

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE SIMULATION D'UN SYSTÈME LOGISTIQUE
PORTUAIRE POUR IDENTIFIER LES GOULOTS**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL**

**PAR
ERIK BERGERON**

NOVEMBRE 2022

Université du Québec à Trois-Rivières
Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL (M. ING.)

Direction de recherche :

Pascal Forget

Prénom et nom

directeur de recherche

Jean-François Audy

Prénom et nom

codirecteur de recherche

Jury d'évaluation

Sébastien Gamache

Prénom et nom

Génie industriel - UQTR

Mustapha Ouhimmou

Prénom et nom

Génie des systèmes - ÉTS

REMERCIEMENTS

Je dois la complétion de cette maîtrise à plusieurs personnes qui ont su m'aider et me motiver au cours de mon parcours.

Je remercie mon directeur de maîtrise, M. Pascal Forget, pour sa patience, sa disponibilité, ses encouragements et ses conseils avisés qui ont su me guider durant mon parcours. Je remercie également mon co-directeur de maîtrise, M. Jean-François Audy, pour son implication importante dans toutes les sphères de cette maîtrise. Ses encouragements et son soutien à toutes les étapes ont su me motiver jusqu'à la toute fin de ce projet. J'ai réellement apprécié travailler sous M. Forget et M. Audy durant ma maîtrise et mon parcours universitaire dans son ensemble. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont accordée et les opportunités qu'ils m'ont présentées.

Je tiens également à remercier M. Léo Gagnon qui a contribué à l'avancement de cette maîtrise dans le cadre d'un stage de recherche.

J'adresse également mes remerciements aux membres de l'Administration portuaire de Trois-Rivières pour leur collaboration dans ce projet, leur disponibilité et leur intérêt constant dans mes travaux.

RÉSUMÉ

Avec la croissance de l'industrie maritime, qui est un secteur clé pour de nombreuses chaînes d'approvisionnement dans le monde, les ports cherchent à augmenter leur capacité et leur performance afin de relever les défis et opportunités créés par la demande accrue de l'industrie. Parmi les divers avenues possibles, l'expansion portuaire est une approche permettant d'atteindre l'objectif d'augmentation de la capacité, mais nécessite des ressources importantes et une planification minutieuse. Avant d'entreprendre un projet de cette envergure, il est important d'avoir une bonne compréhension de sa capacité actuelle ainsi que des exigences et des limites de l'expansion à la lumière des données historiques et des prévisions futures. L'objectif de ce mémoire est de développer une méthodologie de prévision de goulots d'étranglement et d'évaluation de la capacité dans le contexte d'un projet d'expansion portuaire. De plus, la méthodologie proposée adresse le cas particulier de ports ayant une visibilité et des données limitées de leurs opérations portuaires, ce qui constitue un défi supplémentaire pour les organisations portuaires. Pour tester la nouvelle méthodologie proposée, une approche quantitative basée sur la simulation à événements discrets est appliquée à une étude de cas au port de Trois-Rivières où une expansion portuaire majeure est en planification. L'application de la méthodologie développée à ce cas particulier permettra le diagnostic de goulots ferroviaires potentiels et la validation des prévisions de flux d'entités de transport pouvant transiter sur le futur terminal et le port actuel. Les résultats montrent qu'il y a une certaine surutilisation de l'embranchement ferroviaire pour certains services de train, tandis qu'il y a une sous-utilisation de l'embranchement pour un autre service. Dans un même ordre d'idée, les résultats prévoient un dépassement de la capacité d'accueil des wagons du nouveau terminal durant une période de l'année.

3.2.3.3	Données maritimes.....	40
3.2.3.4	Synthèse des données.....	46
3.2.4.	Scénarios d'arrivées maritimes	50
3.3.	Formulation du modèle conceptuel	59
3.3.1.	Entités du modèle.....	59
3.3.2.	Développement d'un modèle préliminaire.....	59
3.4.	Modèle de simulation	64
3.4.1.	Modélisation	64
3.4.2.	Période de réchauffement.....	66
3.4.3.	Variables indépendantes	67
3.4.4.	Variables dépendantes.....	68
3.4.5.	Hypothèses.....	68
3.5.	Vérification et validation.....	69
4.	CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE.....	71
4.1.	Traitement des données sortantes	71
4.2.	Analyse des convois ferroviaires.....	73
4.3.	Capacité ferroviaire	81
4.4.	Évolution des stocks.....	82
4.5.	Sommaire des résultats.....	84
5.	CHAPITRE 5 : CONCLUSION	85
5.1.	Synthèse de la recherche.....	85
5.2.	Limitations de la recherche.....	86
5.3.	Contributions de la recherche.....	87
5.4.	Avenues futures de la recherche	88
6.	RÉFÉRENCES	89
	ANNEXES.....	92
	Annexe 1.....	92
	Annexe 2.....	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Carte des terminaux du port de Trois-Rivières	2
Figure 1.2 Éléments du système portuaire à l'étude	4
Figure 3.1 Étapes de la méthodologie	22
Figure 3.2 Exemple de séquences de processus du terminal 21	25
Figure 3.3 Seuils de l'embranchement ferroviaire.....	28
Figure 3.4 Aperçu des données historiques d'intérêts des flux maritimes.....	30
Figure 3.5 Aperçu des données historiques d'intérêts des flux ferroviaires	31
Figure 3.6 Aperçu des données historiques d'intérêts des flux routiers	31
Figure 3.7 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (chargement port actuel)	38
Figure 3.8 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (déchargement port actuel)	38
Figure 3.9 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (spodumène terminal 21).....	39
Figure 3.10 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (fertilisant terminal 21)	39
Figure 3.11 Distribution des temps de transit des flux maritimes entrants du port actuel (données aberrantes).....	41
Figure 3.12 Distribution des quantités des flux maritimes entrants du port actuel (données aberrantes).....	41
Figure 3.13 Distribution des débits de déchargement des flux maritimes entrants du port actuel (données aberrantes).....	42
Figure 3.14 Distribution des temps de transit des flux maritimes entrants du port actuel	42
Figure 3.15 Distribution des quantités des flux maritimes entrants du port actuel.....	43
Figure 3.16 Distribution des débits de déchargement des flux maritimes entrants du port actuel	43
Figure 3.17 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 2).....	51
Figure 3.18 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 3).....	51
Figure 3.19 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 4).....	52
Figure 3.20 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 5).....	52
Figure 3.21 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 6).....	52
Figure 3.22 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 7).....	53
Figure 3.23 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 8).....	53
Figure 3.24 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 9).....	53
Figure 3.25 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 10).....	54
Figure 3.26 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 11).....	54
Figure 3.27 Exemples des tableaux de distributions de probabilités et probabilités cumulées (familles 2 à 7).....	56
Figure 3.28 Exemple de scénarios d'arrivées maritimes (famille 3)	57
Figure 3.29 Distributions de % de tonnage maritime en fonction du nombre de scénarios générés (famille 9)	57
Figure 3.30 Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 9)	58
Figure 3.31 Organigramme des interactions maritimes et ferroviaires	60

Figure 3.32 Organigramme des interactions maritimes et routières	63
Figure 3.33 Évolution de la marchandise moyenne au cours du temps.....	66
Figure 3.34 Évolution des stocks au cours d'une année (modèle erroné).....	70
Figure 3.35 Évolution des stocks au cours d'une année (modèle validé).....	70
Figure 4.1 Nombre de wagons entrant par convoi AM durant l'année.....	78
Figure 4.2 Nombre de wagons entrant par convoi PM durant l'année	78
Figure 4.3 Nombre de wagons sortant par convoi AM durant l'année	79
Figure 4.4 Nombre de wagons sortant par convoi PM durant l'année	79
Figure 4.5 Nombre de wagons dans le système portuaire en fonction du temps.....	82
Figure 4.6 Stocks en fonction du temps.....	83
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 2).....	92
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 2).....	92
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 2).....	92
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 3).....	93
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 3).....	93
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 3).....	93
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 4).....	94
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 4).....	94
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 4).....	94
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 5).....	95
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 5).....	95
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 5).....	95
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 6).....	96
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 6).....	96
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 6).....	96
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 7).....	97
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 7).....	97
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 7).....	97
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 8).....	98
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 8).....	98
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 8).....	98
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 9).....	99
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 9).....	99
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 9).....	99
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 10).....	100
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 10).....	100
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 10).....	100
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 11).....	101
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 11).....	101
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 11).....	101
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 2)	102
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 3)	102

Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 4)	103
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 5)	103
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 6)	103
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 7)	104
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 8)	104
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 9)	104
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 10)	105
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 11)	105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Catégories et exemples d'enjeux portuaires.....	8
Tableau 3.1 Prévisions du terminal 21.....	29
Tableau 3.2 Résumé des prévisions du port actuel	32
Tableau 3.3 Moyenne et écart-type du nombre de camions entrant par jour (données manuelles).....	35
Tableau 3.4 Nombre de camions par année (données manuelles)	35
Tableau 3.5 Proportion de wagons dans les convois AM et PM.....	40
Tableau 3.6 Temps de transit des flux maritimes.....	44
Tableau 3.7 Quantité de marchandise des flux maritimes	44
Tableau 3.8 Débit de chargement / déchargement des flux maritimes	45
Tableau 3.9 Synthèse des temps de transit par famille.....	46
Tableau 3.10 Nombre maximal de camions par jour par famille	48
Tableau 3.11 Nombre maximal de wagons par convoi par famille	49
Tableau 3.12 Tonnage par navire	50
Tableau 4.1 Description des données sortantes collectées automatiquement durant la simulation	73
Tableau 4.2 Dépassements de seuils par les convois ferroviaires	74
Tableau 4.3 Dépassements du premier seuil (wagons)	75
Tableau 4.4 Dépassements du second seuil (wagons)	75
Tableau 4.5 Attribution des dépassements de seuils 1 et 2 pour le port actuel et le terminal 21	77
Tableau 4.6 Pourcentage de wagons en fonction du jour de la semaine (samedi, dimanche et lundi regroupés).....	80
Tableau 4.7 Wagons entrants et sortants en fonction des jours de la semaine	81
Tableau 4.8 Nombre de wagons présents dans le système portuaire	82
Tableau 4.9 Résultats des stocks	83

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE

1.1 Contexte de la recherche

Dans le contexte de mondialisation actuel où la plupart des produits et biens sont livrés et consommés à l'échelle planétaire, la chaîne d'approvisionnement et l'industrie du transport sont soumises à une pression considérable et croissante pour satisfaire à la demande des consommateurs. La pression est particulièrement forte pour l'industrie du transport maritime qui est impliquée dans plus de 90% du transport de marchandises (Fruth et Teuteberg, 2017). En effet, selon la United Nations Conference on Trade and Development (2018), le transport de biens par l'industrie maritime a atteint 10,7 milliards de tonnes en 2017, ce qui correspond à une croissance de 411 millions de tonnes, dont la moitié est attribuable à des produits en vrac secs. Parmi les multiples acteurs de l'industrie maritime, le port est un acteur clé qui permet le commerce national et international, qui assure la connexion entre les différents modes de transport et qui connecte les différents producteurs et consommateurs aux marchés (Douaioui et al., 2018). Les ports étant donc des nœuds centraux de la chaîne d'approvisionnement, ils sont confrontés à la nécessité d'optimiser leur performance afin de répondre aux besoins croissants du transport maritime (Molavi et al., 2019).

Afin de capitaliser sur la demande croissante de l'industrie maritime, les ports cherchent à augmenter leur capacité et leur performance au niveau opérationnel. En effet, plusieurs options telles que l'optimisation des opérations logistiques portuaires et du flux de marchandises (Mazouz et al., 2017) par l'intégration de nouvelles technologies (Rajabi et al., 2019) et processus d'affaires, l'utilisation de terminaux intermodaux intérieurs (Reis et Almeida, 2019) et l'expansion du port (Triska et al., 2020) sont des avenues de solutions évaluées par les administrations portuaires.

1.2 Présentation de l'organisation portuaire

L'étude de cas présentée dans ce mémoire est réalisée au port de Trois-Rivières avec la collaboration de l'administration portuaire. L'Administration portuaire de Trois-Rivières (APTR) fait partie des 17 administrations portuaires canadiennes au pays et accueille annuellement environ 55000 camions, 11000 wagons et plus de 200 navires. En tout, plus de 3 millions de tonnes métriques sont manutentionnées par le port. Le port de Trois-Rivières est un port urbain de taille moyenne spécialisé dans le stockage et le transport multimodal d'une importante diversité de produits en vrac et de marchandises générales.

Le port comporte actuellement trois terminaux distincts et couvre une surface de 457 000 m². La figure 1.1 illustre l'emplacement des différents terminaux dans le port.



Figure 1.1 Carte des terminaux du port de Trois-Rivières

Le terminal des élévateurs, délimité en vert dans la figure 1.1, compte deux élévateurs ainsi que des réservoirs utilisés pour l'entreposage de grains, d'alumine et de coke calciné. Le terminal de marchandises générales, délimité en bleu dans la figure 1.1, se caractérise par les nombreux hangars ainsi que des espaces étendus servant à l'entreposage et la manutention de nombreux produits, tels que l'acier, des produits forestiers, des transformateurs et des composantes d'éoliennes. Le dernier terminal, soit le terminal de vrac solide et liquide, délimité en orange dans la figure 1.1, est composé de plusieurs hangars et réservoirs, ainsi qu'une large surface d'entreposage extérieure et deux grues portuaires mobiles. Ce dernier terminal fait près de la moitié de la superficie actuelle du port.

L'APTR, qui a fourni les données nécessaires à la réalisation de ce mémoire, a lancé à l'automne 2018 sa planification stratégique « Cap sur 2030 ». À l'intérieur de ce plan stratégique où se côtoient l'amélioration de la compétitivité de la chaîne logistique, le soutien aux projets d'innovations et environnementaux et le développement de la zone riveraine, l'administration portuaire annonce la construction d'un futur terminal à l'ouest de ses installations actuelles. Il est estimé que le futur terminal résultant de ce projet d'expansion se traduira par une augmentation d'environ 50% de la capacité globale du port. Cette expansion se veut une réponse de l'administration portuaire vis-à-vis le trafic maritime croissant auquel fait face le port. Le futur terminal est indiqué par la couleur jaune à la figure 1.1.

Le futur terminal 21, dont la valeur est estimée à 2,7 milliards de dollars, comprend la construction de 3 postes à quai, de voies d'accès ferroviaires et routières, et des espaces d'entreposage. L'APTR estime que l'exploitation de ce terminal devrait résulter dans la création de 495 emplois directs et indirects et mener à des retombées économiques annuelles de 59 millions de dollars.

La figure 1.2 illustre les processus impliquant le transport maritime, routier et ferroviaire ainsi que le stockage de la marchandise et les opérations de chargements et déchargements. Une ressource est partagée entre le port actuel et le futur terminal, soit l'embranchement ferroviaire. Au niveau maritime, le futur terminal possède ses propres quais distincts du port actuel. Pour ce qui est du transport routier, il y a partage de certaines voies entre le port actuel et le nouveau terminal, mais l'étude de la capacité routière est exclue des travaux de ce mémoire.

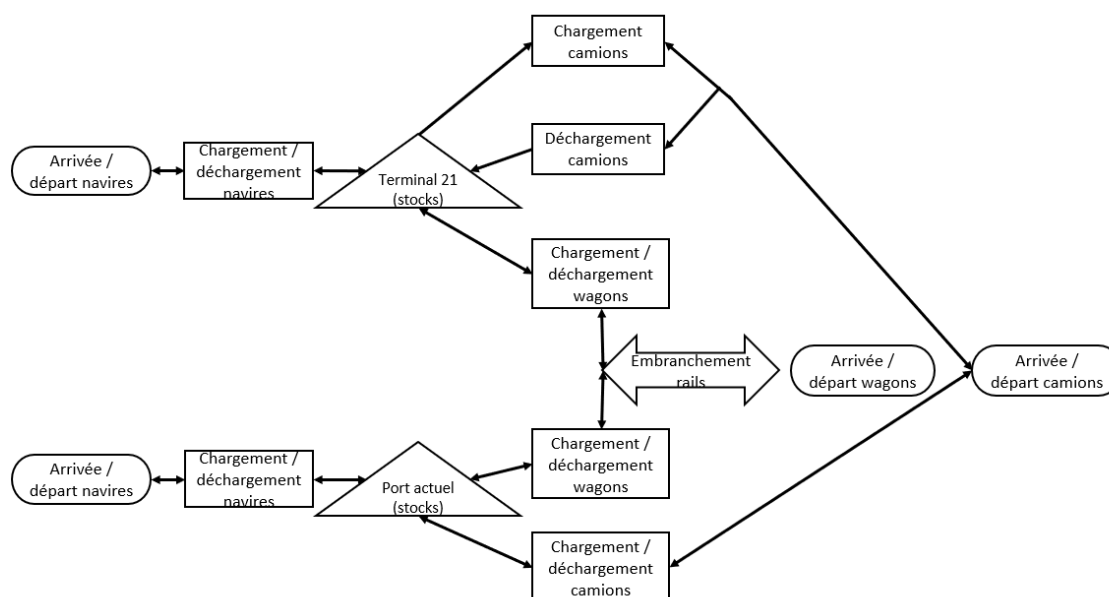


Figure 1.2 Éléments du système portuaire à l'étude

1.3 La problématique de l'évaluation de la capacité

Un projet d'expansion de cette envergure pose plusieurs défis de logistique portuaire, notamment en ce qui concerne la capacité des différentes ressources logistiques intervenant dans l'acheminement des marchandises depuis leur entrée jusqu'à la sortie du port et ce, tant pour le port actuel que pour le futur terminal. En tant que plateforme logistique spécialisée dans l'entreposage et le transbordement d'une grande variété de marchandises non conteneurisées, le port de Trois-Rivières doit également tenir compte dans ses prévisions de flux des incertitudes importantes inhérentes à son portefeuille de marchandises. Cependant, les outils et méthodes à disposition de l'APTR sont limités dans leur potentiel à évaluer la capacité du port, en particulier dans le contexte actuel où les besoins sont croissants. La méthode prévisionnelle actuelle de l'APTR est basée sur une demande lissée sur une année ainsi que les taux de rotation des stocks. Présentement, cette approche triviale répond aux besoins de l'APTR en termes de prévisions et d'évaluation de la capacité, mais l'addition d'un futur terminal soulève plusieurs incertitudes par rapport à l'augmentation de la capacité du port et si les infrastructures associées seront en mesure de répondre aux nouveaux besoins logistiques du système portuaire. Dans le cadre

de ce mémoire, un accent particulier est mis sur le transport ferroviaire, car le port actuel et le futur terminal partagent le même embranchement ferroviaire pour l'entrée et la sortie des convois ferroviaires. Le port de Trois-Rivières étant un port urbain ceinturé par le centre-ville, l'APTR doit respecter des seuils stricts au niveau de la grandeur des convois entrant et sortant de l'embranchement ferroviaire. La capacité de cette ressource partagée étant limitée, l'addition du futur terminal pose un risque accru de goulot. Dans ce contexte, les méthodes prévisionnelles et d'évaluation de la capacité actuelle de l'APTR ne sont pas adaptées pour faire face aux nouveaux défis et à l'incertitude apportés par le futur terminal.

1.4 Objectif

Ce mémoire a pour objectif de développer une méthodologie de prévision de goulots et d'évaluation de la capacité dans le contexte d'un projet d'expansion portuaire. Pour tester la nouvelle méthodologie proposée, une approche quantitative basée sur la simulation à événements discrets est appliquée à une étude de cas au port de Trois-Rivières. L'application de la méthodologie développée à ce cas particulier permettra le diagnostic de goulots ferroviaires potentiels et la validation des prévisions de flux d'entités de transport pouvant transiter sur le futur terminal et le port actuel.

Ayant identifié une lacune dans la littérature en matière d'outils d'analyse et d'aide à la décision en gestion de la capacité de port à marchandises non conteneurisées, le mémoire apporte une contribution à la fois méthodologique, que empirique en gestion de la capacité dans un contexte d'expansion portuaire. Spécifiquement, une méthodologie basée sur la simulation et la première expérimentation (mise en œuvre) d'un concept théorique proposé par Bassan (2007) sont démontrées sur un cas d'étude réel.

Les principales étapes réalisées pour atteindre l'objectif sont présentées dans ce mémoire. Premièrement, une revue de littérature adressant des méthodologies et études de cas connexes au projet de recherche est présentée au chapitre 2. La méthodologie proposée et son application à un cas d'étude sont présentées au chapitre 3. L'analyse des résultats est présentée au chapitre 4 et pour terminer la conclusion est présentée au chapitre 5.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le cadre de ce mémoire, le problème abordé et l'objectif visé touchent le cas d'étude du port de Trois-Rivières et la construction d'un nouveau terminal dans le cadre de leur projet d'expansion visant à augmenter leur capacité. Considérant que l'étude de cas porte sur un port spécialisé dans l'entreposage et le transbordement d'une large diversité de marchandises non conteneurisées, la recherche au sein de la littérature a initialement été dirigée vers des environnements et contextes similaires. Cependant, lors de la recherche, il a été constaté que le milieu académique accorde largement plus d'attention aux ports manutentionnant des conteneurs qu'aux ports se spécialisant dans la marchandise en vrac. Cette lacune générale de la littérature touchant les ports de vrac est démontrée dans la revue de littérature de Dragović et al. (2017), dont le but principal est d'analyser l'usage de modèles de simulation portuaire et évaluer leurs contributions à la recherche avec un accent particulier sur les terminaux de conteneurs. Malgré l'intérêt des auteurs pour les cas touchant à la conteneurisation, cette revue de littérature exhaustive couvre 219 articles publiés dans des journaux entre 1961 et 2015 touchant à la simulation dans tous les types de milieu portuaires. Il est pertinent de mentionner que la revue de littérature fait la distinction entre les milieux portuaires et les types de simulation effectuées. Il est important de tenir compte de distinction entre les types de systèmes portuaires, puisque les ports à marchandises non conteneurisées et les ports à conteneurs font chacun face à des défis différents. D'un côté, les ports à conteneurs manutentionne une variété limitée de marchandises, lui offrant la possibilité de standardiser et même automatiser certaines de leurs opérations. D'un autre côté, les ports de marchandises en vrac doivent faire la manutention d'une grande diversité de marchandises de plusieurs types, dont certains sont saisonniers. Les multiples chaînes de manutention ainsi que l'incertitude inhérente aux produits manutentionnés posent des défis non négligeables pour les gestionnaires de ces ports.

Un premier constat soulevé par les auteurs est la croissance marquée des articles touchant la simulation dans le domaine portuaire au cours des dernières années. En effet, 32 articles

couvrent la période entre 1961 et 1999, tandis que 187 papiers sur le sujet ont été publiés entre 2000 et 2015, ce qui illustre l'évolution de l'intérêt de l'utilisation et de l'accessibilité à la simulation en milieu portuaire.

Ayant analysé les articles par champ d'application, Dragović et al. (2017) ont divisé les articles en quatre sections de simulation par domaine, soit les ports à conteneurs (166 articles), les ports en général (24 articles), le trafic portuaire (15 articles) et les terminaux de marchandises en vrac (14 articles). En tout, les études touchant spécifiquement à la simulation dans un contexte de port de vrac constituent donc seulement 6,4% des cas identifiés dans la littérature par Dragović et al. (2017). De plus, en poussant leur analyse davantage, les auteurs ont pu constater que la majorité des articles publiés durant la période entre 1961 et 2000 touchait les ports de vrac et les ports en général, à 50% et 41,6% respectivement. Pour ce qui est des articles touchant aux ports à conteneurs, il a été constaté que l'application de la simulation au milieu portuaire s'est surtout concentrée dans divers sous-domaines des ports à conteneurs.

Tenant compte de la littérature limitée portant sur les ports de marchandises non conteneurisées, la revue de littérature de ce mémoire a été élargie afin d'inclure des études touchant à la marchandise conteneurisée. La revue de littérature présentée dans ce mémoire aborde d'abord les défis et enjeux actuels du secteur portuaire avant de se pencher sur les différentes solutions explorées dans la littérature. Par la suite, la revue est dirigée vers le sujet de l'évaluation de la capacité de systèmes portuaires où différentes études de cas sont examinées. La revue se conclut par les constats relevés dans la littérature étudiée.

2.1 Défis et enjeux du secteur portuaire

Avant d'aborder les différentes solutions explorées par les ports devant faire face à la demande croissante de l'industrie maritime, les projets d'expansion et études de cas présentées dans la littérature, il est pertinent de définir ce qu'est un port ainsi que ses besoins et enjeux. Rajabi et al. (2019) définissent un port comme étant « une connexion entre la mer et la terre qui fournit aux navires des installations leur permettant de charger

et décharger des passagers et des marchandises ». La définition précédente peut être enrichie en soulignant qu'un port est également « un réseau d'acteurs qui coopèrent et partagent des ressources afin de coproduire de la valeur » (Douaioui et al., 2018). Plusieurs enjeux communs sont identifiés dans la littérature et peuvent être regroupés en cinq catégories. Les catégories ainsi que des exemples d'enjeux pour chaque catégorie sont illustrés dans le tableau 2.1 (Rasmussen et al., 2018).

Tableau 2.1 Catégories et exemples d'enjeux portuaires

Catégories	Enjeux
Enjeux opérationnels	<ul style="list-style-type: none"> - Goulots - Délai/Attente - Erreurs - Manque d'information - Coûts - Capacité insuffisante
Enjeux de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> - Accident des véhicules (bateau, camion, équipement de manutention, etc.) - Cybersécurité - Terrorisme - Perte de marchandise - Contrebande - Passagers clandestins
Enjeux environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion des déchets - Pollution (de l'eau et de l'air)
Enjeux énergétiques	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation d'énergie - Coût de l'énergie grandissant
Enjeux sociétaux	<ul style="list-style-type: none"> - Construction - Expansion du port dans la ville - Pollution (visuelle et sonore) - Trafic lié aux activités portuaires

Les enjeux nommés dans le tableau 2.1 se retrouvent dans la plupart des ports, mais leur importance varie en fonction de variables régionales et les politiques gouvernementales en places. En effet, un port situé dans un pays où le coût de l'énergie et les exigences environnementales sont élevés sera plus préoccupé par les enjeux énergétiques et environnementaux. Un autre exemple similaire au port impliqué dans l'étude de cas de ce

mémoire est celui d'un port ceinturé par une ville et qui doit faire face à des enjeux sociétaux et opérationnels grandissant afin de continuer à satisfaire la demande grandissante de l'industrie du transport maritime tout en minimisant les impacts sur la municipalité. Le contexte et la situation propre à chaque port font en sorte que les besoins et les solutions recherchées peuvent être différents. L'intégration de nouvelles technologies et processus d'affaires visant à optimiser les opérations logistiques et les flux de marchandises, l'utilisation de terminaux intermodaux (Rasmussen et al., 2018) et les projets d'expansion portuaires (Balliauw, 2021) sont des options considérées par les administrations portuaires.

2.2 Solutions explorées dans la littérature

La diversité des enjeux et les contextes propres à chaque port, comme présenté dans la sous-section précédente, font en sorte que de multiples avenues sont explorées par les ports afin de répondre à leurs défis.

2.2.1 Optimisation des processus

Comme pour le port à l'étude dans ce mémoire, les ports peuvent être ceinturés par un cadre urbain qui restreint considérablement tout projet d'expansion. Dans l'impossibilité d'étendre leurs activités sur le territoire, ces ports se tournent donc vers l'optimisation des opérations portuaires afin d'augmenter leur capacité et, ultimement, contribuer à un meilleur taux de rotation des marchandises manutentionnées. Cette approche est mise en œuvre dans l'étude de cas d'un terminal à conteneurs chinois (Mazouz et al., 2017), où les auteurs cherchent à maximiser le débit du terminal en déterminant, par la simulation à événements discrets basée sur la théorie des files d'attente, le nombre d'entrées et de sorties optimal pour maximiser le débit du trafic routier transitant dans le système. Le système étudié dans cet article se limite aux flux routiers et maritimes au sein du terminal, soit les arrivées et départs de camions et navires ainsi que les opérations de chargement, déchargement, stockage, inspection et pesée. L'étude étant concentrée sur les flux de conteneurs et des transporteurs ainsi que les opérations de logistiques portuaires touchant directement à la manutention des conteneurs, le modèle développé comporte quatre

sections principales, soit le système de guérite, la cour, l'aire de trafic et le poste d'amarrage. Le modèle de Mazouz et al. (2017) simule activement deux composantes, soit les stocks et les véhicules de transport. En effet, les auteurs soulignent que d'un point de vue logistique, on peut considérer que les terminaux ont seulement les deux composantes mentionnées précédemment. Cette vision permet aux auteurs de définir les limites du système à l'étude et de diriger le développement de leur modèle afin de se concentrer sur l'objectif de leur étude, ce qui est une approche classique en simulation. Trois variables couvrent les résultats de l'étude de cas, soit la quantité d'équivalent vingt pieds (EVP), le taux d'utilisation des guérites entrantes et sortantes, et le temps d'attente moyen aux guérites.

2.2.2 Intégration de technologies 4.0

Pour répondre aux défis actuels et futurs, les ports se tournent également vers les nouvelles technologies issues de l'Industrie 4.0. L'Industrie 4.0, qui est à la base de la quatrième révolution industrielle initiée par l'Allemagne en 2011 (Yang et al., 2018; Douaioui et al., 2018), a capté l'intérêt du domaine industriel depuis plusieurs années déjà. L'intérêt des ports pour l'Industrie 4.0 est récent, mais croissant. En effet, il a été constaté que cette révolution industrielle amenée par l'émergence de nouvelles technologies, telles que l'Internet des Objets (IoT) et l'analyse des données massives, ne présente pas des opportunités de développement seulement pour l'industrie, mais également pour d'autres domaines et applications comme la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la logistique (Douaioui et al., 2018). Plusieurs applications et gains sont envisagés par l'intégration de solutions basées sur la technologie 4.0. Les principaux exemples d'applications et d'améliorations sont décrits dans les lignes suivantes (Wu et al., 2013; Rasmussen et al., 2018; Rajabi et al., 2019; Jovic et al., 2019).

Plusieurs cas d'application citent l'utilisation de technologies 4.0 pour obtenir des gains opérationnels. L'application de ces technologies peut servir à l'optimisation de la communication et du transfert de données entre les acteurs portuaires afin d'assurer un partage d'information rapide et sans papier au sein du système portuaire. L'infonuagique

est un exemple de technologie clé pouvant soutenir la connectivité au sein d'un port. L'utilisation de ce type de technologie et des données massives rendent possible l'utilisation de simulations et d'outils prédictifs pour soutenir la gestion du système portuaire. L'utilisation de capteurs et de l'infonuagique permet d'offrir une meilleure visibilité et contrôle des activités portuaires en temps réel. Par exemple, l'intégration de ces technologies en vue de la création d'un système de transport intelligent permettrait d'assurer un flux fluide des différentes entités de transport en guidant et en procurant de l'information au camionneur sous la forme de plage de rendez-vous ou de temps d'attente estimé.

La sûreté et sécurité des installations portuaires est un autre aspect pouvant bénéficier de l'application de ce genre de technologies. En effet, en ayant une vision globale et en temps réel du port, le temps de réaction pour répondre à des enjeux de sûreté et sécurité peut être amélioré. En addition aux bénéfices au niveau de la sûreté et sécurité, l'utilisation de technologies de type Blockchain permet une meilleure traçabilité et identification de la marchandise transitant dans le port, allégeant la documentation requise et accélérant potentiellement le processus aux douanes. De plus, cette technologie permettrait d'éviter des cas de fraude par la modification de données (Rasmussen et al., 2018). Présentement, les ports d'Antwerp et de Rotterdam explorent la technologie Blockchain pour cette application.

Un autre type d'application mentionnée dans la littérature est la gestion de l'infrastructure. Des capteurs captent des données telles que la température, le niveau de l'eau, la vitesse et la direction du vent et la pollution. Un exemple concret de ce bénéfice est souligné par l'article *Port of Rotterdam Wants to Be the Smartest* (<https://www.offshore-energy.biz/>, 2018) qui avance que le port de Rotterdam sera prochainement en mesure d'atteindre le chargement maximal de cargaison sur les navires en fonction de prédictions basées sur le niveau de l'eau. Avec cette gestion de l'infrastructure, il est également possible d'intégrer une maintenance intelligente des infrastructures du port.

Un dernier exemple d'application est au niveau de la gestion de l'énergie. L'intégration de nouvelles technologies au sein du port pourrait le rendre plus efficient et en mesure de réduire sa consommation énergétique par une gestion intelligente de l'énergie.

Le potentiel d'application et d'amélioration des ports par l'intégration des technologies 4.0 est illustré par certains projets de ports meneurs dans le domaine. Un exemple est le port de Rotterdam qui, par son projet de numérisation en partenariat avec l'entreprise IBM, estime que les compagnies de transport maritime ainsi que le port pourront réduire le temps d'accostage des navires d'une heure, ce qui se traduit par des gains d'environ 80 000\$ américains (« Port of Rotterdam Wants to Be the Smartest », 2018). Un autre exemple est celui du port d'Hambourg qui planifie doubler sa capacité de 9 millions de EVP d'ici 2025, mais sans doubler son espace. Cela signifie donc que le port devra gérer de manière optimale le trafic au sein de son enceinte en recourant notamment à la technologie 4.0 (Rajabi et al., 2019; Rasmussen et al., 2018).

2.2.3 Expansion portuaire

Parfois, lorsqu'il est question d'enjeux opérationnels et logistiques causés par des besoins accrus, les ports privilégient l'expansion lorsque possible. Cette avenue requiert certes des investissements importants et beaucoup de temps, mais a le bénéfice de se traduire en hausse de capacité une fois le projet complété (Balliauw, 2021). La disposition des autorités portuaires à réaliser des projets d'expansions pour faire face aux enjeux actuels auxquels ils font face est mise de l'avant par un sondage de De Langen et al. (2018). En effet, ces derniers estiment que des investissements d'environ 50 milliards d'euros seront nécessaires dans les ports européens entre 2018 et 2027, dont 70% impliquent l'expansion de la capacité. L'optimisation des processus d'affaires et les nouvelles technologies sont des solutions permettant aux ports d'atteindre une certaine flexibilité et un contrôle accru de leurs opérations, mais les gains dégagés par l'optimisation ne permettront pas, dans tous les cas, de satisfaire l'augmentation de la demande et que fatalement, une expansion s'imposera. En effet, sans projet d'expansion, les ports devant faire face à une demande grandissante importante feront face à des temps d'attente, à de la congestion au sein du

système portuaire et ne pourront pas répondre à la demande, ayant comme conséquences possibles des pertes de clients et de profits (Balliauw, 2021).

2.3 Évaluation de la capacité

Au sein d'un système portuaire, la notion de capacité peut être perçue de plusieurs manières et toucher un large éventail d'éléments et de ressources. En effet, la capacité peut référer à la suffisance des infrastructures à stocker la marchandise transitant par le port. Elle peut également faire allusion aux différentes ressources physiques au sein du système portuaire, tel que des équipements de manutention comme des chariots élévateurs, des grues et des balances, ou même à la main-d'œuvre travaillant au sein du port. Dans plusieurs cas, la capacité en milieu portuaire touche aux ressources logistiques du système telles que les guérites, les quais, les routes et le réseau ferroviaire interne, et à leur faculté à traiter les navires, camions et wagons de manière à éviter les délais et la congestion au sein du port. Bien que la capacité en milieu portuaire soit un terme ayant un sens large, plusieurs auteurs proposent une définition afin de mieux cerner la signification et l'importance de celle-ci. Balliauw (2021) suggère que la capacité d'un port est fréquemment exprimée en nombre de navires ou en quantité de marchandises pouvant être traitées durant une période donnée. Cette définition, bien qu'acceptable, est limitée par la suggestion que la capacité d'un port est affectée seulement par la quantité de navires ou de marchandises transitant en son sein durant un laps de temps. Bassan (2007) donne une définition similaire en définissant la capacité d'un port comme la quantité de marchandise manutentionnée au cours d'une période. L'auteur ajoute également que le concept dirigeant l'analyse de la capacité devrait être déterminé par l'opération déterminant le taux de capacité le plus bas par unité de temps au cours d'un cycle d'opération. Cette définition est particulièrement pertinente lorsqu'on considère que comme dans le cas d'une chaîne d'approvisionnement, le flux de marchandises et opérations logistiques portuaires est aussi efficace que son maillon le plus faible, qui dans le cas d'un système portuaire, est souvent le point de congestion (Iyoob et Van Niekerk, 2021). Cette vision de la capacité portuaire est également appuyée par Triska et al. (2020), qui proposent de séparer le système portuaire en sous-système (quais, cour de stockage, guérites) et de vérifier quel

sous-système a la capacité la plus faible afin de déterminer le goulot du système dans sa totalité. Cependant, même si cette approche permet de simplifier certaines analyses, les auteurs soulignent qu'elle ne prend pas en considération les liens et interactions entre les sous-systèmes.

Le secteur portuaire étant un nœud central de la chaîne d'approvisionnement, connectant les transports maritimes, routiers et ferroviaires pour assurer le transport d'un large éventail de marchandises pour de nombreux acteurs et clients, les ports ont constamment à opérer dans un contexte d'incertitude et d'imprévisibilité inhérent à un secteur touchant autant d'éléments Balliauw (2021). Dans cet ordre d'idée, il est décisif pour les administrations portuaires de s'assurer que les flux de la marchandise et des opérations de logistiques portuaires soient sous contrôle afin de pouvoir s'ajuster en cas d'événements et situations inattendus. De plus, une bonne connaissance de la capacité du port permet à l'administration portuaire de prévoir, d'optimiser et d'agir sur leur système afin d'utiliser la capacité optimale et éviter une sous-utilisation ou une surutilisation de leurs ressources.

L'évaluation de la capacité est particulièrement importante dans le cadre d'un projet d'expansion portuaire, comme l'illustrent les problèmes de congestions du port de Durban en Afrique du Sud (Iyoob et Van Niekerk, 2021). Comme le soulignent les auteurs, éventuellement, l'expansion des ressources physiques et des infrastructures portuaires n'est pas suffisante pour continuer de supporter la demande grandissante de l'industrie maritime. Les systèmes de transport en amont et aval du port ainsi que les opérations logistiques associées doivent également avoir une capacité suffisante pour soutenir le flux accru de marchandises transitant par le port, sans quoi la congestion du trafic au sein du système portuaire est inévitable, menant à des impacts économiques et environnementaux négatifs. Dans le cas du port de Trois-Rivières, la proximité du port avec le centre-ville fait en sorte que tout problème de congestion au sein du port a le potentiel d'affecter le trafic dans sa périphérie et donc sur le réseau municipal.

La recherche sur la littérature portuaire touchant à l'analyse de capacité, les projets d'expansion et les goulots dans les systèmes portuaires révèle que la simulation à

événements discrets est de loin l'outil le plus utilisé dans les études touchant ces sujets. En effet, la revue de littérature sur le sujet de la simulation des ports et terminaux de conteneurs réalisée par Dragović et al. (2017) et couvrant 219 articles entre 1961 et 2015 démontre non seulement que la simulation à événement discret est une des approches de modélisation des opérations portuaires les plus populaires, mais que la quantité d'articles publiés entre 2000 et 2015 est presque six fois plus élevée qu'avant les années 2000, illustrant l'intérêt grandissant de la communauté scientifique pour la recherche dans le domaine portuaire, particulièrement la conteneurisation, et l'utilisation de la simulation comme outil. L'attrait de la simulation dans ce genre d'études est que les projets touchant les opérations de logistiques portuaires comme l'expansion de la capacité peuvent être testés au moyen de la simulation avant tout effort d'implantation réelle (Hartmann, 2004). Figueira et Almada-Lobo (2014) soulignent, quant à eux, que l'avantage principal de la simulation est sa capacité à gérer de multiples processus sans faire de concession au niveau de la complexité du modèle. À la différence d'autres méthodes, la simulation permet l'analyse d'une multitude de scénarios différents avec un grand niveau de détails dans une approche *what if*. Considérant que les ports sont un système complexe avec une multitude de processus, il est donc justifié dans la plupart des cas de recourir à la simulation dans le cadre d'études dans ces systèmes.

Dans l'article de Triska et al. (2020), les auteurs présentent deux approches pour déterminer la capacité optimale d'un port, soit l'approche économique, qui associe la capacité au coût minimum par tonne manutentionnée, et l'approche par ingénierie, qui associe la capacité au niveau de service comme le taux d'utilisation des ressources et le ratio entre le temps d'attente et le temps d'opération. Dans le cadre de leur revue de littérature, sur un total de 35 articles, 34 ont utilisé l'approche par ingénierie en utilisant des critères associés au niveau de service. Les critères suivants ont pu être retrouvés dans la littérature étudiée par Triska et al. (2020) :

- rapport entre le temps d'attente moyen et le temps d'opération moyen des navires ;
- taux d'utilisation ;

- taux d'accostage à l'arrivée ;
- seuils du nombre maximal d'unités admises durant une période donnée (navires, trains) ;
- seuils de dépassement du niveau de conteneurs dans la cour de stockage.

Triska et al. (2020) offrent deux perspectives pour évaluer la capacité d'un port. La première perspective, soit la perspective de l'offre, soulève la question de quelle quantité de marchandises peut supporter le système avec ses opérations de logistiques portuaires et infrastructures actuelles. La seconde perspective, soit la perspective de la demande, soulève la question de quels changements aux infrastructures et opérations doivent être effectués afin de répondre à la demande. Dans le cadre de ce mémoire, l'expansion ainsi que tout changement apporté à l'infrastructure et aux opérations portuaires sont des éléments déjà couverts par l'APTR. La première perspective proposée par les auteurs correspond davantage aux travaux réalisés dans ce mémoire, puisqu'il est question d'évaluation de la capacité et des goulots du futur terminal tout en tenant compte du port actuel. Dans le même ordre d'idée, l'approche par ingénierie utilisant des critères touchants au niveau de service convient davantage à l'étude réalisée dans ce mémoire puisque l'aspect économique n'est pas le centre d'intérêt de l'étude.

Plusieurs auteurs ont développé une méthodologie d'évaluation de la capacité touchant à des projets d'expansions et ont testé celle-ci dans divers ports réels ou fictifs inspirés de ports réels à travers le monde. La méthodologie développée et son application pour trois cas distincts sont abordées aux pages suivantes.

Le premier cas présenté est l'application de la méthodologie d'évaluation de la capacité et planification d'expansion de Triska et al. (2020), qui testent leur méthodologie dans un modèle de terminal de conteneurs inspiré d'un terminal réel du sud du Brésil. Les auteurs appliquent une approche combinant la simulation à événements discrets et la méthode Monte-Carlo sur le modèle du terminal de conteneurs. Seules trois ressources sont prises en compte dans l'étude, soit : les quais, le stockage et les guérites pour les camions. Le modèle inclut le transport maritime et routier, mais n'aborde pas le transport ferroviaire,

soulevant donc certaines limites de l'étude, considérant qu'un port est généralement une plateforme intermodale pour ces trois modes de transport. La logique de l'approche proposée par les auteurs consiste à vérifier l'influence de la disponibilité des ressources sur les indicateurs opérationnels et les coûts du système.

Il a été mentionné dans la section précédente que Triska et al. (2020) proposent deux perspectives pour évaluer la capacité d'un port, soit les perspectives de l'offre et de la demande. Dans le même ordre d'idées, les auteurs ont également développé deux méthodologies d'évaluation de la capacité basées sur l'approche économique et l'approche par ingénierie. Soulignons que la perspective de l'offre n'est pas adaptée à l'approche économique, puisque cette approche ne touche pas directement la performance opérationnelle. Les auteurs évaluent donc la capacité par trois approches différentes, soit l'approche par ingénierie avec la perspective de l'offre, l'approche par ingénierie avec la perspective de la demande, et l'approche économique avec la perspective de la demande.

D'abord, l'approche par ingénierie avec la perspective de l'offre consiste en l'évaluation de six niveaux de demande. Les résultats montrent, sans surprise de la part des auteurs, que le temps d'attente au sein du port grandit de façon exponentielle avec l'augmentation de la demande. L'approche a permis aux auteurs de déterminer que la capacité optimale du terminal est de 517 070 conteneurs par année.

Ensuite, dans le cas de l'approche par ingénierie avec la perspective de la demande, une capacité optimale n'est pas déterminée, mais plutôt une planification de l'expansion est planifiée par l'analyse du nombre de conteneurs transitant par le port en fonction du nombre de ressources disponibles et le temps d'attente au port. Avec cette approche, la capacité à planifier pour le projet d'expansion serait à déterminer par l'administration portuaire en utilisant les résultats obtenus par la méthode comme outil d'aide à la décision.

Pour l'approche économique avec la perspective de la demande, le temps de calcul de par la simulation est largement plus élevé que les deux autres approches. Ceci est dû au fait que plusieurs configurations de ressources sont simulées pour chaque niveau de demande et à cause de l'analyse de sensibilité nécessaire à l'approche économique. Les résultats de

cette approche illustrent tout d'abord le nombre de conteneurs pouvant transiter par le port en fonction du nombre de ressources disponibles. Ensuite, pour les mêmes niveaux de débit de conteneurs initialement examinés, le coût de transit par conteneur a été déterminé.

Le second cas présenté est l'application de la méthodologie d'évaluation de la capacité et planification d'expansion et améliorations de Netto et al. (2016), qui teste leur méthodologie dans un modèle de terminal brésilien exportateur de minerai de fer. La simulation à événements discrets est utilisée afin de déterminer la capacité logistique d'un terminal de minerai de fer brésilien. L'évaluation de la capacité des terminaux portuaires a été réalisée à partir de critères basés sur le niveau de service, soit le temps moyen en file d'attente et le taux d'occupation des équipements portuaires et des quais. Il est pertinent de souligner que les auteurs ont également ajouté à ces critères des seuils à ne pas dépasser pour les critères mentionnés précédemment, à savoir le temps d'attente moyen ne doit pas excéder 10 jours et le taux d'occupation maximal des équipements et quais ne doit pas dépasser 85%. Les auteurs utilisent une approche systémique dans laquelle le terminal est divisé en sous-système au sein du même modèle de simulation. Suite à la validation du modèle par la simulation du terminal actuel, l'expansion et les améliorations prévues par le port sont intégrées au modèle et la simulation d'un scénario d'expansion est exécutée pour diverses quantités de marchandises exportées par le terminal jusqu'à ce qu'un des éléments des sous-systèmes excède un des seuils spécifiés par les auteurs. Au final, la première ressource à atteindre un seuil fut le taux d'occupation moyen des quais qui a atteint la valeur de 85%, indiquant ainsi que cette ressource était le goulot du terminal. Pour terminer, les auteurs ont déterminé par la simulation du scénario d'expansion que la capacité du terminal est passée de 35 Mt/année à 64 Mt/année.

Le troisième cas présenté est l'application de la méthodologie d'évaluation de la capacité de Reis et Almeida. (2019), qui testent leur méthodologie dans une étude de cas d'un village de fret à Turin en Italie. L'étude porte sur l'étude de la capacité d'un terminal intermodal au moyen de la simulation à événements discrets et touche principalement au transport ferroviaire et au stockage de la marchandise. Malgré que cette étude ait été

simplifiée pour ne tenir compte que du mode de transport ferroviaire, elle se distingue par l'évaluation de multiples scénarios simulant le trafic actuel du terminal, le trafic actuel avec l'addition du trafic du port de Savona, et le trafic de conteneurs au terminal. Les auteurs font l'évaluation de ces différents trafics et évaluent l'impact de différentes améliorations sur les multiples scénarios testés afin de déterminer des paramètres tels que la capacité du terminal et le temps de transit de la marchandise.

2.4 Limites et constats identifiés dans la littérature

Au cours de la revue de la littérature, plusieurs facteurs limitants et situations problématiques ont été identifiés par les auteurs. Dans certains cas, des parallèles ont pu être établis entre les limites mentionnées dans la littérature et celles confrontées dans le cadre de l'étude réalisée dans ce mémoire. Malgré une popularité grandissante de la recherche dans le secteur portuaire et l'utilisation accrue de la simulation comme outil au cours des dernières années, certaines lacunes ont pu être observées dans la littérature. En premier lieu, la grande majorité de la littérature touche aux ports à conteneurs et à leurs sous-systèmes. La lacune de recherche portant sur les ports de vrac est en soi une limite puisque la plupart des méthodologies et critères retrouvés touchent de près ou de loin à la manutention de conteneurs et à des opérations portuaires spécifiques à ce genre de marchandise. Malgré cela, des parallèles intéressants peuvent être faits entre les ports de vracs et les ports à conteneurs. En second lieu, suite à leur revue de littérature sur l'évaluation de la capacité et la planification d'expansion au moyen de la simulation, Triska et al. (2020) affirment que les articles analysés ne présentaient pas une méthode bien définie quant à l'utilisation des méthodes de simulation pour l'évaluer la capacité portuaire, illustrant ainsi des limitations au niveau de l'évaluation de la capacité d'un système portuaire au moyen de la simulation dans la littérature scientifique. De plus, les auteurs mettent en évidence que le transport maritime est l'élément le plus recherché et que dans bien des cas, il s'agit du seul processus analysé dans plusieurs articles. Les quais sont également étudiés dans de nombreuses recherches, mais il est constaté que les opérations de la cour de triage sont souvent négligées. Une dernière critique des auteurs est que dans certaines publications où des critères de seuils sont utilisés, les auteurs

n'utilisent pas une valeur unique, mais plutôt une plage de seuils due à la nature suggestive du paramètre choisit. Sans discréditer cette approche, les auteurs soulignent que cette manière de procéder diminue l'impression de rigueur de l'approche utilisée. Dans le cadre de ce mémoire, des critères d'évaluation de la capacité utilisant une plage de seuils bien définis sont utilisés, sans toutefois porter atteinte à la rigueur de l'approche. En effet, les seuils définis représentent des limites distinctes dont le dépassement a des impacts différents et une gravité propre aux yeux de l'APTR. De plus, afin que la simulation soit contrainte par les seuils établis, ceux-ci sont utilisés seulement dans l'analyse des résultats et n'influencent pas la simulation elle-même.

La revue de littérature permet d'arriver à plusieurs constats. Pour commencer, malgré la popularité grandissante de la recherche dans le secteur portuaire, la majorité des travaux réalisés portent sur les ports à conteneurs et leurs sous-systèmes tandis que peu d'études récentes touchant à l'évaluation de la capacité et l'utilisation de la simulation dans les ports de marchandises en vrac sont publiées. Malgré cela, plusieurs auteurs soulignent ce point au sein de la littérature, illustrant ainsi que la communauté scientifique reconnaît cette lacune.

Ensuite, deux approches mentionnées par Triska et al. (2020), soit l'approche économique et l'approche par ingénierie, se démarquent dans la littérature consultée. Cependant, l'approche par ingénierie, dont l'évaluation de la capacité est réalisée au moyen de critères basés sur le niveau de service, est largement plus utilisée au sein de la littérature.

Troisièmement, il semble y avoir un consensus général dans le milieu de recherche portuaire que la simulation à événements discrets est un outil particulièrement bien adapté aux études de système portuaires.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie de prévision de goulots et d'évaluation de la capacité. Plus précisément, la méthodologie développée dans ce mémoire, bien qu'en principe applicable à tous les systèmes portuaires, est dirigée pour répondre aux besoins de systèmes portuaires particuliers en contexte de projet d'expansion.

Les types de systèmes portuaires vers lesquels l'approche est orientée sont des ports de marchandises non conteneurisées et dont le développement des technologies 4.0 n'est pas à un stade avancé. Par un développement non avancé des technologies 4.0, on désigne les ports dont la transition vers les nouvelles technologies et la numérisation n'est pas ou est récemment débutée. Le port de Trois-Rivières, soit le port à l'étude dans ce mémoire, est un exemple du type de système portuaire visé par la méthodologie. Malgré un commencement réussi de l'intégration de technologies, l'APTR est confrontée à une lacune au niveau de ses données, offrant ainsi une faible visibilité des flux de marchandises et opérations logistiques. La méthodologie proposée dans ce mémoire est développée spécifiquement pour permettre la prévision de goulots et l'évaluation de la capacité d'un système portuaire ayant une visibilité incomplète causée par un manque de données.

La méthodologie proposée dans ce mémoire est employée dans le cadre d'une étude du port de Trois-Rivières dans laquelle un modèle de simulation à événements discrets est conçu afin de prévoir des goulots éventuels et évaluer la capacité du système portuaire dans le cadre du projet d'expansion du terminal 21. Les étapes de la méthodologie sont présentées à la figure 3.1.

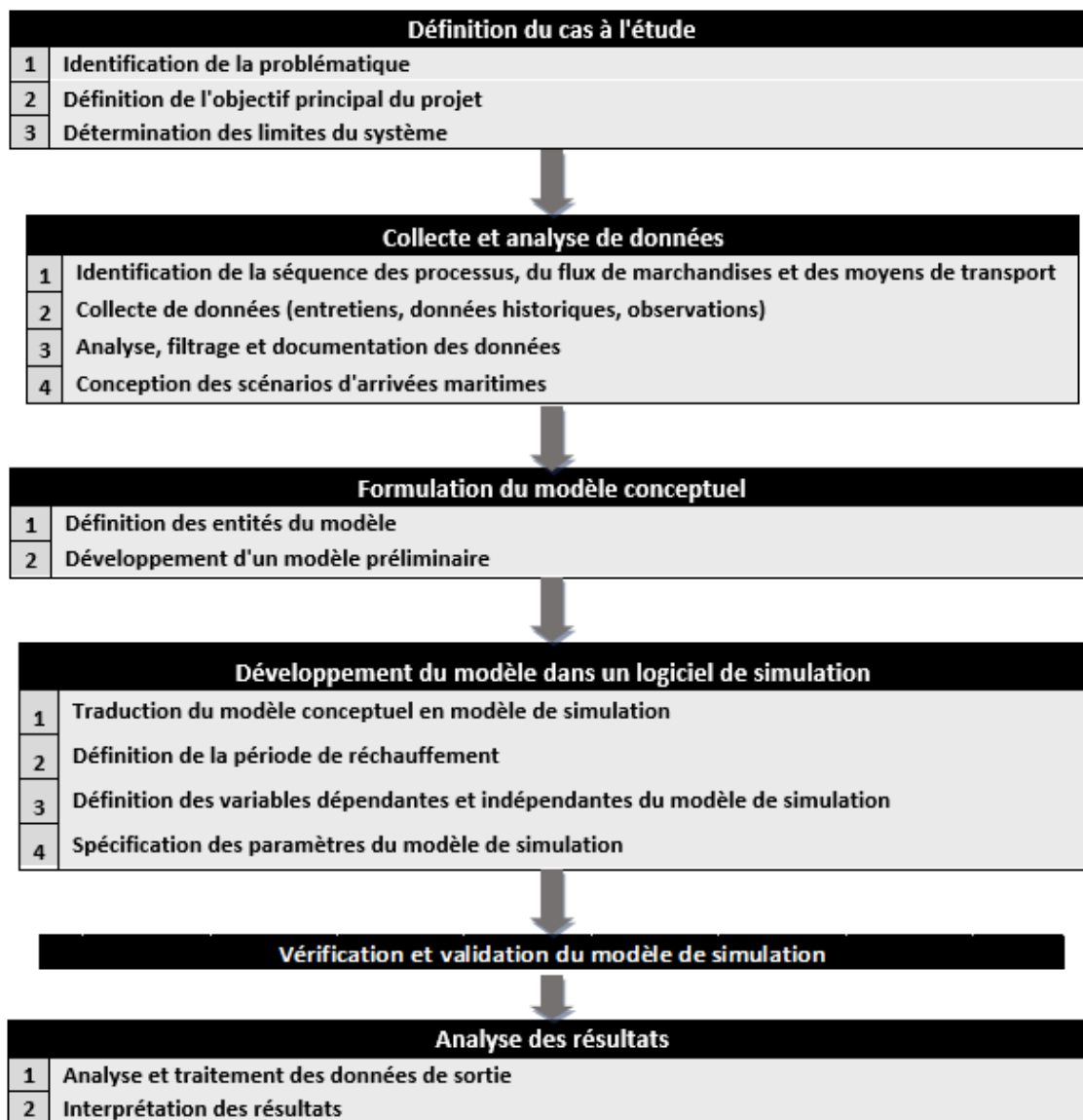


Figure 3.1 Étapes de la méthodologie

3.1. Définition du cas à l'étude

Pour mener à bien tout projet de simulation, il est avant tout nécessaire de bien définir les différents éléments entourant le cas à l'étude. L'identification de la problématique, la définition des cibles et objectifs, et la détermination des limites du système ainsi que le niveau de détail nécessaire sont tous des points à aborder lors d'échanges initiaux avec l'organisation visée par le projet. La clarification de ces éléments selon les spécifications

de l'organisation permet de cibler les besoins et les attentes au niveau des données, du modèle et des résultats recherchés. La définition du cas à l'étude est divisée en trois phases, soit :

- 1- Identification de la problématique ;
- 2- Définition de l'objectif principal du projet ;
- 3- Détermination des limites du système.

La définition du cas à l'étude du port de Trois-Rivières est présentée aux sections 1.2 à 1.4 de ce mémoire.

3.2. Collecte et analyse de données

Dans ce mémoire, la prévision de goulots et l'évaluation de la capacité sont réalisées dans un contexte de projet d'expansion et l'attention est dirigée vers les flux de marchandises et les opérations de logistiques portuaires. La méthodologie tient compte des flux d'entités de transport routiers, maritimes et ferroviaires ainsi que des opérations de chargement et déchargement au sein du port actuel et de l'expansion portuaire. Le port actuel et l'expansion sont traités séparément à l'exception de ressources partagées entre les deux zones. L'intérêt de la méthodologie proposée réside particulièrement dans la possibilité des ports de procéder à la prévision de goulots et l'évaluation de la capacité malgré des lacunes au niveau de leurs données logistiques et une faible visibilité des opérations portuaires.

La collecte et l'analyse de données sont une étape particulièrement importante dans la méthodologie proposée, puisqu'elle aborde directement le manque de visibilité des organisations et les approches mises en place pour contourner cette problématique. L'étape de collecte et d'analyse des données est divisée selon les cinq phases suivantes :

- 1- identification de la séquence des processus, du flux de marchandises et des moyens de transport ;
- 2- collecte de données (entretiens avec l'organisation, données historiques, observations sur le terrain) ;

- 3- analyse, filtrage et documentation des données ;
- 4- ajustement des distributions aux données collectées ;
- 5- conception des scénarios d'arrivées maritimes.

3.2.1. Identification de la séquence des processus, du flux de marchandises et des moyens de transport

Comme introduit à la section 1.2, le système portuaire à l'étude consiste en des infrastructures routières, ferroviaires et maritimes ainsi que diverses infrastructures de stockage distribuées sur les multiples terminaux tels que des silos, des réservoirs, des hangars et un réseau de pipelines. Considérant le large éventail de marchandises, moyens de transport et équipements pour effectuer le chargement / déchargement des différentes marchandises ainsi que le contexte de faible visibilité des opérations portuaires, il serait complexe et énergivore d'étudier chaque variation de la séquence des processus propres à chaque marchandise et chaque situation de transport. Dans cet ordre d'idée, une approche plus généraliste est adoptée pour l'identification de la séquence des processus. En effet, l'objectif du projet met davantage l'emphase sur l'aspect logistique et les flux de marchandises du système portuaire : il n'est donc pas nécessaire de couvrir en détail les différents processus associés au chargement / déchargement, à la manutention et autres opérations secondaires. Un exemple de la séquence des processus et du flux de marchandises impliquant les diverses modes de transports est illustré par la figure 3.2.

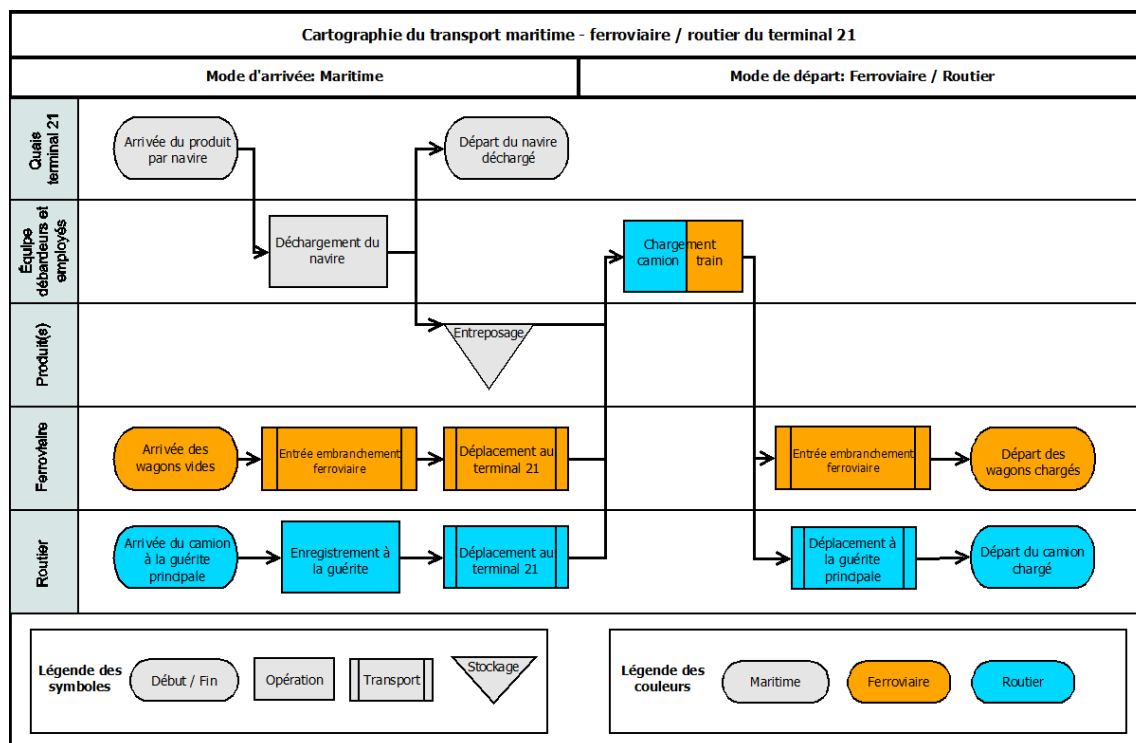


Figure 3.2 Exemple de séquences de processus du terminal 21 (adaptée de Gaudreau et al., 2016)

L'exemple de séquence des processus présenté à la section 3.2 est pour le cas d'arrivée de marchandises par navire, camion et wagon, et le départ de marchandises par camion et wagon pour des flux transitant par le terminal 21. Il est pertinent de souligner que la séquence des processus illustrée à la figure 3.2 est similaire pour le port actuel et que les flux sont bidirectionnels. La figure 3.2 est donc applicable à toutes les séquences de processus, marchandises et moyens de transport pour le port actuel et le terminal 21.

3.2.2. Collecte de données

Dans le contexte d'une organisation portuaire ayant une visibilité limitée de ses opérations, l'étape de collecte des données peut être particulièrement ardue. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour procéder à la collecte de données, soit :

- 1- Entretiens avec l'organisation et les acteurs portuaires ;
- 2- Obtention de données historiques ;
- 3- Observations et collectes de données sur le terrain.

3.2.2.1 Entretiens avec l'organisation et les acteurs portuaires

Il est attendu que l'autorité portuaire gérant le port ainsi que les acteurs portuaires œuvrant dans celui-ci ont une connaissance et maîtrise du système qui est supérieure à l'équipe de projet. Gardant ceci en tête, des entretiens préliminaires avec ces organisations permettent d'acquérir une connaissance rapide du système et de mettre en évidence les informations importantes, les situations problématiques, des hypothèses et les limitations actuelles du système. Autrement dit, ces entretiens préliminaires servent de fondation à la suite de l'étape de collecte de données. Par la suite, pendant le projet, des entretiens sporadiques et des échanges avec des personnes contacts sont un atout permettant l'obtention de réponses rapides à des problématiques et interrogations pouvant survenir à toutes les étapes du projet.

Dans le cas du port de Trois-Rivières, l'organisation principale est l'APTR, qui est responsable de la gestion du système portuaire. Cependant, plusieurs autres acteurs portuaires sont également impliqués au sein du port de Trois-Rivières. Les acteurs portuaires mentionnés sont des manutentionnaires d'envergure qui sont installés depuis plusieurs années dans le port et mènent des opérations dans des secteurs distincts. Les principaux manutentionnaires sont :

- *G3 Canada* : Entreprise facilitant les liens entre les champs canadiens et les marchés mondiaux. Société céréalière basée à Winnipeg, G3 Canada Limited exploite des installations sur des ports de l'Est du Canada ;
- *Logistec* : Chef de file dans l'exploitation de terminaux en Amérique du Nord, l'entreprise offre une gamme de service en manutention de marchandise en vrac, générale ou liée à un projet. Établie à Montréal, Logistec contribue à faire croître l'économie et prospérer les collectivités ;
- *Groupe Somavrac* : Entreprise familiale dont le siège social est situé à Trois-Rivières et se spécialisant en arrimage, entreposage, manutention et transformation, transport et distribution de produits en vrac solide et liquide pour le compte de divers secteurs de l'industrie.

Les rencontres préliminaires avec l'APTR ont permis une compréhension générale des opérations se déroulant au port de Trois-Rivières ainsi que la situation par rapport à la visibilité limitée de l'autorité portuaire. Pour ce qui est du manque de visibilité, le problème principal se situe au niveau du transport routier. En effet, l'enregistrement des camionneurs à la guérite, que ce soit manuellement ou automatiquement, ne donne pas suffisamment d'information à l'APTR pour identifier les marchandises et les flux des camions transitant au port. La seule information pertinente de ces enregistrements est les dates et heures d'entrées et de sorties, mais sans connaître les détails du transport effectué, l'analyse des données routières est très limitée. De plus, plusieurs inconsistances et erreurs telles que des enregistrements doubles ou des temps de passage excessifs sont retrouvées dans les données routières, remettant en question leur qualité. Ces éléments ont été discutés lors de rencontre avec l'APTR suite à l'analyse des données routières.

Les discussions avec l'APTR ont également mis en évidence une problématique au niveau de l'accès et du partage de données au sein du système portuaire. De par leur nature d'entreprises privées, les manutentionnaires œuvrant au sein du port limitent le partage de leurs données avec l'APTR. En effet, il y a un partage d'information de niveau administratif entre les acteurs portuaires, mais pas un partage de données d'ordre opérationnelle. Le niveau de granularité des données administratives disponibles n'offre pas le niveau de détails requis pour les besoins du projet. Cette situation accentue le manque de visibilité de l'APTR et est un frein à tout effort de collaboration afin de remédier à la situation. De plus, puisque plusieurs des infrastructures portuaires appartiennent aux manutentionnaires, l'installation de diverses technologies pour collecter des données est limitée et compliquée. Dans le même ordre d'idée, la situation actuelle fait en sorte que des entretiens avec les manutentionnaires par rapport à la collecte de données ne sont pas possibles.

Les entretiens avec l'APTR ont également permis de clarifier plusieurs éléments touchant au transport ferroviaire. En premier lieu, un total de quatre convois ferroviaires circule dans le système portuaire quotidiennement. Sur la plage horaire de 7 AM, une locomotive

entre au port avec un convoi entrant et par la suite quitte avec un autre convoi sortant. L'opération est répétée sur la plage horaire de 11 PM avec un convoi entrant et sortant. En second lieu, l'APTR explique que les transports ferroviaires sont réalisés du lundi au vendredi, excluant ainsi les journées de samedi et dimanche. En troisième lieu, il a été estimé par l'APTR que la limite du nombre de wagons pouvant être présent sur le terminal 21 au même moment est de 80 wagons. Finalement, trois seuils limitant la grandeur des convois ferroviaires sont définis pour l'embranchement ferroviaire reliant le réseau ferroviaire interne du port avec celui de l'opérateur ferroviaire local. Les trois seuils sont illustrés à la figure 3.3.

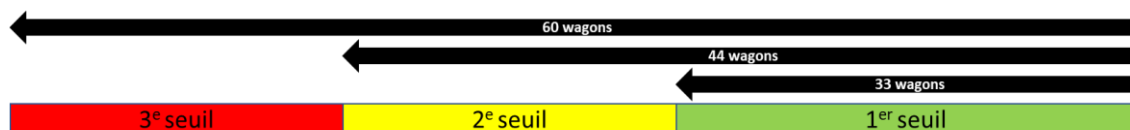


Figure 3.3 Seuils de l'embranchement ferroviaire

Le premier seuil représente le parcours entre la barrière ferroviaire et la cour de triage à l'intérieur du port. Idéalement, l'APTR souhaite que les convois ferroviaires demeurent à l'intérieur de ce seuil par souci de sécurité et sûreté. Le deuxième seuil représente le parcours entre la limite du stationnement du bâtiment de croisière AML et la barrière ferroviaire du port. Le dépassement d'un convoi ferroviaire dans ce deuxième seuil est problématique, car le convoi déborde dans le centre-ville de Trois-Rivières, étant ainsi un inconvénient et un risque pour la population. Le troisième seuil représente le parcours entre le stationnement du bâtiment de croisière AML et la limite du tunnel à l'est du centre-ville. Le dépassement d'un convoi ferroviaire dans ce seuil final est particulièrement problématique puisque les rails du tunnel ne sont pas entretenus et que l'inconvénient et le risque posé au public est non négligeable.

3.2.2.2 Obtention de données historiques

L'acquisition de données historiques est l'approche la plus rapide et directe pour obtenir un large éventail de données d'une organisation. Cependant, en contrepartie pour cette rapidité d'accès aux données, l'équipe de projet n'a pas de contrôle sur le processus de

prise de données et la structure de la base de données. De plus, il y a la possibilité de retrouver des erreurs et des limitations potentielles. Les données acquises de cette manière doivent donc être étudiées attentivement afin de confirmer leur validité et leur utilisation potentielle dans le cadre du projet.

Pour le projet à l'étude, les données fournies par l'APTR peuvent être séparées en trois catégories, soit :

Prévisions des flux du terminal 21 ;

Données historiques ;

Prévisions des flux du port actuel.

La première catégorie, soit les prévisions des flux du terminal 21, comprend les données touchant aux familles de produits prévues pour le nouveau terminal ainsi qu'une estimation annuelle des flux de navires, camions, wagons et marchandises transitant dans le terminal cinq ans après sa construction, soit une période à laquelle ce dernier serait en mesure de fonctionner à pleine capacité. Le tableau 3.1 illustre les données touchant aux prévisions annuelles du terminal 21.

Tableau 3.1 Prévisions du terminal 21

#	Description	Sens	Navire	Wagon	Camion	Tonnage
1	Pâte et granules de bois	OUT	5	-	5 000	150 000
2	Fertilisants	IN	4	1 111	833	125 000
3	Concentré de minerais	IN	5	-	3 067	92 000
4	Concentré de minerais	OUT	14	3 222	-	290 000
5	Poutres et plaques d'acier	IN	35	-	5 433	163 000
6	Pièces surdimensionnées	IN	3	-	6 667	200 000
7	Sel industriel et de route	IN	6	-	3 000	190 000
8	Sel industriel et de route	OUT	3	-	-	90 000
9	Grains et céréales	OUT	17		9 000	270 000

Une précision à apporter au tableau 3.1 est que le sens des flux indiqués est celui des navires. Un flux « IN » indique donc un navire entrant tandis qu'un flux « OUT » indique un navire sortant. Les prévisions annuelles du terminal 21 sont simplistes, mais suffisantes

à première vue pour un modèle de simulation, sauf pour la première famille « Pâte et granules de bois », puisqu'aucun flux historique de ce produit est enregistré dans la base de données de l'APTR, contrairement aux autres produits. Afin de solutionner la problématique mentionnée précédemment, des paramètres de familles apparentées à la famille 1 ont été utilisés comme intrant au modèle de simulation pour ce cas particulier. En effet, les discussions avec l'APTR ont permis d'établir que par la nature des produits transportés, le temps de transit de la famille 1 devrait être similaire à celui de la famille 4. Pour ce qui est de la répartition du tonnage annuel de la famille 1, elle est basée sur la répartition du tonnage annuel de la famille 11, soit l'ensemble de la marchandise à flux sortant du port actuel.

La deuxième catégorie, soit les données historiques du port de Trois-Rivières, comprend l'ensemble des données maritimes, routières et ferroviaires allant jusqu'aux 20 dernières années d'opération du port.

Les données historiques des flux maritimes sont les données les plus complètes et détaillées de l'APTR. Tous les détails concernant les navires, leur origine, leur largeur, le tirant d'eau, le produit transporté, etc. sont couverts en détail dans la base de données de l'APTR. La majorité des données sont entrées manuellement dans un fichier Excel par le maître de port. Pour les besoins du projet, les données d'intérêts sont limitées aux heures et dates d'entrée et de sortie des navires ainsi que les produits transportés, le sens des transports, et le tonnage de chaque cargaison. Un aperçu des données historiques d'intérêts des flux maritimes est illustré à la figure 3.4.

Année	SequenceNumber	ArrivalDate	DepartureDate	temps	ProductType	Product	Quantity	MoveIn	MoveOut	Tonnage/h
2015	2015-0038	2015-02-13 18:00	2015-02-19 17:15	143	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	11005	VRAI	FAUX	77,0
2015	2015-0218	2015-08-24 03:50	2015-08-26 19:10	64	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	8593	VRAI	FAUX	134,3
2015	2015-0268	2015-10-04 16:50	2015-10-06 16:00	48	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	7699	VRAI	FAUX	160,4
2015	2015-0279	2015-10-12 22:35	2015-10-14 07:30	33	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	7696	VRAI	FAUX	233,2
2015	2015-0282	2015-10-14 10:25	2015-10-17 00:45	62	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	8145	VRAI	FAUX	131,4
2015	2015-0285	2015-10-16 20:30	2015-10-21 21:54	121	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	12646	VRAI	FAUX	104,5
2015	2015-0332	2015-11-25 13:10	2015-11-27 03:15	38	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	7641	VRAI	FAUX	201,1
2015	2015-0344	2015-12-05 02:25	2015-12-08 19:00	89	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	9065	VRAI	FAUX	101,9
2015	2015-0347	2015-12-14 11:00	2015-12-16 04:48	41	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	4489	VRAI	FAUX	109,5
2016	2016-0050	2016-03-13 23:18	2016-03-17 20:30	93	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	2980	VRAI	FAUX	32,0
2016	2016-0050	2016-03-13 23:18	2016-03-17 20:30	93	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	2980	VRAI	FAUX	32,0
2016	2016-0050	2016-03-13 23:18	2016-03-17 20:30	93	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	5960	VRAI	FAUX	64,1
2016	2016-0095	2016-05-30 05:53	2016-06-03 19:40	110	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	13746	VRAI	FAUX	125,0
2016	2016-0140	2016-07-26 16:52	2016-07-29 17:35	73	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	8800	VRAI	FAUX	120,5
2016	2016-0222	2016-10-13 22:19	2016-10-18 21:47	119	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	12317	VRAI	FAUX	103,5
2016	2016-0264	2016-11-14 16:30	2016-11-16 20:10	52	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	7537	VRAI	FAUX	144,9
2016	2016-0269	2016-11-20 15:50	2016-11-22 20:40	53	fr:Vrac solide,en:Dry bulk	fr:Fertilisants	6081	VRAI	FAUX	114,7

Figure 3.4 Aperçu des données historiques d'intérêts des flux maritimes

D'une façon similaire aux données maritimes, les données historiques des flux ferroviaires sont également détaillées. Les données sont entrées automatiquement dans un fichier Excel par l'extraction d'information contenue dans des courriels provenant des Chemins de Fer Québec-Gatineau (CFQG). Pour les besoins du projet, les données d'intérêts sont limitées aux heures et dates d'entrées et de sortie des wagons ainsi que les produits transportés, le sens des transports, et le tonnage de chaque cargaison. Un aperçu des données historiques d'intérêts des flux ferroviaires est illustré à la figure 3.5.

TicketID	Car	Date_IN	Date_OUT	Contenu_IN	Marchandise_IN	Type_IN	Poids_IN	Contenu_OUT	Marchandise_OUT	Type_OUT	Poids_OUT
161395	CP388929	2019-12-31 19:28	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	97,13692156
161394	CN376684	2019-12-31 19:28	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	97,93070915
161396	PCN003043	2019-12-31 19:28	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	97,95338879
161393	PCN003023	2019-12-31 19:27	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	98,9059339
161390	PCN003031	2019-12-31 19:26	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	98,1575056
161392	PCN003041	2019-12-31 19:26	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	98,72449674
161391	PCN003025	2019-12-31 19:26	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	97,95338879
161387	CN376601	2019-12-31 19:24	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	97,52247553
161389	PCN003017	2019-12-31 19:24	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	98,33894277
161388	PCN003010	2019-12-31 19:24	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	98,99665248
161384	CNIS376077	2019-12-31 19:23	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	89,22172529
161385	CNLX007624	2019-12-31 19:23	2020-01-03 02:03	NULL	NULL	NULL	NULL	ALUMINA,CALCIN	NULL	NULL	95,93490035

Figure 3.5 Aperçu des données historiques d'intérêts des flux ferroviaires

En ce qui a trait aux données routières, les données historiques des flux routiers sont les moins détaillées de l'APTR. La base de données des flux ferroviaires combine les entrées automatiques des camionneurs réguliers ayant une carte d'accès du port de Trois-Rivières et les entrées manuelles des camionneurs n'ayant pas de carte d'accès et devant s'enregistrer manuellement à l'entrée et à la sortie du port. Les données routières sont limitées et ne permettent pas, en général, de déterminer le produit et la destination du camionneur. Le tonnage étant également une donnée inconnue, les données d'intérêts se limitent aux dates et heures d'entrée et de sortie des camionneurs. Un aperçu des données historiques d'intérêts des flux routiers est illustré à la figure 3.6.

TruckTic	CardNumber	LastName	FirstName	InTime	OutTime	Marchandise	Move	EntryMethods
1083373	NULL	Lessard	Jean Guy	2017-12-01 07:09:31.757	2017-12-01 08:33:54.257	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083378	NULL	Descoteaux	Ghislain	2017-12-01 07:37:16.713	2017-12-01 09:00:41.070	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083380	NULL	Isabelle	Christian	2017-12-01 07:48:23.193	2017-12-01 09:28:11.837	Acier Logistec	Chargement	Manuelle
1083381	NULL	Nadeau	Sylvain	2017-12-01 07:51:38.240	2017-12-01 09:53:13.043	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083387	NULL	Gravel	Sylvain	2017-12-01 08:01:03.427	2017-12-01 09:19:26.487	Acier Logistec	Chargement	Manuelle
1083393	NULL	Lessard	Jean Guy	2017-12-01 09:16:27.000	2017-12-01 09:37:13.817	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083400	NULL	Descoteaux	Ghislain	2017-12-01 09:40:45.413	2017-12-01 10:50:31.713	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083401	NULL	Beaulieu	Michel	2017-12-01 09:45:34.643	2017-12-01 10:03:04.327	Sel de déglacag	Chargement	Manuelle
1083403	NULL	Nadeau	Sylvain	2017-12-01 09:53:34.683	2017-12-01 10:39:20.850	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083407	NULL	Lessard	Jean Guy	2017-12-01 10:38:42.257	2017-12-01 10:57:35.333	Autres	Déchargeme	Manuelle
1083410	NULL	Savoie	Michel	2017-12-01 10:58:48.430	2017-12-01 12:28:55.593	Autres	Chargement	Manuelle

Figure 3.6 Aperçu des données historiques d'intérêts des flux routiers

La troisième catégorie, soit les prévisions des flux du port actuel, couvre les prévisions des flux réalisés par l'APTR pour le port actuel. La structure des prévisions de l'APTR pour le port actuel est similaire aux prévisions pour le terminal 21, mais pour un éventail de produits plus large. Ces données présentent de manière concise les flux annuels de navires, de wagons, de camions et de marchandises. Un résumé des prévisions est illustré au tableau 3.2.

Tableau 3.2 Résumé des prévisions du port actuel

#	Description	Sens	Navire	Wagon	Camion	Tonnage
10	Port actuel flux entrants	IN	200	8 476	46 702	2 178 948
11	Port actuel flux sortants	OUT	50	2 187	14 459	644 551

3.2.2.3 Observations et collectes de données sur le terrain

Dans le cas où les entretiens avec les organisations et l'obtention de données historiques ne sont pas suffisants pour les besoins du projet, la dernière approche disponible sont les observations et collectes de données sur le terrain. Dans le contexte de ce projet, l'observation sur le terrain aurait été une bonne approche pour obtenir davantage de visibilité et de données sur les transports ferroviaires et routiers. Cependant, la complexité de suivre les camions et wagons de leur entrée jusqu'à leur sortie du port, la quantité importante de temps et de travail qui devrait être consacrée à cette tâche et la situation sanitaire exceptionnelle causée par la pandémie de Covid 19 ont fait en sorte que les observations et collectes de données sur le terrain n'étaient pas une approche disponible dans le cadre du projet.

3.2.3. Analyse, filtrage et documentation des données

L'analyse, filtrage et documentation des données englobent l'ensemble du travail réalisé pour comprendre, organiser et préparer les données pour leur utilisation future dans le cadre du projet. À cette étape, les données sont étudiées afin de déterminer leur utilité et également repérer des erreurs ou limitations potentielles, particulièrement dans le cas des données fournies par l'organisation puisque l'équipe de projet n'a pas participé au processus de collecte de celles-ci. C'est également à cette étape que doivent être prises

des décisions affectant le développement du modèle de simulation en fonction des données disponibles, valides et utilisables. En effet, un manque de données, une quantité non négligeable d'erreurs et d'autres limitations peuvent limiter l'utilisation de certaines données et mener l'équipe de projet à prendre des décisions et poser des hypothèses afin d'ajuster le développement du modèle aux données disponibles.

Dans le cadre du projet, les données peuvent être séparées en données routières, ferroviaires et maritimes. L'analyse, le filtrage et la documentation des données sont donc réalisés séparément pour chaque moyen de transport, puisque chaque catégorie de données a ses propres particularités et limitations. Par la suite, une courte synthèse de l'analyse de l'ensemble des données est réalisée afin de confirmer quelles données seront utilisées pour la suite du projet. Les intrants tels que les temps de transit et le nombre d'unités entrantes par jours sont également réunis et présentés de façon concise dans la section synthèse.

3.2.3.1 Données routières

Au niveau du transport routier, les données historiques fournies par l'APTR couvrent les flux routiers entre 2015 et 2019. Une particularité importante des données routières de l'APTR est que celles-ci peuvent être séparées en deux catégories, soit les entrées manuelles et les entrées automatiques. Les camionneurs circulant régulièrement dans le port ont une carte d'accès qui enregistre automatiquement des données telles que la date d'entrée, le nom du chauffeur, et le point d'entrée dans le port. Pour les besoins du modèle, les données automatiques sont difficilement utilisables. En effet, le temps de transit, la marchandise transportée et le type de transport (chargement / déchargement) sont tous inconnus. Après analyse de ces données, le manque d'information de base rend l'utilisation des données d'entrées automatiques inutilisables dans le cadre du projet.

Dans le cas des camionneurs ne possédant pas de carte d'accès, ces derniers doivent s'enregistrer manuellement à la guérite à leur entrée et sortie du port. Les données obtenues par l'enregistrement manuel des camionneurs sont beaucoup plus détaillées que les données émanant des enregistrements automatiques. Les principales données d'intérêts sont les dates et heures d'entrée et de sortie, les marchandises transportées et le type de

transport réalisé. Une particularité propre aux données entrées manuellement est les erreurs de saisie des camionneurs. Plusieurs instances de doublons ont été remarquées dans les données, où un camionneur a entré à deux reprises les informations associées à son transport, mais avec une valeur erronée de date et heure d'entrée ou de sortie. Ces erreurs sont repérables par des temps de transit excessivement court ou long, ou par la présence de temps de transit négatifs. Afin d'éliminer les erreurs de ce genre, les transports avec des temps de transit excessivement courts et longs ont été retirés des données historiques utilisées dans le projet. Tout transport de moins de 9 minutes ainsi que de plus de 24 heures a été retiré des données historiques.

Puisqu'une large proportion des données routières, soit les entrées automatiques, ne sont pas utilisables dans le cadre du projet, il n'est pas possible de déterminer une distribution valide des entrées de camions au sein du port. Dans le même ordre d'idées, les données d'entrées manuelles sont limitées, en particulier lorsque celles-ci sont séparées par famille de produits pour le terminal 21, faisant en sorte que l'estimation de temps de transit par famille de produit n'est pas possible avec les données routières actuelles. Considérant les limitations susmentionnées, la détermination de distributions d'arrivées pour les transports routiers est mise de côté. De plus, les données routières sont regroupées et divisées en familles « chargement » et « déchargement » afin de déterminer des temps de transit pour chacune de ces catégories. Cette approche réduit les limitations du manque de données pour certains produits en séparant les données en deux catégories.

Avec les données routières disponibles, les temps de transit ainsi que le nombre de camions entrant par jour sont déterminés pour les catégories de chargement et de déchargement. Le temps de transit est calculé en effectuant la différence entre la date et heure de sortie et la date et heure d'entrée du camionneur. Cette approche permet de connaître le temps de transit d'un camion au sein du système portuaire, mais ne fait pas la distinction entre le temps de déplacement, le temps d'attente et le temps de chargement / déchargement. Cette limitation est à prendre en compte dans le modèle de simulation afin d'éviter d'appliquer une attente supplémentaire aux camions puisque le temps d'attente

est déjà compris dans le temps de transit total. Pour ce qui est du nombre de camions entrant par jour, la moyenne et l'écart-type ont été calculés pour les catégories de chargement et déchargement et sont présentés au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Moyenne et écart-type du nombre de camions entrant par jour (données manuelles)

Camions entrant par jour		
Catégorie de transport routier	Moyenne	Écart-type
Chargement	16,74	18,1
Déchargement	14,65	16,12

Cependant, les moyennes et écarts-types illustrés au tableau 3.3 sont valides seulement pour les flux routiers provenant des enregistrements manuels des camionneurs. L'absence des flux issus des enregistrements automatiques doit être prise en considération puisque le nombre de camions entrant par jour est possiblement sous-estimé. Cette problématique fait l'objet d'une investigation plus approfondie en comparant le nombre de camions entrants enregistrés manuellement entre les années 2015 et 2019 et le nombre de camions prévus dans les prévisions de l'APTR pour le port actuel. Le tableau 3.4 illustre le nombre de camions transitant au port par année pour les enregistrements manuels.

Tableau 3.4 Nombre de camions par année (données manuelles)

Année	Nombre de camions (chargement)	Nombre de camions (déchargement)	Total
2015	3936	1845	5781
2016	3333	3939	7272
2017	3905	4483	8388
2018	5558	3611	9169
2019	7629	3729	11358
Moyenne	4872	3521	8394
Écart-type	1750	995	2090

En comparant le nombre de camions transitant au port entre 2015 et 2019, et la prévision du nombre de camions qui transiteront dans le port actuel présentée au tableau 3.2, on

constate le large écart entre le nombre de camions prévus pour le port actuel et le nombre de camions enregistrés manuellement entre les années 2015 et 2019. Cet écart est également confirmé par l'APTR, qui explique que la majorité des camionneurs circulant dans le port possède une carte d'accès pour les enregistrements automatiques. À la vue de ces éléments et considérant une répartition inégale des camionneurs sans carte parmi les familles du port actuel, il est jugé impossible d'utiliser les données historiques afin d'estimer le nombre de camions entrant par jour au port et d'utiliser une distribution comme intrant des arrivées de camions dans le modèle de simulation.

3.2.3.2 Données ferroviaires

Au niveau du transport ferroviaire, les données historiques fournies par l'APTR couvrent les flux ferroviaires entre 2011 et mi-2020. Des discussions avec l'APTR ont révélé que les données ferroviaires plus anciennes étaient moins fiables. Il a donc été décidé de limiter l'analyse de données aux cinq dernières années complètes, soit entre 2015 et 2019. L'analyse des données ferroviaires a permis de constater que celles-ci étaient beaucoup plus complètes et détaillées que les données routières, mais contenaient tout de même quelques erreurs. En effet, même si les données ferroviaires sont obtenues automatiquement par la lecture des courriels de CFQG, le processus de collecte de données demeure obscur et n'est pas à l'abri d'erreurs humaines. Les erreurs étant rares, celles-ci sont identifiables par la présence de transports impossibles ou des temps de transit excessivement courts ou longs. Par des transports impossibles, on désigne tout transport ne pouvant pas être réalisé selon l'APTR. Un exemple concret est un wagon d'alumine entrant dans le port dans un contexte où tous les transports ferroviaires d'alumine sont exclusivement sortants. Comme pour les transports routiers, les transports ferroviaires avec des temps de transit négatifs, excessivement courts ou longs ont été retirés des données historiques pour la suite du projet. La présence de doublons dans les données ferroviaires a également été remarquée lors de l'analyse et la validation des données historiques. Puisque chaque instance de transport ferroviaire est associée à un identifiant unique dans une colonne « TicketID », les doublons ont pu rapidement être

retirés en filtrant les données historiques afin de mettre en évidence des identifiants ayant plus d'une occurrence.

Similairement aux données routières, les temps de transit des wagons sont déterminés en effectuant la différence entre la date et heure de sortie et d'entrée de ceux-ci. Les données n'offrant pas davantage d'information sur les différentes opérations ferroviaires au sein du port, le temps de déplacement, le temps d'attente et le temps de chargement / déchargement ne sont pas différenciés dans le temps de transit général du wagon.

Les données ferroviaires sont séparées en quatre familles distinctes, soit :

- Port actuel entrant (chargement) ;
- Port actuel sortant (déchargement) ;
- Spodumène (déchargement – terminal 21) ;
- Fertilisant (chargement – terminal 21).

Les deux premières familles touchent à l'ensemble des données historiques des flux ferroviaires entre les années 2015 et 2019 séparées en chargement et déchargement, tandis que les deux dernières familles touchent aux produits du terminal 21 requérant du transport ferroviaire. Les données utilisées pour les deux dernières familles sont basées sur les données historiques de produits similaires ayant circulé dans le port. Il est nécessaire de souligner que les données historiques pour le spodumène et le fertilisant sont limitées. En effet, entre 2015 et 2019, seulement 193 wagons de spodumène et 58 wagons de fertilisant ont transité par le port. N'ayant pas de source de données alternatives pour ces familles de produits, ces données sont utilisées avec la possibilité, au besoin, d'ajustements futurs à partir d'hypothèses discutées avec l'APTR.

Le nombre de wagons entrants et sortants par jour est déterminé avec la même méthode que pour le nombre de camions par jour. Cependant, certaines distinctions entre les deux types de transports doivent être prises en compte. Contrairement aux camions pouvant entrer à divers moments au cours de la journée, l'entrée des wagons est dictée par les deux convois ferroviaires en AM et en PM. Le nombre de wagons par convois ainsi que le

moment de la journée est donc à prendre en compte dans l'analyse des données ferroviaires. Les profils d'entrées de wagons au cours de la journée ont donc été réalisés pour les quatre familles de données ferroviaires et sont présentés aux figures 3.7, 3.7, 3.9 et 3.10.

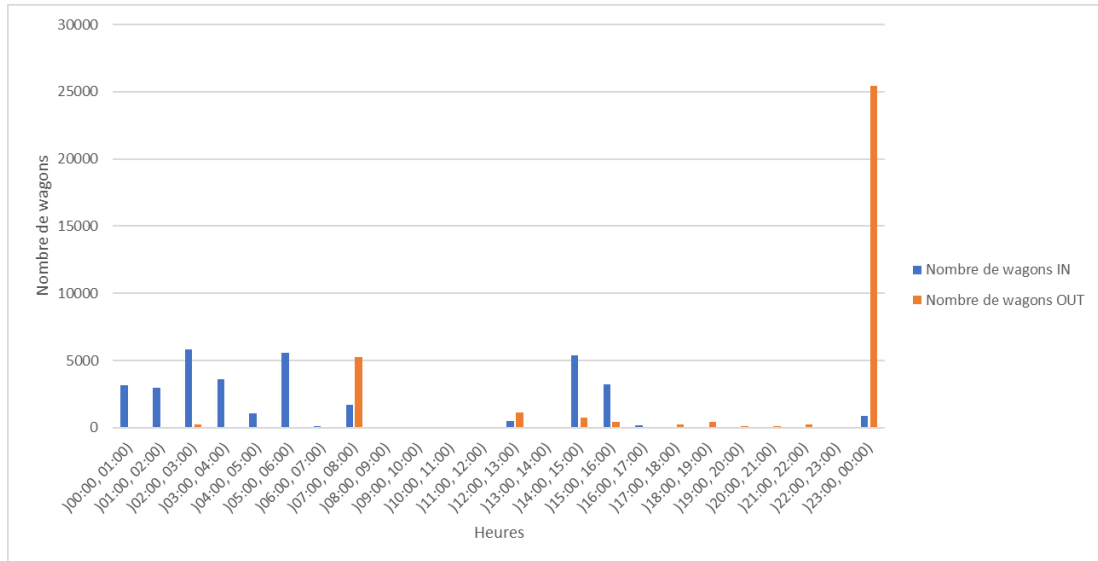


Figure 3.7 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (chargement port actuel)

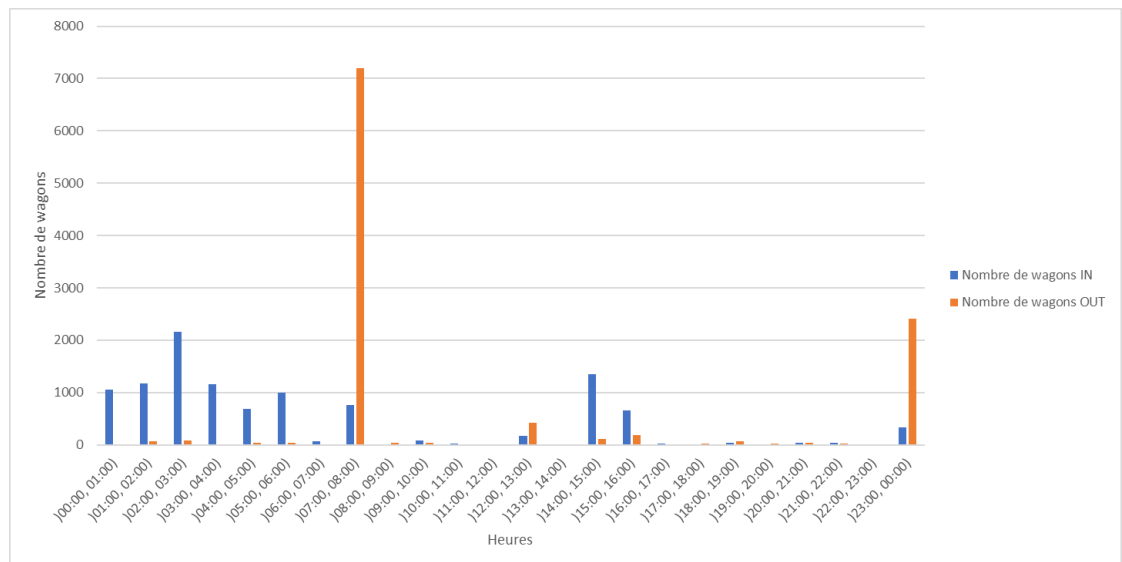


Figure 3.8 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (déchargement port actuel)

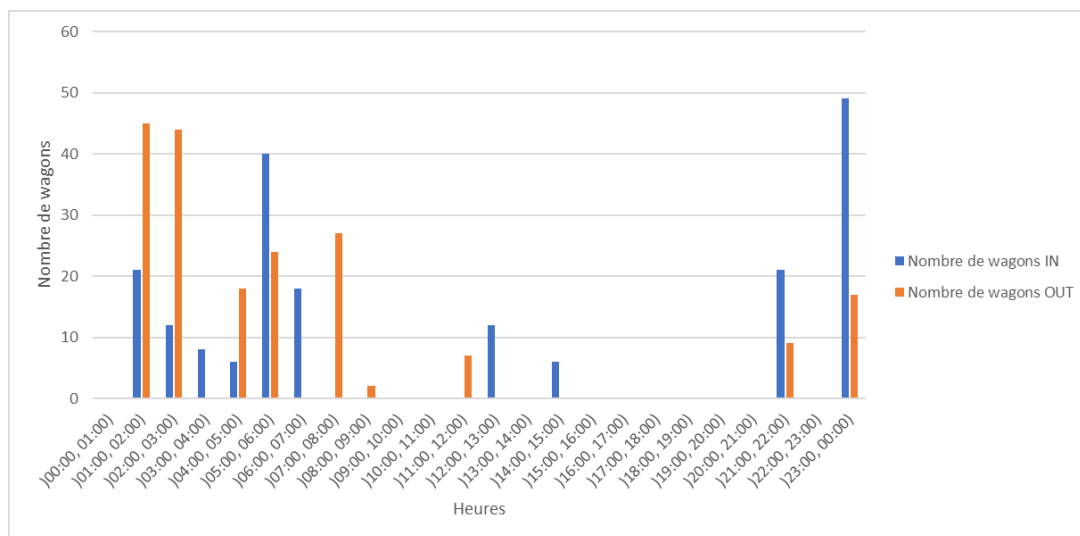


Figure 3.9 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (spodumène terminal 21)

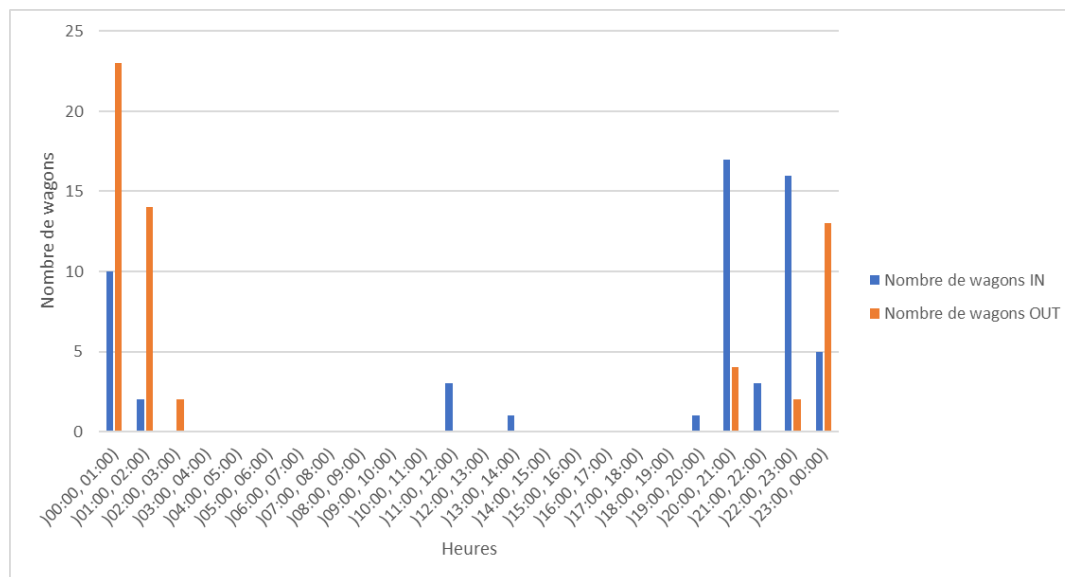


Figure 3.10 Wagons entrants et sortants en fonction de l'heure (fertilisant terminal 21)

On remarque que même si les wagons sont censés entrer et sortir par convoi vers 7h et vers 23h, les données historiques des temps d'enregistrement illustrent des entrées et sorties éparpillées au cours de la journée. Ceci peut être expliqué par des imprécisions ou des délais dans l'heure d'enregistrement des wagons à leur arrivée et leur sortie. Gardant cette particularité en tête, les wagons peuvent être classés en convoi AM ou PM en fonction de leur heure d'entrée. Les wagons entrant entre 7h et 23h sont classés comme

faisant partie du convoi AM tandis que les wagons entrant entre 23h et 7h sont classés comme faisant partie du convoi PM. Il en est de même pour les wagons sortants. Cette approche permet de calculer la proportion de wagons dans les convois AM et PM pour les quatre familles de transports ferroviaires analysées comme présenté au tableau 3.5.

Tableau 3.5 Proportion de wagons dans les convois AM et PM

Famille de données ferroviaires	Convoi	
	AM	PM
Port actuel entrant (chargement)	33,41%	66,59%
Port actuel sortant (déchargement)	29,76%	70,24%
Spodumène (déchargement - terminal 21)	20,21%	79,79%
Fertilisant (chargement - terminal 21)	70,69%	29,31%

Les proportions calculées peuvent par la suite être utilisées pour faire l'allocation des wagons quotidiens dans les convois AM et PM.

3.2.3.3 Données maritimes

De l'ensemble des données collectées dans ce projet, les données historiques maritimes sont les plus complètes et détaillées. En effet, à la différence des données routières et ferroviaires, aucun doublon, erreur, ou limitation a été observé durant l'analyse des données maritimes. Des données maritimes peuvent être extraites l'information permettant de déterminer la quantité de marchandise chargée et déchargée au port par les navires ainsi que le temps demeuré à quai. Trois informations de transit sont obtenues suite au traitement des données, soit le temps à quai, la quantité chargée ou déchargée et le débit de chargement / déchargement. La moyenne et l'écart-type de ces trois éléments sont calculés pour chaque produit du terminal 21 ainsi que le port actuel à partir des données historiques entre 2015 et 2020. Comme complément aux moyennes et écarts-

types calculés, des histogrammes et des diagrammes en boîtes ont également été réalisés afin de représenter les distributions des temps de transit, les quantités de marchandises, et les débits de chargement et déchargement. Ces distributions ont ensuite été utilisées afin de repérer si les données suivent une loi statistique permettant de modéliser simplement les paramètres de transit en intrant du modèle. Il est rapidement devenu évident que malgré la fiabilité des données maritimes, celles-ci contenaient des données aberrantes. Un exemple de ces données aberrantes est illustré pour les flux maritimes entrants du port actuel aux figures 3.11, 3.12 et 3.13.

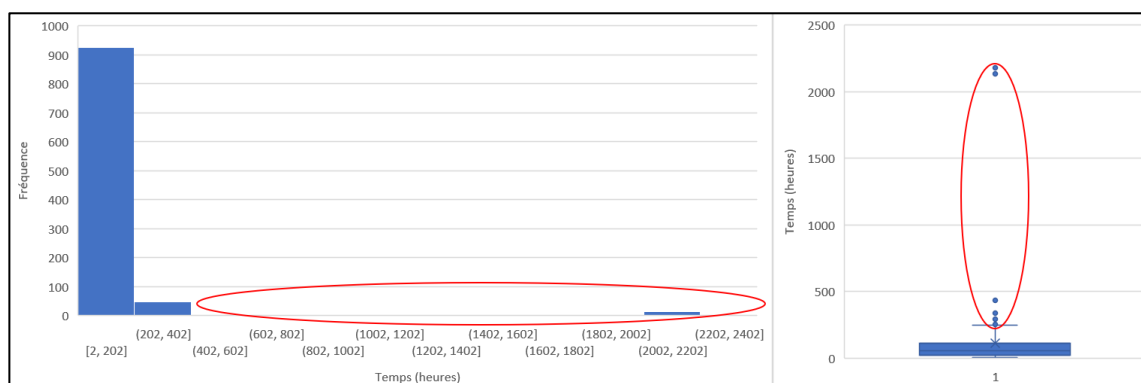


Figure 3.11 Distribution des temps de transit des flux maritimes entrants du port actuel (données aberrantes)

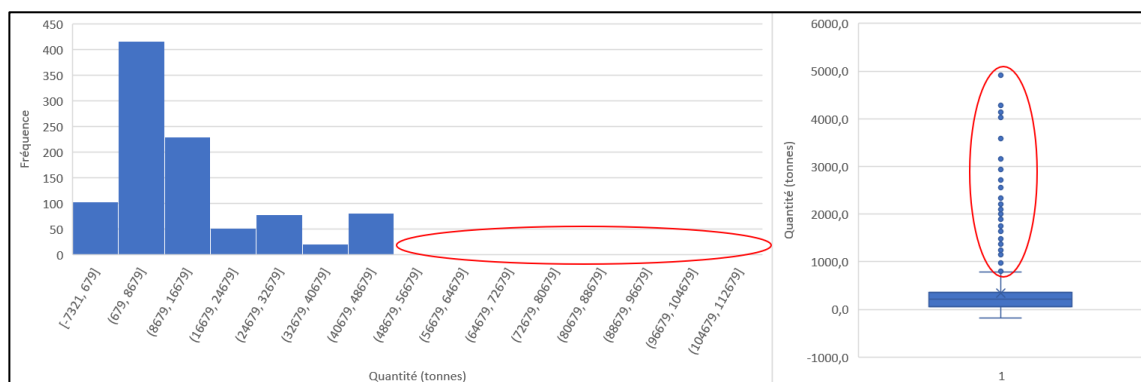


Figure 3.12 Distribution des quantités des flux maritimes entrants du port actuel (données aberrantes)

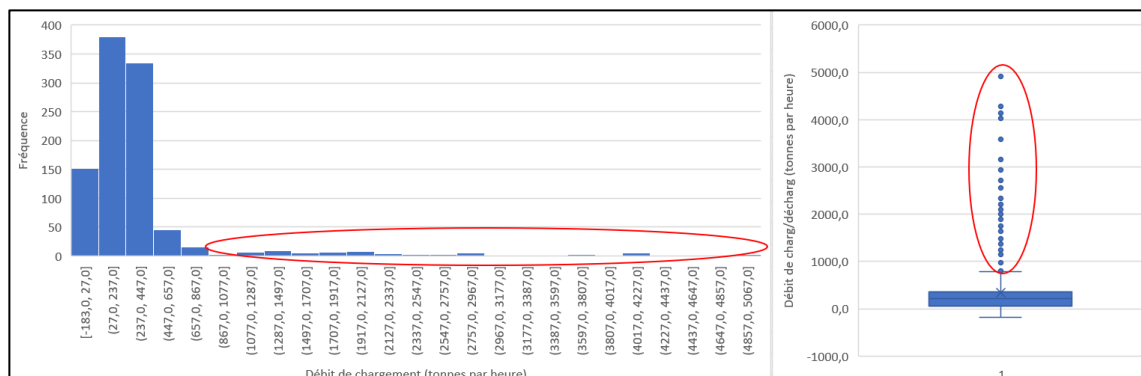


Figure 3.13 Distribution des débits de déchargement des flux maritimes entrants du port actuel (données aberrantes)

Afin de retirer les données aberrantes, soit les données excessivement élevées s'écartant de la norme comme illustré aux figures précédentes, un deuxième traitement des données historiques a été réalisé pour toutes les familles du terminal 21 ainsi que le port actuel, dont les données sont séparées en flux de marchandises entrants et sortants. Ce traitement supplémentaire permet d'obtenir des moyennes et écarts-types sans l'influence de données extrêmes. Les figures 3.14, 3.15 et 3.16 reprennent l'exemple des flux maritimes entrants du port actuel, mais sans les données aberrantes.

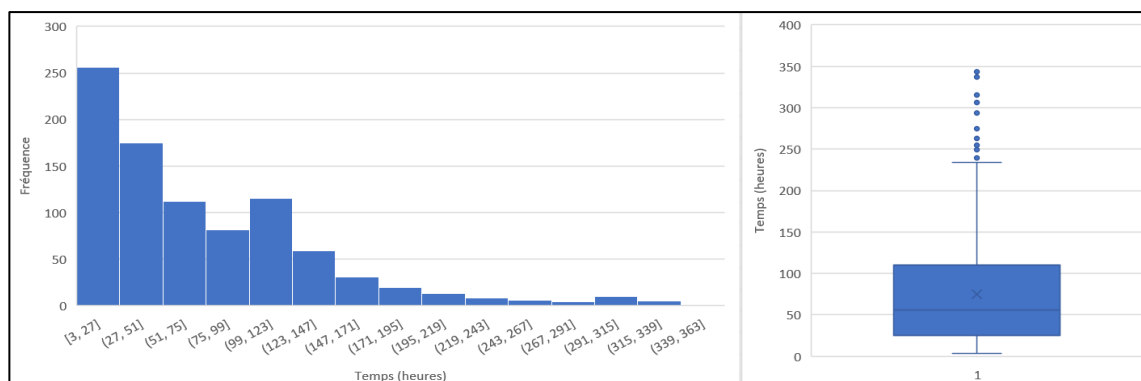


Figure 3.14 Distribution des temps de transit des flux maritimes entrants du port actuel

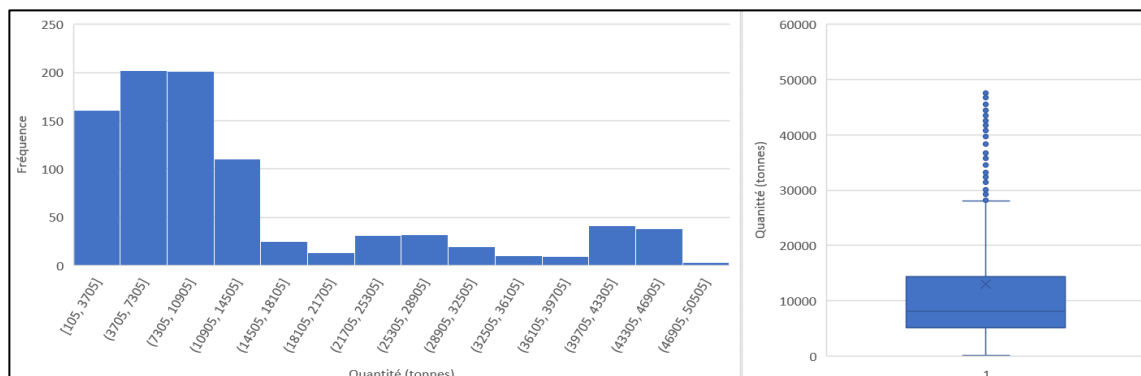


Figure 3.15 Distribution des quantités des flux maritimes entrants du port actuel

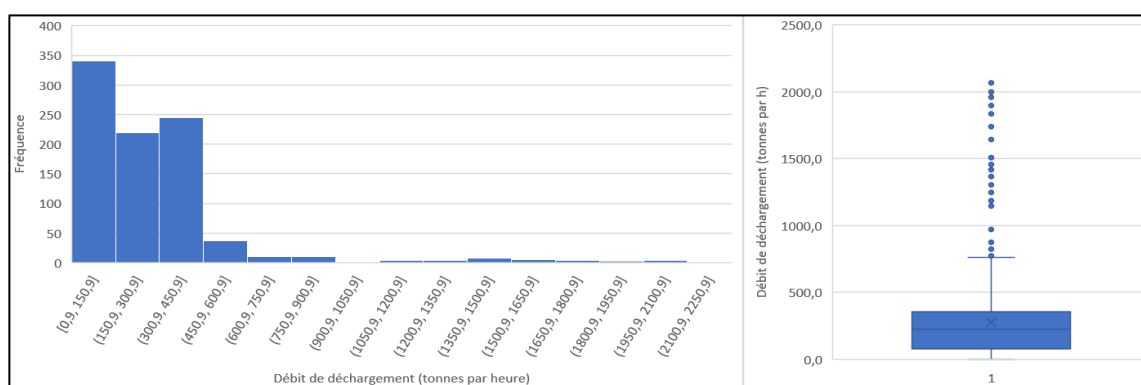


Figure 3.16 Distribution des débits de déchargement des flux maritimes entrants du port actuel

Les distributions des familles du terminal 21 et des flux maritimes sortants du port actuel sont incluses dans l'annexe 1 du mémoire. Les résultats de l'analyse des données historiques maritimes pour le temps de transit, la quantité et le débit de chargement / déchargement sont présentés aux tableaux 3.6, 3.7 et 3.8. Afin d'être concis, les flux maritimes entrants et sortants du port actuel, soit le port dans son ensemble, sont identifiés par les familles 10 et 11 respectivement.

Tableau 3.6 Temps de transit des flux maritimes

Temps de transit (heures)					
Famille	Moyenne	Écart-type	Nombre de navires	Min	Max
2	101,1	48,8	53	29	218
3	104,9	56,2	74	23	263
4	92,2	39,4	56	40	189
5	95,7	37,4	131	23	176
6	89,3	38,8	12	35	143
7	46	42,3	61	2	162
8	41,8	10,1	22	28	69
9	85,2	47,2	130	16	210
10	74,7	63,5	895	3	343
11	83,3	58,9	338	13	381

Tableau 3.7 Quantité de marchandise des flux maritimes

Quantité (tonnes)					
Famille	Moyenne	Écart-type	Nombre de navires	Min	Max
2	8828,2	4376,4	53	1500	19984
3	15269,3	7813,2	74	480	33240
4	10443,6	537,6	56	9281	11648
5	2240,8	2188,6	131	2	7395
6	12776,7	9064,7	12	1989	26940
7	25071,4	12194,7	61	-	45000
8	28346,6	1937,1	22	24016	31155
9	20513,9	10345,1	130	4004	38610
10	13013,7	12450,5	895	105	47877
11	14864,9	10719,3	338	144	48069

Tableau 3.8 Débit de chargement / déchargement des flux maritimes

Débit de chargement / déchargement (tonnes par heure)					
Famille	Moyenne	Écart-type	Nombre de navires	Min	Max
2	100,5	50,3	53	10,9	233,2
3	173,6	98,2	74	5,7	498,3
4	134,1	54,4	56	56,2	291,2
5	28,2	27,3	131	0	90,2
6	138,5	81,9	12	56,8	304,9
7	1408,8	1489,7	61	-	4959
8	712,8	166,2	22	387,8	1112,7
9	272,1	97,8	130	63,6	723,7
10	273,5	306	895	0,9	2101,6
11	228,6	194,5	338	0,9	1225,4

Pour la famille 1, après consultation avec l'APTR au sujet de l'absence de données historiques correspondant à ce produit, il a été déterminé que les caractéristiques physiques des produits de la famille 4 étaient suffisamment similaires à celles des produits de la famille 1 pour que le temps de transit des deux familles soit similaire.

L'observation des différentes distributions met en évidence qu'aucun portrait particulier ne se dégage de celles-ci. En effet, aucune loi statistique ne semble particulièrement bien épouser les distributions de ces mesures pour les familles et donc ne pourrait pas être utilisée par le modèle pour produire des distributions fidèles aux données historiques. Tout dépendant de la mesure et de la famille du produit, les lois statistiques représentant le mieux les distributions sont différentes (uniforme, normale, exponentielle, etc.). Ce constat indique que les variations de temps ou de quantités autour des moyennes sont majoritairement dues à des facteurs aléatoires. S'il en avait été autrement, par exemple, dans le cas de variations dues à des méthodes de travail répétées, nous aurions observé des distributions beaucoup plus semblables d'une famille à l'autre.

3.2.3.4 Synthèse des données

Dans cette sous-section est réalisée une brève synthèse des données routières, ferroviaires et maritimes. Le but de cette synthèse est de réunir et présenter les résultats chiffrés de l'analyse de données. La synthèse couvre donc les temps de transit, les distributions d'arrivées, la quantité de marchandises transportées et le nombre d'entités de transports entrant.

Les données routières et ferroviaires n'étant pas suffisantes au calcul de distributions, et les données maritimes ne reflétant pas de profil particulier pour les temps de transit des différentes familles, les temps de transit sont calculés en faisant la différence entre l'heure et la date de sortie et d'entrée des transports. Les moyennes et écarts-types des temps de transit pour les différentes familles et transports sont présentés dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 Synthèse des temps de transit par famille

#Famille	Sens	Temps de transit (heures)					
		Maritime		Ferroviaire		Routier	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
1	OUT	92,2	39,4	N/A	N/A	1,67	2,06
2	IN	101,1	48,8	229,4	272,1	1,54	1,99
3	IN	104,9	56,2	N/A	N/A	1,54	1,99
4	OUT	92,2	39,4	49,0	81,7	N/A	N/A
5	IN	95,7	37,4	N/A	N/A	1,54	1,99
6	IN	89,3	38,8	N/A	N/A	1,54	1,99
7	IN	46,0	42,3	N/A	N/A	N/A	N/A
8	OUT	41,8	10,1	N/A	N/A	1,67	2,06
9	OUT	85,2	47,2	N/A	N/A	1,67	2,06
10	IN	74,7	63,5	38,5	78,9	1,54	1,99
11	OUT	83,3	58,9	63,5	97,9	1,67	2,06

*N/A en l'absence de flux

Il est nécessaire de souligner que les marchandises transportées n'étant pas identifiées dans les données historiques routières, les temps de transit des transports routiers sont basés sur les données des familles 10 et 11, soit le port actuel pour les flux entrants et sortants.

Les limitations au niveau des données routières et ferroviaires posent un défi de taille pour la détermination de distributions d'arrivées de ces transports. Pour remédier à ce problème, le modèle utilise les distributions d'arrivées maritimes afin de générer les arrivées de camions et wagons. Cette approche est inspirée de Bassan (2007), qui avance que dans le cas de marchandise conteneurisée, le nombre de navires entrant au port affecte directement le nombre de conteneurs. Dans un même ordre d'idée, l'auteur explique que le nombre de conteneurs arrivant durant une période dicte le nombre de camions devant entrer dans le système portuaire. L'arrivée d'un conteneur notifie son propriétaire d'envoyer un camion. En bref, les arrivées de camions dépendent des arrivées de navires planifiées au port.

Afin de faire face aux défis posés par les données routières et ferroviaires limitées, le concept mis de l'avant dans l'article de Bassan (2007) est appliqué dans le cadre de ce projet. Le concept étant initialement dirigé vers la marchandise conteneurisée, on fait l'hypothèse que le concept s'applique également aux marchandises non conteneurisées. En effet, comme pour la marchandise conteneurisée, les flux entrants et sortants de navires génèrent des flux de marchandises, créant des besoins en transport routier et ferroviaire pour transporter la marchandise aux différents propriétaires. Le travail extensif réalisé pour concevoir les distributions et scénarios d'arrivées maritimes est présenté à la section 3.2.4.

Les données limitées au niveau du transport routier et des familles 2 et 4 pour le transport ferroviaire ont également requis des ajustements au niveau de la quantité de marchandise transportée et du nombre d'unités de transport. La quantité transportée n'étant pas connue et disposant que des enregistrements manuels pour les données routières, la quantité de marchandises transportées et le nombre de camions entrant par jour sont déterminés en fonction des prévisions pour le terminal 21 et les prévisions du port actuel. Suite à des discussions avec l'APTR, le tonnage d'un camion plein a été fixé à 30 tonnes et le tonnage d'un wagon plein a été fixé à 90 tonnes selon les estimations et les calculs prévisionnels de l'administration portuaire. Le nombre maximal de camions entrant par jour de chaque

famille a été calculé en distribuant la quantité totale de camions de camions des familles par 80% des jours disponibles au cours de l'année. Les camions circulant au port durant toute la semaine, la quantité totale de camions est divisée par 80% de 365 jours, soit 292 jours. Le transport ferroviaire étant réalisé seulement 5 jours par semaine, le nombre total de jours de travail disponibles est 261 jours. 80% des jours disponibles pour le transport ferroviaire correspondent donc à 209 jours. L'utilisation de 80% des jours disponibles est nécessaire puisque les transports routiers et ferroviaires des différentes familles n'ont pas lieu tous les jours. Cette approche assure le passage de la majorité des camions et wagons dans le modèle malgré des périodes moins achalandées. Le tableau 3.10 présente le nombre maximal de camions par jour pour les différentes familles.

Tableau 3.10 Nombre maximal de camions par jour par famille

Famille	Nombre de camions	Prévision annuelle de tonnage	Nombre maximal de camions par jour
1	5 000	150 000	17
2	833	24 990	3
3	3 067	92 010	11
5	5 433	162 990	19
6	6 667	200 010	23
8	3 000	90 000	10
9	9 000	270 000	31
10	46 800	46 702	160
11	14 450	14 459	49

Le tonnage annuel et le nombre de camions étant basés sur les prévisions de l'APTR pour le terminal 21 et le port actuel, la même approche sera utilisée pour le tonnage annuel maritime et ferroviaire ainsi que le nombre de wagons par convoi. Cette décision fut prise suite à une phase de validation illustrant un débalancement important des stocks pour une version antérieure du modèle utilisant des tonnages annuels maritimes et ferroviaires et des nombres de wagons par convoi basés sur les données historiques. L'évolution des stocks étant principalement utilisé comme outil de validation dans ce projet, il a été

déterminé préférable de baser le tonnage annuel sur les prévisions du terminal 21 et du port actuel afin que les flux entrants et sortants de marchandises soient balancés dans un modèle fonctionnel. Le tonnage annuel et le nombre maximal de wagons par convoi sont présentés au tableau 3.11.

Tableau 3.11 Nombre maximal de wagons par convoi par famille

Famille	Nombre de wagons	Prévision annuelle de tonnage	Nombre maximal de wagons par convoi
2	1 111	99 990	5
4	3 222	289 980	15
10	8 476	762 817	41
11	2 187	196 869	(11,93 ; 11,36)*

*Moyenne et écart-type

On souligne la présence d'une moyenne et d'un écart-type pour le nombre maximal de wagons par convoi pour la famille 11. Pour les familles 10 et 11, les données historiques sont suffisamment détaillées pour calculer des moyennes et écarts-types valides pour le nombre de wagons par convoi. Cependant, ces résultats sont utilisés seulement si le nombre de wagons par convoi est compatible avec le tonnage annuel devant circuler par voie ferroviaire. Dans le cas de la famille 11, la quantité minimale de wagons par convoi pour une période de 209 jours est de 11 wagons. La moyenne de wagons calculée à partir des données historiques étant supérieure à ce seuil minimal, le nombre de wagons par convoi pour la famille 11 peut être déterminé par les données historiques. Dans le cas de la famille 10, la valeur minimale du nombre maximal de wagons par convoi est de 35 wagons. En supprimant la contrainte de 80%, ce seuil passe à 32,5 wagons. Cependant la valeur moyenne et l'écart-type calculés à partir des données historiques du port actuel sont 26,66 et 14,38 wagons respectivement. Lorsqu'utilisées dans le modèle, ces valeurs réduisent de façon non négligeable les flux ferroviaires de la famille 10, affectant ainsi les résultats de la simulation. Face à ce problème, les données historiques de la famille 10 sont mises de côté au profit des prévisions du port actuel, soit une approche similaire à l'utilisation des prévisions du terminal 21 pour les familles 2 et 4.

Finalement, le tonnage annuel et le tonnage par navire sont présentés au tableau 3.12.

Tableau 3.12 Tonnage par navire

Famille	Nombre de navires	Tonnage	Tonnage par navire
1	5	150 000	30 000
2	4	125 000	31 250
3	5	95 500	19 100
4	14	286 500	20 464
5	35	163 000	4 657
6	3	200 000	66 667
7	6	190 000	31 667
8	3	90 000	30 000
9	17	270 000	15 882
10	200	2 178 948	10 895
11	50	644 551	12 891

3.2.4. Scénarios d'arrivées maritimes

En accord avec le concept exposé dans l'article de Bassan (2007), les arrivées de navires dictent les arrivées de camions et de wagons dans le système portuaire. Pour avoir un modèle représentatif du système portuaire réel, il est important de connaître la répartition annuelle des arrivées de navires. En effet, les navires n'arriveront pas de manière uniforme durant l'année puisque le trafic est soumis aux variations saisonnières des différents types de produits.

Sachant de la part de l'APTR que la saisonnalité des trafics des familles de produits qui transiteront au terminal 21 devrait être similaire à celle des produits similaires pris en charge par le port actuel, un portrait de la saisonnalité représentatif de l'avenir peut être déterminé à partir des données historiques maritimes. Les dates d'arrivée et les tonnages des navires entre les années 2015 et 2020 ont donc été extraits pour les 11 familles pour observer la répartition moyenne du tonnage maritime annuel au cours des 12 mois de l'année. La répartition du tonnage pour les différentes familles 2 à 11 est présentée par les

figures 3.17 à 3.26. On souligne qu'en l'absence de données historiques, la répartition utilisée pour la famille 1 est basée sur la répartition moyenne de tous les transports sortants, soit la famille 11.

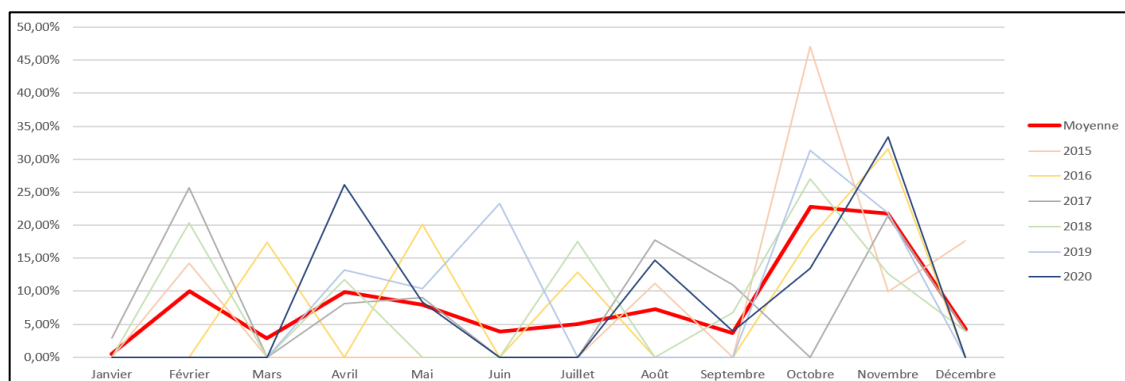


Figure 3.17 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 2)

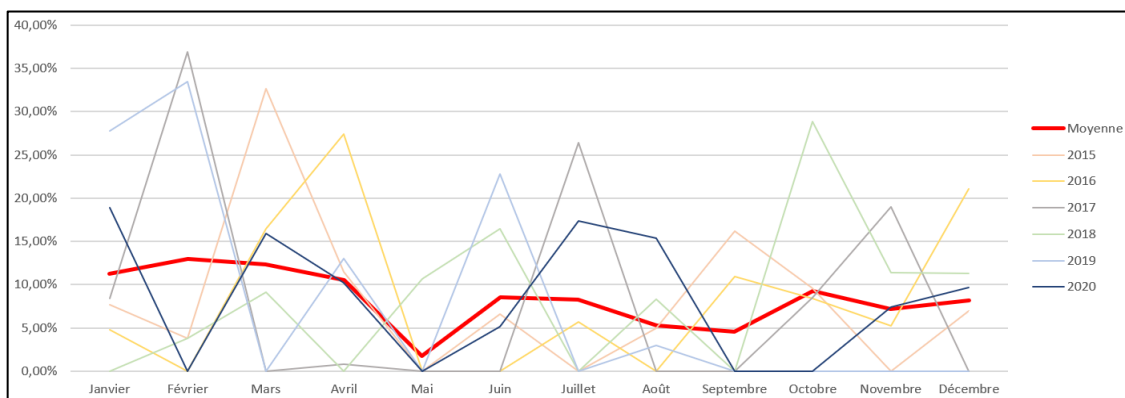


Figure 3.18 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 3)

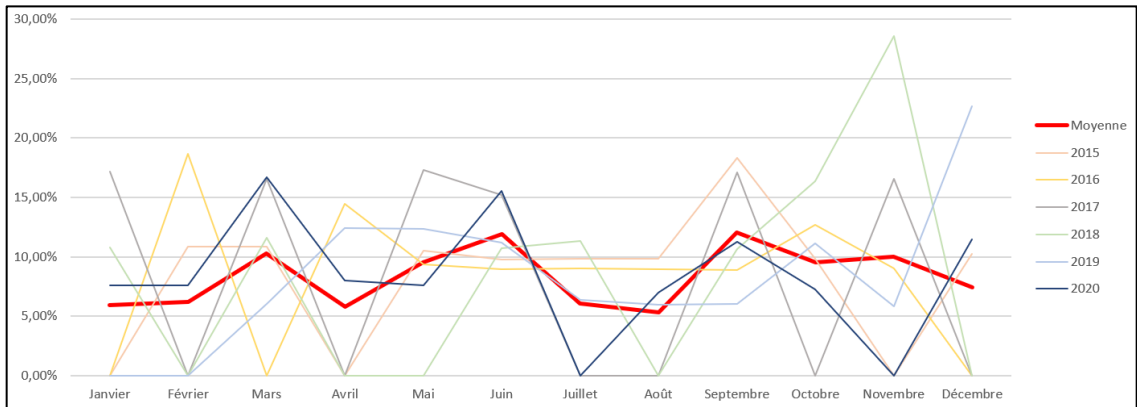


Figure 3.19 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 4)

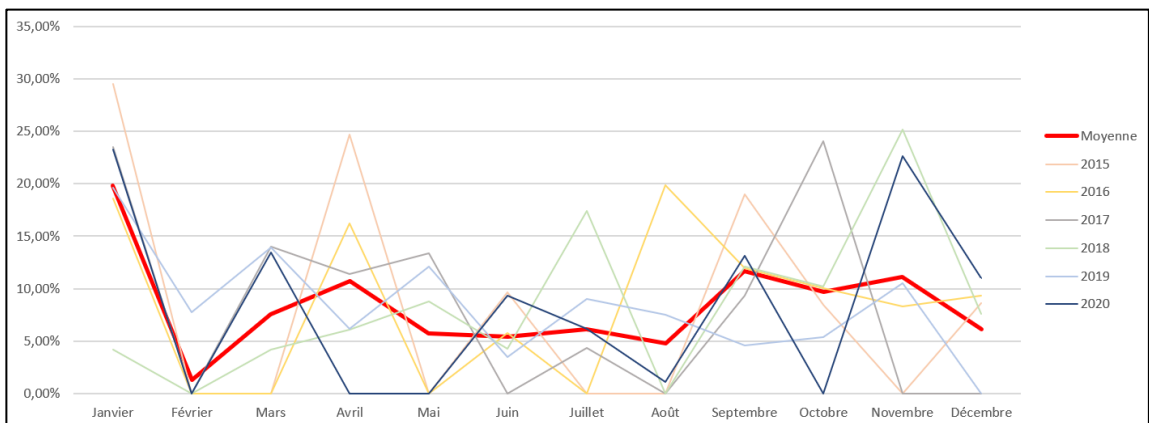


Figure 3.20 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 5)

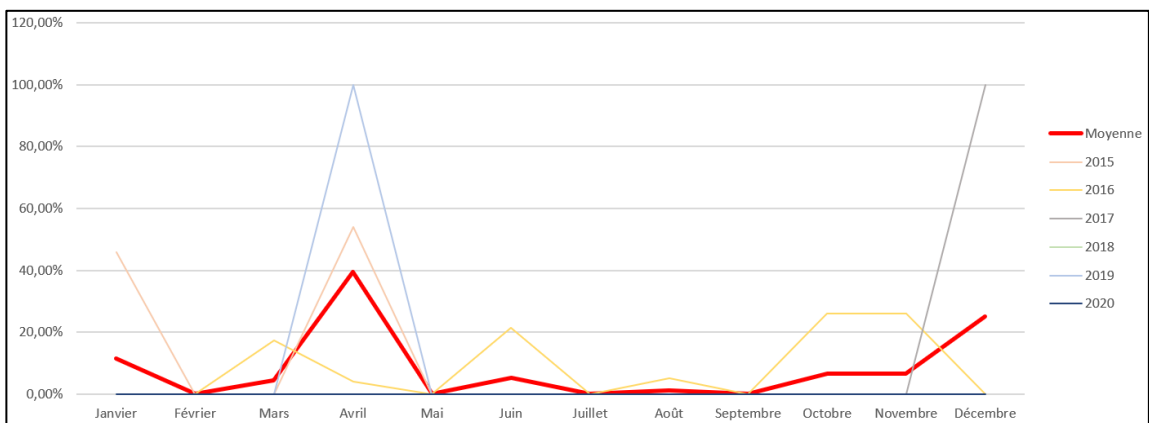


Figure 3.21 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 6)

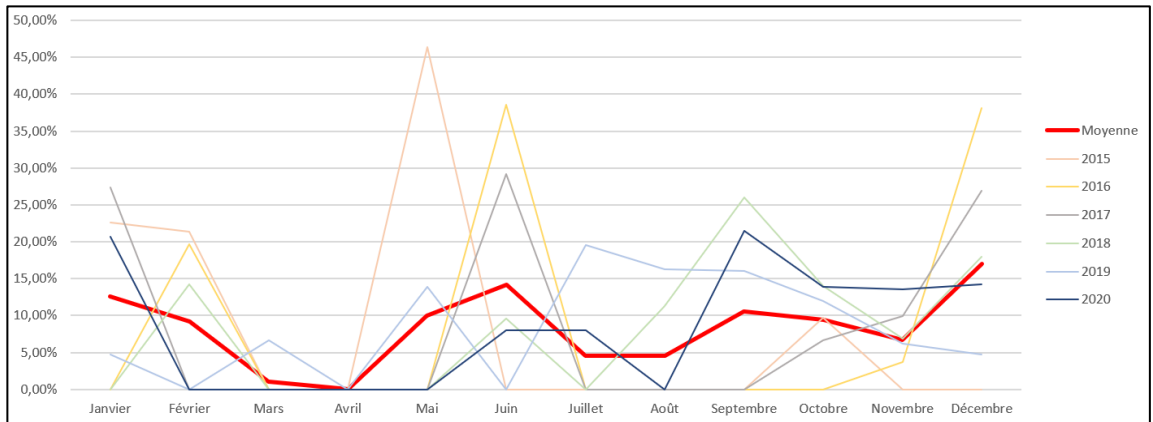


Figure 3.22 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 7)

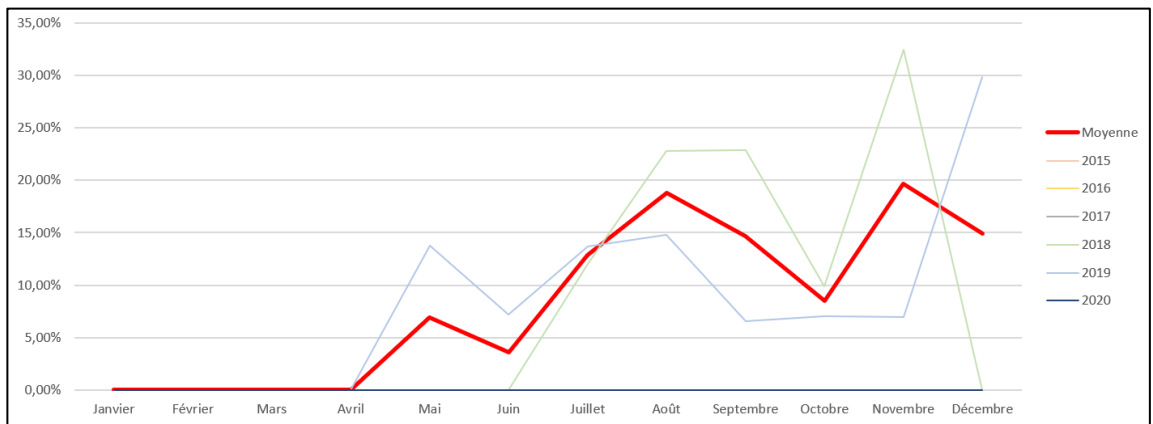


Figure 3.23 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 8)

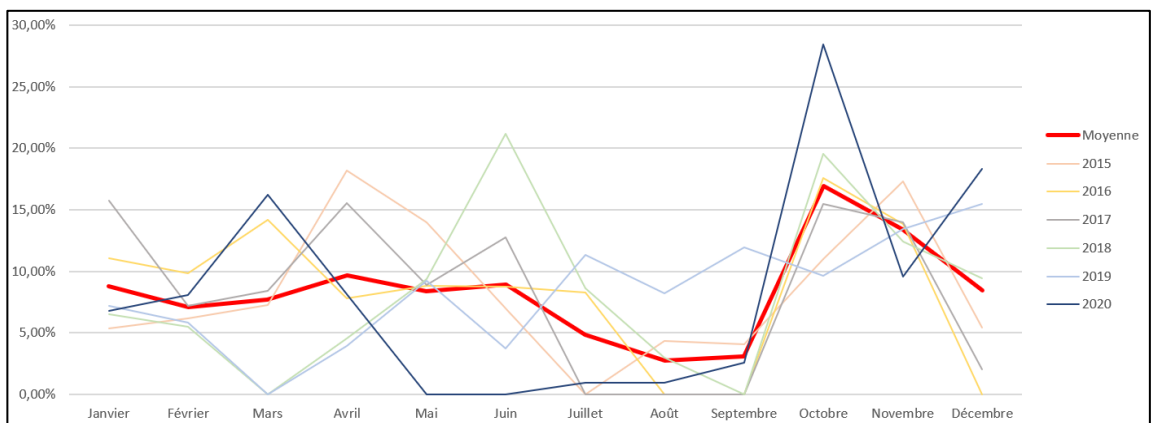


Figure 3.24 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 9)

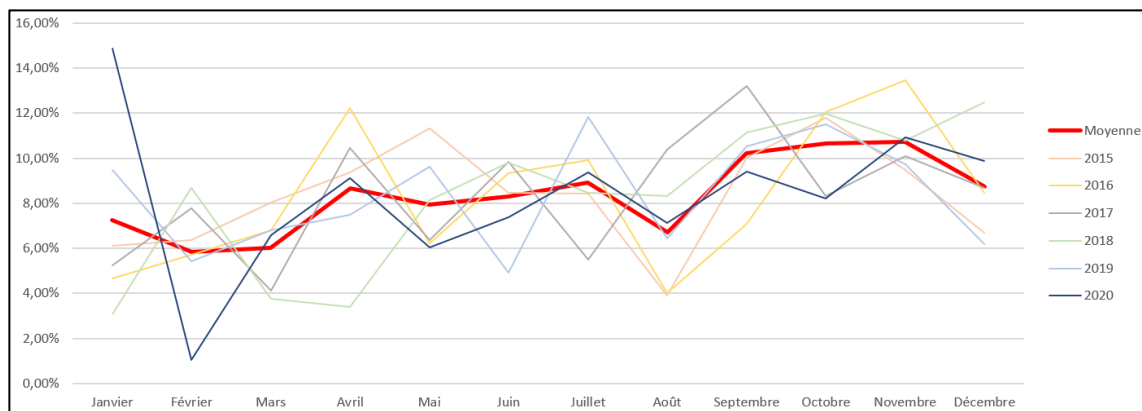


Figure 3.25 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 10)

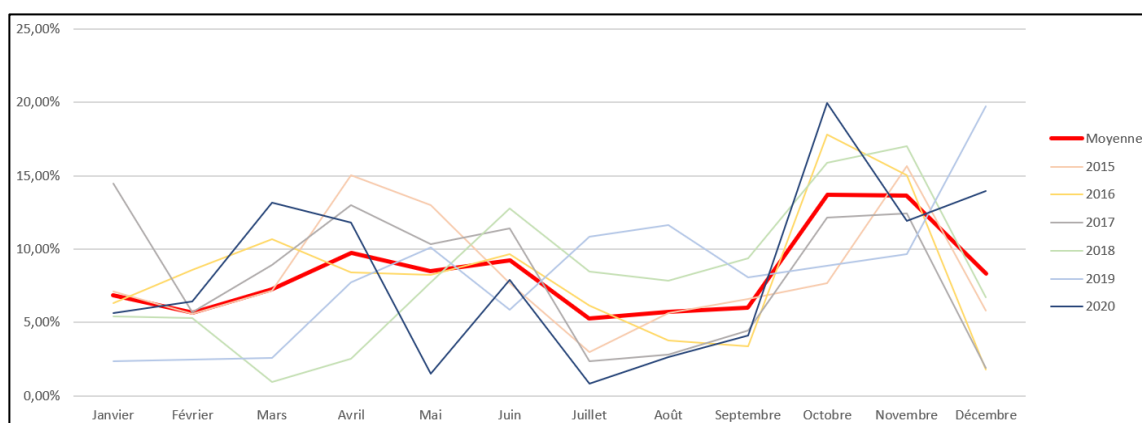


Figure 3.26 Distribution annuelle historique du tonnage maritime (famille 11)

L'observation des distributions confirme que le tonnage annuel maritime n'est pas uniforme et que les variations saisonnières sont non négligeables.

L'approche basée sur le concept de Bassan (2007) nécessite, en principe, un horaire des arrivées de navires dans le modèle de simulation afin de dicter les arrivées de camions et de wagons. Cependant, cette méthode retirerait la majorité des facteurs aléatoires du modèle, limitant significativement la pertinence des résultats du modèle. Afin de conserver les facteurs aléatoires au niveau des arrivées des transports tout en suivant globalement les répartitions historiques maritimes en utilisant une cédule d'arrivées de navires, une méthode particulière fut employée dans le cadre du projet.

Le respect des éléments susmentionnés passe par la génération des dates d'arrivées des navires prévus annuellement pour chaque famille en prenant comme probabilité d'arrivée de chaque navire lors d'un mois particulier le pourcentage historique moyen de répartition de la marchandise pour le mois. Par exemple, si une portion moyenne historique de 15% de la marchandise annuelle en janvier a été trouvée lors du traitement des données pour une famille donnée, chaque navire de cette famille aurait 15% de chance d'arriver en janvier. Cette méthode permet de tendre vers la distribution d'arrivées maritimes de chaque famille en respectant les contraintes particulières du modèle, et en évitant d'utiliser des fractions de navires pour respecter précisément les pourcentages de distributions historiques.

La méthode est davantage poussée afin d'éviter l'utilisation d'une cédule unique dans le modèle de simulation dans le but de conserver la nature stochastique du modèle de simulation. Des scénarios d'arrivées maritimes sont générés par un modèle statique externe à la simulation développée sur Excel.

Le modèle Excel est basé sur l'utilisation de la formule *RechercheV* pour rechercher un nombre aléatoire généré entre zéro et un dans une plage de pourcentages cumulés pour renvoyer la valeur correspondante à la position de ce nombre. Les probabilités d'arrivées maritimes par mois ont été reprises et une colonne des pourcentages cumulés qui sera utilisée par la fonction *RechercheV* pour les 11 familles fut ajoutée comme illustré à la figure 3.27.

Données provenant du traitement en tâche 1								
Famille 2			Famille 3			Famille 4		
Probabilité	Probabilité cumulée	Mois d'arrivée	Probabilité	Probabilité cumulée	Mois d'arrivée	Probabilité	Probabilité cumulée	Mois d'arrivée
0,00	0,00	2027-01-15 12:00	0,11	0,00	2027-01-15 12:00	0,06	0,00	2027-01-15 12:00
0,10	0,00	2027-02-15 12:00	0,13	0,11	2027-02-15 12:00	0,06	0,06	2027-02-15 12:00
0,03	0,11	2027-03-15 12:00	0,12	0,24	2027-03-15 12:00	0,10	0,12	2027-03-15 12:00
0,10	0,13	2027-04-15 12:00	0,10	0,37	2027-04-15 12:00	0,06	0,22	2027-04-15 12:00
0,08	0,23	2027-05-15 12:00	0,02	0,47	2027-05-15 12:00	0,10	0,28	2027-05-15 12:00
0,04	0,31	2027-06-15 12:00	0,09	0,49	2027-06-15 12:00	0,12	0,38	2027-06-15 12:00
0,05	0,35	2027-07-15 12:00	0,08	0,57	2027-07-15 12:00	0,06	0,50	2027-07-15 12:00
0,07	0,40	2027-08-15 12:00	0,05	0,66	2027-08-15 12:00	0,05	0,56	2027-08-15 12:00
0,04	0,47	2027-09-15 12:00	0,05	0,71	2027-09-15 12:00	0,12	0,61	2027-09-15 12:00
0,23	0,51	2027-10-15 12:00	0,09	0,75	2027-10-15 12:00	0,10	0,73	2027-10-15 12:00
0,22	0,74	2027-11-15 12:00	0,07	0,85	2027-11-15 12:00	0,10	0,83	2027-11-15 12:00
0,04	0,96	2027-12-15 12:00	0,08	0,92	2027-12-15 12:00	0,07	0,93	2027-12-15 12:00
Famille 5			Famille 6			Famille 7		
Probabilité	Probabilité cumulée	Mois d'arrivée	Probabilité	Probabilité cumulée	Mois d'arrivée	Probabilité	Probabilité cumulée	Mois d'arrivée
0,20	0,00	2027-01-15 12:00	0,11	0,00	2027-01-15 12:00	0,13	0,00	2027-01-15 12:00
0,01	0,20	2027-02-15 12:00	0,00	0,11	2027-02-15 12:00	0,09	0,13	2027-02-15 12:00
0,08	0,21	2027-03-15 12:00	0,04	0,11	2027-03-15 12:00	0,01	0,22	2027-03-15 12:00
0,11	0,29	2027-04-15 12:00	0,40	0,16	2027-04-15 12:00	0,00	0,23	2027-04-15 12:00
0,06	0,39	2027-05-15 12:00	0,00	0,55	2027-05-15 12:00	0,10	0,23	2027-05-15 12:00
0,05	0,45	2027-06-15 12:00	0,05	0,55	2027-06-15 12:00	0,14	0,33	2027-06-15 12:00
0,06	0,51	2027-07-15 12:00	0,00	0,61	2027-07-15 12:00	0,05	0,47	2027-07-15 12:00
0,05	0,57	2027-08-15 12:00	0,01	0,61	2027-08-15 12:00	0,05	0,52	2027-08-15 12:00
0,12	0,61	2027-09-15 12:00	0,00	0,62	2027-09-15 12:00	0,11	0,56	2027-09-15 12:00
0,10	0,73	2027-10-15 12:00	0,06	0,62	2027-10-15 12:00	0,09	0,67	2027-10-15 12:00
0,11	0,83	2027-11-15 12:00	0,06	0,69	2027-11-15 12:00	0,07	0,76	2027-11-15 12:00
0,06	0,94	2027-12-15 12:00	0,25	0,75	2027-12-15 12:00	0,17	0,83	2027-12-15 12:00

Figure 3.27 Exemples des tableaux de distributions de probabilités et probabilités cumulées (familles 2 à 7)

Les colonnes « Mois d'arrivée » de la figure 3.27 illustrent les arrivées de navires le 15^e jour des mois à 12h. Puisque les données historiques étaient trop fragmentaires pour obtenir des distributions historiques d'arrivées quotidiennes, les arrivées sont cédulées au 15^e jour de chaque mois. Le logiciel de simulation Simio qui est utilisé dans le cadre de ce projet a une fonctionnalité permettant de faire varier les dates d'arrivées des navires pour des arrivées cédulées. Le modèle fait donc varier uniformément les arrivées plus ou moins 15 jours autour des dates cédulés, soit les 15^e des mois. De cette façon, les navires arrivent à des journées aléatoires à l'intérieur du mois cédulé.

Le principe du modèle statique de simulation des arrivées est similaire pour chaque famille. Pour chaque cellule, le modèle recherche une valeur aléatoire générée entre 0 et 1 dans les valeurs de probabilité cumulée de la famille visée, et renvoie la valeur du mois d'arrivée selon la position de cette valeur aléatoire dans la probabilité cumulée. Le nombre d'arrivées à céduler pour une famille correspond au nombre de navires attendus annuellement pour la famille spécifique multiplié par le nombre de scénarios. Un exemple visuel des scénarios d'arrivées maritimes pour la famille 5 est présenté à la figure 3.28.

Nombre total de navires dans l'année		5				
Scénario	Navires					
	1	2	3	4	5	
1	2027-10-15 12:00	2027-02-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-04-15 12:00	2027-03-15 12:00	
2	2027-08-15 12:00	2027-08-15 12:00	2027-03-15 12:00	2027-03-15 12:00	2027-01-15 12:00	
3	2027-04-15 12:00	2027-12-15 12:00	2027-11-15 12:00	2027-12-15 12:00	2027-06-15 12:00	
4	2027-04-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-02-15 12:00	2027-03-15 12:00	2027-06-15 12:00	
5	2027-03-15 12:00	2027-03-15 12:00	2027-08-15 12:00	2027-10-15 12:00	2027-06-15 12:00	
6	2027-06-15 12:00	2027-11-15 12:00	2027-06-15 12:00	2027-06-15 12:00	2027-09-15 12:00	
7	2027-01-15 12:00	2027-06-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-06-15 12:00	2027-08-15 12:00	
8	2027-04-15 12:00	2027-04-15 12:00	2027-03-15 12:00	2027-08-15 12:00	2027-03-15 12:00	
9	2027-12-15 12:00	2027-07-15 12:00	2027-08-15 12:00	2027-10-15 12:00	2027-01-15 12:00	
10	2027-01-15 12:00	2027-04-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-02-15 12:00	
11	2027-02-15 12:00	2027-02-15 12:00	2027-10-15 12:00	2027-03-15 12:00	2027-04-15 12:00	
12	2027-11-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-06-15 12:00	2027-04-15 12:00	2027-04-15 12:00	
13	2027-11-15 12:00	2027-02-15 12:00	2027-10-15 12:00	2027-12-15 12:00	2027-01-15 12:00	
14	2027-06-15 12:00	2027-01-15 12:00	2027-09-15 12:00	2027-09-15 12:00	2027-02-15 12:00	
15	2027-10-15 12:00	2027-12-15 12:00	2027-02-15 12:00	2027-02-15 12:00	2027-10-15 12:00	

Figure 3.28 Exemple de scénarios d'arrivées maritimes (famille 3)

Avant de générer les scénarios de chaque famille, il est nécessaire de déterminer le nombre minimal de scénarios à générer pour reproduire de manière fidèle les distributions saisonnières du tonnage maritime historique. À cet effet, une analyse a été effectuée pour observer les résultats de répartitions d'arrivées obtenus avec le modèle statique pour des nombres de scénarios variant entre 10 et 100. Les distributions obtenues pour les nombres de scénarios variant sont présentées à la figure 3.29 pour la famille 9.

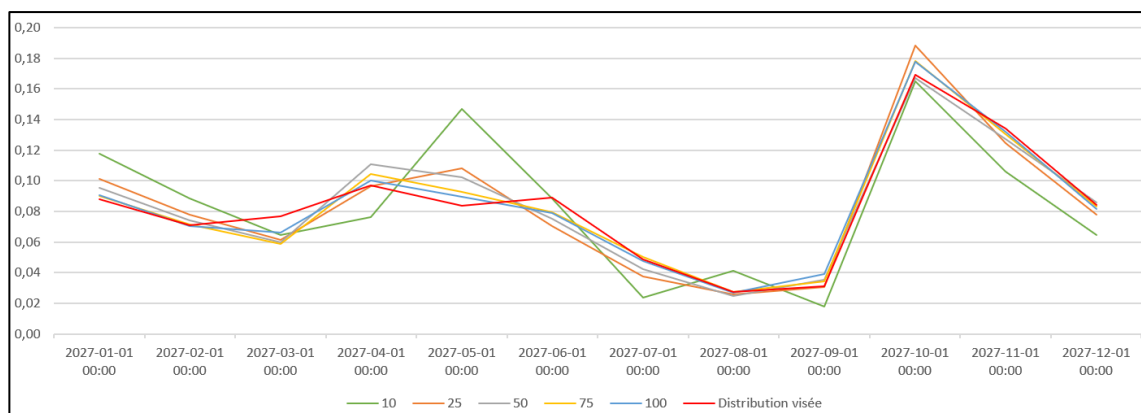


Figure 3.29 Distributions de % de tonnage maritime en fonction du nombre de scénarios générés (famille 9)

Dans la figure 3.29, la distribution visée est identifiée par la courbe rouge. À partir de 50 scénarios, les résultats se confondent suffisamment avec la distribution visée et l'ajout de scénarios supplémentaires après 50 scénarios apporte peu de gains par la suite. À la lumière de ce constat, le nombre de 50 scénarios d'arrivées maritimes a été choisi. Un nombre supérieur de scénarios aurait peu d'impact et alourdirait significativement le temps de simulation sans bénéfices tangibles au niveau de la fiabilité des résultats. À la figure 3.30 est présenté un exemple de comparaison entre la distribution obtenue avec la simulation statique et la distribution visée. Les graphiques comparatifs pour toutes les familles sont présentés à l'annexe 2.

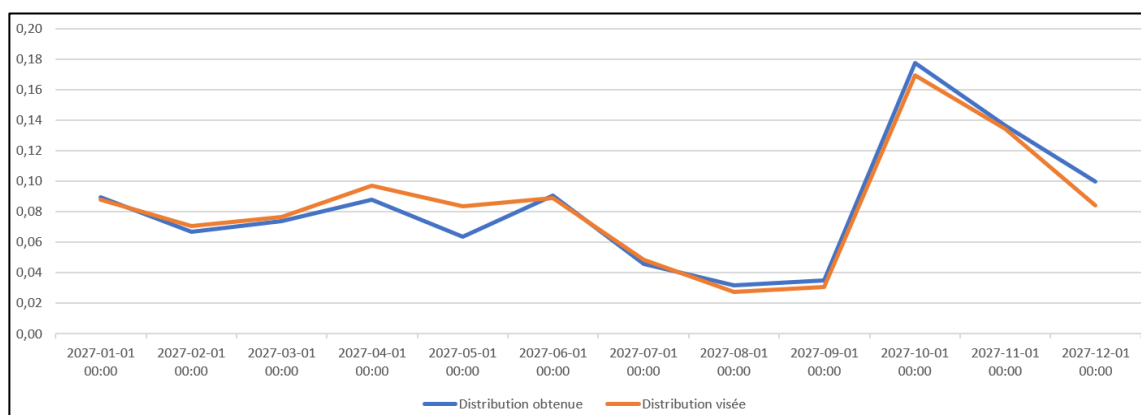


Figure 3.30 Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 9)

Dans le modèle de simulation du système portuaire, les 50 scénarios d'arrivées de navires par famille sont simulés un après l'autre dans des expériences. Les scénarios, qui sont importés dans Simio sous forme de tables, sont désignés comme variable de contrôle pour chaque expérience menée. Cette solution permet de respecter les contraintes et besoins du modèle en générant des arrivées de navires cédulées en fonction de distributions visées tout en conservant le facteur aléatoire de la simulation à événements discrets. En plus de conserver le facteur aléatoire du système simulé, la simulation de multiples scénarios permet d'obtenir des résultats plus représentatifs que la simulation d'un seul scénario.

3.3. Formulation du modèle conceptuel

Dans cette section sont présentés les entités ainsi que les organigrammes du modèle conceptuel ayant mené à la conception du modèle final.

3.3.1. Entités du modèle

Les entités visibles circulant dans le modèle de simulation sont les différents transporteurs, soit les navires, les wagons et les camions. Des animations de base sont utilisées pour représenter les déplacements des différents transports dans le modèle de simulation lors de son exécution. En addition aux entités visibles, les flux de marchandises et les niveaux de stocks du terminal 21 ainsi que du port actuel sont suivis à partir d'éléments matériels regroupant les stocks des familles 1 à 9 du terminal 21 et les stocks 10 et 11 du port actuel respectivement. Les stocks sont donc suivis, en tonnes, pour le terminal 21 et le port actuel, et non séparés par famille. Les flux de marchandises étant liés aux déplacements des entités de transport dans le modèle, ceux-ci ne sont pas animés, mais l'évolution des stocks est illustrée en temps réel durant le déroulement de la simulation.

3.3.2. Développement d'un modèle préliminaire

La séquence des événements ainsi que les sous-processus principaux du modèle de simulation sont mis en évidence dans des organigrammes qui ont été conçus lors du développement préliminaire du modèle. La séquence des événements étant légèrement différente en fonction des interactions entre les modes de transport, deux organigrammes ont été créés pour les interactions entre les transports maritimes et ferroviaires ainsi que les transports maritimes et routiers, à l'exception de la famille 8 où l'interaction est entre deux transports maritimes (transbordement entre deux tailles de navires). Les interactions maritimes étant les plus simples du modèle, la conception d'un organigramme pour ce cas de figure n'était pas nécessaire. L'organigramme illustrant les interactions entre les transports maritimes et ferroviaires est présenté à la figure 3.31.

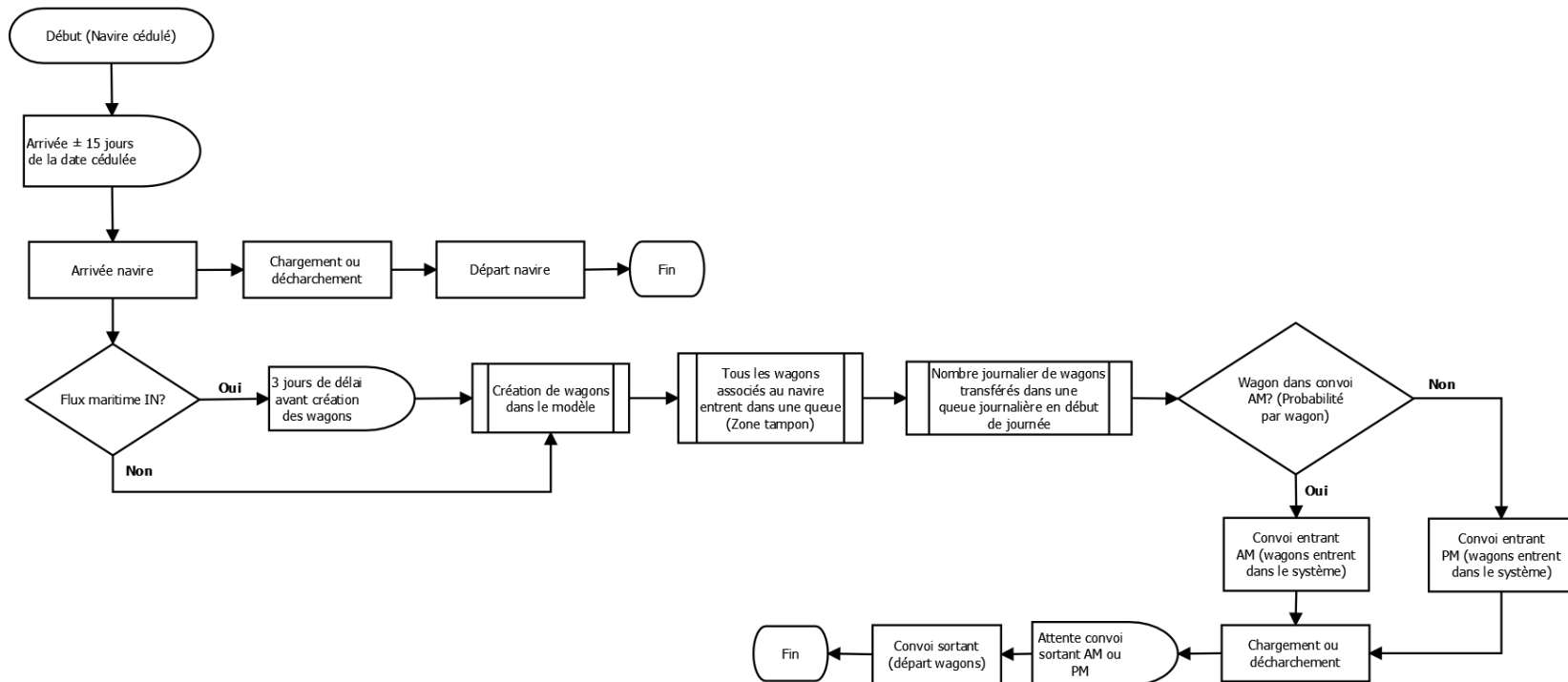


Figure 3.31 Organigramme des interactions maritimes et ferroviaires

L'arrivée des transports routiers et ferroviaires étant fonction des arrivées maritimes dans la simulation, les étapes initiales du modèle touchent au transport maritime. Le premier événement du modèle est l'arrivée d'un navire selon la cédule des transports maritimes de chaque famille. Comme mentionné à la section 3.2.4, chaque navire arrive à plus ou moins 15 jours de la date cédulée afin que les arrivées de navires au cours de chaque mois soient aléatoires mais que la répartition mensuelle du nombre de navire reproduise la saisonnalité annuelle d'arrivée des navires de la famille. Du côté maritime, une fois que le navire est généré dans le modèle, celui-ci passe par un processus de chargement ou déchargement selon si le flux maritime est entrant ou sortant. Un flux maritime entrant est défini par un navire chargé entrant au port pour décharger sa marchandise, tandis qu'un flux maritime sortant indique un navire vide entrant au port pour un chargement de marchandise. Une fois l'opération de chargement ou déchargement complétée, le navire quitte le port et la portion maritime du transport prend fin dans le modèle. Du côté ferroviaire, la création des wagons dans le modèle diffère suivant si le navire associé est un flux maritime entrant ou sortant. Dans le cas d'un flux maritime entrant, un délai de 3 jours est appliqué avant la création des wagons dans le modèle. Ce délai vise à augmenter sensiblement l'écart entre l'arrivée d'un navire venant décharger la marchandise et les wagons venant charger cette marchandise en gardant en tête que l'arrivée simultanée d'un navire et des wagons associés est peu probable ni souhaitable. Cette approche vise également à réduire la possibilité d'une pénurie de stocks dans le modèle en accordant un trop court délai au navire entrant afin de décharger sa marchandise avant l'arrivée du premier convoi de wagons. Dans le cas d'un flux maritime sortant, l'arrivée prématurée de wagons en fonction de l'arrivée aléatoire d'un navire n'est pas paramétrable dans le logiciel de simulation Simio. Considérant que dans le cas d'un flux maritime sortant, le stock à charger est déjà au port avant l'arrivée du navire, la création des wagons est réalisée simultanément avec l'arrivée du navire associé afin d'assurer le remplissage des stocks pour le prochain navire.

La création de l'ensemble des wagons associés à un transport maritime requiert le relâchement progressif et contrôlé de ceux-ci dans le modèle. Pour ce faire, la totalité des

wagons créés est d'abord transférée dans une queue agissant comme une zone tampon dans le modèle. À partir de cette queue, dans laquelle tous les wagons du modèle sont initialement en attente, un nombre de wagons pour chaque famille de produits est transféré dans une seconde queue journalière au début de chaque nouvelle journée du lundi au vendredi. Chaque wagon transféré dans cette queue journalière est associé au convoi AM de 7h ou au convoi PM de 23h en fonction de la répartition respective des arrivées ferroviaires de chaque famille. Du lundi au vendredi, à 7h et à 23h, les wagons du modèle entrent dans le système portuaire au sein d'un convoi ferroviaire et débutent leur processus de chargement et déchargement. Puisque le processus de chargement et déchargement des transports ferroviaires inclut le temps d'attente et de transport de chaque wagon, la capacité de la ressource pour ce processus est infinie afin de ne pas ajouter un temps d'attente supplémentaire au transit des wagons. Une fois le processus de chargement/déchargement complété, les wagons demeurent en attente pour un convoi sortant en AM ou en PM par lequel ils quittent le port, mettant fin à la portion ferroviaire du transport dans ce modèle.

Malgré de nombreuses similitudes avec les interactions entre les transports maritimes et ferroviaires, les interactions entre les transports maritimes et routiers comportent quelques différences dues en majoritairement à l'absence de convoi. L'organigramme illustrant les interactions entre les transports maritimes et routiers est présenté à la figure 3.32.

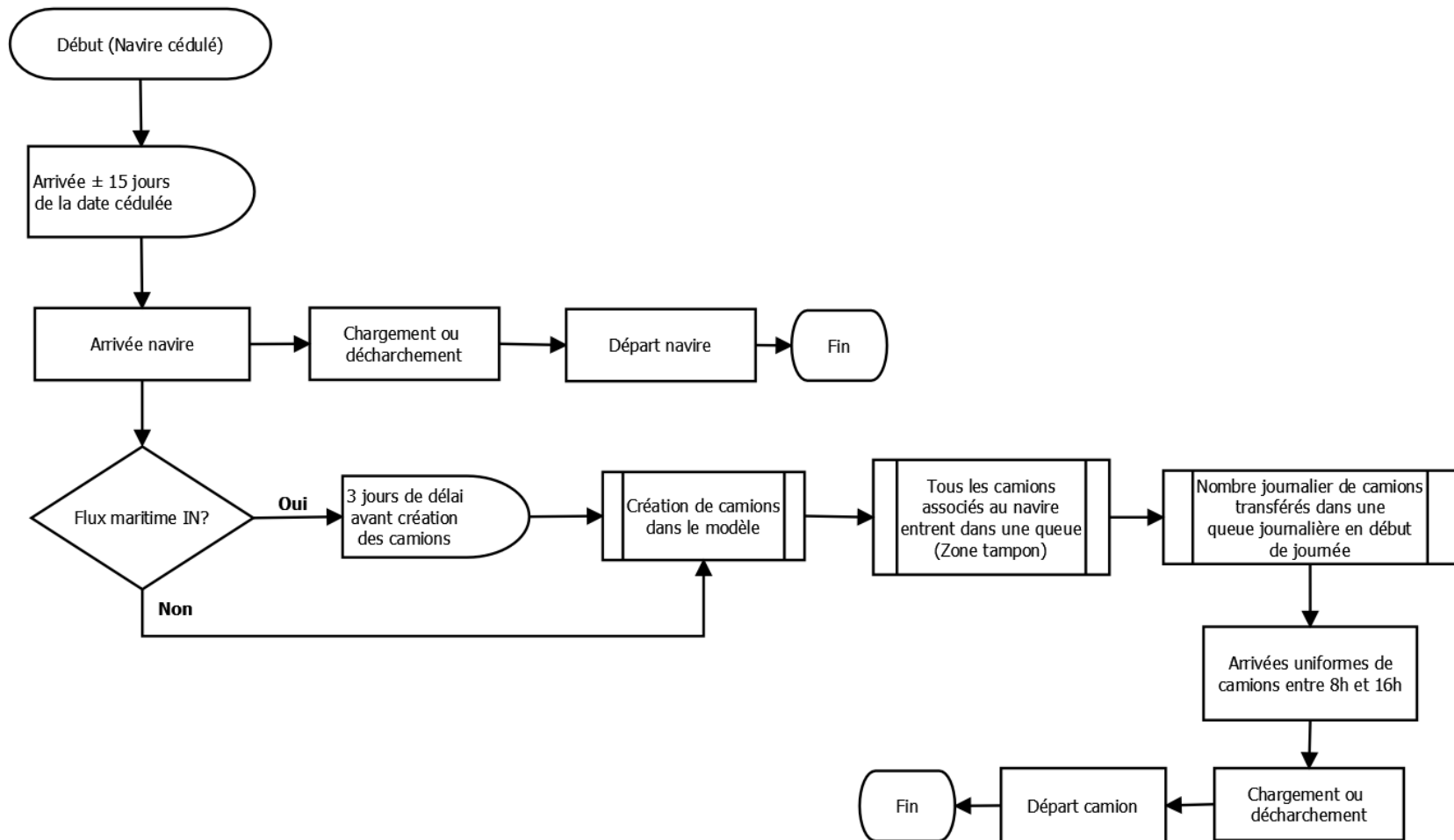


Figure 3.32 Organigramme des interactions maritimes et routières

L'organigramme de la figure 3.32 illustre que les interactions entre les transports maritimes et routiers sont grandement similaires aux interactions entre les transports maritimes et ferroviaires présentés dans l'organigramme de la figure 3.31. Les différences sont visibles suite au transfert des camions dans une queue journalière en début de journée. Au lieu de distribuer les camions au sein de deux convois en AM et PM, les camions arrivent de manière uniforme entre 8h et 16h. Comme pour le transport ferroviaire, la capacité du processus de chargement et déchargement est infinie puisque le temps d'attente et de déplacements des camions est compris dans ce processus. Une fois cette opération terminée, le camionneur quitte immédiatement le système ferroviaire, mettant fin à la portion routière du transport dans ce modèle.

3.4. Modèle de simulation

Le modèle de simulation a été développé avec le logiciel Simio. Les différentes activités du modèle étant une suite d'événements centrés sur les flux d'entités de transport et de marchandises au sein du système portuaire, la simulation à événements discrets est utilisée dans le cadre de ce projet. Dans cette section sont expliqués les objets et processus principaux composant le modèle de simulation. La période de réchauffement et les réplifications, les variables indépendantes et les variables dépendantes, et les hypothèses sont également présentées dans cette section.

3.4.1. Modélisation

Cette section aborde les objets et processus principaux ayant servi à la modélisation du modèle conceptuel. Pour commencer, chaque type de flux d'entités de transport de chaque famille est simulé sur une ligne individuelle dans le modèle de simulation. Pour le transport maritime, avec une totalité de 11 types de flux, la structure d'une ligne de transport maritime est :

- une source : pour générer les navires entrants selon les tables d'arrivées de chaque famille et appliquer l'arrivée aléatoire de plus ou moins 15 jours de la date cédulée ;
- un serveur : pour l'opération de chargement ou déchargement des navires ;

- une sortie : pour retirer les navires quittant le système portuaire.

En complément aux objets susmentionnés, des sous-processus sont activés à l'entrée du nœud de transfert à la sortie de la source ainsi qu'à l'entrée du nœud de transfert à la sortie du serveur pour activer les flux de marchandises entrants et sortants.

Pour le transport routier, avec une totalité de 9 types de flux, la structure d'une ligne de transport routier est :

- une source : la création de l'ensemble des camions associés à un transport maritime est déclenchée par une arrivée maritime associée au transport routier spécifique ;
- une queue (zone tampon) : tous les camions créés, mais pas encore relâchés dans le système portuaire, sont stockés dans la zone tampon avant d'être relâchés progressivement de manière contrôlée dans le système portuaire ;
- un combineur : les camions sont réunis en un lot avant d'entrer dans le serveur pour le fonctionnement des sous-processus liés aux flux de marchandises ;
- un serveur : pour l'opération de chargement ou déchargement des camions ;
- un séparateur : le lot de camions est séparé en camions individuels ;
- une sortie : pour retirer les camions quittant le système portuaire.

En complément aux objets susmentionnés, des sous-processus sont activés à l'entrée du nœud de transfert à la sortie de la source ainsi qu'à l'entrée du nœud de transfert à la sortie du séparateur pour activer les flux de marchandises entrants et sortants.

Pour le transport ferroviaire, avec une totalité de 4 types de flux, la structure d'une ligne de transport est la même que pour le transport routier. La distinction entre le transport routier et ferroviaire se situe au niveau des queues (zones tampons) décrites à la section 3.3.2 et les sous-processus ferroviaires. En effet, la gestion des convois ferroviaires ainsi que la collection de données ferroviaires au cours de la simulation font en sorte que la majorité des sous-processus du modèle touchent au transport ferroviaire. Le cas d'étude

au port de Trois-Rivières étant dirigé vers le diagnostic de goulots ferroviaires, la majorité des données collectées durant la simulation sont orientées vers le transport ferroviaire.

Au niveau de la collecte de données, les données de chaque réplication pour tous les scénarios sont enregistrées dans des fichiers Excel au cours de la simulation à l'aide de la fonction « ExcelWrite » distribuée au sein de plusieurs processus et activée soit par des événements, tels qu'un flux de marchandise, ou par des minuteurs s'activant au cours de chaque jour de la simulation.

3.4.2. Période de réchauffement

Tenant compte que le système portuaire est continuellement actif, le modèle est considéré à horizon infini, nécessitant ainsi une période de réchauffement au début de la simulation pour que le système se stabilise suite au démarrage de la simulation. La période de réchauffement a été déterminée à partir du graphique illustrant l'évolution de la marchandise moyenne au cours du temps dans la simulation. Le graphique est présenté à la figure 3.33.

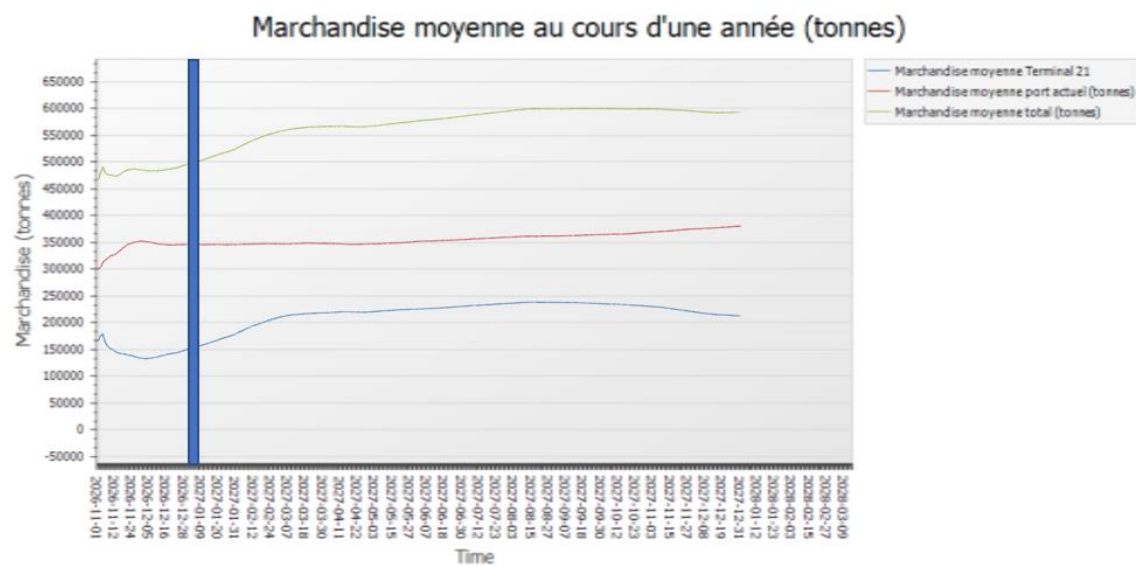


Figure 3.33 Évolution de la marchandise moyenne au cours du temps

L'observation de l'évolution de la marchandise moyenne au cours du temps illustre une stabilisation de la marchandise du port actuel après le premier mois, tandis que la

marchandise du terminal 21 commence à se stabiliser après 2 mois. La période de réchauffement a donc été fixée à 61 jours, soit les mois de novembre et décembre afin de permettre la collecte des résultats sur une année entière débutant le premier janvier. Durant le réchauffement, les premières arrivées de navires permettent d'initier les flux routiers et ferroviaires du modèle, qui se stabilisent après approximativement 2 mois, comme illustré par l'évolution des stocks moyens.

Afin d'obtenir des résultats non biaisés, 20 répliques sont effectuées pour chaque expérience. Le modèle devant simuler 50 scénarios d'arrivées maritimes, 1000 simulations sont réalisées au total.

3.4.3. Variables indépendantes

Dans cette étude, certaines variables indépendantes influencent les flux de marchandises et de transports au sein du système portuaire. Pour débiter, les arrivées maritimes sont déterminées en fonction des tables d'arrivées de chaque famille avec une variation de plus ou moins 15 jours de la date cédulée. Les arrivées maritimes varient également au sein de 50 scénarios d'arrivées. Dans le même ordre d'idée, les arrivées des transports routiers et ferroviaires étant dictées par les arrivées maritimes, le taux d'arrivée des camions et wagons au cours de l'année suit de près la cédule d'arrivée des navires de chaque famille. Ensuite, la répartition des wagons entrant en AM et PM de chaque famille détermine la répartition des wagons au sein des convois ferroviaires quotidiens. Les transports associés au terminal 21 et au port actuel sont également observés afin d'évaluer l'impact des flux du nouveau terminal sur les opérations régulières du port.

Les horaires d'opération des transports influencent également les flux de marchandises et les flux d'entités de transport du modèle. En effet, les camions arrivent durant toute la semaine entre 8h et 16h, tandis que les convois ferroviaires sont actifs du lundi au vendredi à 7h et 23h. La proportion des wagons et camions pouvant entrer au port par jour est également déterminée par les différentes familles. Au niveau des processus de chargement et déchargement, les temps d'opérations des différents transports sont en fonction de chaque famille. Il faut également souligner que les opérations de chargement et

déchargement des wagons et camions sont complétées pour les entités présentes dans le système portuaire, peu importe l'heure et la date. Cette décision est prise afin de ne pas prolonger le temps de transit des entités, dont le temps d'attente est déjà pris en compte dans les processus de chargement et déchargement.

3.4.4. Variables dépendantes

Dans le cadre du cas d'étude de ce projet, les variables dépendantes visent les flux de marchandises ainsi que le transport ferroviaire du port actuel et du nouveau terminal. La première variable dépendante est le nombre de wagons par convoi ferroviaire. L'étude de cette variable, retrouvée dans la section des résultats, permet l'analyse de l'impact des flux ferroviaires du terminal 21 sur les dépassements de seuils, la surutilisation et sous-utilisation de la capacité de l'embranchement ferroviaire, et l'attribution des dépassements d'un seuil par les flux du port actuel et/ou du terminal 21.

Le nombre de wagons présents sur le port est la deuxième variable dépendante de cette étude. Les wagons du terminal 21 étant stockés sur le terminal durant leur passage au port, le nombre de wagons est suivi afin d'identifier des dépassements de la capacité de 80 wagons du nouveau terminal.

La dernière variable dépendante est la quantité de stocks dans le système portuaire. Cette variable est utilisée à des fins de validation du modèle et pour valider les prévisions de flux d'entités de transport au moyen de la méthodologie appliquée dans ce modèle de simulation.

3.4.5. Hypothèses

Dans cette section sont spécifiées certaines hypothèses ayant influencé le modèle de simulation.

Une première hypothèse provenant de l'APTR touche à la quantité de marchandise transportée par les camions et les wagons. Dans leurs prévisions, l'APTR estime qu'un camion plein transporte 30 tonnes de marchandise, tandis qu'un wagon plein transporte 90 tonnes de marchandise. En l'absence de tonnage dans les données routières limitées et

suite à une validation initiale du modèle illustrant que le tonnage déterminé avec les données ferroviaires limitées pour les transports ferroviaires, l'hypothèse de l'APTR a été reprise dans le modèle de simulation

Une seconde hypothèse touche à la quantité de marchandise initiale présente au terminal 21 et au port actuel au début de la simulation. Afin d'éviter une pénurie de stocks en début de simulation lors de la période de réchauffement, un stock initial de 300 000 tonnes pour le port actuel et de 166 750 tonnes pour le terminal 21 sont utilisés. Le stock du port actuel a été établi suite à une discussion avec l'APTR, tandis que le stock initial du terminal 21 correspond à 50% de la capacité théorique de 333 500 tonnes du terminal.

Une troisième hypothèse concerne l'horaire des opérations de chargement et déchargement des wagons. L'APTR ayant spécifié que les convois ferroviaires sont habituellement du lundi au vendredi, aucun wagon n'entre ou ne sort le samedi et le dimanche. Puisque les opérations de chargement et déchargement incluent également le temps de déplacement et le temps d'attente des wagons lors de leur passage au port, les wagons sont relâchés dans le premier convoi sortant disponible une fois leur opération de chargement ou déchargement complétée. Pour éviter de biaiser les résultats avec un temps d'attente supplémentaire, les opérations de chargement et déchargement des wagons se poursuivent durant le samedi et dimanche, et les wagons prêts à sortir sont relâchés dans les convois sortants du lundi, causant ainsi un pic de wagons sortants le lundi qui est pris en compte dans l'analyse des résultats.

3.5. Vérification et validation

Une validation initiale du modèle a été faite à l'aide de l'animation afin d'observer graphiquement les flux de marchandises et des transports. Les validations plus exhaustives examinaient le nombre d'entités passant par le modèle et l'évolution des stocks au cours de la simulation. Cette validation a permis de repérer un problème dans une version initiale du modèle causé par l'utilisation des données basées sur le nombre historique de wagons avec les quantités de navires et de camions basées sur les prévisions. L'évolution rapide

et hors contrôle des stocks a permis de mettre en évidence ce problème illustré à la figure 3.34.

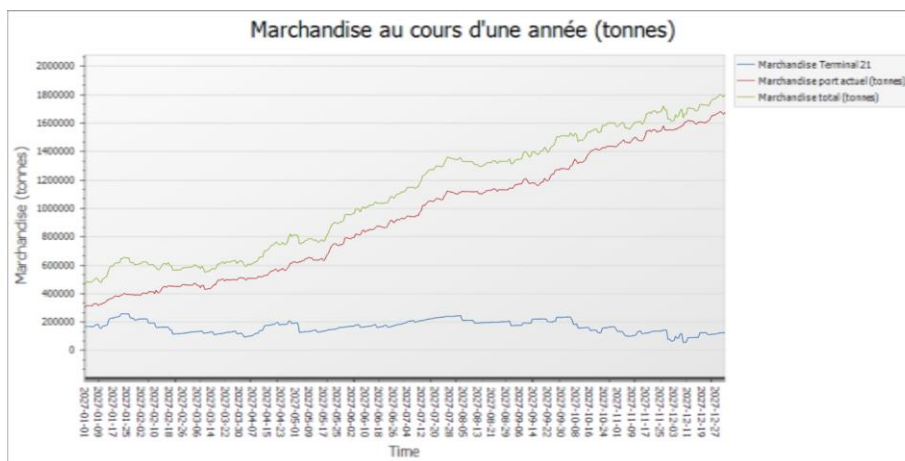


Figure 3.34 Évolution des stocks au cours d'une année (modèle erroné)

Ce problème fut corrigé dans une version subséquente du modèle en utilisant les données prévisionnelles pour tous les types de transports, assurant ainsi que les stocks soient balancés dans un modèle fonctionnel. Le modèle corrigé a pu de nouveau être validé par l'observation de l'évolution des stocks au cours du temps. Le balancement des flux de marchandise et le profil des stocks au cours de l'année illustré à la figure 3.35 ont permis de valider le modèle. Il est également pertinent de souligner que le profil des stocks de la figure 3.35 suit le profil de saisonnalité d'arrivées mensuelles des navires, offrant une validation supplémentaire au modèle de simulation.

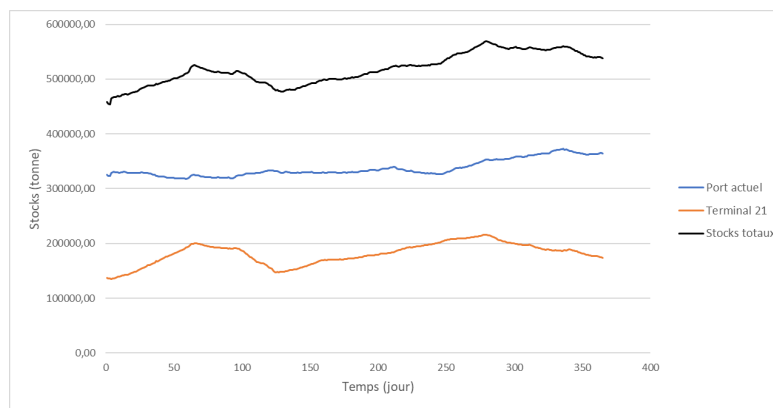


Figure 3.35 Évolution des stocks au cours d'une année (modèle validé)

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE

Dans cette section sont présentées les données obtenues suite à la simulation des scénarios d'arrivées maritimes. Au total, 50 scénarios avec 20 répliques ont été exécutés afin de reproduire fidèlement les répartitions du trafic maritime du port de Trois-Rivières. L'intérêt principal de l'APTR étant la composante ferroviaire, l'analyse des résultats se concentre sur le transport ferroviaire qui est plus susceptible d'être affecté par des goulots en raison de l'augmentation du trafic causé par le nouveau terminal. L'embranchement ferroviaire utilisé pour l'entrée et la sortie des convois ferroviaires, qui avait déjà une capacité limitée, deviendra une ressource partagée entre le port actuel et le terminal 21, augmentant le risque de congestion des transports ferroviaires. En addition de la capacité de l'embranchement ferroviaire, qui est évalué à partir de trois seuils illustrés précédemment à la figure 3.3, le nombre de wagons dans le système portuaire ainsi que l'évolution des stocks, à la fois au port actuel qu'au terminal 21, sont abordés dans l'analyse des résultats.

4.1. Traitement des données sortantes

Avant de procéder à l'analyse des résultats, un traitement des données sortantes du modèle est d'abord nécessaire afin d'obtenir des résultats valides. Puisque dans Simio, la simulation des 50 scénarios d'arrivées maritimes avec 20 répliques chacun est réalisée simultanément dans une expérience, la totalité des données sortantes sont enregistrées dans des fichiers Excel au cours de la simulation. L'objectif des scénarios d'arrivées maritimes étant de reproduire la distribution d'arrivées des navires de chaque famille le plus fidèlement possible, les résultats d'intérêts sont les résultats totaux des 50 scénarios et non les résultats individuels de chaque scénario. Afin de parvenir à ces résultats globaux issus des résultats de chaque scénario, des manipulations des données sortantes du modèle de simulation sont d'abord requises.

Les données sortantes de la simulation étant enregistrées dans un fichier Excel, il a d'abord été nécessaire de préparer un gabarit pour l'inscription des données sortantes de manière

organisée dans les colonnes et onglets appropriés avec des calculs et formules préparées pour l'analyse automatisée des données. Cette préparation fait en sorte que pour chaque réplication de chaque scénario, les données sortantes sont organisées et préparées de manière standardisée pour une économie maximale de temps. Au total, la collecte des données sortantes pour les 20 répliques de chacun des 50 scénarios a mené à la création de 1000 fichiers Excel. En addition à ces 1000 fichiers standardisés, 50 fichiers de scénarios additionnels, soit un fichier par scénario, ont été créés afin de fusionner les données des 20 répliques de chaque scénario. Un fichier final fusionnant les données sortantes des 50 fichiers de scénarios a été créé afin de pouvoir procéder à l'analyse des résultats et à des manipulations supplémentaires telles que la création de graphiques. Le tableau 4.1 illustre les types de données dans les fichiers Excel standardisés. L'ensemble des données sortantes sont organisées sur une base journalière durant une année entière.

Tableau 4.1 Description des données sortantes collectées automatiquement durant la simulation

Type de donnée	Famille (nom et numéro)	Détails
Nombre de wagons par convoi	Total (1 à 11)	In AM
		Out AM
		In PM
		Out PM
	Fertilisant (2)	In AM
		In PM
		Out AM
		Out PM
	Spodumène (4)	In AM
		In PM
		Out AM
		Out PM
	Port actuel flux maritime entrant (10)	Vide in AM
		Vide in PM
		Plein out AM
		Plein out PM
Port actuel flux maritime sortant (11)	Plein in AM	
	Plein in PM	
	Vide out AM	
	Vide out PM	
Nombre de wagons présent au port	Terminal 21 (1 à 9)	Par jour
	Port actuel (10 et 11)	Par jour
	Total (1 à 11)	Par jour
Stocks	Terminal 21 (1 à 9)	Par jour
	Port actuel (10 et 11)	Par jour
	Total (1 à 11)	Par jour

4.2. Analyse des convois ferroviaires

L'embranchement ferroviaire étant la ressource la plus susceptible d'être sujette à des goulots causés par l'augmentation du trafic ferroviaire dus au terminal 21, le nombre de wagons est suivi de près pour les flux entrants et sortants des convois AM et PM. Différentes mesures sont utilisées afin de permettre une évaluation des goulots potentiels

et de leur occurrence. À titre de rappel, les goulots sont évalués en fonction des dépassements des trois seuils établis par l'APTR présentés à la figure 3.3. Le tableau 4.2 offre une perspective rapide des dépassements de seuils par les convois au cours d'une année pour chaque service de transport ferroviaire.

Tableau 4.2 Dépassements de seuils par les convois ferroviaires

Service		Moyenne de wagons dans le convoi	Écart-type	Min	Max	Nombre de convois dépassant le seuil 3	Nombre de convois dépassant le seuil 2	Nombre de convois dépassant le seuil 1
AM	Entrant	17,90	2,17	13	22	0	0	0
	Sortant	21,15	14,70	9	58	0	49 (18,77%)	52 (19,92%)
PM	Entrant	37,14	4,08	26	45	0	11 (4,21%)	227 (86,97%)
	Sortant	30,78	9,40	19	59	0	39 (14,94%)	63 (24,14%)

Des quatre périodes de services ferroviaires (AM entrant, AM sortant, PM entrant et PM sortant), trois dépassent de manière récurrente le premier seuil de 33 wagons et le second seuil de 44 wagons de l'embranchement ferroviaire. La seule période de service avec aucun dépassement est le convoi entrant en AM. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les données historiques montrent qu'une proportion plus élevée de wagons arrivent dans le convoi PM et sont enregistrés durant la nuit. Les résultats mettent en évidence que le convoi entrant en PM est le service le plus problématique. En effet, les résultats du tableau 4.2 montrent que 86,97% des convois de ce service dépassent le premier seuil, ce qui est largement plus que les services sortants en AM et PM dont 19,92% et 24,14% des convois dépassent le nombre de wagons permis pour le premier seuil. Si, en termes de nombre d'occurrences, le service entrant en PM dépasse plus souvent les seuils de l'embranchement ferroviaire, les résultats indiquent des dépassements plus importants en général pour les services sortants en AM et en PM. Les pourcentages plus élevés de dépassements du deuxième seuil pour ces deux services ferroviaires suggèrent que malgré

un nombre de dépassements total moins élevé, l'occurrence de dépassements plus importants est plus élevée pour les transports sortants que pour le transport entrant en PM.

Le tableau 4.2 étant principalement dirigé vers le nombre de convois dépassant les seuils, l'analyse des résultats est approfondie afin d'établir un profil des dépassements de seuils en fonction du nombre de wagons. Aux tableaux 4.3 et 4.4 sont présentés la moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum pour le nombre de wagons au sein de convois ayant dépassé le premier et second seuil. En d'autres termes, seuls les wagons de convois ayant dépassé les seuils sont pris en compte dans ces résultats. N'étant jamais dépassé, le seuil 3 est mis de côté dans les analyses subséquentes.

Tableau 4.3 Dépassements du premier seuil (wagons)

Premier seuil (≥ 33 wagons)						
Service de train		Nombre de convois dépassant le seuil	Moyenne du nombre de wagons dépassant le seuil	Écart-type	Min	Max
AM	Entrant	0	-	-	-	-
	Sortant	52 (19,92%)	49,97	4,03	41	58
PM	Entrant	227 (86,97%)	38,12	3,43	33	45
	Sortant	63 (24,14%)	45,25	8,08	33	59

Tableau 4.4 Dépassements du second seuil (wagons)

Second seuil (≥ 44 wagons)						
Service de train		Nombre de convois dépassant le seuil	Moyenne du nombre de wagons dépassant le seuil	Écart-type	Min	Max
AM	Entrant	0	-	-	-	-
	Sortant	49 (18,77%)	50,48	3,57	46	58
PM	Entrant	11 (4,21%)	44,31	0,31	44	45
	Sortant	39 (14,94%)	50,14	4,98	44	59

Les résultats des tableaux 4.3 et 4.4 renforcent le constat émis suite à l'observation du tableau 4.2. Ainsi, 86,97% des convois du service entrant en PM dépassent le premier seuil, mais l'importance des dépassements en nombre de wagons est plus grande pour les transports sortants en AM et PM. En effet, pour les convois sortants dépassant le second seuil, les moyennes du nombre de wagons de ces convois sont de 50,48 et 50,14 wagons respectivement. De plus, pour les convois entrants en PM dépassant le second seuil avec une moyenne de 44,31 wagons par convoi, l'écart-type de 0,31 wagon ainsi que le minimum de 44 wagons et le maximum de 45 wagons illustrent que les dépassements du second seuil pour ce service ferroviaire sont mineurs en comparaison aux dépassements plus significatifs des convois sortants, comme illustré par leur moyenne d'environ 50 wagons et leur maximum respectif de 58 et 59 wagons.

Les goulots de l'embranchement ferroviaire ainsi que leurs occurrences ayant été identifiés pour les quatre services ferroviaires, la question précisant si l'addition du nouveau terminal est responsable pour ces goulots demeure. L'embranchement ferroviaire étant une ressource partagée entre le port actuel et le terminal 21, il est important de distinguer les goulots causés par les transports ferroviaires réguliers du port actuel et les transports dus aux flux supplémentaires du terminal 21. Le tableau 4.5 identifie le nombre moyen de wagons dépassant les seuils ainsi que la proportion des goulots associés au port actuel et au nouveau terminal. L'attribution des goulots est effectuée en gardant en tête que le port actuel est impacté par les activités du terminal 21, et non le contraire. En d'autres mots, les dépassements sont d'abord attribués au terminal 21 et seul un dépassement de seuil causé spécifiquement par les transports du port actuel peut être imputé au port actuel.

Tableau 4.5 Attribution des dépassements de seuils 1 et 2 pour le port actuel et le terminal 21

Moyenne (et %) du nombre de wagons dépassant les seuils					
Service de train		Seuil 1 (≥ 33)		Seuil 2 (≥ 44)	
		Port actuel	T21	Port actuel	T21
AM	Entrant	-	-	-	-
	Sortant	42,03 (100%)	-	46 (86,07%)	7,44 (13,93%)
PM	Entrant	-	10,68 (100%)	-	12,41 (100%)
	Sortant	37,22 (75,80%)	11,88 (24,20%)	-	13,69 (100%)

Les résultats du tableau 4.5 montrent que pour le service entrant en PM, 100% des dépassements du premier et second seuil sont attribuables aux flux ferroviaires du terminal 21. Dans le cas des dépassements pour les services sortants, 100% pour le premier seuil et 86,07% pour le second seuil des convois en AM sont attribuables au port actuel. Pour les convois sortants en PM, les dépassements du premier seuil sont attribués au port actuel à 75,80% et au terminal 21 à 24,20%. Les dépassements du second seuil pour ce service de train sont totalement dus au terminal 21. En résumé, les nombreuses occurrences de dépassements identifiées pour le service entrant en PM semblent tous dus au terminal 21, tandis que les dépassements moins fréquents, mais plus importants des services sortants, sont plus souvent attribuables au port actuel qu'au terminal 21. Ayant établi un profil des flux ferroviaires pour les différents services de trains et en distinguant les flux des ports actuels et du terminal 21, des représentations visuelles des flux ferroviaires sont créées afin d'assister à l'analyse des résultats présentés précédemment. Les représentations visuelles du nombre de wagons par convoi cumulés du port actuel et du terminal 21 au cours de l'année sont illustrées aux figures 4.1 à 4.4. De plus, les trois seuils sont identifiés dans les figures afin d'illustrer visuellement les dépassements de seuils au cours de la simulation.

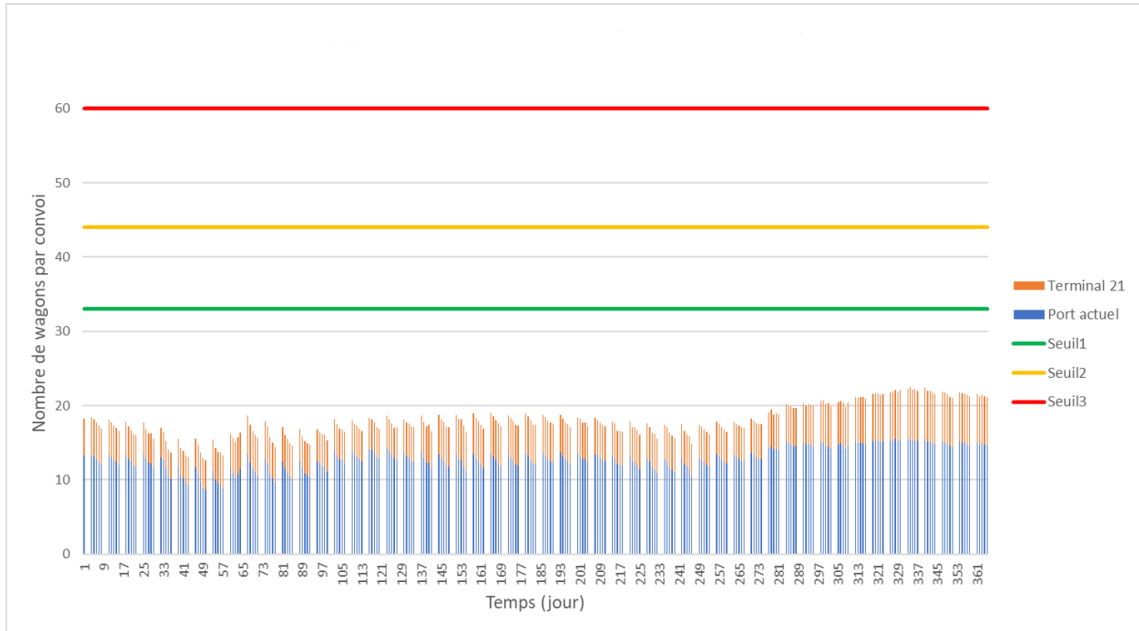


Figure 4.1 Nombre de wagons entrant par convoi AM durant l'année

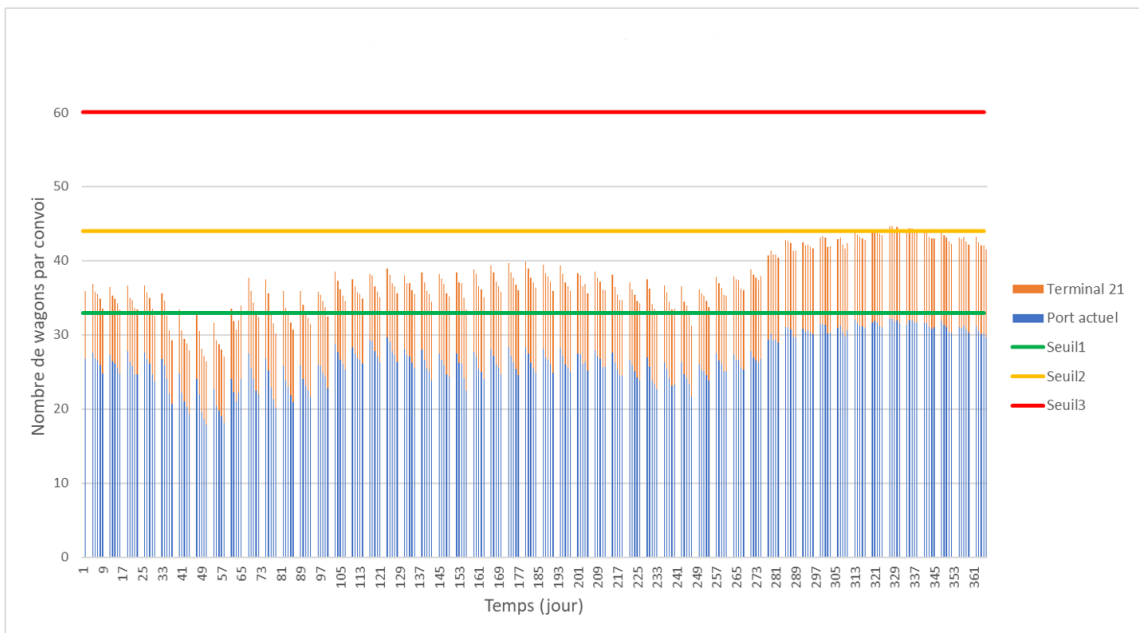


Figure 4.2 Nombre de wagons entrant par convoi PM durant l'année

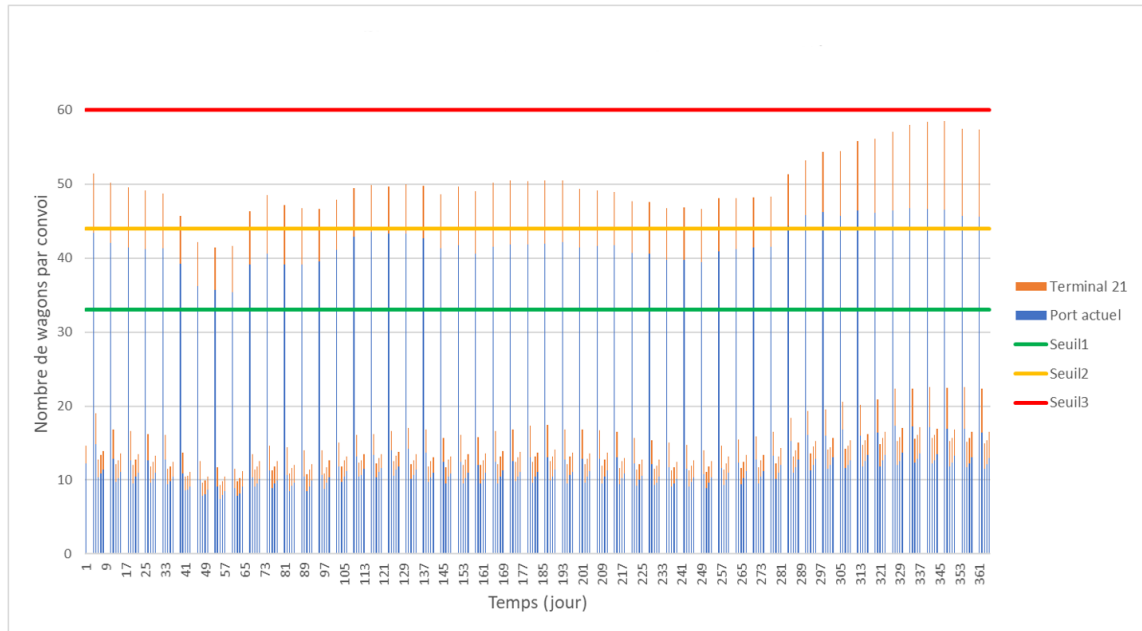


Figure 4.3 Nombre de wagons sortant par convoi AM durant l'année

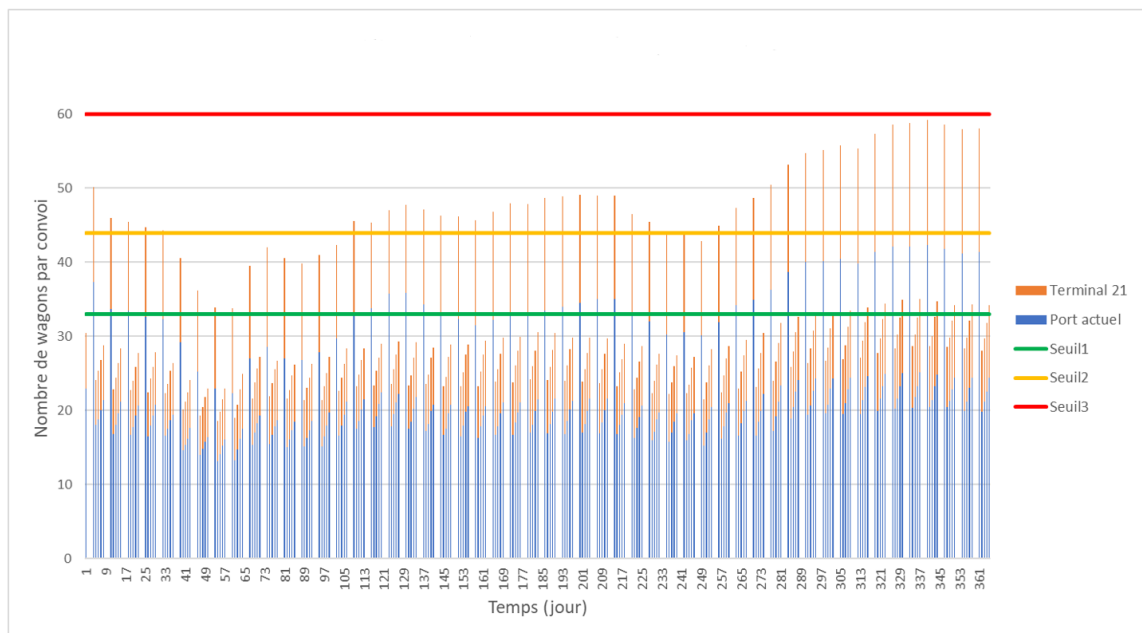


Figure 4.4 Nombre de wagons sortant par convoi PM durant l'année

L'observation des figures 4.1 et 4.2 permet de constater que la capacité de l'embranchement ferroviaire est sous-utilisée en AM, expliquant pourquoi aucun dépassement n'a lieu pour ce service. À l'opposé, on constate qu'avec l'addition des flux

ferroviaires du terminal 21, la capacité de l'embranchement ferroviaire est surutilisée régulièrement pour le service entrant en PM, expliquant les dépassements fréquents du premier seuil par les convois de ce service. L'analyse des figures 4.3 et 4.4, soit les services sortants en AM et PM, fait ressortir un profil particulier du nombre de wagons par convoi durant l'année. En effet, des pics réguliers sont remarqués au début de chaque semaine, soit les lundis. Ces pics sont expliqués par la programmation du modèle de simulation et une condition imposée par l'APTR, soit qu'aucun convoi ferroviaire ne circule dans le système portuaire les samedis et dimanches. Afin d'éviter d'ajouter un temps d'attente supplémentaire aux wagons transitant par le port, les opérations de chargements et déchargements de wagons sont poursuivies pour les wagons présents au port le samedi et dimanche. Les wagons en attente d'un convoi sortant sont par la suite relâchés dans les convois sortants du lundi, provoquant ainsi les pics observés aux figures 4.3 et 4.4.

Malgré ces pics du lundi, il a été décidé de conserver le modèle de simulation tel quel, puisque les données historiques de l'APTR indiquent la présence de wagons entrants et sortants le samedi et dimanche. Le regroupement des flux ferroviaires du samedi, dimanche et lundi dans les données historiques illustrent un % importants de wagons expliquant partiellement les pics observés comme l'illustre le tableau 4.6.

Tableau 4.6 Pourcentage de wagons en fonction du jour de la semaine (samedi, dimanche et lundi regroupés)

Famille	Fertilisant (#2)	Spodumène (#4)	Port actuel in (#10)	Port actuel out (#11)
Jour de semaine	% de wagons			
Lundi	32,76%	30,06%	25,37%	23,26%
Mardi	24,14%	19,35%	18,02%	19,50%
Mercredi	32,76%	22,92%	19,35%	18,75%
Jeudi	3,45%	9,82%	17,80%	17,96%
Vendredi	6,90%	17,86%	19,45%	20,53%

Objectivement, en lissant les transports du lundi avec le reste de la semaine, l'analyse de la figure 4.3 suggère qu'aucun dépassement n'aurait lieu pour les convois sortants en AM,

tandis que les dépassements du premier seuil augmenteraient légèrement pour les wagons sortants en PM. Afin de prendre compte des pics du lundi observés aux figures 4.3 et 4.4, le nombre de wagons entrant et sortant est comparé entre le lundi et le reste de la semaine dans le tableau 4.7. On constate qu'en effet, pour les services sortants, il y a une différence significative du nombre de wagons entre le lundi et le reste de la semaine.

Tableau 4.7 Wagons entrants et sortants en fonction des jours de la semaine

	Lundi				Mardi à vendredi			
	Moyenne de wagons	Écart-type	Min	Max	Moyenne de wagons	Écart-type	Min	Max
Entrant	57,45	4,85	47	66	54,45	6,40	39	67
Sortant	97,58	10,27	75	118	40,57	4,98	29	52

4.3. Capacité ferroviaire

Le nombre de wagons présents dans le système portuaire est également colligé une fois par jour. Cet indicateur est pertinent, puisque les wagons du terminal 21 demeurent à l'intérieur de ce terminal jusqu'à leur sortie du système portuaire. L'APTR ayant spécifié que le terminal 21 aurait une capacité d'accueil maximale de 80 wagons, le respect de cette contrainte est ainsi vérifié. Le profil du nombre de wagons en fonction du temps pour le terminal 21, le port actuel et le système portuaire global est illustré à la figure 4.5.

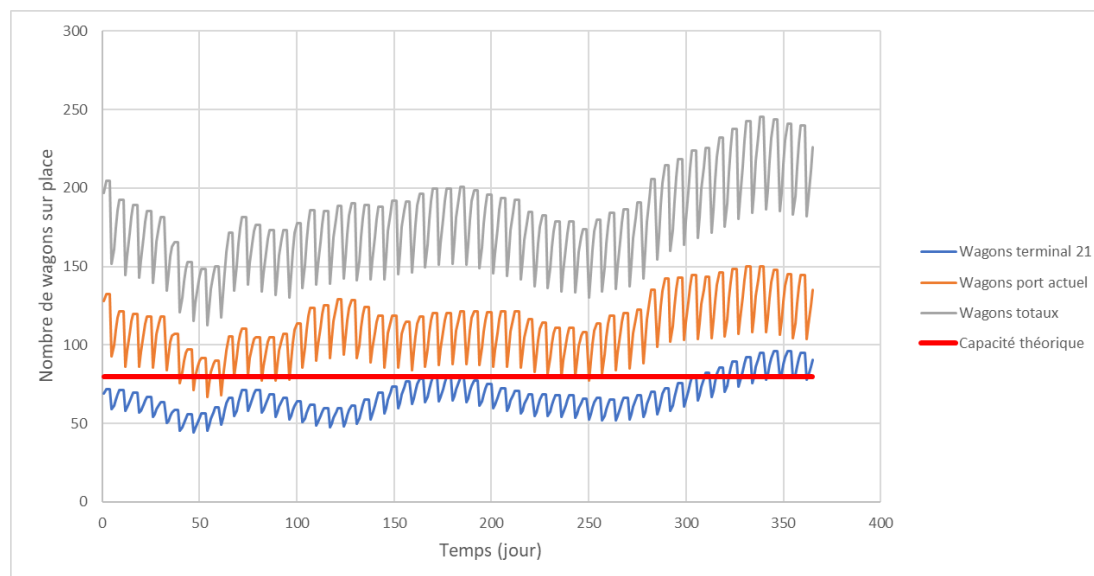


Figure 4.5 Nombre de wagons dans le système portuaire en fonction du temps

On constate que le nombre de wagons présents au terminal 21 surpasse la capacité d'accueil de 80 wagons vers la fin de l'année et possiblement vers le milieu de l'année. Les résultats plus détaillés sont présentés au tableau 4.8.

Tableau 4.8 Nombre de wagons présents dans le système portuaire

Résultats		Moyenne	Écart-type	Min	Max	Capacité dépassée (jours et %)
Nombre de wagons dans le port	Terminal 21	67,27	11,18	44	96	42 (11,51%)
	Port actuel	111,70	18,18	67	150	N/D
	Port complet	178,98	28,01	112	245	N/D

Comme indiqué au tableau 4.8, la capacité d'accueil du terminal 21 a été dépassée 11,51% de l'année. À la vue de ces résultats, l'APTR peut donc s'attendre à des dépassements de sa capacité d'accueil de wagons pour le terminal 21 avec les prévisions actuelles.

4.4. Évolution des stocks

L'évolution des stocks du système portuaire a été suivie durant la simulation et a servi à la validation du modèle de simulation ainsi que pour confirmer la fluidité des opérations

logistiques avec l'ajout des flux du nouveau terminal. Malgré que l'analyse des résultats soit concentrée sur la composante ferroviaire, la simulation englobe les opérations logistiques touchant au transport maritime, routier et ferroviaire afin de simuler un système complet. Le profil de l'évolution des stocks en fonction du temps est présenté à la figure 4.6.

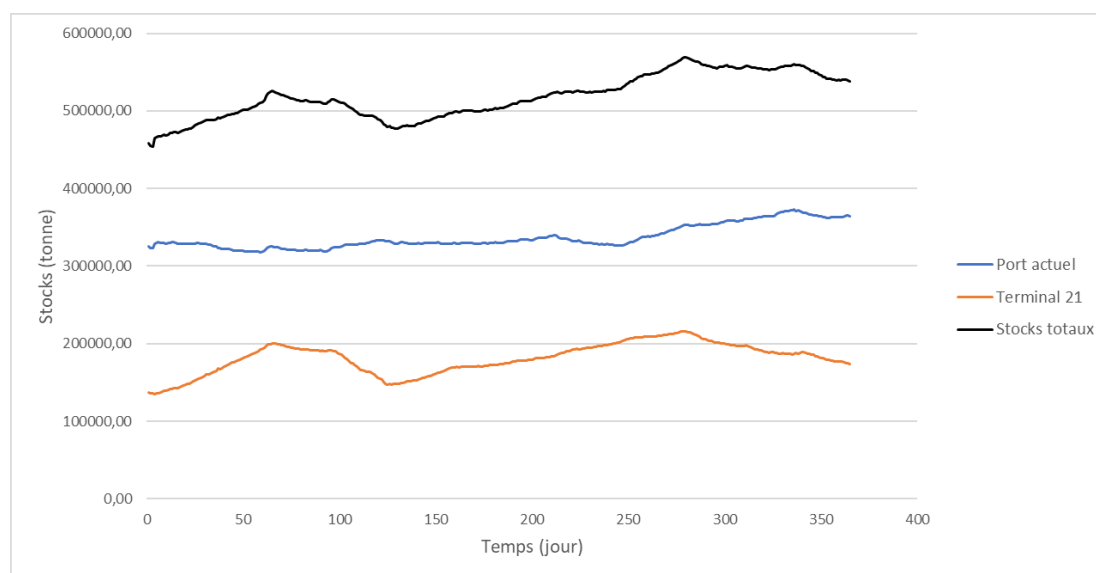


Figure 4.6 Stocks en fonction du temps

On constate que le profil de l'évolution des stocks est similaire au profil du nombre de wagons dans le système portuaire présenté à la figure 4.5. Cela s'explique par le fait que les stocks ainsi que les arrivées de wagons sont influencés par les arrivées maritimes dans le modèle qui sont déterminées en fonction de la saisonnalité des différentes familles prises en compte dans le modèle. Les résultats plus détaillés des stocks sont présentés au tableau 4.9.

Tableau 4.9 Résultats des stocks

Résultats		Moyenne	Écart-type	Min	Max
Stocks (tonnes)	Terminal 21	181 394,46	197 16,75	135 309,56	216 136,91
	Port actuel	336 981,04	152 21,28	318 061,51	372 890,31
	Port complet	518 340,59	283 59,44	454 153,99	569 535,76

4.5. Sommaire des résultats

Les dépassements réguliers du premier seuil ainsi que les dépassements plus rares du second seuil indiquent que les flux ferroviaires additionnels du terminal 21 créeront des goulots au niveau de l'embranchement ferroviaire. Cependant, dû à la présence de pics causés par le modèle pour les services ferroviaires sortants, l'importance des dépassements pour ces périodes de service est moins significative qu'initialement apparente. En effet, en ajustant l'analyse des résultats pour tenir compte des pics, le service sortant en AM est sous-utilisé et ne présente aucun dépassement, tandis que le service sortant en PM présente tout de même des dépassements du premier seuil, mais aucun dépassement du second seuil. Finalement, il a été constaté que la capacité d'accueil des wagons du terminal 21 était dépassée vers la fin de l'année simulée, illustrant des problèmes de capacité du terminal 21 lorsque la saisonnalité des produits est la plus élevée. À la vue de ces résultats, l'APTR peut s'attendre à des interactions non souhaitables entre les convois ferroviaires du port et l'embranchement ferroviaire du centre-ville de la municipalité. En effet, les dépassements des deux premiers seuils indiquent que des convois ferroviaires dépasseront les limites du port lors de leurs entrées et sorties. Il est important de mentionner que le troisième seuil n'est jamais dépassé, indiquant ainsi que les convois ferroviaires ne pénétreront pas dans le tunnel à l'est du centre-ville.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION

5.1. Synthèse de la recherche

Le but de ce projet de recherche était de développer une méthodologie de prévision de goulots et d'évaluation de la capacité dans le contexte d'un projet d'expansion portuaire. En addition au contexte d'expansion portuaire, la méthodologie est développée pour le cas d'une organisation portuaire disposant de données limitées. La méthodologie proposée est démontrée avec la réalisation d'une étude de cas au port de Trois-Rivières, un port urbain de taille moyenne spécialisé dans le stockage et le transport multimodal d'une diversité de produits en vrac et de marchandises générales. L'étude de cas du port de Trois-Rivières a permis de diagnostiquer les goulots ferroviaires potentiels et de valider les prévisions de flux pouvant transiter sur le futur terminal et le port actuel.

La revue de littérature a mis en évidence une lacune de la littérature touchant les ports de marchandise en vrac, faisant en sorte que la revue a été élargie pour inclure différents types de systèmes portuaires, comme les ports de marchandise conteneurisée. La revue aborde les défis et enjeux du secteur portuaire avant d'aborder différentes solutions explorées dans la littérature. Le sujet de l'évaluation de la capacité et son lien avec les projets d'expansion sont ensuite explorés, mettant de l'avant l'utilisation de la simulation ainsi que différentes approches et critères utilisés pour l'évaluation de la capacité. La méthodologie proposée dans ce mémoire est basée sur le concept avancé par Bassan (2007), qui avance que le nombre de navires entrant affecte le nombre de conteneurs, ce qui par conséquent affecte également le nombre de camions entrant. Sur la base de ce concept, une méthodologie centrée sur l'utilisation principale des données maritimes est mise de l'avant et appliquée au port de Trois-Rivières pour l'étude des goulots potentiels et l'évaluation de la capacité de la composante ferroviaire pour le projet d'expansion du terminal 21. En se basant principalement sur les données historiques maritimes ainsi que les prévisions de l'APTR, un modèle de simulation à événements discrets mettant en scène les opérations logistiques des navires, wagons et camions ainsi que les flux de marchandises a été développé et utilisé pour évaluer les goulots potentiels touchant au

transport ferroviaire. Les indicateurs sont principalement centrés sur l'embranchement ferroviaire du système portuaire, qui est une ressource ayant une capacité limitée et qui est partagée entre le port actuel et le nouveau terminal. Les seuils de l'embranchement ferroviaire définis par l'APTR ainsi que la quantité de wagons présents au terminal 21 sont les indicateurs utilisés pour la prévision de goulots potentiels. Les résultats illustrent des dépassements réguliers du premier seuil et des dépassements plus rares du second seuil. Les résultats mettent également en évidence une sous-utilisation de la capacité de l'embranchement ferroviaire en AM, qui pourrait servir à réduire les dépassements de seuils. Similairement aux dépassements, la capacité d'accueil de wagons du terminal 21 est également dépassée vers la fin de l'année simulée. Les résultats des dépassements de seuils pour les services ferroviaires sortants en AM et PM ne sont pas aussi nets que pour les services entrants dus à la présence de pics du nombre de wagons sortant les lundis. Cependant, le profil des dépassements et les analyses sous plusieurs angles des transports ferroviaires offrent tout de même une perspective et des résultats valables à l'APTR afin d'aider les gestionnaires dans leur prise de décisions touchant la construction du nouveau terminal 21.

5.2. Limitations de la recherche

Certaines limitations sont à prendre en compte dans le cadre de cette recherche. En effet, même si la méthodologie est conçue pour être fonctionnelle en utilisant principalement les données maritimes historiques, plusieurs paramètres entrants du modèle de simulation, tels que le nombre d'entités de transports et la quantité de marchandise importée et exportée, doivent être compilés. Les résultats de la simulation (ainsi que les interprétations qui en suivent) sont directement liés à la qualité des données fournies par l'administration portuaire. Dans le même ordre d'idée, il est possible que le traitement des données ait eu un impact sur les résultats finaux de l'étude, par exemple l'exclusion de données aberrantes dans l'historique des activités ferroviaires. Une autre limitation du cas d'étude présenté est l'agrégation de l'ensemble des flux du port actuel en deux familles, soit les flux de marchandises entrants et sortants. Considérant que la simulation de familles de produits distinctes, comme réalisée pour le terminal 21, demanderait davantage de temps

de développement, le port actuel a été traité comme une boîte noire dans le modèle de simulation. Certaines variations dans la saisonnalité des transports et flux de marchandise de produits individuels sont donc probablement perdues et absorbées dans la saisonnalité du port actuel général utilisé dans le modèle. L'étude étant principalement concentrée sur l'impact des nouveaux flux du terminal 21, la portion du port actuel ne requérait pas un niveau de détail important dans le modèle de simulation. Il est pertinent de souligner que dans le cadre de travaux futurs se penchant sur des avenues de solution pour la mitigation des goulots diagnostiqués, un niveau de détail plus important pour la portion du port actuel sera nécessaire.

5.3. Contributions de la recherche

Tout d'abord, la recension des écrits sur l'utilisation de modèle de simulation appliquée aux ports de marchandises non conteneurisées a montré que très peu de travaux ont été faits en ce sens. Les travaux réalisés dans ce mémoire ont permis de décrire et présenter une méthodologie de prévision de goulots et d'évaluation de la capacité dans un contexte d'expansion portuaire, ce qui contribue à la littérature scientifique au niveau théorique.

La méthodologie proposée dans ce mémoire permet de créer un modèle de simulation et d'identifier les données d'entrées nécessaires en utilisant principalement les données maritimes. Cette approche, basée sur le concept avancé par Bassan, offre l'opportunité aux ports d'utiliser des outils de simulation malgré des données limitées. Il est pertinent de souligner que Bassan (2007) propose une méthodologie de quantification de la performance des opérations portuaires en fonction de plusieurs indicateurs et à l'aide de la simulation. Cependant, contrairement à l'étude présentée dans ce mémoire, Bassan (2007) demeure au niveau conceptuel sans développement méthodologique sur le concept théorique proposé et n'adresse pas les enjeux d'expansion portuaire. Considérant que ce ne sont pas tous les ports qui ont accès à une base de données complète et fiable, la méthodologie proposée dans ce mémoire ainsi que l'étude de cas se distingue et offre une option d'aide à la décision prenant en compte des ressources limitées dont disposent parfois les gestionnaires de port en s'appuyant sur un cas d'étude concret.

Finalement, cette recherche contribue au développement des connaissances sur l'utilisation de la simulation appliquée à un port spécialisé dans la marchandise non conteneurisée ainsi que sur la prévision de goulots et l'évaluation de la capacité en contexte de projet d'expansion. L'industrie maritime étant en croissance, il est intéressant de se pencher sur le cas de projets d'expansion pour divers types de ports disposant de différentes ressources.

5.4. Avenues futures de la recherche

Dans cette étude, les opérations logistiques et les flux de marchandises des transports maritimes, ferroviaires et routiers sont simulés en suivant une méthodologie concentrée sur les données maritimes pour compenser une lacune en visibilité au niveau des données routières et ferroviaires. Il pourrait être intéressant de comparer les résultats résultants de cette méthodologie et les résultats d'un modèle de simulation disposant de toutes les données ferroviaires, routières et maritimes, le tout dans un nouveau cas d'étude, afin de comparer et d'analyser les écarts de résultats entre les deux méthodes.

Il serait également intéressant de réaliser une étude de cas dans différents ports et types de ports afin de valider que la méthodologie est généralisable à d'autres ports de marchandises non conteneurisées ainsi qu'à des ports à conteneurs après certains ajustements au modèle.

Finalement, l'étude de cas s'étant concentrée sur la composante ferroviaire du port de Trois-Rivières, il pourrait être intéressant de revisiter le modèle avec des contraintes maritimes et routières afin d'utiliser le plein potentiel du modèle développé pour l'étude de cas. Par exemple, la congestion au niveau du déchargement des marchandises des navires et au niveau des routes utilisées par les camions entrants et sortants dans les prémices du port aurait apporté une autre dimension à l'analyse des flux logistiques.

RÉFÉRENCES

- Balliauw, M. (2021). Time to build: A real options analysis of port capacity expansion investments under uncertainty. *Research in Transportation Economics*, 90.
- Bassan, S. (2007). Evaluating seaport operation and capacity analysis - preliminary methodology. *Maritime Policy and Management*, 34(1), 3-19.
- De Langen, P., Turró Calvet, M., Fontanet, M., & Caballé, J. (2018). The infrastructure investment needs and financing challenge of European ports.
- Douaioui, K., Fri, M., Mabrouki, C., & Semma, E. A. (2018). Smart port: Design and perspectives. Paper presented at the *Proceedings - GOL 2018: 4th IEEE International Conference on Logistics Operations Management*, 1-6.
- Dragović, B., Tzannatos, E., & Park, N. K. (2017). Simulation modelling in ports and container terminals: Literature overview and analysis by research field, application area and tool. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(1), 4-34.
- Figueira, G., & Almada-Lobo, B. (2014). Hybrid simulation-optimization methods: A taxonomy and discussion. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46, 118-134.
- Fruth, M., & Teuteberg, F. (2017). Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? *Cogent Business & Management*, 4(1).
- Goudreau E, Baril C, Gascon V, Audy JF. 2016. Cartographie du trafic routier, ferroviaire et maritime et diagramme de circulation au Port de Trois-Rivières. Rapport de recherche, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada. 66 pages.
- Hartmann, S. (2004). Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics. *OR Spectrum*, 26(2), 171-192.
- Iyoob, M. Z., & Van Niekerk, B. (2021). CAUDUS: An optimisation model to reducing port traffic congestion. Paper presented at the *IcABCD 2021 - 4th International*

Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems, Proceedings.

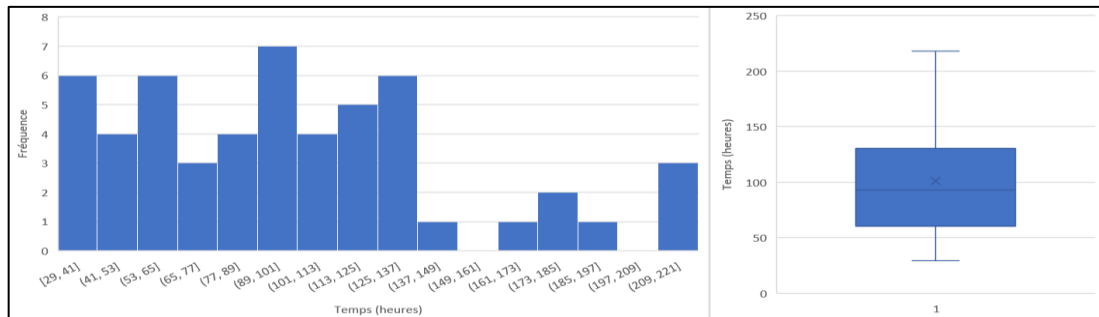
- Jovic, M., Kavran, N., Aksentijevic, S., & Tijan, E. (2019). The transition of croatian seaports into smart ports. Paper presented at the *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2019 - Proceedings*, 1386-1390.
- Mazouz, A., Naji, L., & Lyu, Y. (2017). Container – terminal – gate – system optimization. *Journal of Applied Business Research*, 33(3), 605-614.
- Molavi, A., Lim, G. J., & Race, B. (2019). A framework for building a smart port and smart port index. *International Journal of Sustainable Transportation*.
- Netto, J. F., Botter, R. C., & Medina, A. C. (2016). Analysis of capacity associated to levels of service at port terminals using systemic approach and simulation of discrete events. Paper presented at the *Proceedings - Winter Simulation Conference, 2016-February* 3426-3437.
- Port of Rotterdam Wants to Be the Smartest. (2018). Consulté le 6 octobre 2019, à l'adresse <https://worldmaritimeneeds.com/archives/254068/port-of-rotterdam-wants-to-be-the-smartest/>
- Rajabi, A., Khodadad Saryazdi, A., Belfkih, A., & Duvallet, C. (2019). Towards smart port: An application of AIS data. Paper presented at the *Proceedings - 20th International Conference on High Performance Computing and Communications, 16th International Conference on Smart City and 4th International Conference on Data Science and Systems, HPCC/SmartCity/DSS 2018*, 1414-1421.
- Rasmussen, A., Delenclos, F. X., & Riedl, J. (2018). To Get Smart, Ports Go Digital. Consulté le 5 octobre 2019, à l'adresse <https://www.bcg.com/fr-ca/publications/2018/to-get-smart-ports-go-digital.aspx>

- Reis, V., & Almeida, A. (2019). Capacity evaluation of a railway terminal using microsimulation: Case study of a freight village in turin. *Frontiers in Built Environment*, 5.
- Triska, Y., Frazzon, E. M., & Silva, V. M. D. (2020). Proposition of a simulation-based method for port capacity assessment and expansion planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 103.
- United Nations Conference on Trade and Development. (2018). Review of maritime transport. UNCTAD/RMT/2018. Consulté le 7 octobre 2019, à l'adresse https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf
- Wu, Y., Xiong, X., Gang, X., & Nyberg, T. R. (2013). Study on intelligent port under the construction of smart city. Paper presented at the *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, SOLI 2013*, 175-179.
- Yang, Y., Zhong, M., Yao, H., Yu, F., Fu, X., & Postolache, O. (2018). Internet of things for smart ports: Technologies and challenges. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 21(1), 34-43.

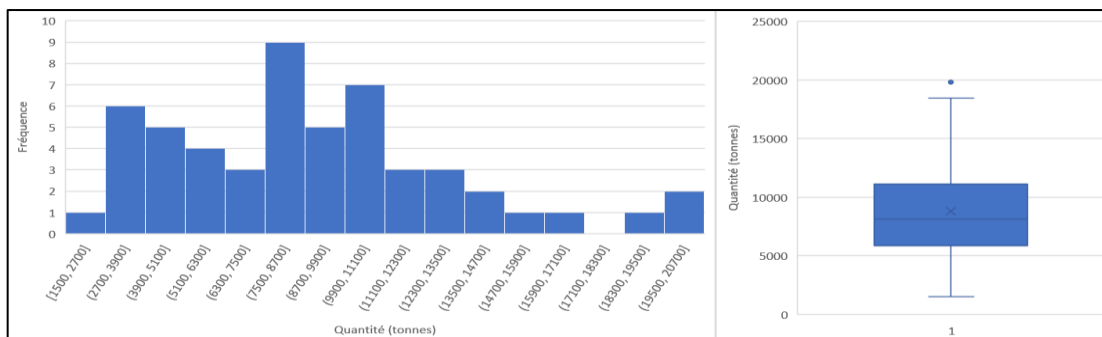
ANNEXES

Annexe 1

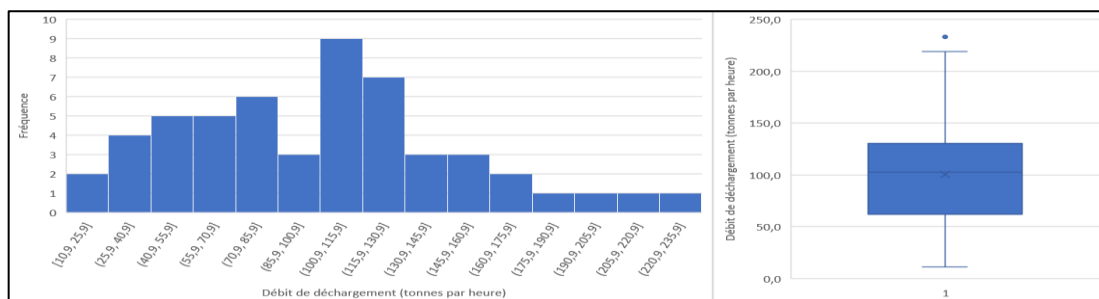
Distributions maritimes des temps de transit, quantité de marchandise et débit de chargement / déchargement pour chaque famille.



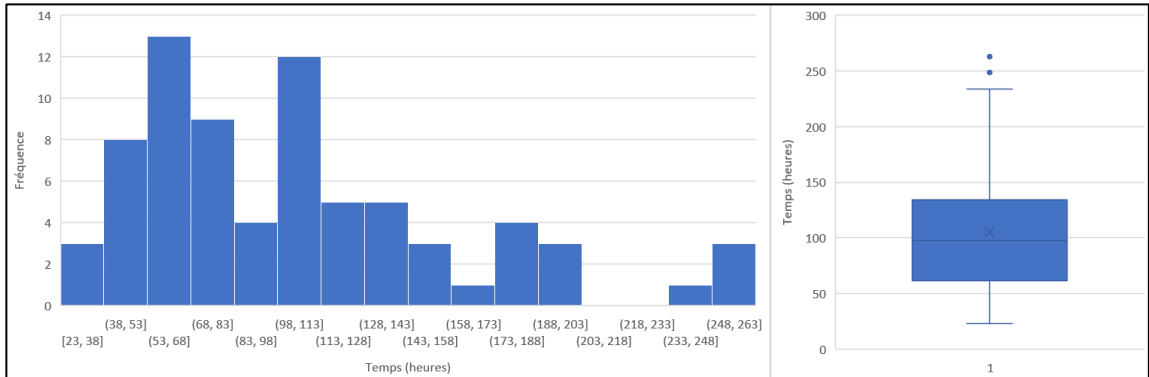
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 2)



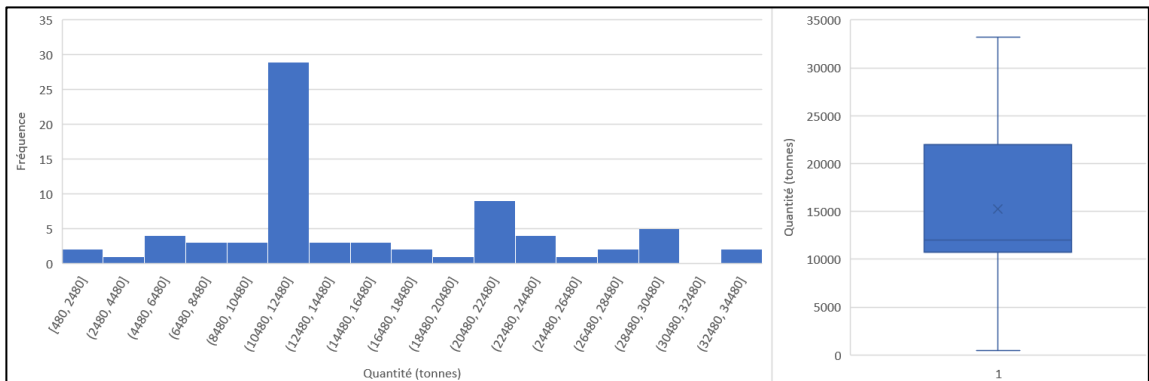
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 2)



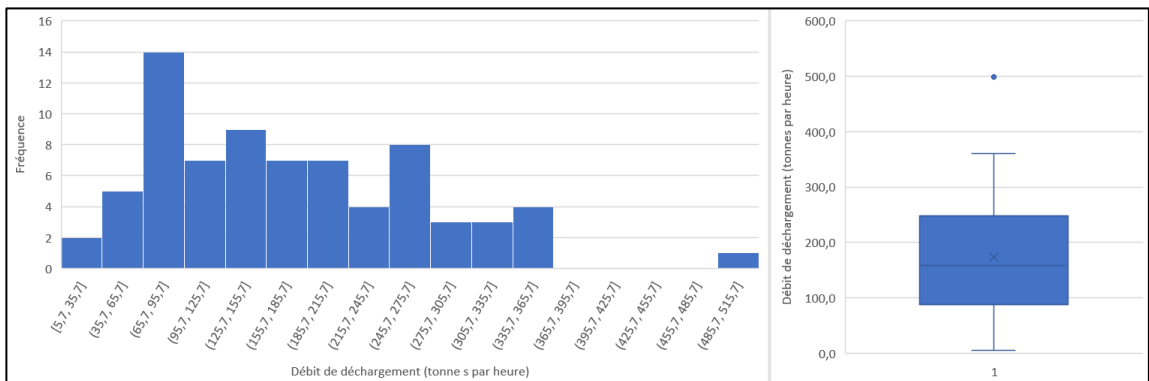
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 2)



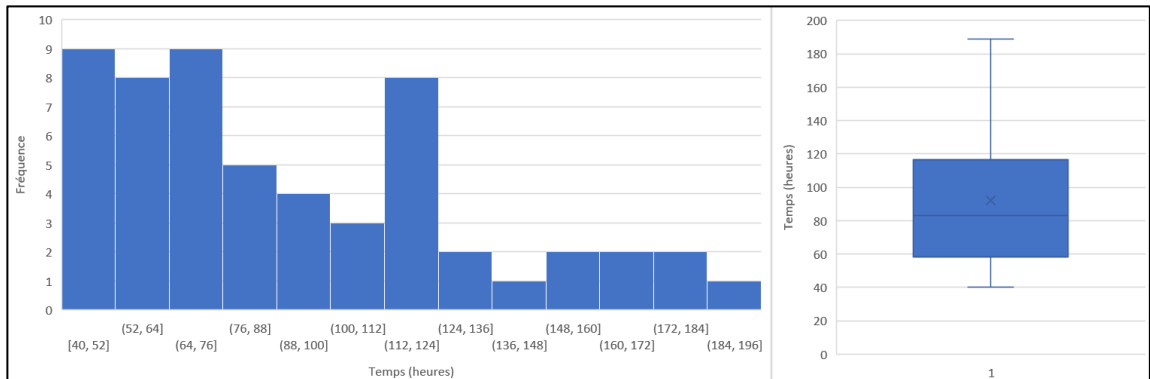
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 3)



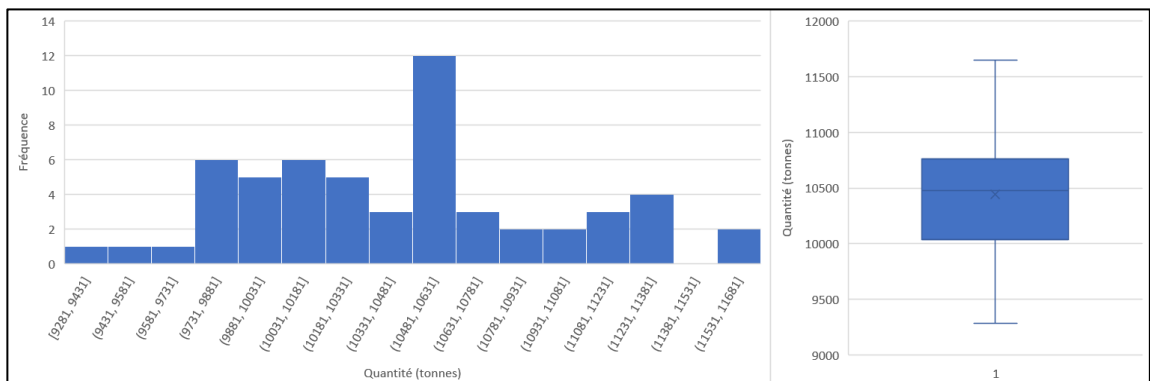
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 3)



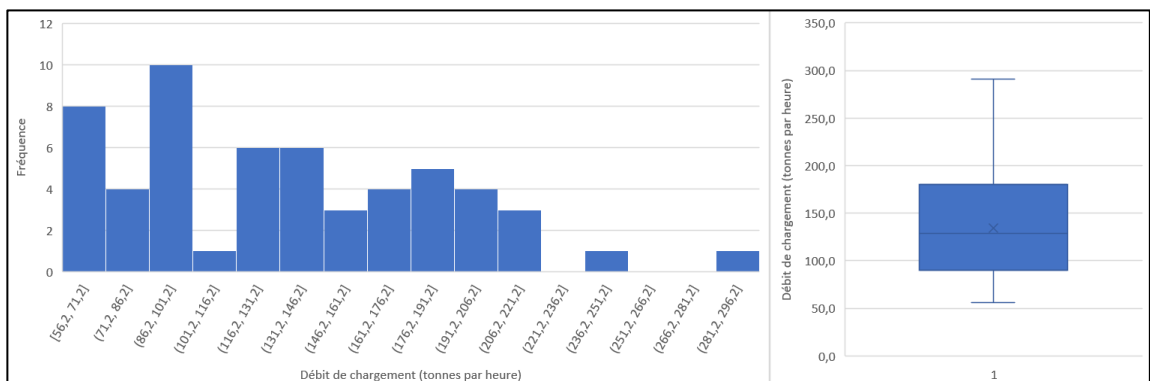
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 3)



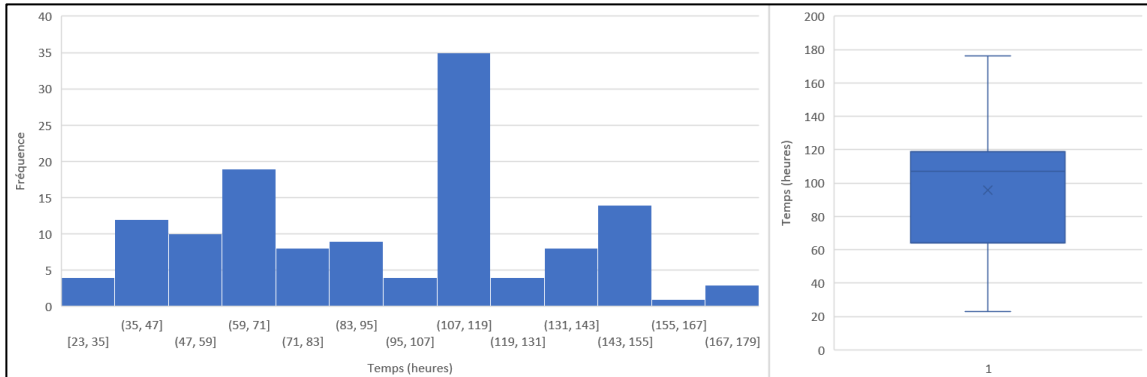
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 4)



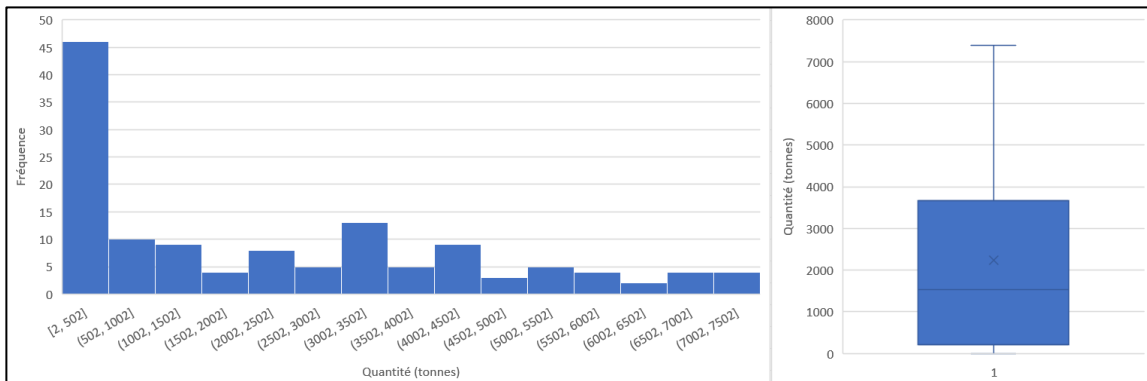
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 4)



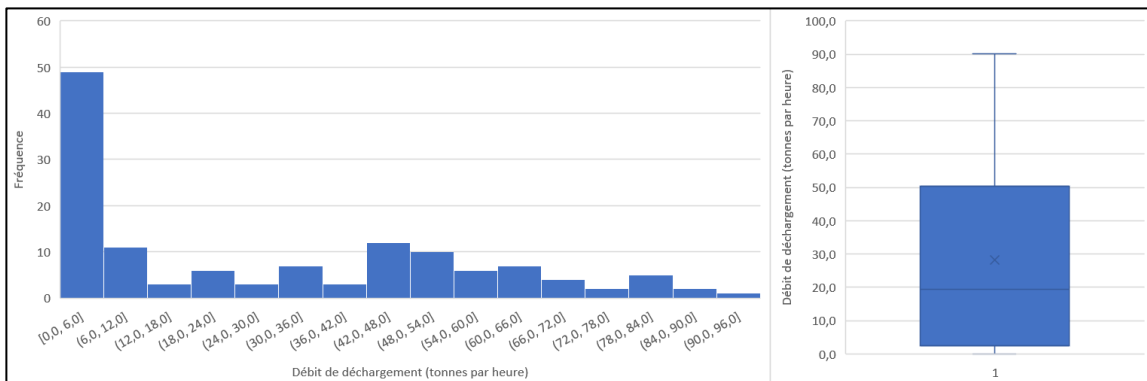
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 4)



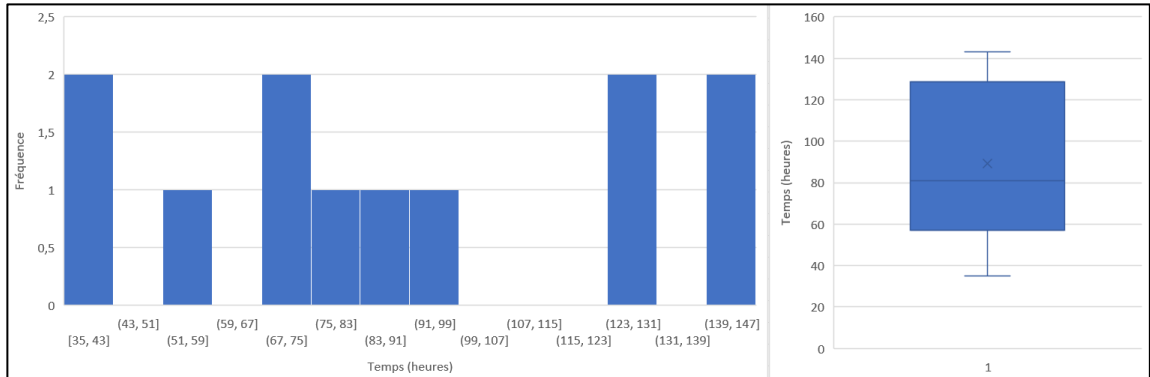
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 5)



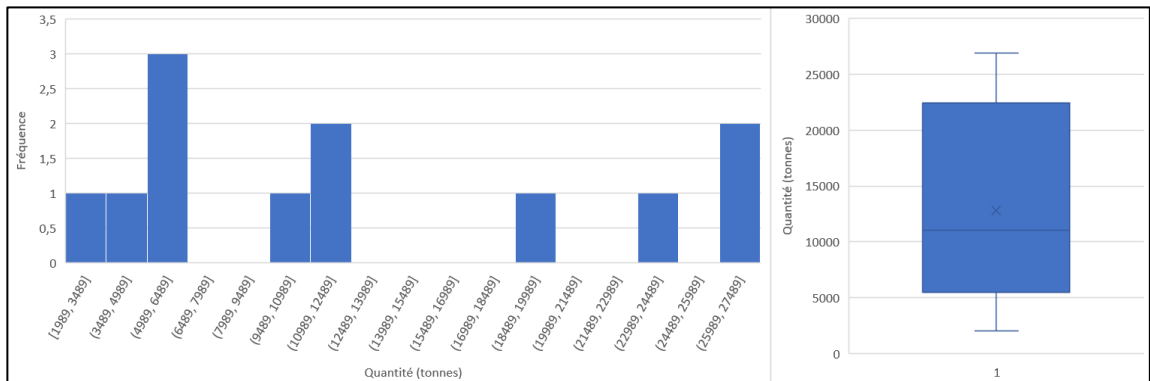
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 5)



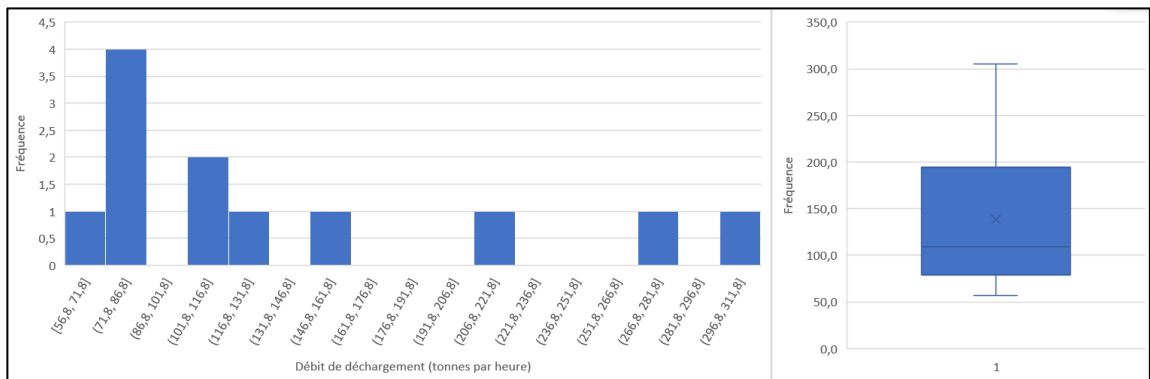
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 5)



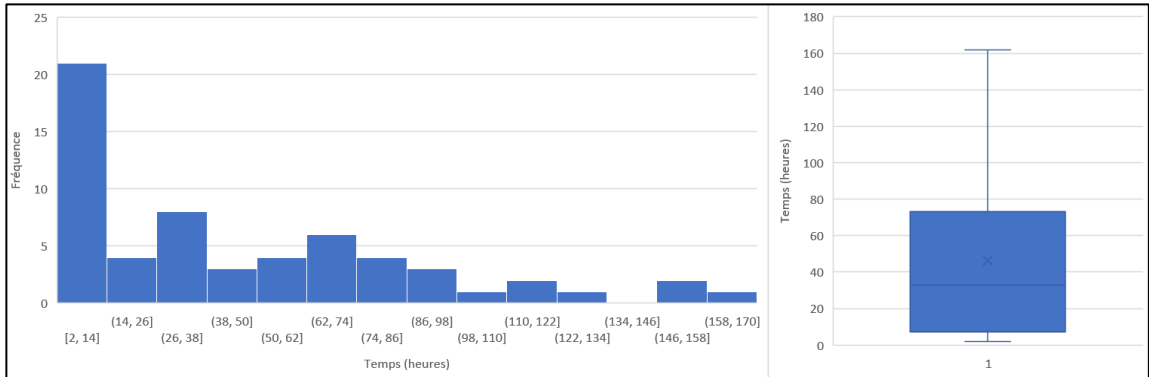
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 6)



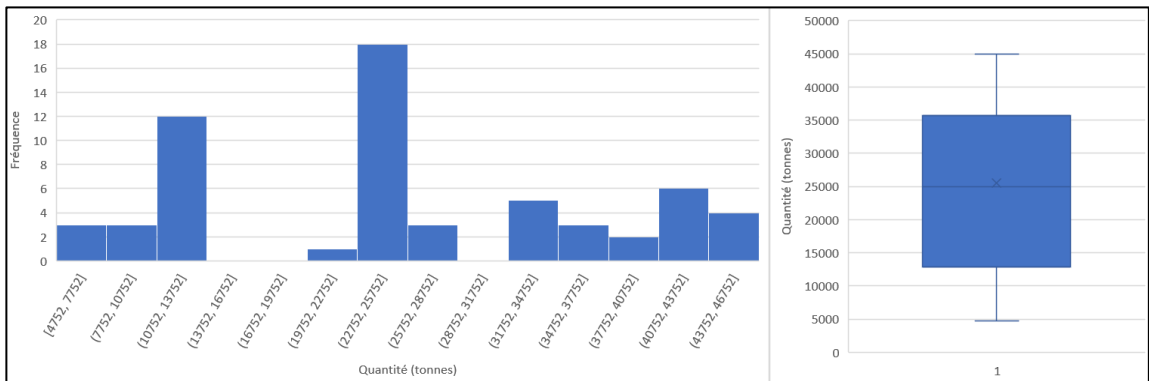
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 6)



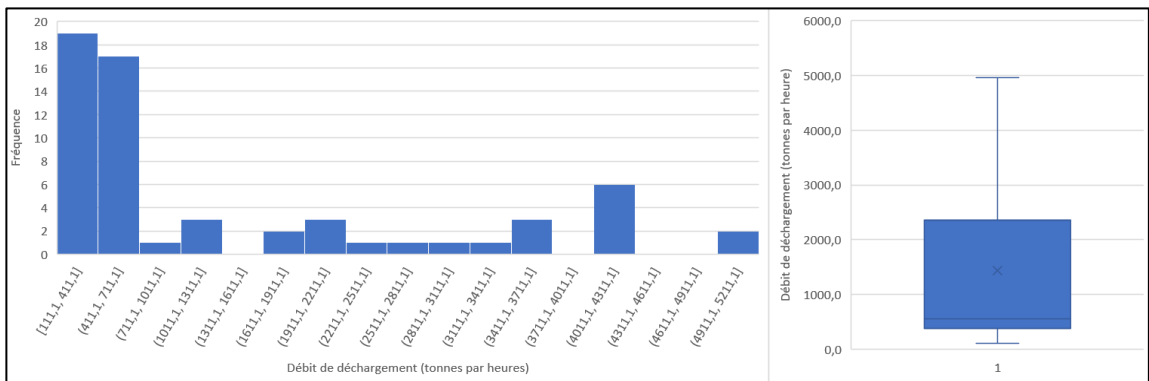
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 6)



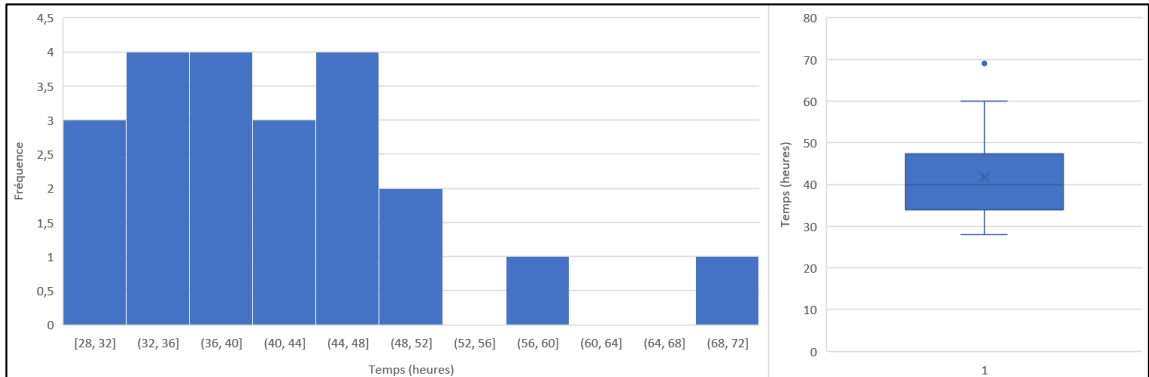
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 7)



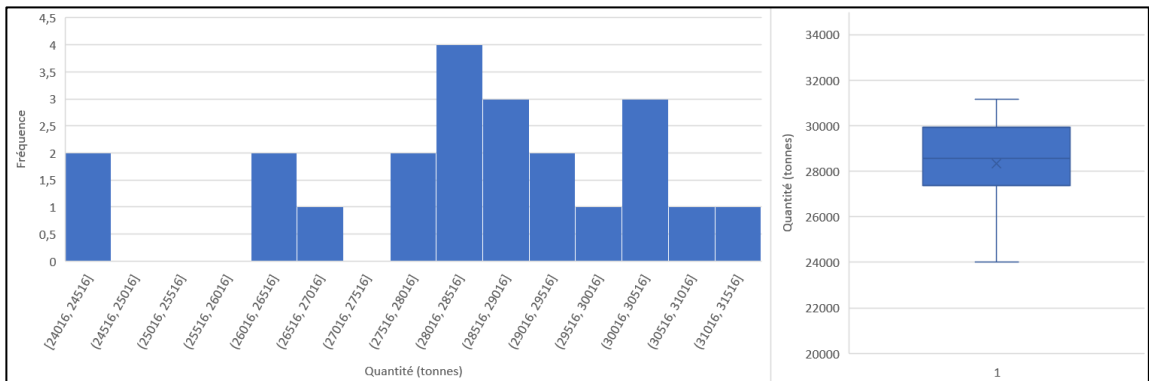
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 7)



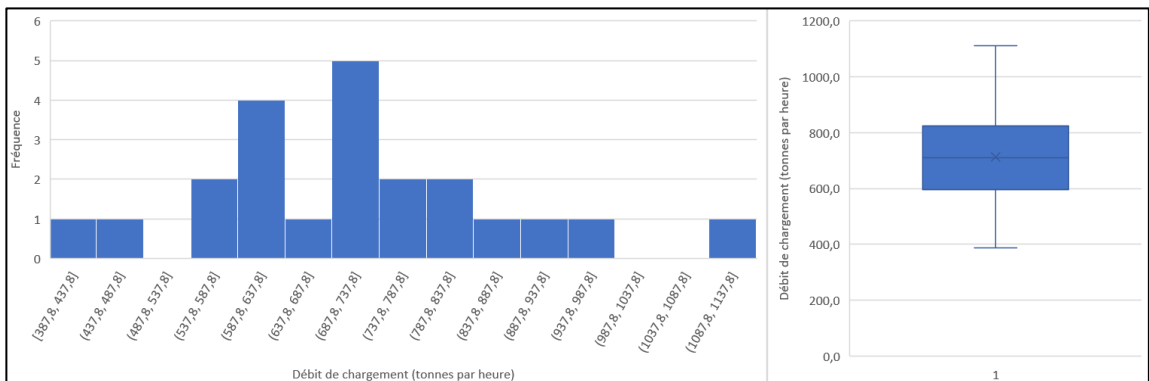
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 7)



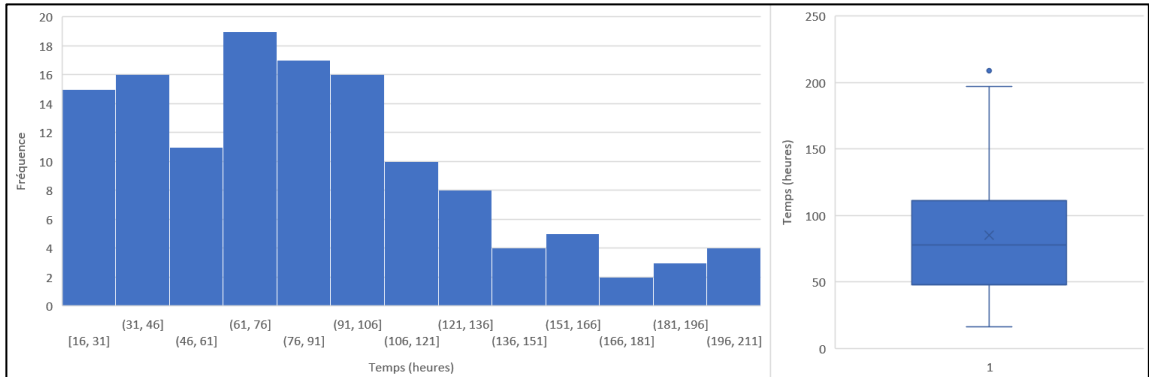
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 8)



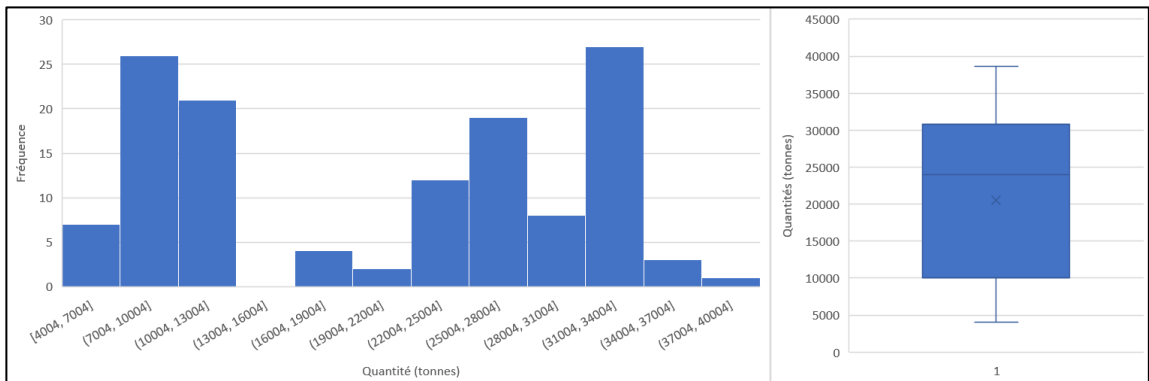
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 8)



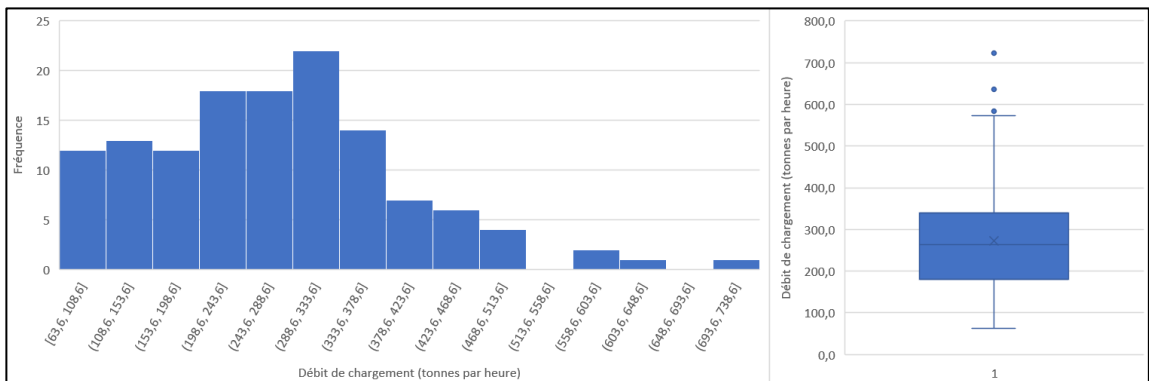
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 8)



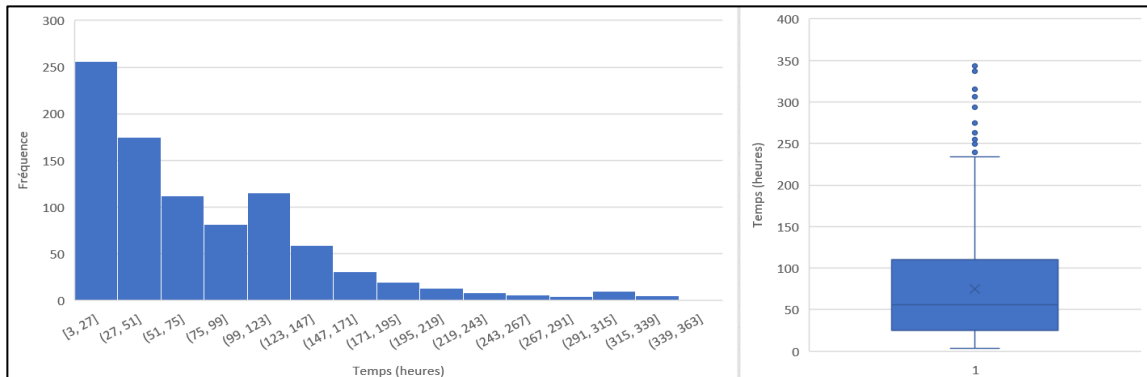
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 9)



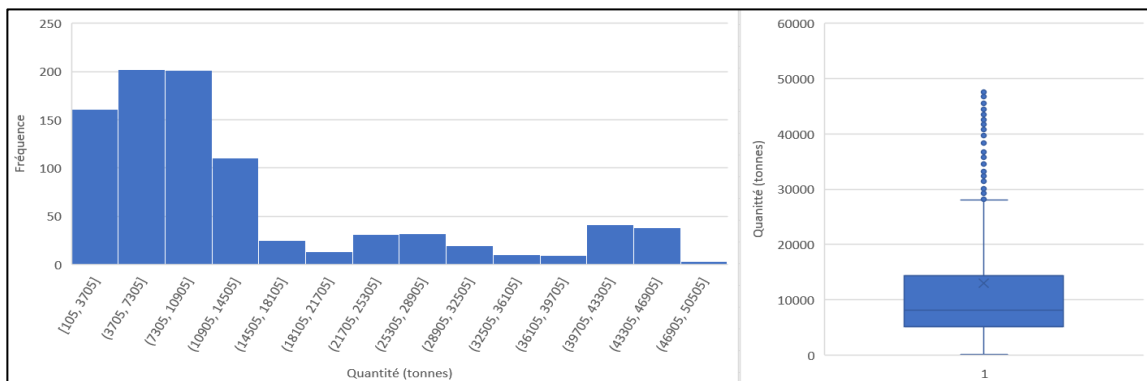
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 9)



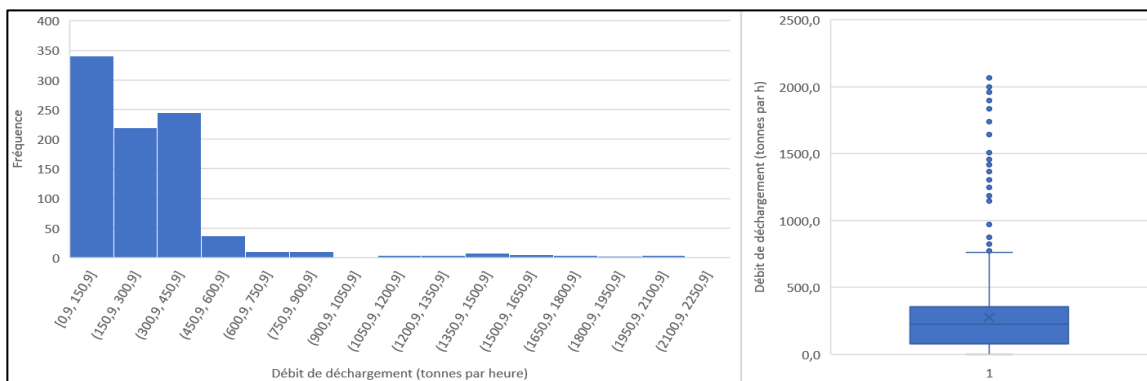
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 9)



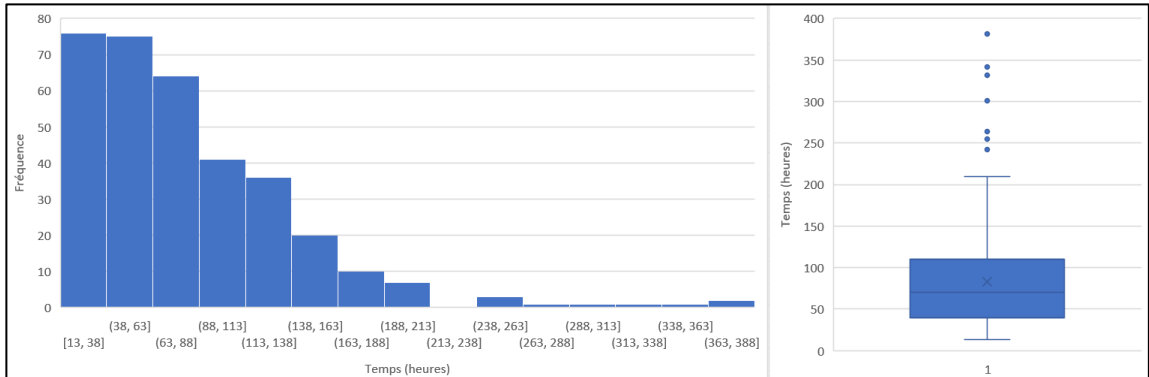
Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 10)



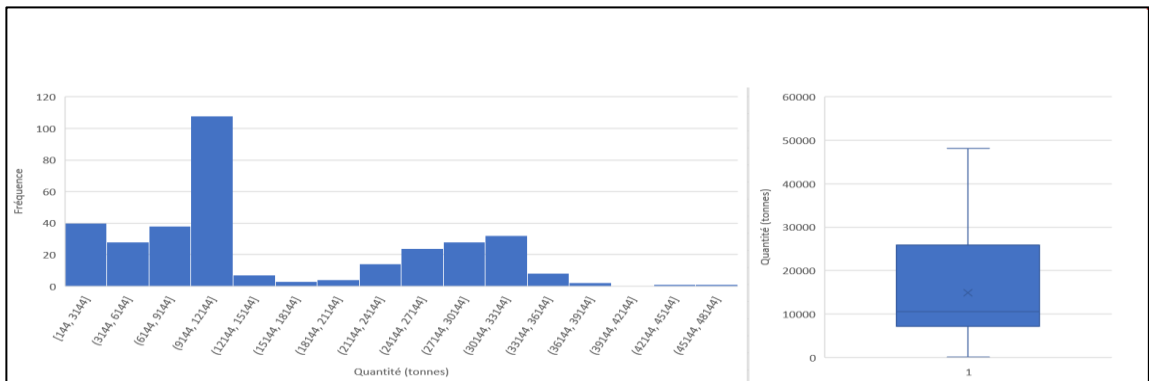
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 10)



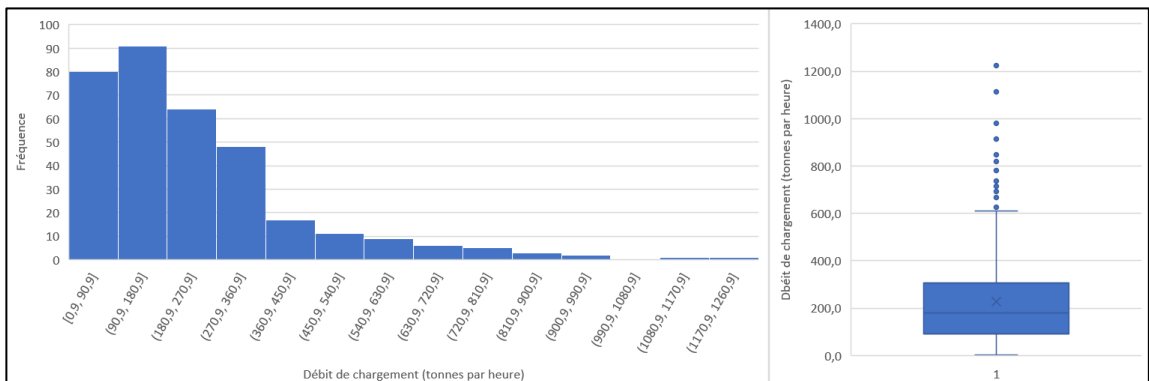
Distribution des débits de déchargement historiques maritimes (famille 10)



Distribution des temps de transit historiques maritimes (famille 11)



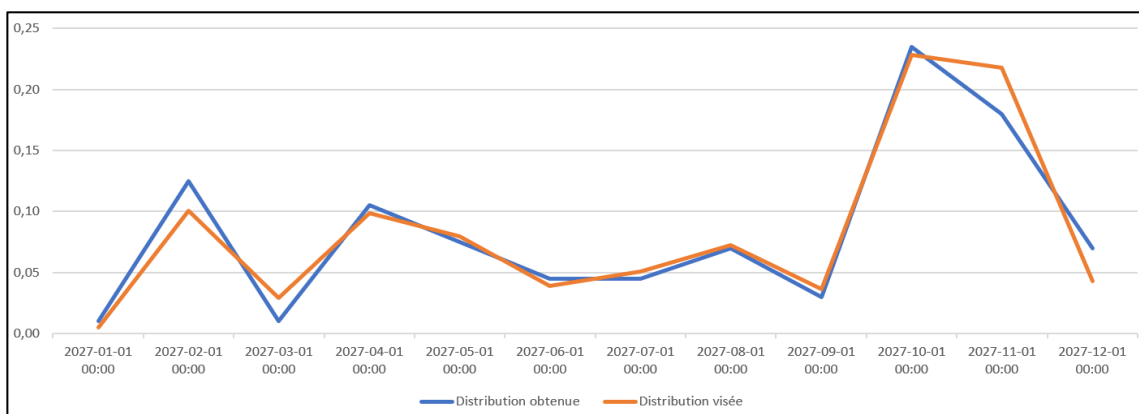
Distribution des quantités historiques maritimes (famille 11)



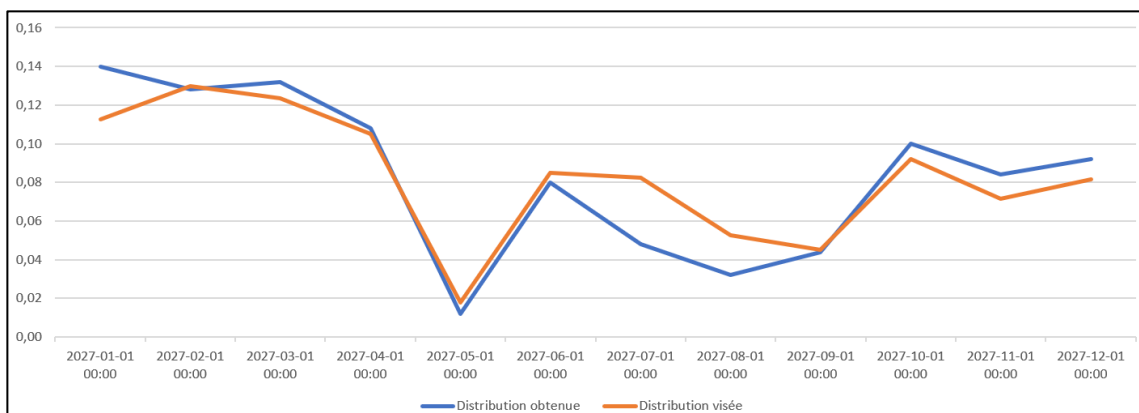
Distribution des débits de chargement historiques maritimes (famille 11)

Annexe 2

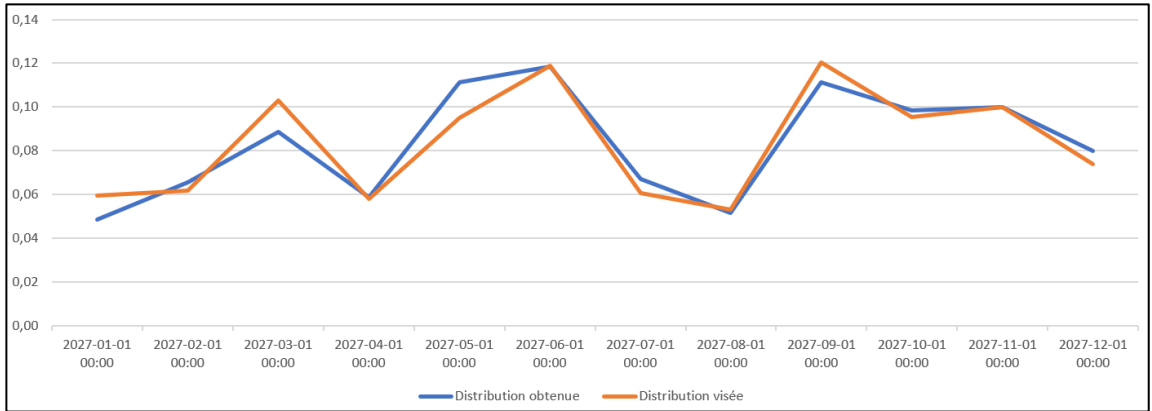
Comparaison entre les distributions maritimes obtenues avec la simulation statique et les données historiques maritimes pour les familles 2 à 11.



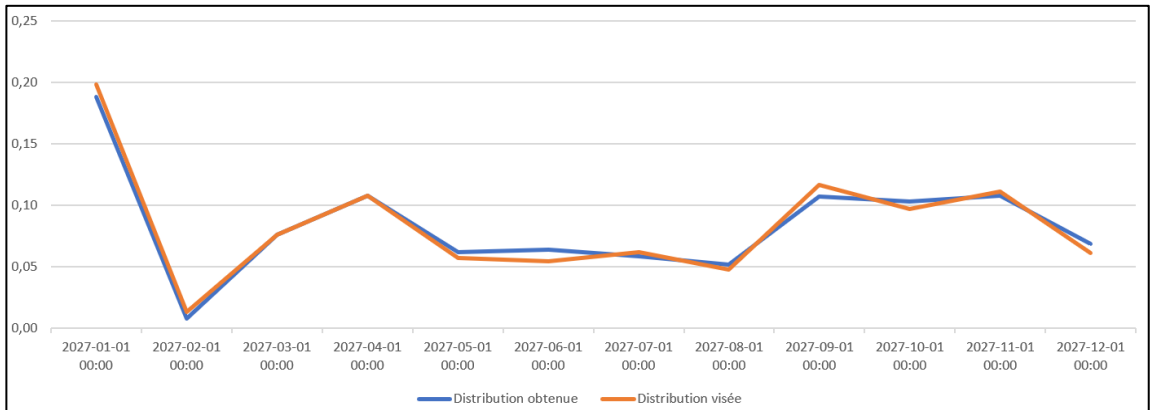
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 2)



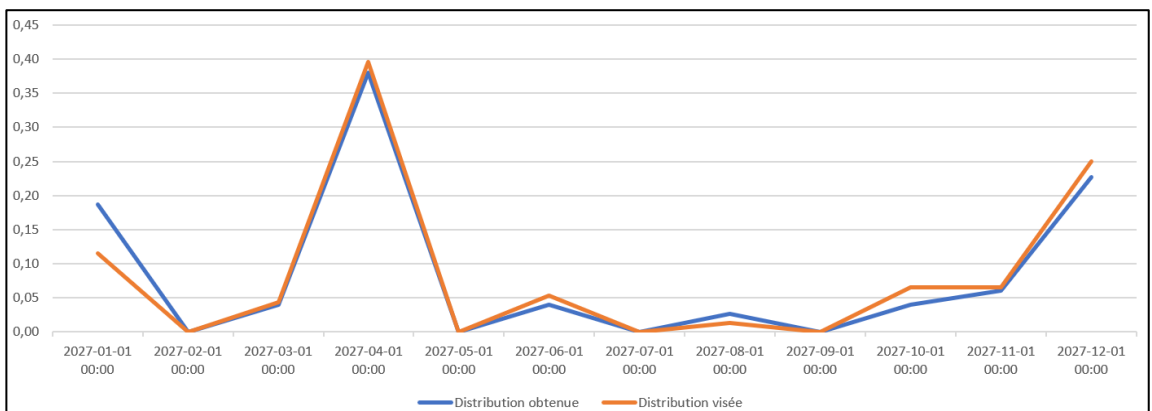
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 3)



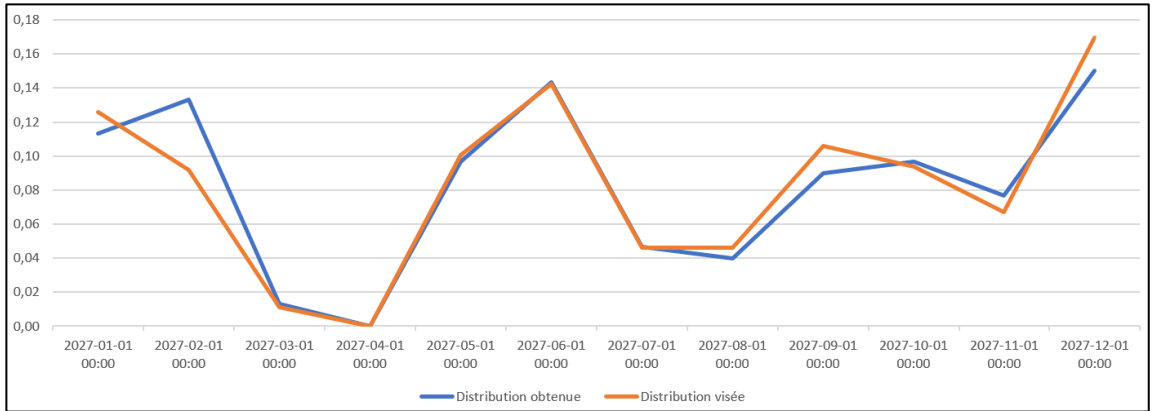
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 4)



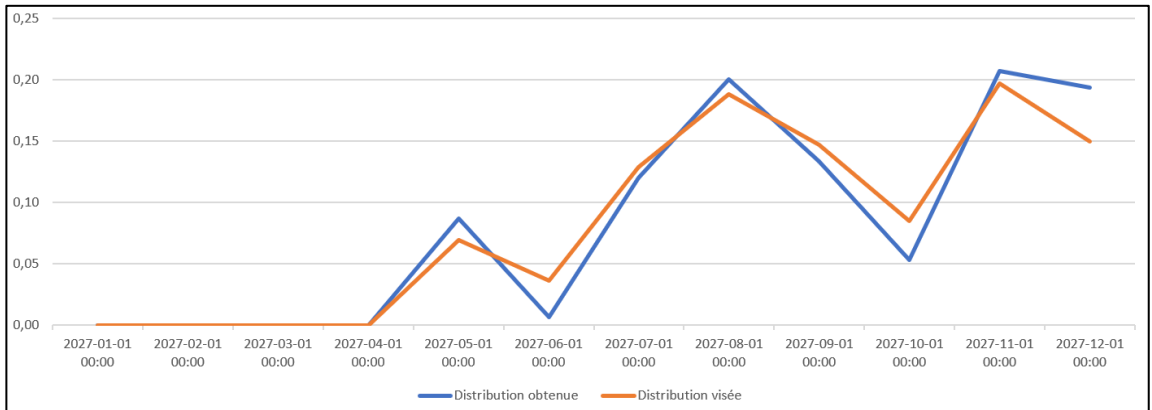
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 5)



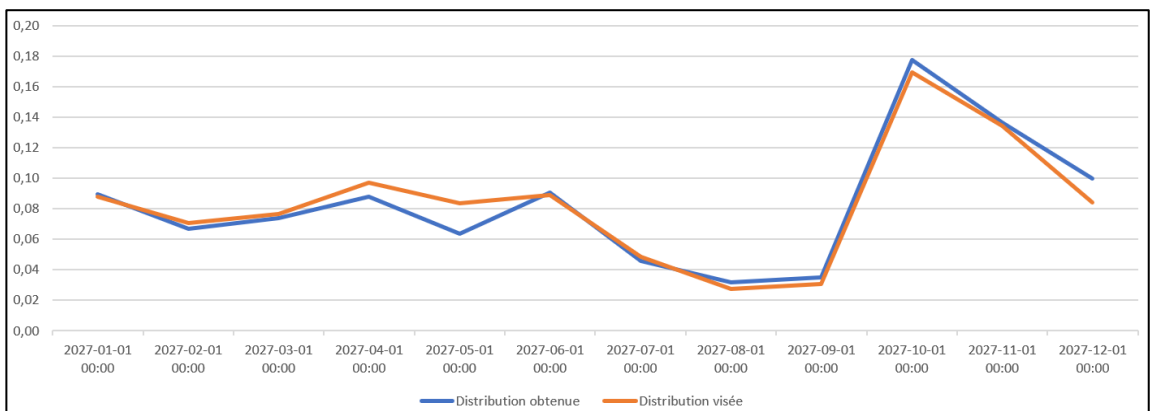
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 6)



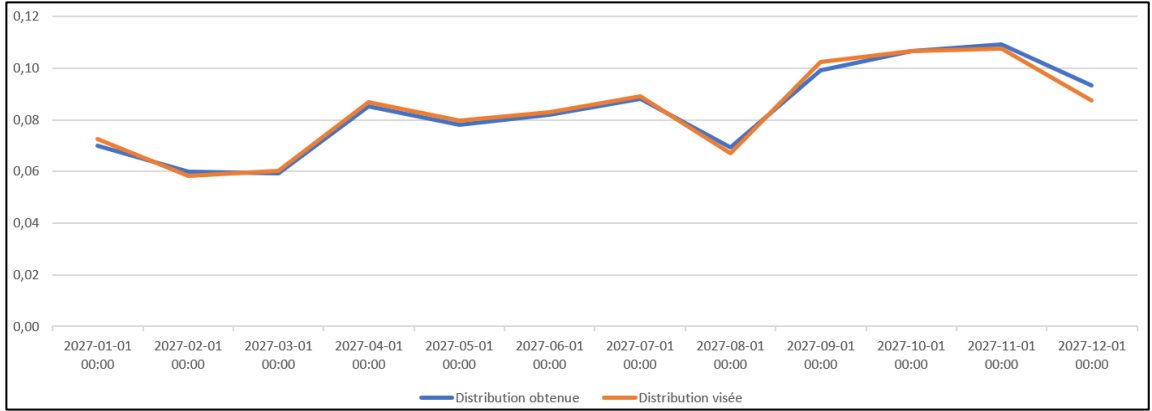
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 7)



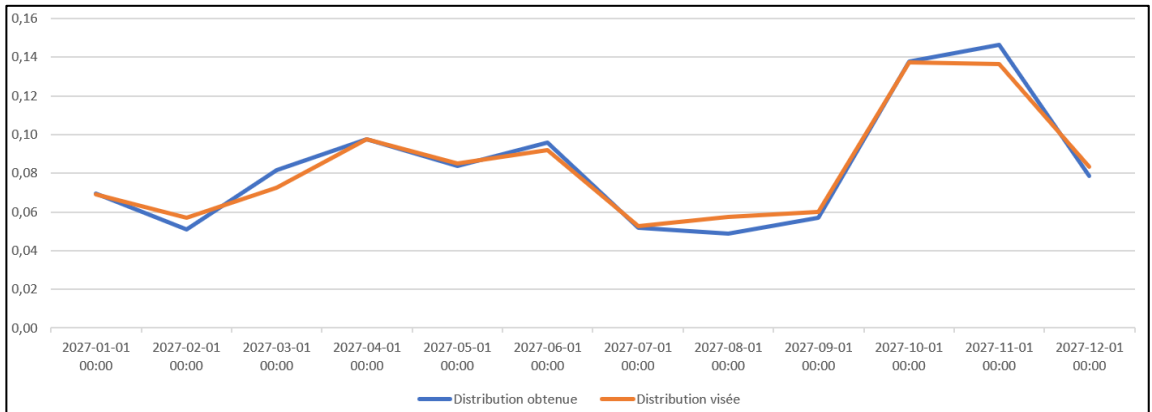
Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 8)



Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 9)



Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 10)



Distributions visée et obtenue avec les scénarios d'arrivées générés (famille 11)

