

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**COMPARAISON DES ACTIVITÉS DE MANUTENTION DE DIVERS PRODUITS DANS UN
PORT SANS CONTENEURISATION : UNE ANALYSE PAR ENVELOPPEMENT DE DONNÉES**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

LAURENT BOURNIVAL

JANVIER 2025

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Ce mémoire a été dirigé par :

Chantal Baril, directrice de recherche

Département de génie industriel

Viviane Gascon, codirectrice de recherche

Département de management

Jury d'évaluation du mémoire :

Chantal Baril, Ph.D

Département de génie industriel

Dominic Vadeboncoeur, M.Sc.A

Département de génie industriel

François Meunier, Ph.D

Département de mathématiques et d'informatique

Remerciements

Je tiens à remercier la professeure Chantal Baril, ma directrice de recherche, sans qui ce mémoire n'aurait pas vu le jour. J'étais très hésitant à poursuivre mes études au 2^e cycle, mais Chantal a pris le temps de m'expliquer les principaux aspects de la maîtrise et c'est en grande partie grâce à mes discussions avec elle que j'en suis arrivé où je suis aujourd'hui.

Je remercie également la professeure Viviane Gascon, ma codirectrice de recherche, dont la rigueur et les encouragements ont été essentiels pour mener à bien ce projet. Ses conseils et son soutien m'ont permis d'affronter les différents défis qui se sont présentés à moi et de continuer à mettre les efforts nécessaires à la réalisation de ce projet.

Je suis aussi reconnaissant envers ma conjointe, Marie-Soleil, qui m'a aidé à traverser les moments difficiles en comprenant pleinement ce que je vivais. Sa présence à mes côtés a été très importante.

Enfin, mes parents m'ont aidé à garder la motivation tout au long de mon parcours, me rappelant les objectifs que je m'étais fixés au départ. Leur présence a été essentielle dans les moments de remise en question.

Résumé

L'augmentation constante du trafic maritime, engendrée par la mondialisation, incite les ports à améliorer leur performance. Les ports doivent accueillir plus de navires avec les mêmes installations, ce qui représente un défi de taille pour les administrations portuaires. Le port de Trois-Rivières ne fait pas exception à cette situation. Le port tente de réduire le temps à quai des navires afin d'améliorer sa capacité.

Ce mémoire se penche sur l'analyse des activités à quai et les caractéristiques qui rendent le chargement (ou le déchargement) des navires efficients. L'objectif principal de la recherche est de développer une approche permettant de mesurer l'efficience des activités de (dé)chargement des navires.

La méthodologie utilisée dans ce mémoire est l'analyse par enveloppement de données (DEA). Cette approche permet de comparer l'efficience relative des navires choisis pour l'étude, soit ceux transportant du concentré de cuivre, de nickel et de zinc. Le DEA nécessite l'utilisation de données d'entrées (inputs) et de sorties (outputs) afin de comparer l'efficience des navires (DMUs) entre eux qui est mesurée par leur temps à quai. Les données sont recueillies à partir de la documentation rendue disponible par l'Administration Portuaire de Trois-Rivières. Onze combinaisons d'inputs et outputs ont d'abord été testées afin de choisir les combinaisons pertinentes pour cette étude. Les inputs retenus sont le *nombre moyen d'équipes de débardeurs*, le *nombre de grues* et le *temps d'arrêt avec équipes*, alors qu'un seul output est retenu, soit le *tonnage (dé)chargé par heure à quai*.

Deux problèmes sont résolus à l'aide du modèle CCR, qui considère qu'une augmentation proportionnelle de tous les inputs a pour conséquence une augmentation proportionnelle des outputs (rendements d'échelles constants). Les deux autres problèmes sont résolus à l'aide du modèle BCC, qui considère qu'une variation des inputs n'a pas nécessairement pour conséquence une augmentation proportionnelle des

outputs (rendements d'échelles variables). Pour les deux modèles, 2 combinaisons d'inputs et d'outputs sont résolues : la première comprend le *nombre moyen d'équipes de débardeurs* et le *nombre de grues* en inputs, alors que l'output est le *tonnage (dé)chargé par heure à quai*. L'autre combinaison ajoute le *temps d'arrêt avec équipes* en input.

Les résultats des deux problèmes du modèle CCR sont les mêmes, ce qui indique que l'ajout de l'input *temps d'arrêt avec équipes* n'a pas d'influence sur l'efficience des navires si on considère des rendements d'échelle constants. Un seul navire atteint l'efficience dans ce modèle et il s'agit du navire avec le tonnage (dé)chargé par heure à quai le plus élevé. Les résultats des deux problèmes du modèle BCC diffèrent de ceux du modèle CCR. Trois navires sont efficents dans le premier problème, alors qu'un quatrième navire efficient est ajouté pour le deuxième problème. La forme de la frontière efficiente définie par le modèle BCC permet aux navires avec des combinaisons d'inputs/outputs moins élevés d'atteindre l'efficience, ce qui explique ce résultat.

Les seules caractéristiques qui semblent exercer une influence sur l'efficience des navires sont le temps à quai, le temps d'arrêt avec équipes et le fait que le navire ait été à quai durant la fin de semaine. Bien que l'ajout de l'input *temps d'arrêt avec équipes* n'ait qu'une faible influence sur les résultats d'efficience dans les quatre problèmes résolus, il présente une cause de l'inefficacité des navires. Le temps d'arrêt avec équipes influence directement le temps à quai d'un navire et les niveaux d'inputs sont similaires pour tous les navires, ce qui explique ce constat.

Les principales recommandations émises concernent les résultats obtenus. Le nombre d'équipes de débardeurs et de grues ne semblent pas influencer l'efficience des navires. Cependant, l'objectif du port doit être de minimiser ces inputs tout en maximisant le tonnage (dé)chargé par heure à quai des navires. Le port devrait aussi revoir son programme de maintenance ou d'amélioration des équipements pour réduire les bris et

améliorer la planification des équipes. Ces changements permettraient de réduire les temps d'arrêt avec équipes. Enfin, le port devrait considérer la possibilité de réaliser des activités de (dé)chargement durant la fin de semaine ou mieux planifier l'arrivée des navires pour réduire le nombre de navires à quai durant la fin de semaine. Comme il n'y a pas (ou très peu) d'activités de (dé)chargement durant la fin de semaine, l'efficience des navires qui sont restés à quai durant la fin de semaine est plus faible.

À notre connaissance, il s'agit de la première étude qui a développé une méthode d'évaluation de l'efficience relative entre différents navires séjournant dans un même port. La méthodologie pourra être validée ou améliorée dans de futures études et pourra être appliquée à d'autres produits dans le port étudié ou dans d'autres ports.

Table des matières

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES	iii
Remerciements	iv
Résumé.....	v
Table des matières	viii
Liste des illustrations.....	xii
Liste des tableaux.....	xii
Liste des abréviations.....	xiii
Chapitre 1. Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique	3
1.3 Questions de recherche	4
1.4 Objectifs de recherche	4
Chapitre 2. Revue de littérature	5
2.1 Méthodes d'évaluation de la productivité et de l'efficience dans les ports.....	5
2.2 Analyse par enveloppement de données (DEA).....	7
2.2.1 Utilisation du DEA dans les ports avec des matières conteneurisées	9
2.2.2 Utilisation du DEA dans les ports sans conteneur	14
Chapitre 3. Description du port étudié	18
3.1 Description des activités de (dé)chargement des navires à quai.....	18
3.1.1 Temps de (dé)chargement.....	19
3.1.2 Temps nécessaires	19

3.1.3	Temps de pause	19
3.1.4	Temps d'arrêt avec équipes	19
3.1.5	Temps d'arrêt sans équipe.....	20
3.1.6	Autres temps d'arrêt.....	20
3.2	Particularités des activités de (dé)chargement.....	21
3.3	Informations sur les activités de (dé)chargement	22
Chapitre 4.	Méthodologie	24
4.1	Collecte de données	24
4.1.1	Collecte des données des SOF	24
4.1.2	Compilation des données.....	26
4.2	Analyse par enveloppement de données (DEA).....	28
4.2.1	Exemple de DEA : 1 input et 1 output.....	28
4.2.2	2 inputs et 2 outputs	31
4.3	Modèle DEA.....	34
4.4	Modèles CCR.....	35
4.4.1	Modèle mathématique CCR	35
4.4.2	Modèle CCR linéaire.....	37
4.4.3	Modèle CCRL dual	37
4.4.4	Modèle CCR orienté output	39
4.5	Modèle BCC	40
Chapitre 5.	Tests et résultats	43
5.1	Choix des DMUs, inputs et outputs.....	43

5.1.1	DMUs.....	43
5.1.2	Inputs et outputs.....	43
5.2	Résultats et analyse.....	48
5.2.1	Efficience en fonction des inputs et des outputs.....	51
5.2.2	Les ensembles de référence	55
5.2.3	Caractéristiques des navires efficients et presque efficients	57
5.3	Recommandations.....	65
	Chapitre 6. Conclusion	68
	Références.....	70
	Annexes.....	73

Liste des illustrations

Figure 3.1 : Répartition du temps à quai	21
Figure 4.1 : En-tête d'un SOF	25
Figure 4.2 : Exemple SOF.....	26
Figure 4.3 : Tonnage en fonction du nombre de grues - 1 input et 1 output.....	29
Figure 4.4 : Amélioration de la DMU 5.....	31
Figure 4.5 : Illustration du modèle BCC	41
Figure 5.1 : Efficience en fonction du nombre d'équipes moyen.....	52
Figure 5.2 : Efficience en fonction du nombre de grues.....	52
Figure 5.3 : Efficience en fonction du temps arrêt avec équipes	52
Figure 5.4 : Efficience en fonction du tonnage (dé)chargé par heure à quai (BCC 3 inputs)	54
Figure 5.5 : Efficience en fonction du tonnage (dé)chargé (BCC 3 inputs)	60
Figure 5.6 : Efficience en fonction du temps à quai (BCC 3 inputs).....	62
Figure 5.7 : Tonnage (dé)chargé par heure à quai en fonction du temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt.....	63

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques des ports avec et sans conteneurs	2
Tableau 2.1 : Résumé des articles, ports avec conteneurs.....	14
Tableau 2.2 : Résumé des articles, ports sans conteneurs	17
Tableau 4.1 : Exemple des temps de (dé)chargement provenant d'un SOF	27
Tableau 4.2 : Exemple DEA - 1 input et 1 output.....	29
Tableau 4.3 : Exemple DEA - 2 inputs et 2 outputs.....	32
Tableau 4.4 : Efficience avec poids fixes	33
Tableau 4.5 : Efficience en changeant les poids fixes	33
Tableau 5.1 : Inputs et outputs de départ	44
Tableau 5.2 : 11 combinaisons d'inputs et outputs	45
Tableau 5.3 : Navires efficents – CCRL	46
Tableau 5.4 : Données sur les inputs et output des 27 navires	48
Tableau 5.5 : Efficience des navires en fonction des problèmes.....	50
Tableau 5.6 : Coefficients de corrélation entre l'efficience et les inputs/outputs.....	54
Tableau 5.7 : Ensembles de référence	56
Tableau 5.8 : Caractéristiques des navires efficents et presque efficents	58
Tableau 5.9 : Nombre de navires efficents et presque efficents selon le produit.....	58
Tableau 5.10 : Nombre de navires efficents et presque efficents selon l'opération	59
Tableau 5.11 : Nombre de navires efficents et presque efficents en fonction du tonnage	61
Tableau 5.12 : Nombre de navire efficents et presque efficents vs présence la fin de semaine	61
Tableau 5.13 : Corrélation – Efficience et caractéristiques des navires	64

Liste des abréviations

AHP : Analytic hierarchy process (Procédure hiérarchique d'analyse)

APTR : Administration portuaire de Trois-Rivières

ARAS : Méthode d'évaluation du rapport additif

BCC : Banker, Charnes et Cooper

CCR : Charnes, Cooper et Rhodes

CRS : Constant Return to Scale (rendement d'échelle constant)

DEA : Data Envelopment Analysis (analyse par enveloppement de données)

DMU : Decision Making Unit (Unité de prise de décision)

IDEA : Imprecise Data Envelopment Analysis (Analyse par enveloppement de données imprécises)

MTM : Million de tonnes métriques

NVA : Non-valeur ajoutée

RO-RO : Roll-on/Roll-off (transroulage)

SFA : Stochastic Frontier Analysis (Analyse stochastique des frontières)

SOF : Statement of facts

TEU : Twenty-foot equivalent unit (Équivalent vingt pieds)

TOPSIS : Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (Technique de préférence de commande par similarité avec la solution idéale)

VA : Valeur ajoutée

VRS : Variable Return to Scale (rendement d'échelle variable)

Chapitre 1. Introduction

1.1 Mise en contexte

La mondialisation entraîne une augmentation du trafic maritime dans les ports (Chang et Tovar, 2017). En effet, le transport maritime représente plus de 80% des échanges internationaux de marchandises (UNCTAD, 2022). Le port de Trois-Rivières est aussi affecté par cette croissance. La quantité de marchandise ayant transité par le port de Trois-Rivières est passée de 2,7 millions de tonnes métriques (MTM) en 2013 à 4,2 MTM en 2023 (APTR, 2013, 2023), malgré la pandémie de COVID-19 déclarée en mars 2020.

Le port de Trois-Rivières est géré, exploité et entretenu par l'Administration Portuaire de Trois-Rivières (APTR). L'APTR est un organisme à but non lucratif ayant pour but d'offrir des services essentiels aux manutentionnaires, clients et plaisanciers, en plus d'assurer l'entretien des principales installations du port (Gouvernement du Canada, 2018; Port de Trois-Rivières, 2022b). Le port de Trois-Rivières est situé au centre-ville de Trois-Rivières. Le fait que le port soit en milieu urbain réduit les capacités d'expansion et ajoute des enjeux sociaux. Parmi les enjeux sociaux se trouvent la réduction du bruit et de la poussière lors du (dé)chargement des navires, des émissions de gaz à effet de serre engendrées par le trafic routier et l'engorgement des rues avoisinant le port.

Le port comporte trois terminaux. Un terminal regroupe généralement plusieurs quais et est, dans un port maritime, une infrastructure permettant la manutention (chargement, déchargement) d'un certain type de marchandise. Un terminal est généralement dédié à un type de marchandise (produit) spécifique, mais il peut aussi en accueillir plus d'un. Les terminaux comprennent les installations nécessaires au (dé)chargement de ces produits comme des quais, des grues et des espaces d'entreposage.

Quatre manutentionnaires utilisent les installations et infrastructures du port de Trois-Rivières. Ces derniers entreposent temporairement les produits dans les espaces du port. Les produits peuvent être chargés ou déchargés des navires par les manutentionnaires. Le trafic engendré par la manutention des produits entrant et sortant dans le port entraîne de la congestion, retardant le chargement ou le déchargement des navires et des camions.

Le port de Trois-Rivières manutentionne 28 produits différents divisés en quatre catégories : le vrac solide, le vrac liquide, les marchandises générales et le grain. Le vrac solide représente 85% du tonnage annuel au port de Trois-Rivières (APTR, 2023) avec 9 produits. Le port de Trois-Rivières n'est pas un port avec conteneurs. Les ports qui se consacrent aux produits sans conteneurs fonctionnent de façon différente de ceux qui en accueillent. Le tableau 1.1 présente les caractéristiques de ces deux types de ports.

Tableau 1.1 : Caractéristiques des ports avec et sans conteneurs

Port avec conteneurs	Port sans conteneurs
Le conteneur est un produit standardisé	Il y a plusieurs produits (vrac solide, liquide marchandises générales)
Les équipements de manutention sont plus standardisés	Il peut y avoir un équipement de manutention par produit
Les étapes du processus de (dé)chargement sont les mêmes	Les étapes peuvent varier en fonction du produit
Le nombre de camions nécessaires à la manutention est prévisible (capacité de la grue et des équipes)	Le nombre de camions est prévisible pour certains produits et non prévisible (dépend de la température) pour d'autres

Les caractéristiques des ports sans conteneurs les rendent plus complexes et engendrent des défis organisationnels plus importants. Le manque de standardisation et la variabilité des équipements nécessaires selon le produit complexifie la gestion des activités portuaires.

Chaque année, plus de 250 navires marchands et de croisières s'arrêtent au port de Trois-Rivières (Port de Trois-Rivières, 2022a). L'augmentation du trafic maritime génère

une augmentation du nombre de navires et nécessite plus d'équipements de manutention, d'espace d'entreposage et de main-d'œuvre.

1.2 Problématique

Le trafic maritime augmente année après année au port de Trois-Rivières, comme partout ailleurs dans le monde (APTR, 2013, 2021; Chang et Tovar, 2017; Rochette, 2023). Pour répondre à cette augmentation, le port doit être en mesure d'accueillir un plus grand nombre de navires.

Les navires vont au port de Trois-Rivières pour charger ou décharger des produits. Afin que le navire accoste, le quai doit être libre et prêt à l'accueillir. Sinon, le navire doit attendre que le quai se libère, ce qui génère des coûts¹. Une fois à quai, des équipes de débardeurs s'affairent au (dé)chargement du navire. Lorsqu'un produit arrive au port par navire, il est d'abord soit déchargé sur le quai, dans des camions, sur un convoyeur ou dans un pipeline. Lorsque le produit est déchargé sur le quai, il est ensuite chargé dans des camions à l'aide de pelles mécaniques et est transporté dans des hangars d'entreposage jusqu'à ce qu'un camion le livre chez le client externe.

Le temps à quai (ou temps de séjour) des navires est un enjeu important pour les ports. Un temps à quai réduit permet d'augmenter la disponibilité du quai pour accueillir davantage de navires. La réduction du temps à quai permet aux propriétaires de navires de réduire certains coûts reliés à l'attente, ce qui rend alors les ports plus attrayants (Balci *et al.*, 2018) dont celui de Trois-Rivières. Cela permet aussi aux manutentionnaires d'obtenir plus de clients et de vendre plus de marchandises, ainsi qu'au port d'augmenter ses revenus avec l'augmentation du nombre de navires.

Il est donc primordial d'identifier les activités qui contribuent à l'augmentation du temps à quai d'un navire, de l'arrivée du navire jusqu'à son départ en passant par les étapes de

¹ Les frais d'attente (demurrage) sont chargés au propriétaire du navire ou au manutentionnaire, dépendamment de qui est responsable de l'attente.

déchargement/chargement. Des indicateurs de performance, tels que le tonnage (dé)chargé par unité de temps de (dé)chargement ou de temps à quai, doivent permettre de faire la distinction entre les activités à valeur ajoutée (VA) et à non-valeur ajoutée (NVA). La problématique étudiée concerne l'analyse des activités à quai dans le but d'identifier les caractéristiques qui rendent le (dé)chargement des navires efficient. Ces caractéristiques permettront ensuite d'établir des recommandations afin de réduire le temps à quai des navires qui séjournent au port. Trois produits seront étudiés, soient les concentrés de cuivre, nickel et zinc.

1.3 Questions de recherche

La problématique permet de se poser les questions suivantes :

- Quelles sont les activités reliées au (dé)chargement d'un navire, de son arrivée à son départ du quai?
- Quelles activités de (dé)chargement d'un navire sont à VA? à NVA?
- Quels indicateurs de performance permettent de mesurer la productivité à quai des navires?
- Quelles ressources permettent de réduire le temps à quai d'un navire?

1.4 Objectifs de recherche

L'objectif principal de la recherche est de développer une approche pour mesurer l'efficience des activités de (dé)chargement des navires. Afin d'atteindre l'objectif principal de recherche, il sera nécessaire d'atteindre aussi ces objectifs secondaires :

- Identifier les activités de (dé)chargement à VA et à NVA
- Identifier les ressources nécessaires pour le(dé)chargement des navires
- Identifier les indicateurs de performance pour les activités de (dé)chargement des navires

Chapitre 2. Revue de littérature

La revue de la littérature permet de faire l'état des connaissances récentes sur l'évaluation de l'efficience dans les ports maritimes. Ce chapitre est séparé en 2 parties. La première partie concerne les méthodes d'évaluation de la productivité et de l'efficience dans les ports. La seconde partie traite de l'analyse par enveloppement de données (Data Envelopment Analysis, DEA) comme méthode pour comparer l'efficience des ports.

2.1 Méthodes d'évaluation de la productivité et de l'efficience dans les ports

La littérature comporte plusieurs méthodes comparant l'efficience ou la productivité de différents terminaux ou ports. Parmi ces méthodes, on retrouve les méthodes statistiques (Đelović et Mitrović, 2017), l'analyse par enveloppement de données (DEA) (Pjevcevic *et al.*, 2018; Tovar et Wall, 2019), la procédure hiérarchique d'analyse (AHP) (Balci *et al.*, 2018; Pjevcevic *et al.*, 2018) et l'analyse de décision multicritères (Gök-Kısa *et al.*, 2022).

Đelović et Mitrović (2017) ont étudié le tonnage (dé)chargé par unité de temps à quai d'un navire et le tonnage (dé)chargé par unité de temps de (dé)chargement comme mesure de performance. Les temps d'arrêt représentent une part importante du temps à quai d'un navire, ce qui cause une différence importante et variable entre le tonnage (dé)chargé par unité de temps de (dé)chargement et le tonnage (dé)chargé par unité de temps à quai pour les navires étudiés. Parmi les facteurs pouvant influencer le tonnage (dé)chargé par unité de temps à quai ou de (dé)chargement, les auteurs énumèrent la fiabilité des équipements, le type de grues, la capacité des convoyeurs, le type de camions ou de navires, les restrictions environnementales, les types d'opérations (chargement ou déchargement), le nombre d'opérateurs et le climat tels que la température et les vents.

Pjevcevic *et al.* (2018) ont réalisé une étude de cas permettant de déterminer la combinaison des équipements de manutention de vrac solide la plus efficiente. L'analyse par enveloppement de données (DEA) a été utilisée pour analyser l'efficience des différentes combinaisons d'équipements de manutention. Les inputs utilisés sont le nombre de travailleurs et le coût des ressources engagées (comprenant notamment le coût unitaire d'entreposage et de l'équipement utilisé dans le (dé)chargement), alors que les outputs sont le temps moyen des navires dans le port et le temps d'utilisation moyen des équipements (grues du quai, machines d'empaquetage et camions).

Balci *et al.* (2018) ont évalué la compétitivité des terminaux de vrac solide à l'aide de la méthode AHP et ont déterminé que la vitesse de manutention est un critère de sélection important permettant aux expéditeurs de choisir un terminal.

L'analyse des séries chronologiques a permis à Dos Santos *et al.* (2019) d'analyser l'évolution du tonnage manutentionné, du temps de service et des coûts des matières en vrac au port de Santos de 2016 à 2018. L'étude a permis de démontrer que le tonnage manutentionné et les coûts sont prévisibles grâce à cette méthode.

Selon UNCTAD (2019), un faible temps à quai est un indicateur de l'efficience et de la compétitivité d'un port. Dans ce rapport de la Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement (UNCTAD), le tonnage (dé)chargé par unité de temps à quai est aussi utilisé comme indicateur de performance pour un port.

Gök-Kısa *et al.* (2022) ont évalué la performance de 5 ports turcs à l'aide de deux méthodes d'analyse de décision multicritères, soient la méthode d'évaluation du rapport additif (ARAS) et la technique de préférence de commande par similarité avec la solution idéale (TOPSIS). Les critères évalués comprennent notamment le tonnage (dé)chargé pour chaque type de produit (vrac solide et marchandises générales) et le nombre de

véhicules de transroulage (RO-RO)². Le port le plus efficient est le même pour les deux méthodes, mais le moins efficient diffère.

On retrouve dans la littérature plusieurs méthodes pour l'évaluation de la productivité et de l'efficience des ports, et les indicateurs de performance y sont aussi variés. Parmi ces indicateurs, on retrouve le tonnage de matière (dé)chargé par heure à quai ou par heure de (dé)chargement, le temps à quai moyen et les coûts. Ces indicateurs seront pertinents pour l'analyse du temps à quai des navires au port de Trois-Rivières. Afin d'analyser le temps à quai, le présent mémoire utilise l'analyse par enveloppement de données (DEA), qui est présentée à la section suivante.

2.2 Analyse par enveloppement de données (DEA)

Le DEA a été introduit par Charnes, Cooper et Rhodes (1978) et permet de comparer l'efficience de différentes unités de prise de décision (DMUs) avec un ou plusieurs inputs (ressources utilisées, par exemple) et outputs (tonnage annuel, par exemple). Avec le DEA, un problème d'optimisation est résolu pour chaque DMU avec pour objectif la minimisation des inputs ou la maximisation des outputs. Le résultat de chaque problème permet de déterminer l'efficience relative de la DMU observée (notée DMU 0) comparativement aux autres DMUs à l'étude. Le modèle Charnes, Cooper et Rhodes (CCR) considère des rendements d'échelle constants (Constant Return to Scale, CRS), signifiant qu'une variation d'un même pourcentage de tous les inputs a pour conséquence une variation proportionnelle des outputs (Cooper *et al.*, 2007; Cullinane *et al.*, 2006; Zahran *et al.*, 2020). Cooper *et al.* (2007) affirment que le modèle CCR est approprié lorsque les données sont normalisées (par exemple, par capita et par heure). Le modèle Banker, Charnes et Cooper (1984) (BCC) considère des rendements d'échelle variables (Variable Return to Scale, VRS), signifiant qu'une variation d'un même pourcentage de tous les inputs n'a pas nécessairement pour conséquence une variation

² Le (dé)chargement par transroulage (RO-RO) permet aux véhicules de manutention d'aller chercher (ou déposer) la cargaison directement sur le navire

proportionnelle des outputs (*Cooper et al.*, 2007; *Cullinane et al.*, 2006; *Zahran et al.*, 2020). Les modèles peuvent être orientés input, c'est-à-dire qu'ils visent la minimisation du nombre d'inputs pour obtenir un certain niveau d'output, ou orientés output, signifiant que le modèle vise à maximiser le niveau d'outputs (*Cooper et al.*, 2007; *Cullinane et al.*, 2006; *Zahran et al.*, 2020). Il existe aussi plusieurs variantes du DEA, comme l'analyse par enveloppement de données imprécises (IDEA) (*Zahran et al.*, 2020) permettant de traiter les données incomplètes ou comprenant des incertitudes, ou le DEA-SBM, qui considère les variations de nature aléatoire dans les données (*Li et al.*, 2022). (*Li et al.*, 2022; *Zahran et al.*, 2020).

Les modèles de DEA visent généralement à minimiser les inputs et/ou à maximiser les outputs. Un output peut être indésirable. L'objectif est alors de minimiser la quantité de l'output indésirable. Le temps à quai d'un navire est considéré comme un output indésirable puisqu'il doit être le plus court possible. La minimisation des outputs indésirables requiert donc d'adapter ces modèles de DEA. Halkos et Petrou (2019) ont comparé différentes méthodes d'utilisation des outputs indésirables avec le DEA. Ils suggèrent notamment de les ignorer, de les considérer comme des inputs ou d'effectuer les transformations mathématiques nécessaires afin de les rendre désirables. Les auteurs indiquent que la décision quant au choix de la méthode revient au chercheur selon la précision désirée et qu'il n'y a pas de réponse précise concernant la méthode la plus appropriée.

Färe et Grosskopf (2004) proposent une approche permettant de combiner les outputs à maximiser et ceux à minimiser. Les auteurs affirment cependant qu'ils préfèrent la méthode qui consiste à considérer les outputs indésirables comme des inputs plutôt que celle qui ne fait que les ignorer.

2.2.1 Utilisation du DEA dans les ports avec des matières conteneurisées

Plusieurs auteurs ont utilisé le DEA afin de comparer des ports ou des terminaux manutentionnant des produits en conteneurs. Ces études sont présentées afin de déterminer des inputs et outputs pertinents.

Cullinane *et al.* (2006) ont comparé l'utilisation du DEA (modèles CCR et BCC orientés output) et de l'analyse stochastique des frontières (SFA) pour comparer 57 terminaux de matière conteneurisée. L'output utilisé est le nombre de conteneurs manutentionnés en un an, alors que les inputs comprennent le nombre de grues à quai et sur le navire, le nombre de chariots cavaliers³ et des informations sur la dimension du terminal et des quais. Les auteurs concluent que les deux méthodes permettent d'obtenir des résultats similaires, mais que les efficiencies moyennes obtenues avec le modèle CCR sont plus faibles qu'avec le modèle BCC et qu'il y a moins de DMUs efficientes avec ce modèle. Les résultats d'efficience obtenus avec le DEA et le SFA sont corrélés, mais le DEA suggère des rendements d'échelle variables, alors que le SFA suggère des rendements d'échelle constants.

D'agostini *et al.* (2015) ont utilisé les modèles CCR (CRS) et BCC (VRS) orientés input du DEA afin d'analyser l'efficience de ports italiens qui accueillent des conteneurs et des produits en vrac. Les plus efficents sont ceux qui reçoivent une variété de produits avec une majorité de vracs solide et liquide. Les inputs utilisés sont la capacité d'entreposage, la longueur des quais et les coûts investis dans le port pour l'année étudiée, alors que les outputs sont le tonnage total de matière manutentionnée et les revenus générés par type de produits.

Wanke et Barros (2015) ont utilisé le DEA CCR et BCC orienté output en deux étapes pour comparer l'efficience de 27 ports brésiliens. Les inputs utilisés sont la longueur, la profondeur et le nombre de quais, l'espace d'entreposage extérieur et dans les hangars

³ Les chariots cavaliers permettent la manutention des conteneurs.

ainsi que la longueur et la profondeur du canal d'accès au port. Les outputs sont les heures allouées annuellement au chargement de vrac solide et de conteneurs, le nombre de conteneurs et le tonnage annuel ainsi que le nombre de navires accueillis annuellement pour des conteneurs et pour du vrac solide. L'étude a démontré que l'efficience d'échelle (qui combinent les notions d'échelle, ou taille, d'opération optimale et de d'efficience de production relative) est plus importante dans les ports avec un partenariat privé-public.

Zahran *et al.* (2020) ont appliqué l'analyse par enveloppement de données imprécises (IDEA), une variante du DEA, avec des données imprécises et incomplètes, afin de comparer 29 ports de la péninsule arabe. Le modèle est basé sur le BCC orienté output. Cette étude utilise en inputs le nombre de quais, l'aire totale d'entreposage pour le terminal et le nombre de grues (portiques ou non). Les outputs utilisés sont le tonnage total de matière manutentionnée, le nombre de navires ayant accosté au terminal et le nombre de conteneurs manutentionnés. Les données imprécises ou incomplètes, par manque de données, sont le nombre de grues et concernent tous les outputs. La méthodologie proposée par les auteurs peut être répétée dans des ports avec des données imprécises ou incomplètes, selon les auteurs.

Da Costa *et al.* (2021) ont utilisé les modèles CCR et BCC orientés output du DEA afin de comparer l'efficience de terminaux de produits conteneurisés situés au nord du Brésil et d'établir les bonnes pratiques pour les terminaux inefficients. L'output choisi est le nombre de conteneurs manutentionnés. Les inputs utilisés sont le nombre de navires ayant accosté au terminal, le nombre total de conteneurs manutentionnés divisé par le nombre de navires dans le terminal et les temps d'arrêt pendant le (dé)chargement. Ces inputs diffèrent de ceux qu'on retrouve généralement dans la littérature, soit la longueur des quais ou le nombre d'employés. Les auteurs affirment que ces inputs contribuent directement à l'augmentation de l'output. L'étude conclut que l'inefficience illustre une mauvaise utilisation des ressources (inputs) des terminaux et que des investissements

dans les infrastructures et les équipements permettent d'améliorer l'efficience des terminaux étudiés.

Fancello *et al.* (2021) ont appliqué les deux orientations (input et output) du modèle CCR du DEA et ont utilisé plusieurs combinaisons d'inputs et outputs de 35 ports méditerranéens de conteneurs dans le but d'identifier les facteurs ayant le plus grand impact sur leur efficience en termes du nombre de conteneurs manutentionnés annuellement (output). Les inputs utilisés sont la superficie de la zone d'entreposage, le nombre de grues et la distance du port par rapport à l'axe Suez-Gibraltar, une route maritime importante de l'Orient. L'objectif était de déterminer les inputs ayant le plus grand impact sur l'efficience avec le modèle orienté input et de déterminer le potentiel d'amélioration des valeurs des inputs avec le modèle orienté output. Selon les résultats obtenus, les ports devraient augmenter leurs ressources, notamment la superficie de la zone d'entreposage, plutôt que d'augmenter le nombre de conteneurs manutentionnés.

Li *et al.* (2022) ont comparé l'efficience de 32 manutentionnaires de matières conteneurisées dans des ports de Chine. Les auteurs affirment qu'un même terminal peut être utilisé par plusieurs manutentionnaires avec une efficience variée. Les inputs utilisés sont le nombre d'employés, le nombre de quais ainsi que leur longueur et le nombre d'équipements de (dé)chargement, alors que les outputs sont le nombre de conteneurs et le tonnage de matières manutentionnées. Le modèle de super efficience DEA-SBM et la méthode de l'index Malmquist ont été utilisés. Les auteurs concluent que l'efficience des terminaux est étroitement reliée à la région économique dans laquelle ils sont situés, l'efficience étant plus élevée dans les régions développées. Le projet de notre mémoire comporte des similitudes avec l'étude réalisée par Li *et al.* (2022). En effet, les terminaux du port de Trois-Rivières sont utilisés par différents manutentionnaires et différents navires seront étudiés. En revanche, notre étude porte sur des matières en vrac.

Park *et al.* (2022) proposent un modèle DEA en deux étapes permettant de distinguer les opérations de (dé)chargement, se déroulant dans un terminal, et celles de livraison/réception, se déroulant hors du terminal. Les auteurs utilisent des inputs communs pour les deux étapes, soient le nombre d'employés, l'espace d'entreposage, le nombre de grues dans l'aire d'entreposage, le nombre d'années d'opération et la demande prévue en termes de volume (TEU). Les inputs uniques aux opérations de (dé)chargement sont la longueur des quais, le nombre de grues et de véhicules de manutention sur le quai et le pourcentage de navires ayant attendu plus de 12 heures avant d'accoster, alors que le seul input unique aux opérations de livraison/réception est le nombre d'équipements de support (par exemple, des chariots élévateurs et des convoyeurs). Les outputs correspondent au nombre de conteneurs (dé)chargés et livrés/reçus. Les auteurs concluent qu'il est préférable de s'attarder aux activités de (dé)chargement puisqu'elles utilisent moins d'inputs et permettent au terminal d'améliorer sa compétitivité.

Nong (2023) propose une approche d'évaluation de la performance des ports à l'aide du DEA (CRS et VRS orientés input et output). Le capital investi, les dépenses opérationnelles, le nombre d'employés, la superficie du port, la longueur et la profondeur des quais sont les inputs utilisés par les auteurs, alors que les revenus associés au nombre de navires accueillis ainsi que le tonnage de matière manutentionnée annuellement sont les outputs. Les auteurs précisent que les ports avec des rendements d'échelle croissants peuvent améliorer leur efficience en changeant leur niveau d'inputs, alors que ceux avec des rendements d'échelle décroissants peuvent l'améliorer en changeant leur niveau d'outputs.

Cano-Leiva *et al.* (2023) ont utilisé les approches CRS et VRS du DEA dans la première phase d'une étude en deux phases visant à évaluer l'effet de la privatisation des terminaux espagnols sur leur efficience. Les inputs utilisés sont la longueur des quais, l'espace d'entreposage et le nombre de travailleurs, alors que les outputs sont le nombre

de conteneurs et le tonnage de chaque matière (dé)chargée, ainsi que le nombre de passagers. Cette première phase a permis de conclure que la main-d'œuvre est l'input ayant le plus d'impact sur l'efficience, suivi de la longueur des quais.

Le tableau 2.1 regroupe les principales informations des articles présentés dans cette section. Notons que ce tableau présente seulement les articles traitant des modèles CCR ou BCC. Les inputs utilisés dans ces articles comprennent notamment le nombre de grues, la capacité d'entreposage et la taille du port, des quais ou du terminal. Dans le contexte de notre étude, ces inputs s'avèrent pertinents, car ce sont des ressources utilisées par chaque navire qui séjourne dans un port. La quantité de marchandises manutentionnée est utilisée en output dans tous les articles présentés. Cet output peut s'avérer pertinent dans le contexte de notre étude. En revanche, l'échelle de temps sera à revoir, car les auteurs utilisent généralement la quantité de marchandise manutentionnée annuellement. Les autres outputs utilisés sont le nombre de navires accueillis et les revenus. Ces inputs et outputs s'appliquent dans des ports ou des terminaux accueillant principalement des matières transportées en conteneurs, mais pourraient également être appliqués dans des ports transportant uniquement des matières sans conteneurs (vrac et marchandises générales).

Tableau 2.1 : Résumé des articles, ports avec conteneurs

		Articles	Nombre d'articles (/8)
Modèle	CCR	Cullinane <i>et al.</i> (2006), D'agostini <i>et al.</i> (2015), Wanke et Barros (2015), Da Costa <i>et al.</i> (2021), Fancello <i>et al.</i> (2021), Nong (2023), Cano-Leiva <i>et al.</i> (2023)	7
	BCC	Cullinane <i>et al.</i> (2006), D'agostini <i>et al.</i> (2015), Wanke et Barros (2015), Zahran <i>et al.</i> (2020), Da Costa <i>et al.</i> (2021), Nong (2023), Cano-Leiva <i>et al.</i> (2023)	7
Inputs	Nombre de grues	Cullinane <i>et al.</i> (2006), Zahran <i>et al.</i> (2020), Fancello <i>et al.</i> (2021),	3
	Capacité d'entreposage	D'agostini <i>et al.</i> (2015), Wanke et Barros (2015), Zahran <i>et al.</i> (2020), Fancello <i>et al.</i> (2021), Cano-Leiva <i>et al.</i> (2023)	5
	Taille du port, quais, terminal	Cullinane <i>et al.</i> (2006), D'agostini <i>et al.</i> (2015), Wanke et Barros (2015), Zahran <i>et al.</i> (2020), Nong (2023), Cano-Leiva <i>et al.</i> (2023)	6
Outputs	Quantité de marchandises manutentionnée (par année)	Cullinane <i>et al.</i> (2006), D'agostini <i>et al.</i> (2015), Wanke et Barros (2015), Zahran <i>et al.</i> (2020), Da Costa <i>et al.</i> (2021), Fancello <i>et al.</i> (2021), Nong (2023), Cano-Leiva <i>et al.</i> (2023)	8
	Nombre de navires	Wanke et Barros (2015), Zahran <i>et al.</i> (2020)	2
	Revenus	D'agostini <i>et al.</i> (2015), Nong (2023)	2

2.2.2 Utilisation du DEA dans les ports sans conteneur

Il existe moins d'études se penchant sur le DEA dans les ports sans conteneurs.

De Oliveira et Cariou (2011) ont utilisé les modèles CCR et BCC du DEA orientés inputs pour 122 ports de minerai de fer et de charbon afin d'évaluer l'effet de la taille et du type de matière transportée dans le port sur l'efficience. Le tirant d'eau, la longueur totale des quais, la capacité des espaces d'entreposage (en tonnes) et le tonnage (dé)chargé par heure sont utilisés en inputs. Le tonnage (dé)chargé par heure à quai n'est pas habituellement utilisé en inputs, mais les auteurs l'utilisent pour distinguer les opérations de chargement des opérations de déchargement. L'output utilisé est le tonnage de matière manutentionnée annuellement. L'étude a permis d'établir que le tonnage manutentionné par heure dans les ports de chargement est plus élevé que dans

les ports de déchargement et que les ports efficients sont généralement ceux de plus grande taille.

Medal-Bartual *et al.* (2017) ont comparé l'efficience de 33 ports de la péninsule ibérique à l'aide du DEA sous l'approche BCC (VRS) orienté input. Les auteurs affirment que l'orientation input est pertinente lorsque les inputs sont des variables endogènes (facteurs internes, comme les infrastructures ou les équipements) et que les outputs sont reliés à la demande. Les frais fixes et les coûts de main-d'œuvre sont utilisés en inputs, alors que le tonnage de chaque type de matière manutentionné est utilisé en output. Les résultats ont permis de conclure que les ports accueillant une grande proportion de navires de vrac liquide sont les plus efficients, suivis de ceux accueillant une grande proportion de navires de vrac solide.

Suliman *et al.* (2019) proposent un modèle CCR issu d'un recensement de la littérature pour mesurer l'efficience des terminaux de vrac solide. Selon les auteurs, les inputs devraient être les équipements, les infrastructures et la main-d'œuvre, alors que les outputs devraient refléter la performance du terminal. Pour les outputs, les auteurs suggèrent des mesures de performance reliées au temps, comme la vitesse de manutention (ou tonnage de matière (dé)chargée par heure) et les mouvements de grues par heure. Les auteurs recommandent aussi l'utilisation d'indicateurs physiques, financiers, d'utilisation de ressources et de niveau de service dans les terminaux (par exemple, le nombre d'équipements disponibles et le tonnage devant être manutentionné chaque jour). Leur modèle permet d'identifier les possibilités d'améliorations d'un point de vue de gestion, stratégique et opérationnel.

Tovar et Wall (2019) ont appliqué le DEA-Malmquist orienté output pour 26 ports espagnols afin de démontrer qu'ils sont généralement plus efficients lorsqu'ils sont plus gros et que les produits qui y transitent sont variés. Les outputs utilisés sont le tonnage des différentes matières manutentionnées et le nombre de passagers, alors que les

inputs sont le nombre d'employés, les dépenses opérationnelles, le capital (y compris la valeur des infrastructures) et la surface du lieu d'entreposage.

Contrairement aux articles utilisant le DEA pour comparer l'efficience de différents ports, ce mémoire utilise le DEA dans un seul port afin de comparer l'efficience de différents navires transportant différents produits. L'étude sera similaire à celle réalisée par Li *et al.* (2022), qui ont comparé l'efficience de différents manutentionnaires. Notre étude se distingue cependant par l'utilisation des navires comme DMU et l'utilisation des modèles CCR et BCC plutôt que le modèle de super efficience DEA-SBM et la méthode de l'index Malmquist. Le DEA permettra d'identifier les navires efficients et d'établir les caractéristiques de ces navires. Ces caractéristiques permettront ensuite d'établir les bonnes pratiques à mettre en place afin d'améliorer l'efficience des navires qui s'arrêteront au port dans le futur.

Le tableau 2.2 présente un résumé des articles de cette section. La plupart des inputs utilisés dans les articles portant sur les ports sans conteneurs sont généraux et s'appliquent à l'échelle d'un port ou d'un terminal et ne constituent pas des ressources pour les navires qui sont les DMUs étudiées dans ce mémoire.

Tableau 2.2 : Résumé des articles, ports sans conteneurs

		Articles	Nombre d'articles (/4)
Modèle	CCR	De Oliveira et Cariou (2011), Suliman <i>et al.</i> (2019)	2
	BCC	De Oliveira et Cariou (2011), Medal-Bartual <i>et al.</i> (2017)	2
Inputs	Capacité d'entreposage	De Oliveira et Cariou (2011), Tovar et Wall (2019)	2
	Nombre d'employés	Suliman <i>et al.</i> (2019), Tovar et Wall (2019)	2
	Coûts (opérationnels, main-d'œuvre)	Medal-Bartual <i>et al.</i> (2017) Tovar et Wall (2019)	2
Outputs	Quantité de marchandises manutentionnée (par heure, par année)	De Oliveira et Cariou (2011), Medal-Bartual <i>et al.</i> (2017), Suliman <i>et al.</i> (2019), Tovar et Wall (2019)	4
	Mouvements de grues par heure	Suliman <i>et al.</i> (2019)	1

La plupart de ces inputs ne seront pas considérés pour ce mémoire. En revanche, l'output *tonnage de matière manutentionnée* sera pertinent. Trois articles sur quatre considèrent le tonnage de matière manutentionné annuellement, ce qui ne pourra pas être mesuré puisque les navires ne sont à quai que quelques jours. C'est donc le tonnage manutentionné pour la période durant laquelle un navire est à quai qui sera considéré comme output.

La revue de littérature a démontré que, dans le secteur maritime, le DEA a été utilisé principalement pour comparer l'efficience des ports. À notre connaissance, il n'existe pas d'étude utilisant le DEA dans un seul port afin de comparer l'efficience des activités portuaires pour les navires.

Chapitre 3. Description du port étudié

Ce mémoire se concentre sur les activités de (dé)chargement des navires au port de Trois-Rivières et sur les ressources qu’elles requièrent. Ce chapitre permettra de mieux comprendre les étapes d’un (dé)chargement de navire et d’identifier les activités à VA et NVA.

3.1 Description des activités de (dé)chargement des navires à quai

Les activités de (dé)chargement des navires à quai correspondent aux activités permettant la manutention de la cargaison du navire vers le quai ou du quai vers le navire durant son séjour à quai. Selon Barata *et al.* (2022), le temps à quai d’un navire « commence dès que la première corde est attachée au quai et se termine lorsque la dernière corde est détachée » du quai, ce qui représente le temps total d’amarrage du navire.

Lorsqu’un navire arrive au port, il doit d’abord attendre des papiers autorisant le (dé)chargement. Lorsque cette autorisation est reçue, la (ou les) équipe de débardeurs, qui a préalablement été commandée par le manutentionnaire, débute le (dé)chargement de la cargaison. Les activités de chargement et de déchargement de la cargaison requièrent l’aide de grues, pipelines ou convoyeurs selon le produit manutentionné. Le transport de la marchandise du quai vers les hangars ou des hangars vers le quai ne font pas partie des activités de (dé)chargement.

Afin d’étudier l’efficience des activités de (dé)chargement des navires, il faut d’abord comprendre ce qui compose le temps à quai des navires. Le temps à quai des navires est défini par les 6 catégories suivantes:

- Temps de (dé)chargement
- Temps nécessaires
- Temps de pause
- Temps d’arrêt avec équipes

- Temps d'arrêt sans équipe
- Autres temps

3.1.1 Temps de (dé)chargement

Le temps de (dé)chargement est le temps durant lequel les débardeurs effectuent des activités de manutention pour le (dé)chargement du navire. Ces activités constituent de la valeur ajoutée.

3.1.2 Temps nécessaires

Les temps nécessaires regroupent les temps de toutes les tâches qui doivent être réalisées par l'équipe du navire excluant le temps de (dé)chargement. Ces tâches sont, par exemple, l'équilibrage du navire, le changement de cale ou la préparation des équipements. Ces tâches sont nécessaires pour assurer la sécurité sur le navire pendant le (dé)chargement ainsi que le bon déroulement des activités. Elles ne sont pas considérées à valeur ajoutée dans ce mémoire puisqu'elles ne sont pas directement liées au (dé)chargement. Elles sont considérées comme de la non-valeur ajoutée nécessaire. De plus, ces tâches sont réalisées par l'équipe du navire et non par les débardeurs. Les activités analysées dans ce travail sont celles réalisées par les débardeurs.

3.1.3 Temps de pause

Les temps de pause sont les périodes accordés aux débardeurs pour le repos et les repas et représentent de la non-valeur ajoutée nécessaire.

3.1.4 Temps d'arrêt avec équipes

Les temps d'arrêt avec équipes comprennent les arrêts forcés lorsque des équipes de débardeurs sont présentes pour les activités de (dé)chargement. Les arrêts forcés peuvent être causés, par exemple, par l'attente du navire ou d'un formulaire, la mauvaise température, les équipements défectueux ou les pannes d'électricité. Ces temps constituent de la non-valeur ajoutée.

3.1.5 Temps d'arrêt sans équipe

Les temps d'arrêt sans équipe sont les temps durant lesquels aucune équipe de débardeurs n'a été commandée durant les heures normales de travail. Un navire n'étant pas habituellement (dé)chargé durant la nuit et les fins de semaine, ces périodes ne sont donc pas considérées comme du temps d'arrêt sans équipe. Les navires ayant du temps d'arrêt sans équipe sont généralement ceux où aucune équipe de débardeurs n'a été commandée en raison du mauvais temps prévu ou d'un bris durant un quart de jour, la semaine. Les temps d'arrêt sans équipe représentent de la non-valeur ajoutée.

3.1.6 Autres temps d'arrêt

Les autres temps d'arrêt d'un navire à quai sont les moments où il n'y a pas de travail réalisé sur le navire. Il s'agit généralement des quarts de nuit et de fin de semaine. Durant ces périodes, aucune équipe de débardeurs n'est commandée.

La figure 3.1 illustre la répartition du temps à quai. Les temps où se retrouvent des activités à valeur ajoutée sont indiqués en vert, ceux où on retrouve des activités à non-valeur ajoutée nécessaire sont en jaune, alors que ceux avec des activités à non-valeur ajoutée sont en rouge.

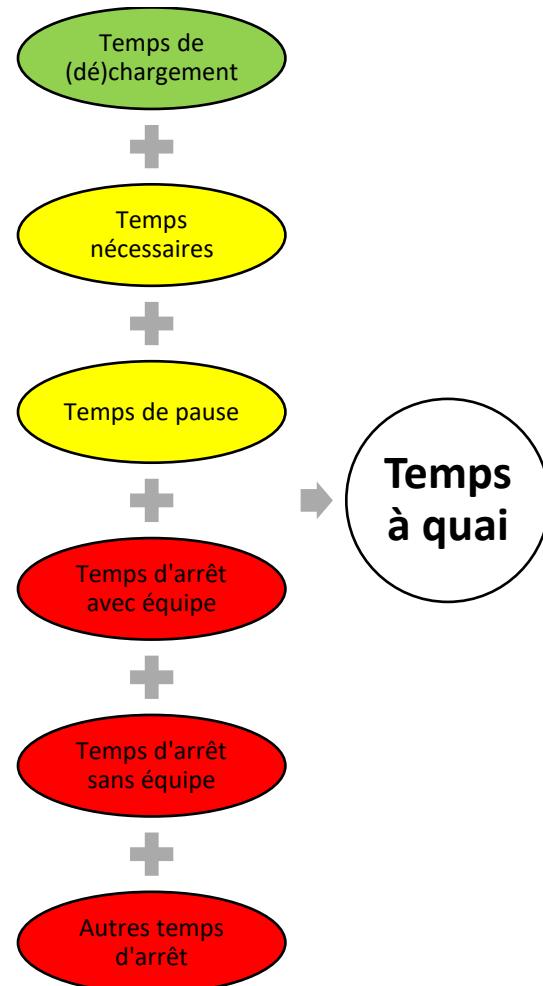


Figure 3.1 : Répartition du temps à quai

3.2 Particularités des activités de (dé)chargement

Une étude préliminaire a permis d'établir certains constats concernant les activités de (dé)chargement des navires à quai au port de Trois-Rivières de 37 navires de concentré de cuivre, nickel et zinc, de 2019 à 2021 (Bournival, 2022).

Le temps alloué au (dé)chargement des produits au port de Trois-Rivières représente entre 25% et 31% du temps à quai des 37 navires de concentré de minerai étudiés. Le temps requis pour les activités à non-valeur ajoutée et à non-valeur ajoutée nécessaire correspond à 59% du temps à quai des navires en moyenne.

Généralement, les activités de (dé)chargement au port de Trois-Rivières ont lieu du lundi au vendredi, durant les quarts de jour (8h à 16h) et de soir (16h à minuit). À l'occasion, des activités de (dé)chargement ont lieu durant les autres quarts (de nuit et de fin de semaine). Selon l'APTR, il est impossible d'augmenter le nombre d'activités de (dé)chargement durant les quarts de travail de nuit et de fin de semaine de façon permanente en raison notamment du bruit causé par le (dé)chargement des navires.

3.3 Informations sur les activités de (dé)chargement

L'analyse des activités de (dé)chargement a été réalisée à partir des données extraites des Statements of Facts (SOF). Le Statement of Facts (SOF) est un formulaire complété par un agent maritime qui contient une description des activités d'un navire durant son séjour au port (voir les figures 4.1 et 4.2 pour des exemples). Un SOF par navire est complété. Les opérations telles que l'embarquement du pilote marin, l'amarrage, la préparation des opérations de chargement et de déchargement, les opérations de chargement et de déchargement, le désamarrage et le départ y sont consignés en ordre chronologique.

Le SOF indique aussi l'utilisation de remorqueurs, la quantité de carburant à bord ainsi que les périodes où aucun travail n'est réalisé en raison des conditions météorologiques.

Les informations consignées dans les SOF constituent les données brutes relatives aux activités de (dé)chargement des navires à quai. D'autres informations pertinentes, telles que le nom du navire, le tonnage ainsi que la date de départ et d'arrivée y sont inscrits.

Il est important de noter que la précision des informations contenues dans un SOF varie selon l'agence maritime. Par conséquent, seuls les SOF incluant, entre autres, le tonnage de matière, le temps à quai du navire, le nombre d'équipes (ou gang) de débardeurs, le temps de (dé)chargement et le nombre de grues ont été considérés.

Ce chapitre a permis d'établir les caractéristiques du port de Trois-Rivières, et plus particulièrement les activités de (dé)chargement. La méthodologie utilisée pour identifier les navires efficients sera présentée au chapitre 4.

Chapitre 4. Méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude est l'analyse par enveloppement de données (Data Enveloppement Analysis, DEA). Le DEA permet de considérer les ressources utilisées pour le (dé)chargement des navires et d'identifier les bonnes pratiques parmi les DMUs (navires) observées. Cette méthodologie permettra d'identifier les navires ayant des temps à quai plus courts et l'utilisation des ressources pour y arriver. Deux modèles DEA ainsi que les résultats obtenus seront comparés.

4.1 Collecte de données

Les données pour chaque navire étudié sont extraites de leur SOF, puis compilées dans un fichier Excel.

4.1.1 Collecte des données des SOF

Les données recueillies sont les suivantes :

- Type de produit manutentionné
- Tonnage de matière à (dé)charger pour le navire observé
- Temps à quai du navire
- Type d'activités (chargement ou déchargement)
- Temps de (dé)chargement et nombre d'équipes de débardeurs présente à chaque instant du (dé)chargement
- Nombre de grues (du navire ou du terminal) : Le nombre de grues est généralement donné dans les SOF. Lorsque ce n'est pas le cas, le SOF indique le numéro de la grue affectée au (dé)chargement de la cale. Le nombre de grues peut alors être déterminé en comptant le nombre de numéros de grues différents. Dans de rares cas, il arrive que ces informations ne soient pas disponibles. Pour estimer le nombre de grues, le nombre de cales inscrites dans le SOF est compté. S'il y a plus d'une cale et qu'il n'y a pas d'activités de déplacement de grues inscrites, il est supposé que le nombre de cales à

(dé)charger est égal au nombre de grues. S'il y a des activités de déplacement de grues, le nombre de grues est posé à 1, sauf s'il y a une grue de navire inscrite dans le SOF.

- Temps d'arrêt en raison du mauvais temps
- Temps d'arrêt en raison des bris
- Temps d'arrêt avec équipes : Les temps d'arrêt avec équipes sont déduits à partir des informations contenues dans les SOF. Tous les événements qui causent l'arrêt du travail des équipes de débardeurs sont associés à des temps d'arrêt avec équipes. Ces temps d'arrêt avec équipes peuvent être causés par des bris d'équipement, des conditions météorologiques et peuvent être répertoriés lorsqu'on note « standby » dans les SOF. Le temps d'arrêt avec équipes prend en considération le nombre d'équipes impliquées. Par exemple, si deux équipes doivent cesser le (dé)chargement du navire en raison de la pluie, le temps d'arrêt avec équipes est multiplié par deux, car deux équipes auraient pu effectuer des activités de (dé)chargement durant ce temps.

La figure 4.1 présente un exemple d'en-tête d'un SOF. On y retrouve le type de produit, le tonnage total manutentionné et les heures d'arrivée et de départ du navire.

Arrival date	17-Oct-2019	hour	0355	Cargo	Copper Concentrates
Docked date	17-Oct-2019	hour	0355	Berth	20
Notice of readiness tendered to:				date	17-Oct-2019 hour 0355
Notice of readiness received				date	18-Oct-2019 hour 0800
Commenced loading				date	18-Oct-2019 hour 0805
Completed loading				date	19-Oct-2019 hour 2015
Total cargo loaded:	9,795.788 wmt as per draft survey				
Sailed for: Onsan, Korea				date	19-Oct-2019 hour 2315
Bunkers on arrival:	HSFO : 229.50 mt	LSFO :	Nil	HSDO :	Nil LSDO : 125.60 mt
Bunkers shipped:	HSFO : Nil	LSFO :	Nil	HSDO :	Nil LSDO : Nil
Bunkers on sailing:	HSFO : 229.50 mt	LSFO :	Nil	HSDO :	Nil LSDO : 119.00 mt
Tugs on entering :	1	Tugs for shifting :	N/A	Tugs on sailing :	Nil
Draft inward: Fwd	4.23 m	Aft	8.82 m	Draft outward: Fwd	7.18 m Aft 7.90 m

Figure 4.1 : En-tête d'un SOF

La figure 4.2 présente un exemple de SOF avec les activités détaillées relatives au chargement d'un navire. On remarque que les étapes y sont décortiquées à chaque heure et que le nombre d'équipes y est indiqué.

Date	Day of week	Commenced	Finished	Details, remarks, weather, holidays, shift or berth, etc.
18-Oct-2019	Friday	0800	0805	Safety meeting
		0805	---	Commenced loading basis S/Time
		0805	1100	1 gang loading hold 1 with shore crane
		1100	1130	1 gang standby account rain
		1130	1445	1 gang loading hold 1 with shore crane
		1445	1500	1 gang shifting shore crane to hold 2
		1500	1600	1 gang loading hold 2 with shore crane
		---	1600	End of S/Time shift
		---	---	Total cargo loaded: 3,000.00 wmt / Remain to load: 6,750.00 wmt
		1600	---	1 gang continued loading basis O/T (50/50 split)
		1600	1605	Safety meeting
		1605	1815	1 gang loading hold 2 with shore crane
		1815	1830	1 gang shifting shore crane to hold 1
		1830	1945	1 gang loading hold 1 with shore crane
		1945	2000	1 gang loading backhoe in hold 2 AFT for levelling
		2000	2130	1 gang loading hold 1 with shore crane / Levelling hold 2 AFT
		2130	2145	1 gang unloading backhoe from hold 2 AFT
		2145	2200	1 gang shifting shore crane to hold 2
		2200	2359	1 gang loading hold 2 with shore crane
		---	2359	End of O/T shift
		---	---	Total cargo loaded: 5,763.00 wmt / Remain to load: 3,987.00 wmt

Figure 4.2 : Exemple SOF

4.1.2 Compilation des données

Les données brutes, pour chaque navire, ont été compilées dans un fichier Excel pour obtenir:

- Tonnage (dé)chargé par heure à quai
- Heures de (dé)chargement-équipe : Les heures de (dé)chargement-équipe sont calculées en multipliant le nombre d'équipes présentes lors des activités de (dé)chargement par le temps de (dé)chargement. Dans les SOF, le nombre d'équipes de débardeurs est inscrit à chaque étape de chargement et ce, pour un certain intervalle de temps. Le tableau 4.1 est un exemple des temps de (dé)chargement (en heures) et du nombre d'équipes pour chaque séquence de (dé)chargement provenant d'un SOF.

Tableau 4.1 : Exemple des temps de (dé)chargement provenant d'un SOF

Temps de (dé)chargement (h)	Nombre d'équipes
1	1
2	2
1,5	1

Les heures de (dé)chargement-équipe sont calculées ainsi :

$$\begin{aligned} \text{Heures (dé)chargement - équipe} &= (1 \times 1) + (2 \times 2) + (1,5 \times 1) \\ &= 6,5 \text{ h-équipe} \end{aligned}$$

- Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement-équipe

Le tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement-équipe est obtenu en divisant le tonnage par les heures de (dé)chargement-équipe.

- Nombre moyen d'équipes

Le nombre moyen d'équipes est obtenu en calculant la moyenne pondérée d'équipes par heure de (dé)chargement.

$$\text{Nombre moyen d'équipes} = \frac{\sum (\text{temps de (dé)chargement}) \times (\text{nombre d'équipes})}{\sum \text{temps de (dé)chargement}}$$

Le calcul du nombre moyen d'équipes est illustré à partir de l'exemple du tableau 4.1.

$$\text{Nombre moyen d'équipes} = \frac{(1 \times 1) + (2 \times 2) + (1,5 \times 1)}{(1 + 2 + 1,5)} = 1,44 \text{ équipes}$$

Les informations provenant des différents SOF ont été compilées afin de générer les données qui seront utilisées dans la modélisation des problèmes DEA.

4.2 Analyse par enveloppement de données (DEA)

L'analyse par enveloppement de données (DEA) permet de comparer différentes unités de production et d'évaluer leur efficience relative. Les unités de production, appelées unités de prise de décision (DMUs) dans le contexte du DEA, peuvent représenter une entreprise, une organisation, ou dans le contexte de cette étude, un port, un terminal ou un navire. L'efficience d'une DMU correspond à une bonne utilisation des ressources; une DMU efficiente utilisera peu de ressources (inputs) pour produire un résultat désiré (output). Un problème de programmation linéaire par DMU est résolu afin de déterminer les DMUs qui utilisent leurs ressources (inputs) de manière efficiente pour produire un résultat désiré (output). L'analyse des DMUs efficientes permet de déterminer les bonnes pratiques dans le domaine et les améliorations à apporter aux DMUs inefficiences.

Lorsque le modèle n'utilise qu'une ressource (input) et un extrant (output), l'efficience est calculée en divisant la valeur de l'output par celle de l'input. Lorsque le nombre d'inputs et/ou d'outputs augmente, l'efficience est obtenue par le ratio de la somme pondérée des outputs sur la somme pondérée des inputs. La pondération, ou poids, de chaque input et output, pour une DMU donnée, est obtenue lors de la résolution d'un problème DEA. De cette façon, chaque DMU est associée aux poids de ses inputs et outputs qui maximisent son efficience.

4.2.1 Exemple de DEA : 1 input et 1 output

Considérons huit DMUs qui sont des terminaux dans un port. L'input est le nombre de grues dans chaque terminal et l'output est la quantité de matière manutentionnée (en tonnes) annuellement dans chaque terminal. Le tableau 4.2 présente les données de cet exemple et l'efficience des DMUs mesurée par

$$\text{Efficience} = \frac{\text{Output}}{\text{input}} \quad (4.1)$$

Tableau 4.2 : Exemple DEA - 1 input et 1 output

DMU (terminaux)	Input (Nombre de grues)	Output Tonnage manutentionné (10000 tonnes)	Efficiency
1	3	20	6,67
2	4	25	6,25
3	6	30	5
4	5	22,5	4,5
5	3	15	5
6	5	30	6
7	4	15	3,75
8	6	27,5	4,58

L'efficience de la DMU 1 est la plus élevée, car elle permet de manutentionner le plus de matière par grue. La figure 4.3 présente le tonnage manutentionné annuellement en fonction du nombre de grues pour les huit DMUs.

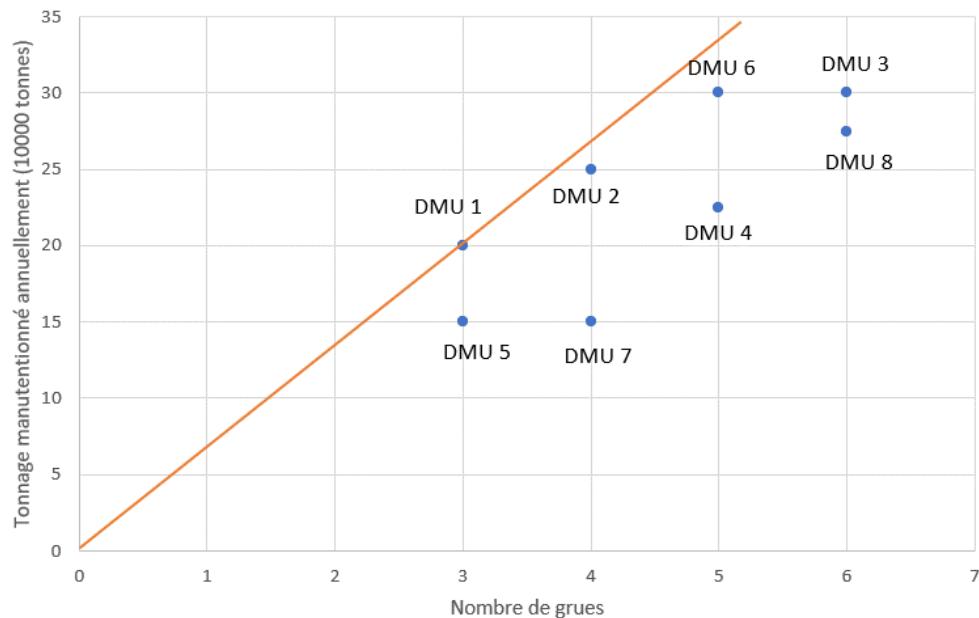


Figure 4.3 : Tonnage en fonction du nombre de grues - 1 input et 1 output

La pente de la droite reliant chaque point (DMU) et l'ordonnée à l'origine est égale au tonnage manutentionné divisé par le nombre de grues. La droite ayant la plus grande pente est appelée la frontière efficiente et elle devient une référence pour tous les points (DMU). Les points sont soit sur la frontière efficiente, soit sous la frontière efficiente. Ils sont alors compris dans l'ensemble de possibilités de production (P), qui contient tous les points. Les points sur la droite avec la plus grande pente sont efficents, alors que les points sous cette droite sont inefficients. Dans l'exemple, seule la DMU 1 est efficiente, car elle est la seule sur la frontière efficiente.

Il devient intéressant de comparer l'efficience de chaque DMU avec celle de la plus efficiente, soit la DMU 1. La DMU 1, qui est la seule sur la frontière efficiente, est l'ensemble de référence des autres DMUs. Lorsqu'il y a un input et un output, cette comparaison se fait en calculant le ratio du tonnage manutentionné par grue pour la DMU considérée sur le tonnage manutentionné par grue pour la DMU 1.

$$0 \leq \frac{\text{Tonnage manutentionné par grue DMU 0}}{\text{Tonnage manutentionné par grue DMU 1}} \leq 1 \quad (4.2)$$

Puisque le tonnage manutentionné par grue de la DMU considérée est nécessairement inférieur ou égal à celui de DMU 1, ce ratio sera toujours inférieur ou égal à 1. Les DMUs avec un ratio inférieur à 1 sont jugées inefficiences. Pour atteindre l'efficience, elles doivent soit réduire leur niveau d'input, soit augmenter leur niveau d'output. Par exemple, la DMU 5 deviendrait efficiente (atteindrait la frontière efficiente) si son tonnage manutentionné augmentait de 50 000 tonnes (passant de 150 000 à 200 000 tonnes), ou si le nombre de grues utilisées diminuait de 0,75 (passant de 3 à 2,25) (figure 4.4).

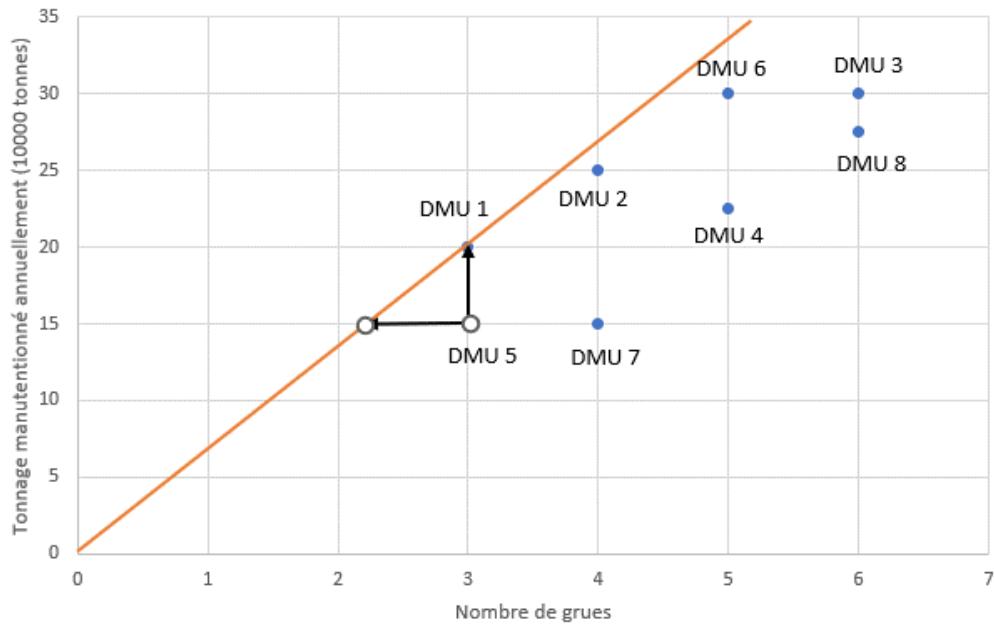


Figure 4.4 : Amélioration de la DMU 5

4.2.2 2 inputs et 2 outputs

Lorsqu'on a seulement 1 input et 1 output, la mesure de l'efficience par le ratio output/input est adéquate. Lorsqu'on a plus d'un input ou plus d'un output, il importe de définir l'importance accordée à chaque input et output. Cela se fait en considérant des poids associés à chacun. L'efficience est alors calculée par la somme pondérée des outputs sur la somme pondérée des inputs, en fonction des poids.

Afin d'expliquer ce concept, ajoutons un input et un output à notre exemple : le nombre d'employés et le nombre de navires accueillis annuellement. Le tableau 4.3 présente les données.

Tableau 4.3 : Exemple DEA - 2 inputs et 2 outputs

DMU	Inputs		Outputs	
	Nombre de grues	Nombre d'employés	Tonnage manutentionné (10000 tonnes)	Nombre de navires/an
1	3	12	20	100
2	4	10	25	137
3	6	9	30	128
4	5	14	22,5	153
5	3	9	15	157
6	5	11	30	148
7	4	11	15	136
8	6	14	27,5	129

Lorsqu'il y a plus d'un input ou plus d'un output, il faut déterminer le poids qui sera attribué à chacun. Par exemple, on peut juger que le nombre de grues est deux fois plus important que le nombre d'employés et que le tonnage manutentionné est 4 fois plus important que le nombre de navires. Dans ce cas, l'efficience pondérée serait, pour la DMU 1 :

$$\text{Efficience} = \frac{4 \times 20 + 1 \times 100}{2 \times 3 + 1 \times 12} = 10$$

La DMU ayant la plus grande efficience pondérée servira de point de référence. Dans cet exemple, la DMU 5 a l'efficience pondérée la plus élevée (tableau 4.4). En divisant l'efficience de chaque DMU par celle de la DMU 5, on obtient une efficience normalisée (tableau 4.4). L'efficience normalisée de la DMU 5 est nécessairement égale à 1.

Tableau 4.4 : Efficience avec poids fixes

DMU	Efficience pondérée	Efficience normalisée
1	10	0,69
2	13,17	0,91
3	11,81	0,82
4	10,13	0,70
5	14,47	1,00
6	12,76	0,88
7	10,32	0,71
8	9,19	0,64

La fixation des poids exerce une influence sur la valeur de l'efficience pondérée. En effet, si le nombre d'employés était 2 fois plus important que le nombre de grues et le nombre annuel de navires 5 fois plus important que le tonnage annuel manutentionné, on obtiendrait les résultats du tableau 4.5. Dans ce cas, la DMU 3 serait la plus efficiente et non la DMU 5.

Tableau 4.5 : Efficience en changeant les poids fixes

DMU	Efficience pondérée	Efficience normalisée
1	7,41	0,64
2	10,92	0,94
3	11,58	1,00
4	8,05	0,69
5	11,05	0,95
6	11,04	0,95
7	8,12	0,70
8	7,84	0,68

Le DEA vise donc à contourner la limite d'utiliser des poids fixes en déterminant des poids variables pour chaque DMU. Les poids attribués à chaque DMU sont déterminés de façon à ce que le ratio pondéré output/input soit maximisé pour chaque DMU par rapport aux autres DMUs. Ces poids sont obtenus en résolvant un problème de DEA pour chaque

DMU. Les modèles mathématiques permettant de déterminer les poids qui maximisent l'efficience de chaque DMU, sont présentés dans les sections suivantes.

4.3 Modèle DEA

Le DEA vise à déterminer l'efficience relative de chaque DMU en maximisant le ratio pondéré output/input lorsqu'on considère plusieurs inputs et outputs.

Les modèles DEA peuvent être orientés input ou output selon que l'on vise à utiliser le moins de ressources (inputs) pour atteindre un certain résultat (outputs) ou à obtenir le résultat maximum (outputs) en utilisant une quantité fixe de ressources (inputs).

Définition 1. Orientation input : L'orientation input a pour objectif la minimisation des inputs permettant d'obtenir le même niveau d'outputs.

L'orientation input ne vise donc pas à augmenter la production d'outputs, mais bien à réduire l'utilisation des ressources afin d'obtenir le même résultat.

Définition 2. Orientation output : L'orientation output vise à maximiser les outputs à partir des inputs actuels.

L'orientation output vise alors à augmenter la production d'outputs en fonction des ressources disponibles. Il n'est alors pas nécessaire d'agir sur le niveau de ressources (inputs) requises.

Cullinane *et al.* (2006) affirment qu'il est nécessaire pour un port de savoir si les ressources actuelles (inputs) sont utilisées de manière efficiente. En ce sens, l'orientation output permettra de déterminer quels navires utilisent leurs ressources de façon à maximiser les outputs. L'orientation output sera donc utilisée dans cette étude. L'interprétation des résultats avec le modèle orienté output permettra de déterminer si des améliorations dans les activités du port contribueront à l'obtention d'un meilleur rendement avec les mêmes inputs.

Selon le contexte, les données associées aux inputs et aux outputs génèrent des rendements d'échelle constants ou variables.

Définition 3. Rendement d'échelle constant : Un *rendement d'échelle constant* (Constant Return to Scale, CRS) signifie qu'une variation d'un même pourcentage de tous les inputs a pour conséquence une variation de ce même pourcentage des outputs (Cooper *et al.*, 2007).

Définition 4. Rendement d'échelle variable : Un *rendement d'échelle variable* (Variable Return to Scale, VRS) indique qu'une variation des valeurs des inputs n'a pas nécessairement pour conséquence une variation proportionnelle des valeurs des outputs.

Selon le modèle DEA utilisé, on suppose que le rendement d'échelle est constant (CCR) ou variable (BCC).

La revue de littérature a permis d'exposer qu'il existe plusieurs modèles DEA. Ce mémoire se concentre sur les modèles CCR et BCC, dont l'évaluation de l'efficience diffère en raison des hypothèses sur les rendements d'échelle.

4.4 Modèles CCR

Le modèle CCR de Charnes, Cooper et Rhodes (1978) suppose des rendements d'échelle constants (Constant Return to Scale). Diverses variantes du modèle CCR seront présentées pour arriver à celui utilisé pour réaliser les tests numériques.

4.4.1 Modèle mathématique CCR

Le modèle CCR vise à obtenir, pour une DMU donnée, les poids associés à chaque input et chaque output qui permettent de maximiser son efficience. Pour chaque DMU j , on connaît les valeurs, x_{mj} , de chaque input m et les valeurs y_{nj} de chaque output n . Un problème par DMU, la DMU 0, devra donc être résolu. Le modèle mathématique CCR

fractionnaire prend en considération les paramètres et variables suivants. La même notation est utilisée pour le modèle BCC.

Paramètres :

J : nombre de DMUs

M : nombre d'inputs

N : nombre d'outputs

x_{mj} : valeur de l'input m pour la DMU j , $m = 1, \dots, M$ et $j = 1, \dots, J$

y_{nj} : valeur de l'output n pour la DMU j , $n = 1, \dots, N$ et $j = 1, \dots, J$

Remarque : x_{m0} et y_{n0} représentent, respectivement, les valeurs de l'input m et de l'output n pour la DMU évaluée, notée DMU 0.

Variables :

v_m : poids de l'input m , $m = 1, \dots, M$

μ_n : poids de l'output n , $n = 1, \dots, N$

Le modèle mathématique CCR est donné par (4.3) à (4.6).

$$\max \frac{\mu_1 y_{10} + \mu_2 y_{20} + \dots + \mu_N y_{N0}}{v_1 x_{10} + v_2 x_{20} + \dots + v_M x_{M0}} \quad (4.3)$$

$$\frac{\mu_1 y_{1j} + \mu_2 y_{2j} + \dots + \mu_N y_{Nj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_M x_{Mj}} \leq 1 \quad (j = 1, \dots, J) \quad (4.4)$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N \geq 0 \quad (4.5)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_M \geq 0 \quad (4.6)$$

La fonction objectif (4.3) est le ratio de la somme pondérée des outputs sur la somme pondérée des inputs qui doit être maximisé pour chaque DMU. Elle mesure l'efficience de la DMU 0 qui, par la contrainte 4.4, sera au plus égale à 1. Enfin, les contraintes 4.5 et 4.6 expriment les contraintes de non-négativité pour les poids des inputs et des outputs.

4.4.2 Modèle CCR linéaire

Le modèle CCR n'est pas linéaire. La fonction objectif 4.3 est linéarisée en posant $v_1x_{10} + v_2x_{20} + \dots + v_mx_{m0} = 1$. La contrainte 4.4 est linéarisée en multipliant chaque côté de l'inéquation par $v_1x_{1j} + v_2x_{2j} + \dots + v_mx_{mj}$. Le modèle linéarisé (4.7) – (4.11) est équivalent au modèle (4.3) - (4.6) (Cooper et al. (2007)).

CCR linéaire, CCRL:

$$\max \mu_1y_{1o} + \mu_2y_{2o} + \dots + \mu_Ny_{No} \quad (4.7)$$

$$v_1x_{1o} + v_2x_{2o} + \dots + v_Mx_{Mo} = 1 \quad (4.8)$$

$$\mu_1y_{1j} + \mu_2y_{2j} + \dots + \mu_Ny_{Nj} \leq v_1x_{1j} + v_2x_{2j} + \dots + v_Mx_{Mj} \quad (j = 1, \dots, J) \quad (4.9)$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N \geq 0 \quad (4.10)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_M \geq 0 \quad (4.11)$$

L'efficience avec le modèle CCRL sera appelée *efficiency CCR* (Cooper et al., 2007).

Définition 5. Efficience CCR : La DMU 0 est efficiente si la valeur de la fonction objectif de CCRL à l'optimum est égale à 1 et il existe au moins une solution optimale pour laquelle $\mu > 0$ et $v > 0$. Sinon, la DMU 0 est inefficiente.

4.4.3 Modèle CCRL dual

Le problème dual du CCRL comprend moins de contraintes que son problème primal. Il est ainsi plus rapide à résoudre. Le modèle linéaire primal a autant de contraintes que de DMUs, alors que le nombre de contraintes du modèle dual est équivalent au nombre d'inputs et d'outputs, qui est généralement plus petit que le nombre de DMUs.

Le CCRL peut être représenté de façon matricielle par les expressions 4.12 à 4.16, où μ et v représentent les variables associées aux poids des outputs et des inputs respectivement. x_0 et y_0 représentent la matrice des valeurs des inputs et des outputs

pour la DMU 0, et X et Y sont les matrices des valeurs des inputs et des outputs pour toutes les DMUs.

$$\max \mu y_0 \quad (4.12)$$

$$v x_o = 1 \quad (4.13)$$

$$-vX + \mu Y \leq 0 \quad (4.14)$$

$$v \geq 0 \quad (4.15)$$

$$\mu \geq 0 \quad (4.16)$$

Le problème dual du problème CCRL, considéré comme un modèle orienté input et noté CCRLD_input, est donné par les expressions 4.17 à 4.20 (Cooper *et al.*, 2007).

CCRLD_input :

$$\min \theta \quad (4.17)$$

$$\theta x_o - \lambda X \geq 0 \quad (4.18)$$

$$\lambda Y \geq y_0 \quad (4.19)$$

$$\lambda \geq 0, \theta \text{ sans restriction} \quad (4.20)$$

θ est la variable duale associée à la contrainte 4.13 et λ est la variable duale associée à la contrainte 4.14. Une variable λ_i est définie pour chaque DMU i , $i = 1, \dots, J$.

La valeur optimale θ^* de CCRLD_input est égale à la valeur optimale de CCRL. L'efficience sera donc mesurée par la valeur de θ^* .

Il importe de rappeler que la résolution des problèmes CCR pour chaque DMU permet, entre autres, de déterminer les DMUs efficientes et, par conséquent, ce qu'on appelle l'ensemble de référence de chaque DMU. Pour chaque DMU, il faut se référer à son ensemble de référence pour déterminer les possibilités d'améliorations.

Définition 6. Ensemble de référence (CCRLD_input) : L'ensemble de référence d'une DMU CCR-inefficiente est constitué des DMUs efficientes qui sont celles pour lesquelles les contraintes 4.18 et 4.19 sont satisfaites à égalité et $\theta^* = 1$. L'ensemble de référence inclut alors les DMUs dont le poids $\lambda_j^* > 0$.

Le poids (λ) d'une DMU faisant partie de l'ensemble de référence représente à quel point cette dernière a un impact sur l'efficience de la DMU 0 (ou contribue à l'inefficience de la DMU 0). Plus le poids λ d'une DMU de l'ensemble de référence est élevé, plus cette DMU affecte l'efficience de la DMU 0.

4.4.4 Modèle CCR orienté output

Pour obtenir un modèle CCR orienté output, il est nécessaire d'apporter des modifications au modèle CCRLD_input.

Le modèle CCRLD_input est modifié en posant $\theta = \frac{1}{\eta}$, $\lambda = u/\eta$ et en considérant que minimiser $1/\eta$ est équivalent à maximiser η . On obtient alors le modèle défini par les expressions 4.21 - 4.24.

$$\max \eta \quad (4.21)$$

$$\frac{1}{\eta} x_o - X \frac{u}{\eta} \geq 0 \quad (4.22)$$

$$Y \frac{u}{\eta} \geq y_0 \quad (4.23)$$

$$u \geq 0, \eta \text{ sans restriction} \quad (4.24)$$

En multipliant 4.22 et 4.23 par η , on obtient le modèle CCRLD_output (Cooper *et al.*, 2007).

CCRLD_output :

$$\eta^* = \max \eta \quad (4.25)$$

$$x_o - Xu \geq 0 \quad (4.26)$$

$$Yu \geq \eta y_0 \quad (4.27)$$

$$\mu \geq 0, \eta \text{ sans restriction} \quad (4.28)$$

C'est le modèle CCRLD_output qui a été utilisé afin d'évaluer l'efficience des DMUs.

4.5 Modèle BCC

Le modèle BCC mesure l'efficience de la DMU différemment du modèle CCR puisqu'il prend en considération des rendements d'échelle variables et le modèle CCR des rendements d'échelle constants. La frontière efficiente et, par conséquent, l'efficience sont déterminées de façon différente dans le modèle BCC par rapport au modèle CCR.

La figure 4.5 illustre certaines différences entre le modèle CCR (en rouge) et le modèle BCC (en noir) pour un exemple avec un input et un output (Cooper *et al.*, 2007). La frontière efficiente du modèle BCC englobe les points A, B et C alors que celle du modèle CCR ne comprend que le point B. Ainsi, A, B et C sont efficents selon le modèle BCC alors que seulement B l'est selon le modèle CCR.

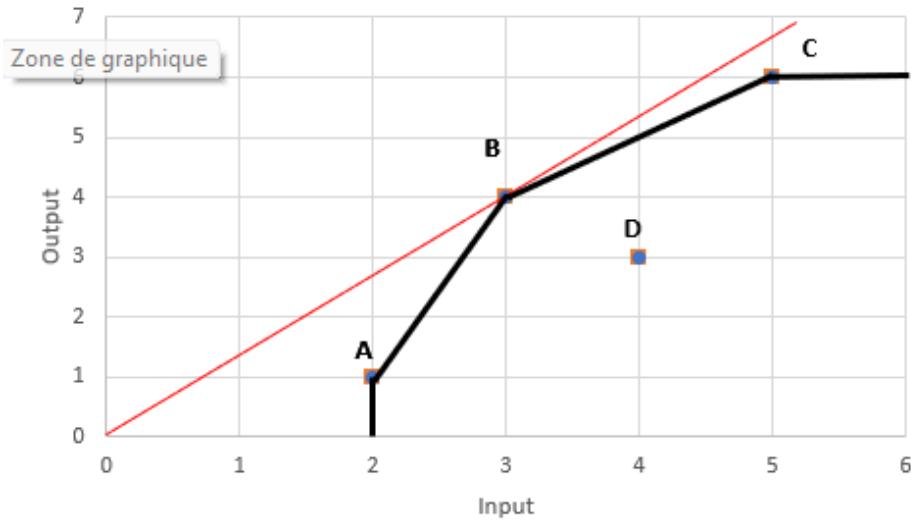


Figure 4.5 : Illustration du modèle BCC

Le segment de droite AB représente un rendement d'échelle croissant par rapport à la frontière efficiente, alors que le segment de droite BC représente un rendement d'échelle décroissant. Le rendement d'échelle est croissant si, lorsque les valeurs des inputs sont augmentées d'un facteur k, les valeurs des outputs sont alors augmentées d'un facteur plus élevé que k. Le rendement d'échelle est décroissant, si les valeurs des outputs augmentent d'un facteur plus faible que k lorsque les valeurs des inputs sont augmentées d'un facteur k. Dans la figure 4.5, on constate qu'entre les points A et B, l'augmentation de l'input (de 2 à 3 soit un facteur de 1,5) a pour conséquence une augmentation de l'output plus élevée (de 1 à 4 soit un facteur de 4), alors qu'entre les points B et C, l'augmentation de l'input (de 3 à 5 soit un facteur de 1,67) a pour conséquence une augmentation plus faible de l'output (de 4 à 6 soit un facteur de 1,5).

L'ensemble des points sur et sous la frontière efficiente (ensemble des possibilités de production) dans le modèle BCC est convexe (Banker *et al.* (1984)).

Afin de s'assurer que l'ensemble des possibilités de production demeure convexe, la contrainte $\sum \lambda = 1$ est ajoutée au modèle CCRLD_output pour obtenir le modèle BCC_output.

BCC_output :

$$\eta_B^* = \max \eta_B \quad (4.29)$$

$$x_0 - \lambda X \geq 0 \quad (4.30)$$

$$\lambda Y \geq \eta_B y_0 \quad (4.31)$$

$$\lambda \geq 0 \text{ et } \eta_B \text{ quelconque} \quad (4.32)$$

$$\sum \lambda = 1 \quad (4.33)$$

Définition 7. Efficience BCC : La DMU 0 est dite efficiente si la fonction objectif (η_B) de BCC output est égale à 1 à l'optimum et qu'il existe au moins une solution optimale pour laquelle les contraintes 4.30 et 4.31 sont satisfaites à égalité. (Cooper *et al.*, 2007)

Définition 6. Ensemble de référence (BCC output) : L'ensemble de référence d'une DMU BCC-inefficiente comprend les DMUs dont le poids à l'optimum $\lambda_j^* > 0$.

Les problèmes CCRLD_output et BCC_output sont résolus pour identifier les navires efficents étant donné que le premier considère un rendement d'échelle constant et le second un rendement d'échelle variable. La comparaison des solutions optimales des deux problèmes permettra une analyse plus complète de leurs navires efficents respectifs afin de déterminer leurs caractéristiques. Le chapitre 5 présente les tests permettant de déterminer les DMUs, inputs et outputs qui seront utilisés ainsi que les résultats obtenus à l'aide des problèmes CCRLD_output et BCC_output.

Chapitre 5. Tests et résultats

Ce chapitre présente le choix des DMUs et les inputs et outputs retenus à la suite de la résolution de plusieurs problèmes de type CCR.

Par la suite, les problèmes CCRLD_output et BCC_output sont résolus avec 2 inputs et un output ainsi qu'avec 3 inputs et un output afin d'identifier les navires efficients et leurs caractéristiques.

5.1 Choix des DMUs, inputs et outputs

5.1.1 DMUs

À notre connaissance, il n'existe pas d'étude utilisant le DEA dans un seul port afin de comparer l'efficience des activités portuaires pour les navires. Une seule étude (Li *et al.*, 2022) a été réalisée en considérant les manutentionnaires comme DMU. Puisque le port de Trois-Rivières ne compte que quatre manutentionnaires, les utiliser comme DMU n'est pas approprié, considérant qu'il devrait y avoir trois fois plus de DMUs que d'inputs et d'outputs, et que notre étude comptera au moins un input et un output (Wanke et Barros, 2015).

Les DMUs retenus dans ce mémoire sont les navires transportant du concentré de cuivre, de nickel et de zinc. Ces trois produits sont similaires, car ce sont tous des concentrés de minerai. Leur méthode de manutention est généralement la même. Ces trois produits sont ceux pour lesquels le plus de données étaient disponibles. Les navires étudiés ont accosté au port de Trois-Rivières en 2019, 2020 ou 2023 (les données n'étaient pas disponibles pour 2021 et 2022). Un total de 27 navires a été retenu, ce qui correspond à 27 DMUs.

5.1.2 Inputs et outputs

Le tableau 5.1 présente les 7 inputs et 3 outputs qui ont été identifiées au départ. Ces différents inputs ont été choisis à partir de discussions avec des intervenants de l'APTR

ainsi qu'à la suite de l'étude préliminaire (Bournival, 2022) réalisée au port de Trois-Rivières sur les activités de (dé)chargement des navires à quai. Notons que *le temps à quai* est considéré comme un input bien qu'il soit en fait un output, quoiqu'indésirable. Puisqu'on souhaite réduire la valeur de cet output plutôt que l'augmenter, il peut être ajouté aux inputs, dans un tel cas. Les outputs ont été choisis à partir des informations contenues dans les SOF et parmi les plus fréquemment étudiés dans la littérature.

Tableau 5.1 : Inputs et outputs de départ

Inputs	Outputs
Temps arrêt avec équipes (h)	Tonnage total (dé)chargé par navire
Temps d'arrêt en raison des bris (h)	Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement
Nombre total de grues	Tonnage (dé)chargé par heure à quai
Nombre moyen d'équipes de débardeurs	
Temps d'arrêt en raison du mauvais temps (h)	
Nombre de camions circulant sur le quai	
Temps à quai (h) (output indésirable)	

Le tableau 5.2 présente les 11 combinaisons d'inputs et outputs qui ont été testées afin de déterminer les inputs et les outputs pertinents pour cette étude. Par exemple, la combinaison 1 comprend les inputs *temps en raison des bris, nombre total de grues, nombre moyen d'équipes de débardeurs* et *temps à quai* et l'output *tonnage par heure de déchargement*. Le modèle DEA de base, CCRL, a été utilisé pour résoudre les onze problèmes (un par combinaison). Les problèmes ont été résolus à l'aide du solveur d'Excel.

Tableau 5.2 : 11 combinaisons d'inputs et outputs

	Combinaison										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Input											
Temps arrêt avec équipes (h)									X	X	X
Temps d'arrêt en raison des bris (h)	X	X	X	X	X	X	X	X			
Nombre total de grues	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Nombre moyen d'équipes de débardeurs	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Temps d'arrêt en raison du mauvais temps (h)			X			X	X				
Nombre de camions circulant sur le quai				X	X		X				
Temps à quai (h) (output indésirable)	X	X	X	X							
Output											
Tonnage total (dé)chargé par navire			X								
Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement	X	X	X	X	X	X	X			X	X
Tonnage (dé)chargé par heure à quai					X	X	X	X	X	X	

Le tableau 5.3 présente les numéros des navires efficents pour chacune des combinaisons, soit les navires pour lesquels la valeur de la fonction objectif de CCRL à l'optimum est égale à 1 et qu'une des solutions optimales est telle que les variables sont strictement supérieures à 0.

Tableau 5.3 : Navires efficents – CCRL

Navires efficents	Combinaison											Nombre total de combinaisons
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
26	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		10
2	X	X	X	X	X	X	X			X	X	9
9	X	X	X	X	X	X	X			X		8
17	X	X	X	X	X	X	X			X		8
4	X	X	X	X	X							5
24				X	X							2
6		X										1
21		X										1
22		X										1
25		X										1

Les navires 2, 9, 17 et 26 ressortent comme étant efficents dans le plus grand nombre de combinaisons (combinaisons 1 à 7 et 10 pour les 4 navires auxquelles s'ajoutent les combinaisons 8 à 9 et 11, selon le cas). L'output commun à ces combinaisons est *tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement*. Cet input ne représente que le temps à valeur ajouté du séjour du navire au port. Ainsi, l'output *tonnage (dé)chargé par heure à quai* a été choisi en output, car il permet de déterminer l'influence des inputs sur le séjour entier du navire.

Les inputs communs aux 7 premières combinaisons sont *temps d'arrêt en raison des bris*, *nombre total de grues* et *nombre d'équipes de débardeurs*. L'input *temps d'arrêt avec équipes* est inclus dans les combinaisons 9 et 10 au lieu de *temps d'arrêt en raison des bris*. Le *temps d'arrêt en raison des bris* est habituellement inclus dans le *temps d'arrêt avec équipes* puisque les bris se produisent généralement lorsque les équipes de débardeurs sont présentes. Notons aussi que les *temps d'arrêt en raison du mauvais*

temps et tous les temps d'arrêt où une équipe est présente sont inclus dans le *temps d'arrêt avec équipe*; il est donc plus complet. Par conséquent, bien que l'input *temps d'arrêt avec équipes* n'est pas présent de façon explicite dans les combinaisons 1 à 7, il a été retenu comme troisième input.

Les inputs retenus sont :

A : Nombre moyen d'équipes de débardeurs

B : Nombre total de grues

C : Temps d'arrêt avec équipes

Le *nombre moyen d'équipes de débardeurs* est choisi pour représenter le nombre de travailleurs. Le *nombre total de grues* est aussi un input utilisé par plusieurs auteurs (Fancello *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2022; Zahran *et al.*, 2020). Le *nombre moyen d'équipes de débardeurs* et le *nombre total de grues* sont des ressources essentielles pour (dé)charger les navires.

Le *temps d'arrêt avec équipes*, bien que n'étant pas une ressource pour les navires, peut avoir un impact sur leur efficience.

L'output *tonnage (dé)chargé par heure à quai* peut avoir un impact plus direct sur la durée du séjour à quai d'un navire et il permettra d'évaluer comment les inputs influencent la vitesse de (dé)chargement sur la durée entière du séjour du navire à quai.

Le choix des trois inputs et de l'output correspond à la combinaison 9.

Les données utilisées pour réaliser les tests numériques ont été extraites des SOF (tableau A1.1 de l'annexe 1) et sont présentées dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Données sur les inputs et output des 27 navires

Navire	Données			Output Tonnage (dé)chargé par heure à quai
	A Nombre moyen d'équipes de débardeurs	B Nombre de grues total	C Temps d'arrêt avec équipes (h)	
1	1,625	2	5,75	298,66
2	1,000	1	0	90,53
3	1,731	2	6	66,82
4	1,701	2	1	249,66
5	1,868	2	1,75	187,41
6	1,000	1	9	144,98
7	1,000	2	1,75	166,51
8	1,000	1	1,50	75,73
9	1,000	2	0,25	210,72
10	1,742	2	5,92	149,99
11	1,000	1	31,67	34,06
12	1,732	2	36,75	95,38
13	2,337	3	20,17	248,07
14	1,000	1	2,25	145,48
15	2,000	2	27,50	145,46
16	1,000	2	22,92	95,66
17	1,000	1	0,75	157,84
18	1,443	3	29,50	81,32
19	1,784	2	17,50	116,69
20	1,915	4	0	186,61
21	1,849	2	26,83	165,70
22	2,406	3	0	233,78
23	1,361	2	0	166,71
24	1,509	2	1,25	164,67
25	1,643	3	5,50	335,10
26	1,646	2	0	382,18
27	1,746	2	0	353,85

5.2 Résultats et analyse

Le DEA (CCR ou BCC) orienté output vise à maximiser les outputs tout en conservant la même quantité d'inputs. Afin d'identifier les navires efficients et la robustesse des résultats, quatre problèmes DEA, autres que le CCRL utilisé pour les 11 combinaisons,

sont testés : deux modèles CCR orientés output, l'un avec les 3 inputs et l'autre sans l'input temps *d'arrêt avec équipe* et deux modèles BCC orientés output avec les mêmes combinaisons d'inputs.

Les quatre problèmes DEA testés sont donc :

- 1) CCR orienté output (CCRLD_output) avec 2 inputs (A et B) et un output
- 2) CCR orienté output (CCRLD_output) avec 3 inputs (A, B et C) et un output
- 3) BCC orienté output (BCC_output) avec 2 inputs (A et B) et un output
- 4) BCC orienté output (BCC_output) avec 3 inputs (A, B et C) et un output

Les quatre problèmes sont résolus pour chacun des 27 navires à l'aide du solveur d'Excel. Un problème par navire est résolu, pour un total de 108 problèmes. La résolution de ces problèmes permettra d'identifier les navires efficients.

Pour les deux modèles (CCRLD_output et BCC_output), l'efficience d'un navire (DMU) est la valeur de la fonction objectif à l'optimum. Rappelons que pour le modèle CCRLD_output, la valeur optimale est η^* et l'efficience $\theta = 1/\eta^*$. Pour le modèle BCC_output, la valeur optimale est η_B^* et l'efficience $\theta = 1/\eta_B^*$. L'efficience d'un navire peut donc différer selon le problème CCR ou BCC. Pour les deux problèmes, les navires efficients sont ceux pour lesquels leur θ respectif est égal à 1. Il est donc possible que les navires efficients ne soient pas les mêmes pour les deux problèmes, CCR et BCC.

Le tableau 5.5 présente l'efficience des 27 navires. Les navires efficients (2, 9, 17 et 26) sont en jaune. Nous avons également identifié les navires presque efficients. Le critère retenu pour qu'un navire soit presque efficient est que son efficience soit supérieure ou égale à 0,75. Ils sont représentés en bleu dans le tableau 5.5. Cette valeur de 0,75, pour qualifier un navire de presque efficient, a été choisie en fonction des résultats du tableau 5.5 et afin de vérifier leur influence sur les ensembles de référence. Il va de soi que cette valeur aurait pu être différente mais elle nous apparaît raisonnable.

Tableau 5.5 : Efficience des navires en fonction des problèmes

Navires	Efficience			
	Inputs A et B		Inputs A, B et C	
	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,792	0,793	0,792	0,793
2	0,474	0,574	0,474	1,000
3	0,175	0,175	0,175	0,175
4	0,653	0,653	0,653	0,653
5	0,490	0,490	0,490	0,490
6	0,759	0,919	0,759	0,919
7	0,717	0,790	0,717	0,790
8	0,396	0,480	0,396	0,480
9	0,908	1,000	0,908	1,000
10	0,392	0,392	0,392	0,392
11	0,178	0,216	0,178	0,216
12	0,250	0,250	0,250	0,250
13	0,457	0,649	0,457	0,649
14	0,761	0,922	0,761	0,922
15	0,381	0,381	0,381	0,381
16	0,412	0,454	0,412	0,454
17	0,826	1,000	0,826	1,000
18	0,243	0,248	0,243	0,248
19	0,305	0,305	0,305	0,305
20	0,420	0,488	0,420	0,488
21	0,434	0,434	0,434	0,434
22	0,419	0,612	0,419	0,612
23	0,528	0,544	0,528	0,657
24	0,470	0,476	0,470	0,476
25	0,878	0,878	0,878	0,878
26	1,000	1,000	1,000	1,000
27	0,926	0,926	0,926	0,926
Total navires efficents et presque efficents	8	9	8	10

Rappelons qu'un navire est considéré efficient lorsque son efficience est égale à 1. Seul le navire 26 est efficient pour les quatre problèmes. Les résultats pour les combinaisons CCR à 2 et 3 inputs sont les mêmes. Pour le problème BCC, on retrouve plus de navires efficents comme on pouvait s'y attendre considérant comment la frontière efficiente est définie. Pour le BCC à 2 et à 3 inputs, les navires 9 et 17 s'ajoutent au navire 26 comme étant efficents. L'efficience assez élevée des navires 9 et 17 pour les problèmes CCR, respectivement de 0,908 et 0,826, les rend presque efficents, alors qu'ils sont efficents

pour les problèmes BCC. L'input *temps d'arrêt avec équipes* n'a permis d'ajouter qu'un navire efficient, le 2, pour le problème BCC seulement. Le navire 2 est le seul navire efficient dans au moins l'un des quatre problèmes qui n'est pas presque efficient pour les autres problèmes. L'input *temps d'arrêt avec équipe* pourrait exercer une influence sur l'efficience de ce navire. Les navires 1, 6, 14, 25 et 27 sont presque efficents dans tous les modèles alors que le navire 7 ne l'est que pour les problèmes BCC, ce qui peut résulter du choix du critère *presque efficient* des navires.

5.2.1 Efficience en fonction des inputs et des outputs

L'analyse des inputs et des outputs permet de déterminer leur impact sur l'efficience des navires.

L'efficience des navires a été représentée en fonction de chacun des trois inputs : *nombre moyen d'équipes de débardeurs*, *nombre total de grues* et *temps d'arrêt avec équipes* pour le problème CCR à 2 et à 3 inputs dans les figures 5.1 à 5.3. Les numéros des navires efficents et presque efficents sont identifiés sur les figures. Pour les problèmes BCC, les graphiques sont similaires et se retrouvent à l'annexe 3.

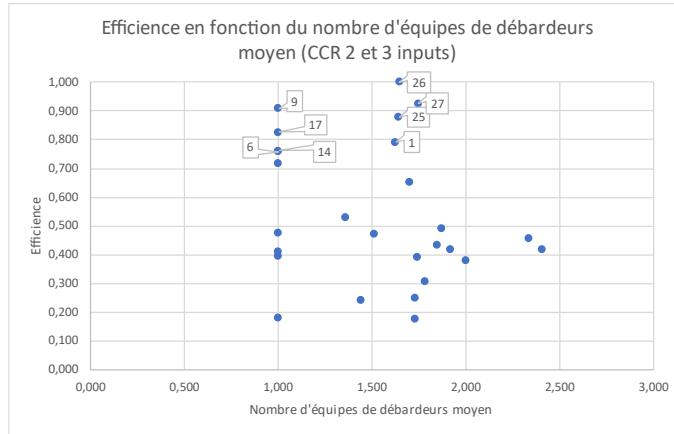


Figure 5.1 : Efficiency en fonction du nombre d'équipes moyen

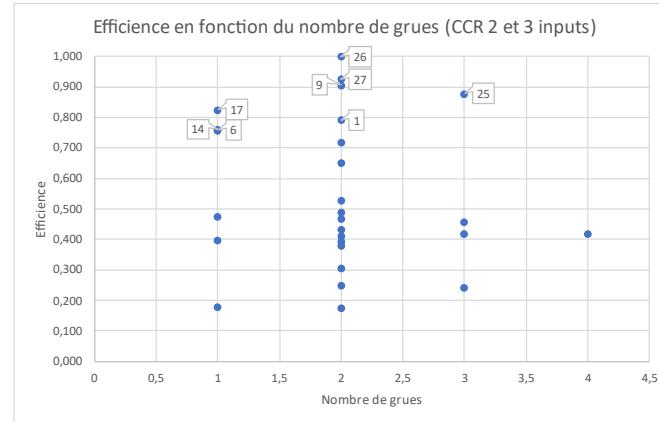


Figure 5.2 : Efficiency en fonction du nombre de grues

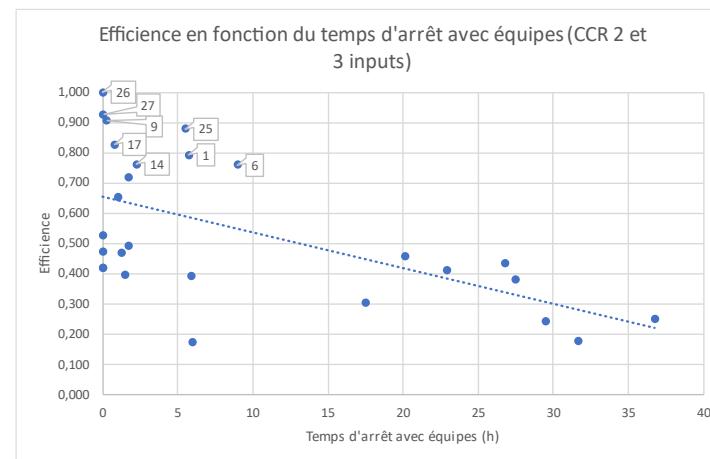


Figure 5.3 : Efficiency en fonction du temps arrêt avec équipes

Les figures 5.1 et 5.2 indiquent que l'efficience des navires n'est pas reliée au nombre moyen d'équipes de débardeurs, ni au nombre total de grues. Les équipes de débardeurs et les grues sont toutefois des ressources utilisées par le navire. La faible variabilité dans les valeurs de ces deux inputs peut expliquer qu'il n'ait pas été possible de constater leur possible effet sur l'efficience des navires.

Le figure 5.3 permet de constater qu'en général, plus le temps d'arrêt avec équipes est élevé, plus l'efficience est faible. Cependant, le temps d'arrêt avec équipes n'a que très peu d'impact sur le nombre de navires efficients dans les problèmes CCR et BCC à 3 inputs (tableau 5.5), les résultats étant similaires pour les problèmes à 2 et 3 inputs. En effet, seul le navire 2 est efficient lorsque l'input temps d'arrêt avec équipes est pris en considération pour le BCC à 3 inputs.

L'efficience en fonction de l'output *tonnage (dé)chargé par heure à quai* est présenté seulement pour le modèle BCC à 3 inputs qui est le modèle ayant obtenu le plus grand nombre de navires efficients (figure 5.4). Notons cependant que les tendances sont similaires pour les problèmes CCR à 2 et 3 inputs et BCC à 2 inputs (annexe 3).

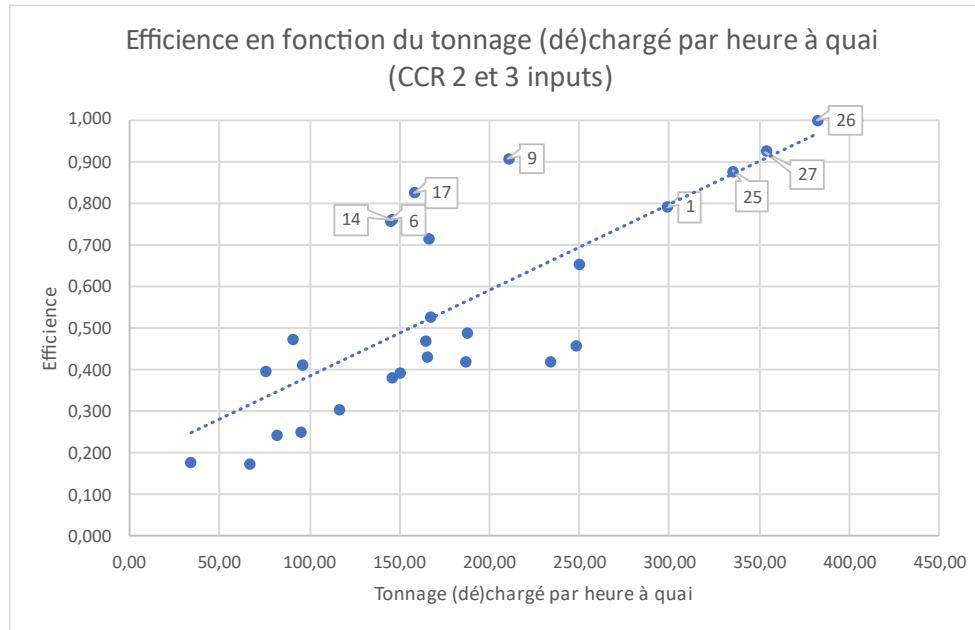


Figure 5.4 : Efficiency en fonction du tonnage (dé)chargé par heure à quai (BCC 3 inputs)

La figure 5.4 indique qu'en général, plus le tonnage (dé)chargé par heure à quai d'un navire est élevé, plus son efficiency est élevée. Cet output a donc un impact certain sur l'efficiency des navires.

Le tableau 5.6 présente les valeurs des coefficients de corrélation entre l'efficiency pour les 4 modèles (CCR 2 et 3 inputs sont regroupées) et chaque input et output.

Tableau 5.6 : Coefficients de corrélation entre l'efficiency et les inputs/outputs

Combinaison	Input			Output
	A	B	C	
CCR	-0,23	-0,12	-0,59	0,76
BCC 2 inputs	-0,25	-0,15	-0,60	0,69
BCC 3 inputs	-0,32	-0,22	-0,63	0,60

Les inputs A (débardeurs) et B (grues) ne sont pas fortement corrélés avec l'efficiency, il n'y a donc pas de relation entre ces inputs et l'efficiency. L'input C, *temps d'arrêt avec équipes*, est celui avec le coefficient de corrélation le moins élevé et le plus près de -1,

pour les 4 combinaisons. La valeur du coefficient de corrélation pour cet input indique qu'il existe une relation négative entre l'efficience et le *temps d'arrêt avec équipe*. Les coefficients de corrélation entre l'output *tonnage (dé)chargé par heure à quai* et l'efficience sont plus proches de 1 que ceux entre l'efficience et les inputs ne le sont de -1, pour toutes les combinaisons, à l'exception du BCC 3 inputs. La corrélation positive est donc plus forte entre l'output et l'efficience que la corrélation négative entre chaque input et l'efficience, sauf pour la combinaison BCC 3 inputs. Ces résultats sont cohérents avec les observations faites aux figures 5.1 à 5.4, qui indiquaient que les inputs A et B ne semblaient pas être corrélés avec l'efficience, mais qu'il y a une relation entre l'input C et l'efficience, de même pour l'output et l'efficience. Notons aussi que l'augmentation des inputs tend à faire diminuer l'efficience, alors que l'augmentation des outputs tend à la faire augmenter, ce qui est concordant avec les résultats obtenus.

5.2.2 Les ensembles de référence

Les ensembles de référence des navires sont aussi analysés. Les ensembles de référence permettent de déterminer les navires pouvant servir de modèles pour les navires étudiés.

Les ensembles de référence ainsi que les valeurs de leurs poids λ pour leurs navires sont présentés au tableau 5.7. Rappelons que les navires efficaces sont représentés en jaune, alors que les navires presque efficaces sont en bleu.

Tableau 5.7 : Ensembles de référence

Navire	Inputs A et B						Inputs A, B et C					
	CCR			BCC			CCR			BCC		
	Efficience	Ensemble de référence		Efficience	Ensemble de référence		Efficience	Ensemble de référence		Efficience	Ensemble de référence	
		θ	Navires	λ	θ	Navires	λ	θ	Navires	λ	θ	Navires
1	0,792	26	0,987	0,793	9, 26	0,033 ; 0,967	0,792	26	0,987	0,793	9, 26	0,033 ; 0,967
2	0,474	26	0,5	0,574	17	1	0,474	26	0,5	1,000	2	1
3	0,175	26	1	0,175	26	1	0,175	26	1	0,175	26	1
4	0,653	26	1	0,653	26	1	0,653	26	1	0,653	26	1
5	0,490	26	1	0,490	26	1	0,490	26	1	0,490	26	1
6	0,759	26	0,5	0,919	17	1	0,759	26	0,5	0,919	17	1
7	0,717	26	0,607	0,790	9	1	0,717	26	0,607	0,790	9	1
8	0,396	26	0,5	0,480	17	1	0,396	26	0,5	0,480	17	1
9	0,908	26	0,607	1,000	9	1	0,908	26	0,607	1,000	9	1
10	0,392	26	1	0,392	26	1	0,392	26	1	0,392	26	1
11	0,178	26	0,5	0,216	17	1	0,178	26	0,5	0,216	17	1
12	0,250	26	1	0,250	26	1	0,250	26	1	0,250	26	1
13	0,457	26	1,42	0,649	26	1	0,457	26	1,42	0,649	26	1
14	0,761	26	0,5	0,922	17	1	0,761	26	0,5	0,922	17	1
15	0,381	26	1	0,381	26	1	0,381	26	1	0,381	26	1
16	0,412	26	0,607	0,454	9	1	0,412	26	0,607	0,454	9	1
17	0,826	26	0,5	1,000	17	1	0,826	26	0,5	1,000	17	1
18	0,243	26	0,877	0,248	9, 26	0,314 ; 0,686	0,243	26	0,877	0,248	9, 26	0,314 ; 0,686
19	0,305	26	1	0,305	26	1	0,305	26	1	0,305	26	1
20	0,420	26	1,163	0,488	26	1	0,420	26	1,163	0,488	26	1
21	0,434	26	1	0,434	26	1	0,434	26	1	0,434	26	1
22	0,419	26	1,462	0,612	26	1	0,419	26	1,462	0,612	26	1
23	0,528	26	0,827	0,544	9, 26	0,441 ; 0,559	0,528	26	0,827	0,657	2, 26	0,441 ; 0,559
24	0,470	26	0,917	0,476	9, 26	0,213 ; 0,787	0,470	26	0,917	0,476	9, 26	0,213 ; 0,787
25	0,878	26	0,998	0,878	9, 26	0,004 ; 0,996	0,878	26	0,998	0,878	9, 26	0,004 ; 0,996
26	1,000	26	1	1,000	26	1	1,000	26	1	1,000	9	1
27	0,926	26	1	0,926	26	1	0,926	26	1	0,926	26	1

Seuls des navires efficients peuvent être dans les ensembles de référence.

Le navire 26 est le seul navire de l'ensemble de référence de chacun des autres navires pour les problèmes CCR à 2 et à 3 inputs. L'ajout de l'input *temps d'arrêt avec équipes* n'a donc pas eu d'impact sur la composition des ensembles de référence pour ce problème.

Le navire 26 se retrouve dans l'ensemble de référence de 18 navires sur 27, pour les problèmes BCC à 2 et à 3 inputs. Le navire 9 se retrouve dans l'ensemble de référence de 8 navires pour le problème BCC à 2 inputs et de 7 navires pour le problème BCC à 3 inputs, alors que le navire 17 se retrouve dans l'ensemble de référence de 6 navires pour le problème BCC à 2 inputs et de 5 navires pour le problème BCC à 3 inputs. Le navire 2 ne se retrouve que dans l'ensemble de référence de deux navires dans le problème BCC à 3 inputs.

De tous les navires, le navire 26 ressort comme étant la référence pour la majorité des navires. Mais, de façon générale, les navires efficients des ensembles de référence peuvent servir de modèles aux autres navires. Il importe donc de vérifier quelles caractéristiques rendent les navires efficients. Cependant, les navires presque efficients peuvent également présenter des caractéristiques pouvant servir de guide pour les autres navires.

5.2.3 Caractéristiques des navires efficients et presque efficients

La problématique de ce mémoire consiste à identifier les navires efficients et faire ressortir leurs caractéristiques afin d'émettre des recommandations permettant de réduire le temps à quai des navires. Il nous a semblé également pertinent, à cet égard, d'analyser les caractéristiques des navires presque efficients.

Le tableau 5.8 présente les caractéristiques des navires efficients (et, par conséquent, faisant partie des ensembles de référence) 2, 9, 17 et 26 (en jaune) dans au moins un des quatre problèmes testés et des navires presque efficients 1, 6, 7, 14, 25 et 27 (en bleu)

dont l'efficience est supérieure à 0,75. Dans la colonne Produit, C représente le cuivre, N le nickel et Z, le zinc. Dans la colonne Opération, D est pour déchargement et C pour chargement. Le tonnage est la quantité du produit transportée par le navire. La 4^e caractéristique indique si le navire était à quai durant au moins une fin de semaine ou pas.

Tableau 5.8 : Caractéristiques des navires efficents et presque efficents

Navire	Caractéristiques					
	Produit	Opération	Tonnage	Fin de semaine à quai	Temps à quai (h)	Temps arrêt sans équipage et autres temps d'arrêt (h)
1	C	D	11498	Non	38,50	0
2	C	C	7178	Oui	79,28	60,37
6	C	C	11302	Non	77,95	37,95
7	C	C	11337	Non	68,08	33,33
9	C	C	10293	Non	48,85	15,35
14	C	C	9796	Oui	67,33	38,08
17	N	C	10536	Oui	66,75	39,08
25	Z	D	22440	Non	66,97	14,88
26	Z	D	11771	Non	30,80	6,30
27	Z	D	11040	Non	31,20	9,28

Les caractéristiques des navires du tableau 5.8 sont analysées afin de déterminer si une relation peut être observée entre elles et l'efficience.

5.2.3.1 Type de produits

Le tableau 5.9 présente le nombre de navires efficents et presque efficents en fonction du type de concentré de minerai.

Tableau 5.9 : Nombre de navires efficents et presque efficents selon le produit

Concentré de minerai	Nombre de navires efficents et presque efficents				
	Nombre de navires	CCR 2 inputs	BCC 2 inputs	CCR 3 inputs	BCC 3 inputs
Cuivre	15	4	5	4	6
Nickel	4	1	1	1	1
Zinc	8	3	3	3	3
Total	8	9	8	10	

37,5% (3/8) des navires transportant du zinc sont efficents ou presque efficents. Ce pourcentage est supérieur à celui du nickel, 25% (1/4). Cependant, un seul des quatre navires efficents, le navire 26, transportait du concentré de zinc. Ce pourcentage varie de 27% à 40% pour le cuivre, selon le problème. Il est donc difficile d'identifier un produit qui aurait une influence marquée sur le nombre de navires presque efficents.

5.2.3.2 Type d'opération

Le tableau 5.10 présente le nombre de navires efficents et presque efficents selon le type d'opération (chargement ou déchargement de la cargaison).

Tableau 5.10 : Nombre de navires efficents et presque efficents selon l'opération

Type d'opération	Nombre de navires	Nombre de navires efficents et presque efficents			
		CCR 2 inputs	BCC 2 inputs	CCR 3 inputs	BCC 3 inputs
Chargement	13	4	5	4	6
Déchargement	14	4	4	4	4
Total		8	9	8	10

Pour les problèmes BCC à 2 et à 3 inputs, le nombre de navires efficents et presque efficents est légèrement plus grand si le type d'opération est le chargement. Pour les problèmes CCR, le type d'opération n'a pas d'impact. Le type d'opération ne semble donc pas avoir d'impact sur le nombre de navires efficents et presque efficents.

5.2.3.3 Tonnage

La figure 5.5 présente l'efficience en fonction du tonnage total (dé)chargé pour le problème BCC à 3 inputs, lequel a permis à un plus grand nombre de navires d'atteindre l'efficience. Les figures similaires pour les problèmes CCR (2 et 3 inputs) et BCC 2 inputs sont présentés à l'annexe 4.

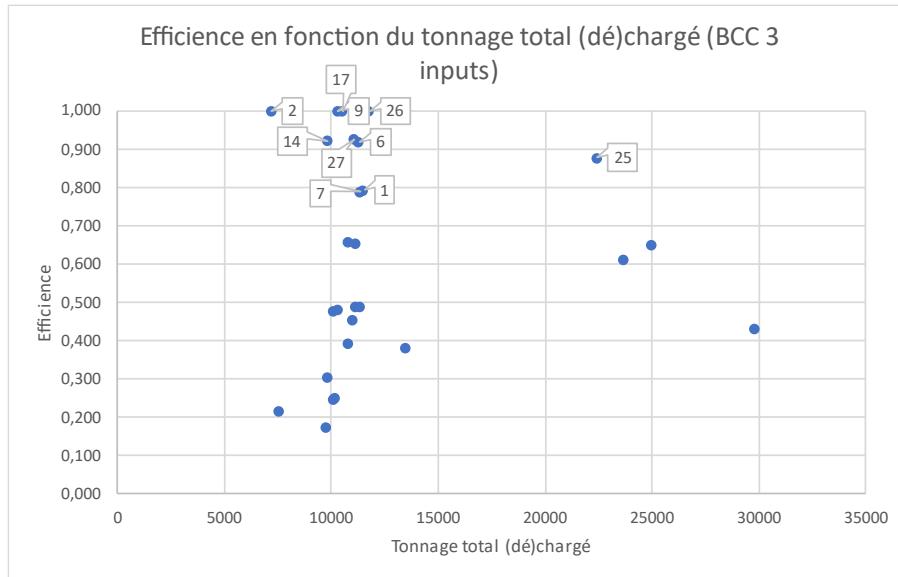


Tableau 5.11 : Nombre de navires efficients et presque efficients en fonction du tonnage

Tonnage médian = 11001	Nombre de navires	Nombre de navires efficients et presque efficients			
		CCR 2 inputs	BCC 2 inputs	CCR 3 inputs	BCC 3 inputs
≤ tonnage médian	14	3	3	3	4
> tonnage médian	13	5	6	5	6
Total		8	9	8	10

Le nombre de navires efficients et presque efficients dont le tonnage est inférieur au tonnage médian est légèrement plus petit que celui dont le tonnage est supérieur au tonnage médian et ce, pour les quatre problèmes résolus. Cet écart n'est pas significatif, car la valeur de p obtenue avec un test de khi-carré est de 0,992. Une valeur de p près de 1 indique que les différences observées pourraient être dues au hasard, ce qui indique que le tonnage ne semble pas avoir d'influence sur l'efficience des navires.

5.2.3.3 Fin de semaine à quai

Le tableau 5.12 présente le nombre de navires efficients et presque efficients en fonction de la présence ou l'absence des navires à quai durant la fin de semaine.

Tableau 5.12 : Nombre de navire efficients et presque efficients vs présence la fin de semaine

À quai la fin de semaine?	Nombre de navires efficients et presque efficients				
	Nombre de navires	CCR 2 inputs	BCC 2 inputs	CCR 3 inputs	BCC 3 inputs
Oui	9	2	2	2	3
Non	18	6	7	6	7
Total		8	9	8	10

Les navires efficents et presque efficents qui n'ont pas été à quai durant la fin de semaine sont nettement plus nombreux. Cela permet de croire que cette caractéristique joue un rôle important sur l'efficience des navires. En général, peu d'activités de (dé)chargement des navires sont réalisées durant la fin de semaine (période durant laquelle il y a du temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt), ce qui augmente le temps à quai des navires. Le nombre de navires efficents et presque efficents serait donc influencée par la présence des navires à quai la fin de semaine. Cette influence provient de l'augmentation des temps d'arrêt sans équipes et des autres temps d'arrêt, qui font diminuer le tonnage (dé)chargé par heure à quai, ce qui résulte en une diminution de l'efficience.

5.2.3.4 Temps à quai

La figure 5.6 présente l'efficience des 27 navires en fonction du temps à quai pour le problème BCC à 3 inputs. Les figures pour les autres problèmes étant similaires à celle de la figure 5.6, elles se retrouvent à l'annexe 4.

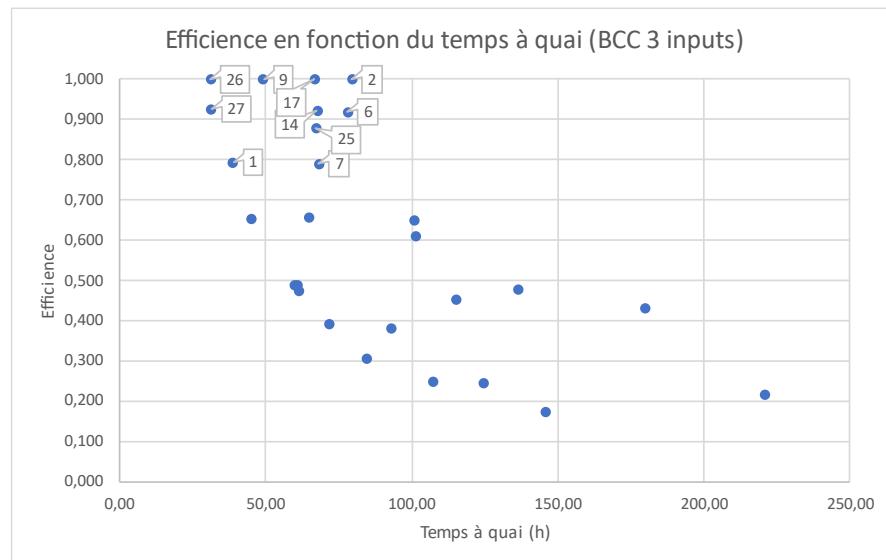


Figure 5.6 : Efficience en fonction du temps à quai (BCC 3 inputs)

Le coefficient de corrélation entre l'efficience et le temps total à quai est de -0,72 pour les 2 problèmes CCR et de -0,66 et -0,65 pour les combinaisons 2 et 3 inputs du modèle BCC, respectivement. Cela indique que généralement, un navire avec un temps à quai plus faible est plus efficient qu'un navire avec un temps à quai plus élevé. D'ailleurs, pour les ports, un faible temps à quai est une mesure de performance importante

5.2.3.6 Temps d'arrêt avec équipe et autres temps d'arrêt

Le temps d'arrêt sans équipe et les autres temps d'arrêt font diminuer le tonnage (dé)chargé par heure à quai (figure 5.7). Le coefficient de corrélation entre le tonnage (dé)chargé par heure à quai et le temps d'arrêt sans équipe et les autres temps d'arrêt, est de -0.72, ce qui indique que le temps d'arrêt sans équipe et les autres temps d'arrêt influencent négativement le tonnage (dé)chargé par heure à quai.

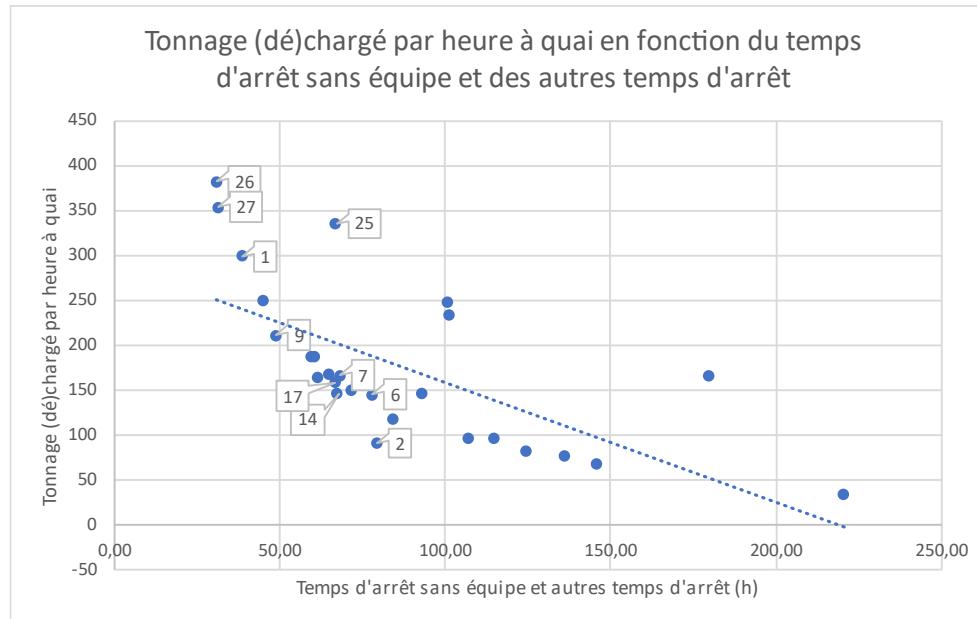


Figure 5.7 : Tonnage (dé)chargé par heure à quai en fonction du temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt

Ces résultats sont ainsi cohérents avec les observations réalisées par Bournival (2022) lors de l'étude des activités de (dé)chargement au port de Trois-Rivières. Cette étude avait démontré que les temps d'arrêt sans équipes et les autres temps d'arrêt représentent la plus grande proportion du temps à quai d'un navire (environ 60%). Il est important de noter que le navire 2, qui atteint l'efficience dans le problème BCC à 3 inputs, a été à quai pendant la fin de semaine durant laquelle aucune opération de chargement n'a été réalisée. Le tonnage de concentré de cuivre chargé sur ce navire est faible (7177 tonnes) et son temps à quai se situe sous la moyenne et la médiane. Le navire 2 utilise cependant peu de ressources (1 équipe de débardeurs et 1 grue), et n'a pas eu de temps d'arrêt avec équipe. Comme ce navire n'est efficient que pour le problème BCC à 3 inputs, son efficience s'explique par l'ajout de l'input *temps d'arrêt avec équipe* et par la forme différente de la frontière efficiente du modèle BCC. Les navires 14 (presque efficient) et 17 (efficient) ont aussi été à quai durant la fin de semaine, mais des activités de (dé)chargement ont eu lieu sur ces navires pendant la fin de semaine.

5.2.3.5 Résumé des constats

Le tableau 5.13 résume les coefficients de corrélations entre l'efficience pour chaque problème et le *temps total à quai*, le *tonnage total (dé)chargé* et les *temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt*.

Tableau 5.13 : Corrélation – Efficience et caractéristiques des navires

Efficience de la combinaison	Temps total à quai (h)	Tonnage total (dé)chargé	Temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt
CCR	-0,72	0,04	-0,70
BCC 2 inputs	-0,66	0,09	-0,63
BCC 3 inputs	-0,65	0,02	-0,59

On remarque que le *tonnage total (dé)chargé* n'est pas corrélé avec l'efficience (corrération = 0,04, 0,09 et 0,02 selon le problème), alors que le *temps total à quai* et les

temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt ont des coefficients de corrélation négatifs relativement près de -1. Ainsi, plus le *temps total à quai* et les *temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt* sont élevés, plus l'efficience est faible.

Aussi, les caractéristiques des navires efficients et presque efficients varient. Il n'a pas été possible de cibler un produit pour lequel le nombre de navires efficients ou presque efficients était plus élevé. Les quatre navires efficients et les 5 navires presque efficients avaient un tonnage inférieur à 12 000 tonnes, mais supérieur à 7 100 tonnes, ce qui indique qu'un tonnage trop élevé pourrait peut-être nuire à l'efficience. L'écart du nombre de navire efficients et presque efficients par rapport à la médiane n'est cependant pas significatif, indiquant que les navires avec un tonnage élevé pourraient aussi être efficients. La présence d'un navire à quai durant la fin de semaine semble réduire son efficience en raison de l'augmentation du temps à quai et du temps d'arrêt sans équipe et des autres temps d'arrêt (quart de nuit et de fin de semaine, généralement). Les temps d'arrêt avec équipes contribueraient à l'inefficience des navires. Les résultats mettent en évidence que l'efficience des navires dépend d'une combinaison des caractéristiques analysées, lesquelles sont interdépendantes. Par exemple, les navires efficients 2 et 17 et le navire presque efficient 14 ont été à quai durant la fin de semaine, ce qui a été identifié comme une caractéristique contribuant à l'inefficience. Ces navires démontrent que l'efficience provient de différentes caractéristiques, car ils sont efficients malgré leur présence à quai durant la fin de semaine.

5.3 Recommandations

Les résultats provenant de la résolution des quatre problèmes DEA permettent d'établir certaines recommandations. Ces recommandations pourront être appliquées pour les navires de concentré de mineraï qui séjourneront au port de Trois-Rivières dans le futur.

L'analyse des résultats a permis d'identifier qu'il y a des navires efficients pour les trois produits à l'étude.

Le tonnage des navires accueillis n'a pas d'influence sur l'efficience. Un nombre de données plus élevé permettrait de valider ce résultat.

Le type d'opérations (chargement ou déchargement) ne devrait pas influencer le type de navires à accueillir, car il n'a pas d'influence sur l'efficience.

Le nombre d'équipes de débardeurs et le nombre de grues utilisées pour chaque navire ne semblent pas avoir d'impact sur l'efficience. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a peu de variabilité dans le nombre d'équipes de débardeurs et de grues d'un navire à l'autre, le premier variant de 1 à 3 et le second, de 1 à 4. Un niveau d'input trop élevé risque de nuire à l'efficience même si le tonnage (dé)chargé par heure à quai est élevé. Il est donc préférable d'assigner moins d'équipes de débardeurs, mais que ceux-ci aient un débit de (dé)chargement de la matière élevé.

Le temps d'arrêt avec équipes devrait être réduit durant les opérations de (dé)chargement des navires puisqu'il diminue l'efficience des navires. Les temps d'arrêt avec équipes comprennent les temps d'arrêt en raison de la météo, des bris et l'attente de la documentation. Les conditions météorologiques sont imprévisibles et peuvent difficilement être contrôlées par le port. Les arrêts en raison des bris pourraient être améliorés à l'aide de programmes de maintenance préventive ou d'amélioration des équipements. En effet, les bris recensés dans les SOF sont généralement en lien avec les grues qui sont la propriété du port (à l'exception des grues du navire). Enfin, une amélioration de la gestion des ressources pourrait être envisagée. Certains SOFs font état d'un manque d'équipes de débardeurs, alors que d'autres indiquent l'attente pour l'obtention de documents. Une meilleure planification permettrait de réduire les temps d'arrêts causés par le manque d'équipe de débardeurs ou par l'attente de documentation.

Les navires qui n'ont été à quai que durant la semaine sont plus efficents que ceux qui ont été à quai aussi durant la fin de semaine, ce qui s'explique par le fait qu'il est rare que des activités de (dé)chargement aient lieu durant la fin de semaine. Il serait pertinent d'évaluer la possibilité de réaliser des activités de (dé)chargement durant la fin de semaine afin d'augmenter le tonnage (dé)chargé par heure à quai des navires à quai durant la fin de semaine. Des mesures de réduction du bruit pourraient être prises afin de ne pas nuire aux rues avoisinantes. Aussi, une meilleure planification de l'arrivée des navires permettrait de réduire le nombre de navires qui restent à quai durant la fin de semaine.

Chapitre 6. Conclusion

La problématique étudiée dans ce mémoire est l'identification des navires efficients ainsi que certaines de leurs caractéristiques afin d'émettre des recommandations permettant de réduire le temps à quai des navires séjournant au port. Le tonnage (dé)chargé par heure à quai a été utilisé en output pour quatre problèmes DEA afin d'évaluer l'efficience relative de 27 navires. Quatre navires efficients ont été identifiés, et leurs caractéristiques ont été analysées ainsi que celles de navires presque efficients.

L'objectif de ce mémoire est de développer une approche pour mesurer l'efficience des activités de (dé)chargement des navires de concentré de minerai au port de Trois-Rivières. Quatre problèmes ont été développés : CCR 2 inputs, CCR 3 inputs, BCC 2 inputs et BCC 3 inputs. Les résultats indiquent que les deux problèmes CCR sont équivalents et permettent aux navires avec un tonnage (dé)chargé par heure à quai plus élevé d'être plus efficients, car ce modèle suppose que l'augmentation d'un certain pourcentage des inputs entraîne une augmentation de ce même pourcentage des outputs. Les deux problèmes BCC permettent aux navires avec un tonnage (dé)chargé par heure à quai plus faible d'atteindre l'efficience en raison de la façon dont la frontière efficiente est définie pour ce modèle. Dans le problème BCC à 3 inputs, deux des quatre navires efficients ont un tonnage (dé)chargé par heure à quai inférieur à la médiane. Les résultats diffèrent légèrement entre les deux problèmes du modèle BCC. L'input temps d'arrêt avec équipes n'a donc que peu d'impact sur l'efficience des navires étudiés.

Les caractéristiques qui améliorent l'efficience des navires sont la réduction du temps d'arrêt sans équipes et autres temps d'arrêt et du temps de séjour des navires durant la fin de semaine. Les navires transportant du concentré de zinc semblent être légèrement plus efficients, mais des navires transportant tous les types de concentré de minerai ont atteint l'efficience. Le tonnage de matière à (dé)charger se situe entre 7 100 et 11 200 tonnes pour les quatre navires efficients et les cinq presque efficients. Enfin, le type

d'opération (chargement ou déchargement) ne semble pas influencer l'efficience des navires.

Certaines mesures pourraient être mises en place par l'APTR afin d'améliorer l'efficience des navires. L'ajout de programmes de maintenance pour les équipements de (dé)chargement ou le remplacement de ces équipements et l'amélioration de la planification pour l'assignation des équipes de débardeurs permettraient de réduire les temps d'arrêt avec équipes. De mesures de réduction du bruit et une amélioration de la planification de l'arrivée des navires permettraient aussi de réduire les temps d'arrêt sans équipes et les autres temps d'arrêt durant la fin de semaine. De plus, il est nécessaire de ne pas allouer un nombre d'équipes de débardeurs et de grues trop grand, tout en s'assurant de maintenir un rythme de (dé)chargement élevé. En résumé, l'efficience dépend principalement des temps d'arrêt avec ou sans équipes et des autres temps d'arrêt.

Ce mémoire comporte des limitations. La disponibilité des données a limité le nombre de navires analysés, le choix des inputs et de l'output et le nombre de produits à l'étude.

Ce mémoire a permis de développer une méthode d'évaluation de l'efficience relative entre différents navires séjournant dans un même port. À notre connaissance, il s'agit de la première étude de la sorte. Des études futures permettront de valider, ou d'améliorer les modèles développés dans ce mémoire ou de poursuivre l'étude avec un nombre de données plus élevé. La méthodologie développée peut être appliquée à d'autres produits dans le port étudié, ou dans d'autres ports. Elle pourrait aussi être appliquée à nouveau au port de Trois-Rivières, pour les mêmes produits, advenant le cas ou des changements seraient apportés par l'APTR, ce qui permettrait d'émettre de nouvelles recommandations.

Références

- APTR. (2013). *Rapport annuel 2013*. <https://porttr.com/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-annuel-2013-VF.pdf>
- APTR. (2021). *Bilan des activités au port de Trois-Rivières*. <https://porttr.com/bilan-2021-des-activites-au-port-de-trois-rivieres/>
- APTR. (2023). *Rapport annuel 2023*. <https://porttr.com/wp-content/uploads/2024/06/Rapport-annuel2023-signe.pdf>
- Balci, G., Cetin, I. B. et Esmer, S. (2018). An evaluation of competition and selection criteria between dry bulk terminals in Izmir [Article]. *Journal of Transport Geography*, 69, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.05.011>
- Barata, F., Ricardianto, P., Mulyana, A., Perwitasari, E., Arubusman, D., Purwoko, H. et Endri, E. (2022). Berthing time in the port of Tanjung Priok, Jakarta, Indonesia. *Uncertain Supply Chain Management*, 10(4), 1387-1396.
- Bournival, L. (2022). *ANALYSE DES ACTIVITÉS LORS DU CHARGEMENT ET DÉCHARGEMENT DES NAVIRES AU PORT DE TROIS-RIVIÈRES*.
- Cano-Leiva, J., Cantos-Sánchez, P. et Sempere-Monerris, J. J. (2023). The effect of privately managed terminals on the technical efficiency of the Spanish port system [Article]. *Case Studies on Transport Policy*, 13, article n° 101026. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101026>
- Chang, V. et Tovar, B. (2017). Metafrontier analysis on productivity for West Coast of South Pacific terminals [Article]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 103, 118-134. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.012>
- Charnes, A., Cooper, W. W. et Rhodes, E. (1978, 1978/11/01/). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Cooper, W. W., Seiford, L. M. et Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software: Second edition*[Book]. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45283-8>
- Cullinane, K., Wang, T. F., Song, D. W. et Ji, P. (2006). The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis [Article]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(4), 354-374. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.07.003>
- D'agostini, E., Ryoo, D.-K. et Jo, S.-H. (2015). Comparative Port Performance Analysis of Italian Ports. *Journal of Navigation and Port Research*, 39(5), 393-399.
- Da Costa, D. S., de Assis Carvalho, M. V. G. S., de Figueiredo, N. M., de Moraes, H. B. et Ferreira, R. C. B. (2021). The efficiency of container terminals in the northern region of Brazil [Article]. *Utilities Policy*, 72, article n° 101278. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101278>

- De Oliveira, G. F. et Cariou, P. (2011). A DEA study of the efficiency of 122 iron ore and coal ports and of 15/17 countries in 2005 [Article]. *Maritime Policy and Management*, 38(7), 727-743. <https://doi.org/10.1080/03088839.2011.625989>
- Đelović, D. et Mitrović, D. M. (2017). Some considerations on berth productivity referred on dry bulk cargoes in a multipurpose seaport [Article]. *Tehnicki Vjesnik*, 24, 511-519. <https://doi.org/10.17559/TV-20150226074034>
- Dos Santos, R. M., Mendes dos Reis, J. G., Raymundo, J. C., Abraham, E. R., Cardoso Junior, A. P. et de Souza, A. E. (2019). Port Performance Measures in Brazil: An Analysis in Port of Santos. Dans. IFIP Advances in Information and Communication Technology. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85072969233&doi=10.1007%2f978-3-030-30000-5_24&partnerID=40&md5=e20e2f908c113afd7fec4f7ab43345f0
- Fancello, G., Serra, P., Aramu, V. et Vitiello, D. M. (2021). Evaluating the efficiency of Mediterranean container ports using data envelopment analysis [Article]. *Competition and Regulation in Network Industries*, 22(3-4), 163-188. <https://doi.org/10.1177/17835917211047837>
- Färe, R. et Grosskopf, S. (2004). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: Comment. *European Journal of Operational Research*, 157(1), 242-245.
- Gök-Kısa, A. C., Çelik, P. et Peker, İ. (2022). Performance evaluation of privatized ports by entropy based TOPSIS and ARAS approach [Article]. *Benchmarking*, 29(1), 118-135. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2020-0554>
- Gouvernement du Canada. (2018). *Administrations portuaires*. <https://www.dfo-mpo.gc.ca/sch-ppb/aboutha-aproposap/information-fra.html>
- Halkos, G. et Petrou, K. N. (2019). Treating undesirable outputs in DEA: A critical review. *Economic Analysis and Policy*, 62, 97-104.
- Li, Z., Wang, X., Zheng, R., Na, S. et Liu, C. (2022). Evaluation Analysis of the Operational Efficiency and Total Factor Productivity of Container Terminals in China [Article]. *Sustainability (Switzerland)*, 14(20), article n° 13007. <https://doi.org/10.3390/su142013007>
- Medal-Bartual, A., Molinos-Senante, M. et Sala-Garrido, R. (2017). Technical efficiency of iberian port authorities by specialization: A dea metafrontier approach [Article]. *Recta*, 18(1), 37-51. <https://doi.org/10.24309/recta.2017.18.1.03>
- Nong, T. N. M. (2023). Performance efficiency assessment of Vietnamese ports: An application of Delphi with Kamet principles and DEA model [Article]. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 39(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2022.10.002>
- Park, J., Lee, B. K. et Low, J. M. W. (2022). A two-stage parallel network DEA model for analyzing the operational capability of container terminals [Article]. *Maritime Policy and Management*, 49(1), 118-139. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1859148>

- Pjevcovic, D., Dimitrijevic, B., Bisevac, I. V. et Vukadinovic, K. (2018). Design process of dry bulk cargo handling at an inland port: Case study of port Danube Pancevo [Article]. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, 25(2), 267-282. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85046001744&partnerID=40&md5=409b96c92257a82d279ac9a30d9cb4f4>
- Port de Trois-Rivières. (2022a). *À propos du Port*. <https://porttr.com/administration-portuaire/a-propos/>
- Port de Trois-Rivières. (2022b). *Mission, vision, valeurs*. <https://porttr.com/administration-portuaire/mission-vision-valeurs/>
- Rochette, M. (2023). Une année record pour les 140 ans du Port de Trois-Rivières. *Le Nouvelliste*. <https://www.lenouvelliste.ca/affaires/affaires-locales/2023/06/15/une-annee-record-pour-les-140-ans-du-port-de-trois-rivieres-DSCTM4CGJRGMXA4SOWSLIFHVI/>
- Suliman, K. R., Rahim, S. A., Ramayah, T. et Degeras, D. K. (2019). Measuring technical efficiency of dry bulk terminal performance using the frontier application of data envelopment analysis: A proposed framework. Dans. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076097057&doi=10.1088%2f1742-6596%2f1366%2f1%2f012100&partnerID=40&md5=92acf11d9dd38c944a538ae54048e918>
- Tovar, B. et Wall, A. (2019). Are larger and more complex port more productive? An analysis of Spanish port authorities [Article]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 121, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.008>
- UNCTAD. (2019). *Review of maritime transport 2019. United Nations Conference On Trade And Development*.
- UNCTAD. (2022). *Review of maritim transport 2022*.
- Wanke, P. F. et Barros, C. P. (2015). Public-private partnerships and scale efficiency in Brazilian ports: Evidence from two-stage DEA analysis [Article]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 51, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.06.002>
- Zahran, S. Z., Alam, J. B., Al-Zahrani, A. H., Smirlis, Y., Papadimitriou, S. et Tsionumas, V. (2020). Analysis of port efficiency using imprecise and incomplete data [Article]. *Operational Research*, 20(1), 219-246. <https://doi.org/10.1007/s12351-017-0322-9>

Annexes

Annexe 1. Compilation des données des SOF

Le tableau A1.1 présente les données extraites des SOF.

Tableau A1. 1 : Données extraites des SOF

Numéro du navire	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Date d'arrivée	2023-01-02 23:30	2020-12-12 11:03	2020-06-21 02:18	2020-06-08 00:18	2020-06-03 07:45	2020-03-24 09:05	2020-03-10 11:20	2020-02-14 12:57	2020-01-29 01:45	2019-12-21 08:36
Date de départ	2023-01-04 14:00	2023-12-15 18:20	2020-06-27 04:00	2020-06-09 21:00	2020-06-05 20:08	2020-03-27 15:02	2020-03-13 07:25	2020-02-20 05:15	2020-01-31 02:36	2019-12-24 08:20
Produit	Cuivre									
Tonnage (dé)chargé	11498	7178	9736	11160	11317	11302	11337	10322	10293	10759
Temps à quai (h)	38,50	79,28	145,70	44,70	60,38	77,95	68,08	136,30	48,85	71,73
Chargement (C) ou déchargement (D)?	D	C	C	D	C	C	C	C	C	C
Nombre de grues (navire)	1		2	1			1		1	1
Nombre de grues (quai)	1	1		1	2	1	1	1	1	1
Temps de bris (h)	5,75			1,00			1,25	1,00		
Temps d'arrêt mauvais temps (h)										
Temps d'arrêt avec équipes (h)	5,75	0	6	1	1,75	9	1,75	1,5	0,25	5,92
Temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt (h)	0	60,37	110,95	25,12	40,47	37,95	33,33	101,88	15,35	46,48
Temps de (dé)chargement - équipe (h)	43,30	16,33	42,83	26,08	31,92	28,50	29,50	30,25	28,50	30,33
Nombre moyen d'équipe	1,625	1,000	1,731	1,701	1,868	1,000	1,000	1,000	1,000	1,742

Numéro du navire	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Date d'arrivée	2019-12-10 15:54	2019-11-17 12:12	2019-11-12 00:40	2019-10-17 03:55	2023-03-12 14:30	2019-12-06 13:00	2019-12-27 01:15	2023-02-03 10:55	2023-03-12 15:18	2020-01-28 11:40
Date de départ	2019-12-19 20:40	2019-11-21 23:10	2019-11-16 05:30	2019-10-19 23:15	2023-03-16 11:20	2019-12-11 08:00	2019-12-29 20:00	2023-02-08 15:30	2023-03-16 03:30	2020-01-30 23:15
Produit	Cuivre	Cuivre	Cuivre	Cuivre	Cuivre	Nickel	Nickel	Nickel	Nickel	Zinc
Tonnage (dé)chargé	7520	10203	25014	9796	13503	11001	10536	10131	9826	11119
Temps à quai (h)	220,77	106,97	100,83	67,33	92,83	115,00	66,75	124,58	84,20	59,58
Changement (C) ou déchargement (D)?	C	C	D	C	D	C	C	D	D	D
Nombre de grues (navire)		1	3			1		2	2	3
Nombre de grues (quai)	1	1		1	2	1	1	1		1
Temps de bris (h)	8,00		17,08		0,25					
Temps d'arrêt mauvais temps (h)	39,00	47,92		14,75	23,25	1,75		69,08	22,75	
Temps d'arrêt avec équipes (h)	31,67	36,75	20,17	2,25	27,5	22,92	0,75	29,5	17,5	0
Temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt (h)	163,52	47,38	35,92	38,08	30,17	51,33	39,08	66,83	35,45	28,33
Temps de (dé)chargement - équipe (h)	20,75	37,08	102,25	23,92	66,83	37,25	24,58	31,75	46,83	49,00
Nombre moyen d'équipe	1,000	1,732	2,337	1,000	2,000	1,000	1,000	1,443	1,784	1,915

Numéro du navire	21	22	23	24	25	26	27
Date d'arrivée	2020-01-12 13:00	2020-03-06 16:45	2020-03-29 14:40	2020-07-12 07:50	2020-08-25 05:24	2023-04-06 13:18	2023-04-10 03:00
Date de départ	2020-01-20 00:50	2020-03-10 22:00	2020-04-01 07:20	2020-07-14 21:10	2020-08-28 00:22	2023-04-07 20:06	2023-04-11 10:12
Produit	Zinc						
Tonnage (dé)chargé	29798	23671	10781	10100	22440	11771	11040
Temps à quai (h)	179,83	101,25	64,67	61,33	66,97	30,80	31,20
Chargement (C) ou déchargement (D)?	D	D	D	D	D	D	D
Nombre de grues (navire)	1	2	1		1	1	2
Nombre de grues (quai)	1	1	1	2	2	1	
Temps de bris (h)	1,00			1,25	4,50		
Temps d'arrêt mauvais temps (h)	27,75				0,50		
Temps d'arrêt avec équipes (h)	26,83	0	0	1,25	5,5	0	0
Temps d'arrêt sans équipe et autres temps d'arrêt (h)	90,83	62,92	41,42	34,33	14,88	6,30	9,28
Temps de (dé)chargement - équipe (h)	103,08	78,00	25,75	21,25	63,00	38,00	35,50
Nombre moyen d'équipe	1,849	2,406	1,361	1,509	1,643	1,646	1,746

Annexe 2. Combinaisons DEA testés

Le tableau A2.1 présente les 11 combinaisons DEA testés pour permettre de déterminer les inputs/outputs pertinents pour cette étude.

Tableau A2. 1 : Combinations DEA testées

# Combinaison	Inputs							Output(s)			Navires efficents (concentré de minerai)
	Temps arrêt avec équipes (h)	Temps de bris (h)	Nombre de grues (total)	Nombre d'équipe moyen	Temps d'arrêt en raison du mauvais temps (h)	Nombre de camions	Temps à quai (h) (output non-désiré)	Tonnage total (dé)chargé	Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement	Tonnage (dé)chargé par heure à quai	
1		X	X	X			X		X		2, 4, 9, 17, 26
2		X	X	X			X	X	X		2, 4, 6, 9, 17, 21, 22, 25, 26
3		X	X	X	X		X		X		2, 4, 9, 17, 26
4		X	X	X		X	X		X		2, 4, 9, 17, 24, 26
5		X	X	X		X			X	X	2, 4, 9, 17, 24, 26
6		X	X	X	X				X	X	2, 9, 17, 26
7		X	X	X	X	X			X	X	2, 9, 17, 26
8		X	X	X						X	26

# Combinaison	Inputs							Output(s)			Navires efficients (concentré de minerai)
	Temps arrêt avec équipes (h)	Temps de bris (h)	Nombre de grues (total)	Nombre d'équipe moyen	Temps d'arrêt en raison du mauvais temps (h)	Nombre de camions	Temps à quai (h) (output non- désiré)	Tonnage total (dé)chargé	Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement	Tonnage (dé)chargé par heure à quai	
9	X		X	X						X	26
10	X		X	X					X	X	2, 9, 17, 26
11	X		X	X					X		2

Le même tableau a été regroupé selon les outputs communs de chaque combinaison. Le tableau A2.2 présente ce regroupement.

Tableau A2. 2 : Combinaisons DEA testées (réorganisés)

# combinaison	Temps arrêt avec équipes (h)	Temps de bris (h)	Nombre de grues (total)	Nombre d'équipe moyen	Temps d'arrêt en raison du mauvais temps (h)	Nombre de camions	Temps à quai (h) (output non-désiré)	Tonnage total (dé)chargé	Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement	Tonnage (dé)chargé par heure à quai	Navires efficients (concentré de minerai)
2		X	X	X			X	X	X		2, 4, 6, 9, 17, 21, 22, 25, 26
5		X	X	X		X			X	X	2, 4, 9, 17, 24, 26
6		X	X	X	X				X	X	2, 9, 17, 26

# combinaison	Temps arrêt avec équipes (h)	Temps de bris (h)	Nombre de grues (total)	Nombre d'équipe moyen	Temps d'arrêt en raison du mauvais temps (h)	Nombre de camions	Temps à quai (h) (output non-désiré)	Tonnage total (dé)chargé	Tonnage (dé)chargé par heure de (dé)chargement	Tonnage (dé)chargé par heure à quai	Navires efficients (concentré de minerai)
7		X	X	X	X	X			X	X	2, 9, 17, 26
10	X		X	X					X	X	2, 9, 17, 26
1		X	X	X			X		X		2, 4, 9, 17, 26
3		X	X	X	X		X		X		2, 4, 9, 17, 26
4		X	X	X		X	X		X		2, 4, 9, 17, 24, 26
11	X		X	X					X		2
8		X	X	X						X	26
9	X		X	X						X	26

Annexe 3. Relations entre l'efficience et les inputs et outputs

Les figures A3.1 et A3.2 présentent la corrélation entre les résultats d'efficience des navires et l'input du nombre d'équipe de débardeurs moyen pour les deux problèmes BCC.

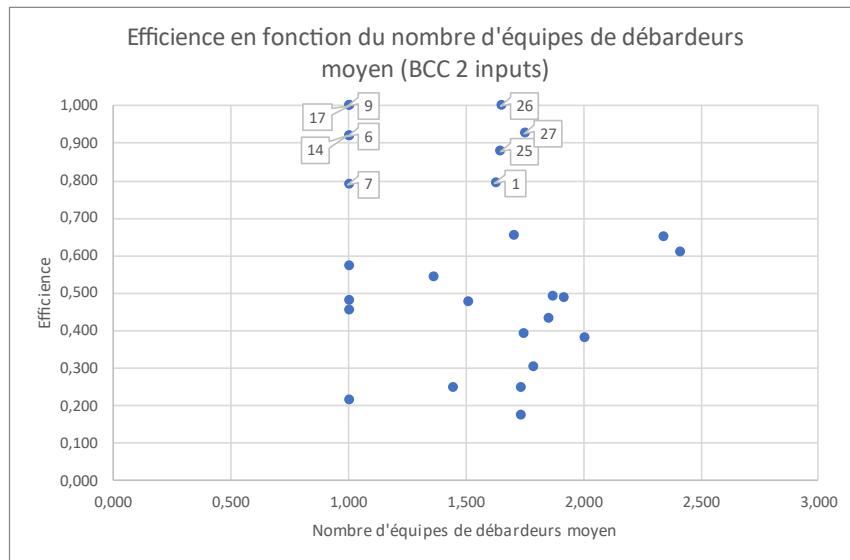


Figure A3.1 : Efficience en fonction du nombre d'équipes moyen (BCC 2 inputs)

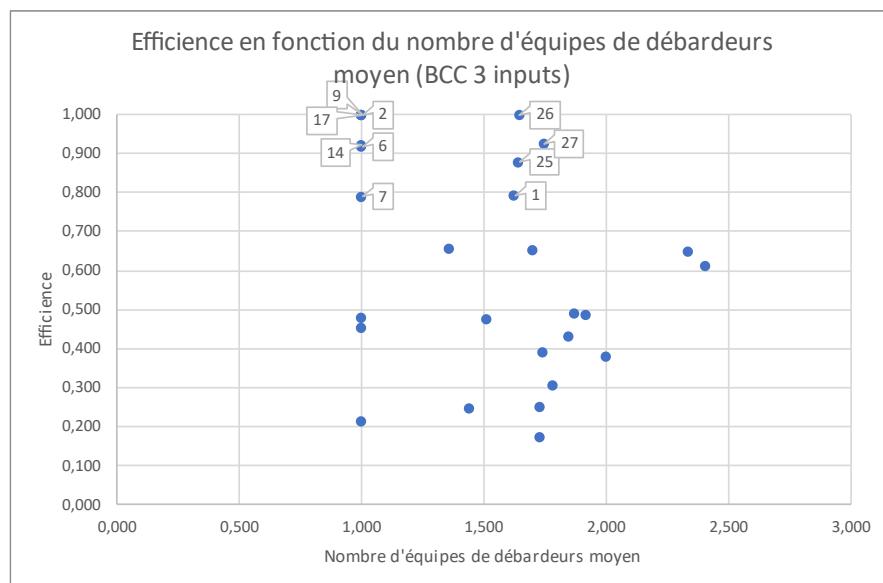


Figure A3.2 : Efficience en fonction du nombre d'équipes moyen (BCC 3 inputs)

Les figures A3.3 et A3.4 illustrent la relation entre les résultats d'efficience des navires et le nombre de grues pour les deux problèmes BCC.

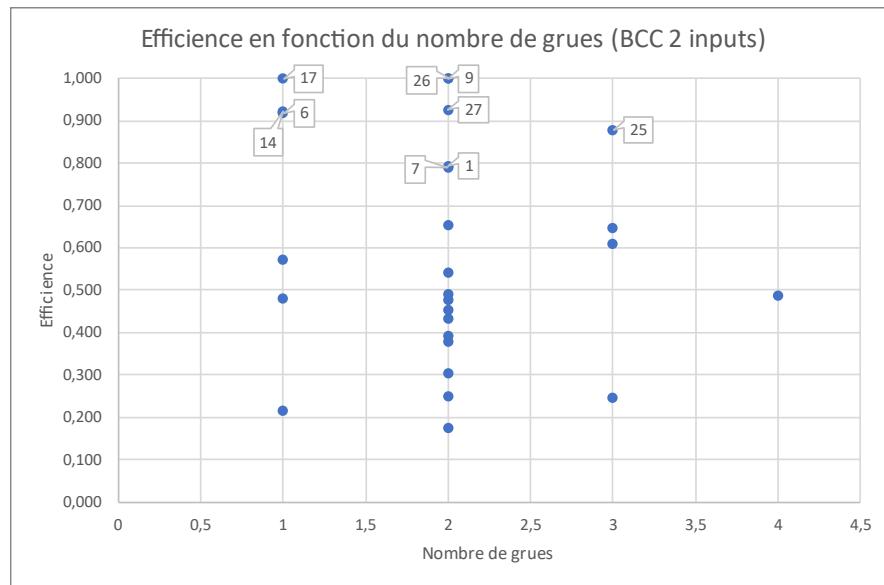


Figure A3.3 : Efficience en fonction du nombre de grues (BCC 2 inputs)

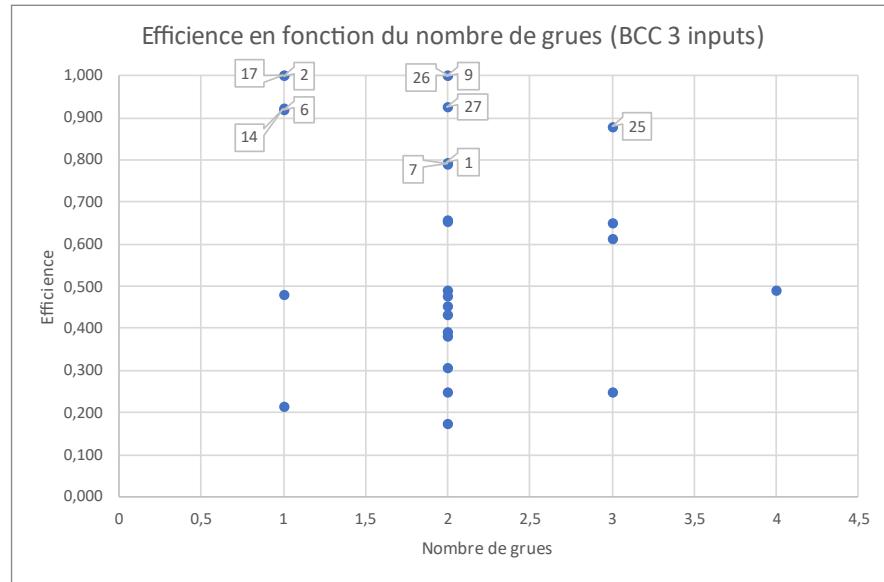


Figure A3.4 : Efficience en fonction du nombre de grues (BCC 3 inputs)

Les figures A3.5 et A3.6 illustrent l'efficience en fonction du temps d'arrêt avec équipe pour les deux modèles BCC.

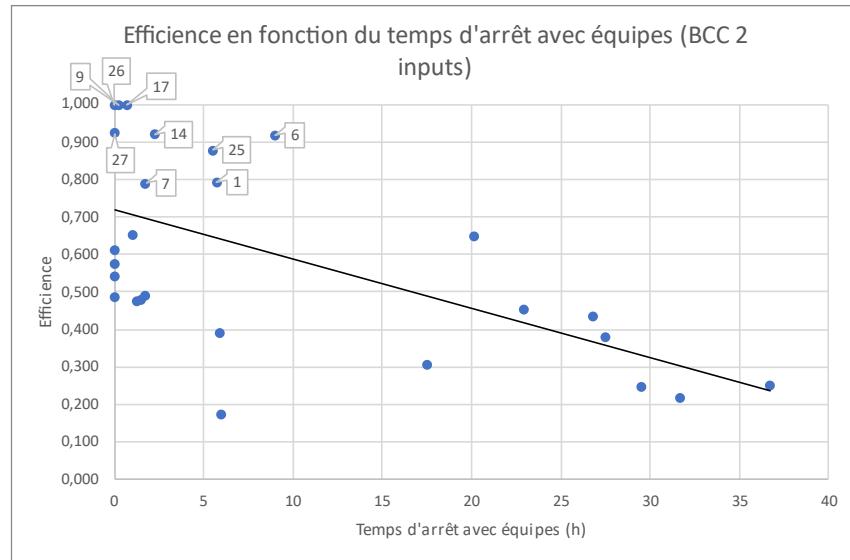


Figure A3.5 : Efficience en fonction du temps d'arrêt avec équipes (BCC 2 inputs)

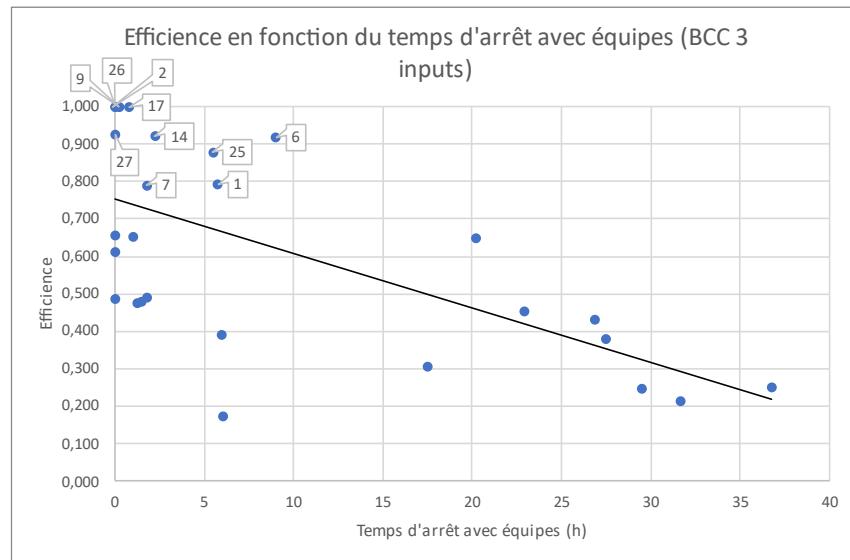


Figure A3.6 : Efficience en fonction du temps d'arrêt avec équipes (BCC 3 inputs)

Enfin, les figures A3.7 et A3.8 montrent l'efficience en fonction du tonnage (dé)chargé par heure à quai pour les deux problèmes BCC.

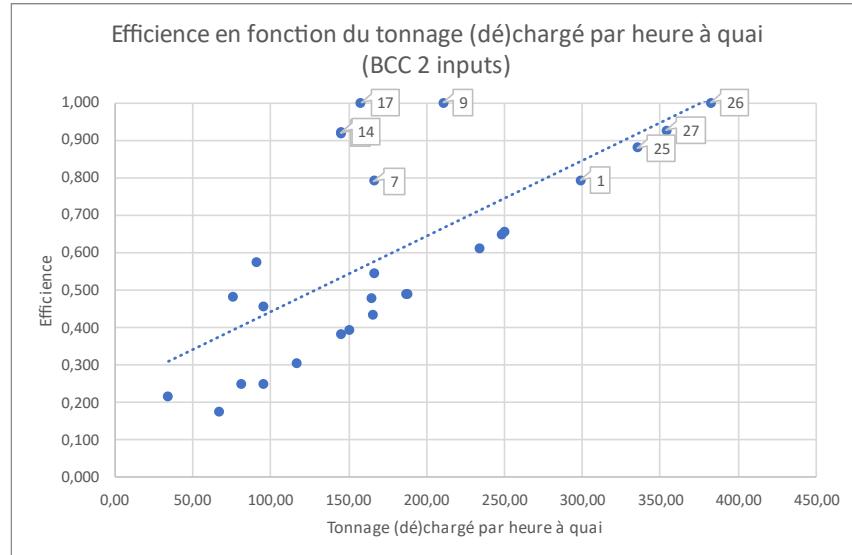


Figure A3.7 : Efficience en fonction du tonnage (dé)chargé par heure à quai (BCC 2 inputs)

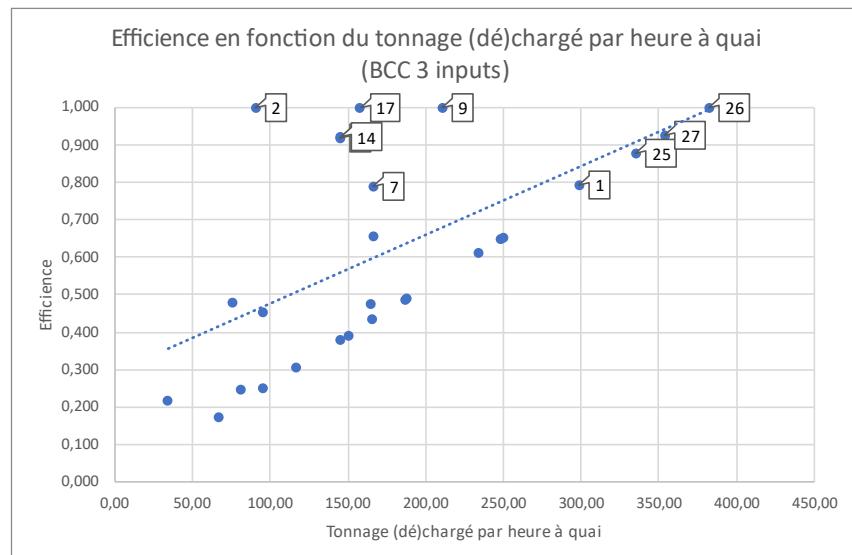


Figure A3.8 : Efficience en fonction du tonnage (dé)chargé par heure à quai (BCC 3 inputs)

Annexe 4. Relation entre les caractéristiques des navires et l'efficience

Les figures A4.1 et A4.2 montrent l'efficience en fonction du temps à quai pour les problèmes CCR (2 et 3 inputs) et BCC 2 inputs.

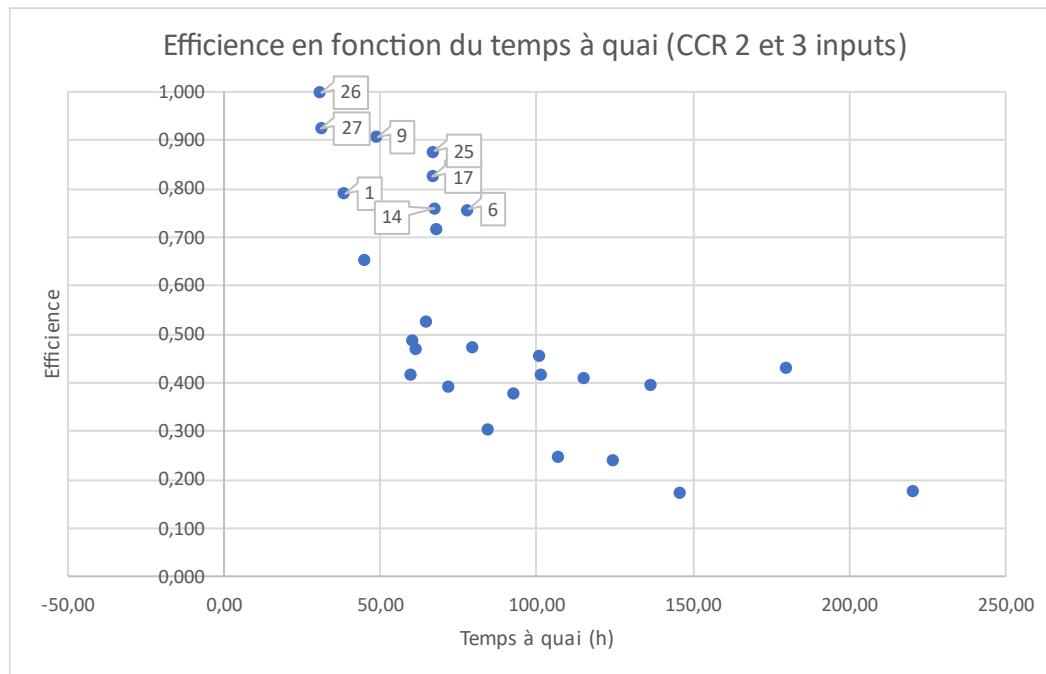


Figure A4. 1 : Efficience en fonction du temps à quai (CCR)

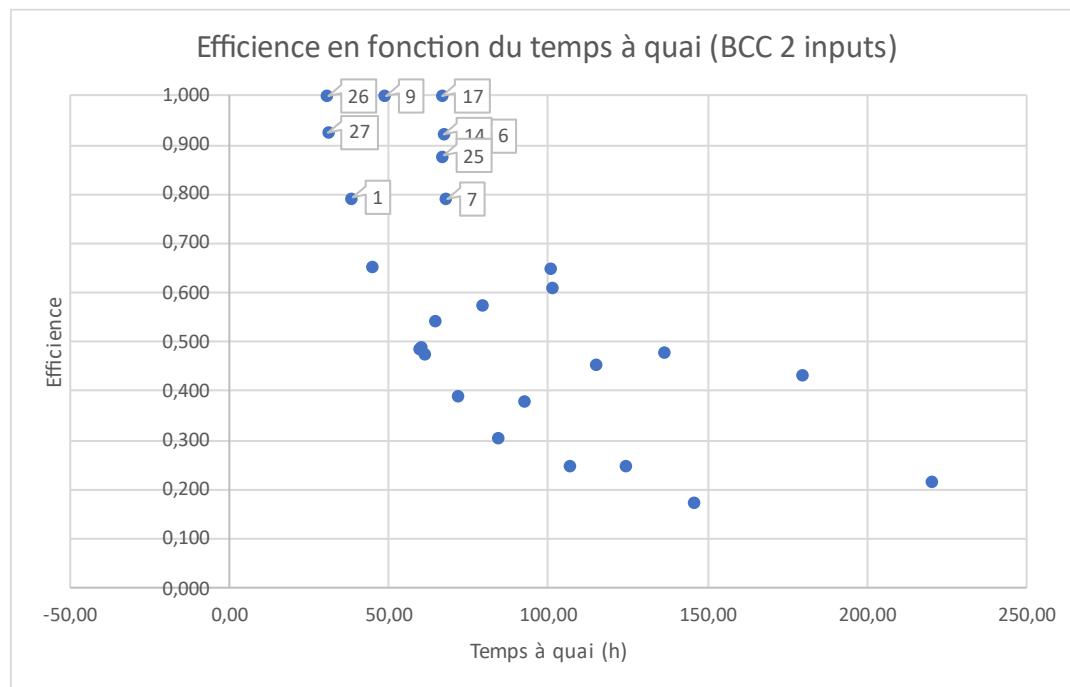


Figure A4. 2 : Efficience en fonction du temps à quai (BCC 2 input)

Les figures A4.3 et A4.4 montrent l'efficience en fonction du tonnage total (dé)chargé par navire.

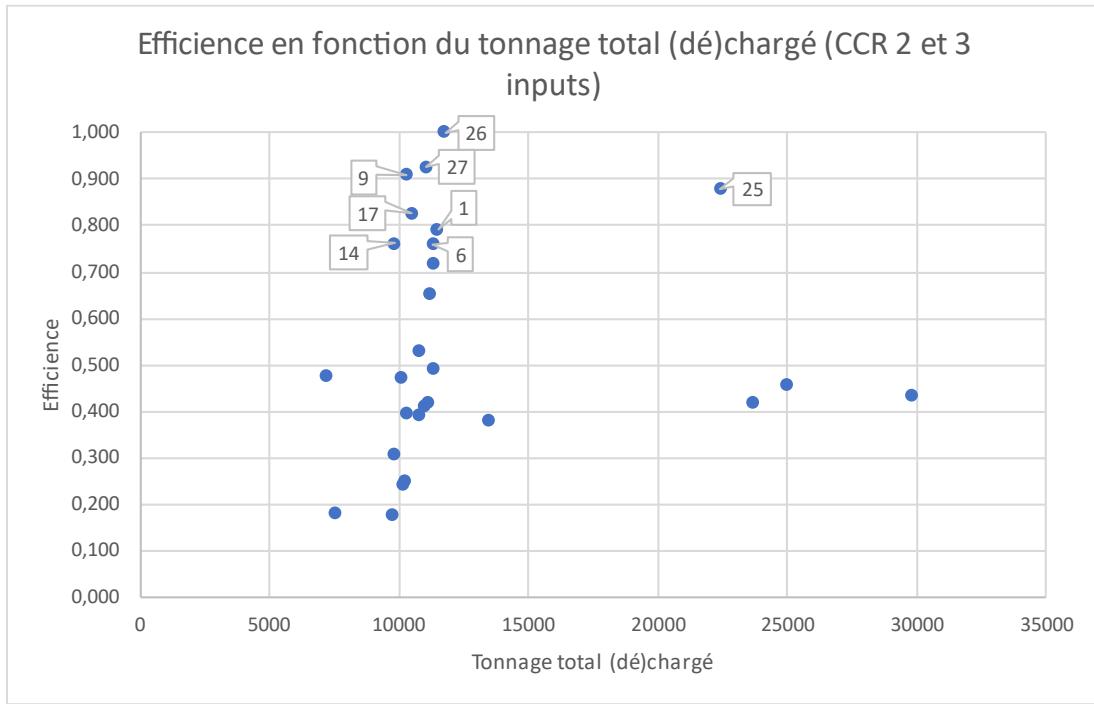


Figure A4. 3 : Efficience en fonction du tonnage total (dé)chargé (CCR)

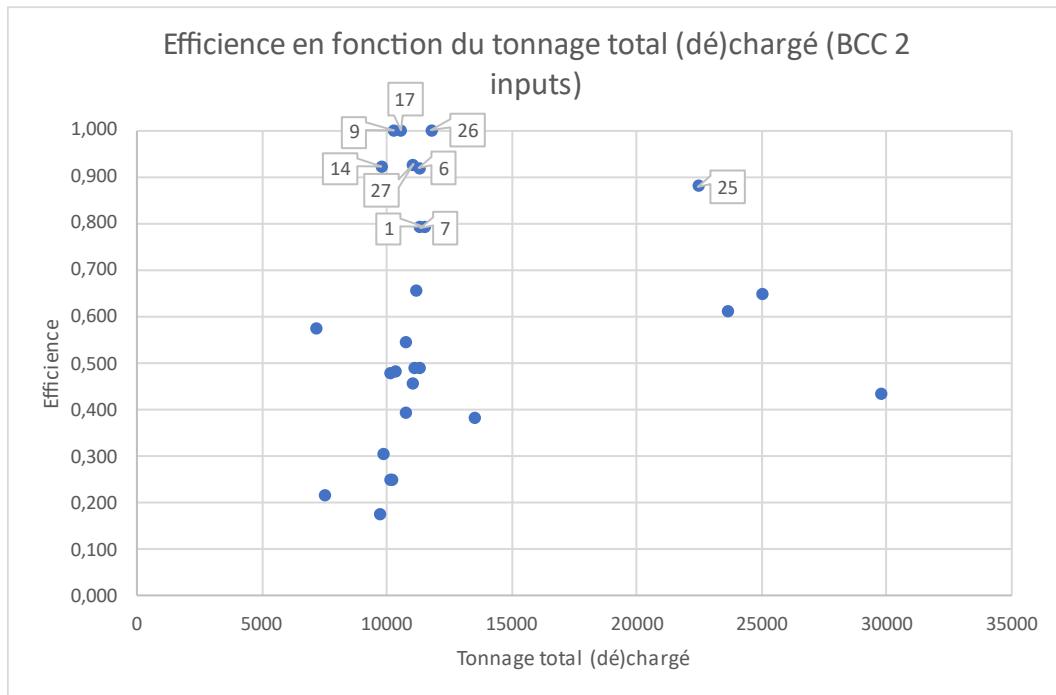


Figure A4. 4 : Efficience en fonction du tonnage total (dé)chargé (BCC 2 inputs)