

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

AMÉLIORATION DU PROCESSUS DE TRANSPORT DE LA MARCHANDISE DANS UN
PORT EN VRAC PAR LA SIMULATION À ÉVÉNEMENTS DISCRETS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA GESTION

PAR
RIHAB JEBALI

FÉVRIER 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

École de gestion

Amélioration du processus de transport de la marchandise dans un port en vrac par la simulation à événements discrets

Rihab Jebali

Maîtrise en sciences de la gestion (1865), spécialité logistique

Ce mémoire a été supervisé par les personnes suivantes :

Viviane Gascon	Directrice de recherche
Chantal Baril	Codirectrice de recherche

Ce mémoire a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Viviane Gascon	Directrice de recherche
François Meunier	Évaluateur provenant d'un autre département que le ou la directeur·trice de recherche)
Denis Lagacé	Évaluateur externe (provenant d'un autre département que le ou la directeur·trice de recherche)

REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer ma gratitude envers ma directrice de recherche, madame Viviane Gascon pour son savoir-faire, son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long de ce projet. Sa présence, sa rigueur scientifique et ses conseils avisés ont été déterminants pour guider et améliorer ce travail. Sa présence constante, son soutien indéfectible et sa dévotion pour l'éducation ont servi de motivation et d'inspiration considérables. Je lui témoigne toute ma gratitude pour le temps qu'elle a consacré à me guider et pour la confiance qu'elle m'a témoignée pendant l'accomplissement de ce projet.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à ma co-superviseuse, madame Chantal Baril, pour son soutien inestimable et sa supervision attentive. Ses orientations, ses recommandations techniques et scientifiques, de même que ses nombreuses propositions judicieuses. Sa présence constante et son aide ininterrompue ont été d'un soutien précieux durant toute la durée de ce projet.

DÉDICACES

En mémoire de ma tendre mère Fatma, qui réside éternellement dans mon cœur et dont l'amour persiste à m'orienter chaque jour. Ce travail témoigne de sa puissance, de ses principes et de tout ce qu'elle m'a transmis.

À mon père, pour son appui indéfectible, ses encouragements permanents et sa foi en moi qui m'ont insufflé la détermination de persévérer jusqu'à la fin.

À mon amie proche Islem, pour son attention, sa compassion et son amitié authentique qui m'ont grandement soutenue tout au long de ce cheminement.

RÉSUMÉ

Le port de Trois-Rivières est un port sans conteneurs qui revêt une grande importance pour l'économie du Québec. Il fusionne le transport ferroviaire, routier et maritime pour des échanges commerciaux nationaux et internationaux et est actif depuis 1882. Ce mémoire s'intéresse au trafic routier de la marchandise en vrac solide dans le port de Trois-Rivières, particulièrement au transport du minerai reçu par navires, vers les lieux d'entreposage. L'objectif principal de cette recherche est de libérer plus rapidement les quais afin de permettre aux navires transportant du minerai en vrac de diminuer leur temps de séjour au port. Le port pourrait ainsi augmenter sa capacité à recevoir un nombre plus élevé de navires et, par conséquent, sa compétitivité dans le domaine du transport maritime.

Pour atteindre cet objectif, un modèle de simulation à événements discrets a été développé à l'aide du logiciel Simio afin de représenter le processus actuel de déchargement d'un navire, du chargement des camions à l'aide d'une chargeuse et du transport de la marchandise du quai vers un hangar.

Trois scénarios ont été testés pour augmenter le rythme de transfert de la marchandise du quai vers le hangar en modifiant les horaires de chargement des camions, et ajoutant des équipements de chargement des camions. Dans un quatrième scénario, le processus de déchargement a été modifié au complet.

Les résultats ont permis de déterminer des façons d'organiser les opérations afin de réduire le temps de séjour du navire en libérant les quais de la marchandise plus rapidement.

Cette étude offre aussi de nouvelles perspectives sur les ports en vrac, un secteur encore peu exploré comparativement aux ports à conteneurs.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	iii
DÉDICACES	iv
RÉSUMÉ	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1. Mise en contexte	1
1.2. Problématique	3
1.3. Questions de recherche	4
1.4. Objectifs de la recherche.....	5
Chapitre 2 - Revue de littérature	6
2.1. Affectation des navires aux quais	6
2.2. Activités de déchargement des navires.....	8
2.3. Trafic routier dans les ports avec et sans conteneurs	10
2.3.1. Facteurs et effets de la congestion routière.....	10
2.3.2. Systèmes de rendez-vous	11
2.3.3. Impact environnemental de la congestion routière	12
2.4. Résumé.....	13

2.4.1.	Indicateurs de performance.....	13
2.4.2.	Approche méthodologique.....	16
2.4.3.	Conclusion	18
Chapitre 3 - Méthodologie		19
3.1.	Étude de cas	19
3.2.	Cartographie.....	20
3.3.	Collecte de données	23
3.3.1.	Opérations des grues	25
3.3.2.	Opérations des camions	29
3.4.	Description du modèle de simulation	30
3.4.1.	Déchargement du navire	30
3.4.2.	Chargements des camions.....	33
3.5.	Validation du modèle de simulation	37
Chapitre 4 - Scénarios et résultats.....		40
4.1.	Scénario 1 : Modification des horaires de chargement des camions	41
4.2.	Scénarios 2 et 3 : ajout d'équipements et modification des horaires de chargement des camions	43
4.2.1.	Scénario 2 : Chargement simultané des camions (un camion/pile) avec deux chargeuses	43
4.2.2.	Scénario 3 : Chargement simultané des camions (deux camions/pile) avec deux chargeuses.....	45

4.3.	Scénario 4 : Dépôt de la marchandise par les grues directement dans les camions	48
4.4.	Constats.....	53
4.4.1.	Avantages et inconvénients des scénarios	53
4.4.2.	Impact de l'augmentation du tonnage déchargé sur le nombre de navires	56
Chapitre 5 - Conclusion		59
5.1.	Contribution de la recherche.....	59
5.2.	Limitation de la recherche	60
5.3.	Avenues futures de la recherche	61
5.4.	Conclusion	62
BIBLIOGRAPHIE		63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Indicateurs de performance reliés aux activités de déchargement des navires dans les ports en vrac et avec conteneurs.....	14
Tableau 2 : Indicateurs de performance – trafic routier.....	15
Tableau 3 : Méthodologies utilisées pour les activités de déchargement des navires et le trafic routier dans les ports avec et sans conteneurs.	17
Tableau 4 : Temps de chargement et déchargement des grues	26
Tableau 5 : Temps de chargement des camions.....	30
Tableau 6 : Paramètres pour le déchargement du navire - modèle de base	33
Tableau 7 : Horaire de chargement des camions aux piles 1 et 2 – modèle de base.....	36
Tableau 8 : Paramètres pour les opérations des camions - modèle de base.....	37
Tableau 9 : Indicateurs de performance	38
Tableau 10 : Validation du déchargement du navire	38
Tableau 11 : Validation du chargement des camions sur le quai.....	39
Tableau 12 : Horaire de chargement des camions - scénario 1.....	41
Tableau 13 : Nombre de chargements de camions - modèle de base et scénario 1	42
Tableau 14 : Tonnage déchargé dans le hangar - modèle de base et scénario 1	42
Tableau 15 : Temps d’attente moyen au hangar et aux piles– modèle de base et scénario 1	43
Tableau 16 : Horaire de chargement des camions - scénarios 2 et 3	44
Tableau 17 : Nombre de chargements de camions - modèle de base, scénarios 2 et 3....	46

Tableau 18 : Tonnage déchargé dans le hangar - modèle de base, scénarios 2 et 3	46
Tableau 19 : Temps moyen d'attente au hangar et avant le chargement des camions - modèle de base, scénarios 2 et 3	47
Tableau 20 : Horaire des grues - scénario 4.....	50
Tableau 21 : Nombre de chargements de camions et tonnage déchargé - Modèle de base et scénario 4.....	51
Tableau 22 : Temps d'attente moyen avant le chargement des camions - scénario 4	52
Tableau 23 : Temps moyen d'attente des camions au hangar – scénario 4	52
Tableau 24 : Avantages et inconvénients – Scénarios 1, 2, 3 et 4	54
Tableau 25 : Nombre de navires et tonnage déchargé	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie du processus de transport du concentré de minerai	22
Figure 2 : Image générée par l'IA du déchargement du navire.....	24
Figure 3 : Temps de chargement des grues (minutes)	27
Figure 4 : Temps de déchargement des grues (minutes).....	28
Figure 5 : Nombre de chargements de camions - pile 1 et pile 2.....	29
Figure 6 : Modèle de simulation de base (déchargement du navire)	31
Figure 7 : Modèle de simulation de base (chargement des camions)	34
Figure 8 : Chargement des camions du scénario 4 (généré par l'intelligence artificielle)	49

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1. MISE EN CONTEXTE

« Celui qui commande la mer commande le commerce ; celui qui commande le commerce commande la richesse du monde, et par conséquent le monde lui-même. » (Raleigh, Sir Walter, 1650)

Le transport maritime permet d'acheminer une vaste quantité de produits à travers le monde à un coût relativement faible par rapport aux autres moyens de transport. Selon le rapport du Comité sectoriel de main-d'œuvre sur le diagnostic sectoriel de l'industrie maritime, le transport maritime occupe 80 % des échanges commerciaux dans le monde (Groupe DDM, 2023). Le volume de marchandise du transport maritime mondial a augmenté de 2,4 % de 2022 à 2023, avec 12 292 millions de tonnes de marchandise (UNCTAD, 2024).

Au Canada, 90 % des échanges commerciaux internationaux en 2023 (Transports Canada, 2023), et 98 % des activités commerciales intérieures du pays en 2020 étaient faits par voie maritime (Transports Canada, 2020).

La province de Québec constitue un maillon très important du transport maritime canadien. Le chiffre d'affaires total de l'industrie maritime au Québec était estimé à 3,1 milliards de dollars en 2023 comprenant 27 000 emplois directs et indirects. Le Québec comporte 20 ports commerciaux stratégiques. 75 % de tous les échanges commerciaux québécois internationaux sont effectués par voie maritime (Gouvernement du Québec, 2025). Le transport maritime au Québec passe principalement par le fleuve Saint-Laurent, qui s'étend sur 3700 kilomètres et est le plus court chemin vers les Grands Lacs et la porte principale vers le continent nord-américain.

Le gouvernement du Québec a lancé un projet sous le nom Avantage Saint-Laurent en juin 2020, qui s'étale jusqu'à 2025. Ce projet a pour but de développer économiquement

l'industrie maritime du Québec. Un budget total de 926,9 millions de dollars a été accordé pour atteindre les objectifs du projet. 300 millions de dollars de ce projet ont été consacrés à la modernisation des infrastructures portuaires. Plusieurs ports sont visés dans ce projet, parmi lesquels les ports de Québec, Montréal, Matane et Trois-Rivières (Gouvernement du Québec, 2021).

Le port de Trois-Rivières, un port maritime stratégique situé entre Québec et Montréal, revêt une grande importance pour l'économie du Québec. Il fusionne le transport ferroviaire, routier et maritime pour des échanges commerciaux nationaux et internationaux et est actif depuis 1882. Chaque année, il reçoit en moyenne 250 navires, 60 000 camions, 11 000 wagons, créant 2 000 emplois directs et indirects et manutentionnant 4,2 millions de tonnes métriques de marchandise telles que l'aluminium, les produits de la foresterie, les minerais, les grains et l'agroalimentaire (Administration Portuaire de Trois-Rivières, 2025). Le port de Trois-Rivières est un port sans conteneurs qui génère une activité économique annuelle de plus de 220 millions de dollars. Il reçoit des produits en vrac et de la marchandise générale et comprend trois terminaux : terminal des élévateurs, terminal de marchandise générale et terminal du vrac solide et liquide. Pour renforcer sa compétitivité, ce dernier a lancé un projet de construction d'un nouveau terminal (terminal 21) (Le Nouvelliste, 2023). Ce projet va permettre d'augmenter la capacité du port d'environ 1,5 millions de tonnes de cargaison. Il va également engendrer encore plus de trafic routier, ferroviaire et maritime, trafic qui est déjà élevé.

Le trafic routier est important dans le port de Trois-Rivières. Les camions, qui y circulent, assurent le transport de la marchandise reçue par navires vers les lieux d'entreposage dans le port, vers l'extérieur du port et de l'extérieur du port vers les lieux d'entreposage dans le port. Ce mémoire s'intéresse au trafic routier de la marchandise en vrac solide dans le port de Trois-Rivières, particulièrement au transport du minerai reçu par navires, vers les lieux d'entreposage.

1.2. PROBLÉMATIQUE

Les activités de chargement, de déchargement et de transport dans les ports manutentionnant de la marchandise en vrac (sans conteneurs) sont plus variées et complexes à planifier que dans les ports avec conteneurs (Feng *et al.*, 2024). En raison de la variété des produits, en vrac solides (minerais, charbon) et liquides (produits pétroliers, chimiques, huile), les activités de chargement et déchargement nécessitent des équipements spécifiques (grues, chargeuse, convoyeur, pompes), une procédure pour les manipuler et un emplacement de stockage adaptés. Les conteneurs ont des formes standardisées qui permettent aussi de standardiser les procédures de manutention, en général, ce qui facilite les processus de (dé)chargement dans les ports avec conteneurs

Les activités de manutention et de transport de la marchandise en vrac présentent plus de risques de pollution et de perte de marchandise que la marchandise en conteneurs (Birkett, 2022). En effet, la marchandise en vrac n'est pas protégée, contrairement à celle dans les conteneurs, et est exposée directement à l'environnement. Les vents peuvent même entraîner des interruptions de leur manipulation. De plus, la manipulation de la marchandise en vrac génère de la poussière (Nylen et Sheehan, 2021), ce qui peut causer une perte de marchandise allant jusqu'à 0,05 % du volume total par jour. De plus, la poussière peut s'accumuler au fil du temps dans les équipements de manutention, ce qui peut causer des problèmes mécaniques et augmenter les coûts d'entretien. Ceci rend la procédure de manutention sensible pour la santé des opérateurs responsables du déchargement du navire, pour la population environnante et pour l'environnement. En effet, plus la matière en vrac reste longtemps exposée à l'air, plus cela génère de la poussière qui nuit à la santé (Hwang et Kim, 2020).

Dans le port de Trois-Rivières, la marchandise en vrac occupe une place importante avec 3,5 millions de tonnes métriques qui y ont transitées en 2025 (Administration Portuaire de Trois-Rivières, 2025). Le processus de déchargement d'un navire transportant ce type de marchandise comprend quelques étapes qui varient selon le type de marchandise en vrac. Par exemple, le déchargement d'un navire transportant du minerai se fait à l'aide de grues. Une fois le déchargement du navire sur le quai débuté, des chargeuses déposent le minerai dans des camions. Ces derniers se dirigent ensuite vers un hangar pour y décharger le minerai où

il est entreposé. Ce cycle se répète jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de minerai sur le quai, ou que la journée de travail soit terminée.

Parallèlement, des camions provenant de l'extérieur du port viennent chercher la marchandise dans les hangars pour la livrer à leurs clients. Ils passent par la balance à leur arrivée et à leur départ.

Tous ces camions génèrent un trafic routier qui peut provoquer de la congestion routière. La congestion routière dans les ports provoque non seulement des retards et des coûts supplémentaires, mais augmentent les problèmes environnementaux : un camion en attente génère davantage d'émissions de gaz à effet de serre.

Les minéraux et les métaux, dont fait partie le concentré de minerai étudié dans ce mémoire, représentaient une valeur économique de 72 milliards de dollars en 2023 au Canada (Ressources naturelles Canada, 2025).

Tout port souhaite libérer ses quais le plus rapidement possible afin d'accueillir davantage de navires. Dans le cas des navires avec concentré de minerai arrivant au Port de Trois-Rivières, cela implique de les décharger plus rapidement et, éventuellement, de reconsidérer les équipements utilisés. Les concentrés de minerai en vrac reçus au Port de Trois-Rivières sont le cuivre, le zinc et le nickel. En libérant rapidement les quais de la marchandise qui y a été déchargée, on permet au navire suivant de débiter son déchargement plus rapidement. Pour y arriver, on cherche à augmenter le taux de rotation des camions qui est le nombre de fois qu'un camion accomplit un cycle complet (arrivée, chargement, déchargement, sortie). Un taux de rotation des camions élevé permet de traiter un volume de marchandise plus important et de libérer plus rapidement le quai.

La problématique traitée dans ce mémoire vise à transférer plus rapidement le concentré de minerai du quai vers le hangar, donc à libérer le quai plus rapidement.

1.3. QUESTIONS DE RECHERCHE

À partir de la problématique étudiée, les questions de recherche sont les suivantes :

- Quelles sont les activités liées au déchargement des navires et au chargement des camions sur le quai ?
- Comment les ressources et les équipements permettent d'améliorer le rythme de chargement des camions et diminuer le temps à quai ?
- Quels sont les facteurs qui contribuent à réduire le temps à quai ?
- Comment augmenter le rythme de transfert de minerai vers les hangars ?
- Quels indicateurs de performance permettent de mesurer la productivité du processus de chargement des camions ?

1.4. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'objectif principal de cette étude est de développer un processus de chargement des camions afin d'augmenter le rythme de transfert des concentrés de minerai vers les hangars pour libérer le quai plus rapidement. Pour ce faire, il est donc nécessaire de répondre à des objectifs secondaires :

- Mesurer l'effet d'ajouter des équipements pour le chargement du minerai.
- Mesurer l'effet de modifier le processus d'affectation des camions aux piles de minerai (alternatif versus simultanée).
- Mesurer l'effet de charger le minerai directement dans les camions, sans chargeuse.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE

Les activités portuaires et maritimes représentent un élément central pour le transport de marchandise.

Une revue de la littérature a été effectuée afin de tracer un portrait des connaissances actuelles sur les activités de chargement et de déchargement dans un port sans conteneur. La littérature traitant des problématiques dans les ports avec conteneurs est beaucoup plus abondante que celle portant sur les ports manutentionnant de la marchandise en vrac. Ces articles ont été conservés car ils peuvent contribuer à identifier des indicateurs des performance et des méthodologies pertinentes pour les ports sans conteneurs.

Les études scientifiques portent principalement sur l'affectation des navires aux quais, les activités de déchargement des navires, le trafic routier dans les ports avec et sans conteneurs, les systèmes de prise rendez-vous, la congestion routière et son impact sur l'environnement. Ces sujets sont pertinents et en lien avec la problématique étudié dans ce mémoire.

2.1. AFFECTATION DES NAVIRES AUX QUAIS

L'affectation des navires aux quais représente un processus très important qui peut avoir son lot de problèmes. Une mauvaise gestion de l'affectation des navires peut générer des problèmes de congestion et de l'attente à l'accostage, l'amarrage, au chargement et au déchargement.

Bouzekri *et al.* (2023) se sont intéressés au LAYCAN qui est la fenêtre de temps fixée par l'armateur et le port durant laquelle un navire peut arriver au terminal. Le non-respect de cette fenêtre de temps peut causer des pénalités et le refus au navire d'accoster. Ils proposent un modèle de programmation linéaire, dans un port sans conteneur, qui prend en considération la disponibilité des quais selon les caractéristiques du navire, les ressources pour le déchargement des navires (convoyeur, grues, etc.) et les jours de travail au port, pour

déterminer les fenêtres de temps d'arrivée des navires dans un port du Maroc. Leurs résultats indiquent que tous les navires ont pu s'amarrer aux quais disponibles en respectant les fenêtres de temps.

Wang *et al.* (2025)^(a) ont utilisé la simulation à événements discrets pour modéliser le processus d'arrivée, de déchargement et de départ des navires de très grande taille qui transportent du minerai en vrac, du pétrole brut et du gaz naturel liquéfié dans un port sans conteneur de Chine. Les auteurs ont déterminé les raisons de l'attente des navires avant l'accostage et testé plusieurs mesures afin de diminuer le temps d'attente. Ces mesures incluent des règles de priorité qui consistent à faire amarrer en premier les navires qui transportent de la marchandise urgente, la création d'une zone d'attente des navires, la diminution de la distance entre les navires dans le canal (voie maritime permettant de relier deux plans d'eau) et l'augmentation du nombre de fenêtres d'accostage. En appliquant toutes ces mesures, les résultats de la simulation soulignent une diminution du temps d'attente des navires de 15,9 % à 25,6 %.

Zhang *et al.* (2022) affirme que le non-coordination entre les activités liées au chargement des navires dans un port sans conteneur et le trafic maritime peut causer des retards et des coûts supplémentaires. Les auteurs ont développé un modèle mathématique multi-objectif qui détermine l'ordonnancement des navires en attente dans le canal, leur affectation aux postes d'amarrage pour réduire la congestion du trafic maritime et l'affectation des équipements de chargement aux navires pour réduire le temps d'attente total.

Pratap *et al.* (2018) ont analysé l'impact de la capacité des aires de stockage sur le temps d'attente pour le déchargement des navires dans un port sans conteneurs en Inde. Ils ont simulé l'accostage des navires à l'aide du logiciel Matlab. L'accostage des navires, selon la règle du premier arrivé, premier servi, a généré des temps d'attente plus longs et de la congestion dans les aires de stockage. La coordination de l'arrivée et du déchargement des navires et du transport vers les aires de stockage contribue à une diminution du temps d'attente des navires et à une rotation plus rapide de la marchandise dans les zones de stockage.

Mar-Ortiz *et al.* (2018) ont travaillé sur une revue de littérature afin d'identifier les caractéristiques que devrait avoir un système d'aide à la décision pour résoudre des problèmes complexes des ports (sans et avec conteneurs). Ces problèmes incluent la planification de l'arrivée des navires, l'affectation des quais et des équipements de déchargement/chargement aux navires, la gestion du trafic routier dans les ports, etc. Un système efficace d'aide à la décision doit être collaboratif, capable de traiter des quantités énormes de données et de gérer les opérations portuaires en temps réel.

Wang *et al.* (2025)^(b) considèrent qu'il y a trois types de congestion dans les ports avec et sans conteneurs. Le premier type est la congestion des navires avant l'entrée dans le port pour des raisons d'attente d'autorisation. Le deuxième type est la congestion au mouillage où les navires jettent leur ancre en attendant qu'un quai se libère pour pouvoir accoster. Le troisième type est l'attente au quai en raison de la non-disponibilité des équipements et d'un processus de chargement ou de déchargement prolongé.

2.2. ACTIVITÉS DE DÉCHARGEMENT DES NAVIRES

Une mauvaise affectation des équipements aux navires peut générer de l'attente et des retards pour le prochain navire et pour les clients. Cimpeanu *et al.* (2017) ont testé les bénéfices de l'ajout d'une deuxième grue et de la gestion des horaires des navires entrant et sortant d'un port sans conteneurs et transportant de la bauxite en Irlande à l'aide de la simulation à événements discrets. Les résultats montrent que l'ajout d'une deuxième grue permet de réduire les coûts de fonctionnement portuaire de 18 %, le temps à quai d'environ 18 % et le temps d'attente des navires pour pouvoir accoster de 74 %. L'augmentation de la capacité des convoyeurs permet de réduire les coûts de fonctionnement du terminal de 2 à 3 %.

Dans leur étude, Bugaric *et al.* (2012) explorent trois scénarios dans un modèle de simulation à événements discrets afin d'évaluer l'efficacité des activités de déchargement des navires transportant du minerai de fer, du calcaire et du charbon dans un port sans conteneurs. Le premier scénario consiste à utiliser deux grues indépendamment et sans coordination entre elles pour décharger un navire. Le deuxième scénario nécessite que les

deux grues travaillent simultanément pour décharger un navire. Le troisième scénario met en œuvre trois grues pouvant fonctionner de manière indépendante. Les résultats de la simulation montrent qu'une stratégie où les grues travaillent simultanément, permet de diminuer le temps de déchargement des navires d'environ 9,31 heures quand le trafic des navires est deux fois plus élevé que la normale, que lorsque les grues fonctionnent de manière indépendante.

Perez et Jin (2020) ont travaillé sur un modèle d'optimisation pour l'affectation des navires aux quais et des équipements de déchargement (grues) aux navires des ports sans conteneurs de Singapour et de Guangzhou. Les résultats ont montré que l'attribution des grues en fonction du type de cargaison à décharger au lieu d'attribuer les grues aléatoirement aux navires, ainsi qu'une augmentation du nombre d'équipements de déchargement, permettent de réduire le temps d'attente des navires et de traiter un volume accru de cargaisons durant une période donnée.

La performance des activités de déchargement des navires et de chargement des camions peut être mesurée de diverses façons et plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'améliorer. Yousefi (2021) a utilisé la régression linéaire pour identifier les facteurs qui ralentissent les activités de chargement et de déchargement de la marchandise sèche dans le port sans conteneurs Imam Khomeini en Iran. L'analyse a mis en évidence les problèmes mécaniques du navire, les retards dans le tri et la répartition de la marchandise vers les prochains lieux de stockage, le manque d'espace de stockage et les bris des équipements de déchargement.

Al Fathin *et al.* (2022) ont identifié les facteurs qui contribuent au ralentissement des activités de déchargement des navires sans conteneurs dans un port en Indonésie. L'étude a montré que les navires attendent avant d'accoster à cause de la non-disponibilité des quais, par manque de disponibilité des équipements et des camions, parce que les opérateurs sont occupés à d'autres tâches et pour des raisons administratives.

La pandémie du COVID-19 a causé des problèmes dans la chaîne d'approvisionnement portuaire. Liu *et al.* (2023) ont utilisé un modèle de simulation dynamique pour analyser l'effet de la pandémie sur la congestion dans un port avec conteneurs de Ningbo-Zhoushan

en Chine durant cette pandémie. Dans le scénario qui suggérait un manque de personnel à cause de la COVID, les résultats de la simulation mentionnent des retards et l'attente des navires et l'accumulation des conteneurs sur le quai à cause du manque de personnel qui ne peut procéder au déchargement des navires. Dans le scénario où tout le personnel est présent, l'article met en évidence qu'il n'y a pas de congestion. Les auteurs proposent d'automatiser les ports pour réduire leur dépendance à l'absence de personnel et d'investir dans l'amélioration des infrastructures portuaires.

2.3. TRAFIC ROUTIER DANS LES PORTS AVEC ET SANS CONTENEURS

Le trafic routier dans les ports représente un maillon essentiel et important pour le transport de la marchandise. Un trafic routier intense peut générer de la congestion, ce qui peut provoquer des retards de livraison. Les activités de chargement et de déchargement des navires et des camions et la pesée des camions peuvent influencer la fluidité du trafic routier. Plusieurs recherches ont été menées pour trouver des solutions pour améliorer le trafic routier dans les ports. De nombreuses recherches (Dekker *et al.* (2013), Kiani *et al.* (2010), Abdelgadir et Ahmed (2025)) l'ont été dans les ports avec conteneurs. La littérature sur les ports sans conteneur est moins abondante. Cependant, certaines des solutions pour les ports accueillant des conteneurs peuvent être adaptées aux ports sans conteneur.

2.3.1. Facteurs et effets de la congestion routière

La mauvaise planification du chargement et du déchargement des camions entraîne des retards, des coûts supplémentaires, de la congestion et une mauvaise réputation pour les sociétés de transport routier du port. L'efficacité des opérations de chargement et de déchargement dépend, entre autres, de la stratégie de déchargement et du nombre d'équipements utilisés.

D'après Abdelgadir et Ahmed (2025), les principaux facteurs de la congestion routière dans les ports avec conteneurs sont la lenteur dans la prise de décision pour décharger les conteneurs, le manque et le mauvais état des équipements de manutention et la capacité limitée des espaces de stockage. Les auteurs affirment que ces facteurs ont un impact sur le

rythme de rotation des camions, ce qui peut entraîner de la congestion routière.

Wang *et al.* (2025)^(a) ont affirmé que la non-disponibilité et une mauvaise synchronisation entre les équipements de manutention, tels que les convoyeurs et les empileurs dans les ports sans conteneurs, est un facteur très important de la congestion des navires et la congestion routière.

2.3.2. Systèmes de rendez-vous

Azab et Eltawil (2016) ont démontré qu'un système de prise de rendez-vous avec l'arrivée des camions à un rythme uniforme constant peut diminuer considérablement le temps de séjour des camions et les files d'attente à l'entrée dans un port avec conteneurs.

Neagoe *et al.* (2021) utilisent la simulation à événements discrets pour tester un système de prise de rendez-vous pour l'arrivée des camions transportant des produits dans un port sans conteneurs et l'ajout de balances, afin de réduire la congestion routière et les émissions de CO₂. Ils proposent d'ajouter des convoyeurs pour décharger plus rapidement les camions, d'utiliser des camions de plus grande capacité ou d'installer une troisième rampe de déchargement connectée à un système de convoyeurs. Un système de prise de rendez-vous pour l'arrivée des camions au port et transmettant directement le poids des camions au système informatique du port ont notablement réduit les temps de séjour des camions.

Goudreau (2018) a analysé le trafic routier dans un port sans conteneur au Québec en utilisant la simulation à événements discrets. Elle a testé divers systèmes de prise de rendez-vous. L'instauration d'un système de rendez-vous pour l'arrivée des camions durant une plage horaire de 2 heures combiner à des règles de priorité réduit davantage l'attente des camions dans le port que la simple règle du premier arrivé, premier servi.

Ben Daya et Audy (2024) ont anticipé que les travaux d'installation d'un nouveau quai peuvent être un facteur de congestion au port de Trois-Rivières. Ils ont utilisé le logiciel de simulation Simio pour tester l'effet de l'augmentation du trafic routier sur la disponibilité des infrastructures et l'ajout d'une troisième guérite pour l'entrée des camions vers une zone

spécifique. À partir des résultats de simulation, ils proposent de répartir l'entrée des camions entre les portes existantes et la nouvelle porte pour diminuer le trafic à l'entrée et d'instaurer un système de prise de rendez-vous pour une meilleure gestion de l'arrivée des camions.

2.3.3. Impact environnemental de la congestion routière

Les temps d'attente des camions dans les ports avec conteneurs ont également un impact significatif sur l'environnement par leurs émissions de gaz à effet de serre. Rigot-Muller *et al.* (2013) proposent des méthodes d'optimisation des routes au Royaume-Uni, incluant les itinéraires des navires et des camions afin de réduire les gaz à effet de serre. Leur objectif est de déterminer la combinaison des deux modes de transport qui minimise la distance totale parcourue et, par conséquent, les gaz à effet de serre.

Rotunno *et al.* (2023) proposent une solution pour améliorer le processus d'arrivée des camions dans le port sans conteneur de Bari. Ils ont combiné une analyse coûts-bénéfices à la simulation à événements discrets pour tester une politique d'allocation des camions à la première ressource disponible (navire ou silo) et l'ajout d'un deuxième silo. Les résultats de la simulation indiquent que l'allocation des camions à la première ressource disponible permet d'augmenter de 12% le volume de marchandise manipulée et de diminuer les gaz à effet serre de 28,3%. Dans le scénario où un silo est ajouté, les résultats indiquent une augmentation de 30% du volume de marchandise manipulée et une diminution de 55% des émissions de gaz à effet serre.

Dekker *et al.* (2013) ont utilisé la simulation à événements discrets pour évaluer l'impact d'un terminal d'échange de remorques sur le temps d'attente des camions dans un port avec conteneurs. Ce terminal est un emplacement à côté du port qui permet aux camions d'échanger leurs remorques avec une autre déjà chargée de conteneurs et prête à partir. Ce terminal d'échange fonctionne durant la nuit et les périodes de faible trafic de camions et permet de réduire les files d'attente. Les résultats de la simulation indiquent une diminution significative du temps d'attente moyen des camions dans le port et à la guérite d'entrée et une diminution de 33,4 % des émissions de CO₂.

2.4. RÉSUMÉ

La revue de la littérature a porté sur plusieurs problèmes reliés au transport maritime (affectation des navires au quai, activités de déchargement des navires) et routier (congestion routière dans les ports, systèmes de prise de rendez-vous, impact environnemental) dans les ports avec et sans conteneurs. La revue de littérature sur les activités reliées au transport maritime était importante pour comprendre le déroulement du processus complet à partir de l'arrivée d'un navire et pour identifier les indicateurs pertinents pour cette étude.

2.4.1. Indicateurs de performance

Le tableau 1 présente les indicateurs de performance les plus utilisés dans les articles reliés aux activités de déchargement des navires.

Tableau 1
Indicateurs de performances - Activités de déchargement des navires dans les ports en vrac
et avec conteneurs

Articles	Indicateurs de performance – Activités de déchargement des navires				
	Temps d'attente du navire avant le (dé)chargement	Tonnage déchargé/ période	Temps de (dé)chargement du navire	Taux d'utilisation des équipements	Temps d'attente avant l'accostage
Cimpeanu <i>et al.</i> (2017)	X	X			X
Bugaric <i>et al.</i> (2012)		X			
Bouzekri <i>et al.</i> (2023)	X		X		X
Perez et Jin (2020)		X	X	X	X
Wang <i>et al.</i> (2025)	X				
Yousefi (2021)	X				
Fathin <i>et al.</i> (2022)	X				X
Zhang <i>et al.</i> (2022)	X		X		
Pratap <i>et al.</i> (2018)	X				
Liu <i>et al.</i> (2023)	X			X	
Wang <i>et al.</i> (2025) (a)	X				X
Mar-Ortiz <i>et al.</i> (2018)				X	
Total	9	3	3	3	5

Le temps d'attente du navire avant le (dé)chargement est l'indicateur présent dans le plus grand nombre des articles sur les problématiques liées au transport maritime dans les ports avec et sans conteneurs. Cependant, puisque notre étude se concentre sur l'augmentation du rythme de transfert des concentrés de minerai du quai vers les hangars et la libération plus rapide du quai pour recevoir un nouveau navire, nous n'avons pas retenu cet indicateur. Nous avons plutôt retenu comme indicateur le tonnage déchargé par période, puisqu'il est lié aux opérations sur le quai et au déchargement dans le hangar. Le tableau 2 présente les indicateurs de performance reliés au trafic routier dans les ports avec et sans conteneurs.

Tableau 2
Indicateurs de performance – trafic routier

Articles	Indicateurs de performance – trafic routier			
	Tonnage transporté	Temps d'attente des camions	Temps de séjour des camions	Taux d'émissions de CO2
Abdelgadir et Ahmed (2025)		X	X	
Neagoe <i>et al.</i> (2021)		X	X	X
Rotunno <i>et al.</i> (2023)	X			X
Gaudreau (2018)		X	X	
Azab et Eltawil (2016)		X		
Dekker <i>et al.</i> (2013)	X	X		X
Rigot-Muller <i>et al.</i> (2013)	X			X
Ben Daya et Audy (2024)		X		
Su <i>et al.</i> (2025)		X		
Wang <i>et al.</i> (2025) (a)		X		
Total	3	8	3	4

Notre étude se concentre principalement sur la recherche de solutions pour diminuer le temps d'attente des camions avant le chargement et augmenter leur taux de rotation, dans le but de libérer le quai plus rapidement. L'augmentation du tonnage déchargé par les camions augmente le taux de rotation des camions. Le tonnage transporté par les camions nous est donc apparu comme l'indicateur le plus pertinent, bien qu'il ne soit pas le plus fréquemment utilisé dans la littérature.

Plusieurs indicateurs fréquemment utilisés dans la littérature n'ont pas été retenus dans cette étude, parce qu'ils ne sont pas en lien direct avec l'objectif principal de notre travail, qui est d'augmenter le rythme de transfert du minerai vers les lieux d'entreposage et libérer le quai plus rapidement.

2.4.2. Approche méthodologique

La simulation à événements discrets, l'optimisation mathématique et la cartographie ressortent comme étant les approches méthodologiques les plus utilisées dans les articles traitant des activités de déchargement des navires et du trafic routier dans les ports (Tableau 3).

Tableau 3
 Méthodologies utilisées pour les activités de déchargement des navires et le trafic routier
 dans les ports avec et sans conteneurs.

Articles	Méthodologie		
	Simulation à événements discrets	Cartographie	Optimisation
Cîmpeanu <i>et al.</i> (2017)	X		
Bugaric <i>et al.</i> (2012)	X		
Bouzekri <i>et al.</i> (2023)			X
Perez et Jin (2020)	X		X
Wang <i>et al.</i> (2025) (a)	X		
Yousefi (2021)			X
Fathin <i>et al.</i> (2022)		X	
Zhang <i>et al.</i> (2022)	X	X	X
Pratap <i>et al.</i> (2018)			X
Liu <i>et al.</i> (2023)	X		
Abdelgadir et Ahmed (2025)			X
Azab et Eltawil (2016)	X		X
Dekker <i>et al.</i> (2013)	X		X
Rigot-Muller <i>et al.</i> (2013)	X		
Neagoe <i>et al.</i> (2021)		X	X
Rotunno <i>et al.</i> (2023)		X	
Gaudreau (2018)	X		
Mar-Ortiz <i>et al.</i> (2018)		X	
Ben Daya et Audy (2024)	X		
Su <i>et al.</i> (2025)			X
Wang <i>et al.</i> (2025) (b)			X
Total	11	5	11

À partir du tableau 3, nous pouvons constater que la simulation à événements discrets a été retenue comme la méthodologie permettant d'analyser le processus de chargement et de déchargement des navires et de proposer des pistes de solutions. Contrairement à plusieurs auteurs qui ont utilisé l'optimisation, la simulation à événements discrets a été choisie car elle permet de représenter de manière réaliste la complexité et la variabilité opérationnelle du système étudié, ce qui correspond davantage à l'objectif de ce mémoire.

2.4.3. Conclusion

La revue de la littérature a démontré que les ports avec conteneurs sont davantage étudiés et qu'elle est peu abondante sur les ports sans conteneurs. Elle a aussi permis d'identifier des indicateurs de performance qui seront utilisés pour mesurer l'impact des scénarios de simulation sur la performance de certaines activités portuaires. Nos travaux s'ajoutent donc à une littérature limitée sur les ports recevant de la marchandise en vrac.

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille la méthodologie utilisée pour ce projet de recherche. Nous présentons tout d'abord le contexte du cas réel de déchargement d'un navire transportant du minerai en vrac jusqu'à son transport par camion vers son lieu d'entreposage dans le port de Trois-Rivières. Nous décrivons la collecte de données provenant des images de vidéos enregistrées sur le site du port à l'étude. La cartographie du processus et le modèle de simulation développé sont présentés en détail. Finalement, la dernière section porte sur la validation du modèle de simulation.

3.1. ÉTUDE DE CAS

Le port de Trois-Rivières comporte 3 terminaux : terminal des élévateurs à grains, terminal des marchandises générales, deux balances et terminal de la marchandise en vrac solide et liquide. Dans cette étude, nous nous concentrons sur le terminal de la marchandise en vrac solide et liquide, qui a une superficie totale de 90 000 m². Ce terminal comporte 4 quais, 8 hangars pour le vrac solide (superficie de 28 000 m²), des réservoirs pour le vrac liquide (capacité de 250 000 m³), un réseau de pipelines et un accès ferroviaire. Dans cette étude, nous étudions le processus de déchargement d'un navire chargé de minerai en vrac (nickel, zinc ou cuivre) et le processus de transport de la marchandise par camion vers le lieu d'entreposage.

Chaque navire arrivant au port se voit attribuer un quai où il doit accoster, selon le produit transporté. Une fois le navire amarré à l'un des quais, le déchargement peut démarrer quand tous les documents administratifs et les autorisations sont obtenus. Pour les navires transportant de la marchandise en vrac, dont les minerais, le déchargement se fait à l'aide de grues mobiles installées dans les cales du navire. La grue pivote sur elle-même de façon à ce que son extrémité (le godet) se déplace pour charger la marchandise dans le navire et pour la décharger directement sur le quai. Ce processus se répète tout au long d'une journée de travail

ou jusqu'à ce que le navire soit complètement déchargé, ce qui peut prendre plusieurs jours. Plus d'une grue peut procéder simultanément au déchargement du navire.

Le minerai déchargé sur le quai, objet de cette étude, doit être transporté dans un lieu de stockage le plus rapidement possible afin de libérer le quai pour accueillir d'autres navires. Le transport par camions débute lorsqu'une certaine quantité est déchargée sur le quai, ce qui forme une pile. Les camions se dirigent vers le quai et attendent leur tour pour charger cette marchandise déposée sur le quai. Chaque camion est chargé à l'aide d'une chargeuse (loader). Actuellement, une seule chargeuse assure le chargement des camions. Puisque deux grues déchargent le navire simultanément, la chargeuse se déplace de la pile 1 à la pile 2, en alternance, pour charger les camions. Le chargement complet d'un camion peut nécessiter plusieurs « pelletées » de la chargeuse. Une fois complètement chargé, le camion quitte le quai et se dirige directement vers un hangar dans le port pour y décharger la marchandise. Les camions n'ont pas besoin de passer par la balance lorsqu'ils vont du quai au hangar. Ce processus se répète tout au long d'une journée de travail ou jusqu'à ce que le navire soit déchargé complètement et la marchandise entièrement transportée vers le hangar.

Le minerai stocké dans les hangars sera transporté à l'extérieur du port par d'autres camions. Ces camions, qui s'ajoutent au trafic routier dans le port, doivent être pesés vides à la balance à leur arrivée. Ensuite, ils se dirigent vers le hangar pour charger la marchandise et repassent par la balance pour être pesés pleins. Finalement, ils quittent le port pour livrer la marchandise vers leur destination. Cette partie du trafic routier ne sera pas traitée dans cette étude.

3.2. CARTOGRAPHIE

La cartographie est utilisée pour décortiquer le processus de l'arrivée du minerai par navire jusqu'à son transport à l'extérieur du port (Figure 1) et pour comprendre l'ordre des étapes. Elle sert de base pour construire le modèle de simulation. La cartographie du processus relié au minerai en vrac comprend cinq ressources :

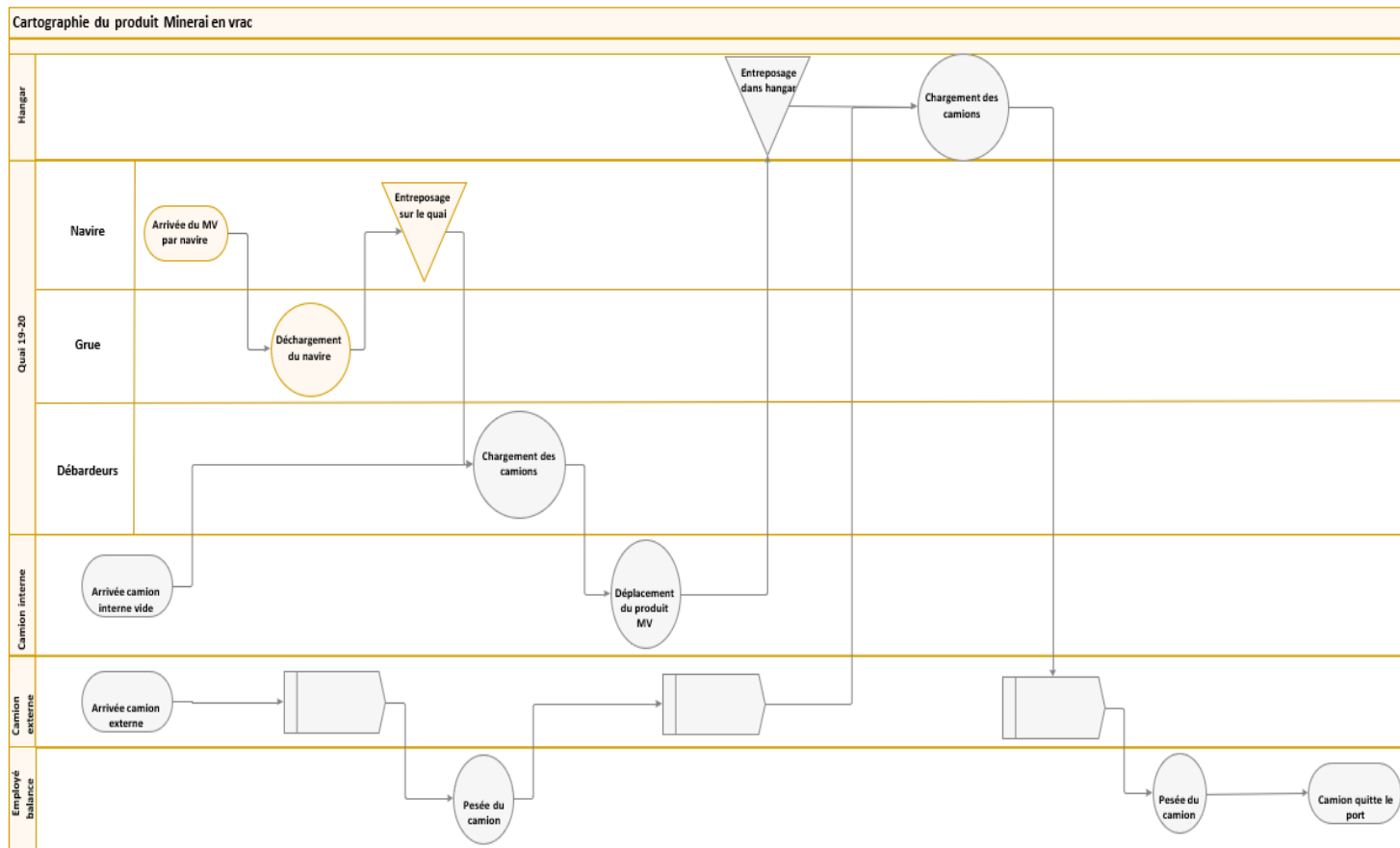
- 1) Hangar : lieu d'entreposage du minerai en vrac dans le port
- 2) Quai 19-20 : lieu d'entreposage temporaire du minerai en vrac après le déchargement du navire et avant son chargement dans les camions internes. Pour cette ressource, le navire représente en fait le lieu d'arrivée et d'entreposage du minerai sur le quai. Les grues assurent le déchargement du navire sur le quai. Les débardeurs opèrent les chargeuses pour le chargement des camions.
- 3) Camions internes : les camions internes assurent le transport du minerai en vrac du quai vers le hangar.
- 4) Camions externes : les camions externes assurent le transport du minerai en vrac du hangar vers sa destination à l'extérieur du port.
- 5) Balance 1-2 : lieux de pesée des camions externes avant et après le chargement du minerai en vrac.

Les étapes de la cartographie illustrées à la figure 1 se résument ainsi :

- Arrivée du minerai par le navire
- Déchargement du navire par les grues
- Entreposage temporaire du minerai sur le quai
- Chargement du minerai dans les camions internes
- Déchargement du minerai dans le hangar
- Chargement du minerai dans les camions externes (qui sont pesés à l'arrivée et à la sortie du port)
- Transport du minerai à l'extérieur du port par les camions externes

La cartographie a été réalisée à l'aide du logiciel VISIO.

Figure 1
Cartographie du concentré de minerai



3.3. COLLECTE DE DONNÉES

Pour bien modéliser le processus de chargement des camions et du déchargement du minerai dans le hangar dans le port de Trois-Rivières, nous avons collecté des données réelles sur le temps de chargement des camions sur le quai et de déchargement des camions dans le hangar. Nous avons également collecté des données réelles sur le temps de déchargement du navire par les grues puisque cela a un impact sur le rythme d'accumulation de la marchandise sur le quai. La source de collecte de données est des vidéos enregistrées de certaines activités du port. Ces vidéos ont permis de visualiser les mouvements des camions, des débardeurs, des grues et des chargeuses. Ces vidéos ont été enregistrées de 8 h à 17 h sans interruption le 18 décembre 2023.

Les images à partir des vidéos enregistrées étant de mauvaise qualité, nous avons généré la figure 2 par l'outil d'intelligence artificielle (Chat GPT) afin d'illustrer le processus étudié dans ce mémoire.

Figure 2
Déchargement du navire (image générée par l'IA)



Les éléments présents sur la figure 2 sont :

- Grues 1 et 2 : elles opèrent en déplaçant leur godet de chacune des deux cales vers le quai et inversement.
- Chargeuse : ce véhicule assure le chargement du minerai de chaque pile dans les camions.
- Pile 1 : emplacement où la grue 1 dépose le concentré de minerai sur le quai.
- Pile 2 : emplacement où la grue 2 dépose le concentré de minerai sur le quai.

3.3.1. Opérations des grues

Les opérations de déchargement du navire sont effectuées par des grues installées sur les navires. Dans les vidéos visionnées, les deux grues effectuent simultanément le déchargement du navire pour assurer son équilibre et sa stabilité afin de garantir un processus de déchargement plus sécurisé. Elles déchargent le minerai des cales du navire pour le déposer sur le quai, ce qui forme des piles. Lorsqu'une certaine quantité de minerai est déchargée sur le quai, une chargeuse transfère le minerai sur des camions. Les opérations de déchargement du navire et de chargement des camions peuvent se faire simultanément.

L'opération de déchargement du navire, effectuée par une grue, peut être divisée en trois étapes : la descente de l'extrémité de la grue (godet) dans la cale du navire vers le quai, l'ouverture du godet de la grue pour décharger la marchandise sur le quai et le retour du godet de la grue vers le navire.

Les vidéos ne permettaient pas de voir explicitement de quelle façon se fait le chargement du minerai par les grues dans les cales du navire. Par conséquent, le temps de chargement du minerai par les grues dans le navire est défini par le temps écoulé entre la disparition au temps t de la grue et son apparition au temps $t+1$, sur les images des vidéos.

Le temps de déchargement du minerai par la grue est le temps écoulé entre l'apparition de la grue sur les images de la vidéo au temps t et sa disparition au temps $t+1$. Il inclut le temps de déplacement du godet de la grue vers le quai, l'attente avant qu'il s'ouvre, le temps de déchargement du godet et le temps du retour du godet vers la cale du navire.

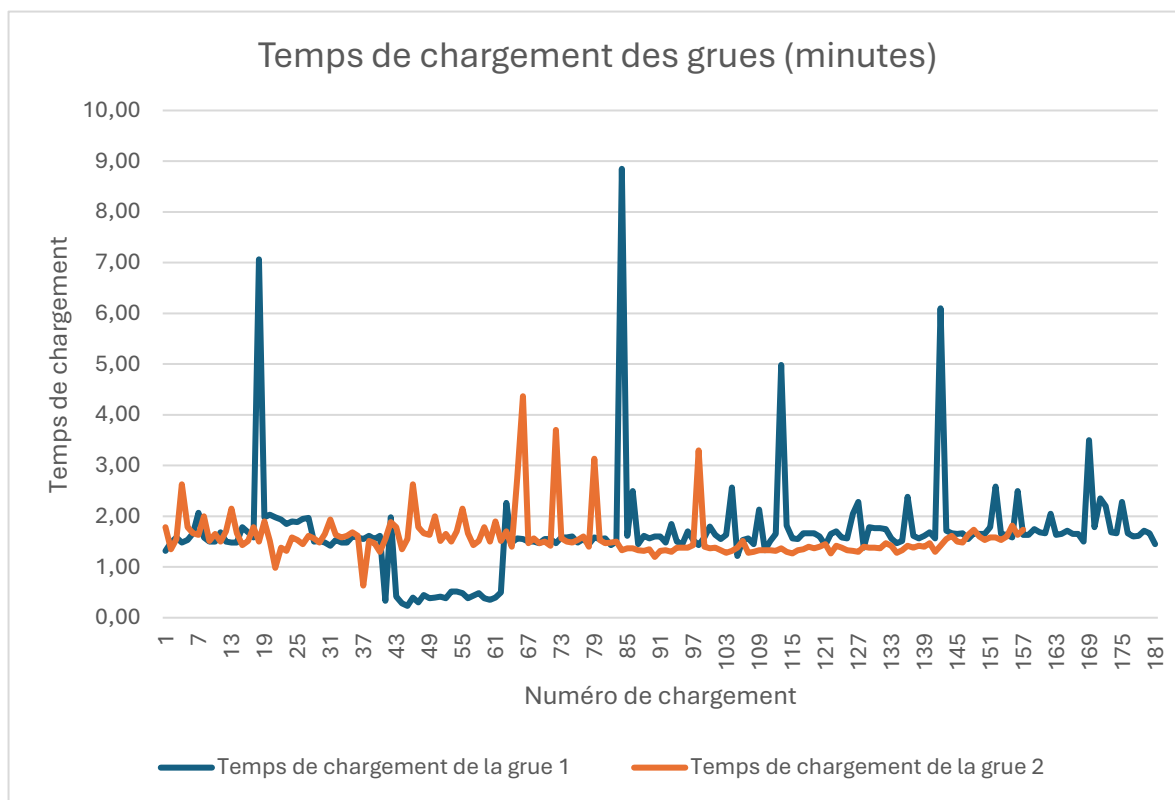
Le tableau 4 présente les temps observés de chargement et de déchargement des grues ainsi que le nombre d'observations pour les deux grues observées.

Tableau 4
Temps de chargement et déchargement des grues

Grue	Nombre observations	Temps (minutes)								
		Total	Chargement				Déchargement			
			Moy.	Min	Max	Écart-type	Moy.	Min	Max	Écart-type
1	181	478	1,65	0,23	8,85	0,94	0,83	0,32	4,03	0,31
2	157	406	1,57	0,63	4,37	0,42	0,98	0,60	6,87	0,53

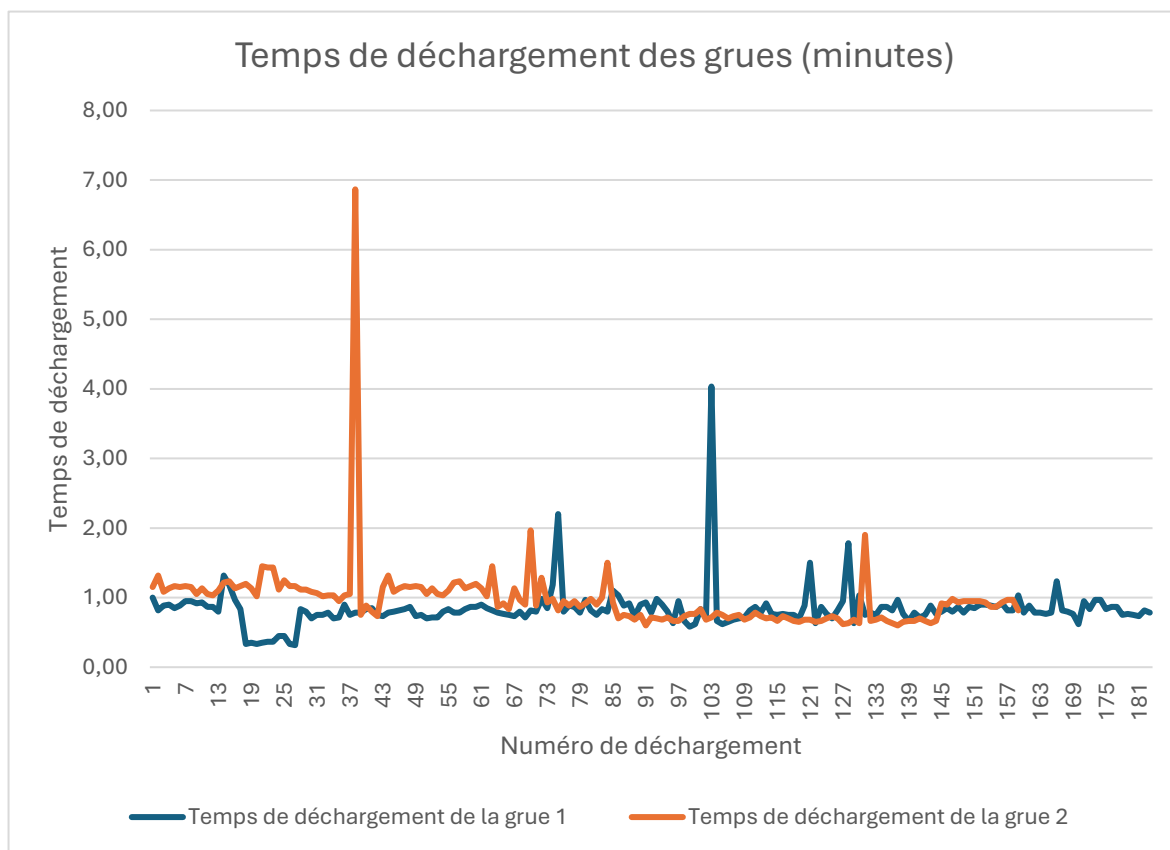
On constate que la grue 1 a été utilisée durant 72 minutes de plus que la grue 2. Cependant, le nombre d'observations par minute d'opération est de 0,378 pour la grue 1 et de 0,386 pour la grue 2, ce qui est assez similaire. La figure 3 présente les temps de chargement des grues.

Figure 3
Temps de chargement des grues (minutes)



Les temps de chargement plus élevés pour chacune des grues sont dus à des périodes d'arrêt de l'opération de chargement, créant ainsi de l'attente pour les grues. La cause de ces arrêts n'a pu être observée dans les vidéos. Cependant, certains arrêts s'expliquent par le fait que la chargeuse charge un camion au moment où la grue aurait dû sortir du navire. Pour des raisons de sécurité, la grue attend dans le navire que la chargeuse ait terminé le chargement du camion. La figure 4 présente les temps de déchargement des grues.

Figure 4
Temps de déchargement des grues (minutes)



Les temps de déchargement plus élevés pour chacune des grues sont dus à des périodes d'arrêt de l'opération de déchargement, créant ainsi de l'attente pour les grues sur le quai. La cause de ces arrêts n'a pu être observée dans les vidéos. Cependant, certains arrêts s'expliquent par le fait que la chargeuse débute le chargement du camion simultanément avec la sortie du godet du navire pour commencer le déchargement. Dans ce cas, la grue est restée immobilisée à côté de la pile, sans s'ouvrir, attendant que la chargeuse ait terminé le chargement du camion. Une fois la chargeuse éloignée de la pile, la grue continue son processus de déchargement et revient vers la cale du navire.

À la fin de la journée, on a remarqué qu'il restait une grande quantité de minerai sur le quai, que ce soit à la pile 1 ou la pile 2, qui n'avait pas été chargée sur les camions. Le

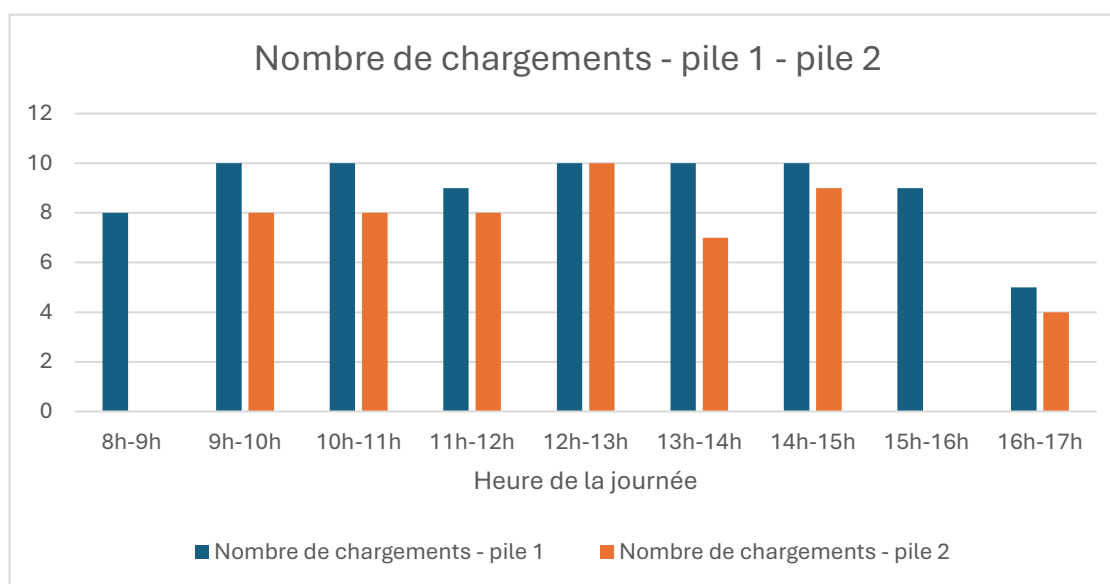
déchargement du navire n'était pas terminé puisqu'il se fait sur plusieurs jours.

3.3.2. Opérations des camions

Les vidéos nous ont permis d'observer que deux grues peuvent décharger le navire sur le quai de façon simultanée, ce qui forme deux piles de minerai (pile 1 et pile 2). Une seule chargeuse est utilisée pour le chargement des camions à l'une ou l'autre des piles. Elle se déplace en alternance d'une pile à l'autre.

La figure 5 présente le nombre de chargements de camions à l'heure à chacune des piles.

Figure 5
Nombre de chargements - pile 1 et pile 2



On remarque qu'il n'y a aucun chargement à la pile 2 de 8h à 9h parce que la grue 2 commence ses opérations seulement à 9h02. Il n'a pas été possible d'identifier les raisons de l'absence de chargement de la grue 2 de 15h à 16h. Sur la plupart des plages horaires, la pile 1 a un nombre plus élevé de chargements par rapport à la pile 2.

Le temps de chargement des camions, temps entre l'arrêt du camion à côté de la pile et son départ une fois chargé, a aussi été mesuré à partir des images qui proviennent des vidéos. Le tableau 5 présente les temps de chargement des camions aux piles 1 et 2. Le nombre total

de 81 chargements à la pile 1 est plus élevé que le nombre total de chargements de 68 à la pile 2.

Tableau 5
Temps de chargement des camions

Pile	Nombre de chargements	Temps de chargement d'un camion (minutes)			
		Min	Max	Moyenne	Écart-type
1	81	0,62	6,38	1,55	0,69
2	68	0,60	2,52	1,50	0,40

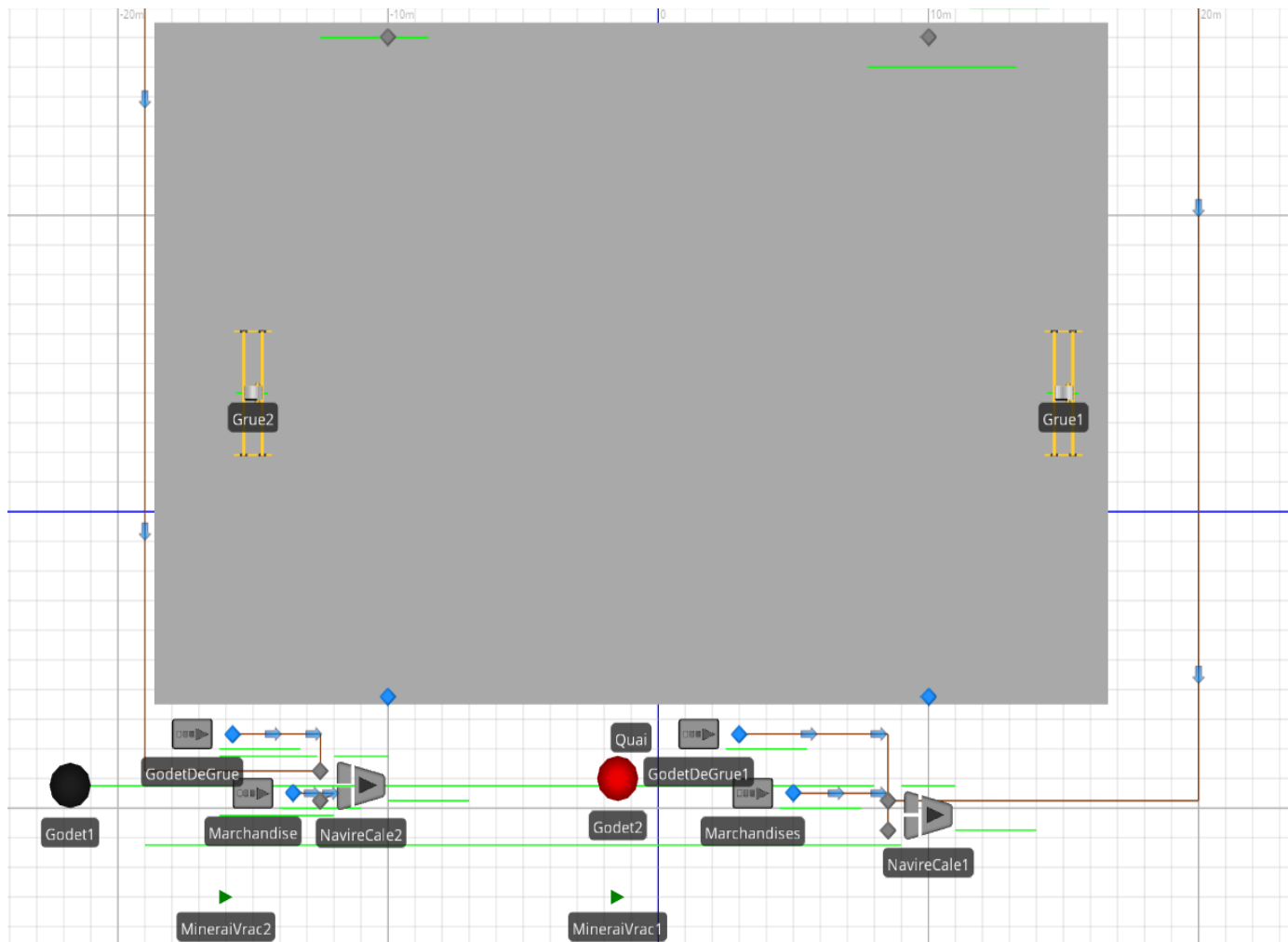
3.4. DESCRIPTION DU MODÈLE DE SIMULATION

Cette section décrit le modèle de simulation de base développé avec le logiciel de simulation SIMIO pour représenter les activités actuelles de déchargement du navire, de stockage temporaire du concentré de minerai sur le quai et de chargement et de déchargement des camions. Ce modèle de simulation reflète la réalité de la journée de travail du 18 décembre 2023 au port de Trois-Rivières.

3.4.1. Déchargement du navire

Le modèle de simulation de base est composé de deux parties. La première partie comprend les activités reliées au processus de déchargement du navire. Il inclut les grues, la marchandise dans le navire (le minerai en vrac), les deux cales et le quai. La figure 6 est une capture d'écran du processus de déchargement du navire du modèle de simulation de base.

Figure 6
Modèle de simulation de base (déchargement du navire)



Le concentré de minerai est représenté dans le modèle de simulation par des entités. Chaque entité a été fixée à 1 tonne. Les deux cales du navire, cale 1 et cale 2, sont considérées comme deux sources. La cale 1 est située à droite du navire et la grue 1 est utilisée pour décharger la marchandise ; la cale 2 est située à gauche du navire et la grue 2 est utilisée pour y décharger la marchandise. Les grues sont représentées par l'objet Crane et le quai est représenté par l'objet Bay de l'extra librairie du logiciel Simio.

L'horaire de travail des deux grues a été obtenu à partir des vidéos. Les distances entre les cales du navire, entre les piles et entre les piles et le hangar ont été mesurées à l'aide de l'application Google Maps.

La capacité des grues a été déterminée à partir des informations obtenues des manutentionnaires du port. Le tableau 6 présente les paramètres utilisés dans le modèle de simulation de base pour les grues du navire.

Toutes les distributions statistiques utilisées dans le modèle de simulation de base, que ce soit pour les grues ou pour les camions, ont été obtenues à partir des temps provenant des vidéos entrées dans l'input Analyze du logiciel de simulation Arena (tableaux 6 et 8).

L'horaire de travail des grues provient des vidéos enregistrées. Le déchargement du navire avec la grue 1 s'est fait de 8h20 à 16h55 et, pour la grue 2, de 9h02 à 16h56. La grue 2 a commencé le déchargement du navire 42 minutes après la grue 1. Une seule pause a été enregistrée pour la grue 1 d'une durée de 38 minutes alors que, pour la grue 2, deux pauses ont été enregistrées : une de 30 minutes et une de 38 minutes.

Les paramètres du tableau 6 sont ceux définis dans la section 3.1.1.

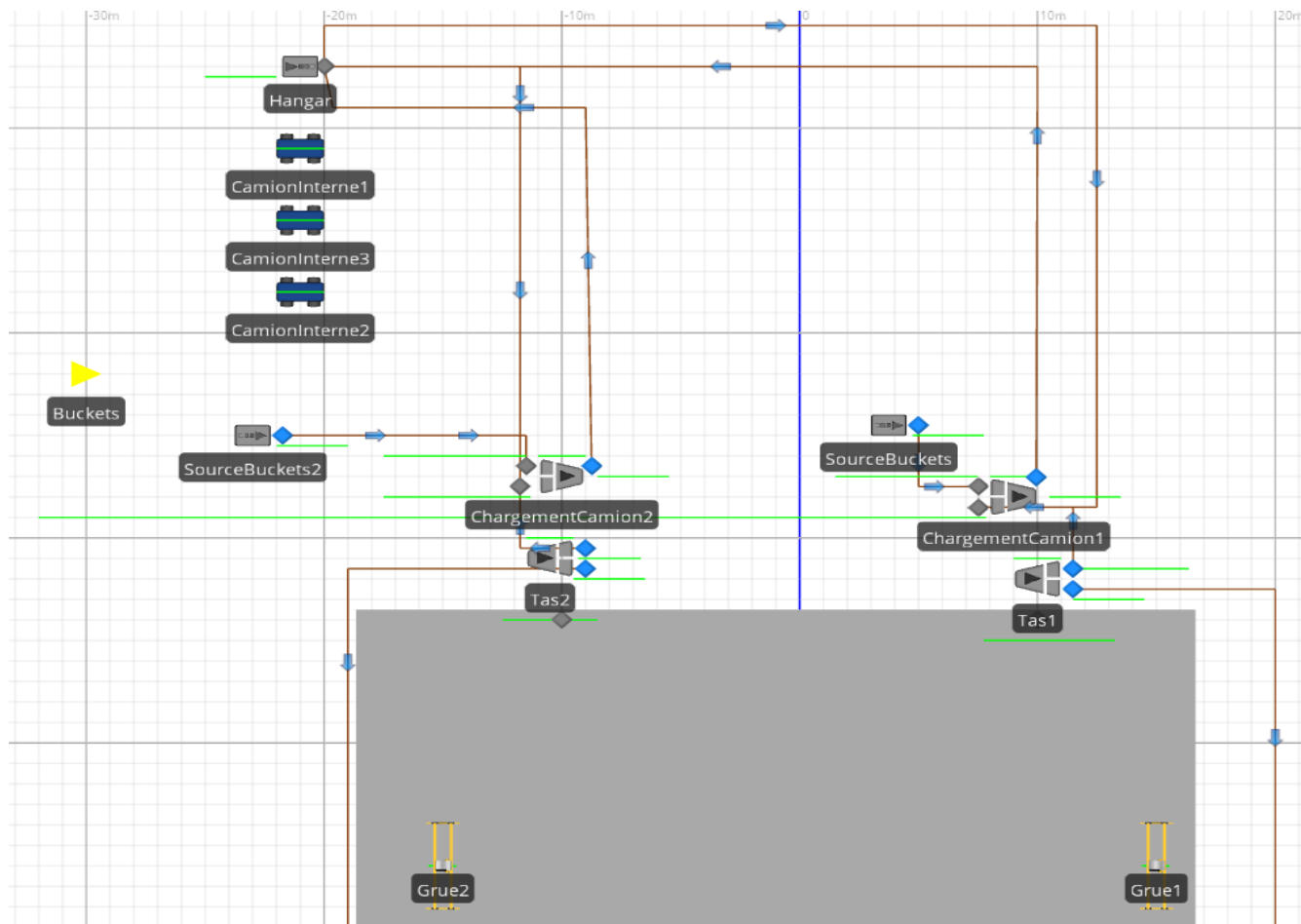
Tableau 6
Paramètres pour le déchargement du navire - modèle de base

Paramètres	Grue 1	Grue 2
Distance entre le navire et la pile	23 mètres	23 mètres
Temps moyen de déchargement	0,83 minutes	0,98 minutes
Temps moyen de chargement	9*Random.Beta (2,98, 11,8) minutes	0,25 + Random.Lognormal (0,25, 0,25) minutes
Capacité des godets des grues	17 tonnes	17 tonnes
Vitesse des grues	0,92 m/s	0,78 m/s
Tonnage moyen déchargé	3200 pour 8,67 heures	2915 pour 7,9 heures
Horaire de travail	8h20 à 16h56 Pause entre 15h44 et 16h22	9h02 à 16h56 Pauses entre 15h40 et 16h18 et entre 13h et 13h30

3.4.2. Chargements des camions

La deuxième partie du modèle de simulation de base décrit le processus de chargement des camions sur le quai à partir des deux piles. Elle comprend les camions, la chargeuse, les piles de concentré de minerai, le quai et le hangar. La figure 7 est une capture d'écran de la partie du processus de chargement des camions du modèle de simulation de base.

Figure 7
Modèle de simulation de base (chargement des camions)



Les camions sont représentés par des véhicules. Le nombre total de camions qui viennent charger la marchandise a été fixé à 3 et la capacité des camions à 20 tonnes, à partir des informations obtenues des manutentionnaires du port. Le chargement des camions se fait en alternance entre les piles 1 et 2, car une seule chargeuse est utilisée pour les deux piles. Les piles sont représentées dans le modèle de simulation de base par deux combineurs qui sont des objets standard dans Simio et qui permettent de fusionner plusieurs entités (le concentré de minerai dans le navire) en une seule entité (le concentré de minerai dans le godet de la grue). Cette modélisation permet de préparer la quantité de marchandise qu'un camion devrait charger pour que, par la suite, l'objet Vehicule effectue le transport des entités combinées vers le hangar. Finalement, le hangar est représenté par un Sink qui est un objet correspondant à la dernière destination d'une entité.

L'horaire de chargement des camions a été réalisé à partir des données collectées des vidéos enregistrés. Le tableau 7 présente l'horaire de chargement des camions aux piles 1 et 2.

Tableau 7
 Horaire de chargement des camions aux piles 1 et 2 – modèle de base

Horaire de chargement des camions			
Pile 1		Pile 2	
De	À	De	À
08:39	09:22	09:23	09:50
09:51	10:14	10:21	10:30
10:36	10:47	10:47	11:06
11:07	11:15	11:20	11:27
11:29	11:37	11:41	11:52
11:54	12:04	12:05	12:12
12:13	12:21	12:22	12:28
12:28	12:30	12:31	12:36
12:36	12:45	12:48	13:00
13:00	13:02	13:13	13:33
13:35	14:13	14:14	14:45
14:46	15:28	16:12	16:28
16:30	16:42	16:42	17:01

Tous les paramètres de chargement des camions sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8
Paramètres pour les opérations des camions - modèle de base

Paramètres	Valeur
Nombre de camions	3
Capacité des camions	20 tonnes
Distance entre la pile 1 et le hangar	140 mètres
Distance entre la pile 2 et le hangar	100 mètres
Temps de chargement des camions à la pile 1	0.04 + Random.Lognormal (0,355, 0,317) minutes
Temps de chargement des camions à la pile 2	0.4 + Random.Weibull(3,05,1,23) minutes
Temps de déchargement des camions dans le hangar	Random.Uniform (2,3) minutes
Vitesse des camions	7 km/h

3.5. VALIDATION DU MODÈLE DE SIMULATION

Afin de valider le modèle de simulation de base, il est primordial d'identifier les indicateurs de performance qui nous permettent de comparer ce qui a été simulé par rapport à la réalité observée sur les vidéos. Le tableau 9 présente les indicateurs de performance retenus pour valider le modèle de simulation.

Tableau 9
Indicateurs de performance

Indicateurs de performance	Définition
Nombre d'aller-retour/grue	Nombre de déplacements aller-retour de la grue du centre du navire vers la pile
Tonnage déchargé/grue	Quantité de minerai en vrac total retiré du navire par la grue
Nombre de chargements de camions/pile	Nombre de fois qu'un camion a été chargé avec la marchandise à la pile

Le nombre d'aller-retour/grue permet de mesurer le rythme et la cadence de déchargement du navire. Le tonnage déchargé/grue permet de mesurer l'efficacité du processus de déchargement. Le nombre de chargements de camions/pile permet de mesurer le rythme de transfert du minerai vers le hangar.

Pour valider le modèle, 100 réplifications d'une journée de travail de 8h20 à 16h56 (les horaires des deux grues) ont été réalisées. Le tableau 10 présente le nombre d'aller-retour et le tonnage déchargé observés et simulés.

Tableau 10
Validation du déchargement du navire

	Nombre aller-retour			Tonnage déchargé sur le quai		
	Observé	Simulé	Écart (%)	Observé	Simulé	Écart (%)
Grue 1	181	176	-2,76	3200	2995,57	-6,39
Grue 2	157	154	-1,91	2915	2613,41	-10,34
Total	338	330	-2,36	6115	5608,98	-8,27

Les pourcentages d'écart entre le nombre d'allers-retours réel et simulé pour les grues 1 et 2 sont respectivement de -2,76 % et -1,91 %, alors que pour le tonnage déchargé, ils sont de -6,39 % pour la grue 1 et de -10,34 % pour la grue 2. Les écarts sont considérés dans les limites raisonnables permettant de valider le modèle de simulation.

Le nombre de chargements de camions est l'indicateur utilisé pour valider la partie sur le chargement des camions. Il correspond au nombre de fois qu'un camion a été chargé avec le minerai. Le tableau 11 présente les valeurs réelles et simulées pour les chargements des camions à chacune des piles.

Tableau 11
Validation du chargement des camions sur le quai

	Nombre de chargements de camions		
	Observé	Simulé	Écart (%)
Pile 1	81	77	- 4,94
Pile 2	68	71	+ 4,41
Total	149	148	-0,67

Les pourcentages d'écart entre le nombre de chargements de camions à la pile 1 et à la pile 2 sont respectivement de -4.94 % et +4.41 %. Ces écarts sont considérés comme acceptables afin de valider le modèle de simulation.

En conclusion, le modèle de simulation a été validé avec des écarts considérés acceptables tant pour la partie de déchargement du navire que pour la partie de chargement des camions. Ce modèle constitue notre modèle de base et reflète la situation actuelle des activités de déchargement du navire et de chargement des camions pour le transport du minerai vers le hangar.

CHAPITRE 4 - SCÉNARIOS ET RÉSULTATS

Dans ce chapitre, le modèle de base servira à tester différents scénarios afin de diminuer le temps sur le quai du concentré du minerai pour libérer le quai plus rapidement. Quatre scénarios sont testés. Dans ces scénarios, les variables indépendantes suivantes sont modifiées :

1. Horaire de chargement des camions
2. Nombre de camions disponibles pour le chargement
3. Capacité des camions

L'impact des changements apportés sera mesuré sur les variables dépendantes suivantes :

1. Nombre de chargements de camions.
2. Tonnage déchargé dans le hangar.
3. Temps d'attente avant le chargement des camions.
4. Temps d'attente des camions au hangar.

Le temps d'attente avant le chargement des camions et le temps d'attente au hangar sont obtenus de Simio de la façon suivante :

Temps d'attente avant le chargement des camions (Idle time dans Simio) : temps pendant lequel un camion est en attente, au hangar, avant d'être autorisé à se déplacer vers une pile pour y effectuer un chargement.

Temps d'attente au hangar (Waiting time dans Simio) : temps pendant lequel un camion attend, à son arrivée au hangar, avant de pouvoir décharger le minerai.

Les valeurs des variables dépendantes de chaque scénario seront comparées à celles du modèle de base et des autres scénarios. Finalement, les avantages et les inconvénients de chaque scénario seront également identifiés.

4.1. SCÉNARIO 1 : MODIFICATION DES HORAIRES DE CHARGEMENT DES CAMIONS

Dans le premier scénario, nous avons voulu tester l'impact de la modification des horaires de chargement des camions à chacune des piles tout en gardant les autres paramètres du modèle de base. Le tableau 12 présente l'horaire de chargement des camions du scénario 1. Dans le modèle de base, le temps total de chargement est de 6,75 heures (Tableau 7), alors que dans le scénario 1, le temps total de chargement est de 8 heures. Deux pauses de 15 minutes et une pause de 30 minutes ont été attribuées aux camionneurs, le chargement en alternance ayant été conservé.

Tableau 12
Horaire de chargement des camions - scénario 1

Horaire de chargement des camions - scénario 1			
Pile 1		Pile 2	
De	À	De	À
8h15	10h15		
		10h30	12h30
13h00	15h00		
		15h15	17h15

Le nombre de chargements de camions pour le modèle de base et le scénario 1 est présenté dans le Tableau 13. On observe une augmentation du nombre total de chargements des camions pour le scénario 1 par rapport au modèle de base. L'augmentation totale (pile 1 et pile 2) est de 5,41% et de 12,68% pour la pile 2. Pour la pile 1, il y a une légère diminution de 1,30%.

Tableau 13
Nombre de chargements des camions - modèle de base et scénario 1

	Nombre de chargement des camions		
	Modèle de base	Scénario 1	Écart modèle de base scénario 1
Pile 1	77	76	-1,30%
Pile 2	71	80	+12,68 %
Total	148	156	+5,41 %

Le tableau 14 indique que le tonnage déchargé dans le hangar a augmenté de 5,38% (158,2 tonnes en plus) pour le scénario 1 par rapport au modèle de base. Cette augmentation n'est pas due à un investissement dans plus de ressources mais plutôt à une augmentation du temps disponible pour le chargement des camions.

Tableau 14
Tonnage déchargé dans le hangar - modèle de base et scénario 1

	Tonnage déchargé dans le hangar	Écart par rapport au modèle de base (tonnes)	Écart par rapport au modèle de base (%)
Modèle de base	2943	—	—
Scénario 1	3101,2	+158,2	+5,38 %

L'augmentation du nombre de chargements des camions entraîne un plus grand nombre de déchargements au hangar. Tel que montré au tableau 15, cela provoque un nombre plus élevé d'arrivée de camions au hangar, ce qui se traduit par une attente légèrement plus longue avant l'accès au hangar pour le scénario 1.

Tableau 15
Temps d'attente moyen au hangar et aux piles– modèle de base et scénario 1

		Modèle de base	Scénario 1
Temps d'attente moyen (min)	Hangar	0,40	0,44
	Avant le chargement	1,32	2,08

L'attente avant le chargement est plus élevée dans le scénario 1 que dans le modèle de base à cause de la configuration des horaires. Dans le modèle de base, les horaires des camions sont très fragmentés, avec plusieurs courtes périodes de disponibilité. Cependant, dans le scénario 1, les camions disposent d'intervalles de travail beaucoup plus longs (par blocs de 2 heures). Ainsi, dans le modèle de base, les camions alternent fréquemment entre des périodes d'activité et d'inactivité, ce qui réduit les temps d'attente, tandis que dans le scénario 1, les longues plages continues de travail font que plusieurs camions deviennent disponibles en même temps, ce qui crée une congestion temporaire aux piles et explique l'augmentation du temps d'attente moyen avant le chargement. C'était d'ailleurs l'objectif initial du scénario 1, qui est d'élargir les périodes de disponibilité pour le chargement aux piles.

4.2. SCÉNARIOS 2 ET 3 : AJOUT D'ÉQUIPEMENTS ET MODIFICATION DES HORAIRES DE CHARGEMENT DES CAMIONS

Les scénarios 2 et 3 explorent l'effet d'ajouter une chargeuse, de charger simultanément les camions aux deux piles en plus de modifier les horaires de chargement des camions

4.2.1. Scénario 2 : Chargement simultané des camions (un camion/pile) avec deux chargeuses

Dans le modèle de base qui représente la situation actuelle, le chargement des camions se fait en alternance entre les deux piles avec 3 camions au total. Une seule chargeuse est utilisée.

Dans le scénario 2, le chargement des camions est fait simultanément aux piles 1 et 2 au lieu d'être en alternance. Un camion est affecté à la pile 1, un camion à la pile 2 et le troisième peut se déplacer pour être chargé, en alternance, à la pile la plus proche où il n'y a pas de camion en attente d'être chargé. De plus, on dispose de deux chargeuses au lieu d'une seule qui se déplace entre la pile 1 et la pile 2. Chaque chargeuse est responsable du chargement à une pile, ce qui permet le chargement des camions en simultané aux 2 piles.

Les scénarios 2 et 3 impliquent un changement des horaires de chargement des camions aux piles 1 et 2 afin, entre autres, de limiter ces temps morts tout en intégrant formellement des pauses et des périodes pour les repas.

Les horaires de chargement des camions ont été établis, pour le modèle de base, à partir du visionnement des vidéos. Le début du chargement des camions dépend de l'horaire des grues. Dans la réalité et dans le modèle de base, un camion ne peut être chargé que si une certaine quantité de marchandise a d'abord été déposée sur le quai. L'horaire de chargement des camions du modèle de base comprend des intervalles de temps de travail alternés avec beaucoup de temps mort (Tableau 7). Afin de réduire ces temps morts, un nouvel horaire de chargement des camions a été élaboré pour les scénarios 2 et 3 (tableau 16).

Tableau 16
Horaire de chargement des camions - scénarios 2 et 3

Horaire de chargement des camions – scénarios 2 et 3			
Pile 1		Pile 2	
De	À	De	À
8h39	10h00	9h23	11h00
10h15	12h00	11h15	13h00
12h30	15h00	13h30	15h15
15h15	16h42	15h30	17h00

Dans le modèle de base, le chargement des camions se fait de 8h39 à 9h22 à la pile 1, suivi d'un temps mort de 9h22 à 9h50. Dans les scénarios 2 et 3, le chargement des camions

à la pile 1 se fait sans arrêt de 8h39 à 10h00, augmentant ainsi la période de chargement de 28 minutes par rapport au modèle de base. Le temps total disponible pour le chargement des camions est passé de 6,75 h dans le modèle de base et de 8 h dans le scénario 1 à 13,67 h pour les scénarios 2 et 3. Cela représente environ le double du temps disponible par rapport au modèle de base. Cette augmentation ne provient pas seulement du temps, mais aussi de la méthode de chargement différente : dans le scénario 1, le chargement se faisait en alternance (une pile à la fois), tandis que dans les scénarios 2 et 3, il se fait en simultané, c'est-à-dire aux deux piles au même moment.

Les mêmes paramètres que pour le modèle de base sont utilisés pour les scénarios 2 et 3 soient la capacité des grues et des camions et les temps de chargement des camions et de déchargement des grues (Tableaux 6 et 8).

4.2.2. Scénario 3 : Chargement simultané des camions (deux camions/pile) avec deux chargeuses

L'horaire de chargement des camions et tous les paramètres du scénario 3 sont les mêmes que ceux du scénario 2 sauf pour le nombre de camions. Dans le scénario 3, deux camions sont rattachés à la pile 1 et deux camions à la pile 2, pour un total de 4 au lieu de 3 comme dans le modèle de base et le scénario 2.

Le nombre de chargements de camions pour le modèle de base et les scénarios 2 et 3 est présenté dans le Tableau 17.

Tableau 17
 Nombre de chargements des camions - modèle de base, scénarios 2 et 3

	Modèle de base	Scénario 2		Scénario 3	
	Nombre de chargements de camions	Nombre de chargements de camions	Écart par rapport au modèle de base (%)	Nombre de chargements de camions	Écart par rapport au modèle de base (%)
Pile 1	77	86	11,69 %	96	24,68 %
Pile 2	71	85	19,72 %	88	23,94 %
Total	148	171	15,54 %	184	24,32 %

Le Tableau 17 montre une augmentation du nombre total de chargements des camions pour les scénarios 2 et 3 par rapport au modèle de base. L'augmentation est de 24,32 % pour le scénario 3 et de près de 15,54 % pour le scénario 2. Une augmentation du nombre de chargements des camions résulte en une augmentation du tonnage déchargé dans le hangar. Le tableau 18 présente les résultats de cette variable dépendante.

Tableau 18
 Tonnage déchargé dans le hangar - modèle de base, scénarios 2 et 3

Scénario	Tonnage déchargé dans le hangar	Écart par rapport au modèle de base (tonnes)	Écart par rapport au modèle de base (%)
Modèle de base	2943	—	—
Scénario 2	3408,6	+465,6	+15,82
Scénario 3	3675,4	+732,4	+24,88

Le tableau 18 indique que le tonnage déchargé dans le hangar a augmenté de 15,82% et 24,88% respectivement pour les scénarios 2 et 3. Le scénario 3 permet d'obtenir un tonnage déchargé dans le hangar légèrement supérieur à celui du scénario 2 avec un écart de 266,8 tonnes soit 7,83% de plus.

L'augmentation du nombre de chargements des camions dans le scénario 2 permet de transporter 465,6 tonnes de minerai de plus vers le hangar que le modèle de base. Cependant, ce scénario requiert l'ajout d'une chargeuse.

Les résultats du scénario 3 (nombre de chargement des camions et de tonnage déchargé dans le hangar) sont légèrement supérieurs à ceux du scénario 2. Cependant, le scénario 3 requiert l'acquisition d'une chargeuse mais également d'un camion additionnel. Dans les deux cas, on a pu augmenter le rythme de transfert du minerai vers le hangar. Ceci permettrait donc au quai de se libérer plus rapidement.

Tableau 19
Temps moyen d'attente au hangar et avant le chargement des camions - modèle de base, scénarios 2 et 3

Temps d'attente moyen	Modèle de base	Scénario 2	Scénario 3
Au hangar (min)	0,40	1,1	2,76
Avant le chargement (min)	1,32	0,69	0,85

Les temps moyens d'attente par camion au hangar passent de 0,40 minute dans le modèle de base, à 1,1 minute dans le scénario 2, puis à 2,76 minutes dans le scénario 3 (Tableau 19). Cette augmentation s'explique par le fait que, dans les scénarios 2 et 3, un plus grand nombre de camions arrivent presque en même temps au hangar. En effet, l'ajout d'une chargeuse permet d'augmenter le rythme de chargement des camions à chacune des piles. Le fait que davantage de camions se déplacent en même temps pour se décharger dans le hangar peut entraîner de l'attente et l'encombrement à l'entrée du hangar. De plus, un seul camion peut entrer dans le hangar à la fois pour se décharger, ce qui fait qu'un camion doit parfois attendre que le précédent ait terminé son déchargement pour passer. Le temps d'attente au hangar est plus élevé pour le scénario 3 car il requiert un plus grand nombre de camions.

Le temps d'attente moyen avant le chargement des camions est moindre pour les scénarios 2 et 3 par rapport au modèle de base. L'ajout d'une chargeuse permet le chargement en simultané aux deux piles pour les scénarios 2 et 3 alors que, dans le modèle de base, une

seule chargeuse assure le chargement aux deux piles en alternance. Toutefois, le nombre de camions disponibles pour le chargement étant plus élevé dans le scénario 3 que dans le scénario 2, le temps d'attente avant le chargement y est légèrement supérieur. Les scénarios 2 et 3 requièrent une deuxième chargeuse. Cela permettrait d'augmenter le tonnage déchargé dans le hangar et ainsi de libérer le quai plus rapidement de sa marchandise. Cependant, le scénario 2 s'avère plus avantageux que le scénario 3 car il permet d'obtenir de bons résultats avec l'ajout d'une chargeuse sans l'ajout d'un camion et ce, pour une amélioration comparable.

4.3. SCÉNARIO 4 : DÉPÔT DE LA MARCHANDISE PAR LES GRUES DIRECTEMENT DANS LES CAMIONS

Dans ce scénario, les grues déchargent le minerai directement dans les camions à l'aide d'une trémie mobile. Il n'y a donc plus de dépôt de marchandise sur le quai. Les activités de déchargement du minerai sur le quai et de chargement des camions avec la chargeuse sont éliminées. La capacité des camions est réduite à 17 tonnes au lieu de 20 tonnes, afin de correspondre à celle des grues. Cela se traduit par un aller-retour de la grue à chaque chargement de camion. La figure 8, générée par l'intelligence artificielle (Chat GPT), illustre le processus du scénario 4 avec une trémie qui n'est pas mobile.

Figure 8
Processus du chargement des camions du scénario 4 généré par l'intelligence artificielle
(Chat GPT)



L'horaire de début et de fin de déchargement des grues est le même que celui du modèle de base (Tableau 20). Le camion affecté à la grue 1 suit l'horaire de la grue 1, de même pour le camion affecté à la grue 2 qui suit l'horaire de la grue 2. Le temps disponible pour le chargement des camions est de 7,97 heures pour la grue 1 et de 7,40 heures pour la grue 2, soit un total de 15,37 heures de chargement disponibles. Ainsi, le scénario 4 offre 8,62 heures de plus de temps de chargement que le modèle de base qui dispose de 6,75 heures. Le

déchargement de la grue nécessite la présence du camion puisque le déchargement se fait directement dans le camion.

Tableau 20
Horaire des grues - scénario 4

Horaire des grues			
Grue 1		Grue 2	
De	À	De	À
8h20	15h44	9h02	13h00
16h22	16h56	13h30	16h56

L'horaire de chargement des camions est évidemment le même que celui des grues. Par exemple, le camion affecté à la grue 1 commence ses opérations en même temps que la grue 1 et termine lorsque celle-ci cesse ses activités. Il en est de même pour les camions affectés à la grue 2.

Les tests ont été réalisés en faisant varier le nombre de camions rattachés à chaque grue de 1 à 4, pour un nombre total de camions allant de 2 à 8. L'ajout progressif de camions a pour but d'évaluer leur effet sur le rythme de transfert du minerai vers le hangar. Le tableau 21 présente le nombre de chargements des camions et le tonnage déchargé du scénario 4.

Tableau 21
 Nombre de chargements et tonnage déchargé - Modèle de base et scénario 4

	Modèle de base	Scénario 4				Écart par rapport au modèle de base (%)			
		Nombre de camions				Nombre de camions			
Nombre de chargements		1	2	3	4	1	2	3	4
Grue 1	77	92	100	102	104	19,48	29,87	32,47	35,06
Grue 2	71	79	84	88	90	11,27	18,13	23,94	26,76
Total	148	171	184	190	194	15,54	24,32	28,38	31,08
Tonnage déchargé dans le hangar	2943	2894	3096	3162	3215	-1,66	5,20	7,43	9,23

Ce scénario permet d'obtenir une augmentation du tonnage déchargé dans le hangar à partir de 2 camions par grue. L'augmentation est la plus importante (9,23 % par rapport au modèle de base) avec 4 camions par grue (8 au total). Le scénario 4 exige que le processus de chargement des camions soit modifié et qu'une trémie mobile soit utilisée. Les grues ne pouvant déposer le minerai sur le quai pour former des piles, il est normal que le nombre total d'aller-retour des grues soit réduit. Il en résultera donc un temps de déchargement du navire plus long. L'avantage du scénario 4 est que le tonnage déchargé dans le hangar augmente légèrement.

Le Tableau 22 présente le temps d'attente moyen avant le chargement des camions.

Tableau 22
Temps d'attente moyen avant le chargement des camions - scénario 4

	Temps d'attente moyen avant le chargement des camions (Min)			
	Nombre de camions par grue			
	1	2	3	4
Grue 1	0,78	2,13	4,12	5,92
Grue 2	1,87	2,16	3,75	5,58

Le temps d'attente moyen avant le chargement des camions varie en fonction du nombre de camions. Puisque chaque grue ne peut traiter qu'un seul camion à la fois, les autres doivent attendre leur tour. Plus le nombre de camions augmente, plus ce temps d'attente avant le chargement est important.

De plus, lorsque le camion est disponible pour le chargement mais que la grue est occupée à se charger dans le navire, il doit attendre. Cette attente est incluse dans le temps d'attente d'un camion avant le chargement pendant toute la simulation.

Le tableau 23 présente le temps moyen d'attente des camions au hangar.

Tableau 23
Temps moyen d'attente des camions au hangar – scénario 4

Temps moyen d'attente	Modèle de base	Scénario 4 (min)			
		Nombre de camions par grue			
		1	2	3	4
Au hangar (min)	0,40	0,50	4,43	8,10	11,59

Avec un camion par grue (2 camions au total), le temps moyen d'attente au hangar reste faible avec le scénario 4 (0,50 minutes). Avec 4 camions par grue (total de 8), soit 5 camions de plus par rapport au modèle de base, le temps moyen d'attente au hangar est beaucoup plus élevé (11,59 minutes). Cela est causée par le fait que plusieurs camions sont en même temps au hangar pour être déchargés. Plus le nombre de camions augmente, plus l'attente au hangar augmente.

4.4. CONSTATS

4.4.1. Avantages et inconvénients des scénarios

Les avantages et les inconvénients de chaque scénario et des pistes d'amélioration sont présentés dans cette section. Le Tableau 24 présente les avantages et les inconvénients de chaque scénario par rapport au modèle de base.

Tableau 24
Avantages et inconvénients – Scénarios 1, 2, 3 et 4

		Scénario						
		1	2	3	4			
					Nombre de camions			
		2	4	6	8			
Avantages	Augmentation du tonnage déchargé dans le hangar	X	X	X		X	X	X
	Augmentation du nombre de chargements de camions	X	X	X	X	X	X	X
	Retrait d'une chargeuse				X	X	X	X
	Retrait d'un camion				X			
	Élimination du minerai sur le quai				X	X	X	X
	Diminution du temps d'attente avant le chargement		X	X				
Inconvénients	Ajout d'une chargeuse		X	X				
	Ajout de camions			X		X	X	X
	Ajout d'une trémie				X	X	X	X
	Augmentation du temps d'attente au hangar		X	X	X	X	X	X
	Augmentation du temps d'attente avant le chargement	X				X	X	X

Dans le scénario 1, on observe une légère augmentation du nombre de chargements de camions et, par conséquent, du tonnage déchargé dans le hangar. Ceci mène à une libération légèrement plus rapide du quai. Cependant, le temps d'attente avant le chargement ne diminue pas, il augmente, tandis que le temps d'attente au hangar présente une légère augmentation. Ce scénario ne nécessite aucun ajout d'équipements et représente donc une option simple qui améliore modestement les performances sans coûts supplémentaires.

Dans le scénario 2, le nombre de chargements de camions augmente grâce à l'ajout d'une chargeuse. Le temps d'attente avant le chargement présente une diminution marquée. Le tonnage déchargé dans le hangar augmente, ce qui correspond à une libération plus rapide du quai. Toutefois, le gain d'efficacité au niveau du chargement s'accompagne d'une hausse du temps d'attente au hangar. Ce scénario présente un coût d'investissement lié à l'ajout d'une chargeuse à moins qu'une autre chargeuse soit actuellement disponible sans être utilisée.

Dans le scénario 3, le nombre de chargements de camions augmente encore davantage puisqu'un camion a été ajouté, en plus de la chargeuse, ce qui entraîne une hausse du tonnage déchargé dans le hangar. Ceci mène à une libération plus rapide du quai et à moins d'attente avant le chargement sur le quai. Cependant, une augmentation marquée du temps d'attente avant le déchargement dans le hangar est observée à cause du nombre plus élevé de camions en circulation. En conclusion, l'ajout d'un camion en plus de la chargeuse a permis d'augmenter le nombre de chargements et le tonnage déchargé dans le hangar, mais cela a entraîné une hausse du temps d'attente dans le hangar contrairement à celui du quai.

Dans le scénario 4, des modifications importantes du processus de chargement ont été réalisées, en passant d'un chargement à partir des piles sur le quai à un chargement direct par la grue dans les camions à l'aide d'une trémie. Ce changement du processus permet d'éliminer certaines étapes intermédiaires. Lorsqu'il n'y a qu'un seul camion par grue, le système devient très fluide. Les camions n'attendent presque plus avant d'être chargés, puisque la grue peut transférer le minerai directement dans les remorques des véhicules. Le hangar, de son côté, reçoit un faible nombre de camions, ce qui maintient un faible temps d'attente. Ce scénario 4 avec un camion par grue ajoute seulement une trémie mobile.

Lorsque deux camions sont assignés à chaque grue, le tonnage déchargé dans le hangar augmente. Cependant, certains camions doivent attendre leur tour pour se charger. En plus de l'attente avant le chargement, le hangar accueille davantage de camions qui peuvent attendre leur déchargement. Ce scénario demande l'achat d'un camion supplémentaire, en plus de la trémie.

Avec trois camions par grue, les résultats donnent un plus grand nombre de chargements de camions et, par conséquent, plus de tonnage déchargé dans le hangar d'où une libération plus rapide du quai. Cependant, les camions attendent plus longtemps avant d'être chargés, car la grue est complètement occupée. L'attente s'allonge aussi au hangar, où plusieurs camions arrivent presque en même temps. L'investissement devient ici plus important : trois camions supplémentaires doivent être ajoutés, en plus de la trémie mobile.

Enfin, lorsque quatre camions sont utilisés par grue, le tonnage déchargé dans le hangar augmente mais la circulation devient trop lente. Les camions passent plus de temps à attendre, que ce soit au quai ou au hangar. Le système atteint alors sa limite : les gains de tonnage deviennent négligeables et les temps d'attente augmentent fortement. Ce dernier scénario demande le plus grand investissement, avec plusieurs camions additionnels et la trémie mobile, sans offrir une amélioration marquée du tonnage déchargé dans le hangar.

4.4.2. Impact de l'augmentation du tonnage déchargé sur le nombre de navires

L'objectif principal de ce projet consiste à libérer le quai du minerai plus rapidement afin d'accueillir davantage de navires. Le tableau 25 présente une estimation, à partir des résultats des simulations et de certaines hypothèses, de l'impact du tonnage déchargé par jour au hangar sur le nombre de navires que le port pourrait accueillir.

Bournival (2024) propose une analyse de l'efficacité des activités de (dé)chargement des navires transportant du concentré de minerai. Le tonnage total moyen de ces navires était de 11 720 tonnes. Cette valeur sera utilisée afin d'estimer, à partir des résultats des scénarios, le nombre moyen de navires qui pourraient être accueillis au port. Le tonnage déchargé au hangar est la quantité quotidienne transportée au hangar.

Tableau 25
Nombre de navires et tonnage déchargé

	A	B	C	D
	Tonnage déchargé/jour	Nbre jours pour décharger un navire	Nbre de navires pouvant être accueillis au port	Augmentation # navires vs modèle de base
Modèle de base	2943	3,98	66,27	-
Scénario 1	3101,2	3,78	69,06	4,21 %
Scénario 2	3408,6	3,44	74,32	12,15 %
Scénario 3	3675,4	3,19	78,76	18,80 %
Scénario 4				
2 camions	2894	4,05	65,35	-1,38 %
4 camions	3096	3,79	68,96	4,06 %
6 camions	3162	3,71	70,04	5,69 %
8 camions	3215	3,64	70,89	6,97 %

Le tonnage déchargé par jour (colonne A) provient des résultats des simulations (tableaux 14, 18 et 21).

Le nombre de jours requis pour décharger un navire de la colonne B s'obtient en divisant le tonnage moyen d'un navire transportant du minerai (11 720 tonnes) par la colonne A.

Pour obtenir un temps à quai d'un navire plus réaliste, une journée a été ajoutée au nombre de jours requis pour décharger un navire. On fait l'hypothèse que l'accueil des navires au port se fait durant 330 jours par année puisque la voie navigable du fleuve St-Laurent est fermée durant certains jours en hiver. Le nombre de navires pouvant être accueillis annuellement au port (colonne C) est donc calculé en divisant les 330 jours/an par (colonne B+1).

Le pourcentage d'augmentation du nombre de navires pouvant être accueillis au port est calculé par rapport au modèle de base (colonne D).

Le Tableau 25 met en évidence la relation entre le tonnage déchargé dans le hangar et la capacité du port à accueillir un plus grand nombre de navires.

On remarque que plus le tonnage déchargé par jour augmente, plus le port est susceptible d'accueillir de navires. Les scénarios 2 et 3 génèrent les augmentations les plus élevées, avec 12,15% et 18,80% respectivement. Ces deux scénarios requièrent l'ajout d'une chargeuse et, pour le scénario 3, d'un camion. Ceci pourrait représenter des coûts ponctuels additionnels à moins qu'une deuxième chargeuse soit disponible. Cependant, ces coûts pourraient être compensés par une augmentation des revenus pour le port qui accueillerait plus de navires. Le port devrait donc évaluer si ces investissements dans une chargeuse et un camion seraient profitables. Dans l'éventualité où une deuxième chargeuse serait actuellement disponible au port, ce scénario devient encore plus intéressant car il serait peu coûteux.

Il est important de rappeler que d'autres hypothèses, que celles formulées pour le tableau 25, pourraient mener à des résultats différents. Plusieurs éléments tels que la météo et le bris d'équipements, n'ont pas été pris en considération. Cependant, il est indéniable que le tonnage déchargé quotidiennement au hangar a un impact direct sur les navires qui pourraient être reçus au port.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude est de développer un processus de chargement des camions afin d'augmenter le rythme de transfert des concentrés de minerai vers les hangars pour libérer le quai plus rapidement et accueillir plus de navires.

5.1. CONTRIBUTION DE LA RECHERCHE

La recherche présentée dans ce mémoire apporte une contribution importante à l'amélioration du processus de chargement et de transfert du minerai au port de Trois-Rivières. Grâce à la modélisation et à la simulation, différents scénarios ont été analysés pour comprendre comment l'utilisation des équipements influence le rythme de transfert du concentré de minerai vers le hangar. Les résultats montrent que l'augmentation du tonnage déchargé dans le hangar permet au quai de se libérer plus rapidement. Quand le quai est dégagé plus vite, le navire peut terminer son déchargement dans un délai plus court, ce qui réduit son temps de séjour au port. En conséquence, le port devient capable d'accueillir un plus grand nombre de navires par année, améliorant ainsi sa capacité.

Cette recherche montre aussi que le bon équilibre entre le nombre de camions et de chargeuses est essentiel pour éviter la congestion et maintenir un flux continu entre le quai et le hangar. Par exemple, ajouter trop de camions augmente la circulation et les temps d'attente, tandis qu'un nombre trop faible ralentit le transfert du minerai.

En simulant différentes situations, le modèle développé dans ce mémoire permet d'évaluer les effets des différentes ressources (camions, chargeuses, trémie) sur le tonnage déchargé dans le hangar. Il devient alors un outil d'aide à la décision pour choisir les meilleures options selon les besoins du port et du manutentionnaire.

Un transfert plus rapide du minerai du quai vers le hangar permet de diminuer l'exposition des opérateurs aux émissions de poussière générées lors de la manipulation du minerai. De plus, les diminutions des temps d'attente avant le chargement et le déchargement des camions observés contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO₂) et à la protection

de l'environnement. L'augmentation du tonnage déchargé quotidiennement dans le hangar a donc également un impact au niveau environnemental.

Ces travaux contribuent à l'enrichissement des connaissances reliées au déchargement des navires et au chargement des camions dans les ports sans conteneurs. De plus, les résultats ont permis d'avoir des améliorations significatives dans l'augmentation du rythme de transfert du minerai vers le hangar ainsi qu'une libération plus rapide du quai.

Finalement, la revue de la littérature indique que la recherche scientifique reliée aux ports sans conteneur est moins abondante que celle des ports avec conteneurs, que ce soit pour examiner les problèmes reliés à l'affectation des navires aux quais, au chargement et au déchargement des navires ou aux problématiques reliées au trafic routier. Ce travail apporte des connaissances dans un domaine où les recherches sur les ports sans conteneurs sont limitées.

5.2. LIMITATION DE LA RECHERCHE

Cette étude est basée sur des données recueillies sur une seule journée, un seul produit et un seul navire. La manutention d'autres produits peut avoir d'autres spécifications en termes de la nature et du nombre des équipements responsables du processus de déchargement du navire et de chargement des camions. Certaines données reliées à ce qui se passe dans le hangar, les distances entre le quai et le hangar et les vitesses des grues et des camions ont été estimées. Il serait intéressant de travailler avec des données réelles.

Certaines conditions réelles n'ont pas pu être prises en considération dans le modèle de simulation telles que les pannes d'équipement, les conditions météorologiques et, surtout, la disponibilité réelle des opérateurs. Ces conditions peuvent influencer le déroulement des opérations de déchargement du navire et de chargement des camions, car elles peuvent provoquer des interruptions et des retards. Par exemple, une panne de grue ou une pluie intense peut ralentir ou même interrompre complètement le déchargement. De même, la disponibilité du personnel, les changements de quart de travail ou les temps de pause peuvent aussi affecter la continuité des activités. Les résultats de cette recherche sont liés à un horaire

de travail déterminé. Ces éléments n'ont pas été intégrés dans le modèle car ils nécessiteraient des données détaillées sur la planification quotidienne du port et une analyse sur la fréquence des pannes ou des conditions météo difficiles.

5.3. AVENUES FUTURES DE LA RECHERCHE

Il serait intéressant d'étudier spécifiquement le processus de déchargement du navire afin de réduire son temps de séjour à quai. Faudrait-il davantage de grues en simultané et de plus grande capacité ? Est-ce que les grues pourraient se déplacer plus rapidement ?

L'utilisation des équipements devrait être analysée plus en détails. Par exemple, combien de chargeuses le manutentionnaire possède-t-il et comment sont-elles utilisées ? Une meilleure planification de leur utilisation pour les activités de chargement permettrait peut-être d'avoir 2 chargeuses sur le quai sans investissement.

Notre recherche n'a pas permis d'étudier les effets reliés à la protection de l'environnement. Il serait intéressant d'intégrer des indicateurs d'émissions de CO₂ pour mesurer l'effet de la consommation de carburant des camions et des équipements de manutention.

Le minerai entreposé dans les hangars doit éventuellement être transporté à l'extérieur du port. Une étude complète du trafic routier devrait intégrer les camions externes, leur passage à la balance et le processus de chargement au hangar. De plus, il serait intéressant d'étudier comment augmenter le rythme de déchargement des camions dans les hangars afin, par exemple, d'en accueillir deux à la fois.

Finalement, la prise en considération des conditions météorologiques serait un élément important pour analyser leurs effets sur le système actuel. Au port de Trois-Rivières, des vents dominants provenant du Saint-Laurent peuvent affecter la performance des grues ou, dans les cas de tempêtes, les arrêter complètement. De plus, la neige et le verglas peuvent réduire la visibilité et la facilité de déplacement pour les camions et les chargeuses. Le logiciel de simulation Simio permet d'examiner ce genre de situation en déclenchant des événements qui arrêtent ou ralentissent les grues ou les camions. Les conditions

météorologiques modifient la performance des équipements de manutention et affectent la performance globale des opérations de chargement et de déchargement dans le terminal.

5.4. CONCLUSION

Ce mémoire permet d'enrichir les connaissances scientifiques sur les opérations portuaires dans un port sans conteneur dont les processus de déchargement des navires transportant de la marchandise en vrac et de chargement des camions pour le transport de la marchandise vers le hangar.

Les travaux réalisés ont montré qu'il est possible d'augmenter la quantité de minerai déchargée dans le hangar, ce qui libère plus rapidement le quai et réduit le temps de séjour des navires au port. En conséquence, le port pourrait accueillir un plus grand nombre de navires sur une même période. Toutefois, ces améliorations nécessitent des investissements supplémentaires en équipements. Les dirigeants du port doivent donc évaluer si les revenus additionnels reliés à l'accueil d'un plus grand nombre de navires justifient les dépenses engagées.

BIBLIOGRAPHIE

Abdelgadir, S. O. M. et Ahmed, A. O. I. (2025). Logistics solutions to container congestion problems in port Sudan 2020–2024 (Theoretical study). *Journal of Ecohumanism*, vol. 4, no 1, 1192 – 1206.

Administration Portuaire de Trois-Rivières (2025). À propos du port. Port Trois-Rivières. Consulté le 23 janvier 2025, tiré de <https://porttr.com/administration-portuaire/a-propos/>.

Administration Portuaire de Trois-Rivières (2025). Une année charnière pour le Port de Trois-Rivières. Consulté le 23 juin 2025, <https://porttr.com/une-annee-charniere-pour-le-port-de-trois-rivieres/>.

Al Fathin, M. R., Heryandri, K. et Muis, A. (2022). The efforts to increase dry bulk unloading performance at the port of PT. Bandar Bakau Jaya Banten. *Advances in Transportation and Logistics Research*, vol. 5, 1155–1165.

Azab, A. E. et Eltawil, A. B. (2016). A simulation based study of the effect of truck arrival patterns on truck turn time in container terminals. *European Conference on Modelling and Simulation*, 80–86.

Ben Daya, B. et Audy, J. F. (2024). Port access fluidity management during a major extension project: A simulation-based case study. *Sustainability*, vol. 16, no 7. <https://doi.org/10.3390/su16072834>.

Birkett, D. (2022). Dry bulk cargoes and the impact on air pollution in ports. *Port equipment manufacturers Association*, 25 p.

Bournival, L. (2024). Comparaison des activités de manutention de divers produits dans un port sans conteneurisation : une analyse par enveloppement de données. *Mémoire de maîtrise*, Université du Québec à Trois-Rivières.

Bouzekri, H., Alpan, G. et Giard, V. (2023). Integrated laycan and berth allocation problem with ship stability and conveyor routing constraints in bulk ports. *Computers &*

Industrial E, vol. 181. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109341>

Bugaric, U. S., Petrovic, D. B., Jelic, Z. V. et Petrovic, D. V. (2012). Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading. *Simulation*, vol. 88, no 12, 1508-1521.

Cimpeanu, R., Devine, M. T. et O'Brien, C. (2017). A simulation model for the management and expansion of extended port terminal operations. *Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review*, vol. 98, 105-131.

Dekker, R., Van Der Heide, S., Van Asperen, E. et Ypsilantis, P. (2013). A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 25, no 4, 528-542.

Feng, X., Wang, Z., Wang, Y., Yin, W., Chao, Y. et Ye, G. (2024). Improving resilience in an intermodal transport network via bulk cargo transport coordination and empty container repositioning. *Ocean and Coastal Management*, vol. 248, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106970>

Goudreau, (2018). Analyses des impacts de l'implantation d'un système de rendez-vous sur le trafic routier dans un port manutentionnant des produits non conteneurisés. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières.

Gouvernement du Québec (2021). La nouvelle vision maritime du Québec, avantage Saint-Laurent. Ministère des transports et de la mobilité durable. 39 p.

Gouvernement du Québec (2025). Portrait du transport maritime au Québec. Ministère des transports et de la mobilité durable. Consulté le 23 janvier 2025, <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-services-transport-maritime/pages/portrait-quebec.aspx>.

Groupe DDM (2023). Diagnostic sectoriel de main-d'œuvre de l'industrie maritime. Rapport, Comité sectoriel de main-d'œuvre de l'industrie maritime (CSMOIM), 48 p.

Hwang, J. et Kim, S. (2020). Fine dust and sustainable supply chain management in port

operations: focus on the major cargo handled at the dry bulk port. *Journal of marine science and engineering*, vol. 8, no 7. <https://doi.org/10.3390/jmse8070530>

Kiani, M., Sayareh, J. et Nooramin, S. (2010). A simulation framework for optimizing truck congestions in marine terminals. *Journal of Maritime Research*, vol. 7, no 1, 55-70.

Le Nouvelliste (2023). On s'attend à une baisse du trafic maritime. *Le Nouvelliste*. Consulté le 23 janvier 2025, <https://www.lenouvelliste.ca/affaires/affaires-locales/2025/01/03/on-sattend-a-une-baisse-du-traffic-maritime-5NN3CA3NT5FJXBXRROFXZJTC4A/>.

Liu, J., Wang, X. et Chen, J. (2023). Port congestion under the Covid-19 pandemic: The simulation-based counter measures. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 183. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109474>

Mar-Ortiz, J., Gracia, M. D. et Castillo-García, N. (2018). Challenges in the design of decision support systems for port and maritime supply chains. *Exploring Intelligent Decision Support Systems: Current state and new trends*, vol. 764, 49–71.

Neagoe, M., Hvolby, H.-H., Taskhiri, M. S. et Turner, P. (2021). Using discrete-event simulation to compare congestion management initiatives at a port terminal. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 112. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102362>

Nylen, J. et Sheenan, M. (2021) The impact of moisture on lead concentrate powder dust emissions in ship-loading operations. *Powder Technology*, vol. 394, 353-362.

Perez, D. et Jin, J. G. (2020). Integrated dedicated berth allocation and specialised handling equipment assignment in bulk ports. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 12, no 6, 543-562.

Pratap, S., Daultani, Y., Tiwari, M. et Mahanty, B. (2018). Rule based optimization for a bulk handling port operations. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 29, no 2, 287-311.

Rigot-Muller, P., Lalwani, C., Mangan, J., Gregory, O. et Gibbs, D. (2013). Optimising

end-to-end maritime supply chains: a carbon footprint perspective. *The International Journal of Logistics Management*, vol. 24, no 3, 407-425.

Raleigh, W. (1971). *The history of the world*, C. A. Patrides, Éd., Temple University Press, 418 p.

Rotunno, G., Lo Zupone, G., Carnimeo, L. et Fanti, M. P. (2023). Discrete event simulation as a decision tool: A cost benefit analysis case study. *Journal of Simulation*, vol. 18, no 3, 378-394.

Ressources naturelles Canada (2025). Bulletin d'information sur la production minérale canadienne. Statistique Canada. Consulté le 04 décembre 2025. <https://ressources-naturelles.canada.ca/mineraux-exploitation-miniére/donnees-statistiques-analyses-exploitation-miniére/faits-mineraux-métaux>

Transports Canada (2020). *Les transports au Canada*. Gouvernement du Canada. Consulté le 23 janvier 2025, <https://tc.canada.ca/en/corporate-services/transparency/corporate-management-reporting/transportation-canada-annual-reports>.

Transports Canada (2023). *Résilience du commerce maritime*. Gouvernement du Canada. Consulté le 23 janvier 2025, <https://tc.canada.ca/fr/transport-maritime/surete-maritime/resilience-commerce-maritime>.

UNCTAD (2024). *Étude sur le transport maritime 2024*. UNO commerce et développement. Consulté le 23 janvier 2025, <https://unctad.org/fr/publication/etude-sur-le-transport-maritime-2024>.

Wang, J., Liu, K., Yuan, Z., Yang, X. et Wu, X. (2025) (a). Simulation modeling of super-large ships traffic: Insights from Ningbo-Zhoushan Port for coastal port management. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 138. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.103039>

Wang, W., Guo, J., Tian, Q., Peng, Y., Cao, Z., Liu, K. et Peng, S. (2025) (b). Stockyard allocation in dry bulk ports considering resource consumption reduction of spraying

operations. *Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review*, vol. 15, 1-9.

Yousefi, H. (2021). Evaluation of the main factors effective on loading and unloading of dry bulk cargo with a focus on reduced rate of loading and unloading in the imam Khomeini port-Iran. *International Journal of Maritime Technology*, vol. 15, 1-9.

Zhang, X., Li, J., Yang, Z. et Wang, X. (2022). Collaborative optimization for loading operation planning and vessel traffic scheduling in dry bulk ports. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 51. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101489>