

HEC MONTRÉAL

**Résolution d'un problème de tournées de navires pour
une entreprise canadienne de transport maritime**

par

Louis-Pierre Trottier

**Sciences de la gestion
Logistique internationale**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maître ès sciences
(M. Sc.)*

Avril 2017
© Louis-Pierre Trottier, 2017

Table des matières

Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Résumé	xi
Remerciements	xiii
Chapitre 1 – Introduction	1
1.1. Mise en contexte.....	2
1.1.1. Contexte du transport au Canada.....	2
1.1.2. Aperçu du transport maritime	3
1.1.3. Particularités du transport maritime dans les Grands Lacs	5
1.2. Description de l'entreprise.....	7
1.2.1. Nature des opérations	7
1.2.2. Processus de création d'horaires et de tournées	8
1.2.3. Considérations stratégiques	9
1.2.4. Besoins	10
1.3. Structure du mémoire	10
Chapitre 2 – Revue de la littérature	13
2.1. Problème de tournées de véhicules	13
2.1.1. PVC avec contraintes de capacité.....	14
2.1.2. PTV avec contraintes de fenêtres de temps	15
2.1.3. PTV avec une flotte hétérogène	15
2.1.4. PTV avec cueillettes et livraison	16
2.2. Problème de tournées de navires	17
2.2.1. Classifications des problèmes	18
2.2.2. Opérations itinérantes	19
2.2.3. Charge fractionnée.....	21
2.2.4. Problèmes combinés de gestion des stocks et de tournées	22
2.2.5. Formulation robuste	23

2.3. Méthodes de résolution exactes	24
2.4. Heuristiques et métaheuristiques	25
2.4.1. Heuristiques de base.....	26
2.4.2. Heuristiques de recherche à voisinage local et étendu	26
2.4.3. Heuristiques de recherche avec tabous.....	28
2.4.4. Autres algorithmes de résolution	29
2.5. Applications pratiques des problèmes de tournées de navires.....	30
Chapitre 3 – Description détaillée et formulation du problème.....	33
3.1. Description du problème de base.....	33
3.1.1. Particularités géographiques	33
3.1.2. Flotte	36
3.1.3. Données sur les distances et les temps	42
3.1.4. Données de la demande	47
3.1.5. Ports et délais d'entrée et de sortie	49
3.1.6. Fenêtre de temps	50
3.1.7. Coûts.....	51
3.1.8. Types de cargo.....	53
3.1.9. Pénalités liées au coefficient d'arrimage.....	56
3.1.10. Demande multi-destinations	59
3.1.11. Dépôts.....	60
3.1.12. Optimisation dynamique	61
3.1.13. Arrêts pour maintenance mécanique	62
3.1.14. Délais météo	62
3.1.15. Ravitaillement de carburant.....	64
3.2. Formulation du problème	66
3.2.1. Ensembles, variables et paramètres.....	67
3.2.3. Fonction objectif	71
3.2.4. Contraintes additionnelles	73
Chapitre 4 – Méthode de résolution.....	75
4.1. Phase de prétraitement et de validation	75
4.1.1. Interface utilisateur	76
4.1.2. Calcul des délais météo applicables.....	82
4.1.3. Calcul des pénalités de chargement.....	84
4.1.4. Processus de génération des fichiers	86
4.2. Heuristique de recherche avec tabous	88
4.2.1. Modifications de base à l'algorithme de Cordeau et Laporte.....	88

4.2.2. Fonctionnement général	89
4.2.3. Initialisation	90
4.2.4. Itérations et processus de diversification	91
4.2.5. Contraintes.....	93
4.2.6. Paramètres.....	95
4.2.7. Analyse de sensibilité des contraintes	97
4.2.8. Processus d'arrêt et résultats	98
4.2.9. Navire-fantôme.....	98
4.3. Phase de post-traitement.....	99
4.3.1. Fichier de sortie.....	100
4.3.2. Mise en forme automatique	101
4.3.3. Mouvements manuels et mise à jour de la fonction objectif	102
Chapitre 5 – Résultats et analyses	103
5.1. Déroulement du paramétrage et de l'analyse de sensibilité	103
5.2. Résultats numériques	104
5.2.1. Processus de comparaison	104
5.2.2. Tournée type	106
5.2.3. Horizon temporel d'un an – Année 2016.....	108
5.2.4. Horizon temporel de deux mois – Automne 2016	111
5.2.5. Réalisme des solutions.....	113
5.3. Résultats qualitatifs.....	115
5.3.1. Impact sur le processus de création d'horaires.....	115
5.3.2. Processus budgétaire.....	116
5.3.3. Évaluation de scénarios	117
5.4. Paramétrage.....	119
5.4.1. Variation de $\theta_{\max}$	120
5.4.2. Variation de $\zeta_{\max}$	121
5.4.3. Variation de $\delta_{\max}$	123
5.4.4. Variation de κ	126
5.4.5. Variation de χ	127
5.4.6. Variation de λ	129
5.4.7. Variation d' ϵ	130
5.4.8. Relaxation des fenêtres de temps (ω)	132
5.4.9. Combinaison des paramètres.....	134
5.5. Analyse de sensibilité	135
5.5.1. Impact de la largeur des fenêtres de temps.....	135

5.5.2. Variation de la vitesse des navires	137
Chapitre 6 – Conclusion	141
6.1. Utilité du modèle pour l'entreprise.....	141
6.2. Autres applications du modèle	142
6.2.1. Gestion du carburant.....	142
6.2.2. Établissement des prix	143
6.3. Améliorations à la méthodologie	144
Bibliographie	147

Liste des tableaux

Tableau 1 – Sous-régions du réseau.....	34
Tableau 2 – Catégories de la flotte du problème	40
Tableau 3 – Tableau des paramètres des navires.....	42
Tableau 4 – Tableau des délimitations pour calculer la table des distances	44
Tableau 5 – Tableau des temps de navigation dans les voies maritimes et canaux	46
Tableau 6 – Liste des paramètres de chaque voyage	49
Tableau 7 – Tableau des paramètres des ports	50
Tableau 8 – Matrice simplifiée des temps de nettoyage des cargos	55
Tableau 9 – Différentes catégories des cargos transportés par la compagnie	56
Tableau 10 – Tableau des tirants d'eau maximum entre deux régions	57
Tableau 11 – Exemple de pénalité avec trois navires fictifs.....	58
Tableau 12 – Paramètres inclus dans le fichier de sortie de l'algorithme.....	101
Tableau 13 – Ratio entre les coûts obtenus par l'algorithme et ceux de l'horaire de base	109
Tableau 14 – Ratio du temps total pour chaque type d'opération	110
Tableau 15 – Ratio entre les coûts obtenus par l'algorithme et ceux de l'horaire de base	111
Tableau 16 – Ratio du temps total pour chaque type d'opération	112
Tableau 17 – Caractéristiques des ensembles de scénarios de paramétrage	119
Tableau 18 – Paramètres thetamax pour chaque scénario de test.....	120
Tableau 19 – Paramètre zetamax pour chaque scénario test.....	122
Tableau 20 – Valeur de deltamax pour chaque scénario test	124
Tableau 21 – Valeur de kappa pour chaque scénario test.....	126
Tableau 22 – Valeurs de khi testées	128
Tableau 23 – Valeur moyenne de la fonction objectif pour différents nombres d'itérations	131
Tableau 24 – Itération où la dernière amélioration a été effectuée par l'algorithme par ensemble de scénarios	132
Tableau 25 – Valeurs d'oméga testées	133
Tableau 26 – Valeurs moyennes de la fonction objectif pour les tests combinés.....	135

Liste des figures

Figure 1 - Carte de la voie navigable du St-Laurent et des Grands Lacs.....	6
Figure 2 – Carte des sous-régions du réseau.....	35
Figure 3 – Profil d'un navire autodéchargeur.....	37
Figure 4 – Exemple d'une table hydrostatique d'un navire (image tirée de Wikipédia)...	38
Figure 5 – Coupe transversale de coque des navires-vraquiers et autodéchargeurs.....	39
Figure 6 – Délimitations principales des sous-régions.....	44
Figure 7 – Exemple de calcul des distances par addition des rayons.....	46
Figure 8 – Exemple de pénalité de cargo imposée sur trois navires.....	58
Figure 9 – Exemple de cueillette et de livraison à plusieurs destinations.....	60
Figure 10 – Exemple de gel des voyages.....	61
Figure 11 – Exemple de délais météo par mois.....	63
Figure 12 – Schéma du temps de service S_{ijv}	70
Figure 13 – Schéma simplifié du processus.....	77
Figure 14 – Menu principal de l'utilisateur.....	78
Figure 15 – Formulaire de création d'un arrêt temporaire.....	79
Figure 16 – Formulaire de modification de la table des distances.....	79
Figure 17 – Formulaire des délais généraux de navigation.....	80
Figure 18 – Formulaire de création de pénalités fictives.....	80
Figure 19 – Formulaire de création de délais fixe pour une portion du réseau.....	81
Figure 20 – Formulaire de destinations multiples.....	81
Figure 21 – Formulaire de modification des paramètres d'optimisation.....	82
Figure 22 – Illustration d'une pénalité positive modulée par différentes valeurs de λ	85
Figure 23 – Ordonnancement d'une tournée avant l'ajustement du début des fenêtres de temps.....	91
Figure 24 – Ordonnancement d'une tournée après l'ajustement des fenêtres de temps.....	91
Figure 25 – Exemple d'une tournée obtenue – durées moyennes.....	106
Figure 26 – Exemple d'insertion d'un cargo pour réduire les segments à vide.....	107
Figure 27 – Exemple d'une tournée obtenue – courtes durées.....	108
Figure 28 – Impact de la valeur de $\theta_{\max}$ sur la qualité de la solution obtenue.....	121
Figure 29 – Impact de la valeur de $\zeta_{\max}$ sur la qualité de la solution.....	123
Figure 30 – Impact de la valeur de $\delta_{\max}$ sur la qualité de solution.....	125
Figure 31 – Impact de la valeur de $\delta_{\max}$ sur le nombre d'itérations de la première solution.....	125
Figure 32 – Variation du paramètre κ pour toutes les instances test.....	127
Figure 33 – Impact du paramètre χ sur la qualité de la solution.....	129
Figure 34 – Valeur de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations (10 scénarios P127).....	131
Figure 35 – Impact d' ω sur la qualité de la solution obtenue.....	134

Figure 36 – Impact de la relaxation des fenêtres de temps sur la solution (contraint) ..	136
Figure 37 – Impact de la relaxation des fenêtres de temps sur la solution (non contraint)	
.....	137
Figure 38 – Impact de la variation des vitesses moyennes sur la solution (sans capacité excédentaire)	139
Figure 39 – Impact de la variation des vitesses moyennes sur la solution (avec capacité excédentaire)	140

Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation et la résolution d'un problème de tournées de navires auquel est confrontée une compagnie de transport maritime canadienne. Ce problème consiste à trouver des tournées de livraison maritime minimisant les coûts de transport tout en visitant tous les clients de la compagnie de transport. Un modèle est tiré de la littérature et est adapté aux réalités rencontrées par une compagnie canadienne opérant sur les Grands Lacs et dans la voie maritime du Saint-Laurent. Le modèle est résolu par une heuristique de recherche avec tabous puis un outil d'aide à la décision est présenté pour faciliter l'interaction avec les données. Enfin, le modèle et l'algorithme sont testés sur des données réelles provenant de l'entreprise de transport afin d'évaluer la qualité et le réalisme des solutions obtenues.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, monsieur Jean-François Cordeau, titulaire de la Chaire en logistique et en transport à HEC Montréal, qui a encadré les travaux de ce mémoire. Il m'a encouragé dans l'accomplissement de ce projet de recherche en répondant à toutes mes questions et en dirigeant mes efforts. Il a également apporté un soutien financier très apprécié qui m'a permis de me concentrer sur mes travaux.

J'aimerais également remercier les membres de l'équipe du *Dispatch* et du *Marketing* œuvrant au sein de la compagnie de transport avec laquelle j'ai collaboré. Votre aide, vos conseils ainsi que vos idées m'ont permis de créer un modèle complet et réaliste. J'aimerais particulièrement remercier Benoit, du département de l'informatique, pour les pistes d'amélioration ainsi que Mariève, du département commercial, qui a cru en ce projet et qui a permis de faciliter le partenariat entre HEC Montréal et la compagnie de transport.

Enfin, j'aimerais remercier mes collègues, amis et professeurs du Département de gestion des opérations et de la logistique et du Département des affaires internationales à HEC Montréal. Ce parcours fut une expérience enrichissante et j'aimerais les remercier de leur contribution.

Chapitre 1 – Introduction

Le transport de marchandises revêt une importance capitale pour la société. Il permet d'acheminer les matières premières des sites d'extraction vers les sites de transformation, puis les produits finis vers les sites de consommation. Depuis plusieurs siècles, le transport de cargo par voie maritime contribue au développement économique des sociétés partout autour du globe. Le vingtième siècle a été marqué par une augmentation drastique du commerce international, et cet accroissement a été soutenu notamment par le transport maritime. En effet, entre 1965 et 2005, le volume total de cargo transporté par navire a crû de 450% en tonnes-kilomètres (Branch, 2007).

Depuis les années 1950, une attention accrue a été portée à l'optimisation des réseaux logistiques, particulièrement des réseaux de transport. Des entreprises et même des secteurs entiers reposent sur l'optimisation de ces réseaux. L'utilisation d'outils d'optimisation permet de faciliter la prise de décisions de plus en plus complexes et d'augmenter l'intensité d'utilisation de ressources limitées.

Il est également de plus en plus facile d'accéder à des outils puissants pour la résolution de problèmes complexes où l'humain pourrait difficilement trouver des solutions. L'avènement de l'ordinateur personnel moderne et son utilisation répandue témoignent de son importance pour les entreprises. De nombreux logiciels d'optimisation font leur apparition sur le marché pour résoudre des problèmes fréquemment rencontrés en entreprise.

L'optimisation des réseaux de transport est particulièrement importante pour réduire l'empreinte environnementale des entreprises. Wu et al. (1994) notent que les décisions logistiques de conception de réseau et d'horaire de transport peuvent grandement réduire les coûts et les émissions de pollution atmosphérique des entreprises. Les méthodes d'optimisation permettent de prendre en compte des éléments supplémentaires lorsque vient le temps de prendre des décisions. Ainsi, les délais et les

coûts ne sont plus les seuls éléments pris en considération par les entreprises, et les outils d'aide à la décision sont cruciaux pour intégrer ces variables de décision.

En somme, cet effort accru d'optimisation est de plus en plus important et peut représenter des économies non négligeables pour les entreprises ainsi qu'une réduction importante de l'empreinte écologique de ces dernières. Ce mémoire décrit les efforts d'adaptation de modèles théoriques à un problème réel de tournées de véhicules vécu par une entreprise de transport maritime canadienne. Nous créons un modèle puis adaptons une heuristique afin de résoudre un problème réel et concret; la méthodologie décrite dans cette recherche peut certainement servir comme cadre d'adaptation standard aux problèmes logistiques rencontrés dans le monde du transport maritime.

Les sections suivantes de ce chapitre permettront de comprendre les particularités du transport maritime et les principales routes de commerce au Canada, ainsi que de comprendre la nature des activités de l'entreprise avec laquelle nous avons collaboré. Une description plus détaillée des contraintes propres à l'entreprise sera fournie au troisième chapitre.

1.1. Mise en contexte

1.1.1. Contexte du transport au Canada

L'industrie canadienne est grandement axée sur l'extraction et la transformation de base de ressources naturelles. Le secteur de l'extraction minière et de l'agriculture représente près de 10% de l'économie canadienne (Stat Can, 2016). Le transport de ces ressources est donc primordial pour le pays. Il doit être effectué de la manière la plus efficace possible, des sites d'extraction vers les marchés de consommation.

Dans le secteur de l'agriculture, la production de céréales représente un total de plus de 12 milliards de dollars en 2015 (Stat Can, 2016). Une grande part de cette production provient des provinces de l'ouest et est expédiée vers la Colombie-Britannique pour l'exportation vers les marchés asiatiques, ou vers les Grands Lacs pour la consommation nationale ou l'exportation vers les marchés européens et africains. Pour le marché de l'est, ces cargos sont généralement expédiés par train vers des ports bordant les Grands Lacs où ils seront ensuite chargés dans des navires pour être

transportés vers des centres urbains et vers les moulins pour la transformation, ou pour l'entreposage en vue de l'exportation. L'entreposage se fait principalement dans les silos à grain bordant les Grands Lacs et le fleuve St-Laurent (Park & Koo, 2001).

Une autre industrie en importance au Canada et en Amérique du Nord est l'extraction du minerai de fer et du charbon, et leur utilisation pour la production d'acier, pour la production d'électricité ou pour l'exportation. La majorité des usines de transformation d'acier se situent dans les Grands Lacs, tandis que les mines d'extraction se situent principalement dans le nord du Canada, sur la Côte-Nord du Québec, ainsi qu'aux États-Unis. Le minerai de fer et le charbon sont ainsi transportés vers les Grands Lacs, en provenance de l'est du Canada et des États-Unis pour alimenter les usines d'acier et l'industrie lourde (Stopford, 2009).

1.1.2. Aperçu du transport maritime

Dans cette section, et pour le reste de ce mémoire, nous nous intéressons au transport maritime de vrac solide et sec, c'est-à-dire de cargaisons déposées directement dans la cale d'un bateau sans l'utilisation d'un conteneur. Le vrac solide sec peut prendre plusieurs formes (poudres, granules, etc.), mais la dimension de chaque élément ne dépasse généralement pas un diamètre de 25 centimètres. Il existe plusieurs autres types de navires étant adaptés au transport de différents types de cargos : pétroliers, navires gaziers, transport de conteneurs, etc.

Le transport de ce vrac solide est effectué généralement sous trois formes d'opérations : le transport maritime nolisé (*charter*), le transport en itinérance (*tramp*) et les lignes de transport (*liner*) (Lawrence, 1972). Les compagnies de transport nolisé louent un ou plusieurs navires (et son équipage parfois) à une compagnie voulant transporter un cargo d'un point A à un point B. La compagnie louant le navire est donc responsable de l'opérer, et paie un frais de location à la compagnie propriétaire du bateau. Les compagnies faisant du transport itinérant sont contactées par des compagnies voulant faire transporter un cargo d'un point A à un point B. La compagnie de transport opère donc un ou plusieurs navires pour répondre à la requête du client, et ce dernier paie un frais chargé par tonne à la compagnie de transport. Les compagnies opérant des lignes de transport ont un horaire régulier et établi à l'avance et passent à différents ports. Des

clients peuvent réserver de la capacité sur un segment en particulier. Les lignes de transport maritime sont rarement utilisées pour le transport de vrac.

En plus de ces trois modes de fonctionnement, les opérations peuvent être commerciales ou industrielles. Les opérations commerciales concernent des compagnies de transport indépendantes qui transportent le cargo pour le compte d'autrui et dont les opérations sont spécialisées exclusivement pour le transport. Les opérations industrielles concernent généralement des compagnies ayant des opérations industrielles (par exemple la production d'acier) et opérant leur propre flotte pour livrer leur marchandise ou aller la chercher chez un fournisseur. Le transport est donc une fonction secondaire aux activités de l'entreprise.

En règle générale, les navires-vraquiers transportent de la marchandise à pleine capacité d'un port de chargement vers un point de déchargement, de manière similaire à un transport en camion-plein (FTL ou *Full-truck-load*). Par contre, il est fréquent qu'un navire doive charger du cargo de plusieurs ports ou le décharger à plusieurs autres points, ce qui signifie que le navire n'est pas à pleine capacité (LTL ou *Less-than-truck-load*).

L'industrie du transport maritime est très compétitive malgré le nombre peu élevé d'acteurs dans le marché. Souvent, la seule différenciation possible est par le prix. Les taux de transport sont largement influencés par l'offre et la demande de capacité de transport sur le marché. En effet, si elles se retrouvent en excès de capacité, les compagnies voudront utiliser leurs navires à pleine capacité et baisseront leurs taux pour faire gonfler leur demande, et si le marché se retrouve en manque de capacité, les taux de transport seront plus élevés, car les clients devront payer une prime pour faire transporter leur cargo en priorité. La capacité totale de transport du marché est influencée par le nombre de navires qui naviguent ainsi que par la composition de la flotte d'une région donnée.

Le nombre de navires d'une région varie en fonction de l'âge des flottes, des prix de mise en chantier de nouveaux navires (qui est influencé par les cycles économiques, les prix des matières premières et par les coûts de la main-d'œuvre) et le prix de rachat des navires pour le recyclage. Des coûts de mise en chantier plus bas vont pousser les entreprises de transport à augmenter la taille de leur flotte avec des navires récents, ce qui augmente alors la capacité de transport sur le marché. Des prix de recyclage plus élevés ou un âge moyen d'une flotte plus élevé vont contribuer à l'augmentation du

recyclage des navires, et ainsi baisser la capacité du marché. La durée de vie utile d'un navire de cargo varie entre 20 et 30 ans, en fonction de l'utilisation du navire et de sa région d'opération (Stopford, 2009).

Les taux de transport sont donc influencés par l'offre (la capacité de transport) et la demande (les cycles économiques, les échanges commerciaux, etc.). L'efficacité et la flexibilité des opérations des entreprises de transport sont donc essentielles pour pouvoir survivre dans cet environnement hautement compétitif.

1.1.3. Particularités du transport maritime dans les Grands Lacs

L'industrie du transport maritime au Canada est principalement constituée de navires-vraquiers (52%) transportant du cargo sec (Transport Canada, 2014). La majorité de cette flotte est établie dans les Grands Lacs et dans la voie maritime du St-Laurent pour le transport du minerai, du sel, du charbon et pour l'exportation du grain. Puisque les Grands Lacs et une grande partie de la voie maritime du Saint-Laurent sont constitués d'eau douce, les navires ont généralement une durée de vie supérieure aux navires océaniques. C'est pourquoi l'âge moyen de la flotte des vraquiers canadiens est d'environ 29 ans (Canadian Shipowners Association, 2000).

Les durées de transport dans les Grands Lacs sont courtes (généralement moins de 8 jours, du chargement jusqu'au déchargement). À la différence du transport international où les navires peuvent naviguer pendant des mois, la réalité des Grands Lacs incite les clients à demander des chargements justes à temps, ce qui induit une pression sur les opérations des transporteurs. Des clients peuvent demander de transporter un cargo quelques semaines jusqu'à quelques jours à l'avance, ce qui force les transporteurs à devoir composer avec une demande dynamique.

De plus, les transporteurs font face à des marges de profit très basses. L'évolution des marges d'opération des transporteurs est influencée par les prix de matières premières ainsi que par la capacité du marché. Le Baltic Dry Index, un indice qui traque les taux d'affrètement des navires-vraquiers, donne généralement un bon aperçu des marges du secteur du transport maritime de vrac. Après avoir atteint des sommets en 2007-2008, il a chuté avec la crise hypothécaire et est resté bas depuis (The Economist, 2015). Les entreprises de transport au Canada et ailleurs dans le monde se retrouvent donc dans un marché où les taux de transport demeurent très bas actuellement.

Les Grands Lacs sont tous reliés entre eux et à l'océan Atlantique par le fleuve St-Laurent et sa voie maritime, le Canal Welland et les écluses à Sault-Ste-Marie. En raison de l'utilisation de canaux et d'écluses, la taille des vaisseaux est restreinte. Les navires doivent donc respecter une longueur, une largeur et un tirant d'eau maximaux, ce qui limite la capacité de faire des économies d'échelle en utilisant des navires plus grands. Ces contraintes restreignent également l'entrée de navires transatlantiques qui sont généralement plus gros et plus lourds, ce qui crée une barrière à la compétition d'acteurs internationaux.

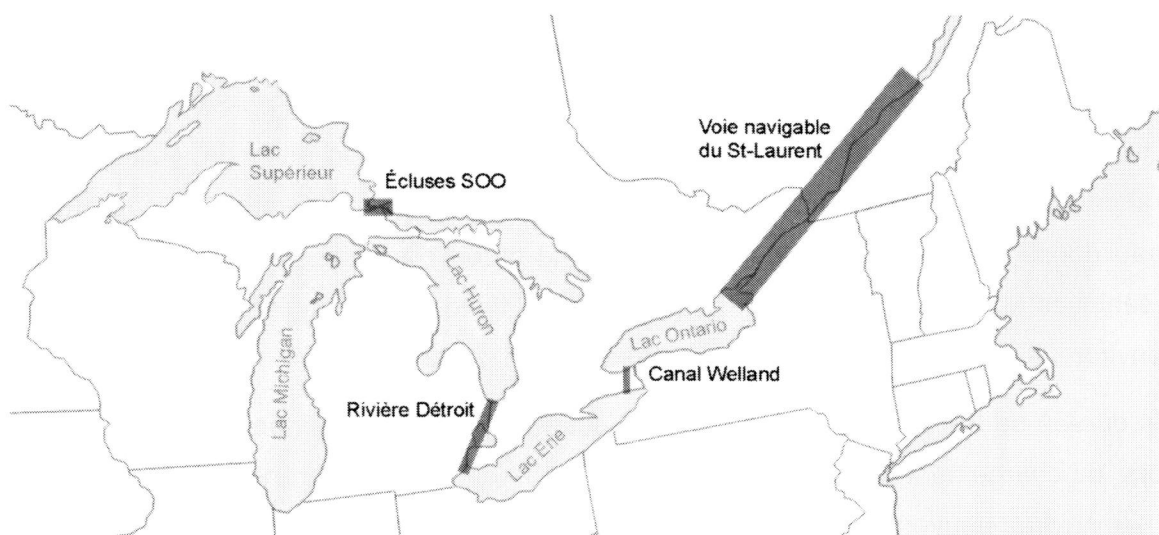


Figure 1 - Carte de la voie navigable du St-Laurent et des Grands Lacs

Une autre réalité à laquelle les compagnies de transport maritime canadiennes doivent se soumettre est la présence des lois de cabotage et du Jones Act des États-Unis. Sous le Jones Act, il est impossible de servir un client ayant un port d'origine et un port de destination aux États-Unis si le bateau n'a pas été construit dans un chantier naval américain et s'il n'est pas enregistré aux États-Unis (Vaughn, 2016). Les transporteurs canadiens peuvent donc desservir les ports américains seulement si l'origine ou la destination est un port canadien ou étranger. Le Canada impose ses propres lois sur le transport d'un port canadien à un autre sous le Coasting Trade Act (Hodgson & Brooks, 2012).

En somme, le système d'écluse et ses restrictions de taille, ainsi que les lois de cabotage au Canada et aux États-Unis, imposent des contraintes additionnelles sur les transporteurs dans la région des Grands Lacs. Ces contraintes réduisent la flexibilité opérationnelle des transporteurs, mais contribuent à protéger l'industrie maritime canadienne dans les Grands Lacs.

1.2. Description de l'entreprise

1.2.1. Nature des opérations

Lors de ce projet de recherche, nous avons collaboré avec Canada Steamship Lines, une entreprise canadienne spécialisée dans le transport de marchandises en vrac dans les Grands Lacs, le fleuve St-Laurent et sur la côte Est du Canada. La compagnie opère également quatre autres divisions à l'échelle internationale. Le cargo transporté est uniquement du vrac sec et se fait à l'aide de navires-vraquiers et de navires autodéchargeurs.

Des clients souhaitent transporter un type spécifique de cargo d'un port de production vers un port de consommation, selon un horaire préétabli. Les clients établissent donc des contrats à long terme avec la compagnie de transport, qui leur assure de transporter une certaine quantité annuellement selon des fenêtres de temps. Le transporteur opère donc sa propre flotte pour répondre aux requêtes des clients, et peut parfois sous-contracter le transport à un autre transporteur si sa flotte ne peut pas répondre à la demande.

Normalement, le taux chargé au client couvre les coûts de base encourus par la compagnie de transport ainsi qu'une prime pour couvrir les dépenses administratives, les coûts en capital et le profit de la compagnie. Si un transporteur peut baisser ses coûts d'opération en améliorant l'efficacité de son réseau, il peut ainsi baisser ses prix de transport et augmenter sa compétitivité sur le marché.

Le transporteur fixe par contrat un taux chargé à la tonne, c'est-à-dire qu'il paiera un coût de transport qui variera en fonction du nombre de tonnes transportées. Généralement, un minimum est spécifié au contrat, et si le tonnage n'atteint pas ce

minimum, un coût de fret non utilisé (*deadfreight*) est chargé au client. Sur les contrats de longue durée, les taux peuvent être indexés à l'inflation. Parfois, un taux additionnel est chargé à la tonne en fonction du prix du carburant : un prix de base du carburant est spécifié au contrat et si les prix réels dépassent celui-ci, une surprime de carburant est applicable au taux chargé au client. De plus, si le client ou ses agents ne peuvent charger ou décharger le navire selon un temps spécifié au contrat, une surestarie (*demurrage*) est chargée au client (un frais couvrant les coûts supplémentaires encourus par le transporteur si ce dernier reste au port).

Puisque les opérations du transporteur canadien sont principalement établies dans les Grands Lacs, la compagnie doit cesser d'opérer pendant trois à quatre mois chaque année pendant l'hiver en raison des glaces. Les opérations cessent donc généralement vers la fin décembre et recommencent entre la mi-mars et le début du mois d'avril.

1.2.2. Processus de création d'horaires et de tournées

Chaque année, les clients spécifient une quantité de cargos à transporter d'un port de chargement vers un port de déchargement. Cette quantité peut être fixe et spécifiée par contrat, ou peut contenir une portion de cargo en « option ». Le client peut donc, selon un certain préavis, exercer son option de transport selon un taux préférentiel spécifié au contrat. L'ordre de grandeur des quantités à transporter par mois est connu à l'avance et la compagnie peut donc créer un horaire brut et planifier le nombre requis de navires à opérer chaque mois.

À partir de cet horaire brut, l'équipe de planification peut créer un horaire détaillé indiquant les tournées pour chaque navire, ainsi que les dates de chargement et de déchargement. La compagnie conserve un horaire avec un horizon roulant de 60 jours.

La planification des tournées et des horaires se fait à la main par l'équipe de planification. Les temps de navigation sont calculés selon l'expérience des planificateurs, et l'allocation des navires aux différents contrats se fait en fonction d'une préférence subjective d'un bateau pour un contrat en particulier. Par exemple, un navire peut être plus adéquat pour effectuer un certain type de chargement, ou pour aller à certains types de ports.

Les planificateurs utilisent généralement une règle maison pour créer les horaires. Ils sélectionnent les contrats qui sont les plus contraints (généralement des contrats ayant

un port de chargement ou de déchargement dans une région où seulement certains types de navires peuvent naviguer) et ils affectent ces contrats à ces navires. S'il y a de la capacité restante, ils remplissent ces navires spécialisés avec des contrats standards. Lorsque ces bateaux spécialisés sont remplis, ils prennent une autre catégorie de navire (ayant une plus petite capacité, des coûts moins élevés, etc.) et remplissent l'horaire des navires en tentant de minimiser les portions du voyage à vide. Enfin, ils finissent par placer les contrats résiduels dans les navires restant en tentant de minimiser les temps morts pour les navires. Ils contactent fréquemment les clients pour devancer ou retarder un chargement ou un déchargement. Si un navire n'a pas de contrats assignés, le planificateur va tenter de le remplir avec des cargos ponctuels, devancer le chargement de clients réguliers ou encore mettre le bateau en arrêt temporaire. Lorsque l'horaire est complet, les planificateurs effectuent certains changements manuels pour minimiser les temps morts ou les segments à vide en échangeant des voyages d'un navire à un autre. Il n'y a pas actuellement de programme informatique ni d'outil de planification pour la création de tournées et d'horaire, ce qui a encouragé le développement de l'outil présenté dans ce mémoire.

1.2.3. Considérations stratégiques

La compagnie est propriétaire d'une flotte et l'opère. Une flotte de navires-vraquiers et d'autodéchargeurs peut représenter des centaines de millions de dollars en actifs pour une compagnie et les coûts d'opération des navires peuvent se chiffrer à des dizaines de milliers de dollars par jour par navire. Les décisions stratégiques de la compagnie de transport concernent donc la taille et la composition de la flotte.

Puisque les navires opèrent dans une région restreinte (les Grands Lacs) pour un nombre de cargos limité, et que les coûts d'opération sont très importants pour la compétitivité de la compagnie, les navires sont généralement adaptés à cette réalité. En effet, la taille et le mode de construction des bateaux empêchent l'utilisation de ces bateaux pour les voyages océaniques ou côtiers, et doivent donc se limiter au transport de cargo brut dans les Grands Lacs, le fleuve et le golfe du St-Laurent. L'achat de navires ayant certaines capacités et caractéristiques est important pour la compagnie, car certains navires plus petits offrent une plus grande flexibilité opérationnelle (accès à

des plus petits ports), mais les navires plus grands peuvent plus efficacement transporter le cargo et donc réduire les coûts d'opération de la compagnie.

La composition de la flotte doit donc être révisée fréquemment pour adapter le profil de la compagnie aux besoins du marché, mais elle demeure relativement stable, car les coûts d'acquisition et de recyclage des navires sont très importants.

1.2.4. Besoins

La compagnie opère actuellement une flotte de navires. Dû aux facteurs mentionnés ci-haut, elle ne compte pas modifier de façon importante la capacité de la flotte ni sa composition dans un horizon de temps rapproché.

L'équipe de planification de la compagnie souhaite pouvoir effectuer une planification des voyages de façon plus optimale dans le but de réduire les coûts d'opération des navires. Pour ce faire, ils veulent optimiser les horaires et les tournées des navires pour minimiser a) la distance parcourue à vide, b) le temps de voyage total de la flotte, c) les coûts de pilotage et les charges des écluses, d) les frais de carburant et autres frais d'exploitation de la flotte, et e) maximiser les revenus provenant du nombre total de tonnes transportées par les navires.

Afin de pouvoir répondre aux besoins opérationnels de la compagnie, et étant donné la complexité du problème, un outil de planification des tournées et des horaires a donc été développé. Ce mémoire présente un outil répondant à ces besoins en créant un modèle se basant sur les opérations de la compagnie, mais également prenant en compte les recherches effectuées sur le sujet. Le mémoire présente également la méthode de résolution du modèle ainsi que l'outil d'aide à la décision utilisé par les planificateurs de la compagnie.

1.3. Structure du mémoire

Le prochain chapitre présentera une revue de la littérature des problèmes de tournées de navires ainsi que les méthodes de résolution disponibles. Par la suite, le chapitre 3 présentera en détail le problème et une formulation mathématique sera apportée au problème pour des fins d'illustration et de clarté. Le chapitre 4 décrira la méthode de résolution du problème ainsi que l'outil créé, et le chapitre 5 présentera et discutera des

résultats obtenus. Enfin, la conclusion replacera dans le contexte actuel l'apport de ce mémoire et explorera des avenues d'améliorations.

Chapitre 2 – Revue de la littérature

Dans ce chapitre, nous explorons les fondements des problèmes de tournées de véhicules, mais plus particulièrement les problèmes applicables à l'industrie maritime. Différentes variantes du problème de base sont présentées et des modèles adaptés à l'industrie maritime sont décrits. Les méthodes de résolution les plus couramment utilisées pour résoudre les problèmes de tournées de navires sont ensuite présentées et décrites. Enfin, une dernière section s'intéresse à l'aspect pratique de la recherche et aux efforts déployés pour appliquer les modèles théoriques aux situations réelles de l'industrie.

2.1. Problème de tournées de véhicules

Le problème rencontré par l'entreprise est similaire à un problème de tournées de véhicules (PTV), problème largement étudié et décrit dans la littérature. Dantzig et Ramser (1959) ont fourni la première formulation du problème de tournées de véhicules en s'intéressant à trouver les tournées les plus courtes pour une flotte de véhicules de livraison d'essence entre un terminal et des clients. Le problème de base consiste donc à trouver des tournées visitant tous les clients d'un réseau de façon à minimiser la distance parcourue par la flotte qui est basée à un dépôt.

Le problème de tournées de véhicules est une généralisation du problème du voyageur de commerce (PVC). Dans ce problème, un voyageur doit visiter toutes les villes d'une région en parcourant la plus petite distance. Malgré son apparente simplicité, le problème demeure très difficile à résoudre de manière optimale. Trouver une solution au problème par énumération pour les instances comportant un grand nombre de points est très difficile et long; un graphe comportant 15 clients et un dépôt génère jusqu'à $14!/2$ solutions différentes, soit près de $6,538 \times 10^{11}$ tournées différentes pour les problèmes

symétriques et plus de 1.308×10^{12} tournées différentes pour les problèmes asymétriques.

En raison de sa polyvalence (il s'applique à plusieurs industries différentes) et de sa complexité, il existe un très grand nombre de recherches portant sur le problème de tournées de véhicules, et de nombreux modèles différents existent. De plus, une grande part de cette recherche s'intéresse uniquement à la résolution du problème en proposant des méthodes exactes et des méthodes heuristiques. Laporte (2009) donne un bon aperçu du travail de modélisation effectué et décrit plusieurs méthodes de résolution du problème.

Nous verrons dans la prochaine section des généralisations et adaptations du problème de tournées de véhicules de base pour prendre en compte la réalité que vivent les entreprises de transport maritime. Nous explorons donc les formulations les plus courantes s'apparentant le plus au mode de fonctionnement de l'industrie maritime.

2.1.1. PVC avec contraintes de capacité

Le problème de tournées de véhicules sous contraintes de capacité est une généralisation du problème de base. Dans ce problème, chaque véhicule a une certaine capacité maximale qu'il ne peut dépasser lors de sa tournée. Chaque fois qu'un client est visité, le véhicule livre ou ramasse un cargo spécifié par un poids, un volume ou un indice de capacité. Ce poids ou volume est limité dans le véhicule de livraison, ce qui limite le nombre de clients visités dans une tournée. Le cargo peut également prendre la forme de passagers dans le transport de personnes.

Cette contrainte complique le problème. La solution doit minimiser la distance parcourue par les véhicules en prenant en compte le fait qu'ils ne peuvent pas desservir tous les clients dans un même voyage. Si un véhicule desservant une certaine sous-région dépasse sa capacité maximale, il est contraint de retourner au dépôt. D'autres véhicules doivent donc répondre à la demande dans la sous-région dont il reste des clients à servir, tout en essayant de minimiser leur propre distance. L'imposition de cette contrainte entraîne donc globalement des tournées plus longues, et individuellement des tournées plus courtes, car plus de véhicules doivent être utilisés pour répondre à la même demande.

Les véhicules partent donc du dépôt, desservent tous les clients en prenant en compte la contrainte de capacité, et retournent finalement au dépôt. Généralement, le nombre de véhicules (ou de tournées) est défini à l'avance. Kumar et Panneerselvam (2012) apportent une formulation au problème dans leur revue de la littérature sur les différentes formulations du PTV. La somme de la demande recueillie ou livrée doit toujours être inférieure à la capacité du véhicule; si une tournée comprend des cueillettes et des livraisons, la capacité ne doit pas être dépassée en cours de route.

Les problèmes appliqués dans des contextes réels ont habituellement cette contrainte de base, car les véhicules utilisés sont souvent contraints dans leur capacité.

2.1.2. PTV avec contraintes de fenêtres de temps

Le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps est une généralisation du problème de base où les clients spécifient des fenêtres de temps à l'intérieur desquelles ils doivent être servis. Le véhicule doit donc arriver chez le client avant la fin de la fenêtre de temps (limite supérieure) et s'il arrive avant le début (limite inférieure), il doit attendre avant de commencer à le servir.

Cette formulation est très courante dans les contextes de livraison ou de transport de marchandises pour un client externe, contexte très présent dans l'industrie maritime où des navires visitent une série de clients selon des fenêtres de temps. Dans ce problème, l'algorithme ne crée pas seulement une tournée, mais également un horaire de visite pour chaque client en prenant en compte le temps de déplacement entre chaque client, les temps d'attentes, les temps de service, etc. Solomon (1987) décrit le problème de PTV avec contraintes de fenêtres de temps, et propose plusieurs algorithmes pour le résoudre.

2.1.3. PTV avec une flotte hétérogène

Selon Anbuudayasankar et al. (2014), il existe quatre types de variantes touchant la flotte de véhicules d'une compagnie. La flotte peut être homogène, c'est-à-dire que chaque véhicule de la flotte a des caractéristiques et des coûts identiques, ou elle peut être hétérogène, c'est-à-dire que les véhicules de la flotte ont des coûts similaires, mais des capacités différentes. Les flottes peuvent également être fixes ou variables, c'est-à-

dire que la taille de la flotte est fixée tandis que dans le cas d'une flotte variable, elle n'est pas nécessairement fixe.

En plus de ces distinctions, le choix des types de véhicules peut être également une variable de décision pour le problème : le planificateur veut ainsi savoir quelle flotte utiliser tout en déterminant la tournée de chaque véhicule. Koç et al. (2016) effectuent un recensement des multiples variantes du problème de tournées de véhicules avec une flotte hétérogène.

2.1.4. PTV avec cueillettes et livraison

Une des variantes du problème classique de tournées de véhicules concerne le type d'opération des véhicules. Tel que recensé dans l'ouvrage de Anbuudayasankar et al. (2014), il y a quatre principaux modes d'opérations pour une flotte de véhicule : a) la cueillette ou la livraison pure, b) la livraison précédant la cueillette, c) la cueillette précédant la livraison, et d) la livraison et la cueillette combinés.

Le premier mode s'intéresse uniquement à la cueillette ou à la livraison chez des clients, et peut-être considéré comme le problème de tournées de véhicules classique. Le deuxième et le troisième modes s'intéressent à effectuer un type d'activité (cueillette ou livraison) avant un autre. Enfin, le quatrième type d'opération s'intéresse à effectuer, de façon mixte, la cueillette et la livraison, mais la cueillette chez un client doit précéder la livraison.

La livraison et la cueillette combinées incluent donc une contrainte de préséance : un cargo doit être ramassé avant d'être livré. Dumas et al. (1991) définissent le problème de cueillette et livraison sous contraintes de fenêtres de temps. Les auteurs notent que le problème a certaines similitudes avec le problème de transport à la demande (*dial-a-ride problem* ou DARP).

Dans plusieurs cas, ce problème de cueillette et livraison est contraint par la quantité qui peut être transportée dans le véhicule. Pour certains types d'opérations, les véhicules ne peuvent que transporter un chargement plein. Ils ramassent donc le produit chez un client, et vont le livrer directement après la cueillette à sa destination correspondante.

Le problème de base de tournées de navires s'intéresse à ramasser le cargo d'un client à un ou plusieurs ports et à le livrer à un ou plusieurs ports, et ce, dans des fenêtres de temps spécifiées par le client. Les flottes utilisées sont généralement hétérogènes et tous les véhicules sont contraints à des capacités. Les quatre généralisations précédentes sont donc toutes applicables au problème de tournées de navires de base; la prochaine section s'intéresse aux contraintes et formulations supplémentaires qui existent dans la littérature quant aux problèmes de tournées de navires.

2.2. Problème de tournées de navires

Le problème de tournées de véhicules est central dans l'optimisation des systèmes de transport des entreprises. Pour chaque mode de transport, il s'adapte de façon différente en fonction de la structure des opérations des transporteurs. L'industrie maritime ne fait pas exception, bien que la recherche sur ce mode de transport ait été moins importante. Ronen (1982) explique ce phénomène en mettant à l'avant que l'industrie maritime a souffert pendant longtemps d'un manque de visibilité face aux autres modes de transport et qu'elle est également moins structurée, ce qui entraîne une grande diversité d'opérations. Il soutient également que le problème de base est difficile à standardiser, que les navires font souvent face à plus d'incertitude, ce qui limite la recherche sur des problèmes statiques et que l'industrie maritime a une attitude plus conservatrice face à ce type de recherche.

L'industrie maritime a une grande diversité d'opérations, et chaque type d'opération amène ses propres contraintes. Un élément reste cependant central aux problèmes de tournée de navires, soit l'objectif de minimisation des coûts de transport ou de maximisation des revenus. Bien que le coût de transport soit généralement influencé par la distance parcourue, dans bien des cas pratiques les opérations sont complexes et plusieurs coûts et revenus peuvent être affectés par d'autres facteurs.

Ronen (1982) énonce certaines différences entre les problèmes de tournées de véhicules routiers et les problèmes de tournées de navires. Les navires sont très différents les uns des autres; ils peuvent avoir des fonctions, des capacités ou des structures de coûts complètement différentes, à la différence des flottes relativement homogènes dans les problèmes de base. De plus, la façon dont les horaires et les tournées sont effectués varie énormément en fonction des opérations des transporteurs,

et l'horizon de planification peut également changer. Enfin, les navires sont rarement basés à un port, et opèrent continuellement; les horaires sont construits avec très peu d'arrêts et de périodes tampons, ce qui accentue les impacts des délais sur les opérations.

2.2.1. Classifications des problèmes

En raison de la grande diversité des problèmes, une distinction entre trois modes d'opération a été effectuée par Lawrence (1972) et reprise par plusieurs auteurs. Cette distinction a été décrite à la section 1.1.2.

Outre ces trois types d'opération, plusieurs classifications additionnelles ont été développées pour structurer les opérations des compagnies maritimes. Ronen (1982) propose un système de classification non exhaustif pour les problèmes de tournées de navires :

- Mode d'opération (lignes de transport, transport itinérant ou flotte industrielle)
- Contraintes de fenêtres de temps (spécifiées ou non)
- Origine unique ou multiple
- Nombre de ports de chargement et de déchargement (unique ou multiple)
- Nombre de ports de visite par voyage (unique ou multiple)
- Types de cargos (unique ou multiple)
- Taille de la flotte (un navire ou plusieurs)
- Types de navires (flotte homogène ou hétérogène)
- Demande déterministe, stochastique ou faisant partie des variables de décision
- Vitesse constante ou variable
- Composition de la flotte statique, variable ou étant une variable de décision
- Contraintes de ports / de routes pour les navires
- Coûts fixes, variables ou mixtes
- Objectifs de maximisation, minimisation ou autres objectifs
- Utilisation ou non d'opérations de transbordement

Cette liste permet de voir qu'il est possible d'avoir des opérations très différentes d'une compagnie à l'autre, et même parfois à l'intérieur d'une même compagnie. Les modes d'opération restent cependant les distinctions les plus importantes à faire entre les différents problèmes. En effet, les problèmes rencontrés dans le même mode

d'opération tendent à être de nature similaire, mais ayant quelques différentes contraintes différentes.

Christiansen et al. (2007) établissent également une classification des problèmes en logistique maritime, mais se basent principalement sur les niveaux de planification. Les problèmes sont donc classés sur trois niveaux : le stratégique (à long terme), le tactique (à moyen terme) et l'opérationnel (à court terme). Les problèmes de tournées de navires se situent généralement dans la catégorie des problèmes tactiques, bien que certains problèmes puissent également toucher la planification à long terme et la planification opérationnelle. Les problèmes stratégiques touchent généralement la taille de la flotte et les types de navires à utiliser. Les problèmes tactiques touchent les tournées et horaires des navires, mais également des ajustements à la taille de la flotte durant les saisons de navigation. Enfin, les décisions opérationnelles s'intéressent à la vitesse des navires sur des routes particulières et l'ordre des navires pour le chargement et déchargement.

Ronen (1982), Ronen (1993), Christiansen et al. (2004) et Christiansen et al. (2008) ont fait une revue de la littérature sur les problèmes de tournées de navires sur les trois types de modes.

2.2.2. Opérations itinérantes

Dans cette recherche, nous analysons les opérations d'un transporteur canadien qui fonctionne principalement de façon itinérante. Les compagnies opèrent généralement une flotte de navire répartie dans un réseau, et en fonction des requêtes de transport de clients, des tournées sont créées pour répondre à la demande. Les clients peuvent conclure une entente à long terme avec le transporteur où un certain tonnage annuel à transporter entre deux points est connu à l'avance, ou peuvent conclure des contrats à court terme (*spot*) pour transporter des cargos quelques semaines à l'avance.

Appelgren (1969) a été un des premiers auteurs à s'intéresser au problème de tournées de navires itinérants (*Tramp Scheduling and Routing Problem* ou TSRP). Le problème étudié consiste à assigner une séquence de cargos à des bateaux pour créer un horaire pour chaque tournée de la façon la plus optimale possible. Son problème est soumis à des contraintes de fenêtres de temps pour ramasser les cargos chez les clients. Il introduit un concept de pénalités et primes pour prendre en compte le caractère dynamique de la demande; il concentre les navires les plus contraints en y plaçant le

plus de contrats possible et libère les navires les moins contraints pour réaliser des contrats à court terme. Pour ce faire, il met en place une prime artificielle qui augmente si un bateau n'est pas utilisé pendant un certain temps. Ces trous dans l'horaire sont par la suite comblés manuellement par des demandes ponctuelles. L'auteur note que le problème peut être résolu à optimalité seulement si le nombre de cargos et de navires demeure bas. Appelgren (1971) simplifie grandement le problème afin de prendre en compte plus de cargos et de navires et utilise un algorithme de séparation et évaluation pour trouver une solution.

Ronen (1986) décrit un problème de création d'horaires et de tournées à court terme : les navires chargent d'un seul port d'origine, déchargent à un ou plusieurs ports de destinations, et reviennent vides vers l'origine. La flotte de ce problème est hétérogène, car les capacités des différents navires, les contraintes de visite des ports et les coûts sont différents. Chaque port de destination peut être desservi par plusieurs navires, ce qui implique que des navires peuvent avoir une capacité inférieure à la taille du cargo à livrer. L'auteur propose trois avenues de solutions pour résoudre le problème et les compare entre elles. Il propose un algorithme de recherche locale, une méthode de génération d'horaires de façon aléatoire et un algorithme exact basé sur l'énumération de solutions binaires. La troisième méthode permet de résoudre le problème à optimalité, mais ne fonctionne pas pour les tournées de grande taille.

Dans les problèmes précédents, la vitesse de navigation considérée était constante, c'est-à-dire que les navires naviguaient toujours à la même vitesse entre deux ports. Brown et al. (1987) ont été parmi les premiers auteurs à combiner le concept de vitesse comme variable de décision et le TSRP avec fenêtres de temps. Les auteurs formulent un problème où la vitesse peut être sélectionnée dans un intervalle de vitesse entre deux ports lorsque le bateau est vide seulement. Gatica et Miranda (2010) et Fagerholt et al. (2010) proposent des problèmes où la vitesse entre deux ports est une variable de décision en tout temps. Pour incorporer plusieurs contraintes dans leur modèle, ils rendent discrètes les fenêtres de temps des clients; ils imposent plusieurs temps prédéfinis pour arriver aux ports de chargement ou de déchargement à la place d'utiliser un intervalle de temps comme dans la formulation classique du TSRP avec fenêtres de temps. Norstad et al. (2011) et Wen et al. (2016) utilisent également la vitesse comme variable de décision et concluent que le choix des vitesses de navigation dans un TSRP

peut avoir des impacts significatifs sur les coûts d'opération de la flotte et les profits des transporteurs.

Dans un TSRP de base, un navire charge généralement un cargo à un port d'origine et va le porter à un ou plusieurs ports de destination. Fagerholt et Christiansen (2000) considèrent un problème où différents cargos peuvent être chargés dans un navire avec plusieurs cales de taille variable. En effet, certains navires sont équipés de séparateurs pouvant se déplacer, ce qui permet aux cales d'avoir un volume différent et d'obtenir plus de flexibilité pour le chargement de différents clients. Jetlund and Karimi (2004) formulent un problème où un navire-citerne peut transporter plusieurs produits chimiques dans plusieurs cales différentes de taille fixe (entre 10 et 20 par navire). En raison de la réactivité chimique des produits transportés, des contraintes de préséance des cargos dans chaque cale sont prises en compte. Les deux problèmes précédents ne concernent pas uniquement la création de tournées et d'horaires, mais également l'allocation des bons cargos aux bons navires en fonction de la capacité de chaque cale et de contraintes de préséance.

2.2.3. Charge fractionnée

Jusqu'à présent, les problèmes étudiés ont une taille fixe de cargo à transporter. Ce type d'opération ne capture pas toujours la réalité des transporteurs itinérants qui peuvent opter pour des tailles de cargo plus ou moins grandes en fonction du navire qui visitera un client. En effet, les contrats à long terme permettent une certaine flexibilité quant à la taille des cargos, ce qui permet notamment le fractionnement des charges d'un client sur plusieurs navires et le chargement de multiples cargos différents sur un même navire. Ce type d'opération est nécessaire quand la quantité à transporter excède la capacité des navires de la flotte. Brønmo et al. (2007) introduisent un modèle qui prend comme variable de décision la taille de chaque cargo transporté dans un intervalle et qui permet le transport de plusieurs cargos dans le même navire. La flotte du problème est hétérogène au niveau de la capacité et des coûts des navires, et il n'y a pas de contraintes de compatibilité entre les cargos à transporter. Cette généralisation du problème de base est particulièrement importante pour les entreprises de transport itinérant, car le choix de la taille des charges permet de prendre plusieurs petits cargos ponctuels dans des cales qui pourraient être vides.

En se basant sur la prémisse que les tailles de cargos peuvent être flexibles, Andersson et al. (2011) proposent un modèle qui permet le fractionnement des charges sur plusieurs navires. Les cargos peuvent être séparés entre différents navires, ces derniers n'ayant pas eu la capacité nécessaire pour le transport de la charge complète. Ce problème peut représenter une avenue intéressante pour les transporteurs, car le fractionnement des charges permet l'utilisation plus grande de la capacité des navires d'une flotte, ce qui a un potentiel d'augmenter les revenus de la compagnie.

2.2.4. Problèmes combinés de gestion des stocks et de tournées

Les transporteurs maritimes de cargos en vrac établissent souvent des partenariats avec des entreprises afin que non seulement les cargos soient transportés d'un port d'origine à un port de destination, mais que les stocks au port de chargement et de déchargement soient gérés de façon adéquate. Les problèmes combinés de gestion des stocks et de tournées de véhicules (*Inventory Routing Problems*) représentent une classe à part entière de problèmes, mais certains TSRP incluent la gestion des stocks chez les clients et plusieurs problèmes de tournées industrielles sont axés sur la gestion des stocks.

Christiansen et Nygreen (1998) présentent un problème de gestion des stocks où une flotte hétérogène de navires doit desservir des usines de production et des points de consommation pour un seul produit. Les stocks aux points de production ne peuvent dépasser la capacité de stockage du point et les stocks aux points de consommation ne doivent pas être nuls, car cela entraîne un arrêt de production dû à un manque de ressources. Le problème prend en compte deux types de fenêtres de temps : une qui est donnée par le client et une autre qui est dérivée implicitement en fonction des stocks. Les stocks à chaque point créent donc des fenêtres de temps artificielles qui sont par la suite utilisées dans le problème.

Ronen (2002) présente un problème de gestion des stocks et tournées de navires où une flotte de navires-citernes hétérogènes doit visiter un port de production et un port de consommation et doit sélectionner, parmi plusieurs produits, la quantité à transporter pour maintenir les stocks constants à tous les ports. Chaque port produit ou consomme un ou plusieurs produits, et un taux de production et de consommation constant est

applicable pour chaque type de produit. Pour simplifier le problème, les navires ont des espaces de transport dédiés pour chaque cargo, mais chaque navire ne peut transporter qu'une combinaison limitée de produits, le tout sous des capacités différentes d'un élément de la flotte à l'autre. Le problème est résolu en deux temps en déterminant d'abord la quantité de chaque cargo à transporter pour répondre aux contraintes de stock avant d'élaborer des tournées. Al-Khayyal et Hwang (2004) ont formulé un problème similaire, mais les navires peuvent visiter plusieurs ports de production et plusieurs ports de consommation à chaque voyage.

Dans les problèmes classiques de TSRP, chaque requête de transport comporte un ou plusieurs ports de cueillette et un ou plusieurs ports de livraison. Dans le problème décrit par Hennig et al. (2011), des requêtes de livraison avec un tonnage et un type de cargo spécifié sont envoyées au transporteur, et ce dernier peut choisir parmi plusieurs ports de production et plusieurs navires pour répondre à la demande. La flotte est hétérogène en termes de coûts et de capacité, et chaque navire peut transporter plus d'un type de cargo. Le problème comporte l'objectif de déterminer la meilleure tournée minimisant les coûts de transport tout en respectant les fenêtres de temps des livraisons et la quantité à transporter dans chaque navire pour répondre aux requêtes de transport.

En somme, comme Christiansen et Nygreen (1998) l'ont proposé, la gestion des stocks peut être mise en place en fixant la quantité à transporter et en choisissant des fenêtres de temps implicites pour effectuer le transport de marchandises, ce qui assure que le port de chargement ne soit jamais en surcapacité et le port de déchargement en pénurie de stocks.

2.2.5. Formulation robuste

Le transport maritime est assez différent des autres modes de transport, notamment en raison du fait que les navires vont naviguer continuellement et peuvent arriver à toute heure de la journée à un port de chargement et de déchargement. Dans certaines régions, les opérations portuaires se déroulent tout au long de la journée, mais dans bien des cas, des fenêtres de temps chaque jour sont imposées sur l'arrivée des navires en plus des fenêtres de temps générales pour la cueillette ou la livraison des cargos. De plus, les opérations des navires sont très incertaines en raison des délais causés par la météo ou le trafic dans des canaux et écluses. La concurrence de ces deux facteurs

peut entraîner d'importants temps d'attente au port si un bateau arrive en soirée ou la fin de semaine (lorsque le port est fermé).

Christiansen et Fagerholt (2002) proposent un modèle prenant en compte cette réalité en mettant en place une pénalité proportionnelle au risque de dépasser les fenêtres de temps du port. Si l'arrivée d'un navire est prévue près de la fin d'une fenêtre de temps, une pénalité est imposée, ce qui impose aux solutions optimales d'être plus robustes. Cette formulation permet aux tournées et horaires de prendre en compte la réalité stochastique des temps de navigation des navires tout en restant relativement simple à formuler et à résoudre.

2.3. Méthodes de résolution exactes

Les méthodes de résolution exactes sont par définition des méthodes qui permettent l'obtention d'une solution optimale à un problème. Dans certains problèmes logistiques, la solution optimale peut être obtenue assez rapidement avec des méthodes très simples (par exemple, le problème du plus court chemin). Dans d'autres cas, incluant le problème de tournées de véhicules, la solution optimale peut être plus difficilement atteinte, et dans des cas complexes, quasi impossible à obtenir. Néanmoins, les méthodes de résolution exactes ont été utilisées dans un bon nombre de problèmes de tournées de navires; la plupart de ces problèmes sont assez contraints (ce qui limite l'espace de solution) et le nombre de cargos et de navires est relativement modeste.

Parmi les méthodes utilisées pour résoudre le TSRP, Appelgren (1969) utilise la décomposition de Dantzig-Wolfe pour séparer le problème en des sous-problèmes indépendants pour chaque navire. Cependant, cette méthode donne lieu à des solutions qui ne sont pas entières, c'est-à-dire que des variables qui auraient normalement pris des valeurs binaires (assignation ou non d'un cargo à un navire) pouvaient prendre des valeurs non entières (par exemple 0,4). Pour prendre en compte cette contrainte d'intégralité, Appelgren (1971) utilise l'algorithme de séparation et évaluation.

Andersson et al. (2011) utilisent une version différente de l'algorithme de séparation et évaluation en générant un ensemble d'horaires réalisables et non dominés avec un générateur *a priori*. Les limites supérieures pour l'évaluation sont estimées à l'aide d'une méthode qui calcule le levage maximal d'un navire assigné à une tournée en particulier.

Brown et al. (1987) utilisent une méthode de partitionnement d'ensemble. Un algorithme de génération d'horaires génère tous les horaires possibles en plaçant un à la suite de l'autre des cargos où la fenêtre de temps est respectée. Un deuxième algorithme calcule par la suite les coûts de chaque horaire généré. Enfin, un algorithme d'optimisation résout un problème de partitionnement d'ensemble avec les horaires générés pour trouver une solution optimale. Cette méthode prend chaque horaire généré pour chaque navire et tente de trouver l'ensemble d'horaires minimisant les coûts sous contrainte que chaque cargo soit transporté exactement une fois. Pour faciliter la recherche d'une solution optimale, les auteurs introduisent la notion d'élasticité des contraintes en permettant l'inactivité des navires ou l'utilisation de navires loués à d'autres transporteurs.

Les méthodes exactes utilisées donnent des solutions dans un temps de calcul assez bas pour de petites instances. Les méthodes décrites précédemment ont été appliquées à des tests pouvant atteindre un maximum d'une centaine de cargos. Pour les problèmes de plus grande taille, les heuristiques et métaheuristiques sont préférées.

2.4. Heuristiques et métaheuristiques

En raison de la complexité des problèmes de tournées de véhicules pour les réseaux comportant plusieurs véhicules ou plusieurs points de demande, et en raison du temps requis pour résoudre des problèmes complexes avec des méthodes exactes, plusieurs chercheurs se sont penchés sur des méthodes de résolution heuristiques. Une heuristique est généralement un algorithme créé spécifiquement pour un problème ou une classe de problèmes et qui permet d'atteindre une solution qui n'est pas nécessairement optimale, mais dans un temps de résolution plus court. Il est parfois nécessaire de trouver de bonnes solutions en un temps court, surtout dans des contextes pratiques où la prise de décision doit se faire sur une base régulière par les opérateurs responsables des horaires.

Chaque heuristique est unique, car elle est habituellement créée ou adaptée pour répondre aux contraintes propres à un seul problème. Il existe cependant des familles d'heuristiques qui reposent toutes sur un même mécanisme pour trouver une solution. Les familles d'heuristiques les plus utilisées pour la résolution des problèmes de tournées de navires seront explorées dans cette section.

2.4.1. Heuristiques de base

Boffrey et al. (1979) décrivent une méthode heuristique simple pour générer des tournées de navires. L'algorithme part de tournées simples composées d'une paire de ports à visiter (une cueillette et une livraison) et tente d'ajouter à ces tournées simples des ports supplémentaires. Les ports supplémentaires sont ajoutés à un voyage existant seulement si les contraintes de fenêtres de temps et de chargement sont respectées et si l'ajout maximise la valeur de la fonction objectif comparativement à tous les mouvements possibles.

Ronen (1986) présente une heuristique de minimisation des coûts qui fonctionne en calculant préalablement une tournée qui minimise le coût requis pour desservir chaque port avec la flotte actuelle. Ensuite, les navires les plus contraints de la flotte sont sélectionnés et l'algorithme tente d'assigner les ports de visites les plus distants jusqu'aux plus proches. Pour que l'assignation fonctionne, les contraintes doivent être respectées et le coût d'assignation ne doit pas dépasser un critère de coût prédéfini. Ce critère de coût est calculé à l'aide des tournées générées initialement multipliées par un facteur qui est relaxé graduellement à mesure que les ports sont assignés à des tournées. Plusieurs facteurs sont utilisés sur plusieurs séries, et la série minimisant les coûts est retenue à la fin comme horaire.

Les deux heuristiques précédentes illustrent bien le travail effectué afin de trouver des méthodes de solution simples à des problèmes de tournées de navires. Ces méthodes ne font pas partie de famille d'heuristiques en particulier, car leur fonctionnement est unique.

2.4.2. Heuristiques de recherche à voisinage local et étendu

Les heuristiques fonctionnent habituellement en deux phases : une phase de construction d'une solution et une phase d'amélioration. Ces heuristiques de recherche à voisinage local ou étendu s'intéressent donc à trouver une bonne solution initiale et, par après, à l'améliorer pour trouver un optimum qui deviendra la solution au problème. Malgré la popularité et la simplicité de tels algorithmes, peu d'auteurs semblent les avoir utilisés pour résoudre le TSRP.

Brønmo et al. (2007) décrivent une heuristique de recherche locale à plusieurs points de départ. L'algorithme génère une série de solutions initiales en assignant de façon aléatoire une partie de tous les cargos, et en assignant ensuite les cargos restants dans les tournées maximisant le profit. La composante aléatoire de l'algorithme de construction permet de créer des solutions qui sont diversifiées et la composante biaisée permet de s'assurer que les solutions créées sont prometteuses. Par la suite, l'algorithme effectue deux types de recherches : une recherche rapide qui tente d'améliorer la solution jusqu'à ce qu'un optimum local soit trouvé et une recherche étendue qui permet de chercher dans un espace un peu plus grand d'autres optimums locaux. Le 'déplacement' d'une solution à son voisinage est effectué grâce à des réassignations, des échanges ou des suppressions de requêtes de transport d'une tournée vers une autre (ce qui inclut la cueillette et la livraison d'un cargo).

Korsvik et al. (2011) proposent une heuristique de recherche à voisinage étendu pour résoudre le TSRP avec des charges fractionnées. Une solution initiale est construite en assignant chaque cargo à un véhicule de façon aléatoire et cette solution est améliorée en effectuant une recherche dans les voisinages locaux. Cette recherche s'effectue en réassignant ou échangeant de cargos d'une tournée à l'autre comme l'heuristique précédente, mais introduit d'autres opérateurs pour se déplacer d'une solution à une autre vers un optimum local. À partir de l'optimum local, une recherche étendue est effectuée en détruisant une partie ou la totalité d'une tournée et en insérant les cargos dans les autres tournées. La nouvelle solution est évaluée et si la solution est meilleure que l'optimum local, cette nouvelle solution devient le nouveau point de départ. L'algorithme effectue cette recherche étendue sur un nombre fixe d'itérations, et renvoie à la fin la meilleure solution trouvée.

Malliappi et al. (2011) introduisent une heuristique de recherche à voisinage variable pour résoudre le TSRP de base où le profit total doit être maximisé. Pour ce type d'algorithme, une bonne solution initiale est requise, ce qui motive l'emploi d'un algorithme d'insertion qui sélectionne les cargos offrant le plus grand potentiel de profit et en les insérant dans les tournées les plus profitables. Par la suite, l'algorithme brasse la solution trouvée en réassignant et en échangeant des cargos de la solution même si le mouvement n'améliore pas la solution, puis un certain pourcentage de tous les cargos d'une tournée sélectionnée aléatoirement sont supprimés de la tournée et réassignés à d'autres navires si cela améliore la solution. Après ce brassage, la solution est

améliorée en effectuant une recherche dans le voisinage local de la solution. Lorsqu'un optimum local est trouvé, l'algorithme renvoie la solution.

2.4.3. Heuristiques de recherche avec tabous

Les heuristiques de recherche locale sont des algorithmes relativement simples qui permettent d'obtenir de bonnes solutions assez rapidement. Parfois, certains problèmes très contraints nécessitent des outils afin d'explorer davantage l'espace des solutions et ainsi trouver de meilleures solutions. Les métaheuristiques sont des algorithmes qui allient plusieurs mécanismes pour explorer l'espace de solution et visiter plusieurs optima locaux afin d'en trouver un qui sera de très bonne qualité.

Les heuristiques de recherche avec tabous ont été introduites par Glover en 1977, et appliquées par la suite à des problèmes de tournées de véhicules. L'algorithme fonctionne en partant d'une solution initiale et en améliorant cette solution en effectuant des « mouvements » (assignations, échanges). Afin d'explorer l'espace de solution le plus efficacement possible, l'algorithme interdit certains mouvements qui ont été effectués récemment par l'heuristique en imposant un 'tabou' qui dure un nombre fixe d'itérations. Ainsi, l'algorithme peut explorer des voisinages qui donnent des solutions moins bonnes pour potentiellement atteindre de meilleurs optima locaux.

Nanry et Barnes (2000) proposent une heuristique de recherche avec tabous pour résoudre le problème de cueillette et livraison avec fenêtres de temps à plusieurs véhicules (m-PDPTW), problème très similaire au TSRP. L'algorithme insère les paires de cueillette et livraison dans les tournées en respectant les contraintes de fenêtre de temps, ce qui donne une solution réalisable qui est utilisée comme solution de départ. Par la suite, l'algorithme effectue trois types de mouvements (assignement, échange et réorganisation interne) pour se déplacer de solution en solution. L'algorithme évalue comment les contraintes de fenêtres de temps sont serrées et dirige la recherche de solution vers les tournées les moins contraintes.

Landrieu et al. (2001) utilisent un algorithme similaire pour résoudre un problème de cueillette et livraison avec fenêtres de temps à un seul véhicule (I-PDPTW). Il utilise une heuristique de construction pour obtenir une première solution qui n'est pas nécessairement réalisable, et utilise une pénalité de revisite en plus du critère tabou pour quitter une sous-région de l'espace de solution.

Cordeau et al. (2001) proposent une heuristique de recherche avec tabous pour résoudre un problème de tournée de véhicule avec fenêtre de temps (VRPTW). L'algorithme permet l'exploration de solutions non réalisables en relaxant les contraintes de capacité, de durée maximale et des fenêtres de temps, ce qui est particulièrement utile pour résoudre des problèmes dans des situations très contraintes. Un paramètre de diversification est également utilisé pour mieux explorer l'espace de solution. Cordeau et Laporte (2003) présentent une heuristique pour résoudre le problème de transport à la demande (*dial-a-ride problem* ou DARP), similaire au PDPTW et au TSRP. L'algorithme comporte également un paramètre de diversification de l'espace de recherche ainsi que la capacité à relaxer les contraintes pour faciliter l'exploration de solutions dans des instances très contraintes.

Korsvik et al. (2010) utilisent une heuristique de recherche avec tabous pour résoudre le TSRP. Ils adaptent l'heuristique développée par Cordeau et al. (2001) et Cordeau et Laporte (2003) pour le problème spécifique et ajoutent une phase finale d'intensification pour aller chercher des gains potentiels. La phase d'intensification se base sur les mêmes mouvements que Brønmo et al. (2007) ont introduit dans leur heuristique de recherche locale. Korsvik et Fagerholt (2010) proposent la même heuristique pour la résolution du TSRP avec des quantités flexibles de cargos. Ils ajoutent une heuristique rapide pour déterminer la quantité optimale de cargos à transporter en se basant sur trois critères : le gain (ou la perte) de revenus associé à la réduction du cargo, la violation de la contrainte de capacité sur un navire et le temps de déchargement (basé sur la taille du cargo).

2.4.4. Autres algorithmes de résolution

Il existe beaucoup d'heuristiques et de métaheuristiques utilisées pour résoudre le problème de tournées de véhicules. Nous notons cependant deux métaheuristiques qui ont été utilisées pour la résolution du TSRP et du PDPTW et qui pourraient jeter un regard intéressant sur de nouvelles méthodes appliquées à l'industrie maritime.

Sombuntham & Kachitvichayanukul (2010) proposent une méthode d'optimisation des essaims de particules (*Particle Swarn Optimisation* ou PSO) pour résoudre le problème de tournées de véhicules avec cueillette et livraison sous des fenêtres de temps. L'algorithme PSO fonctionne en représentant une solution par une particule dans un

espace multidimensionnel. Des solutions sont cherchées en appliquant un vecteur de vitesse à la particule pour la déplacer. Au début, un ensemble de plusieurs particules (plusieurs tournées initiales) se trouve dans l'espace multidimensionnel à des positions aléatoires avec un vecteur de vitesse aléatoire. À la première itération, le nuage de particule se déplace selon les vecteurs de chaque particule, et le vecteur de vitesse est réévalué en fonction de la meilleure position de la particule, mais également de la meilleure position de l'essaim. Les itérations terminent à l'atteinte d'un critère d'arrêt, et l'algorithme renvoie la meilleure solution trouvée.

Lin and Liu (2011) utilisent un algorithme génétique (GA) pour la résolution d'un TSRP. Les algorithmes génétiques utilisent les principes de la théorie de l'évolution pour améliorer une population de solutions candidates. L'algorithme commence alors avec une population de solutions aléatoires réalisables, et pour chaque chromosome de la solution, une aptitude de survie est calculée basée sur la valeur de la solution. Les solutions sont classées et une probabilité de sélection est associée à cette aptitude. Un chromosome est sélectionné en fonction de cette probabilité et est croisé avec un autre chromosome d'une autre solution candidate pour former une progéniture. La progéniture peut également être sujette à une mutation génétique qui altère la solution. Les croisements et mutations génétiques sont effectués sur tous les membres de la population sur un nombre fixe d'itérations, et la meilleure solution est retenue à la fin.

2.5. Applications pratiques des problèmes de tournées de navires

L'application pratique des solutions développées en recherche opérationnelle a toujours été un défi pour les chercheurs. La mise en place des outils en entreprise requiert souvent une adaptation du modèle pour répondre aux besoins spécifiques de l'entreprise, ce qui requiert le développement de modèles qui sont flexibles et proches de la réalité opérationnelle des entreprises. Christiansen et al. (2007) soutiennent qu'une large part de la recherche opérationnelle en transport n'est pas faite en collaboration avec l'industrie sauf dans le cas de l'industrie maritime. En effet, les chercheurs doivent collaborer davantage avec les entreprises afin de mieux comprendre les problèmes de transport maritime, problèmes qui sont souvent méconnus du public à la différence du transport routier ou aérien.

Dans leur étude, Canen & Scott (1995) s'interrogent sur les facteurs qui ont contribué à la réussite ou à l'échec de l'implantation de logiciels de création d'horaire et de tournées. Une collaboration est souvent nécessaire entre les chercheurs et l'industrie pour le développement de systèmes qui fonctionnent et qui permettent de résoudre des problèmes réels.

Certains auteurs soutiennent que les outils d'optimisation pour des problèmes statiques sont peu utiles pour les entreprises et que l'accent devrait être mis sur le développement d'outils interactifs et de simulation pour augmenter l'efficacité des planificateurs au sein des entreprises. En raison de la grande incertitude dans l'industrie du transport maritime, les algorithmes et modèles de recherche opérationnelle ne sont pas toujours applicables à l'industrie. En gardant cette idée en tête, Boykin and Levary (1985) développent un système de simulation pour analyser des alternatives et prendre des décisions pour les opérations courantes d'une flotte industrielle.

Au lieu de compter sur des outils d'optimisation, Miller (1987) tente de résoudre un problème tactique de création d'horaires et de tournées en créant un système qui analyse la faisabilité et les coûts des changements qu'un utilisateur peut choisir. Un horaire de base est créé automatiquement par le système et l'utilisateur (généralement le planificateur) peut effectuer des changements manuels à l'horaire selon son expérience. Chaque fois qu'un changement est effectué, il peut voir son impact sur les coûts et la violation de contraintes. Le système comporte également une série de mouvements automatiques que l'utilisateur peut accepter ou non pour améliorer l'horaire. À la place d'être utilisé pour trouver un horaire et une tournée optimaux, l'outil permet d'évaluer des scénarios et l'impact de décisions des planificateurs de la compagnie.

Bausch et al. (1998) décrivent quatre principes pour qu'un système de planification des tournées et horaires puisse être bien implanté dans l'industrie. Le système de planification ne doit pas remplacer un planificateur, mais plutôt le supporter, car les opérations réelles d'une compagnie sont très complexes et malgré l'effort de modélisation des chercheurs, l'expérience d'un utilisateur est nécessaire pour faire fonctionner adéquatement le système. Le système doit également être convivial pour permettre aux utilisateurs de bien l'utiliser et d'interagir efficacement avec les fonctionnalités de l'outil, et doit pouvoir rouler sur un ordinateur personnel pour encourager sa démocratisation au sein de l'entreprise. Enfin, le système doit permettre

de générer des horaires de façon rapide. Ces quatre conditions sont utilisées pour bâtir un outil d'optimisation basé sur le partitionnement d'ensemble, mais où une interface utilisateur basée sur Excel permet d'interagir efficacement avec le programme et ses données.

Fagerholt (2003) explique le déroulement typique d'un projet de collaboration entre des chercheurs et des entreprises maritimes pour la création d'un outil d'optimisation. Souvent, les employés sont réticents à utiliser un tel outil, car ils croient que les modèles informatiques ne sont pas assez puissants pour capturer la complexité des opérations d'une compagnie maritime. En établissant cette collaboration, les chercheurs en ont appris davantage sur le fonctionnement des opérations maritime et ont pu créer des modèles plus fidèles à la réalité, et l'industrie a eu un aperçu des outils disponibles pour l'aide à la décision. Au gré du projet, l'auteur a trouvé que plusieurs objectifs de la planification pouvaient être conflictuels (l'atteinte de bonnes solutions versus le temps de calcul, la flexibilité du modèle versus sa spécificité), mais pour qu'un tel outil fonctionne adéquatement, il doit reposer sur une interface utilisateur efficace qui prend en compte le facteur humain.

Pour répondre à l'environnement hautement stochastique de l'industrie du transport maritime, Fagerholt et al. (2010) proposent un outil basé à la fois sur la simulation et sur l'optimisation pour résoudre un problème stratégique de TSRP. Ces outils représentent potentiellement une voie d'avenir pour la résolution des problèmes de tournées de navires itinérants.

Ce mémoire est développé conjointement avec une compagnie de transport maritime canadienne ayant des opérations de transport itinérant; le modèle et la méthode de résolution choisis sont spécifiquement adaptés à la réalité opérationnelle des entreprises de transport maritime, tout en restant généraux pour s'appliquer à des entreprises ou secteurs ayant des opérations similaires. Afin de permettre une interaction avec l'utilisateur, une interface utilisateur complète permet l'interaction avec les variables, les contraintes et les paramètres pour calibrer le modèle selon les besoins de la compagnie et demeurer le plus flexible possible.

Chapitre 3 – Description détaillée et formulation du problème

Ce chapitre présente une description ainsi qu'une formulation précise du problème. La première section porte sur les caractéristiques du problème, c'est-à-dire les éléments qui entreront dans le modèle. La seconde section se penche sur une formulation mathématique du problème pour des fins d'illustration.

3.1. Description du problème de base

Tel qu'expliqué dans le chapitre 1, nous faisons face à un problème de transport pour lequel il faut trouver une tournée et un horaire pour chaque navire minimisant les coûts variables de transport, tout en répondant à la demande des clients à l'intérieur d'une fenêtre de temps spécifiée. Des contraintes et paramètres additionnels sont pris en compte dans le modèle afin de refléter le plus fidèlement possible les opérations d'un transporteur maritime en itinérance sur de courtes distances d'expédition (*short-sea shipping*).

3.1.1. Particularités géographiques

Le réseau dans lequel opère la compagnie se situe dans les Grands Lacs, dans la voie navigable du Saint-Laurent, dans le golfe du Saint-Laurent et sur la côte est américaine. La compagnie opère uniquement dans cette région et ne dessert donc pas de client en dehors de ce réseau. Les navires peuvent atteindre les ports en empruntant les lacs et les voies navigables.

Afin de faciliter la classification des sommets du graphe (les ports) et de pouvoir mieux calculer les coûts de pilotage et les tarifs dans les canaux et les écluses, le réseau est

divisé en sous-régions. Ces divisions sont particulièrement importantes pour faciliter le calcul des délais météo.

Sous-région	Description	Limites géographiques
Supérieur	Entièreté des points dans le Lac Supérieur	Sault-Ste-Marie (Est)
Michigan	Entièreté des points dans le Lac Michigan	Récif de Detour (Nord)
Huron	Entièreté des points dans le lac Huron	Sarnia (Sud) Sault-Ste-Marie (Nord)
Érié	Entièreté des points dans le lac Érié	Entrée Sud de la rivière Détroit (Ouest) Port Colborne (est)
Ontario	Entièreté des points dans le Lac Ontario	Port Weller (Ouest) Cap-Vincent (est)
St-Laurent 1	Points sur le fleuve St-Laurent entre Cap-Vincent et Montréal	Cap-Vincent (Sud) Montréal (Nord)
St-Laurent 2	Points sur le fleuve St-Laurent entre Montréal et Québec	Montréal (Sud) Québec (Nord)
St-Laurent 3	Points sur le fleuve St-Laurent entre Québec et Les Escoumins	Québec (Sud) Les Escoumins (Nord)
Atlantique	Entièreté des points dans le golfe St-Laurent et sur la côte est canadienne et des États-Unis	Les Escoumins (Sud)

Tableau 1 – Sous-régions du réseau

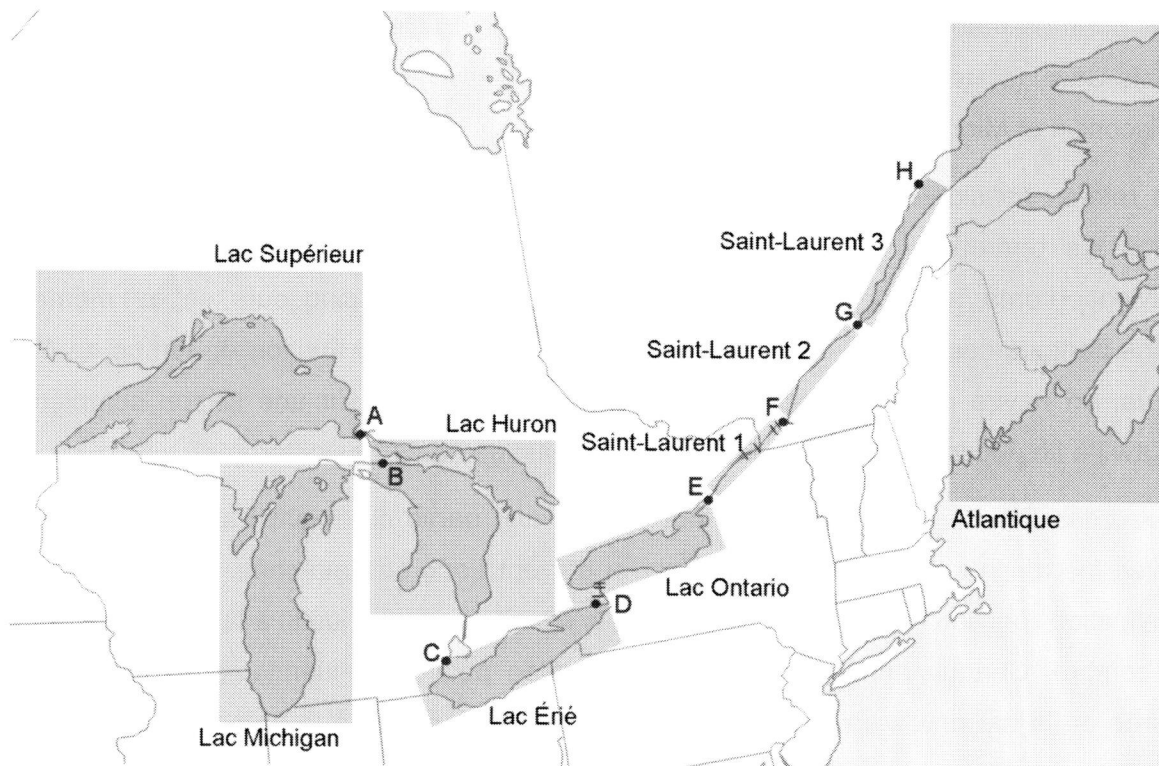


Figure 2 – Carte des sous-régions du réseau

Le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent comporte un total de 19 écluses (marquées en rouge sur la figure 2). Entre Montréal et le Lac Ontario, il y a un total de quatre canaux : le canal de la Rive-Sud (écluses de Saint-Lambert et de Côte-Sainte-Catherine), le Canal Beauharnois (deux écluses à Beauharnois), le Canal Wiley-Dondero (écluses de Snell et Eisenhower) et le canal d'Iroquois (une écluse). Entre le Lac Ontario et le Lac Érié, le canal Welland comporte un total de huit écluses entre la ville de Port Colborne et la ville de Port-Weller. Enfin, entre le lac Huron et le lac Supérieur, la rivière St Mary comporte quatre écluses.

Chaque écluse a une longueur de 233,5 mètres, une largeur de 24,4 mètres et une profondeur de 9,1 mètres, ce qui limite la taille des navires naviguant à travers le système. Actuellement, les navires d'une longueur maximale de 225,5 mètres et d'une largeur de 23,8 mètres peuvent naviguer dans les canaux. Ils peuvent également avoir un tirant d'eau maximal de 8,08 mètres (SLSDC, 2016). Les écluses dans la rivière St Mary's sont plus grandes que le système canadien.

Les ports du réseau se situent au Canada (provinces du Québec et de l'Ontario) et aux États-Unis (états de New York, Michigan, Pennsylvanie, Ohio, Indiana, Illinois, Wisconsin et Minnesota).

Le réseau considéré représente de courtes distances de navigation en comparaison avec les opérations des compagnies transocéaniques. En moyenne, la durée de navigation entre une cueillette et une expédition est de deux à cinq jours, et peut même, dans certains cas, être inférieure à une journée. Ainsi, sur un horizon de temps de 60 jours, un navire peut avoir réalisé entre 6 et 12 cargos, et sur une saison complète (d'avril à fin décembre), il peut avoir transporté plus de 45 cargos différents.

L'eau des Grands Lacs est douce tout comme une partie du fleuve Saint-Laurent. En hiver, les navires ne peuvent pas opérer et doivent donc être attachés. Une saison de navigation régulière débute au début du mois d'avril et s'étend jusqu'à la fin du mois de décembre. Chaque année, les fluctuations météo peuvent influencer énormément la durée de la saison de navigation en ce qui a trait notamment à la formation de glaces sur les lacs, les courants dans les rivières et les niveaux d'eau dans certains canaux et ports. Les incertitudes météo sont couvertes plus en détail dans les prochaines sections.

3.1.2. Flotte

La flotte de la compagnie est composée d'une vingtaine de navires de taille similaire pouvant transporter des cargos secs en vrac. La taille et les dimensions des navires sont semblables; il n'y a donc pas de restrictions d'entrée dans les ports ou les canaux en raison de la taille des vaisseaux.

Les deux tiers de la flotte sont des navires autodéchargeurs, c'est-à-dire des navires qui sont équipés d'un système de déchargement du cargo à bord. Lorsqu'un navire est équipé d'un tel système, le déchargement peut être effectué sans équipement de déchargement au port, et dans des délais généralement plus rapides. Le restant de la flotte représente des navires-vraquiers traditionnels, c'est-à-dire des navires sans équipement de déchargement où il est nécessaire d'utiliser celui du port de destination. Il y a donc certaines restrictions quant à l'équipement disponible à un port de déchargement, ce qui contraint l'utilisation de certains navires à certains ports.

Les navires-autodéchargeurs comprennent une coque en forme d'entonnoir qui dirige le contenu de la cale vers un convoyeur. Il transporte le contenu de la cale vers un tapis

roulant qui monte le cargo sur un mat qui est dirigé sur le quai du port où doit être déchargé le cargo. Sur la figure 3, le convoyeur au fond des cales ainsi que le tapis roulant sont illustrés en rouge.

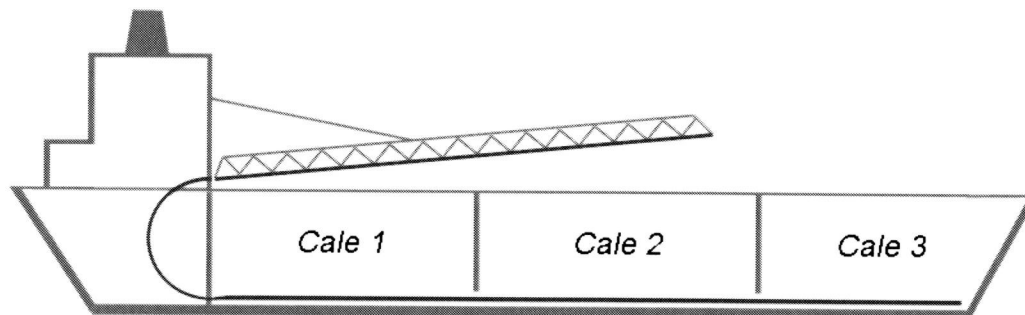


Figure 3 – Profil d'un navire autodéchargeur

Les vraquiers traditionnels sont équipés d'une cale à fond plat, et le déchargement au port est effectué par équipement mécanique ou par équipement de succion. Le fond plat de la cale permet le déchargement par boueur (*bulldozer*).

Les navires ont deux types de capacité : une mesurée en termes de poids et une autre mesurée en termes de volume. Le poids d'un navire est calculé en additionnant toutes les composantes du navire, soit le poids de la structure, de l'équipage, de l'équipement, du cargo, des eaux de ballast, du carburant, etc. Le poids total influence le tirant d'eau du navire, soit la hauteur entre le point le plus bas de la coque et la ligne de flottaison. Généralement, pour calculer le poids du cargo, les employés du port vont regarder la règle sur le côté de la coque, et consulter les tables hydrostatiques du navire pour déterminer le poids total du déplacement d'eau. Ils peuvent par la suite soustraire le poids de la structure et des autres éléments pour obtenir le poids du cargo.

Le poids du navire est donc limité par le tirant d'eau maximal admis à son port de chargement, pendant son voyage et à son port de déchargement. Le poids admissible du navire sera également influencé par la masse volumique de l'eau. L'eau salée est 2,5% plus dense que l'eau douce, ce qui augmente la capacité du navire. Puisque chaque navire a une forme de coque différente, le poids total admissible à un tirant d'eau donné sera différent. Pour calculer préalablement la capacité en poids du navire, nous utilisons les tables hydrostatiques de chaque navire (voir figure 4). À un tirant

d'eau de 8 mètres par exemple, le déplacement d'eau équivalent serait de 8550 tonnes, donc le poids total du navire serait de 8550 tonnes.

Le volume, quant à lui, est limité par la capacité des cales et doit toujours prendre en compte un espace perdu lors du chargement. En effet, le cargo solide, lorsqu'il est chargé, gardera un angle de repos et les coins supérieurs de la cale ne pourront pas être chargés complètement. La capacité volumétrique des cales est calculée en mètres cubes.

Les navires autodéchargeurs, en raison de leur équipement à bords, sont plus lourds que les navires-vraquiers standards. De plus, le design de la coque des navires-autodéchargeurs limite également le volume qu'il peut transporter contre celui d'un navire-vraquier standard. La figure 5 montre les différences de conception de la coque d'un navire-vraquier et d'un navire-autodéchargeur.

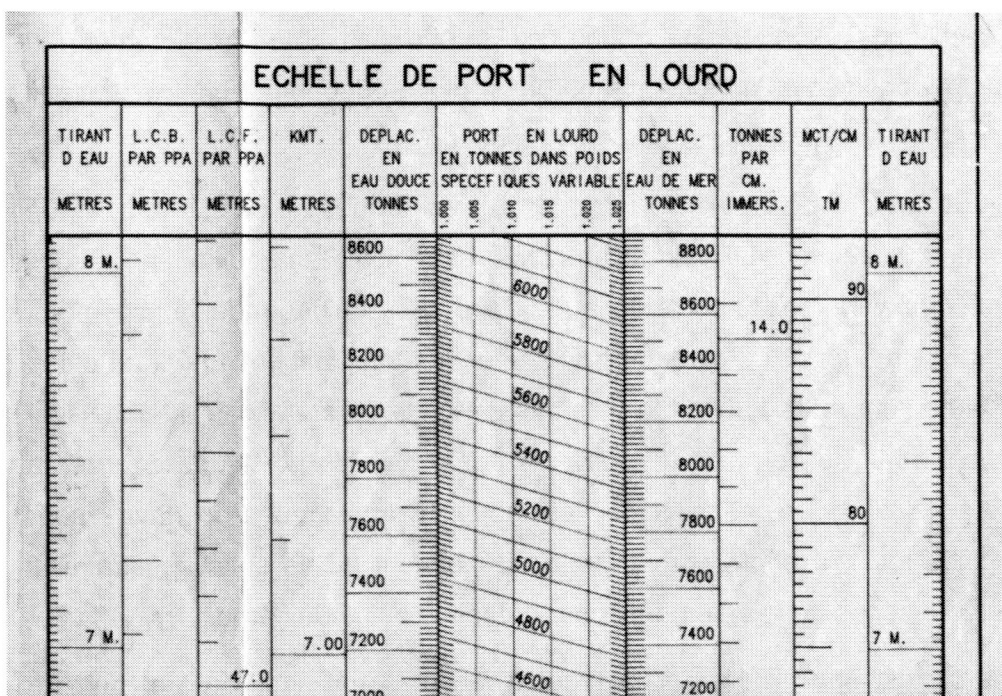


Figure 4 – Exemple d'une table hydrostatique d'un navire (image tirée de Wikipédia)

Certains navires peuvent uniquement naviguer dans les Grands Lacs et dans la voie maritime du St-Laurent, car ils ont été conçus pour une navigation en eaux douces. Certaines restrictions de Transport Canada s'appliquent et ces navires ne sont pas autorisés à naviguer dans le golfe du St-Laurent. De la vingtaine de navires de la flotte, quelques-uns ont été conçus pour la navigation côtière et sont autorisés à naviguer dans

tout le réseau. Certains navires n'ont pas été conçus pour naviguer dans le golfe, mais détiennent des autorisations de navigation vers certains ports dans cette région (pointe de la Gaspésie, Côte-Nord, côte du Nouveau-Brunswick, Îles-de-la-Madeleine). Des contraintes de zones de navigation s'imposent donc à certains navires, ce qui restreint le choix des navires pour effectuer certains voyages.

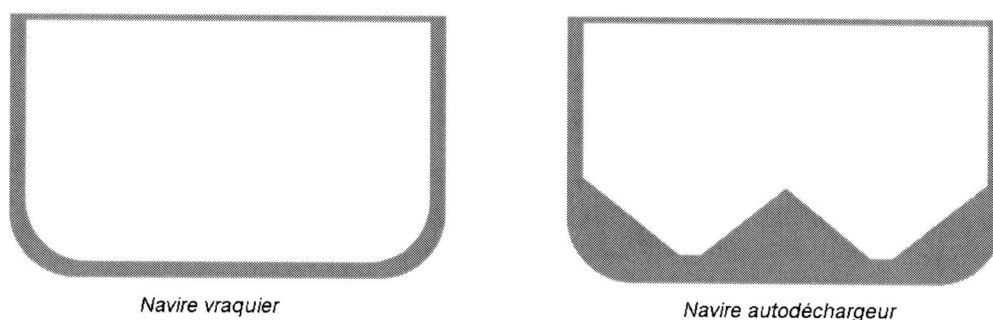


Figure 5 – Coupe transversale de coque des navires-vraquiers et autodéchargeurs

L'âge des navires varie également. Les navires les plus anciens ont généralement des coûts de maintenance et d'opération plus élevés que les nouveaux vaisseaux de la flotte, et consomment plus de carburant. Le coût d'opération du navire varie donc en fonction de son âge, mais également en fonction de ses caractéristiques et du type de ce dernier (vraquier / autodéchargeur).

Le tableau récapitulatif suivant illustre les différents types de navires de la flotte et les regroupe en catégories :

Catégorie	Description	Pourcentage de la flotte
RAL	Navires récents, autodéchargeurs et pouvant circuler dans les Grands Lacs uniquement	~21%
AL	Navires-autodéchargeurs, pouvant circuler dans les Grands Lacs uniquement	~31%
AC	Navires autodéchargeurs, pouvant circuler sur la côte Est américaine et dans le golfe du St-Laurent	~16%
RB	Navires récents, vraquiers, pouvant circuler dans les Grands Lacs, la Côte-Nord et la côte du Nouveau-Brunswick	~10%
B	Navires-vraquiers, pouvant circuler uniquement dans les Grands Lacs	~21%

Tableau 2 – Catégories de la flotte du problème

Les contraintes de navigation, le coût d'opération journalier ainsi que les vitesses moyennes varient d'un navire à l'autre. Même si certains navires ont des caractéristiques similaires, tous les coûts, les paramètres et les contraintes diffèrent grandement d'un navire à l'autre. Les catégories précédentes illustrent la composition de la flotte, mais pour les sections suivantes de ce mémoire, les navires seront nommés et caractérisés sur une base individuelle.

Puisque les coûts en capital d'acquisition sont très élevés, on suppose que la flotte est fixe à court et à moyen termes. La compagnie ne peut donc pas faire varier la composition de sa flotte sur un laps de temps inférieur à un an. Elle peut cependant louer des navires des compétiteurs pour effectuer un contrat si la capacité n'est pas suffisante.

Lorsqu'un navire n'est pas utilisé pendant un long laps de temps, le propriétaire peut l'envoyer en remisage. On distingue deux types de remisage : le remisage à long terme et le remisage à court terme. Le remisage à long terme s'effectue habituellement quand le marché du transport est en baisse et que la flotte est en surcapacité, ou lorsque c'est l'hiver. Le navire est donc vidé de son cargo, de ses eaux de ballast et de son équipage, et est attaché à un port. La compagnie paie un frais aux autorités portuaires pour le remisage du navire. Les coûts d'opération variables baissent à ce moment, mais ne sont

pas nuls; le navire est gardé en permanence et les compagnies continuent de payer pour les assurances. La remise en route d'un navire remisé coûte généralement assez cher, car il est nécessaire d'effectuer des inspections et réparations mécaniques.

Le remisage à court terme se déroule généralement à l'intérieur d'une saison de navigation quand les fenêtres de temps des clients ne sont pas compatibles et qu'un navire doit attendre un certain temps à un port, ou que la flotte soit en surcapacité pendant un court laps de temps. Le navire est donc attaché au port avec ou sans son équipage (en fonction de la durée de temps du remisage) et attend pour le prochain voyage. En règle générale, les responsables des horaires dans les compagnies de transport s'assurent de négocier les fenêtres de temps avec les clients afin de réunir les creux de la demande pour remiser le navire pendant un plus long moment, mais moins fréquemment.

Enfin, chaque navire est caractérisé par les paramètres suivants. Ces paramètres regroupent toutes les données nécessaires au calcul des coûts, de la capacité, ainsi que de la vitesse de déplacement dans le réseau.

Paramètres des navires	Description
Nom du navire	Nom et abréviation du navire
Port d'origine	Port où le navire est disponible pour son prochain chargement au début de la période de planification
Date de disponibilité	Date de disponibilité au début de la période de planification
Port de destination final	Port où le navire doit terminer sa course à la fin de la période de planification (il est également possible de ne pas spécifier de port)
Date d'indisponibilité	Date de fin de la disponibilité du navire durant la période de planification
Type de navire (SU/BU)	Navire-vraquier (BU) ou autodéchargeur (SU)
Coût d'opération journalier variable	Coût d'opération du navire incluant le coût de l'équipage, de l'assurance, de la nourriture, etc.
Vitesse moyenne en charge	Vitesse moyenne du navire lorsque le navire est chargé

Vitesse moyenne lège	Vitesse moyenne du navire lorsque le navire est vide
Capacité volumétrique	Capacité des cales du navire (en mètres cubes)
Poids de la structure, de l'équipement et de l'équipage	Poids total moyen du navire sans eaux de ballast et sans chargement
Tonnage net (à la limite du canal)	Tonnage brut à la limite de tirant d'eau des canaux moins le poids de la structure, de l'équipement et de l'équipage
Tonnage net au tirant d'eau estival	Tonnage brut à la limite de tirant estival du navire moins le poids de la structure, de l'équipement et de l'équipage
Type de carburant	Type de carburant de propulsion consommé par le navire
Consommation de diesel en chargeant	Consommation de diesel pour les générateurs (en tonnes par jour) lorsque le navire charge
Consommation de diesel en déchargeant	Consommation de diesel pour les générateurs (en tonnes par jour) lorsque le navire décharge
Consommation de diesel en voyage	Consommation de diesel pour les générateurs (en tonnes par jour) lorsque le navire navigue (certains navires ne consomment pas de diesel en naviguant)
Consommation de carburant lège	Consommation de carburant de propulsion lorsque le navire est vide
Consommation de carburant chargé	Consommation de carburant de propulsion lorsque le navire est chargé
Capacité côtière du navire	Est-ce que le navire peut naviguer dans les ports côtiers du réseau?
Capacité d'entrée dans le golfe	Est-ce que le navire peut naviguer dans le golfe du Saint-Laurent?

Tableau 3 – Tableau des paramètres des navires

3.1.3. Données sur les distances et les temps

Pour les fins du problème, on suppose que les données des distances et des temps de navigation sont symétriques, c'est-à-dire que la distance et le temps pour se rendre du

port A au port B seront les mêmes que pour se rendre du port B au port A. En pratique, en fonction des marées, des vents et des corridors de navigation, ces distances et ces temps pourraient être légèrement différents. Après avoir consulté le responsable des horaires dans la compagnie de transport, il a été déterminé que les différences demeurent relativement minimales.

Les distances sont toutes exprimées en miles nautiques (mn), les données de vitesse en nœud (nd) et les données de temps en heures (h).

Les données de la vitesse sont valides uniquement lorsque le navire navigue en eaux libres, c'est-à-dire dans un lac, dans le golfe ou sur la côte. La vitesse est fixe le restant du temps, soit lorsque le navire passe dans un canal, une rivière ou un passage.

Le réseau est constitué de 170 ports différents, soit 28 900 distances (chaque port est combiné avec lui-même et avec tous les autres ports). Seuls les ports ayant été visités dans les dix dernières années ont été retenus. De ce nombre, environ 3950 distances étaient préalablement calculées et entrées dans le système. Ces dernières représentaient les distances moyennes effectuées de la sortie du port d'origine à l'entrée du port de destination par les vaisseaux sur les contrats précédents. En pratique, même s'il existe un grand nombre de ports dans le réseau, seulement 13,6% de toutes les combinaisons possibles ont été effectuées par le passé.

Malgré cela, il est nécessaire de calculer les distances restantes (l'outil d'optimisation pourrait déterminer qu'il est plus avantageux d'envoyer un navire sur une tournée n'ayant jamais été effectuée par les navires). Pour calculer les 25 000 distances restantes, un principe d'approximation a été appliqué. Sur le graphe, on place un point à chaque début et fin des sous-régions déterminées ci-haut. Les points suivants ont été placés tel qu'illustré à la figure 6.



Figure 6 – Délimitations principales des sous-régions

Point	Port ou point géographique	Délimitation entre
A	Sault-Ste-Marie	Lac Supérieur et lac Huron
B	Récif de Detour	Lac Michigan et lac Huron
C	Windsor	Lac Érié et lac Huron
D	Port Colborne	Lac Érié et lac Ontario
E	Cape Vincent	Lac Ontario et Saint-Laurent 1
F	Montréal	Saint-Laurent 1 et Saint-Laurent 2
G	Québec	Saint-Laurent 2 et Saint-Laurent 3
H	Les Escoumins	Saint-Laurent 3 et Atlantique

Tableau 4 – Tableau des délimitations pour calculer la table des distances

Le point A délimite la sous-région du lac Supérieur et du lac Huron. Les distances entre chaque paire de points (par exemple entre A et B) et entre chaque port de la région (par

exemple entre la ville de Thunder Bay et le point A) sont calculées en utilisant *Veslink Distance*, un logiciel maritime utilisé pour calculer des distances de navigation. Si la distance existe déjà dans les données, elle est utilisée à la place de celle calculée par le logiciel.

Effectuer des requêtes manuelles dans le logiciel aurait pris énormément de temps et il était impossible d'extraire la table de distance utilisée par le logiciel. Nous avons donc utilisé notre technique d'approximation de la distance avec nœuds et rayons en additionnant les rayons correspondants. Ce traitement automatique a été effectué sur Excel à l'aide de VBA.

L'exemple suivant (figure 7) illustre le fonctionnement du calcul. En calculant la distance entre Thunder Bay et le point A (Sault-Ste-Marie), la distance entre Bay City et le point B (récif de Detour), et la distance entre A et B, il est ainsi possible de trouver la distance entre Thunder Bay et Bay City. Pour calculer par la suite la distance entre Green Bay (dans le Lac Michigan) et Thunder Bay, il suffit de calculer la distance entre le point B et Green Bay.

Pour calculer les distances à l'intérieur d'une même région, nous procédons à une approximation, car le calcul de chaque distance de façon manuelle serait trop long. En prenant les coordonnées géographiques de chaque port et en ajustant ces coordonnées géographiques à la courbure de la Terre, il est ainsi possible de calculer une distance. Puisque le lien entre chaque point dans chaque région est presque linéaire, il est possible de calculer une distance euclidienne avec l'équation suivante :

$$d_2 = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 - (x_2 - x_1)^2},$$

où x_i et y_i représentent les coordonnées cartésiennes des points i .

Afin de prendre en compte la forme de chaque lac ou sous-région, et considérer certains obstacles naturels, la distance est ajustée en trouvant une valeur moyenne entre la distance rectilinéaire et euclidienne (facteur l). La distance rectilinéaire est calculée en posant $l = 1$.

$$d_l = \sqrt[l]{(|y_2 - y_1|)^l - (|x_2 - x_1|)^l}$$

Pour chaque région, nous cherchons un facteur l qui minimise l'erreur quadratique moyenne avec des données de distances qui existent déjà. Par exemple, si la distance entre les points A et B dans une région est de 850 miles nautiques sous la norme $l = 1$ et

740 miles nautiques sous la norme $l = 2$, mais qu'en réalité selon les données historiques cette distance est de 800 miles nautiques, la norme l se situera entre 1 et 2. La comparaison est répétée pour toutes les données déjà existantes, et la norme minimisant l'erreur quadratique moyenne est retenue pour la région.

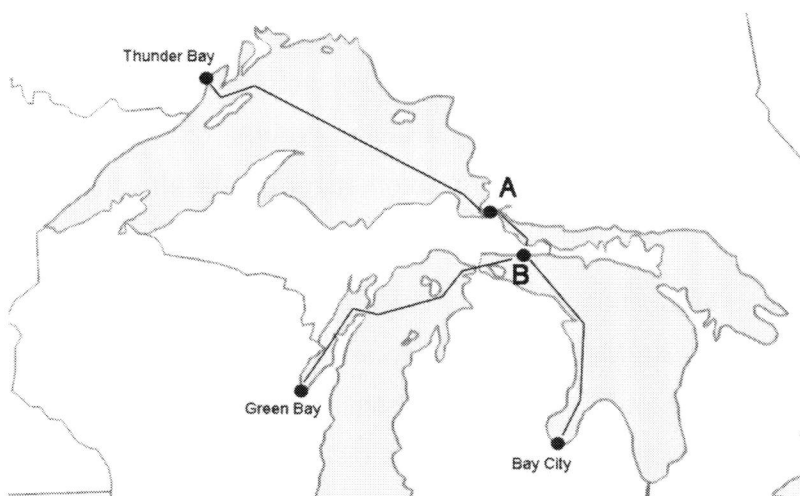


Figure 7 – Exemple de calcul des distances par addition des rayons

Les temps de navigation sont calculés à l'aide de la distance divisée par la vitesse moyenne du navire, mais également en prenant en compte les temps fixes dans certains tronçons. En effet, dans les écluses, les canaux et les voies maritimes, les vitesses sont limitées (limites de vitesse légales ou trafic récurrent) ce qui impose un temps de navigation fixe dans le tronçon. Les temps suivants sont considérés comme fixes pour les régions suivantes :

Voie maritime ou canal	Temps de navigation moyen (h)	Distance (miles nautiques)
Écluses SOO	6	56
Rivière Détroit	8	81
Canal Welland	10	25
Cape-Vincent-Montréal	23	158
Montréal-Québec	14	135
Québec-Les-Escoumins	10	124

Tableau 5 – Tableau des temps de navigation dans les voies maritimes et canaux

Toutes les distances des voies maritimes et canaux entre deux points (δ_{ij}) sont soustraites de la distance totale entre ces deux ports (d_{ij}). La distance résultante correspond à la distance en eaux libres, qui est divisée par la vitesse moyenne du navire en eaux libres lorsqu'il est chargé ou vide selon le cas (V_{nm}). Le temps obtenu correspond au temps de navigation en eaux libres, qui est par la suite additionnée au temps de navigation fixe des canaux (τ_{ij}). L'équation suivante résume le calcul du temps de navigation :

$$B_{ij} = \frac{d_{ij} - \delta_{ij}}{v_{nm}} + \tau_{ij}$$

Dans cette formule, B_{ij} est le temps de navigation entre le port i et j , d_{ij} est la distance entre le port i et j , δ_{ij} est la distance des canaux et voies navigables, v_{nm} est la vitesse du navire en eaux libres et τ_{ij} est le temps de navigation fixe des canaux et voies navigables.

Les temps de navigation sont utilisés dans l'algorithme au lieu de la distance afin de pouvoir plus facilement intégrer les fenêtres de temps et les délais de chargement et déchargement qui sont mesurés en unité de temps également. Le temps de navigation entre deux points donnés variera en fonction du navire utilisé et en fonction de son chargement, mais également en fonction des délais météo des régions.

3.1.4. Données de la demande

Pour la compagnie, plus de 80% de la demande est connue à l'avance et se décline sous forme de contrats à moyen et à long terme (2 à 15 ans). Cette demande est généralement fixe tout au long de l'année, mais les clients peuvent annuler ou ajouter des voyages avec un préavis de quelques semaines. Le reste de la demande (20%) est représenté par des options et des cargos *spot* qui peuvent arriver quelques mois à l'avance jusqu'à quelques jours à l'avance (généralement 10 jours au minimum).

Les données de la demande incluent un ou plusieurs ports de cueillette, un ou plusieurs ports de livraison, un type de cargo, et une préférence stricte ou non sur le choix d'un navire. Les données incluent également une cible de cargo à transporter (un tonnage) ainsi qu'une flexibilité en option. Le transporteur doit transporter minimalement le cargo cible moins la flexibilité négative, et peut transporter au maximum le cargo cible plus la flexibilité positive. Pour un cargo de 30 000 tonnes avec une flexibilité de 10%, le

transporteur doit transporter minimalement 27 000 tonnes et maximalement 33 000 tonnes.

Les préférences strictes imposent donc le choix d'un type de navire pour desservir le contrat, tandis que les préférences non strictes sont basées sur une pénalité positive ou négative que la personne responsable des horaires peut imposer à certains navires. Les clients communiquent au département marketing les besoins spécifiques de chaque voyage qui sont mis dans des contrats. Le responsable des horaires se base par la suite sur les contrats pour satisfaire les besoins des clients, mais également de son expérience passée avec ces derniers.

En raison de la nature de la demande qui est principalement statique, mais qui contient des éléments dynamiques (cargos *spot*), le modèle doit permettre une réoptimisation fréquente. Ce processus de réoptimisation sera exploré plus en détail dans le chapitre suivant.

Le tableau suivant résume les données associées à chaque voyage.

Paramètre d'un voyage	Description
Nom du client	Nom du client et abréviation du client.
Numéro de contrat	Numéro unique de contrat pour fins de référence avec le système ERP de la compagnie
Type de cargo	Type de cargo qui doit être transporté.
Port d'origine	Port de cueillette du cargo.
Port de destination	Port de livraison du cargo.
Fenêtre de temps de cueillette	Fenêtre de temps s'appliquant à la cueillette du cargo. Les clients spécifient toujours une fenêtre de cueillette pour le cargo.
Fenêtre de temps de livraison	Fenêtre de temps s'appliquant à la livraison du cargo. Les clients spécifient très rarement une fenêtre de livraison pour le cargo.
Tonnage demandé	Nombre de tonnes à transporter.
Flexibilité (option du transporteur)	Flexibilité du nombre de tonnes à transporter.
Taux de livraison chargé	Taux de livraison exprimé en dollars par tonne.
SU/BU	Type de navire requis par le client (SU pour autodéchargeur et BU pour vraquier standard).
Temps de service additionnel	Temps de service additionnel requis par le client.

Multi-cueillette	Si le client nécessite une cueillette de cargo à plusieurs ports.
Multi-livraison	Si le client nécessite une livraison de cargo à plusieurs ports.
Matrice de compatibilité navire/demande	Matrice de compatibilité entre chaque navire et le contrat. Un client peut imposer une contrainte forte sur le navire qui le servira.

Tableau 6 – Liste des paramètres de chaque voyage

3.1.5. Ports et délais d'entrée et de sortie

Un des aspects très importants à prendre en compte dans le modèle est le délai d'entrée et de sortie à chaque point dans le graphe. Ce délai inclut le temps de chargement et de déchargement, ainsi que le temps pour accoster et sécuriser le bateau au quai. Le temps de chargement et de déchargement varie en fonction de quatre aspects : a) le port, b) le type de navire, c) le type de cargo et d) le volume de cargo à charger/décharger. Aux fins de ce problème, on suppose que ces délais sont fixes tout au long de l'horizon temporel.

Le port de chargement ou de déchargement influence énormément le temps requis pour accoster et sécuriser le bateau, mais également pour charger et décharger le cargo. En fonction de l'équipement au quai, ces délais ne seront pas les mêmes d'un port à l'autre. Une matrice de délai de base pour chaque port doit donc être prise en compte par le modèle.

Le type de navire influence également de beaucoup le délai d'entrée et de sortie. En effet, le temps de déchargement est beaucoup plus long pour les navires-vraquiers que pour les navires-autodéchargeurs. Les autres délais (chargement, accostage, etc.) ne sont pas influencés par le type de bateau. Afin de simplifier le problème, le délai est uniquement différencié par le type de navire (autodéchargeur ou vraquier) et non pas par un navire en particulier.

Le type de cargo peut aussi influencer la vitesse de déchargement; certains cargos sont plus « collants » que d'autres, ce qui limite la vitesse de déchargement. Enfin, le volume de cargo à décharger influence le délai. Un volume plus élevé de cargo sera plus long à décharger qu'un volume moins élevé.

Les données relatives aux ports sont fournies au tableau 7.

Données sur les ports	Description
Nom du port	Nom et abréviation du port
Région correspondante	Code de région correspondante
Restriction aux navires côtiers?	Est-ce que le port n'accepte que les navires côtiers?
Restriction aux navires dans le golfe?	Est-ce que le port n'accepte que les navires côtiers et ceux pouvant naviguer dans le golfe?
Temps de chargement BU	Temps de chargement moyen pour un navire-vraquier
Temps de déchargement BU	Temps de déchargement moyen pour un navire-vraquier
Temps de chargement SU	Temps de chargement moyen pour un navire-autodéchargeur
Temps de déchargement SU	Temps de déchargement moyen pour un navire-autodéchargeur

Tableau 7 – Tableau des paramètres des ports

3.1.6. Fenêtre de temps

Chaque requête de transport dispose d'une fenêtre de temps pour la cueillette et pour la livraison. Chaque fenêtre de temps est composée d'une limite inférieure et supérieure. La cueillette doit donc être effectuée dans la première fenêtre de temps, et être livrée dans la deuxième fenêtre de temps.

En règle générale, dans l'industrie du transport dans les Grands Lacs, les fenêtres de temps de livraison ne sont pas contraintes tandis que les fenêtres de temps de cueillette le sont. Aux fins de ce problème, il est possible d'imposer une fenêtre de temps à la cueillette et à la livraison, même si en pratique il n'y a qu'une des deux qui est effective.

Les fenêtres ont une largeur différente d'un client à un autre. Par exemple, un client ayant une ou deux requêtes de transport durant l'année exigera des dates très précises pour ses cargos, tandis qu'un client ayant plusieurs requêtes par mois aura une fenêtre de temps plus flexible. La personne responsable des horaires peut négocier avec les clients pour modifier les fenêtres de temps.

La compagnie de transport connaît à l'avance le nombre de cargos qui seront transportés chaque mois. Il est souvent possible d'estimer le moment de livraison souhaité par le client en regardant le nombre de cargos à transporter ou en analysant

les données historiques du client. Par exemple, certains clients produisent du minerai qui est extrait à rythme constant; ils exigent donc une cueillette régulière à un intervalle défini par le rythme d'extraction. Le transporteur créera donc des fenêtres de temps de cueillette prenant en compte cette réalité (par exemple, aller visiter le client chaque semaine, et avoir au minimum 2 jours entre chaque visite de navire). D'autres clients ont une capacité très grande, et exigent la cueillette du cargo dans un intervalle de temps très précis (par exemple, utiliser trois ou quatre navires pour ramasser un cargo la première semaine d'un mois).

Le planificateur contacte généralement les clients deux mois à l'avance et propose une classe de navire avec une fenêtre de temps de visite. Le client peut alors demander un changement au type de navire ou à la fenêtre de temps, annuler un cargo ou le déplacer dans un autre mois. Dans plusieurs cas, les clients contactent la compagnie de transport au début du contrat et indiquent des fenêtres de temps très précises qui seront réévaluées au fil de la saison de navigation.

Enfin, certains clients spécifient des fenêtres de temps à l'intérieur de fenêtres de temps. Par exemple, un port peut être fermé pour des événements spéciaux, des vacances ou des jours fériés, ou encore, certains ports n'opèrent qu'à des temps très précis de la semaine. Pour le premier cas, le planificateur ajuste les fenêtres de temps pour qu'un navire n'ait pas à charger à ce port durant cette période « interdite ». Les fenêtres sont déplacées avant ou après la fermeture. Dans le deuxième cas, le planificateur indique une fenêtre de temps générale au client pour la cueillette du cargo et, quelques jours à l'avance, en fonction du temps estimé d'arrivée au port, le planificateur peut demander au capitaine d'accélérer, de ralentir ou d'arrêter pour entrer dans la fenêtre de temps du port de chargement. Lorsqu'un bateau arrête avant un voyage, il peut en profiter pour prendre du carburant, des victuailles ou effectuer de la maintenance mineure.

3.1.7. Coûts

Tel qu'expliqué dans le premier chapitre, les compagnies maritimes doivent effectuer de grands investissements en capital pour l'achat et la maintenance des navires. Bien que les coûts fixes soient très élevés, seuls les coûts d'opération sont utiles pour la prise de décisions pour ce type de problème. En effet, les choix de destination des navires et la

mise en place d'horaires n'influenceront pas la composition de la flotte ou les réparations majeures.

Les coûts d'opération comportent plusieurs éléments. Afin de faciliter la compréhension de ceux-ci, ils sont simplifiés et séparés en quatre catégories distinctes : les coûts de fonctionnement du navire, les coûts des carburants, les frais de canaux et les autres coûts supplémentaires. Des pénalités de chargement sont également additionnées dans les coûts totaux; elles seront expliquées plus en détail dans les prochaines sections.

Les coûts de fonctionnement du navire incluent notamment les salaires des employés, les coûts de nourriture et de fournitures de base, les primes d'assurance, les coûts des lubrifiants pour la machinerie, les coûts des pièces et les frais de maintenance du bateau. Ces coûts n'incluent pas les carburants utilisés par le navire ni les coûts de cales sèches et de remise en condition des navires. Parmi les quatre catégories, ces coûts sont les plus élevés. Ils sont calculés sur une base journalière, car ils sont directement proportionnels à l'utilisation du navire. En fonction du temps de navigation nécessaire pour compléter un voyage, il est ainsi possible de calculer le coût total de fonctionnement du navire pour le voyage.

Les coûts de carburants sont très importants en transport, particulièrement en transport maritime où ils peuvent représenter près de 40% des coûts d'opération d'un navire. Chaque navire de la flotte utilise deux types de carburant, un pour les moteurs de propulsion et l'autre pour faire fonctionner les génératrices à bord.

Le carburant à propulsion, ou carburant maritime intermédiaire (*Intermediate Marine Fuel* ou IFO) est une forme de mazout lourd consommé par les moteurs des navires. Il existe plusieurs types d'IFO et chaque type est caractérisé par la viscosité du carburant. Le grade de carburant IFO 180 aura donc une viscosité d'environ 180 centistokes (cSt). Le grade de carburant indique également le degré de raffinage du carburant; un carburant IFO 380 sera moins raffiné que du IFO 60, ce qui influencera le prix. Chaque navire est doté d'un système d'injection qui ne peut accueillir qu'un seul type de carburant intermédiaire.

Le carburant utilisé dans les génératrices est du diesel marin (*Marine Diesel Oil* ou MDO). Il est consommé lorsque les générateurs du navire fonctionnent, donc lorsque le navire navigue, lorsqu'il est en attente au port, et lorsqu'il charge ou décharge. La consommation de MDO est stable en tout temps sauf lorsqu'un navire-autodéchargeur

utilise son équipement de déchargement au port, ce qui augmente la consommation de MDO. Tous les navires consomment le même type de diesel à génératrice. Les navires plus récents sont équipés d'une génératrice reliée à l'arbre d'entraînement principal des hélices, ce qui permet de consommer moins de diesel marin lorsque le navire navigue.

Les frais de canaux incluent les coûts de pilotage, les péages pour passer dans un canal, certains frais de douanes ou autres frais relatifs à passer dans un segment particulier. Ces frais varient en fonction du tonnage du bateau (sa taille) ainsi qu'en fonction de son chargement. Les frais de pilotage sont uniquement applicables lorsque le navire navigue entre Montréal et Les Escoumins (respectivement la sous-région St-Laurent 2 et St-Laurent 3).

Enfin, les autres coûts peuvent inclure des frais spéciaux relatifs à l'utilisation d'un type de cargo ou d'un type de bateau sur une route particulière ou dans une région particulière. Si un navire de la flotte nécessite des frais de manœuvre supplémentaires ou des remorqueurs lorsqu'il entre dans un port, ces frais seront reflétés dans cette catégorie. Par contre, s'il est nécessaire d'utiliser un remorqueur pour tous les navires dans un port en particulier ou sur un tronçon particulier, ces frais ne seront pas pris en compte. En effet, si les frais de port sont identiques pour tous les navires de la flotte, ils ne sont pas pris en compte, car ce sont des coûts qui seront encourus, peu importe le choix du navire.

3.1.8. Types de cargo

La compagnie peut transporter théoriquement presque tous les cargos solides et secs, mais en pratique, en raison des activités industrielles et commerciales aux abords des Grands Lacs, le nombre de cargos transportés est relativement limité. Ainsi, historiquement, la compagnie a transporté un maximum de quatre-vingts types de cargos différents ayant chacun des grades différents.

Un cargo se décline par sa catégorie (grains par exemple) et son grade (types de blé). Chaque type de cargo comporte un coefficient d'arrimage, c'est-à-dire la capacité en mètres cubes occupée dans la cale d'un navire par une tonne métrique de cargo (m^3/t). Ce coefficient est l'inverse de la masse volumique (t/m^3) du cargo. Il est utile pour calculer si la capacité du navire sera limitée par le poids du cargo (petit coefficient d'arrimage) ou par son volume (grand coefficient d'arrimage). Le coefficient d'arrimage

peut varier en fonction de l'humidité du cargo ou d'autres facteurs, mais nous supposons qu'il demeure uniforme et constant d'un cargo à l'autre (sauf si spécifié par le client).

Chaque cargo possède également des propriétés qui lui sont propres. Les cargos de charbon et de minerai sont très salissants; ils ne peuvent donc pas être transportés directement avant le transport de grain, de cargo alimentaire ou de sel. Certains cargos abrasifs (roches ou agrégats) permettent un « nettoyage » de la cale, ce qui permet de transporter certains cargos à la suite des autres. Ainsi, le transport de certains cargos les uns à la suite des autres comporte une durée de nettoyage plus ou moins grande en fonction du type de cargo précédant et suivant.

Le nettoyage des cales peut être effectué automatiquement ou manuellement selon le type de cargo. Le nettoyage automatique est effectué à l'aide de vibrateurs dans les parois des cales, ce qui permet de déloger les dépôts et de retirer la majorité du cargo. Ce nettoyage est souvent utilisé avant le chargement de cargo d'un même type ou avant un nettoyage manuel.

Le nettoyage manuel est effectué par les marins en pompant de l'eau, en aspergeant et frottant les parois de la cale et l'équipement. Les nettoyages les plus complets nécessitent une plus grande quantité d'eau et un temps d'exécution supplémentaire. L'eau de nettoyage peut être par la suite filtrée et déversée dans les lacs et la côte Est de l'Atlantique. Elle ne peut pas être relâchée dans les canaux, les rivières, le fleuve ou le golfe du St-Laurent. Elle peut être stockée à bord, mais le bateau sera plus lourd, ce qui limite par conséquent la quantité de cargos qui peut être transportée.

Le nettoyage peut être effectué lorsque le navire navigue entre deux ports. Si le temps de navigation est supérieur au temps de nettoyage, le navire n'encourt pas de délais supplémentaires. Si par contre le temps de nettoyage est supérieur au temps de navigation (généralement lorsqu'un cargo est livré et ramassé par la suite dans le même port), un délai supplémentaire doit être encouru pour le nettoyage.

Le tableau 8 illustre un exemple de matrice des temps de nettoyage pour certaines catégories de cargos.

	Cargo précédent :			
Cargo suivant :	Grain	Charbon	Minerai	Agrégats
Grain	1 heure	18 heures	18 heures	18 heures
Charbon	1 heure	0 heure	8 heures	8 heures
Minerai	1 heure	1 heure	1 heure	4 heures
Agrégats	1 heure	8 heures	8 heures	0 heure

Tableau 8 – Matrice simplifiée des temps de nettoyage des cargos

Afin de simplifier la classification des types de cargos, ils ont été rassemblés en treize différentes catégories. Ces catégories permettent d'appliquer un facteur au chargement ou au déchargement pour moduler le temps d'opération requis.

Nom de la catégorie	Remarques
Ballast (Ballast)	Lorsque le navire est vide, il n'a que ses eaux de ballast.
Petcoke (Coke de pétrole)	Le coke de pétrole est un résidu de raffinerie qui peut être utilisé comme combustible.
Aggregates (Agrégats)	Les agrégats sont des roches généralement utilisées dans l'industrie de la construction.
Ore (Minerai)	Cette catégorie regroupe les minerais de fer et de titane.
Coal (Charbon)	Le charbon est une roche sédimentaire utilisée comme combustible.
Grain (Grain)	Les grains peuvent être utilisés pour l'alimentation humaine ou animale.
Cement (Ciment)	Le ciment est un liant entrant dans la composition du béton, utilisé principalement pour l'industrie de la construction.
Fertilizer (Fertilisants)	Cette catégorie regroupe principalement les fertilisants naturels (comme la potasse).
General (Cargo général)	Les cargos généraux sont généralement des cargos divers ou spéciaux nécessitant une manutention particulière.
Gypsum (Gypse)	Le gypse est un minerai utilisé dans l'industrie de la construction pour le plâtre ou encore comme fertilisant.

Salt (Sel)	Le sel transporté en vrac provient de mines souterraines, et est principalement utilisé comme sel de déglacage l'hiver.
Slag (Laitier)	Le laitier est un résidu provenant de la sidérurgie, utilisé principalement comme agrégat dans le béton.
Sugar (Sucre)	Le sucre transporté est de qualité alimentaire.

Tableau 9 – Différentes catégories des cargos transportés par la compagnie

3.1.9. Pénalités liées au coefficient d'arrimage

Tel que discuté dans la sous-section 3.1.8, chaque cargo possède un coefficient d'arrimage qui lui est propre. Ce coefficient est particulièrement utile pour calculer le coût d'opportunité d'utiliser un navire pour transporter un cargo à la place d'un autre. Tel qu'expliqué précédemment, il y a deux types de capacité des navires : une capacité volumétrique et une capacité de poids maximal limitée par le tirant d'eau.

En prenant le coefficient d'arrimage de chaque cargo et le volume de chaque navire, il est possible de former une matrice du tonnage total qu'un navire peut transporter par cargo. On utilise le minimum entre le poids maximal transporté au tirant d'eau maximal et le poids du volume maximal du cargo. Par exemple, pour une cargaison de bentonite (coefficient d'arrimage d'environ 1,14 m³ par tonne métrique), dans un navire ayant un volume de cale de 35 000 m³, le poids total au volume maximal serait d'environ 30 702 tonnes métriques. Si le navire peut transporter un poids total de 29 000 tonnes métriques à un tirant d'eau de 8,08 mètres, alors le cargo sera limité par le poids et non par le volume. La formule suivante résume le calcul de la capacité maximale pour un cargo donné :

$$\text{Minimum de } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Volume du navire}}{\text{Coef arrimage}} \\ \text{Poids au tirant d'eau maximal} \end{array} \right\} = \text{Min } \left\{ \begin{array}{l} 35000/1,14 \\ 29000 \end{array} \right\} = 29\,000\,T$$

Lorsqu'il est en voyage, un navire est limité au tirant d'eau minimal entre le port de chargement, les lacs et canaux qu'il visite et le port de déchargement. Si un bateau part de Windsor pour aller à Toronto, et que le tirant d'eau du port de chargement est de 10 mètres, celui du port de déchargement de 11 mètres, et le tirant d'eau minimal en voyage de 8,20 mètres, alors le tirant d'eau considéré pour le voyage est d'un maximum

de 8,20 mètres. Si le bateau part d'un port en eau salée, et qu'il navigue continuellement en eau salée, alors son tirant d'eau maximal est multiplié par la densité de l'eau, soit 1,025 kg/L. Le tableau suivant résume les tirants d'eau maximaux rencontrés de chaque région vers chaque région.

De / Vers	Supérieur	Huron	Michigan	Érié	Ontario	St-Laurent	Atlantique
Supérieur	Port	8,4 m	8,4 m	Niv. Eau	8,08 m	8,08 m	8,08 m
Huron	8,4 m	Port	8,4 m	Niv. Eau	8,08 m	8,08 m	8,08 m
Michigan	8,4 m	8,4 m	Port	Niv. Eau	8,08 m	8,08 m	8,08 m
Érié	Niv. Eau	Niv. Eau	Niv. Eau	Port	8,08 m	8,08 m	8,08 m
Ontario	8,08 m	8,08 m	8,08 m	8,08 m	Port	8,08 m	8,08 m
St-Laurent	8,08 m	8,08 m	8,08 m	8,08 m	8,08 m	Niv. Eau	Niv. Eau
Atlantique	8,08 m	8,08 m	8,08 m	8,08 m	8,08 m	Niv. Eau	Port

Tableau 10 – Tableau des tirants d'eau maximum entre deux régions

Une case marquée « port » signifie qu'il n'y a pas de restriction lors du voyage et que le navire sera limité par le niveau d'eau disponible au port de chargement et de déchargement. Une case marquée « Niv. Eau » signifie que le niveau de l'eau influencera grandement le tirant d'eau maximal, mais qu'en règle générale, il est limité à 8,08 mètres. Chaque navire est cependant limité par sa ligne de chargement maximal. Cette ligne est cependant supérieure au tirant d'eau réglementaire dans la majorité des cas.

En ayant la capacité maximale de chaque navire pour chaque type de cargo pour toutes les paires d'origine et destination possibles, il est possible de calculer une pénalité de chargement qui entrera dans la fonction objectif du problème et qui permettra au modèle d'assigner le bon navire au bon cargo. La pénalité de chargement est calculée comme suit pour chaque navire et pour chaque contrat :

$$\text{Pénalité (tonnes)} = |\text{Capacité maximale} - \text{tonnage cible} \times (1 + \% \text{flexibilité positif})|$$

Cette pénalité est par la suite multipliée au taux chargé par tonne ce qui donne une pénalité monétaire qui peut entrer dans la fonction objectif. En parallèle de ce calcul, nous vérifions si le navire a la capacité de transporter le minimum du cargo cible, c'est-

à-dire le tonnage cible multiplié par la flexibilité négative. Si le navire n'a pas cette capacité, le cargo ne pourra pas être transporté.

Pour illustrer ce processus, prenons l'exemple suivant : nous avons un cargo de 25 000 tonnes de charbon (coefficient d'arrimage de 1,30 m³/tonne) à transporter avec une flexibilité de +/- 10%. Nous avons les navires suivants disponibles pour le chargement :

Nom du navire	Poids maximal (t)	Volume (m ³)	Poids au vol. max. (t)
MV Huronian	31 000	38 000	29 231
MV Sudbury	24 000	32 000	24 615
MV Genesee	25 000	26 000	20 000

Tableau 11 – Exemple de pénalité avec trois navires fictifs

Le poids limitant du MV Huronian est de 29 231 tonnes, celui du MV Sudbury est de 24 000 tonnes et celui du MV Genesee est de 20 000 tonnes. Avant de calculer la pénalité, vérifions si chaque navire peut transporter le cargo cible. La limite inférieure à transporter est de 22 727 tonnes, ce qui exclut le MV Genesee. La limite supérieure du cargo à transporter est de 27 500 tonnes. Si le cargo est transporté à un prix de 5\$ par tonne, alors la pénalité pour le MV Huronian serait de $(29\,231 - 27\,500) = 1\,731$ tonnes à 5\$/t, ce qui donne 8 655\$. La pénalité pour le MV Sudbury serait de 2 885 tonnes, ou 14 425\$. La figure suivante résume les pénalités :

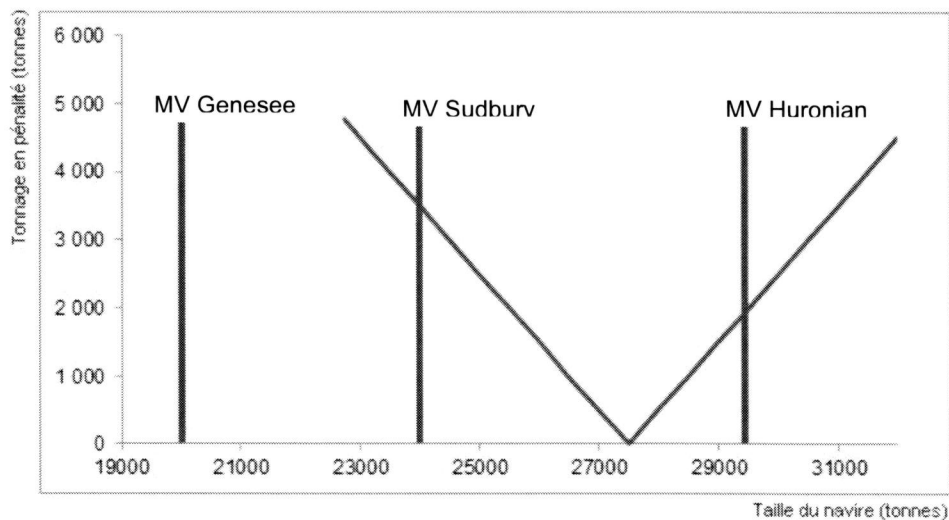


Figure 8 – Exemple de pénalité de cargo imposée sur trois navires

Les navires de grande taille seront autant pénalisés qu'un navire de taille plus modeste avec cette pénalité à condition qu'il puisse transporter le cargo minimal. Cette logique s'applique bien aux opérations des compagnies maritimes dans les Grands Lacs; les responsables des horaires essaient généralement d'allouer les bateaux à des requêtes selon le cargo cible à transporter. Les bateaux qui sont trop volumineux engendrent un coût d'opportunité, car ils pourraient être utilisés à meilleur escient, et les navires trop petits ne peuvent transporter la totalité du cargo, ce qui entraîne une pénalité réelle en revenus non gagnés.

Un paramètre a été développé pour moduler la pénalité appliquée aux navires ayant une capacité excédentaire. Ce paramètre est décrit dans le chapitre suivant.

3.1.10. Demande multi-destinations

Les opérations de transport à courte distance dans les Grands Lacs et le Saint-Laurent se déroulent généralement entre deux points; les clients n'ont qu'une cueillette et qu'une seule livraison par requête de transport. La totalité de la charge à transporter est donc ramassée à un seul port et livrée à un unique port, généralement pour remplir totalement un navire. Chaque navire s'occupe d'un seul client entre deux ports, ce qui est similaire aux opérations de transport routier à charge complète (FTL).

Il arrive parfois qu'il soit nécessaire d'effectuer une cueillette ou une livraison à plusieurs ports pour un même client. Cette situation se présente très rarement pour la cueillette et est également peu commune pour la livraison. Lorsqu'un client nécessite ce type d'opération, il demande généralement deux ports de livraison ou deux ports de cueillette. Un client pourrait théoriquement demander plus de ports de livraison ou de cueillette, mais une telle situation n'a pas été vue par le responsable aux horaires depuis un long moment.

Dans une telle situation de demande multi-destinations, les points de cueillette ou les destinations de livraison se trouvent à proximité, c'est-à-dire qu'il sera toujours plus avantageux d'effectuer la totalité de la cueillette avant d'effectuer la livraison. Par exemple, si un client désire effectuer deux cueillettes dans le Lac Michigan et trois livraisons au total (deux dans le Lac Érié et une dans le Lac Ontario), il serait logique d'effectuer les deux cueillettes avant d'effectuer la livraison (voir la figure 9). Il est ainsi possible de créer un voyage fictif réunissant la totalité des points de cueillette et de

livraison et de moduler les temps de chargement et de déchargement en fonction des délais supplémentaires de livraison pour cette demande multi-destinations.

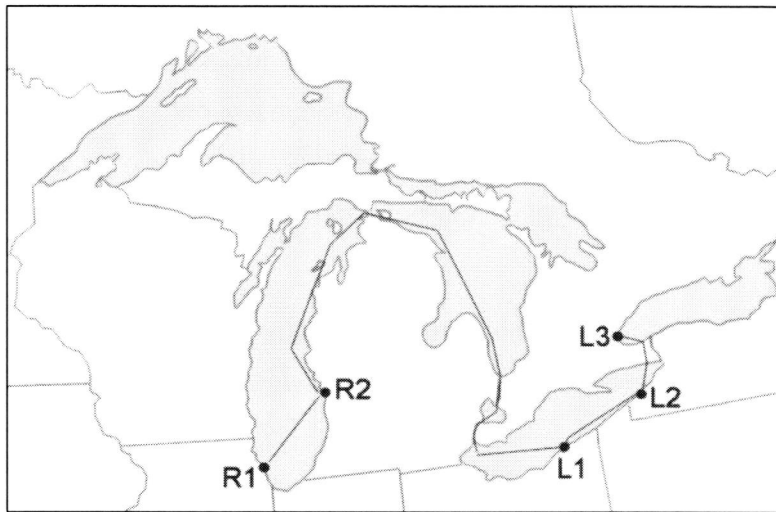


Figure 9 – Exemple de cueillette et de livraison à plusieurs destinations

Les demandes multi-destinations restent des exceptions dans les opérations du transporteur. Les navires ne sont pas actuellement conçus pour transporter différents types de cargos et ce type d'opération ne se fera généralement que pour des cargos de catégorie similaire.

3.1.11. Dépôts

Dans un problème de tournées de véhicules classique, les véhicules quittent et retournent à un dépôt unique respectivement au début et à la fin de la période de planification. Dans le cas de l'industrie maritime et particulièrement les opérations itinérantes, il n'y a pas de dépôt unique, mais plutôt des ports d'origine et des ports de destination. Le port d'origine correspond au dernier port où le navire a déchargé et où le navire est disponible pour le prochain cargo, tandis que le port de destination correspond au port où le navire a déchargé son dernier cargo à la fin de l'horizon de planification. Le choix du port de destination final peut être également spécifié à l'avance et peut correspondre à un port où il y aura plusieurs requêtes futures de cueillette ou encore un port où le bateau sera attaché pour une mise au rancart (ou des réparations).

À la fin de la saison, il est important que le navire aille accoster à un port spécifique à une date spécifique. Le responsable des horaires doit donc créer un horaire prenant en

compte cette réalité et s'assurer que le bateau sera positionné à la fin de sa tournée au port final.

3.1.12. Optimisation dynamique

Puisque la demande peut être parfois dynamique, c'est-à-dire qu'elle peut changer durant l'horizon de planification, le planificateur doit ajuster ses tournées en conséquence. Afin de prendre en compte cette réoptimisation dynamique des tournées, une période figée peut être imposée sur les horaires. Ainsi, un navire dont le voyage entre deux ports est déjà entamé ne sera disponible pour un prochain voyage qu'à la fin de son voyage en cours. De la même manière, si un navire est déjà nommé pour un voyage en particulier auprès des autorités portuaires et du client, et que le délai légal de modification est déjà passé, ce voyage peut être figé et le navire sera seulement disponible lorsque la période de « gel » sera terminée.

L'exemple suivant illustre la période de gel en pratique. À la période 0, l'horaire suivant est obtenu (situation 1). Le navire entame donc le voyage 1.

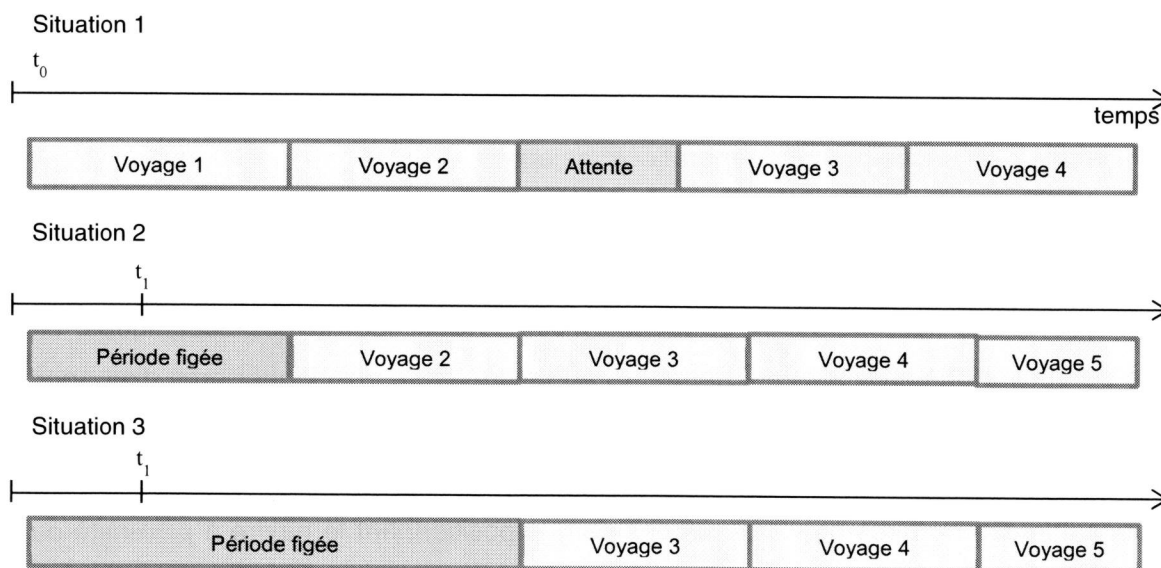


Figure 10 – Exemple de gel des voyages

Si après un jour, l'horaire doit être modifié pour inclure un nouveau voyage, le bateau ne sera disponible qu'après la période figée et à l'endroit où le navire termine le voyage 1 (situation 2). Si le voyage 1 et le voyage 2 sont figés par contrat, le navire ne sera disponible qu'à la fin du voyage 2 à son dernier port de visite (situation 3).

Les compagnies de transport nominent généralement les navires quelques semaines à l'avance. Une nomination correspond à une assignation d'un navire à un certain voyage. Le client a généralement un droit de regard sur les nominations et peut négocier avec le planificateur les dates de livraison (modifier les fenêtres de temps), le type de navire, ou encore le tonnage cible à transporter (en fonction de la taille du navire nominé).

Lorsqu'une opportunité de cargo spot est disponible pour la compagnie, il est assez fréquent pour le responsable des horaires de refaire toutes les nominations pour une certaine catégorie de bateau. Il gèle donc tous les voyages de la flotte sauf ceux qui touchent les navires d'une même catégorie et tente de créer un nouvel horaire en insérant la requête spot dans les tournées actuelles.

3.1.13. Arrêts pour maintenance mécanique

Durant une saison normale d'opération, il est rare qu'il soit nécessaire d'arrêter un navire pour effectuer des réparations. La maintenance mécanique des bateaux est généralement effectuée au début de la saison (au moment de la remise en route des navires) ou lorsqu'un bateau est remisé pour une courte période de temps (lorsque la demande n'est pas assez élevée par exemple). La maintenance mécanique sur un navire peut être effectuée en route ou à un port régulier pour des réparations mineures, ou dans une cale sèche pour les réparations majeures.

Le responsable des horaires peut donc généralement créer des « requêtes fantômes » correspondant à un arrêt de maintenance et les insérer dans les tournées des navires si nécessaire. Dans des opérations de longue distance pour les navires océaniques, on tente de trouver un cargo spot qui permettra au navire de se positionner près d'un point de maintenance. Dans les opérations à courte distance comme dans notre problème, les points de maintenance sont bien répartis sur le réseau, ce qui facilite la tâche du responsable des horaires pour trouver des cargos positionnant le navire à proximité du port où seront effectuées les réparations.

3.1.14. Délais météo

Le réseau des Grands Lacs, du Saint-Laurent et de la Côte est Atlantique sont soumis à d'importantes variations météorologiques tout au long de l'année. Ces variations

peuvent causer des délais aux transporteurs, ce qui peut avoir une grande incidence sur les horaires et les tournées qu'emprunteront les navires.

La présence de glace dans les lacs, l'augmentation ou la diminution importante des niveaux d'eau ainsi que la présence de tempêtes sont les trois facteurs météo causant les principaux délais. Ces événements arrivent de façon aléatoire, et il est très difficile de prévoir avec précision les retards engendrés.

Le planificateur des horaires de la compagnie de transport applique parfois un facteur de délai au temps de navigation pour créer ses horaires. Ce facteur est tiré de sa propre expérience et varie en fonction du temps de l'année. Outre ces facteurs de délais, les horaires ne sont pas conçus avec des périodes tampons pour absorber d'éventuels retards. Ainsi, lorsqu'une tempête entraîne un important retard à l'horaire pour un ou plusieurs navires de la flotte, le planificateur contacte les clients touchés et les clients suivants pour modifier les fenêtres de temps de ces derniers. Il refait un horaire et des tournées si un important retard a affecté plusieurs navires de la flotte.

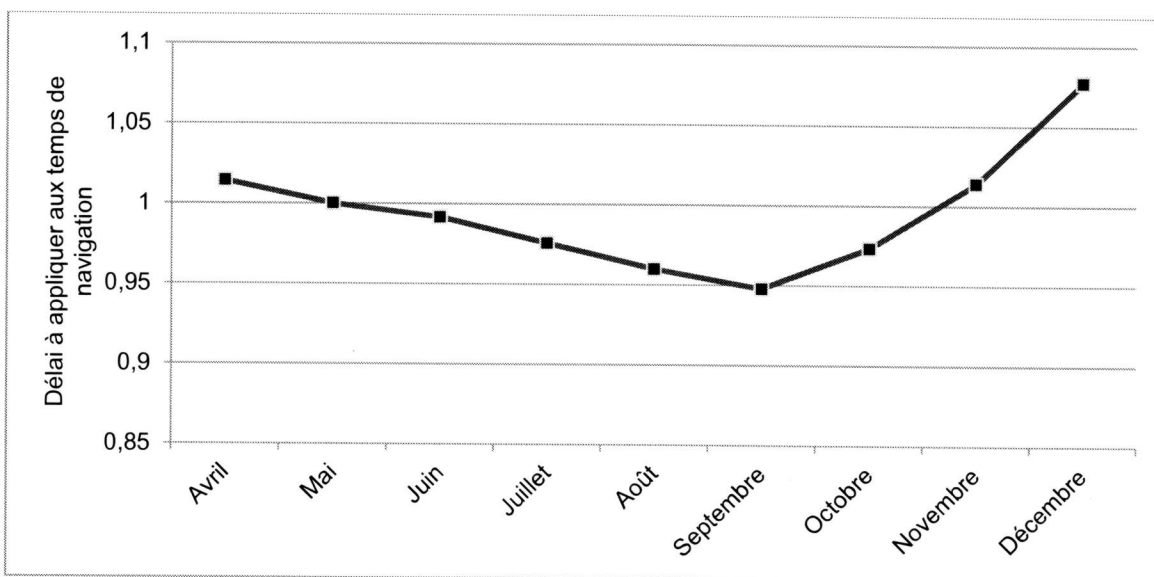


Figure 11 – Exemple de délais météo par mois

Pour prendre en compte cette réalité, une matrice de délais doit être appliquée au temps de navigation. Puisque le réseau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent est très large, et que chaque région peut être soumise différemment aux variations saisonnières, la matrice de délais doit être segmentée par sous-région. Si le facteur de délai est de 15% dans le lac Huron au mois d'octobre, et qu'un navire y navigue, le facteur de délai doit s'appliquer uniquement sur le segment du voyage dans le lac Huron. Cependant,

les délais entre deux lacs ou deux régions adjacentes sont relativement similaires pour un même temps de l'année, une moyenne des délais peut donc être appliquée sur le temps de navigation total du voyage.

Des délais en escalier pour chaque mois peuvent entraîner un problème : si un navire commence un voyage à la fin du mois de septembre et le termine au début du mois d'octobre, quel délai utiliser? À la place d'utiliser le délai en escalier (un facteur fixe qui s'applique pour tout un mois), une moyenne du délai du point central de chaque mois est utilisée. Un prorata du nombre de jours séparant le début du voyage au mois précédent et suivant est utilisé pour moduler le délai à appliquer. Le même principe s'applique pour la fin du voyage, et une moyenne de délai à appliquer est utilisée pour le voyage en entier.

La figure 11 illustre ce fonctionnement. Chaque carré noir représente le délai moyen du mois, et la courbe rouge relie de façon linéaire chaque point. Le délai applicable entre deux points noirs se situe ainsi sur la courbe rouge.

Afin de calculer les délais météo dans les différentes régions des Grands Lacs, nous avons regardé un historique des temps de navigation par mois pour chaque région sur les cinq dernières années. En segmentant les voyages par région, il a été possible de déterminer des déviations avec les temps de navigation théoriques. Ces déviations ont été utilisées pour créer la matrice de délai météo par mois par région.

3.1.15. Ravitaillement de carburant

À la différence d'une automobile ou d'un camion, le processus de ravitaillement en carburant d'un navire est beaucoup plus long et complexe. Un navire doit contacter à l'avance un fournisseur pour vérifier la disponibilité du carburant et planifier un service de livraison au navire. Dans certains cas, les installations permettent de connecter directement les réservoirs terrestres au navire via un petit pipeline. Le navire doit donc s'accoster, et le ravitaillement peut prendre quelques heures dépendamment de la taille du tuyau, de la pression, et de la quantité à charger.

Dans d'autres cas, les installations ne permettent pas de connecter directement le navire aux citernes, d'autres moyens doivent donc être pris pour acheminer le carburant au navire. Des camions-citernes et un camion pompe peuvent être utilisés. Le camion pompe permet d'extraire le carburant des camions plus rapidement, mais ce processus

demeure relativement lent, car plusieurs camions sont nécessaires afin de ravitailler le navire et des changements doivent être effectués entre les camions. Des barges et petits navires-citernes peuvent également être utilisés pour ravitailler les navires, mais ce processus est relativement coûteux et ne convient pas pour de petites quantités de carburant. De plus, lorsque la météo n'est pas clémente, ce type d'approvisionnement n'est pas possible.

Les points de ravitaillement sont très limités dans le réseau; quelques ports offrent le service sur une base régulière et certains ports permettent le ravitaillement par camion ou par barge en dernier recours. Il est parfois nécessaire de modifier légèrement l'horaire et les tournées des navires pour permettre le ravitaillement. Par exemple, si un navire demeure dans une sous-région ne comportant aucun point pour refaire le plein, le navire doit faire un détour pour aller chercher du carburant. Le temps nécessaire pour prendre du carburant affecte également les horaires des navires, mais son effet est somme toute négligeable comparativement au temps de chargement et déchargement que les navires peuvent subir.

Les réservoirs de carburant des navires sont limités par des contraintes réelles de capacité, mais également par des contraintes de chargement. Si un navire chargé doit se faire ravitailler, il peut être contraint par son tirant d'eau au port, ce qui limite la quantité totale de carburant qu'il peut transporter. Si un navire n'a pas de cargo et qu'il fait le plein de carburant, il pourra transporter moins de cargos pour son prochain voyage. Le département du transport tente de trouver un équilibre entre le fait d'aller souvent se faire ravitailler et la capacité perdue en chargeant trop de carburant.

Le planificateur des horaires ne prend pas en compte cette contrainte opérationnelle, mais modifiera ses horaires s'il est avantageux de ravitailler un navire à un point donné. Généralement, les opérateurs des navires contactent le planificateur pour faire des modifications à l'horaire et aux tournées pour le ravitaillement lorsqu'un horaire est déjà créé; le planificateur effectuera alors des modifications en ajoutant un temps de navigation supplémentaire à certains voyages, et en modifiant des points intermédiaires dans la tournée du navire.

3.2. Formulation du problème

Le problème décrit dans les sections précédentes consiste à trouver des tournées et un horaire pour une flotte fixe de navires hétérogènes sous certaines contraintes. Ces tournées doivent permettre à la compagnie d'effectuer toutes les requêtes de transport des clients, c'est-à-dire une cueillette d'un cargo à un ou plusieurs ports, et la livraison du cargo à une ou plusieurs destinations. Le choix des tournées et horaires se fait en tentant de minimiser les coûts totaux de la compagnie et en tentant de minimiser une pénalité liée à la capacité du navire par rapport au tonnage à transporter.

Le problème peut donc être résumé comme suit :

1. Objectif – minimiser les coûts suivants

- Coûts d'opération du navire
- Coûts de carburants (IFO et MDO)
- Péages et frais de pilotage
- Coûts variables additionnels
- Pénalité liée aux capacités et au coefficient d'arrimage du cargo

2. Opérations de la compagnie

- Opérations itinérantes
- Marchandises sèches en vrac
- Cueillette et livraison de cargos en chargement plein
- Ports uniques ou multiples
- Points d'origine multiples
- Points de destination multiples connus ou inconnus
- Délais météo et généraux applicables en fonction du moment de l'année et de la région

3. Flotte

- Flotte fixe de navire-vraquiers et autodéchargeurs
- Coûts d'opération différents
- Consommations différentes de carburants
- Types de carburants différents
- Vitesses différentes
- Capacités (masse et volume maximum) différentes

- Compatibilité spécifique entre chaque port et navire, et entre chaque cargo et navire

4. Cargos

- Fenêtres de temps applicables sur le chargement (et potentiellement sur le déchargement)
- Cargos compatibles avec certains navires uniquement
- Temps de nettoyage requis entre différents types de cargos
- Coefficients d'arrimage différents limitant la capacité des navires
- Chaque cargo doit être ramassé et livré par la flotte

3.2.1. Ensembles, variables et paramètres

Le problème est défini sur un graphe $G = (N, A)$ où N est l'ensemble des nœuds du réseau et A est l'ensemble des arcs. Chaque navire est compris dans l'ensemble V . Chaque navire v peut parcourir un sous-ensemble N_v de nœuds et d'arcs A_v en fonction de sa compatibilité avec chaque nœud (cargo) et arc du réseau (succession de deux cargos).

Le modèle comporte trois principaux types de variables utilisées dans la fonction objectif et dans les contraintes. La variable binaire x_{ijv} indique si le cargo i , précédant le cargo j est transporté par le navire v . La variable continue t_{iv} indique le temps de début de service du cargo i dans le navire v et la variable continue w_{iv} indique le temps d'attente entre la fin du dernier cargo et le début du cargo i dans la tournée v .

Les paramètres suivants se retrouvent dans le problème :

c_{ijv} = coût total de desservir le cargo i avant le cargo j sur le navire v

S_{ijv} = temps de service total nécessaire pour desservir le cargo i avant le cargo j sur le navire v

T_{ijv} = composant du temps de service représentant le temps où le navire est chargé lorsqu'il dessert le cargo i précédant le cargo j sur le navire v

B_{ijv} = composant du temps de service représentant le temps où le navire est déchargé lorsqu'il dessert le cargo i précédant le cargo j sur le navire v

U_{ijv} = composant du temps de service représentant le temps de chargement et de déchargement du cargo i avant le cargo j sur le navire v

$Tmin_{iv}$ = début de la fenêtre de temps associée à la cueillette du cargo i avec le navire v

$Tmax_{iv}$ = fin de la fenêtre de temps associée à la cueillette du cargo i avec le navire v

O_v = coûts d'opération du navire par unité de temps

C_{vMDO} = taux de consommation de diesel pour les moteurs auxiliaires par unité de temps

P_{ijv} = pénalité de chargement imposée au voyage desservant le cargo i avant le cargo j sur le navire v

θ_{ijv} = coûts totaux des canaux pour le voyage desservant le cargo i avant le cargo j sur le navire v

ρ_{MDO} = prix du carburant diesel utilisé dans les moteurs auxiliaires du navire

CC_{vIFO} = taux de consommation de carburant à propulsion par unité de temps lorsque le navire est chargé

CB_{vIFO} = taux de consommation de carburant à propulsion par unité de temps lorsque le navire est vide

ρ_{IFO} = prix du carburant de propulsion par tonne métrique

$Vcharge_v$ = vitesse moyenne en eaux libres lorsque le navire v est chargé

$Vballast_v$ = vitesse moyenne en eaux libres lorsque le navire v est vide

δ_{ij} = distance totale des canaux pour le voyage du cargo i avant le cargo j

D_{ij} = distance totale pour le voyage du cargo i avant le cargo j

F_{ij} = facteur de délai (météo) pour le voyage du cargo i avant le cargo j

τ_{ij} = temps fixe total des canaux pour le voyage du cargo i avant le cargo j

3.2.2. Formulation de flot binaire simplifiée

Afin d'illustrer le modèle à l'aide d'un modèle mathématique simplifié, nous avons tiré et adapté un modèle de Christiansen et al. (2007) pour résoudre un problème de tournées de navires d'une flotte industrielle à chargements complets.

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A_v} c_{ijv} x_{ijv} \quad (1)$$

sous les contraintes

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N_v} x_{ijv} = 1, \quad \forall i \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_v} x_{o(v)jv} = 1, \quad \forall v \in V, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_v} x_{id(v)v} = 1, \quad \forall v \in V, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_v} x_{ijv} - \sum_{i \in N_v} x_{jiv} = 0, \quad \forall v \in V, j \in N_v \setminus \{o(v), d(v)\} \quad (5)$$

$$x_{ijv}(t_{iv} + S_{ijv} - t_{jv}) \leq 0, \quad \forall v \in V, (i,j) \in A_v \quad (6)$$

$$Tmin_{iv} \leq t_{iv} \leq Tmax_{iv}, \quad \forall v \in V, i \in N_v \quad (7)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\}, \quad \forall v \in V, (i,j) \in A_v. \quad (8)$$

L'objectif du problème en (1) est de minimiser la somme des coûts reliés à l'opération d'une flotte, c'est-à-dire les coûts c_{ijv} multipliés par la variable binaire x_{ijv} indiquant si le cargo j après le cargo i sera desservi par le navire v . Les coûts sont détaillés dans la section suivante.

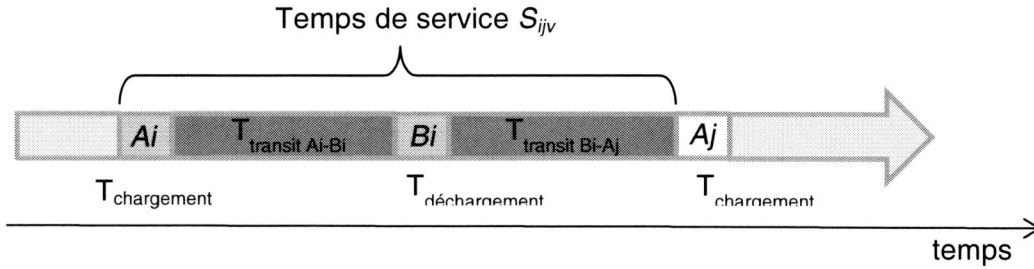
Les contraintes (2) à (8) s'appliquent au problème. Les contraintes (2) s'assurent que tous les cargos soient desservis une fois par un navire de la flotte. Les contraintes (3) et

(4) s'assurent que les navires desservent un cargo fictif représentant l'origine $o(v)$ et la destination $d(v)$ du navire. La destination $d(v)$ du navire peut être réelle en conservant les coûts et les temps de service reliés à la destination, ou fictive en posant $c_{id(v)v} = 0$ et $S_{id(v)v} = 0$. Les contraintes (5) s'assurent que le problème respecte le flot du problème.

Les contraintes (6) s'assurent que le temps de début du service pour le cargo j ne soit pas inférieur au temps de début du service pour le cargo i plus le temps de service nécessaire entre i et j . Le temps de service S_{ijv} exprime le temps nécessaire pour charger le cargo i , faire le voyage entre le port de chargement de i et le port de déchargement de i , le temps de déchargement du cargo i et le temps de voyage du port de déchargement i au port de chargement j . L'inégalité indique qu'un temps d'attente entre i et j peut exister si nécessaire. Les équations (9) remplacent l'inégalité de l'équation (6) par une égalité en introduisant une variable d'attente w_{jv} avant le cargo j .

$$x_{ijv}(t_{iv} + S_{ijv} + w_{jv} - t_{jv}) = 0, \quad \forall v \in V, (i, j) \in A_v \quad (9)$$

La figure suivante illustre le temps de service S_{ijv} .



Où :

- Ai : port de cueillette pour le cargo i
- Bi : port de destination pour le cargo i
- Aj : port de cueillette pour le cargo j

Figure 12 – Schéma du temps de service S_{ijv}

Les contraintes (7) s'assurent que les fenêtres de temps $Tmin$ et $Tmax$ associées au début de service pour le cargo i soient respectées : le temps de début du service pour le cargo i doit être supérieur ou égal au début de la fenêtre de temps, et inférieur ou égal à la fin de la fenêtre de temps. Enfin, les contraintes (8) indiquent que les variables x_{ijv} sont binaires; elles prennent la valeur de 1 si le navire v charge le cargo i avant le cargo j , ou 0 sinon.

La contrainte de compatibilité entre un cargo et un navire est implicitement prise en compte par l'ensemble A_v , c'est-à-dire l'ensemble des cargos i et j pouvant être servis par un navire v . Si une paire n'est pas compatible, elle sera retirée de l'ensemble.

3.2.3. Fonction objectif

L'objectif de ce problème est de minimiser tous les coûts relatifs au transport dans le réseau. Plusieurs coûts entrent dans l'objectif, notamment les coûts d'opération des bateaux, les coûts de carburant, les coûts des passages maritimes, les coûts de déchargement et d'attente en port et les coûts variables supplémentaires. Les coûts fixes d'opération, d'arrimage ou autres coûts fixes sont volontairement exclus du problème, car ils sont encourus, peu importe la solution au problème (peu importe le navire qui est assigné à la cueillette et à la livraison).

L'équation suivante résume la fonction objectif du problème :

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A_v} x_{ijv} (O_v + V_{vMDO} \rho_{MDO}) (T_{ijv} + B_{ijv} + w_{ijv} + U_{ijv}) \\
 + \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A_j} x_{ijv} (P_{ijv} + \theta_{ijv}) \\
 + \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A_j} x_{ijv} T_{ijv} \rho_{IFO} C C_{vIFO} + \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A_j} x_{ijv} B_{ijv} C B_{vIFO} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Cette équation peut être séparée en quatre parties.

La première est la somme pour chaque navire et pour chaque paire i et j des coûts d'opération du navire et des coûts de carburant diesel (MDO) multiplié par le temps total de navigation avec un cargo (T_{ijv}), le temps total de navigation à vide (B_{ijv}), le temps total d'attente au port (w_{ijv}) et le temps total de chargement et déchargement (U_{ijv}). Le carburant diesel est consommé en tout temps pour fournir l'électricité au navire; la consommation journalière est donc multipliée au temps total d'utilisation du navire.

$$T_{ijv} = \left(\frac{D_{ij} - \delta_{ij}}{V_{charge_v}} + \tau_{ij} \right) \times F_{ij} \quad (11)$$

Le paramètre, D_{ij} est la distance lorsque que le navire est chargé, d'une origine i à une destination j , δ_{ij} est la distance totale dans les canaux entre le cargo i et le cargo j lorsque le navire est chargé, V_{charge_v} est la vitesse du navire en eaux libres avec un cargo et τ_{ij} est la portion fixe du temps de navigation moyen dans tous les canaux entre le cargo i et le cargo j . T_{ijv} représente donc le temps de navigation qu'un navire prendra lorsqu'il est chargé entre le cargo i et le cargo j . Le paramètre F_{ij} représente un facteur de délai multiplié au temps total de navigation.

De manière similaire, le temps total de navigation à vide est calculé comme suit :

$$B_{ijv} = \left(\frac{D_{ij} - \delta_{ij}}{V_{ballast_v}} + \tau_{ij} \right) \times F_{ij} \quad (12)$$

La somme de la consommation moyenne du navire v de diesel (C_{vMDO}) multiplié par le prix moyen du diesel (ρ_{MDO}) et multiplié par les quatre éléments précédents donne le coût total du carburant diesel de la flotte. Pour des fins de simplifications de la formulation, nous n'utilisons qu'un seul taux de carburant et un seul prix de carburant. Dans le modèle de résolution, il y a trois taux de consommation de diesel qui sont utilisés, soit lorsque le bateau charge, lorsqu'il décharge et lorsqu'il est en voyage.

La seconde partie de la fonction objectif s'assure d'inclure les coûts des canaux ainsi que les pénalités de chargement du cargo liées à la capacité des cales du navire v ainsi que du coefficient d'arrimage du cargo i . Les coûts de canaux sont représentés par le paramètre θ_{ijv} . La pénalité P_{ijv} inclut des pénalités fictives que l'utilisateur peut imposer sur un navire pour charger un cargo i avant un cargo j .

La troisième partie de l'équation représente le coût total du carburant maritime (IFO) nécessaire pour la navigation avec cargo. Pour des fins de simplification, il n'y a qu'un seul grade de carburant IFO représenté dans la fonction objectif bien qu'il y ait trois grades en tout dans le modèle. La somme du prix du carburant ρ_{IFO} multiplié par le temps de navigation total chargé par navire (T_v) multiplié par la consommation de carburant chargé du navire (CC_{vIFO}) donne le coût total du carburant utilisé pour le transport de cargo.

La quatrième partie de l'équation est similaire à la troisième. En remplaçant le temps total de navigation sous charge (T_v) par le temps total en ballast (B_v) et la consommation de carburant lorsque le navire v est chargé (CC_{vIFO}) par la consommation de carburant lorsque le navire v est vide (CB_{vIFO}), on obtient le coût total du carburant utilisé pour le déplacement en ballast.

3.2.4. Contraintes additionnelles

Les contraintes (2) à (8) s'appliquent toutes à notre problème. Afin d'harmoniser la terminologie utilisée dans la sous-section précédente, nous spécifions S_{ijv} dans (6) par :

$$S_{ijv} = T_{ijv} + B_{ijv} + U_{ijv} \quad (13)$$

L'équation (6) devient alors :

$$x_{ijv}(t_{iv} + (T_{ijv} + B_{ijv} + U_{ijv}) + w_{jv} - t_{jv}) = 0 \quad \forall v \in V, (i, j) \in A_v \quad (14)$$

Pour prendre en compte le temps de lavage des cales lorsque deux cargos consécutifs sont chargés dans un navire, nous ajoutons la contrainte suivante :

$$w_{jv} = \max \left\{ \Gamma_{ijv} - B_{ijv}, 0 \right\} + (t_{jv} - t_{iv} - S_{ijv}) \quad \forall v \in V, (i, j) \in A_v \quad (15)$$

où Γ_{ijv} représente le temps de conditionnement de la cale lorsqu'un cargo j est chargé après un cargo i dans un navire v . Le temps du segment à vide est soustrait au temps de conditionnement, et si ce nombre est positif, un temps minimal d'attente est encouru avant le chargement de j . Selon (9), un temps d'attente est également encouru en raison des fenêtres de temps du prochain cargo.

Chapitre 4 – Méthode de résolution

Ce chapitre présente la méthode de résolution qui a été développée ainsi que toutes les étapes de traitement nécessaires afin de pouvoir résoudre le problème et l'adapter aux spécificités de l'entreprise.

La première section de ce chapitre présente une description du processus de traitement des données. La deuxième section décrit la métaheuristique de recherche avec tabous utilisée pour la résolution du problème. Enfin, la troisième section explique le processus de traitement des résultats et de création des horaires.

4.1. Phase de prétraitement et de validation

La phase de prétraitement et de validation est essentielle au problème. Cette phase adapte les données en fonction des paramètres spécifiés par l'utilisateur. Ce dernier peut notamment indiquer l'horizon temporel du problème (ce qui détermine le nombre total de clients et de sommets), combien de véhicules et quels véhicules seraient utilisés, s'il y a plusieurs cueillettes d'un même cargo ou plusieurs livraisons, si les véhicules ont des dépôts finaux ou si le réseau est ouvert, s'il y a des contraintes spécifiques ou des restrictions pour les navires ou les ports, etc.

En premier lieu, l'utilisateur peut au moyen d'une interface graphique sélectionner les navires qui seront utilisés, ainsi que modifier les caractéristiques techniques de ces navires. Par exemple, l'utilisateur pourrait modifier la vitesse moyenne des navires et moduler la consommation de carburant s'il souhaite explorer des scénarios où les navires vont légèrement plus vite (ce qui influence le temps de navigation), mais consomment plus de carburant (ce qui influence les coûts de carburant).

Par la suite, l'utilisateur sélectionne l'horizon temporel d'optimisation. Le problème peut être résolu à long terme (pour une année financière), à moyen terme (pour planifier un

trimestre ou quelques mois à l'avance) ou à court terme (pour prendre en compte des changements dans la demande). Pour chaque type d'horizon temporel, un nombre différent de sommets sera pris en compte. Pour la réoptimisation à court terme, l'utilisateur peut sélectionner une fenêtre de traitement où le temps minimal correspond à une date où le navire est disponible pour la réalisation d'un prochain voyage et où le temps maximal correspond à l'horizon temporel des horaires des navires.

Ensuite, l'utilisateur peut sélectionner un port de destination finale pour chaque navire ou laisser l'algorithme décider pour lui. En sélectionnant un port de destination, l'utilisateur s'assure qu'à la fin de sa tournée, le navire sera disponible au port spécifié. Il peut également laisser le champ libre et utiliser le point de dépôt du dernier chargement comme destination finale.

L'algorithme suppose que chaque navire effectue un chargement complet d'une origine (une cueillette) vers une destination (une livraison). Cependant, il est possible qu'il y ait n points de cueillette et n points de destination tel qu'expliqué dans la section précédente. Dans ce cas, l'utilisateur peut le spécifier et un contrat fictif sera créé pour chaque point de cueillette supplémentaire ou chaque point de livraison supplémentaire.

Enfin, l'utilisateur peut spécifier des paramètres pour l'heuristique, soit le nombre d'itérations à effectuer, des points d'arrêts automatiques, le nombre d'itérations durant lesquelles les solutions obtenues sont taboues, etc. Ces paramètres seront explorés plus en détail dans la section suivante.

À la fin de la phase de prétraitement, quatre fichiers en format texte (.txt) sont créés et sont utilisés dans la phase de recherche de solution.

4.1.1. Interface utilisateur

Afin d'aider l'utilisateur à parcourir les données et à sélectionner les contraintes spécifiques au problème, une interface utilisateur a été créée en Visual Basic for Applications (VBA) sur Excel. Toutes les données nécessaires au problème se retrouvent donc dans un fichier Excel, et un code permet de créer des fichiers textes en fonction des données et des paramètres sélectionnés.

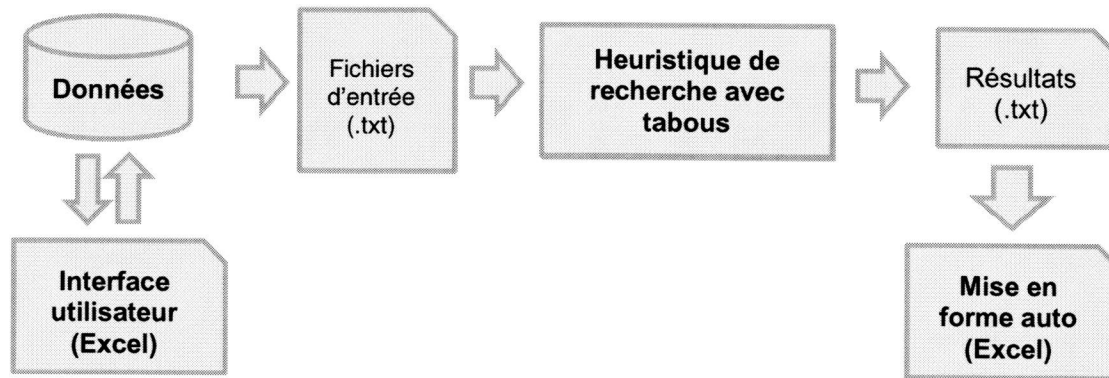


Figure 13 – Schéma simplifié du processus

Les données de la demande sont entrées manuellement par l'utilisateur dans un tableau Excel. Les données sont décrites en détail dans le tableau 6 du chapitre précédent. Pour chaque client, le planificateur peut choisir d'imposer une contrainte de compatibilité « dure » qui empêche l'insertion d'un cargo dans un navire particulier. Cette matrice est particulièrement utile pour des cargos qui ne peuvent être changés de navire en raison de contraintes techniques ou commerciales.

Le planificateur peut également entrer des contraintes « douces » en sélectionnant un client et un contrat et en spécifiant une pénalité monétaire si le cargo est inséré dans la tournée. L'algorithme pourra ainsi procéder à l'insertion, mais sera pénalisé; il cherchera donc de meilleures solutions et choisira d'insérer le cargo dans une autre tournée si cela est possible.

Lorsque toutes les données des clients sont entrées dans la feuille Excel principale, l'utilisateur peut commencer à paramétrer l'horaire qu'il veut créer. Un formulaire VBA le guide alors parmi les différents éléments qu'il peut modifier.

Select schedule characteristics

Vessels in the schedule:

Vessel name:	Speed:	Available date:	Start:	End:
MV ST-JEAN		28/05/2017 21:37:42	PRE	NIL
MV MAURICIE		31/05/2017 16:21:00	TOL	NIL
MV SUDBURY		29/05/2017 17:21:26	QUE	NIL
MV HURONIAN		29/05/2017 18:42:19	SOR	NIL
MV PRAIRIES		31/05/2017 18:12:47	WIN	NIL
MV OSWEGATSHIE		03/06/2017 19:17:11	QUE	NIL
MV GENESEE		27/05/2017 09:30:43	TOL	NIL
MV MISSISSAGI		01/06/2017 05:06:05	PRE	NIL
MV MUNUSCONG		07/06/2017 11:44:50	SYD	NIL
MV CHARLEVOIX		07/06/2017 08:19:29	MTL	NIL
MV NIPIGON		04/06/2017 01:18:04	BCO	NIL

Weather / Location delays

W-DELAY SUPERIOR	05/05/201	03/06/201	3 hrs
PORT DELAY QUE	06/07/201	08/07/201	12 hrs
SEAWAY DELAY SOO LOCK	01/05/201	31/05/201	3 hrs

Delete delay Add delay

Add / modify vessel information

Name of vessel: Port of origin: Available date:

Select speed: ☐ Use average historical speed ☐ Custom speed:

☐ No last port of visit ☐ Use ship during all horizon or Custom ending location: or Date of layup/unavailability:

Change fuel prices

IFO 380 (CAD\$):	IFO 180 (CAD\$):	IFO 60 (CAD\$):	MDO (CAD\$):
421	441	474	776

Planning horizon: 120 Max voyage duration: 120 Start of schedule: 27/05/2017 04:54:07

Vessel/Customer penalty costs

MV HURONIAN	River Minerals	100000
MV OSWEGATSHIE	American Wheat	120000
MV MAURICIE	Rock Salt International	50000

Delete cost Add cost

☒ Use standard general delays

Trade time windows flexibility (%)

Lower flexibility	Upper flexibility
0	0

Module

Modify/view distance table Add unavailability Reset Save scenario Close Generate routes and schedules

Figure 14 – Menu principal de l'utilisateur

Dans le menu principal, l'utilisateur peut sélectionner les navires qui sont inclus dans la série ainsi que les caractéristiques de chaque navire (date de disponibilité, date de non-disponibilité, port d'origine, port de destination, vitesse personnalisée, etc.). L'utilisateur entre également le prix des carburants dans le réseau, l'horizon de planification et le début de l'horaire.

Un module d'analyse de sensibilité permet de générer plusieurs fichiers d'entrée qui seront analysés les uns à la suite des autres à l'aide de l'heuristique de recherche avec tabous. L'utilisateur peut faire varier la vitesse des navires, la largeur des fenêtres de temps, ou des paramètres personnalisés.

Unavailable period

Select a ship :

- MV ST-JEAN
- MV MAURICIE
- MV SUDBURY
- MV HURONTIAN**
- MV PRAIRIES
- MV OSWEGATSHIE
- MV GENESEE
- MV MISSISSAGI

Type of stop

- ☐ Temporary layup
- ☒ Repair
- ☐ Dry dock
- ☐ Time charter

Port of unavailability: Beginning of unavailability: Ending of unavailability:

☒ Ship available at same port or ☐ Specific port :

Additional comments:

Figure 15 – Formulaire de création d'un arrêt temporaire

Si un navire doit effectuer de la maintenance mécanique, ou qu'il doit procéder à un arrêt temporaire, l'utilisateur a accès à un module qui permet de créer un cargo fictif correspondant à l'arrêt planifié. L'utilisateur peut sélectionner la raison de l'arrêt ou de la période d'indisponibilité et le code ajoute automatiquement le cargo à la liste précédemment créée par l'utilisateur.

Distance table parameters

View or modify a distance between two ports:

Port A: Port B:

Base distance (nm)	Canal distance (nm)	Canal sailing time (h)	Sailing time (h) @ 12 knot	Sailing time (d) @ 12 knot
433	56	6	37,42	1,56

Add or modify an additional cost between two ports:

Port A	Port B	Additional cost
SUP	MTL	12000

Port A: Port B: Additional cost:

Figure 16 – Formulaire de modification de la table des distances

La table des distances peut être modifiée manuellement ou via un formulaire VBA. Le formulaire permet d'afficher et de modifier une distance (composée d'une distance de base, d'une distance de canal, et d'un temps fixe de navigation dans le canal). L'utilisateur peut également ajouter un coût supplémentaire de navigation entre deux ports en particulier, c'est-à-dire imposer une pénalité à tous les navires qui visitent un port B après avoir visité le port A.

Customize general delays

Customize general delays :

	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	January
Lake Michigan :	0,80028	1,4742	0,6664	1,4381	0,5376	1,2078	1,21268	0,76228	1,4406	0,60872	1,49176
Lake Huron :	1,3286	1,28772	1,42142	0,6076	1,36036	0,84304	0,60852	1,3455	0,7056	1,09548	1,41642
Lake Superior :	1,31456	0,98592	1,3664	0,65892	0,83688	0,67796	0,6741	0,5868	0,58174	1,59528	1,202
Lake Erie :	0,59856	1,48608	1,38384	0,768	0,50596	0,5772	1,23684	0,947	0,83832	0,75672	2,01342
Lake Ontario :	0,7252	1,11888	0,69168	0,54162	1,4385	1,4505	1,17676	0,931	1,44102	1,8045	1,13082
St. Lawrence River :	0,9081	1,35206	1,3348	1,38312	0,83916	0,4755	0,51624	0,741	0,76152	1,33504	1,78416
Coast :	1,47898	0,72936	0,7488	1,18384	0,53032	0,8595	1,4265	1,1194	0,6603	0,61768	1,03968

Close Apply and close

Figure 17 – Formulaire des délais généraux de navigation

L'utilisateur peut également modifier les délais de navigation à l'aide d'un formulaire. Ces délais sont enregistrés dans une table Excel, mais ce dernier peut également sélectionner les délais de base qui ont été préalablement calculés.

Customer/Trade additional cost

Select a ship

MV ST-JEAN
MV MAURICIE
MV SUDBURY
MV HURONIAN
MV PRAIRIES
MV OSWEGATSHIE
MV GENESEE

Select a customer

Rock Salt International	CHI	MTL	Salt
Salaberry Mining Co.	TOR	OSO	Iron Ore
Salaberry Mining Co.	TOR	QUE	Iron Ore
River Minerals	TBY	CHVX	Stone
American Wheat	WIN	CHI	Grain
American Wheat	WIN	PRE	Grain
American Wheat	WIN	TBY	Grain

Additional cost :

Close Apply and close

Figure 18 – Formulaire de création de pénalités fictives

Les contraintes 'douces', c'est-à-dire les pénalités pour insérer un cargo dans un navire, sont pris en compte par un formulaire où il est possible de sélectionner un navire et des clients, et d'appliquer un coût de pénalité sur ces derniers. Chaque client est différencié

par son nom, mais également par son origine et sa destination, ainsi que par le cargo transporté. Les contrats identiques sont retirés de la liste pour des raisons pratiques. Tous les cargos correspondant au contrat sélectionné recevront la pénalité pour le navire sélectionné.

Figure 19 – Formulaire de création de délais fixe pour une portion du réseau

L'utilisateur peut également ajouter des délais supplémentaires en nombre fixe d'heures à une portion du réseau (un lac, un port ou un canal). Ce délai fixe est applicable durant une fenêtre de temps spécifiée par l'utilisateur, et sera ajouté au temps de navigation lors du calcul de la table des distances finale.

Figure 20 – Formulaire de destinations multiples

Si l'utilisateur indique au programme qu'un cargo doit être chargé ou déchargé à plusieurs ports, un formulaire lui demandera de spécifier les ports à visiter ainsi que l'ordre de visite. Une macro VBA créera des paires origine-destination correspondant aux différents ports de visite.

Figure 21 – Formulaire de modification des paramètres d'optimisation

Enfin, l'utilisateur peut sélectionner des paramètres d'optimisation pour une série de tests. Ces paramètres permettent à l'heuristique de recherche avec tabous de trouver plus facilement ou d'explorer plus de solutions. Tous les paramètres sont décrits plus en détail dans la section suivante.

Une fois que tous les paramètres, variables et contraintes ont été entrés par l'utilisateur, une macro VBA crée automatiquement des fichiers d'entrées. Ces fichiers ont un format fixe qui doit être respecté pour que l'heuristique puisse adéquatement lire le problème; un code mettant en forme automatiquement les données est donc nécessaire.

4.1.2. Calcul des délais météo applicables

Pour calculer les délais météo, la matrice précédente est utilisée. Ainsi, il est possible de calculer des délais moyens pour chaque sous-région à un temps précis de l'année. En raison de la complexité de la mise en place de ces paramètres dans le calcul des distances de navigation lors de l'optimisation et en raison de la baisse de performance observée de la métaheuristique, une estimation du délai est effectuée préalablement et

est ajoutée à la table des distances statiques. Les délais sont donc calculés à l'aide des fenêtres de temps du cargo. Par exemple, si un cargo doit être ramassé entre le 1^{er} septembre et le 10 septembre, et que le temps moyen de navigation est de 3 jours, nous calculons le délai avec une fenêtre de temps du 1^{er} septembre jusqu'au 13 septembre.

Également, pour simplifier le calcul des délais et réduire le temps de traitement, nous avons effectué la simplification suivante. Les délais météo s'appliquent sur deux sous-régions uniquement, soit les régions correspondant à l'origine et à la destination du voyage. En raison des petits écarts entre les délais calculés pour chaque sous-région adjacente, cette simplification n'affecte pas le réalisme des délais imposés. Par exemple, si un délai est de 10% pour le lac A (port de chargement), 12% pour le lac B (lac de transit) et 15% pour le lac C (port de déchargement), nous calculons les délais uniquement à l'aide du lac A et du lac C, ce qui donne une bonne estimation des délais applicables dans les lacs A, B et C.

Le pseudo-code suivant décrit le fonctionnement du calcul :

Fonction Calcul_délais_généraux :

Entrée : port_origine, port_desti, fenêtreA, fenêtreB

fenêtreB = fenêtreB + Calcul_temps_navigation (port_origine, port_desti)

Si jour(fenêtreA) < 15 alors

delaia = (15 - jour(fenêtreA)) / 30 x matrice_delai(port_origine, mois(fenêtreA) - 1) +
(15 + jour(fenêtreA)) / 30 x matrice_delai(port_origine, mois(fenêtreA))

Si jour(fenêtreA) >= 15 alors

delaia = 1 - (jour(fenêtreA) - 15) / 30 x matrice_delai(port_origine, mois(fenêtreA)) +
1 - (45 - jour(fenêtreA)) / 30 x matrice_delai(port_origine, mois(fenêtreA) + 1)

Fin Si

Si jour(fenêtreB) < 15 alors

delaib = (15 - jour(fenêtreB)) / 30 x matrice_delai(port_desti, mois(fenêtreB) - 1) +
(15 + jour(fenêtreB)) / 30 x matrice_delai(port_desti, mois(fenêtreB))

Si jour(fenêtreA) >= 15 alors

delaib = 1 - (jour(fenêtreB) - 15) / 30 x matrice_delai(port_desti, mois(fenêtreB)) +
1 - (45 - jour(fenêtreB)) / 30 x matrice_delai(port_desti, mois(fenêtreB) + 1)

Fin Si

Le calcul de chaque délai météo s'effectue pour toutes les paires origine-destination utilisées par l'heuristique. Le délai est un facteur multiplié à la distance entre une origine et une destination, le temps de canal correspondant et la distance de canal.

4.1.3. Calcul des pénalités de chargement

Le processus de calcul des pénalités de chargement est également effectué lors de la phase de prétraitement. En raison de la structure des fichiers de données qui sont envoyés vers l'heuristique, et en raison du temps de calcul négligeable nécessaire pour le calcul de chaque pénalité, la génération du fichier se fait avant l'optimisation.

Il est seulement nécessaire de calculer une pénalité correspondant à chaque paire de véhicule et cargo, donc pour m véhicule et n cargos, le nombre de ligne dans le fichier de pénalité s'élève à $m \times n$.

Pour 15 véhicules et 100 cargos, ce nombre s'élève à seulement 1500 pénalités. Même pour les grosses instances, le temps de génération de la matrice de pénalité se chiffre en centièmes de secondes.

Pour calculer une pénalité, nous devons déterminer si un navire sera limité par le poids du cargo ou le volume du cargo. Nous comparons ensuite le tonnage maximal que le navire peut transporter au tonnage requis plus la flexibilité contractuelle. L'absolu de la différence multiplié par le taux de transport (\$ / tonne) donne une pénalité monétaire qui sera appliquée au navire. Comme vu dans la section précédente, un grand navire sera autant pénalisé qu'un petit navire en raison du coût d'opportunité d'utiliser une grande capacité pour transporter un cargo de taille moyenne.

Après des discussions avec le planificateur et le département du transport de la compagnie, nous en sommes venus à la conclusion que la portion de la pénalité résultant du coût d'opportunité d'utiliser un navire trop grand n'est pas tout à fait applicable. En effet, il n'est pas toujours possible d'avoir des cargos de grande taille, ce qui limite l'utilisation maximale de la capacité des grands navires. Pour réduire l'effet de la pénalité liée à une surcapacité des navires, un facteur λ est appliqué à la pénalité. Le facteur se situe entre 0 et 1, et en fonction de la disponibilité de grands cargos, il peut être modifié.

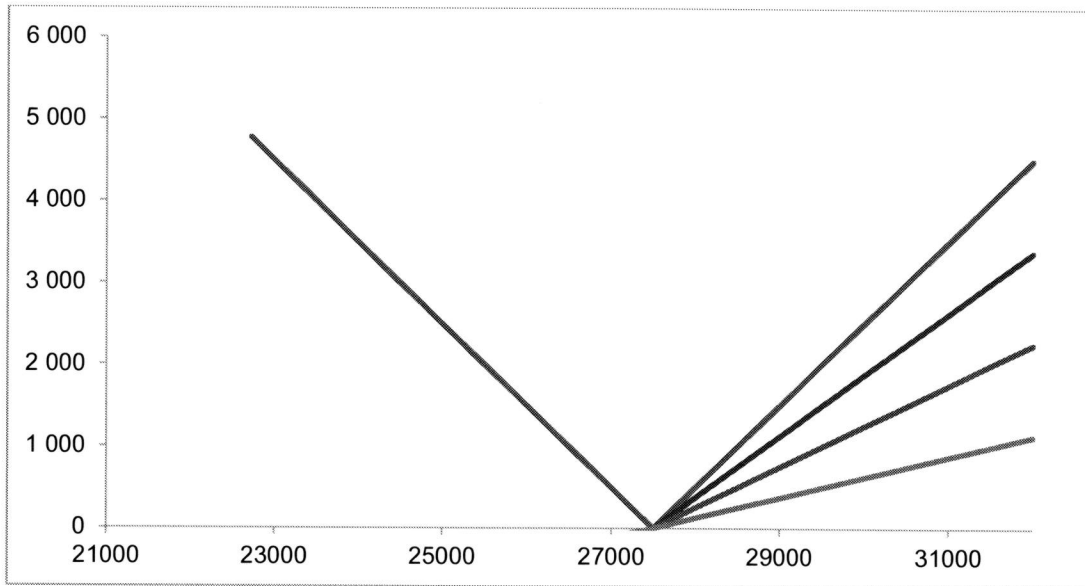


Figure 22 – Illustration d'une pénalité positive modulée par différentes valeurs de λ

Dans la figure précédente, la courbe en gris représente la pénalité avec un facteur $\lambda = 1,00$. En modifiant le facteur à 0,75, nous obtenons la courbe en rouge, à 0,50 nous obtenons la courbe en bleu et à 0,25 nous obtenons la courbe en vert. En testant ce paramètre pour différentes valeurs, nous obtenons de meilleures solutions pour des petites valeurs de λ lorsque les instances sont très contraintes. Les résultats obtenus lors de cette analyse sont décrits plus en détail dans le chapitre suivant.

Le pseudo-code suivant décrit le processus de calcul des pénalités :

Fonction Calcul_pénalité_arrimage :

Entrée : tonne_client, flexibilité_client, capVol, capPoids_seaway, capPoids_sd, coeff_arrimage, portA, portB, taux_tonne

Poids_volMax = capVol / coeff_arrimage

tonne_client = tonne_client x (1 + flexibilité_client)

min_tonne_client = tonne_client x (1 – flexibilité_client)

Si traverse_canal(portA, portB) <> 0 alors

 Poids_max = capPoids_seaway

Sinon

 Poids_max = capPoids_sd

Fin si

Si eausalée(portA) = 1 et eausalée(portB) = 1 alors

 Poids_max = Poids_max x 1,025

Fin si

Si Poids_max < min_tonne_client alors

 Pénalité = DBL_MAX

Sinon

```

    Pénalité = (min( Poids_max, Poids_volMax) – tonne_client ) x taux_tonne
Fin si

Si Pénalité > 0 alors
    Pénalité = pénalité x -1 x lambda
Fin si

Fin Fonction

```

4.1.4. Processus de génération des fichiers

Pour générer le fichier de demande, les dates sont converties en identifiant temporel dont le temps 0 correspond au début de la période de planification et donc le temps maximal correspond à la fin de l'horizon de planification. Les dates sont converties en minutes et tous les temps dans l'algorithme sont ainsi calculés en minutes.

Les fenêtres de temps sont applicables autant aux cueillettes qu'aux livraisons, ce qui permet une grande flexibilité au planificateur. Des fenêtres de temps sont également applicables à tous les navires; une tournée peut commencer à un moment donné dans le futur (dans 5 jours par exemple) et terminer avant une certaine date. Il est donc possible de définir très précisément le temps où un navire naviguera.

Une boucle parcourt ensuite un à un les éléments de la table des cargos et place le cargo dans le fichier d'entrée si la fenêtre de temps de chargement est plus grande que la date de début de l'horizon de planification et si la fenêtre de temps de déchargement est plus petite que la fin de l'horizon de planification. S'il n'y a pas de fenêtre de temps sur le déchargement, une estimation du temps de navigation nécessaire et du temps de service requis est alors appliquée sur la borne supérieure de la fenêtre de temps de cueillette et cette fenêtre de temps fictive doit être inférieure à la fin de l'horizon de planification.

Les temps de service, soit le temps de chargement et de déchargement du cargo sont considérés comme fixes et varient en fonction du type de navire et du cargo transporté. La taille du cargo transporté n'affecte donc pas le temps de chargement ou de déchargement, car la différence entre le chargement ou le déchargement de deux tonnages d'ordre de grandeur similaire est négligeable comparativement au temps total de service requis (attente, accostage, etc.). L'utilisateur peut également entrer un temps de service supplémentaire si un client le requiert. Le temps de service sera appliqué au déchargement uniquement.

Pour générer la table des distances, chaque combinaison possible entre une origine et une destination est effectuée. Chaque cargo (n) comprend une origine et une destination, et chaque navire (m) comprend un port d'origine et un port de destination. Ainsi, le nombre total d'origines et de destinations possibles est $(2 \times (m + n))^2$.

Pour 15 navires et 100 cargos, nous obtenons une table des distances de 52 900 lignes, et pour 150 cargos, nous obtenons une table de 108 900 lignes. Pour de très grosses instances, la création automatique de la table de distance peut devenir très longue, ce qui motive l'utilisation de raccourcis pour réduire le temps de traitement.

À la place d'effectuer le calcul de chaque paire origine-destination, nous générons uniquement les distances qui seront utilisées par l'algorithme, et nous remplaçons les autres distances par des 0. Par exemple, il n'est pas nécessaire de calculer la distance entre un port de livraison et le point initial du navire, car le navire devra effectuer une cueillette avant d'effectuer une livraison. Nous n'avons qu'à calculer la distance entre le port d'origine et le point de cueillette, et la distance entre le point de cueillette et le point de livraison. Également, nous n'avons pas besoin de calculer la distance entre un port final et un port de cueillette, car le dernier port visité par un navire avant de terminer sa tournée sera toujours un port de livraison.

Avec cette méthode, nous sommes passés d'un temps total de création de 5 minutes à moins de deux minutes pour environ 150 cargos et 15 navires.

Puisque l'algorithme nécessite un port de destination à la fin de chaque tournée, nous avons créé des ports fictifs dont la distance avec n'importe quel port final est nulle (donc incidemment le temps de navigation est nul). Le navire livre donc son dernier cargo et se rend à ce port fictif, ce qui signifie que le navire termine sa course au dernier port de livraison.

Le fichier des paramètres des navires est généré en prenant les données nécessaires au problème dans les bases de données des caractéristiques de la flotte et en les copiant dans le fichier d'entrée.

Le fichier des pénalités et compatibilités est créé en générant pour chaque paire de navire et cargo une ligne comportant la pénalité d'assigner le cargo au client (en fonction de la pénalité d'arrimage et des pénalités supplémentaires que l'utilisateur peut entrer) et la compatibilité binaire entre le navire et le client. Si un navire n'est pas compatible, la compatibilité sera donc de 0, et 1 si le navire l'est.

Les quatre fichiers sont générés les uns à la suite des autres et envoyés dans un répertoire sélectionné par l'utilisateur. Le répertoire doit contenir l'exécutable de l'heuristique. L'utilisateur peut lancer manuellement l'optimisation en double-cliquant sur l'exécutable ou il peut le démarrer à l'aide d'Excel.

4.2. Heuristique de recherche avec tabous

La phase de recherche de solution est au cœur de la résolution du problème. Pour trouver des solutions, une métaheuristique de recherche avec tabous est utilisée. Cette méthode est particulièrement adaptée lorsqu'un grand nombre de solutions est possible, ce qui est le cas pour les problèmes de tournée de véhicules.

Ce problème est résolu à l'aide de l'heuristique de recherche avec tabous de Cordeau et Laporte (2003) utilisée pour la résolution d'un problème de tournée de véhicule statique pour le transport à la demande. Ce type de problème est similaire au problème rencontré par l'entreprise de transport maritime : des clients contactent le transporteur et souhaitent obtenir un transport d'une origine vers une destination à l'intérieur d'une fenêtre de temps. L'algorithme comporte certaines caractéristiques qui ne sont pas applicables à l'industrie du transport maritime en mode itinérant comme le dépôt central ou la flotte homogène, mais le problème de base reste semblable, c'est-à-dire de trouver des tournées et des horaires minimisant les coûts de transport de la compagnie et respectant les contraintes des clients.

L'algorithme a été codé en langage C et a été compilé pour fonctionner en environnement Windows, Mac et Linux.

4.2.1. Modifications de base à l'algorithme de Cordeau et Laporte

Puisque la métaheuristique de Cordeau et Laporte comporte certaines caractéristiques différentes du problème étudié dans ce mémoire, nous avons apporté quelques modifications de base. En plus de ces modifications de base, des paramètres ainsi que certaines fonctionnalités ont été introduits et sont décrits dans les sous-sections suivantes.

La principale modification apportée au problème concerne les dépôts. Dans l'algorithme de base, un seul dépôt était utilisé pour l'origine et la destination de chaque tournée. Pour adapter le problème, une origine et une destination pour chaque véhicule sont insérées lors de la phase de construction de chaque tournée. Une fenêtre de temps a été créée pour ce point d'origine et de destination, permettant de restreindre individuellement la durée des tournées.

Pour prendre en compte la flotte hétérogène, des structures qui correspondent à chaque véhicule ont été créées. Ces structures permettent notamment à la fonction objectif d'être renseignée sur les coûts d'exploitation du navire, sa vitesse et sa consommation de carburant. Des matrices de compatibilité associées à chaque véhicule ont également été créées afin de restreindre l'assignation d'une cueillette et d'une livraison dans certaines tournées.

La fonction de coût initiale était basée uniquement sur la distance totale parcourue par les véhicules. La fonction objectif décrite au chapitre 3 a été insérée dans l'algorithme.

Enfin, les distances dans l'algorithme initial étaient calculées à l'aide de points cartésiens. Ces distances ont été remplacées par une table des distances statiques calculée préalablement. Cette table des distances prend en compte les portions fixes des voyages, tel que décrit à la section 3.1.3.

4.2.2. Fonctionnement général

L'heuristique de recherche avec tabous débute à une solution initiale qui respecte ou non les contraintes de base du problème. Le problème est assujéti à des contraintes de respect des fenêtres de temps, de charge maximale du navire, de durée maximale d'une tournée et de durée des voyages. Une description plus détaillée des contraintes du problème sera fournie dans les prochaines sections.

À partir de la solution initiale, l'algorithme évalue le coût total et la faisabilité des solutions dans son voisinage direct. Il se déplace à la meilleure solution dans ce voisinage et place un tabou sur la solution qu'il vient de quitter. Un tabou est une interdiction de retour à cette solution pour un nombre fixe d'itérations. L'algorithme explore donc l'espace de solutions à la recherche d'une solution respectant les contraintes de base du problème et ayant le coût le plus bas. En raison du grand nombre de solutions possibles, l'algorithme effectue un nombre maximal d'itérations

après quoi il retourne à la meilleure solution trouvée (si cette dernière respecte les contraintes du problème).

Puisque l'algorithme n'explore pas tout l'espace de solution, mais seulement une partie, il n'est pas possible de vérifier l'optimalité de la solution. De plus, pour des paramètres identiques et un nombre d'itérations identique, la solution finale peut également varier, car le point de départ initial ainsi que les paramètres de recherche sont aléatoires.

4.2.3. Initialisation

La solution de départ de l'algorithme peut être déterminée aléatoirement ou peut être sélectionnée par l'utilisateur. Dans le premier cas, les différentes requêtes de transport sont allouées aléatoirement à des navires si ces derniers peuvent desservir ces requêtes. En effet, un cargo ne pourrait pas être alloué à un navire s'il y a incompatibilité navire-cargo. Le processus d'initialisation se termine quand toutes les requêtes sont placées dans les navires de la flotte.

Dans le deuxième cas, l'utilisateur peut fournir des tournées déjà existantes à l'algorithme en spécifiant les requêtes à desservir et l'ordre de visite pour chaque navire. Cette solution initiale (« seed ») permet à l'algorithme de partir d'une solution initiale de base qui permet à l'utilisateur de réoptimiser. Le point de départ fourni à l'algorithme peut, encore une fois, ne pas respecter les contraintes de base du problème.

Lorsque les requêtes de transport sont insérées dans chaque tournée, l'algorithme tentera de créer un horaire de visite pour chaque sommet respectant les fenêtres de temps associées à ces derniers. Pour ce faire, l'algorithme tentera de trouver le début du service au sommet i (a_i) le plus loin dans le temps tout en réduisant au maximum les violations de contraintes de fenêtre de temps des autres sommets. Par exemple, pour le sommet 1b, l'algorithme tentera de trouver le temps maximum qui permet le respect des contraintes de fenêtre de temps pour les sommets 2b et 3b.

Dans la première situation, en tentant de minimiser les temps d'attente entre les requêtes, l'algorithme viole les contraintes de fenêtre 2b et la fenêtre de temps 3b associées respectivement à la fin de service de la requête 2 et de la requête 3.

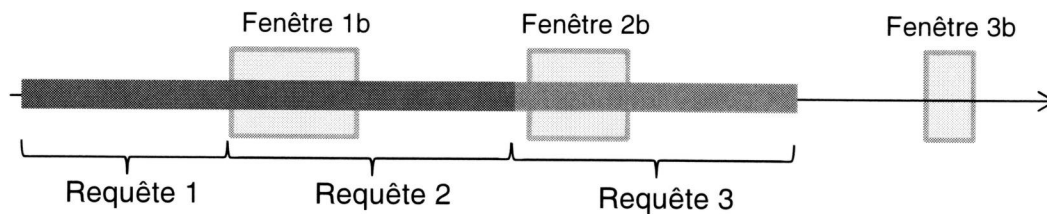


Figure 23 – Ordonnancement d'une tournée avant l'ajustement du début des fenêtres de temps

En tentant de trouver le début de service le plus loin dans le temps pour minimiser la violation des contraintes de fenêtre de temps, l'algorithme crée des temps d'attente entre les requêtes, ce qui permet le respect des trois fenêtres de temps.

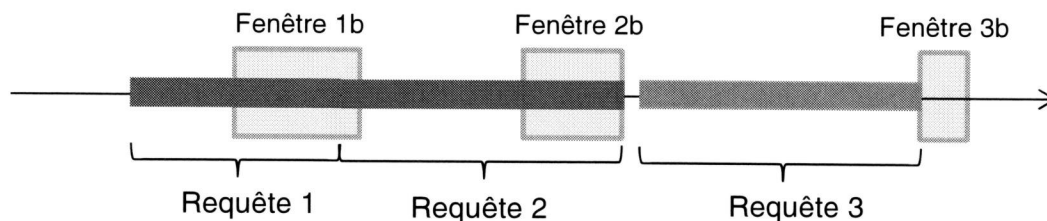


Figure 24 – Ordonnancement d'une tournée après l'ajustement des fenêtres de temps

À la différence de l'heuristique de recherche locale adaptée au transport de personne, il n'y a pas de contrainte de durée maximale d'un voyage, ce qui permet ainsi de créer des périodes d'attente entre les cargos sans qu'il y ait un temps d'attente maximal possible.

L'insertion des requêtes (incluant un sommet de cueillette et de livraison) se fait donc selon ce principe de temps d'attente minimisant la violation des fenêtres de temps, soit par processus aléatoire ou via une tournée préexistante.

4.2.4. Itérations et processus de diversification

À partir de la solution initiale, l'algorithme commence à explorer des solutions dans son voisinage. En se déplaçant d'une solution à une autre, il peut ainsi trouver des solutions respectant toutes les contraintes. Pour se déplacer d'une solution à une autre, l'algorithme effectue deux types de mouvements : des mouvements inter-tournées (échanges de requêtes entre des tournées) et des mouvements intra-tournées

(repositionnement des requêtes dans chaque tournée). À chaque itération, l'algorithme effectue un seul mouvement. La proportion de mouvements inter-tournée et intra-tournée est préalablement déterminée en fonction de la taille du problème. Lorsqu'un mouvement est effectué, ce même mouvement est interdit pour un nombre d'itérations. Ce processus permet ainsi à l'algorithme de ne pas rester prisonnier d'un minimum local en retournant toujours à la solution la moins chère dans un voisinage direct. Le statut tabou de la solution peut être enlevé et le déplacement vers cette solution peut mener à trouver une nouvelle solution encore moins chère.

L'algorithme peut explorer des solutions non réalisables pour se déplacer vers des solutions réalisables moins chères. Les contraintes de fenêtres de temps, de chargement maximal et de durée maximale des tournées et des voyages peuvent donc ne pas être respectées par l'algorithme. Chacune de ces contraintes est incluse dans la fonction objectif comportant les coûts de transport totaux de la solution. La violation des contraintes augmente donc le coût de la fonction objectif, et l'algorithme tentera de minimiser cette fonction objectif en cherchant des solutions qui minimisent la violation des contraintes et les coûts totaux de transport.

Dans la fonction objectif de l'heuristique, chaque violation de contrainte est associée à un paramètre positif qui s'auto-ajuste pendant les itérations. Ce paramètre permet une pondération de l'importance à accorder au respect de chaque contrainte; le paramètre deviendra plus élevé pour une contrainte si elle est violée pendant plusieurs itérations, et inversement, le paramètre diminuera si la contrainte est respectée. Chaque paramètre est ainsi multiplié par un facteur si sa contrainte associée est violée, ou divisé par un facteur si sa contrainte associée est respectée.

Ainsi, l'exploration de solutions non-réalisables est possible, et ces paramètres auto-ajustés permettent la convergence vers des solutions réalisables dans des situations où les contraintes peuvent être très strictes.

De plus, afin de permettre à l'algorithme d'explorer le plus grand espace de solutions possible, un paramètre de diversification est ajouté à la fonction objectif. Ce paramètre de diversification a été proposé par Taillard (1993), et repris dans l'heuristique proposée par Cordeau et Laporte. Il permet de prendre en compte le nombre de fois qu'un mouvement est effectué et ainsi pénaliser la fonction objectif si la fréquence est élevée. La pénalité suivante est ajoutée à la fonction de coût :

$$p(s) = \zeta c(s) \sqrt{n * m} \rho_{ik}$$

où ζ (zêta) est un paramètre pour contrôler l'intensité de la diversification (il n'a pas d'impact s'il est réglé à zéro), n est le nombre de sommets à visiter (origines et destinations de chaque requête), m est le nombre de navires, et ρ_{ik} est le nombre de fois que l'attribut i,k a été utilisé dans la recherche de solution. Chaque mouvement est représenté par un attribut i,k , soit le mouvement de la requête i dans le véhicule k .

Enfin, tel qu'expliqué précédemment, il y a deux types de mouvements effectués pendant la recherche. Le mouvement de base est un mouvement inter-tournées, c'est-à-dire que des requêtes i sont échangées entre des véhicules k . L'algorithme explore donc des solutions en effectuant ces mouvements. À chaque κ (kappa) itérations, l'algorithme effectue des mouvements inter-tournées, soit un réarrangement interne de chaque tournée pour minimiser le coût total de la fonction objectif (soit les coûts de transport et les coûts engendrés par les violations de contraintes). Ce réarrangement permet de trouver de nouvelles solutions réalisables et de placer chaque requête à l'endroit le plus optimal dans la tournée. Ce réarrangement intra-tournée est également effectué chaque fois qu'une nouvelle meilleure solution est trouvée.

4.2.5. Contraintes

Tel qu'énoncé dans la dernière section, il y a quatre principales contraintes. La contrainte du respect des fenêtres de temps est une contrainte dure, c'est-à-dire que les fenêtres de temps de la cueillette ou de la livraison doivent être absolument respectées afin que la solution soit réalisable. Une fenêtre de temps peut être associée soit au sommet d'origine (à la cueillette) ou soit au sommet de destination (à la livraison).

Les sommets comportant une fenêtre de temps qui est plus petite que l'horizon de planification de l'horaire sont considérés comme critiques. Les sommets critiques sont insérés aux endroits optimaux dans chaque tournée et les sommets non critiques associés sont par la suite placés dans la tournée. Pendant cette insertion de sommets non critiques, les sommets critiques demeurent fixes. Cette distinction entre des sommets critiques et non critiques permet une réduction du nombre d'échanges possibles, donc du temps de calcul de l'algorithme lorsqu'il procède à une évaluation du voisinage.

La contrainte de capacité de chaque véhicule est également une contrainte dure, c'est-à-dire qu'elle doit être absolument respectée pour que la solution soit réalisable. Dans le cas de notre problème, chaque client exige généralement le transport d'un navire plein de matériaux d'un point d'origine à une destination. La capacité maximale de chaque véhicule est donc d'un chargement plein. Il serait également possible de modéliser le problème en utilisant des demi-chargements ou d'autres chargements partiels en ajustant la quantité de chaque requête à ramasser et la capacité totale de chaque navire.

Les contraintes de durée totale du voyage et des tournées concernent généralement plus les problèmes où plusieurs passagers ou cargos peuvent être ramassés et placés sur un même véhicule ou les problèmes dont la durée totale des tournées est limitée par des facteurs humains (chauffeurs) ou mécaniques (véhicules nécessitant une maintenance quotidienne). Dans le cas du problème de transport de personnes, ces contraintes sont essentielles. Dans ce problème particulier, puisque les bateaux naviguent à toute heure du jour, et chaque jour de la semaine, les contraintes de durée maximale des tournées ne s'appliquent pas. De même, puisque le problème porte sur des chargements complets d'une origine à une destination, le temps de voyage sera toujours égal à la distance et au temps de service des deux sommets; la contrainte du temps de voyage maximal ne s'applique donc pas.

Des contraintes additionnelles sont ajoutées au problème afin de refléter la composante hétérogène de la flotte de véhicule. Des contraintes dures de compatibilité entre un véhicule et une requête permettent de placer uniquement les requêtes possibles dans les véhicules qui peuvent accueillir le type de chargement, ou aller dans le port requis. Cette compatibilité navire-requête est basée sur six principaux éléments :

- i) compatibilité entre le navire et le cargo;
- ii) compatibilité entre le navire et le port de chargement;
- iii) compatibilité entre le type de navire et le port de déchargement (quant à l'équipement disponible au port pour décharger le navire);
- iv) compatibilité entre la capacité du navire et le nombre minimal requis de cargos à transporter;
- v) compatibilité entre le navire et la route qu'il peut entreprendre (navires côtiers ou navires de lac);
- vi) autres contraintes de préférence d'un client pour certains navires.

Enfin, des contraintes « faibles » sont ajoutées au problème et sont directement prises en compte dans la fonction de coût de transport du problème. C'est le cas notamment du coût d'opportunité de choisir un certain navire pour effectuer une requête de transport contre le reste de la flotte. Ce coût d'opportunité est basé sur la capacité totale du navire. D'autres contraintes « faibles » peuvent être ajoutées par l'utilisateur s'il veut encourager ou décourager l'utilisation de certains éléments de sa flotte.

4.2.6. Paramètres

Dans les paragraphes précédents, certains paramètres ont été introduits. Ces paramètres permettent à l'algorithme de rechercher efficacement des solutions à travers l'espace de solutions en permettant notamment l'exploration de solutions non-réalisables ou la diversification de la recherche.

Alpha (α), bêta (β), gamma (γ) et tau (τ) sont des paramètres de pénalité associés à aux différentes contraintes. Le paramètre α est associé à la contrainte de capacité des navires, le paramètre β est associé à la contrainte de durée totale de chaque tournée, le paramètre γ est associé aux contraintes de fenêtres de temps et τ est associé à la contrainte de temps total de transit. Chaque fois qu'une contrainte est violée, la violation est multipliée par son paramètre de pénalité respectif et est incluse dans la fonction objectif du problème. La fonction est donc composée des coûts suivants :

$$f(s) = c(s) + \alpha q(s) + \beta d(s) + \gamma w(s) + \tau t(s)$$

où :

$f(s)$ = valeur de la fonction objectif

$c(s)$ = coût réel de la solution

$q(s)$ = violation totale de la contrainte de capacité

$d(s)$ = violation totale de la contrainte de durée totale

$w(s)$ = violation totale de la contrainte de fenêtres de temps

$t(s)$ = violation totale de la contrainte de temps de transit

Tel qu'expliqué plus haut, afin de pénaliser la recherche de solutions qui violent les contraintes, un paramètre est multiplié avec la pénalité associée à la contrainte. Lorsque la contrainte n'est plus violée, le paramètre est divisé avec la pénalité associée à la contrainte. Ce paramètre δ (delta) est déterminé aléatoirement à chaque itération et il se situe toujours entre zéro et *deltamax*, borne supérieure au paramètre.

Par exemple, si la contrainte de capacité est violée, alors le paramètre α est multiplié par $(1 + \delta)$, et si elle n'est pas violée, alors il sera divisé par $(1 + \delta)$. Chaque facteur de pénalité associé aux contraintes est borné par une valeur maximale et minimale qu'il peut prendre; si la borne inférieure ou supérieure est atteinte, le paramètre est réinitialisé à 1.

Afin d'empêcher l'algorithme de rester dans un espace de solution restreint, le paramètre zeta (ζ) est introduit. Tel qu'expliqué dans la section précédente, ce paramètre pénalise les mouvements effectués fréquemment en multipliant la pénalité par la fréquence de l'insertion d'un sommet i dans un véhicule k et par le coût de la solution. Ce paramètre est également déterminé aléatoirement à chaque itération, et il doit se situer entre zéro et une borne supérieure (*zetamax*).

Les métaheuristiques de recherche avec tabous reposent sur un paramètre primordial qui empêche l'algorithme de rester prisonnier d'un minimum local. Sans tabou, l'algorithme explorerait continuellement des solutions voisines, ce qui empêcherait l'exploration d'autres minima locaux. Theta (θ) est un paramètre qui représente la durée du tabou. Un tabou est mis en place lorsqu'un mouvement est effectué, l'algorithme ne peut donc pas explorer la même solution pour θ itérations. Le tabou est levé lorsqu'une meilleure solution est trouvée.

Chaque kappa (κ) itérations, l'algorithme effectue des mouvements intra-tournée, c'est-à-dire qu'il réarrange les tournées à l'interne pour réduire la violation des contraintes ou augmenter la qualité de la solution. L'algorithme effectue également ces mouvements lorsqu'une meilleure solution est trouvée.

L'algorithme s'arrête automatiquement lorsque deux situations se présentent : lorsque le nombre η d'itérations est atteint, il arrête et retourne la meilleure solution trouvée si le problème peut être résolu. Plus que ce paramètre est élevé, plus la qualité des solutions peut augmenter. En revanche, le temps de calcul est directement proportionnel au nombre η d'itérations. En plus de ce critère d'arrêt, nous introduisons un critère

additionnel d'arrêt pour valider si les instances ne sont pas trop contraintes. Si l'algorithme ne trouve pas de solution dans les ψ premières itérations, l'algorithme s'arrête automatiquement. Cela permet à l'utilisateur de voir que le problème est trop contraint ou qu'il y a une erreur dans les données sans que l'algorithme ne roule dans le vide pendant un grand nombre d'itérations.

Nous avons introduit dans la section précédente un paramètre pour moduler la pénalité imposée sur les navires ayant une trop grande capacité non utilisée. Lambda (λ) permet en effet de réduire ou d'augmenter l'impact des pénalités positives dans la fonction objectif en fonction de la disponibilité de grands cargos à transporter. Ce paramètre fait donc varier l'impact du coût d'opportunité d'insérer un petit cargo dans une tournée desservie par un navire ayant une très grande capacité.

Enfin, nous introduisons un paramètre supplémentaire qui permet de diversifier la recherche de solutions. Bien que l'algorithme comporte des mécanismes permettant un déplacement efficace à travers l'espace de solution, nous introduisons une fonctionnalité qui permet de détruire complètement la solution et de repartir d'un point aléatoire dans l'espace de solution. À chaque χ itérations, l'algorithme détruit toutes les tournées et recommence à zéro le processus de recherche à partir du nouveau point dans l'espace de solution. Pour annuler l'effet de ce paramètre, il suffit qu'il soit égal à η .

4.2.7. Analyse de sensibilité des contraintes

Afin de tester l'impact de la contrainte des fenêtres de temps sur le coût total de la solution, nous avons introduit un processus d'analyse de sensibilité. Ce processus permet à l'utilisateur de spécifier un certain pourcentage de flexibilité sur les fenêtres de temps de ses clients. Le pourcentage est traduit en nombre d'heures ou de jours en le multipliant à l'horizon temporel de l'horaire (une flexibilité de 1% sur un horizon de 60 jours correspond à des fenêtres de temps plus larges d'environ 15 heures). L'utilisateur peut ainsi spécifier un pourcentage ainsi qu'un nombre de pas, c'est-à-dire un nombre de scénarios entre son pourcentage maximal et sa solution de base.

Le logiciel de prétraitement permet donc de générer autant de fichiers de demande que de pas requis avec de nouvelles fenêtres de temps ajustées. Puisque le processus de recherche de solutions ne donne pas de solutions optimales ni égales à tout coup,

l'utilisateur doit donc générer plusieurs horaires pour chaque pas, et comparer les moyennes des coûts totaux obtenus.

Le chapitre suivant traitera plus en détail les résultats obtenus d'une analyse de sensibilité sur les fenêtres de temps et la vitesse des navires.

4.2.8. Processus d'arrêt et résultats

L'algorithme peut s'arrêter de trois façons différentes. L'utilisateur peut ainsi choisir de mettre fin manuellement aux itérations et ainsi conserver la meilleure solution obtenue pour le nombre d'itérations effectuées. Dans ce cas, il se peut également qu'aucune solution réalisable ne soit obtenue par l'utilisateur. Dans un tel cas, il peut tout de même consulter la dernière solution non-réalisable générée par l'algorithme.

L'heuristique doit effectuer un nombre fixe d'itérations. Si ce nombre est atteint, l'algorithme s'arrête automatiquement et la meilleure solution réalisable est retournée. L'utilisateur peut également spécifier à l'algorithme le nombre de meilleures solutions réalisables à générer à la fin des itérations.

Enfin, l'utilisateur peut spécifier un critère d'arrêt à l'algorithme. Si par exemple aucune solution réalisable n'a été obtenue pour les ψ premières itérations, l'algorithme s'arrête automatiquement et renvoie la dernière solution obtenue non-réalisable.

Une solution est jugée meilleure et est retenue par l'algorithme si elle respecte les quatre principales contraintes décrites dans la section précédente et si son coût de transport est inférieur au coût de transport des autres solutions réalisables. Chaque fois qu'une nouvelle meilleure solution est trouvée par l'algorithme dans son processus de recherche, elle vient remplacer la dernière meilleure solution trouvée.

4.2.9. Navire-fantôme

Afin de relaxer les instances très contraintes et de pouvoir identifier aisément les cargos qui ne peuvent pas être transportés par la flotte (en situation de sous-capacité), un navire-fantôme a été créé. Ce navire-fantôme a des coûts de fonctionnement très élevés, mais une vitesse de croisière qui permet de visiter tous les ports instantanément.

L'algorithme ne retournera pas de solutions si un des cargos n'a pas pu être inséré dans une tournée en raison des contraintes de compatibilité, de capacité ou encore si les fenêtres de temps ne sont pas réalisables. Afin de pouvoir identifier ce cargo problématique, le navire-fantôme ramasse tous les cargos qui ne peuvent être insérés dans les tournées et des solutions peuvent être renvoyées à l'utilisateur. En raison de sa vitesse de croisière très élevée, le navire-fantôme peut desservir tous les clients, mais ses coûts de fonctionnement élevés rendent son utilisation coûteuse pour l'algorithme. L'heuristique recherchera donc des solutions alternatives dont la tournée du navire-fantôme ne contient pas de cargo.

Ce processus de relaxation est très utile lorsque les instances sont très contraintes. Il permet de faire rouler l'algorithme une première fois et de valider si tous les cargos peuvent être insérés dans des tournées tout en respectant leurs contraintes. Si c'est le cas, le navire-fantôme devient vide. L'utilisateur a donc la certitude que la capacité de la flotte est suffisante pour la demande.

Dans le cas contraire, si après un important nombre d'itérations le navire-fantôme contient encore des cargos, cela indique à l'utilisateur que la capacité de la flotte n'est pas suffisante pour desservir tous les cargos ou que les cargos contenus dans les navires-fantômes n'ont pas des fenêtres de temps réalisables, ou qu'ils ne sont pas compatibles avec les navires de la flotte. L'utilisateur peut alors relaxer individuellement les contraintes sur les cargos dans le navire-fantôme et réessayer l'algorithme avec les nouvelles contraintes.

Il est possible pour l'utilisateur de faire rouler l'algorithme avec ou sans le navire-fantôme, même si cette fonctionnalité n'a pas d'incidence sur la performance de l'algorithme.

4.3. Phase de post-traitement

La phase de post-traitement permet de prendre les résultats de la solution finale et de les mettre en forme selon les préférences de l'utilisateur. Lorsqu'une meilleure solution respectant toutes les contraintes est trouvée, l'algorithme la copie dans un fichier qui est remplacé par toutes les solutions subséquentes trouvées. Afin de rendre le processus d'écriture de solution le plus rapide possible, nous générons uniquement les

informations nécessaires et le reste des informations est complété par un script VBA lors de cette phase.

4.3.1. Fichier de sortie

Chaque solution comporte des tournées correspondant au nombre de véhicules utilisés, et une série de ports de cueillette et de livraison correspondant aux clients à visiter. Une tournée comporte donc un port d'origine, une série de ports arrangés selon l'ordre de visite, et un port de fin (fictif ou réel). À chaque port sont associées des informations, notamment sur la date et l'heure de visite, ainsi que des informations entrant dans la fonction objectif. Le tableau suivant résume et décrit les valeurs produites par l'algorithme.

<i>Nom</i>	<i>Description</i>
Port	Port visité par le navire
Temps d'attente	Temps d'attente avant d'entrer au port si le début de la fenêtre de temps associée au chargement est supérieur au temps d'arrivée du navire au port.
Date de visite	Date d'arrivée au port
Temps chargé	Temps de navigation entre un port de chargement et un port de déchargement. Le temps est de zéro si le navire est à lège.
Temps de ballast	Temps de navigation entre un port de déchargement et un port de chargement. Le temps est de zéro si le navire est chargé.
Quantité à bord	Quantité de cargo à bord du navire après avoir chargé ou déchargé au port.
Temps de service	Temps de service requis pour le chargement ou le déchargement au port.
Consommation d'IFO	Consommation totale de carburant de propulsion entre le présent port et le précédent.
Consommation de MDO	Consommation de carburant diesel entre le présent port et le précédent.
Coût d'opération du transit	Coût d'opération du navire entre le présent port et le précédent.
Frais de canaux	Frais des canaux visités entre le présent port et le précédent.
Coûts carburant IFO chargé	Coût du carburant de propulsion entre le présent port et le précédent si le navire est chargé.

Coût carburant IFO en ballast	Coût du carburant de propulsion entre le présent port et le précédent si le navire est à lège.
Coût du MDO	Coût du diesel marin entre le présent port et le précédent, incluant le coût du carburant pour le temps d'attente, le chargement et le déchargement.
Pénalité de chargement	Pénalité de chargement lié à la capacité du navire et à la taille du cargo à transporter.
Coûts additionnels reliés à un segment	Coûts additionnels qu'un utilisateur peut imposer sur un segment en particulier de deux ports.

Tableau 12 – Paramètres inclus dans le fichier de sortie de l'algorithme

Les segments à lège (ballast) et chargés sont différenciés pour des raisons de préférences et des raisons contractuelles. Les départements de marketing et de transport préfèrent voir les consommations de carburant dans deux différentes colonnes.

4.3.2. Mise en forme automatique

Lorsque l'heuristique renvoie une solution finale, cette solution se trouve sous format .txt. Il est alors possible pour le planificateur ou l'utilisateur de lire directement la solution à partir du fichier texte, mais puisque chaque navire et chaque client sont représentés par un indice, il est très difficile de pouvoir évaluer la performance d'un horaire sans effectuer des correspondances à l'aide d'une liste de client et navires.

Le fichier texte peut donc être copié dans une feuille Excel et l'utilisateur peut cliquer sur un bouton qui fait rouler un script VBA qui met en forme automatiquement l'horaire. Chaque indice est converti en titre de client, de port et de navire à l'aide de la base de données sur Excel.

Le planificateur peut obtenir trois types d'horaire : un horaire complet incluant les coûts, les distances, les temps de navigation et la consommation de carburant pour chaque paire de ports, un horaire simplifié qui permet de donner une vue des prochains ports à visiter et les temps de navigation associés, et une vue par client (qui permet au planificateur de voir quel navire visitera quel client dans l'ordre des voyages).

Une macro VBA permet également d'estimer le tonnage qui sera transporté par le navire pour chaque client en fonction de la méthode déterminée à la section 3. Le tonnage peut être validé par le planificateur et le département de marketing.

4.3.3. *Mouvements manuels et mise à jour de la fonction objectif*

Lorsqu'un horaire est produit et révisé par le planificateur, il arrive souvent qu'un ou deux cargos ne conviennent pas. Le planificateur a donc besoin de pouvoir faire des réinsertions manuelles à sa guise, outrepasser certaines contraintes et réévaluer le coût de la solution obtenue.

Un module de modification a été mis sur pied sur Excel pour permettre au planificateur de faire des changements manuels. Le module contient la même fonction objectif que l'heuristique et utilise tous les mêmes paramètres que l'algorithme. Ainsi, lorsqu'un mouvement est effectué, un script VBA vérifie les contraintes et recalcule le coût total de la solution obtenue.

Ce module permet donc d'évaluer si un changement manuel vaut la peine, ou si une fenêtre de temps peut être modifiée pour permettre l'insertion de cargos supplémentaires dans l'horaire.

Chapitre 5 – Résultats et analyses

Ce chapitre présente les résultats obtenus avec des scénarios fictifs et réels tirés des opérations du transporteur canadien. Les scénarios fictifs ont été utilisés afin de valider le fonctionnement de l'heuristique tandis que les instances réelles permettent une évaluation de la performance de l'heuristique face aux processus actuels de la compagnie.

La première section présente le déroulement des tests effectués sur un laps de temps de quatre mois. La deuxième section présente les résultats quantitatifs obtenus en comparant l'horaire créé manuellement par les planificateurs et celui obtenu par l'algorithme. La troisième section présente les impacts qualitatifs sur les processus de l'entreprise. La quatrième section présente les divers tests effectués afin de calibrer adéquatement l'algorithme et pour mieux comprendre le fonctionnement de l'heuristique. Enfin, la cinquième section présente deux analyses de sensibilité effectuées dans le cadre des opérations normales du transporteur.

5.1. Déroulement du paramétrage et de l'analyse de sensibilité

L'algorithme est conçu pour fonctionner sur un ordinateur personnel sous environnement Windows ou Linux. Lors de la phase de test, la majorité des tests ont été effectués sur un ordinateur personnel sous Windows 7 avec un processeur Intel i7-3520M à 2,90 GHz (quatre cœurs dont deux cœurs physiques) avec 16 Go de mémoire vive et sur un ordinateur sous environnement Linux (Ubuntu 14.15 LTS) avec un processeur Intel i5-2410M à 2,30 GHz (quatre cœurs donc deux cœurs physiques) avec 4 Go de mémoire vive. Lorsque l'algorithme est lancé, il utilise la totalité d'un seul cœur du processeur, et environ 4 Mo de mémoire vive.

Sur ces deux ordinateurs personnels, il était donc possible de faire fonctionner trois instances en parallèle (utilisation de trois cœurs du processeur sur quatre). Ce fonctionnement permettait d'effectuer simultanément trois tests.

Lors de la phase de test et de paramétrage, plusieurs tests différents ont été nécessaires. L'énorme quantité de scénarios différents à tester (un pour chaque paramètre testé, et ce pour des scénarios de taille différente) nous a incités à utiliser des outils plus puissants. Afin d'automatiser certains tests, nous avons créé un script BAT et nous avons créé un script VBA pour générer préalablement tous les fichiers d'entrée de chaque scénario.

Pour effectuer les tests, nous avons utilisé deux serveurs HP Proliant DL360 Gen9 fonctionnant sous environnement Windows Server 2012. Chaque serveur utilise des processeurs Intel Xeon E5-2660 à 2,60 GHz avec vingt cœurs, et a 256 Go de mémoire vive. Nous pouvions donc faire rouler 19 scénarios en parallèle sur chaque serveur, ce qui a permis d'effectuer les tests de paramétrage assez rapidement. Chaque test effectué prenait entre quelques heures et quelques jours (dépendamment du nombre de cargos à transporter).

Les données ont été recueillies et testées principalement à l'aide d'Excel. Plusieurs scripts VBA ont été utilisés pour automatiser certaines tâches et faciliter l'analyse des données.

5.2. Résultats numériques

5.2.1. Processus de comparaison

Pour évaluer les impacts quantitatifs de l'algorithme sur les processus existants, nous procédons de deux différentes manières : il est possible de prendre un horaire créé dans le passé sur un horizon fixe et tester l'algorithme sur ces données passées, ou prendre un horaire futur (généralement un à deux mois au maximum) et tester l'algorithme avec des données actuelles. Dans le premier cas, il est possible d'évaluer l'algorithme sur des données pouvant aller jusqu'à un an maximum (entre 400 et 500 cargos) tandis que dans le deuxième cas, il est possible d'évaluer l'algorithme sur un horizon temporel de

deux mois maximum (entre 100 et 150 cargos). Le processus d'analyse et de comparaison ne diffère pas pour ces deux différents types d'horaires.

Pour comparer deux horaires, nous utilisons un horaire de base créé par l'équipe de planification et à partir des mêmes données, paramètres et contraintes, nous créons un horaire avec l'algorithme. L'horaire du planificateur devient donc la solution initiale et l'algorithme calcule tous les coûts, les durées et valide le respect des contraintes. Par la suite, l'algorithme effectue ses itérations et l'horaire final est évalué selon les mêmes coûts, les mêmes durées et les mêmes contraintes. Ainsi, il est possible de comparer les coûts des deux horaires et de mesurer les impacts de l'algorithme sur la qualité de la solution.

Il est également possible de partir d'une solution aléatoire pour bâtir l'horaire. Il suffit d'évaluer l'horaire du planificateur en premier, puis de spécifier à l'algorithme de créer un horaire aléatoire et d'effectuer ses itérations à partir de l'horaire aléatoire. La qualité de la solution n'est pas affectée par le fait d'utiliser un horaire aléatoire ou non.

Nous évaluons les horaires avec les coûts et les mesures suivantes :

- Coût total d'opération des navires;
- Coût total du carburant de propulsion et du diesel;
- Coûts totaux des passages et frais de pilotage;
- Coût total des pénalités relié à la capacité des navires;
- Distance totale en transit;
- Distance totale en ballast.

Tous les ratios présentés dans les prochaines sections sont calculés selon la règle suivante :

Différence sur le scénario de base = Résultat de l'algorithme / Résultat du planificateur.

Afin de refléter une utilisation normale de l'algorithme dans la compagnie, nous avons limité le nombre d'itérations de chaque test à 50 000, et nous avons testé l'algorithme une seule fois pour chaque comparaison effectuée. En augmentant le nombre d'itérations ou en faisant fonctionner l'algorithme plusieurs fois pour le même scénario, la qualité de la solution de l'algorithme pourrait potentiellement s'améliorer.

5.2.2. Tournée type

En tentant de minimiser les coûts de transport, l'algorithme créera des tournées minimisant les segments à vide. Il est souvent nécessaire cependant de se repositionner et de parcourir de grandes distances à vide, car il n'existe pas de cargos entre deux ports, ou que les fenêtres de temps ne correspondent pas entre elles.

Dans la figure 25, une tournée type est présentée. Le navire part du point A vide et navigue vers le point B où il ramasse un cargo destiné au point C. Par la suite, il remonte le fleuve St-Laurent à vide pour ramasser un cargo au point D et revient vers le point E pour le décharger. Il revient sur ses pas et ramasse enfin le cargo au point F pour aller le porter au point G dans le graphe. Ce type de tournée est commun, même si les segments AB, CD et EF représentent de grandes distances à vide. Il n'existe tout simplement pas de requêtes de transport entre ces points à ce moment, ce qui force l'algorithme à créer ce type de tournée.



Figure 25 – Exemple d'une tournée obtenue – durées moyennes

Un « cargo de retour » est un cargo utilisé pour repositionner le bateau dans une nouvelle région. Par exemple, le cargo FG est un cargo utilisé pour envoyer le navire vers les Grands Lacs où d'autres contrats l'attendent. Il n'existe qu'un nombre limité de « cargos de retour », ce qui crée souvent des longs segments à vide dans une tournée. Si le cargo FG n'existait pas et que le navire devait aller au point B, l'algorithme créerait le segment à vide FB.

Lorsque les premiers résultats ont été présentés aux planificateurs de la compagnie, ces longs segments à vide étaient perçus comme non optimaux. Souvent, ces derniers préfèrent « insérer » un cargo dans un long segment à vide pour le couper en deux, même si cette pratique ne réduit pas le temps total de ballast.

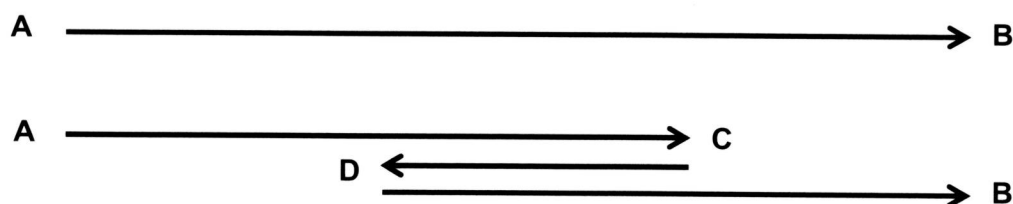


Figure 26 – Exemple d'insertion d'un cargo pour réduire les segments à vide

Cette pratique réduit le temps de ballast sur le voyage suivant (qui commence au point B) en répartissant le segment à vide sur le contrat C et le contrat B. Pour « insérer » le voyage C-D dans une tournée, ils doivent le prendre d'une autre tournée (en posant que toutes les requêtes sont desservies par un navire). Si la nouvelle tournée contenant le segment C-D est effectuée par un navire qui coûte moins cher que le navire de la tournée originale, alors cette insertion permet d'économiser de l'argent. Cependant, si cette insertion est effectuée dans un navire plus cher, cette insertion réduit la qualité de la solution.

En regardant donc les résultats obtenus par l'algorithme, lorsque cette situation se présente, l'algorithme tentera toujours d'insérer ces cargos dans les tournées moins chères, laissant souvent les navires plus dispendieux avec de longs segments à vide.

La figure suivante présente une tournée type où il y a plusieurs cargos « de retour » permettant à l'algorithme de minimiser le nombre de voyages à vide. Le navire part

chargé du point A et se dirige vers le point B, où il décharge son cargo. Ensuite, il recharge au point B pour aller au point C. Il navigue ensuite à vide du point C au point D, où il charge un cargo à destination du point E. Il décharge son cargo et navigue du point E au point F pour charger un cargo à destination de G.

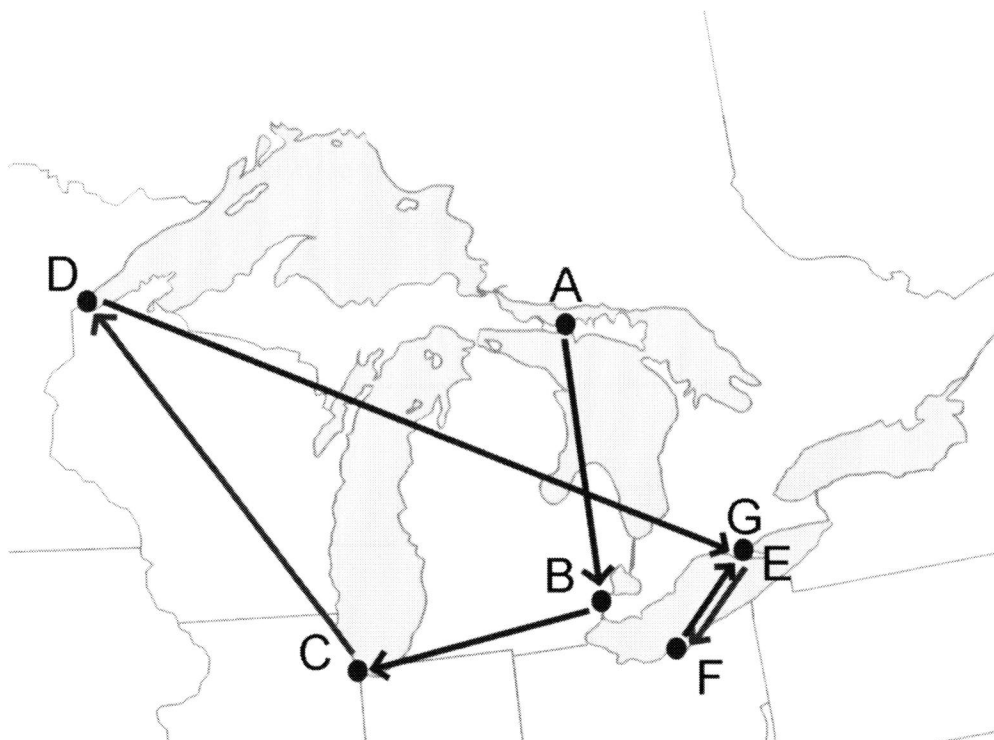


Figure 27 – Exemple d'une tournée obtenue – courtes durées

Lorsque l'algorithme crée les tournées, il insère des cargos afin d'optimiser globalement la fonction objectif. Certains navires peuvent donc avoir des tournées moins optimales que d'autres. En comparant un horaire à un autre, les coûts et les revenus totaux doivent être pris en compte pour les mêmes requêtes de transport.

Dans la prochaine section, une comparaison des horaires créés manuellement et à l'aide de l'algorithme est effectuée.

5.2.3. Horizon temporel d'un an – Année 2016

Afin de tester l'algorithme sur un horizon temporel assez long, nous avons pris l'horaire créé pour le budget de la compagnie pour l'année 2016. Le budget couvre une période de navigation du moins d'avril vers fin décembre.

Cet horaire est créé sur un horizon de temps d'une semaine par le département de transport et le planificateur. L'horaire du budget permet par la suite d'évaluer les coûts d'opération et les revenus de la flotte, et sert ultimement de référence pour évaluer la prochaine saison de navigation.

L'horaire utilisé s'étale donc sur dix mois, et contient plus de 400 requêtes de cueillette et de livraison (800 ports à visiter) et plus d'une quinzaine de navires.

Le revenu total associé à l'horaire de l'algorithme est de 0,41% plus élevé que l'horaire de base. Les coûts associés à l'horaire de l'algorithme sont quant à eux 1,21% moins élevés que l'horaire de base. En calculant un bénéfice d'exploitation à partir de ces deux résultats, l'horaire de l'algorithme génère un bénéfice qui est 3,58% plus élevé que l'horaire de base. Les différents éléments de coûts sont détaillés plus bas :

Coûts	Ratio par rapport à l'horaire de base
Coût d'opération (lié à l'utilisation des navires)	99,13%
Coût de carburant de propulsion pour les segments chargés	99,38%
Coût de carburant de propulsion pour les segments en ballast	95,78%
Coût de carburant diesel	99,18%
Coût des passages et frais de pilotage	99,73%

Tableau 13 – Ratio entre les coûts obtenus par l'algorithme et ceux de l'horaire de base

Le coût d'opération et le coût du carburant diesel sont directement liés à l'utilisation de chaque navire dans l'horaire, c'est principalement pourquoi la différence avec l'horaire de base est très faible. En sélectionnant des navires qui coûtent moins cher pour effectuer des contrats, l'algorithme permet de réduire ces deux coûts. Les navires plus dispendieux sont utilisés moins longtemps et ceux plus économiques plus longtemps.

Le coût de carburant de propulsion pour les segments chargés est lié à l'utilisation des navires et leur consommation de carburant ainsi que leur vitesse. En utilisant des navires qui vont plus vite ou qui consomment moins de carburant, l'algorithme réduit les coûts de carburant de propulsion pour son horaire. Puisque ce sont les mêmes tournées qui doivent être réalisées, le coût du carburant de propulsion demeure très proche de l'horaire de base. Seulement la différence d'utilisation des navires entre les deux horaires explique les divergences de coûts.

Cette situation s'applique également aux coûts des passages et frais de pilotage. En effet, puisque ce sont les mêmes ports à visiter, les navires vont passer dans les mêmes canaux ou zones de pilotage, ce qui donne un résultat très similaire. Cependant, en optimisant certains mouvements à vide, l'algorithme peut réduire le nombre de mouvements à travers les canaux et les zones de pilotage, ce qui explique la réduction des coûts entre l'horaire de base et celui créé par l'algorithme.

La plus grande différence de coût entre les deux horaires est le coût de carburant pour les segments en ballast (à vide). En optimisant les mouvements de la flotte, l'algorithme permet de réduire les segments à vide et peut ainsi réduire le carburant associé à ces segments.

En regardant de plus près le temps total passé à charger et à décharger le navire, et les segments à vide et chargés, nous pouvons confirmer que l'horaire produit par l'algorithme permet d'économiser certains coûts.

Type d'opération :	Ratio du temps total avec l'horaire de base
Chargement / Déchargement	100,26%
Navigation chargée	99,84%
Navigation à vide	96,92%

Tableau 14 – Ratio du temps total pour chaque type d'opération

Le temps passé à charger et à décharger le navire est supérieur dans l'horaire produit par l'algorithme. Certains navires de la flotte prennent plus longtemps à charger que d'autres, et le choix de certains actifs cause probablement cette légère augmentation. Cependant, les temps de navigation chargé et déchargé sont inférieurs en raison de l'optimisation des mouvements des navires, mais également le choix d'actifs ayant des vitesses de croisière moyennes plus élevées.

En somme, les résultats obtenus pour l'année 2016 donnent un bon estimé des gains potentiels réalisés avec l'algorithme sur une année. Les pourcentages obtenus demeurent assez bas, mais sur des opérations de l'ordre de dizaines de millions de dollars, ces gains sont non-négligeables.

Pendant l'année cependant, des changements fréquents peuvent venir perturber le plan initial, ce qui impose de tester l'algorithme sur une période de temps plus courte et sous une période de forte demande.

5.2.4. Horizon temporel de deux mois – Automne 2016

Chaque mois, l'équipe de planification de la compagnie met sur pied un horaire qui sert de ligne directrice pour les soixante prochains jours d'opération. L'horaire sert également de référence pour évaluer les changements de dernière minute apportés à l'horaire chaque semaine.

Nous avons choisi de tester l'algorithme sur une période de deux mois pendant l'automne 2016. Cette période est généralement la plus occupée pendant l'année, et plusieurs navires de la flotte doivent naviguer en même temps.

En raison de la complexité accrue de l'horaire causée par une flotte plus grande, nous croyons que des gains supplémentaires pourraient être dégagés. Nous avons donc pris un segment de soixante jours dans les mois d'octobre et de novembre 2016 et testé l'algorithme sur la même base que l'horaire créé manuellement. L'horaire testé contient 130 cargos et 16 navires.

Après avoir comparé l'horaire de base à l'horaire obtenu avec l'algorithme, nous constatons que l'horaire produit par l'algorithme permet de réduire les coûts de 2,29%. En combinant les coûts à l'augmentation des revenus liés à la meilleure répartition des chargements dans la flotte, nous dégageons un bénéfice d'exploitation (revenus – coûts) qui est 3,85% plus élevé. En regardant le détail de chaque coût, nous pouvons voir où l'algorithme dégage des gains.

Coûts	Ratio avec l'horaire de base
Coût d'opération (lié à l'utilisation des navires)	98,41%
Coût de carburant de propulsion pour les segments chargés	99,29%
Coût de carburant de propulsion pour les segments en ballast	92,12%
Coût de carburant diesel	99,70%
Coût des passages et frais de pilotage	97,08%

Tableau 15 – Ratio entre les coûts obtenus par l'algorithme et ceux de l'horaire de base

Tel que précédemment expliqué, le coût d'opération de la flotte et le coût du carburant diesel sont directement proportionnels à l'utilisation de certains navires par rapport à d'autres. Ainsi, en tentant de maximiser l'utilisation de certains navires et en minimisant

l'utilisation des navires plus coûteux, les coûts d'opération peuvent diminuer. La consommation de diesel diminue également en choisissant les navires les moins chers à opérer.

Le coût des passages diminue de façon assez importante en utilisant l'algorithme. Certains segments à vide sont éliminés en optimisant les mouvements de la flotte, ce qui diminue les frais de péage et de pilotage.

Le coût du carburant de propulsion pour les segments chargés est légèrement diminué, ce qui est principalement causé par l'utilisation de navires consommant moins de carburant pour réaliser le même panier de contrats.

Enfin, le coût ayant le plus diminué est le coût du carburant de propulsion pour les segments à vide. Cette diminution importante est due à l'optimisation des mouvements de la flotte, ce qui cause une diminution drastique de la longueur des mouvements à vide.

La différence du temps total passé pour chaque type de mode d'opération permet de jeter un regard sur les gains d'efficacité causés par l'algorithme.

Type d'opération :	Ratio de temps total avec l'horaire de base
Chargement / Déchargement	97,00%
Navigation chargée	99,70%
Navigation à vide	92,06%

Tableau 16 – Ratio du temps total pour chaque type d'opération

Le temps de chargement et de déchargement a diminué de 3,00% en raison de l'utilisation accrue de navires autodéchargeurs dans l'horaire optimisé comparé à l'horaire de base. Les navires autodéchargeurs sont utilisés plus intensément dans l'horaire produit par l'algorithme, ce qui diminue la proportion de cargos sur les vraquiers standards.

Le temps de navigation chargé demeure relativement stable car les mêmes segments doivent être effectués dans les deux horaires. La légère diminution est causée par l'utilisation de navires naviguant à une plus grande vitesse de croisière moyenne.

Enfin, le plus grand gain demeure le temps de navigation à vide ayant chuté de 7,94%. Cette diminution est expliquée par l'optimisation des mouvements de la flotte (meilleure succession de cargos) diminuant ainsi les mouvements de repositionnement inutiles.

Les gains obtenus sur une plus courte période sont en effet plus élevés que les gains obtenus pour une année complète. L'utilisation d'un plus grand nombre de navires complique généralement la tâche aux planificateurs, ce qui motive l'emploi de ce type d'algorithme pour une meilleure allocation des cargos aux navires.

5.2.5. Réalisme des solutions

La qualité des solutions obtenues avec l'algorithme dépend grandement des contraintes et des paramètres utilisés. En utilisant exactement les mêmes paramètres et contraintes que les planificateurs utilisent pour la création de leur horaire, nous pouvons obtenir de légers gains d'optimisation. La qualité de la solution obtenue diminue en raccourcissant les fenêtres de temps ou en diminuant la compatibilité entre certains cargos et certains navires.

En testant l'algorithme sur plusieurs scénarios, nous avons remarqué que parfois l'horaire obtenu était très similaire à l'horaire créé par les planificateurs. En augmentant les contraintes du problème, l'algorithme n'a souvent « pas le choix » de retourner une solution qui sera presque identique à celle du planificateur. Le planificateur choisissait souvent des contraintes ou des paramètres qui forçaient la solution vers un horaire similaire au sien. Il était donc parfois nécessaire de laisser l'algorithme choisir certains paramètres du problème, notamment la flotte utilisée. Le résultat obtenu pouvait donc différer beaucoup plus en laissant l'algorithme choisir les navires utilisés dans la flotte au lieu de lui imposer une flotte dès le départ.

À plusieurs reprises, le résultat obtenu par l'algorithme défiait les hypothèses prises par les planificateurs. Par exemple, les planificateurs inséraient par expérience les cargaisons de charbon sur une classe de navires tandis que l'algorithme insérait ces mêmes cargos sur une autre classe de navire considérée moins optimale par les planificateurs. En regardant de plus près la capacité de chacune de ces classes de navires, et en regardant le coefficient de chargement du type de charbon, nous avons remarqué que l'algorithme assignait le cargo vers les navires qui pouvaient contenir davantage de charbon. En modifiant légèrement le coefficient de chargement ou en

changeant le type de charbon transporté, nous avons remarqué que la solution obtenue par l'algorithme était complètement différente et venait rejoindre les hypothèses des planificateurs. Ainsi, la solution obtenue était très sensible aux données en entrée, et même une légère modification du coefficient de chargement pouvait donner une solution très différente.

Dans d'autres cas, la solution obtenue venait défier d'autres hypothèses prises par les planificateurs, notamment en ce qui a trait à l'assignation exclusive d'un bateau pour un client. Lorsqu'un contrat est signé avec un client et que plusieurs voyages doivent être effectués chaque mois, les planificateurs assignent généralement un ou plusieurs navires exclusivement pour ce voyage. Les navires effectuent donc des allers-retours du point de chargement au point de déchargement. Lorsque le taux chargé par tonne est élevé, les planificateurs assignent les navires ayant la plus grande capacité à ces contrats. Les résultats obtenus par l'algorithme viennent contredire cette pratique : les navires ayant la plus grande capacité ne sont pas toujours assignés à ces contrats et les navires effectuent rarement des allers-retours pour le même client sur un horizon de plusieurs mois.

L'algorithme n'assigne pas de navire pour effectuer un contrat contenant plusieurs voyages. Il insère souvent des voyages de repositionnement ou de retour lorsque possible entre les allers-retours, ou disperse les voyages sur plusieurs navires différents. En voulant minimiser les segments à vide, l'algorithme tente toujours de coupler des contrats différents ensemble. De plus, il est parfois moins intéressant d'assigner un bateau ayant une plus grande capacité à un contrat dont le taux chargé par tonne est plus intéressant, car le segment de repositionnement du bateau et la perte de revenus sur les autres contrats assignés aux autres navires contrebalancent cet avantage.

En somme, l'algorithme donne parfois des résultats très similaires à ce que les planificateurs produisent en raison notamment des contraintes imposées sur le problème. Cependant, certains résultats obtenus venaient remettre en question les hypothèses des planificateurs. En calculant les coûts et revenus des horaires des planificateurs et en les comparant aux résultats de l'algorithme, il était possible de prouver que certaines hypothèses ne fonctionnaient pas toujours.

5.3. Résultats qualitatifs

Lorsqu'un projet d'amélioration des processus est entrepris au sein d'une entreprise, il est souvent facile de mesurer les gains quantifiables. Cependant, ces projets peuvent entraîner des externalités qualitatives qui influencent le déroulement des opérations quotidiennes de l'organisation ou encore la façon de gérer les ressources.

Puisque le modèle fut testé en entreprise sur un horizon de quatre mois seulement, les impacts sur les processus de gestion sont difficiles à mesurer. Pour juger adéquatement les impacts sur ces processus, l'algorithme doit être testé sur un horizon de temps plus long. Cependant, certains impacts immédiats ont pu être observés.

5.3.1. Impact sur le processus de création d'horaires

Le processus de création d'horaires, tel qu'expliqué précédemment, comprend plusieurs éléments dont notamment l'essai-erreur et un aller et retour avec les clients pour valider les fenêtres de temps. Le planificateur prévoit au début de l'année un nombre de voyage par mois pour chaque client entre une paire d'origine et de destination. Au moment de créer un horaire de deux mois, il communique avec le client pour confirmer le chargement et spécifier une fenêtre de temps.

Par la suite, il prend les navires les plus contraints et associe les voyages à ces derniers. Lorsqu'un navire est plein, il passe au prochain jusqu'à tant que la flotte disponible soit complète ou qu'il ne reste plus de cargos. Si un contrat ne peut convenir à aucun navire, le planificateur communiquera avec le client pour repousser le chargement, l'annuler ou encore modifier la fenêtre de temps du voyage. Il tente par la suite de réinsérer le voyage dans un des navires de la flotte et réévalue si les autres voyages respectent toujours les requêtes des clients.

Ce processus peut s'avérer fastidieux, et chaque voyage peut être inséré et réinséré à plusieurs reprises dans des navires différents. Le modèle a simplifié le processus en permettant de créer un horaire de base répondant aux fenêtres de temps convenues avec les clients et aux contraintes de la flotte. Par la suite, le planificateur peut évaluer si l'horaire convient ou non, et peut y effectuer des modifications manuelles ou modifier les paramètres du modèle pour recréer un nouvel horaire. L'impact sur les revenus et les

coûts est visible à toutes les étapes de ce processus et permet donc au planificateur de juger si un changement est souhaitable ou non.

Les horaires créés par le modèle ont servi de base lors de la création des horaires courants par le planificateur. L'ordre et l'horaire des voyages pouvaient être repris par le planificateur pour la création de l'horaire courant, ce qui accélère le processus. En partant d'une base, le planificateur peut ainsi mieux voir la capacité disponible à chaque mois et mieux planifier combien de navires sont nécessaires pour répondre à la demande.

En somme, l'impact du modèle sur le processus de création d'horaires a été positif et a permis au planificateur d'évaluer différents modèles de tournées. Le modèle a permis également de suivre facilement l'évolution des revenus et des coûts lorsque plusieurs horaires avec des paramètres différents étaient évalués conjointement.

5.3.2. Processus budgétaire

Chaque année, un budget est préparé par la compagnie. Afin de planifier ses opérations, le département de marketing communique une estimation des voyages que la compagnie compte faire pour l'année prochaine. Le département de transport et le planificateur prennent ensuite la demande et créent un horaire servant à évaluer le nombre de jours d'opération de la compagnie, ainsi que les besoins pour la flotte. Le département technique peut par la suite prévoir des réparations à effectuer sur la flotte en fonction de la taille de la flotte utilisée pour l'année.

Le processus de création d'horaires pour le budget est long et complexe. Le planificateur crée un horaire pour l'année, ce qui peut potentiellement prendre plusieurs jours. Par la suite, il doit calculer manuellement le temps de navigation exact entre chaque port, et les coûts associés à la consommation de carburant, les frais de canaux et de pilotage, et les frais de port. Il doit également estimer le tonnage transporté par chaque navire entre chaque paire de ports. Ce processus est long et peut être sujet à des erreurs manuelles.

En utilisant l'algorithme pour la création de l'horaire du budget, tous les coûts et revenus ont été calculés automatiquement, et le temps nécessaire pour créer l'horaire a été beaucoup moindre. À la place de passer du temps sur ce processus, le planificateur a dirigé ses efforts auprès des clients pour valider la demande des prochains mois ainsi

que les fenêtres de temps. L'équipe de transport a donc pu rediriger son temps vers des activités à valeur ajoutée pour la compagnie.

De plus, l'utilisation de l'algorithme a permis d'évaluer trois scénarios de la demande. En raison de l'incertitude des marchés, il n'est pas toujours facile de prévoir adéquatement la demande. Trois horaires représentant trois profils de demande ont permis au département de transport ainsi qu'au département technique de voir facilement l'impact de la demande sur l'utilisation de la flotte et sur les coûts de la compagnie. Les trois scénarios permettent donc d'avoir une meilleure vision à long terme et ainsi mieux planifier les opérations de la compagnie à l'avance.

Enfin, l'algorithme a été utile pour tester des scénarios avec plusieurs paramètres différents (vitesse, navires, etc.). Ces scénarios ont permis de mieux planifier la saison de navigation et mieux planifier les travaux effectués sur les navires.

5.3.3. Évaluation de scénarios

Une partie intégrante des activités logistiques des entreprises de transport comprend l'évaluation de l'impact de nouveaux contrats sur les tournées de transport et l'établissement des prix pour les nouveaux clients. Ces analyses sont souvent effectuées en posant certains paramètres ou hypothèses pour simplifier le processus d'évaluation. Cette simplification peut rendre certaines analyses erronées, ce qui peut mener à une surévaluation ou une sous-évaluation des ressources de l'entreprise.

Des analyses globales de l'impact d'une modification de la demande ou d'un paramètre sur la flotte ou les revenus ont été effectuées par l'algorithme lors de sa phase d'implantation. Un horaire de base (*baseline*) est initialement créé, puis l'impact sur l'horaire, les coûts ou la capacité de la flotte sont évalués en comparant les horaires obtenus pour chaque scénario testé. Ainsi, il est possible de mesurer concrètement l'impact sur des mesures de performance l'impact des scénarios.

Une analyse fréquemment effectuée consiste à évaluer l'impact sur les coûts et les revenus d'un changement apporté manuellement à l'horaire. Un client pourrait par exemple souhaiter devancer ou repousser un chargement, ce qui influence l'ordonnancement des cargos et la tournée prise par le navire. L'impact d'un tel changement n'est pas négligeable. En réévaluant le coût de la fonction objectif du modèle après avoir fait ce changement manuel, il est possible de voir comment ce

changement peut influencer les revenus et les coûts de l'entreprise. Cette analyse a été effectuée à plusieurs moments à l'aide du modèle. Il était possible pour l'utilisateur d'évaluer l'impact sur les revenus et les coûts en effectuant une permutation intra-navire, ou une permutation entre les navires. Cette analyse a notamment permis d'évaluer si des navires étaient plus efficaces pour réaliser certains contrats plutôt que d'autres, et ainsi mesurer quotidiennement l'impact des requêtes de changement d'horaire des clients.

Une autre analyse qui a été effectuée concerne la capacité de la flotte des navires de la compagnie. Puisqu'un navire a des coûts d'opération très élevés, il est nécessaire de minimiser la taille de la flotte requise pour répondre à toute la demande. Le dimensionnement de la flotte fait donc partie des questions stratégiques et tactiques les plus courantes pour les planificateurs de la compagnie de transport. Une évaluation de divers scénarios est donc requise pour prendre ces décisions.

En minimisant les coûts, le modèle tente de réduire également l'utilisation des navires les plus coûteux à opérer tout en voulant maximiser la taille du cargo qui sera chargé. Un navire plus coûteux ayant une plus grande cale pourrait, dans certaines situations, être plus avantageux qu'un navire peu coûteux ayant une cale plus petite. Dans d'autres cas, la même situation pourrait donner un résultat différent. Cette différence entre les deux situations est expliquée notamment par la composition de la demande du transporteur. Des contrats permettant une certaine flexibilité dans le tonnage transporté ainsi que des taux de transport à la tonne très avantageux favoriseront les navires qui ont une plus grande capacité, même si cela entraîne des coûts d'opération plus élevés. Les navires plus efficaces et plus petits seront plus utilisés lorsque les contrats requièrent des tonnages plus bas, ou que les taux de transport sont moins élevés.

Le choix des navires à l'aide du modèle a été testé sous plusieurs types de profil de la demande. Ces analyses ont permis, entre autres, d'évaluer si la capacité de la flotte était suffisante pour réaliser des contrats à long terme et de pouvoir s'engager à transporter un volume de cargo auprès de certains clients. Ces analyses ont également permis d'évaluer plus adéquatement si les hypothèses prises lors du processus d'établissement de prix par le département marketing sont adéquates et reflètent les opérations actuelles et futures de la compagnie. Enfin, l'impact de l'ajout ou de la suppression d'un cargo spot à l'horaire courant (moins de deux mois) a été mesuré à plusieurs moments à l'aide du modèle.

En somme, l'évaluation de scénarios avec le modèle a permis d'évaluer avec précision l'impact réel sur les opérations de l'entreprise d'une modification de la demande ou d'un changement opérationnel au sein de l'entreprise.

5.4. Paramétrage

L'heuristique de recherche avec tabous utilise certains paramètres afin d'explorer efficacement l'espace de solutions. En utilisant l'algorithme développé par Cordeau et Laporte (2003), certains paramètres de base avaient été testés. Nous avons cependant apporté certaines modifications à l'algorithme, et nous voulions réévaluer individuellement les paramètres pour faciliter la recherche de solutions et améliorer la rapidité de l'algorithme.

Nous avons donc effectué une importante phase de paramétrage de l'algorithme; nous avons créé des instances réelles comportant différents nombres de cargos et de navires, et nous avons fait varier les paramètres présentés à la section précédente. Ainsi, nous pouvions avoir une image claire de l'impact de chaque paramètre sur le processus de recherche de solutions.

Nous avons testé chaque paramètre avec plusieurs ensembles de scénarios représentant des horizons de planification d'un mois à trois mois. Le tableau suivant résume les caractéristiques de chaque ensemble.

Nom	Nombre de cargos	Nombre de navires	Horizon de planification	Largeur moyenne des fenêtres de temps
P47	47 cargos	17 navires	1 mois	14,34 jours
P50	50 cargos	15 navires	1 mois	13,96 jours
P91	91 cargos	14 navires	2 mois	32,49 jours
P98	98 cargos	14 navires	2 mois	14,00 jours
P106	106 cargos	17 navires	2 mois	6,98 jours
P127	127 cargos	17 navires	2 mois	19,83 jours
P150	150 cargos	15 navires	2 mois et demi	12,05 jours
P200	200 cargos	15 navires	3 mois	11,64 jours

Tableau 17 – Caractéristiques des ensembles de scénarios de paramétrage

Chaque paramètre différent a été testé entre 20 et 40 fois sur chaque ensemble (sauf certains ensembles qui ont servi à tester uniquement certains paramètres). Le résultat moyen obtenu après un même nombre d'itérations est comparé entre chaque paramètre différent, et des tendances sont dégagées afin d'améliorer le processus de recherche de solutions avec l'heuristique.

5.4.1. Variation de *thetamax*

Lors de la section précédente, nous avons vu que le paramètre *thêta* représente la durée du tabou imposé sur un mouvement, c'est-à-dire la durée (en itérations) de l'interdiction d'effectuer ce mouvement. Le paramètre varie aléatoirement entre 0 et *thetamax*. En faisant varier *thetamax*, nous pouvons voir l'impact de la durée de l'interdiction de mouvement sur la qualité de la solution obtenue.

Nous avons testé le paramètre *thetamax* avec les valeurs présentées au tableau suivant.

Nom de l'ensemble	Valeurs testées
P47	10, 15, 17, 20, 30, 40
P50	10, 15, 17, 20, 30, 40
P98	10, 15, 20
P106	10, 15, 20, 30, 40
P127	5, 10, 15, 17, 20, 30, 40
P150	10, 15, 20, 30, 40
P200	10, 15, 20, 30, 40

Tableau 18 – Paramètres *thetamax* pour chaque scénario de test

Avant de débiter les tests, nous avons posé l'hypothèse que le paramètre pourrait avoir des impacts sur la qualité de la solution obtenue. En effet, un *thetamax* plus petit pourrait réduire la qualité de la solution car l'algorithme pourrait refaire souvent les mêmes mouvements après, ce qui pourrait faire cycloer l'algorithme près d'un minimum local. Un *thetamax* plus élevé pourrait améliorer la solution en forçant l'algorithme à

explorer de nouvelles régions de l'espace de solution en l'interdisant de rester près d'un minimum local.

Après avoir effectué les tests, la variation de ce paramètre n'a pas engendré d'amélioration ni de réduction significative de la valeur de la fonction objectif sur les paramètres testés. La valeur est restée majoritairement à l'intérieur d'une marge de 0,5% de la valeur de référence, et aucune tendance n'a pu être dégagée des résultats obtenus.

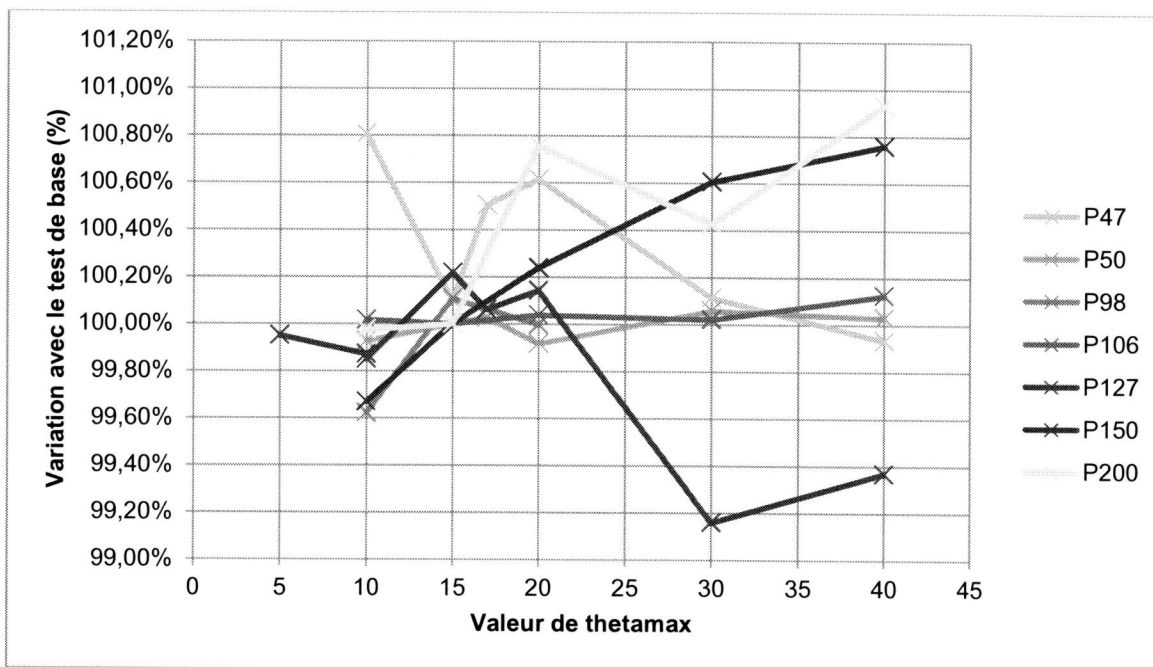


Figure 28 – Impact de la valeur de thetamax sur la qualité de la solution obtenue

Puisque la valeur de θ est une valeur aléatoire entre 0 et $\theta_{\max}$, il se peut que seules les très grandes ou très petites valeurs puissent avoir un impact sur la qualité de la solution. De plus, d'autres paramètres empêchent la solution de cycloer dans un minimum local, ce qui peut compenser pour des valeurs de θ très petites.

5.4.2. Variation de zetamax

Le paramètre zeta est un facteur de pénalité appliqué aux mouvements effectués fréquemment, soit l'insertion d'un segment de voyage dans une tournée. Il varie aléatoirement entre 0 et $\zeta_{\max}$. En faisant varier $\zeta_{\max}$, nous pouvons voir l'impact

de cette pénalité sur l'atteinte de solutions de qualité, en diminuant ou augmentant la pénalité sur les mouvements fréquemment effectués par l'algorithme.

Avant d'avoir effectué les tests, nous avons posé l'hypothèse suivante : de grandes valeurs de *zetamax* pourraient potentiellement améliorer la solution obtenue, car elles induiraient une pénalité additionnelle sur la fonction objectif, et ainsi forceraient l'algorithme à diversifier sa recherche dans l'espace de solutions. En contrepartie, les petites valeurs de *zetamax* pourraient avoir un impact négatif sur la qualité de la solution et minimisant la pénalité liée à une non diversification de la recherche. Également, plus l'espace de solutions est grand (plus grand nombre de véhicules et de cargos), plus les gains obtenus par une grande valeur de *zetamax* pourraient être significatifs.

Nous avons testé le paramètre *zetamax* avec les valeurs présentées au tableau suivant.

Nom de l'ensemble	Valeurs testées
P47	0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,080; 0,100; 0,200.
P50	0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,080; 0,100; 0,200.
P98	0,010; 0,015; 0,020; 0,030.
P106	0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,080; 0,100; 0,200.
P127	0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,040; 0,050; 0,080; 0,100; 0,200.
P150	0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,080; 0,100; 0,200.
P200	0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,080; 0,100; 0,200.

Tableau 19 – Paramètre *zetamax* pour chaque scénario test

La variation de ce paramètre a engendré certains gains pour quelques ensembles de scénarios. Nous avons cependant remarqué une faible tendance négative, c'est-à-dire qu'une augmentation du paramètre diminue la valeur de la fonction objectif, donc améliore la solution. Cette tendance vient rejoindre l'hypothèse posée précédemment, soit que la valeur de la recherche dans l'espace de solution sera mieux diversifiée avec un paramètre plus élevé. La valeur a été changée à la suite de cette analyse.

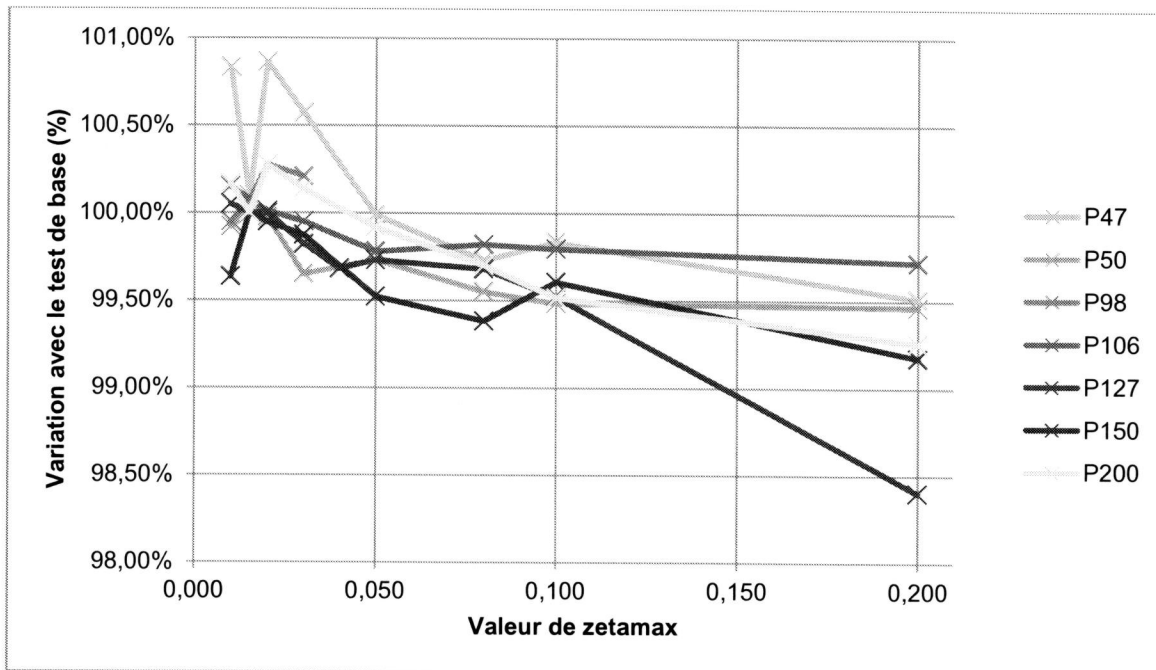


Figure 29 – Impact de la valeur de zetamax sur la qualité de la solution

5.4.3. Variation de deltamax

Le paramètre delta est un paramètre sélectionné aléatoirement entre 0 et *deltamax* qui multiplie les violations de contraintes dans la fonction objectif. Si le paramètre est élevé, la violation d'une contrainte fait augmenter la valeur de la fonction objectif à minimiser. Cette augmentation dirigera la recherche vers des zones où la violation des contraintes sera minime.

Avant d'avoir effectué les tests, nous avons posé l'hypothèse qu'une valeur élevée de delta dirigerait plus rapidement la recherche vers des solutions non contraintes, ce qui donnerait un résultat réalisable assez rapidement. En contrepartie, ce paramètre élevé pourrait limiter l'algorithme en dirigeant sa recherche seulement vers des zones moins contraintes de l'espace des solutions. En somme, un delta plus élevé ferait en sorte que l'algorithme est plus efficace pour trouver rapidement des réponses, mais que pour un même nombre total d'itérations, la solution retournée serait de moins bonne qualité.

Nous avons testé le paramètre *deltamax* avec les valeurs présentées au tableau suivant.

Nom de l'ensemble	Valeurs testées
P47	0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,50; 0,80.
P50	0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,50; 0,75.
P98	0,10; 0,25; 0,50; 0,75.
P106	0,05; 0,10; 0,12; 0,14; 0,15; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24; 0,25; 0,30; 0,50; 0,75.
P127	0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,50; 0,80.
P150	0,00; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,50; 0,80.
P200	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,50; 0,80.

Tableau 20 – Valeur de *deltamax* pour chaque scénario test

La réduction de ce paramètre a engendré des gains pour toutes les instances testées. En effet, par rapport à la valeur de base (*deltamax* = 0,50), la réduction du paramètre a réduit la valeur de la fonction objectif à minimiser, et une tendance est observable pour la plupart des tests effectués.

Ce résultat vient confirmer une partie de l'hypothèse précédemment posée, soit que la valeur de la fonction objectif pour un nombre fixe d'itérations (ici 100 000) est plus basse qu'une valeur plus élevée du paramètre *deltamax*. L'algorithme, pénalisant moins les solutions violant les contraintes, permet une meilleure exploration de l'espace des solutions, amenant à terme de meilleures solutions.

En regardant le moment où la première solution réalisable est obtenue, nous pouvons vérifier également si des valeurs plus élevées de *deltamax* ont un impact sur la convergence vers une solution réalisable. Sur tous les scénarios, une tendance confirmant l'hypothèse a été observée, c'est-à-dire qu'un paramètre *deltamax* élevé donnera en moyenne une solution réalisable plus rapidement qu'un paramètre moins élevé. L'algorithme est donc plus rapide pour trouver des solutions réalisables quand ce paramètre de pénalité est plus élevé.

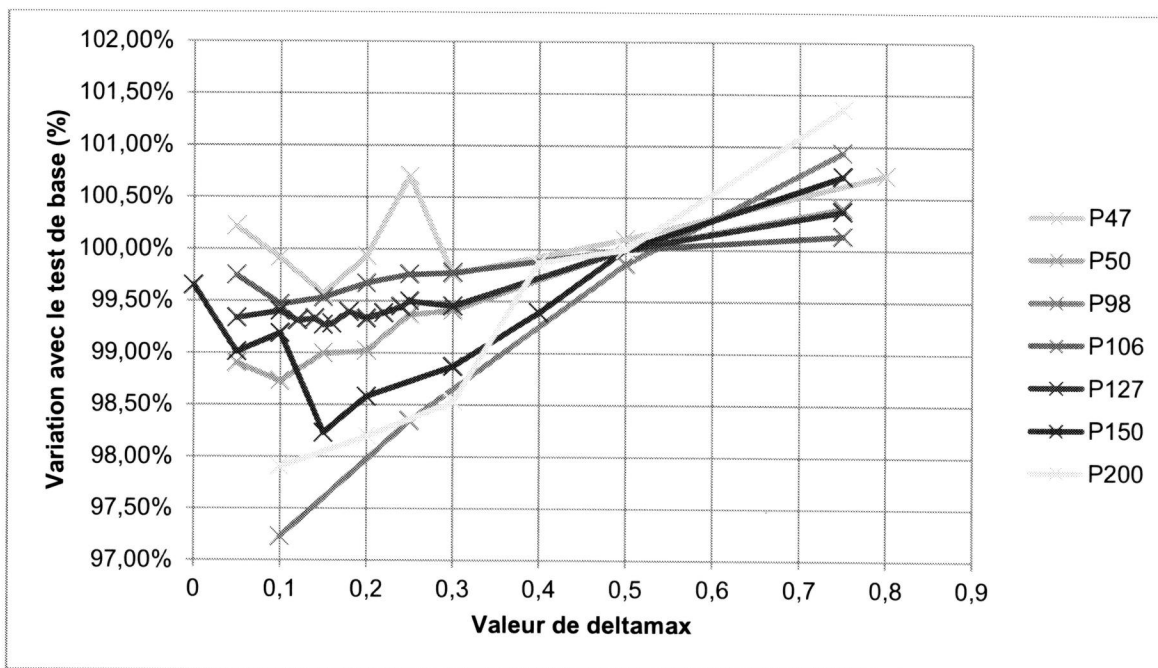


Figure 30 – Impact de la valeur de deltamax sur la qualité de solution

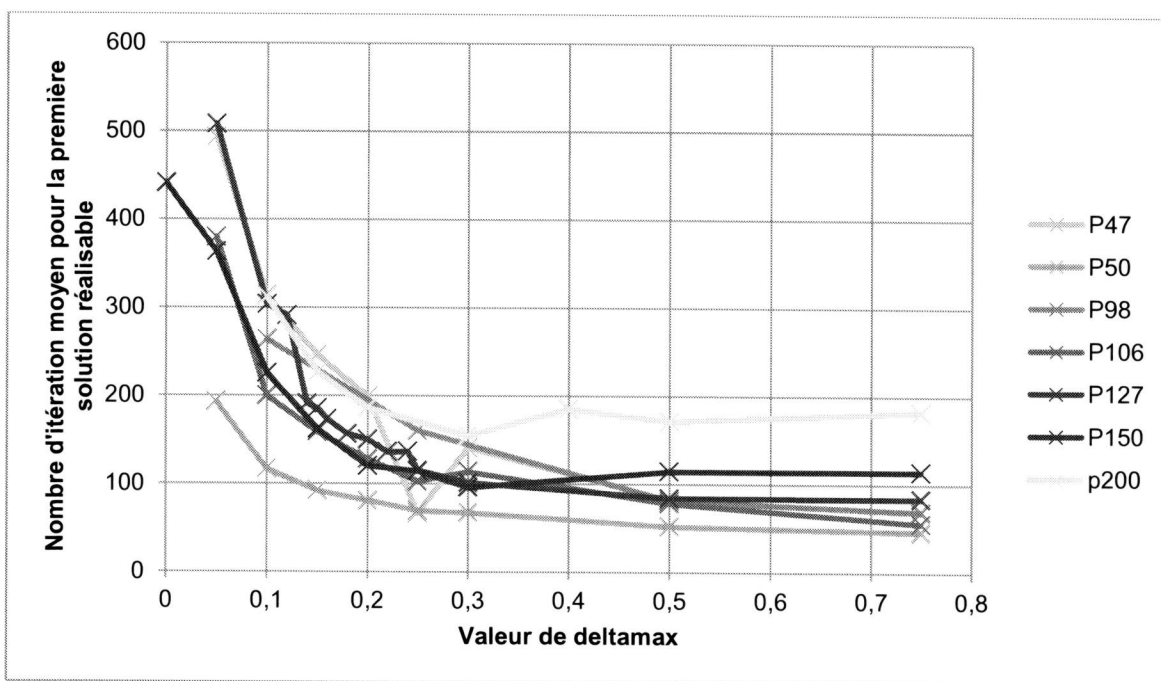


Figure 31 – Impact de la valeur de deltamax sur le nombre d'itérations de la première solution

5.4.4. Variation de kappa

Kappa est un paramètre qui indique à l'algorithme à quel moment un réarrangement intra-tournée doit être effectué à la place d'un échange inter-tournées. Si le paramètre est élevé, moins de réarrangements intra-tournée seront effectués et plus d'échanges inter-tournées seront effectués. La valeur de base du paramètre est de 10, c'est-à-dire qu'il y a un réarrangement interne à chaque 10 itérations de l'algorithme.

Avant de procéder aux tests sur nos ensembles d'instances, nous avons posé une hypothèse : un réarrangement interne provoque une intensification de la recherche dans une région restreinte, ce qui peut potentiellement améliorer une solution qui est déjà bonne. Un réarrangement plus fréquent pourrait donc potentiellement donner des meilleurs résultats, car une intensification de la solution obtenue est effectuée plus souvent. De plus, il y a proportionnellement une meilleure diversité des mouvements, ce qui peut également favoriser l'exploration d'un espace de solution plus large. Ainsi, des valeurs de *kappa* plus basses (augmentation du nombre de réarrangements internes) pourraient apporter de meilleures solutions que des valeurs plus élevées.

Nous avons testé le paramètre *kappa* avec les valeurs présentées au tableau suivant.

Nom de l'ensemble	Valeurs testées
P47	5; 8; 10; 12; 20.
P50	5; 8; 10; 12; 20.
P98	5; 10; 20.
P106	5; 8; 10; 12; 20.
P127	5; 8; 10; 12; 20.
P150	5; 8; 10; 12; 20.
P200	5; 8; 10; 12; 20.

Tableau 21 – Valeur de *kappa* pour chaque scénario test

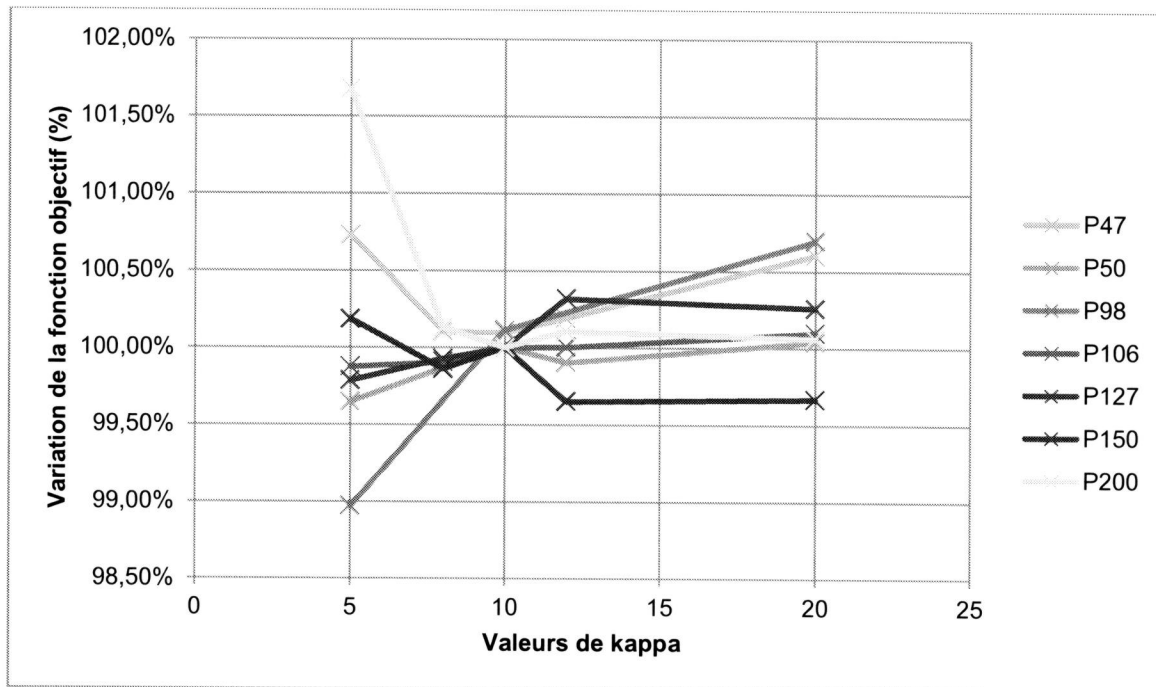


Figure 32 – Variation du paramètre kappa pour toutes les instances test

La variation du paramètre kappa ne semble pas avoir d'impact significatif sur la qualité de la solution obtenue, et il ne semble pas y avoir de tendance observable. En testant à nouveau avec des paramètres plus bas et plus élevés, nous avons pu voir qu'il n'y a pas d'impact significatif sur la qualité de solution.

Il est intéressant de noter que le temps de traitement par itération est plus long quand le paramètre est plus bas (c.-à-d. qu'il y a plus de réarrangements internes), car la tâche de réarrangement nécessite plus de ressources à l'ordinateur. Ainsi, pour un même nombre d'itérations, le temps de traitement total était plus long de 37% quand le paramètre était réduit de moitié (deux fois plus de réarrangements) et le temps de traitement était en moyenne 10% plus court quand le paramètre était doublé (deux fois moins de réarrangements).

5.4.5. Variation de khi

Le paramètre *khi* spécifie le nombre d'itérations avant qu'un brassage de la solution soit effectué. Par exemple, si le paramètre est de 10 000, la solution sera détruite et reconstruite aléatoirement à chaque 10 000 itérations. Si le paramètre est plus élevé, un

brassage sera effectué moins souvent (ou pas du tout s'il est égal au nombre maximal d'itérations).

Avant de débiter nos tests, nous avons posé l'hypothèse qu'un *khi* plus petit (brassage fréquent) pourrait avoir des résultats positifs sur l'atteinte de solutions de qualité, car cela permettrait à l'algorithme d'explorer plusieurs sous-régions. Cependant, un brassage trop fréquent pourrait limiter les gains, car l'algorithme n'aurait pas le temps d'explorer en profondeur la sous-région de l'espace des solutions. De plus, nous croyions que l'impact du paramètre serait plus positif sur les instances comportant un espace de solutions plus grand (plus de cargos ou plus de véhicules), car le brassage permettrait d'obtenir une solution diversifiée et potentiellement meilleure.

Nous avons testé le paramètre *khi* avec les valeurs présentées au tableau suivant :

Nom de l'ensemble	Valeurs testées
P50	5000, 10000, 20000, 50000, 100000.
P91	1000, 5000, 10000, 15000, 20000, 25000, 30000, 40000, 50000, 60000, 100000.
P106	5000, 10000, 20000, 50000, 100000.
P127	5000, 10000, 20000, 50000, 100000.
P150	5000, 10000, 20000, 50000, 100000.
P200	5000, 10000, 20000, 50000, 100000.

Tableau 22 – Valeurs de *khi* testées

Pour un nombre maximal d'itérations de 100 000, nous avons testé le paramètre avec plusieurs fractions de ce nombre. Par exemple, si *khi* était à 50 000, il y avait un seul brassage vers la 50 000^e itération. L'utilisation de ce paramètre a empiré la solution moyenne obtenue dans cinq des six ensembles testés, et a donné des gains peu significatifs pour l'ensemble P127. Il ne semble pas possible de dégager une tendance, sauf pour ce qui est des tests sur des valeurs de *khi* très basses (moins de 10 000). En effet, dans cinq ensembles sur six, baisser la valeur de *khi* de 10 000 à 5000 diminuait la qualité de la solution de 0,40% en moyenne.

L'hypothèse concernant *khi* ne tient donc pas. L'utilisation de ce paramètre ne semble pas permettre une diversification de la recherche dans l'espace de solution, ou encore le paramètre vient contrecarrer l'effet des autres paramètres. Une partie de l'hypothèse reste cependant valide : un brassage trop fréquent a pour effet de réduire la qualité de la

solution, car l'algorithme n'a pas le temps de faire une recherche approfondie dans la sous-région de l'espace de solution.

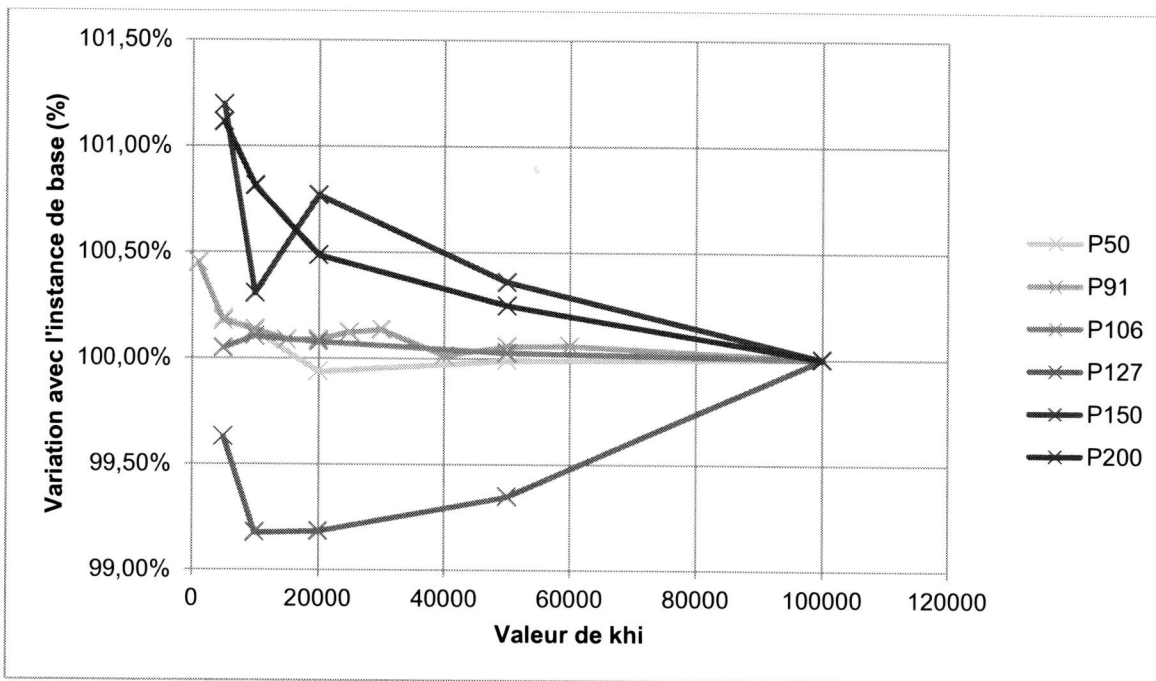


Figure 33 – Impact du paramètre khi sur la qualité de la solution

5.4.6. Variation de lambda

Au chapitre 4, nous avons décrit le paramètre lambda. Ce paramètre permet de modifier la pénalité liée à l'utilisation d'un navire avec une capacité non utilisée. Par exemple, si un navire ayant une capacité de 40 000 tonnes ne transporte que 35 000 tonnes (contraint par le client par exemple), une pénalité correspondante à 5000 tonnes fois le taux chargé par tonne serait ajouté à la fonction objectif. Cette pénalité s'assure donc de minimiser les pertes liées à une mauvaise allocation de la capacité de la flotte.

En testant le paramètre sur des instances réelles, nous avons découvert qu'une augmentation du paramètre lambda (multiplicateur de la pénalité) augmente la valeur de la fonction objectif. Cette augmentation est notamment causée par l'augmentation directe des pénalités liées au sous-chargement. En retirant cette pénalité de la fonction, nous avons remarqué qu'il y avait toujours une augmentation des coûts liés aux autres éléments de la fonction objectif.

L'augmentation du paramètre λ a en effet un impact direct sur la qualité de la solution : la portion des voyages à vide (en ballast) augmente de 1,0% pour un λ passant de 0 à 1. Une tendance directe est également observée entre l'augmentation du paramètre et la longueur moyenne des voyages en ballast (coefficient R^2 de 0,711).

Cette augmentation est logique. Plus la pénalité liée au chargement est grande, plus les navires parcourront de grandes distances pour aller cueillir des cargos ayant la bonne capacité. L'application de cette pénalité revient à la discrétion de l'utilisateur : si une grande disparité dans la taille des cargos est observée par ce dernier, une meilleure allocation des navires aux cargos pourrait entraîner des gains significatifs pour la compagnie. À l'inverse, si les cargos disponibles sont de tailles homogènes, cette pénalité pourrait avoir des effets néfastes sur la performance de la flotte (augmentation des portions de voyages à vide) pour peu de gains.

5.4.7. Variation d'êta

Le paramètre ϵ représente le nombre d'itérations que l'algorithme effectuera avant d'arrêter et de renvoyer la meilleure solution obtenue. L'utilisateur peut à tout moment arrêter l'algorithme manuellement lorsqu'il fonctionne. Pour tous les tests effectués précédemment, la valeur d'êta était fixée à 100 000 itérations. Le temps requis par itération est relativement stable; faire deux fois moins d'itérations prendra alors deux fois moins de temps.

Avant de procéder aux tests, nous avons posé l'hypothèse suivante : l'augmentation du nombre d'itérations aura des effets bénéfiques sur la valeur de la fonction objectif. En effet, en effectuant plus d'itérations, l'algorithme peut potentiellement explorer plus de régions de l'espace de solutions, ce qui permettrait d'obtenir de meilleures solutions. Nous pensons également que l'effet bénéfique sera moins élevé sur les plus petites instances, car l'espace de solutions est beaucoup moins grand et ainsi les opportunités de trouver de nouvelles régions de l'espace de solution sont moins grandes.

Pour chaque ensemble test, nous avons testé ϵ sur 100 000 itérations, 200 000 itérations et 300 000 itérations. Nous avons également testé l'instance P127 sur 500 000 itérations.

Itérations	P47	P50	P98	P106	P127	P150	P200
200 000	100,49%	99,70%	99,54%	99,90%	99,99%	99,48%	100,46%
300 000	99,79%	99,77%	-	99,81%	-	99,60%	99,88%
500 000	-	-	-	-	99,61%	-	-

Tableau 23 – Valeur moyenne de la fonction objectif pour différents nombres d'itérations

L'augmentation d'êta ne semble pas avoir énormément d'impact sur la valeur de la fonction objectif. Tous les tests de 300 000 ou 500 000 itérations ont obtenu une meilleure solution en moyenne que les tests ayant été effectués sur 100 000 itérations. Par contre, les gains obtenus demeurent très faibles et sont peu significatifs.

En regardant de plus près l'évolution de la meilleure solution par rapport aux itérations de l'algorithme (figure 34), on peut voir que les principaux gains se font dans les 1000 premières itérations, et par la suite la plupart des gains significatifs sont effectués avant la 50 000^e itération. Ainsi, augmenter le nombre d'itérations de 100 000 à 200 000 aura peu d'incidence sur la valeur de la fonction objectif.

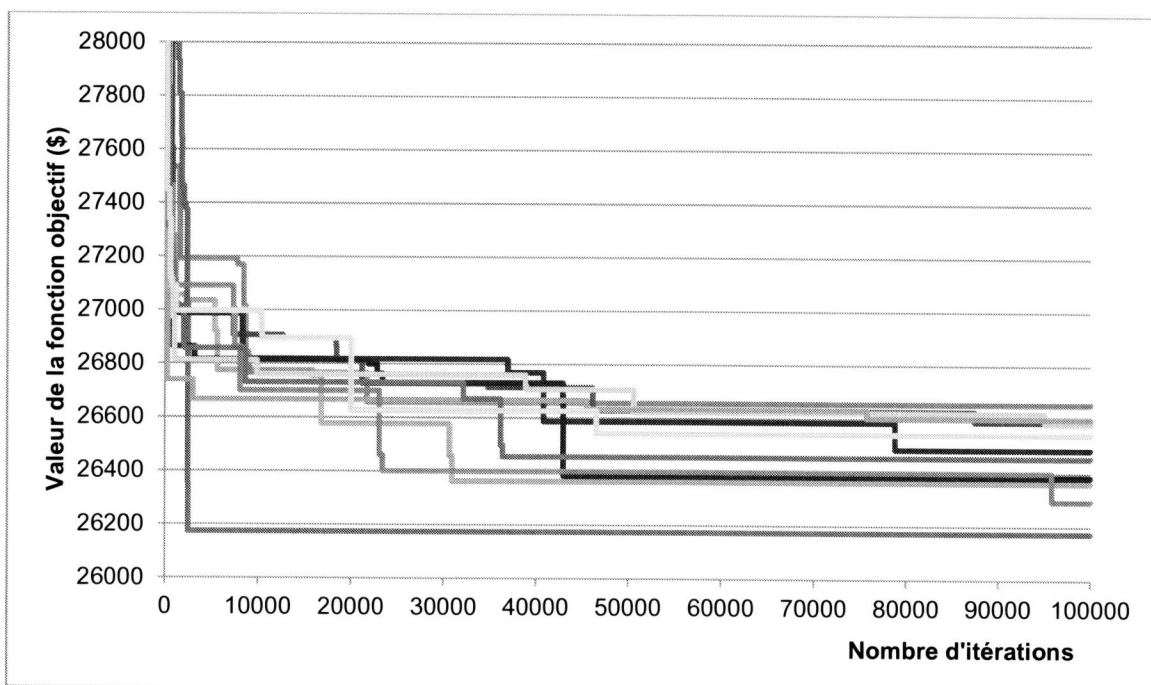


Figure 34 – Valeur de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations (10 scénarios P127)

La première hypothèse est donc infirmée : l'augmentation d'êta n'a pas ou peu d'incidence sur la qualité de la solution renvoyée par l'algorithme. La deuxième hypothèse ne semble pas non plus tenir la route, car les gains obtenus pour les petites instances correspondaient aux gains obtenus pour les instances plus grandes.

Il est cependant intéressant de se pencher sur le moment où l'algorithme effectue sa dernière amélioration en moyenne pour chaque scénario.

Itérations	P47	P50	P98	P106	P127	P150	P200
100 000	56 938	44 487	53 484	46 797	50 317	49 133	50 351
200 000	92 884	103 086	100 809	53 668	116 101	90 972	103 739
300 000	121 652	108 501	-	96 139	-	160 134	110 889
500 000	-	-	-	-	109 537	-	-

Tableau 24 – Itération où la dernière amélioration a été effectuée par l'algorithme par ensemble de scénarios

Les dernières itérations effectuées par l'algorithme sont relativement proportionnelles à la valeur d'êta. Dans le cas de 100 000 et 200 000 itérations, la moyenne de la dernière itération ayant eu une amélioration de la fonction objectif se situait respectivement à 50,22% et 47,23%. À 300 000 itérations, la valeur chute à 39,82%. Il ne semble pas y avoir de relation entre la taille de l'ensemble testé et le moment où l'algorithme trouve sa dernière itération d'amélioration.

Puisque le paramètre êta a une grande influence sur la durée de calcul d'une solution, la baisse de ce paramètre permettrait de trouver des solutions dans un temps moins élevé. En baissant le paramètre à 50 000, l'effet sur la valeur de la fonction objectif serait minime. En regardant la dernière solution obtenue avant 50 000 pour chaque test de chaque ensemble, nous remarquons que cette valeur se situe à 100,35% de la valeur de base. Cependant, il est à noter que même 0,35% de différence peut avoir de grands impacts sur les coûts de la compagnie de transport, surtout si la valeur de la fonction objectif se situe dans les millions de dollars.

5.4.8. Relaxation des fenêtres de temps (oméga)

Les fenêtres de temps contraignent plus le problème que les autres contraintes. En effet, il n'y a pas de limite sur la durée d'un voyage, tous les cargos se font à chargement plein et la limite de durée totale du voyage n'est également pas contrainte. Nous avons décidé d'analyser un paramètre additionnel de relaxation de cette contrainte. Le paramètre permet d'accepter une solution non réalisable jusqu'à une certaine limite si cette dernière, malgré la pénalité associée à la violation de contrainte,

demeure une solution moins chère que la meilleure solution respectant toutes les contraintes obtenue jusqu'à présent. L'algorithme peut donc trouver une solution où les fenêtres de temps ne sont pas respectées jusqu'à concurrence du paramètre oméga. Par exemple, si ce paramètre correspond à 8 heures, toutes les violations de contraintes de la solution ne doivent pas excéder 8 heures.

Nous avons décidé de tester la valeur du paramètre pour voir quel est l'impact d'une relaxation graduelle des fenêtres de temps sur la solution. En raison de la pénalité associée à la violation de la contrainte, nous croyons que l'augmentation du paramètre permettra d'obtenir de meilleures solutions jusqu'à un certain point où la pénalité devient trop grande. À ce point, l'augmentation d'oméga n'aura pas d'effet sur la valeur de la fonction objectif.

Nous avons testé le paramètre oméga avec les valeurs présentées au tableau suivant.

Nom de l'ensemble	Valeurs testées
P50	0, 300, 1000, 5000, 10 000, 20 000, 25 000, 50 000.
P106	0, 300, 1000, 5000, 10 000, 15 000, 20 000, 25 000, 50 000.
P127	0, 300, 1000, 5000, 10 000, 20 000, 25 000, 50 000.
P150	0, 300, 1000, 5000, 10 000, 20 000, 25 000, 50 000.
P200	0, 300, 1000, 5000, 10 000, 20 000, 25 000, 50 000.

Tableau 25 – Valeurs d'oméga testées

En regardant la valeur de la fonction objectif moyenne obtenue pour chaque test de chaque ensemble, nous remarquons que la relaxation des contraintes entraîne une amélioration des solutions. Le degré d'amélioration n'est pas identique pour chaque instance; les fenêtres de temps des instances P50 et P200 sont très larges (respectivement 13,96 jours et 11,64 jours), donc une relaxation de la contrainte n'apporte qu'une amélioration marginale. L'amélioration est la plus prononcée pour l'instance P106 qui a une largeur de fenêtre de temps moyenne de 6,98 jours.

Pour les instances P127 et P150, une légère augmentation d'oméga ($\omega = 300$ minutes) entraîne une diminution de la valeur de la fonction objectif de 0,7%, tandis que l'instance P106 atteint un plateau à $\omega = 5000$ minutes (amélioration de la solution d'environ 2,3%).

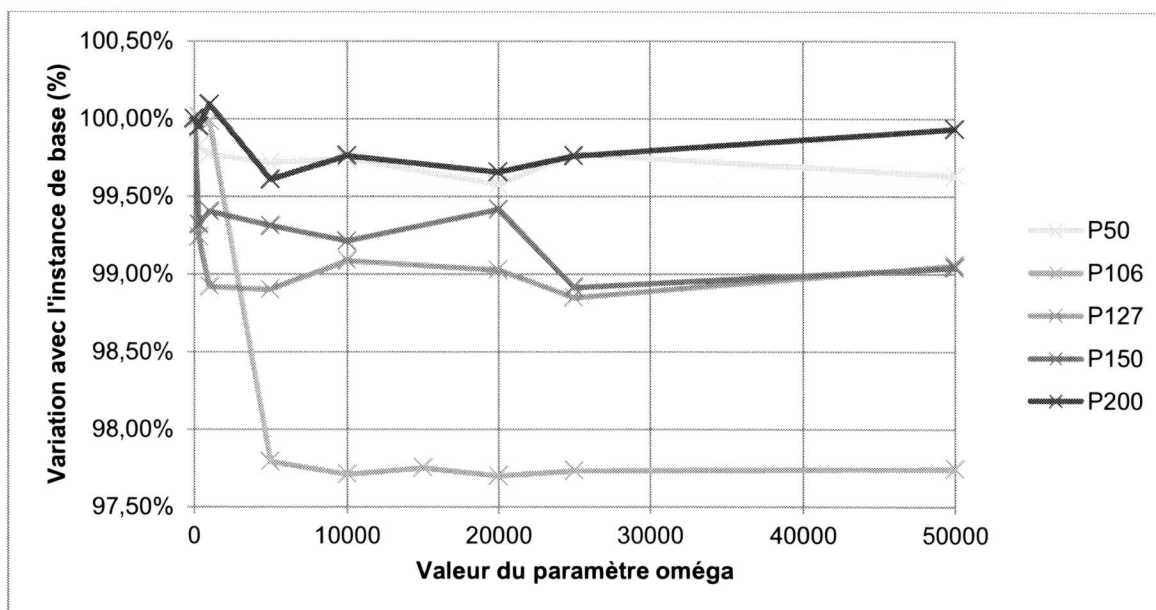


Figure 35 – Impact d'oméga sur la qualité de la solution obtenue

Le comportement de la fonction objectif semble confirmer l'hypothèse posée précédemment. L'augmentation du paramètre améliore la solution (dépendamment de la largeur initiale des fenêtres de temps) et après une certaine valeur, l'augmentation d'oméga n'entraîne pas ou peu d'amélioration en raison de la pénalité liée à la violation des contraintes.

5.4.9. Combinaison des paramètres

Enfin, nous avons voulu analyser l'impact de la combinaison de plusieurs paramètres ensemble pour voir leur effet conjoint. Plusieurs combinaisons peuvent exister, mais en raison des résultats obtenus précédemment, nous avons décidé d'augmenter deux paramètres seulement (delta et zeta) et comparer le résultat aux tests de base.

Nous avons donc diminué *deltamax* de 0,50 à 0,25 et augmenté *zetamax* de 0,015 à 0,030. Les autres paramètres sont restés constants. Puisque *deltamax* pénalise les solutions non réalisables en multipliant la violation des contraintes, la diminution de ce paramètre permet une plus grande exploration de l'espace de solution en passant par des solutions intermédiaires non réalisables. *Zetamax* pénalise les mouvements fréquents, ce qui favorise une meilleure exploration de l'espace de solution. La combinaison de ces deux paramètres pourrait donc permettre d'explorer une plus

grande portion de l'espace de solutions et rapporter des solutions potentiellement meilleures.

Ensemble	100 000 itérations	300 000 itérations	400 000 itérations
P47	99,73%	-	-
P50	98,86%	-	-
P127	99,30%	98,97%	98,92%

Tableau 26 – Valeurs moyennes de la fonction objectif pour les tests combinés

Après avoir testé le paramètre sur les trois ensembles tests, nous avons remarqué que la combinaison des paramètres semble avoir un effet bénéfique sur tous les ensembles, mais particulièrement sur l'ensemble P50. En augmentant le nombre d'itérations effectuées par l'algorithme, nous voyons qu'il explore davantage l'espace de solutions pour l'instance P127 et améliore légèrement sa fonction objectif à partir de 300 000 itérations.

5.5. Analyse de sensibilité

Après avoir testé la sensibilité de la solution en fonction des paramètres de l'algorithme, nous avons voulu analyser la sensibilité aux paramètres du problème. Nous avons consulté le département du transport ainsi que le département des ventes de la compagnie, et nous avons déterminé deux principaux paramètres à faire varier et à évaluer, soit la largeur des fenêtres de temps des clients et la vitesse moyenne des navires.

5.5.1. Impact de la largeur des fenêtres de temps

L'analyse de sensibilité de la largeur des fenêtres de temps permet de calculer quel est le coût ou le bénéfice monétaire associé à des fenêtres de temps très contraintes ou très larges. Ainsi, il est possible d'évaluer quel sera l'impact d'augmenter d'un certain nombre de jours la taille des fenêtres de temps de tous les clients simultanément.

Pour l'analyse de sensibilité, deux scénarios ont été utilisés, soit un scénario où la flotte n'a pas de capacité excédentaire (une utilisation de 90% ou plus) et un scénario où la flotte a de la capacité excédentaire. Nous avons fait varier la largeur des fenêtres de

temps d'une réduction de trois jours jusqu'à une augmentation de dix jours. En raison de la largeur de fenêtres de temps de certains clients étant inférieure ou égale à trois jours, nous avons dû limiter dans certains cas la réduction de la taille des fenêtres de temps à un jour minimum. Si un client avait, avant l'analyse, une fenêtre de cueillette de trois jours, la fenêtre ne pouvait être réduite qu'à un jour minimum, soit une réduction de deux jours. En revanche, nous avons posé l'hypothèse qu'une augmentation de fenêtre de temps de plus de 10 jours n'aurait pas d'impact significatif sur les coûts totaux de l'horaire, car le transporteur effectue des voyages de courte durée. Cette hypothèse a été par la suite validée par les résultats obtenus.

Le premier scénario comporte 106 requêtes de transport ainsi que 17 véhicules tandis que le deuxième scénario comporte 109 requêtes de transport et 15 véhicules.

En analysant les résultats obtenus, nous pouvons voir que l'impact d'une diminution ou d'une augmentation de la largeur des fenêtres de temps a un impact sur la solution obtenue dans les deux cas. Il est intéressant de remarquer que l'augmentation ou la diminution est beaucoup plus prononcée pour les instances déjà très contraintes tandis que l'impact de la variation est moindre pour les instances déjà relaxées.

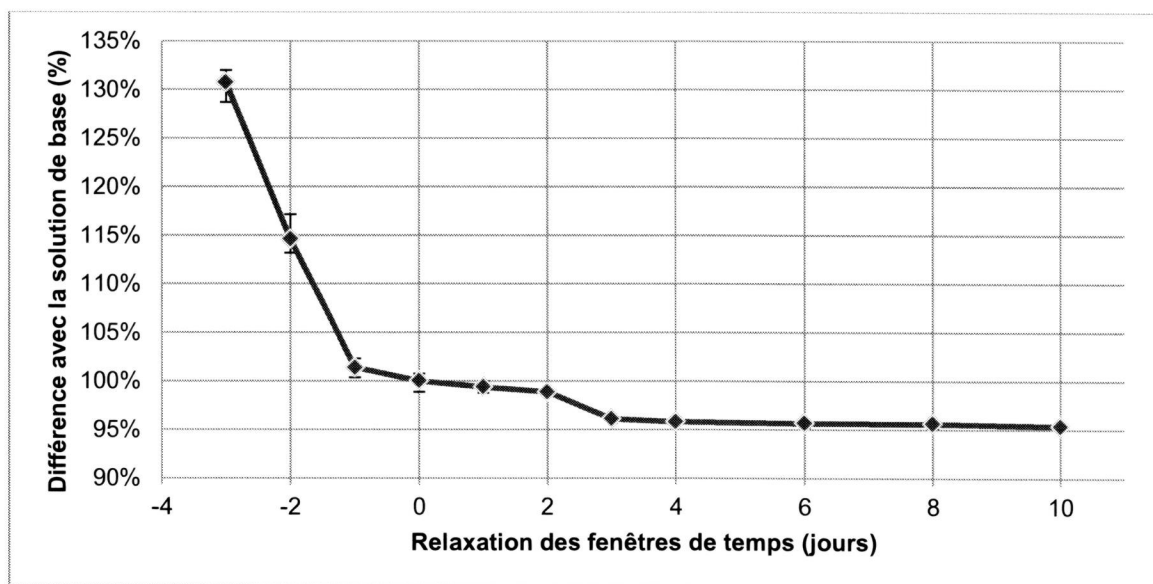


Figure 36 – Impact de la relaxation des fenêtres de temps sur la solution (contraint)

Dans le premier scénario test, l'augmentation drastique de la valeur de la fonction objectif est principalement causée par l'atteinte de la capacité maximale de la flotte. Les contrats ne peuvent plus être réalisés et induisent une pénalité à la fonction objectif. Dans le deuxième scénario, même si les fenêtres de temps sont raccourcies de

quelques jours, la capacité de la flotte demeure suffisante et aucune pénalité n'est encourue.

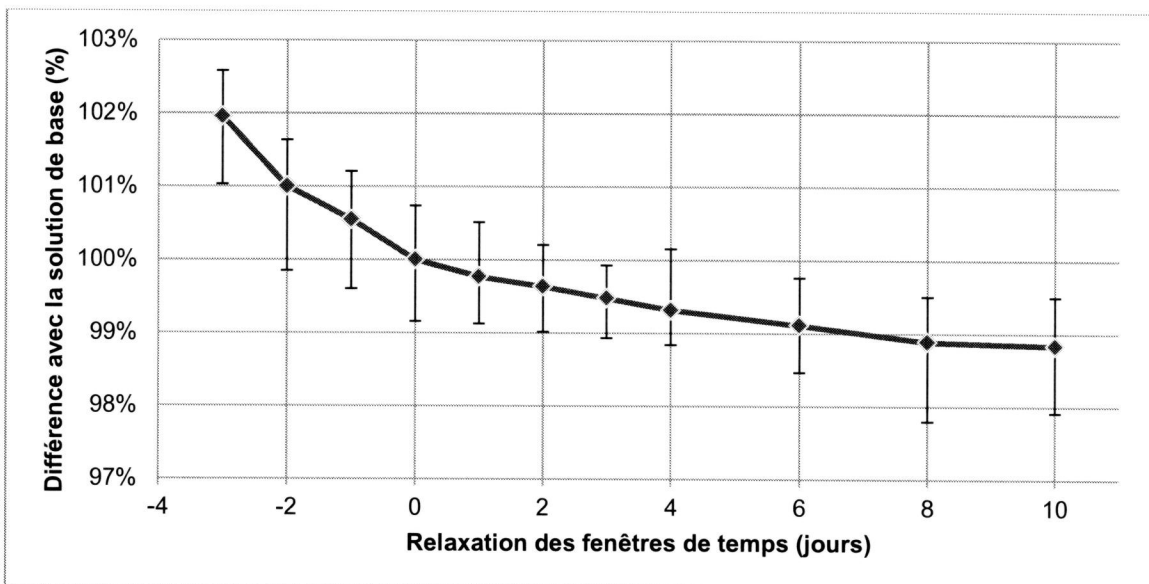


Figure 37 – Impact de la relaxation des fenêtres de temps sur la solution (non contraint)

5.5.2. Variation de la vitesse des navires

La modulation des vitesses de croisière des navires peut être très utile pour les planificateurs dans une compagnie de transport. En effet, diminuer légèrement la vitesse peut avoir des impacts sur la consommation de carburant, mais diminue la capacité totale de la flotte et augmente les coûts moyens d'utilisation pour un même voyage.

Pour effectuer cette analyse, nous devons moduler la consommation de carburant en fonction de la vitesse des navires. Après avoir consulté le département du transport, il a été déterminé que les navires ne pouvaient pas naviguer à plus de 20% de leur vitesse actuelle en raison de contraintes techniques des moteurs, et qu'il ne valait pas la peine de naviguer à moins 20% de leur vitesse actuelle. Nous avons donc établi un intervalle d'évaluation entre 80% et 120% de la vitesse actuelle, avec un pas de 5% pour l'évaluation initiale.

Puisque la consommation de carburant n'est pas liée linéairement à la vitesse du navire, nous devons estimer une consommation en posant certaines hypothèses. Bien que le département technique de la compagnie conserve certaines données de consommation à différents niveaux de charge du moteur, nous avons utilisé une courbe de

consommation évaluée statistiquement par Bialystocki et Konovessis (2016). Le navire utilisé dans l'étude correspond aux navires de la flotte en termes de dimension, de puissance des moteurs et de tonnage pouvant être transporté. Les auteurs ont déterminé une équation de consommation en effectuant une régression quadratique sur des points de consommation dans un intervalle restreint (avec un R-carré obtenu de 0,7557 avant corrections, et 0,8829 après corrections). L'équation suivante décrit donc la consommation du navire pour une vitesse donnée :

$$\text{Consommation} = 0.2525 * \text{vitesse}^2 - 1.6307 * \text{vitesse}$$

L'équation a été appliquée à la flotte et certaines corrections ont été apportées selon les points de consommation rapportée qui étaient disponibles.

Nous avons effectué l'analyse de sensibilité de la vitesse sur deux types de scénarios afin de refléter plus adéquatement les opérations du transporteur. Le premier scénario est basé sur des données réelles où le transporteur n'a pas de capacité excédentaire, c'est-à-dire que tous les navires de la flotte sont occupés à plus de 90% pendant toute la durée de l'horizon de planification. Le deuxième scénario est également basé sur des données réelles où le transporteur a de la capacité excédentaire. Chaque scénario est basé sur un horizon de planification d'environ deux mois et comporte 106 cargos et 17 navires dans le premier cas, et 109 cargos et 15 navires dans le deuxième cas.

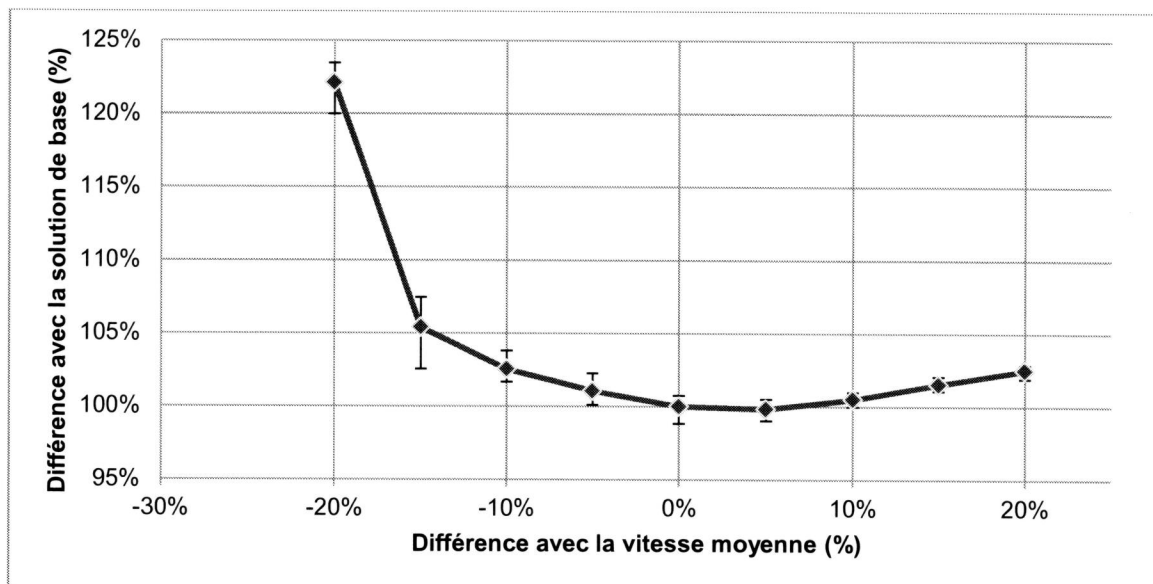


Figure 38 – Impact de la variation des vitesses moyennes sur la solution (sans capacité excédentaire)

En analysant les valeurs de la fonction objectif pour chaque scénario à chaque différent niveau de vitesse, nous pouvons voir qu'une grande diminution ou une grande augmentation de la vitesse augmente les coûts significativement. En diminuant la vitesse moyenne de la flotte, la valeur de la fonction objectif du scénario en sous-capacité croît énormément. La baisse de la vitesse entraîne un manque de capacité, ce qui provoque des pénalités augmentant ainsi la valeur de la fonction objectif. Pour le scénario en surcapacité, une baisse de la vitesse diminue les coûts (en raison de la moins grande consommation de carburant) jusqu'à un certain point où les gains liés à la consommation moins grande de carburant ne sont plus suffisants pour compenser les coûts additionnels ou les pénalités additionnelles.

L'augmentation de la vitesse semble avoir un léger effet positif pour le scénario en sous-capacité. En effet, si les navires vont légèrement plus rapidement, la flotte est plus flexible et certains gains liés à des tournées plus efficaces compensent pour les coûts de carburants plus élevés. Dans le cas de l'instance non contrainte, l'augmentation de la vitesse entraîne des coûts supplémentaires liés essentiellement à la consommation plus élevée de carburant.

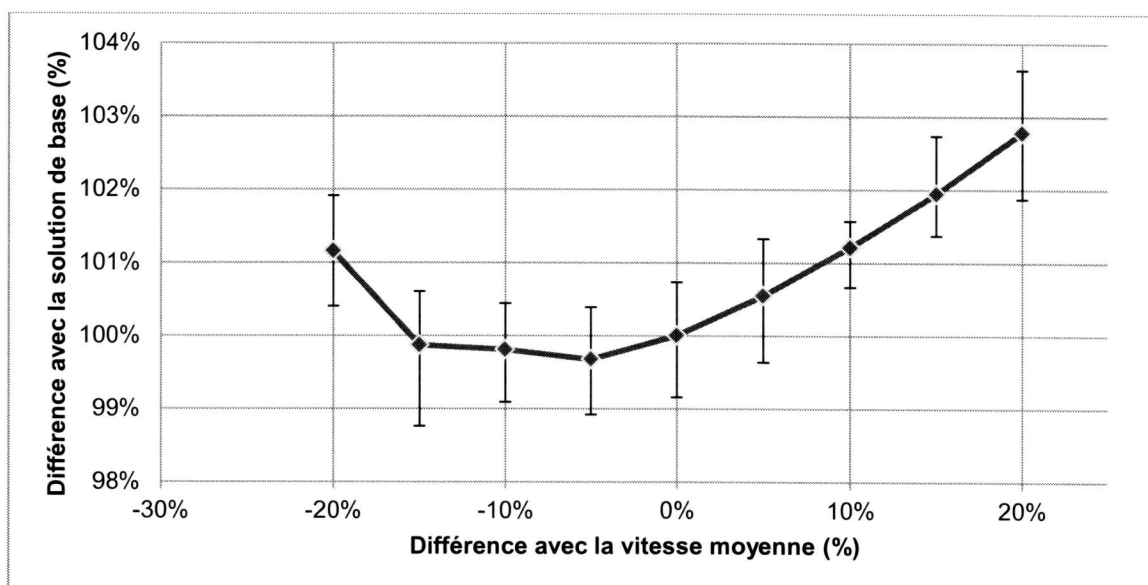


Figure 39 – Impact de la variation des vitesses moyennes sur la solution (avec capacité excédentaire)

En regardant de plus près les différents éléments de la fonction objectif, nous pouvons voir que l'augmentation de la vitesse diminue les coûts d'opération du navire. Pour le même nombre de clients, le navire est utilisé pour une moins grande période. En contrepartie, les coûts liés au carburant augmentent plus rapidement que les coûts d'opération diminuent, ce qui cause une augmentation de la valeur de la fonction objectif dans le scénario en surcapacité. Dans le cas du scénario en sous-capacité, le facteur de pénalité lié au non-respect des requêtes de transport et à l'affectation des cargos aux navires entraîne des coûts supplémentaires plus importants encore. En augmentant la vitesse, ces coûts diminuent jusqu'à un certain point où il ne semble plus avoir de pénalité. À partir de ce point, l'augmentation des coûts de carburant entraîne des coûts supplémentaires n'étant plus compensés par la baisse de la pénalité.

Chapitre 6 – Conclusion

6.1. Utilité du modèle pour l'entreprise

Les outils d'aide à la décision peuvent avoir un grand impact sur les opérations des entreprises, particulièrement lorsqu'il y a de grandes sommes d'argent en jeu. Pour les entreprises de transport, l'utilisation d'algorithmes pour résoudre des problèmes de tournées de véhicules peut permettre de réduire substantiellement les coûts d'opération et de maximiser les revenus tirés des opérations de transport.

Ce mémoire présente un algorithme d'optimisation basé sur une heuristique de recherche avec tabous pour résoudre un problème de tournée de véhicules. Une réduction des coûts d'opération de 1,21% à 2,29% a été observée sur divers horizons de planification. Une maximisation du revenu lié au chargement des navires a permis d'augmenter les bénéfices d'opérations théoriques de 3,58% à 3,85% comparativement aux opérations normales de l'entreprise. Bien que ces gains semblent modestes, les opérations de l'entreprise se chiffrent en dizaines de millions de dollars par année. Une légère diminution des coûts et une augmentation des revenus ont donc un grand effet sur les résultats de l'entreprise.

De plus, l'algorithme permet de modifier les processus de création d'horaires, et permet ultimement de mieux planifier les ressources de l'entreprise. Plusieurs scénarios correspondant à des hypothèses différentes de la demande, ou encore des analyses de sensibilité peuvent permettre aux gestionnaires de voir l'impact de divers paramètres sur les coûts de l'entreprise.

La qualité des solutions des outils d'aide à la décision est grandement influencée par les données utilisées. Afin de s'assurer que les utilisateurs puissent interagir efficacement et rapidement avec les données, un programme en VBA a été développé. Ce programme a été utile pour créer rapidement les scénarios utilisés lors du processus de planification

budgétaire ainsi que pour optimiser la vitesse des navires. Un module de présentation et modification de l'horaire a été mis sur pied pour permettre aux planificateurs de voir l'impact de modifications manuelles à l'horaire. Cette interface utilisateur a été utile pour obtenir le support des planificateurs lors du déroulement de ce projet.

Enfin, l'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour la résolution du problème de tournées de navires de l'entreprise de transport avec laquelle nous avons collaboré a permis de dégager des gains non négligeables. Ces gains se retrouvent directement sous la forme de coûts réduits et de revenus maximisés, mais également sous forme d'amélioration des processus existants et sur la capacité accrue de planifier les opérations à l'avance. Il est donc possible d'adapter des algorithmes existants utilisés pour d'autres moyens de transport ou d'autres modes d'opération pour convenir aux besoins de l'industrie maritime.

6.2. Autres applications du modèle

En plus d'aider à créer des horaires à court, moyen et long termes, l'outil de planification développé dans le cadre de ce mémoire peut trouver plusieurs autres applications au sein de l'entreprise. Ces utilisations n'ont pas été testées, mais elles ont été proposées aux gestionnaires de l'entreprise.

6.2.1. Gestion du carburant

Un navire consomme de grandes quantités de carburant. La gestion efficace du carburant permet aux entreprises de transport d'économiser des coûts très importants. Lorsque vient le temps de s'approvisionner en carburant, les planificateurs décident d'aller soit au port de ravitaillement le plus proche, soit de faire un détour pour aller chercher du carburant moins dispendieux un peu plus loin. La décision d'aller chercher du carburant à un port comprend plusieurs variables, notamment le prix du carburant par tonne, les frais fixes de livraisons, la teneur en soufre (limité par la loi), la distance à parcourir, le temps requis pour prendre du carburant et le rayon d'opération du navire.

La décision est aussi influencée par la séquence des contrats dans l'horaire : un navire chargeant 500 tonnes de carburant diminue de 500 tonnes le poids maximal qu'il peut transporter. Les navires transportant des cargos lourds (limités par le tirant d'eau du

navire) doivent donc limiter la quantité de carburant à prendre, mais aller plus souvent aux ports de ravitaillement. Les navires transportant des cargos limités par le volume peuvent prendre de plus grosses quantités de carburant et aller moins souvent aux ports de ravitaillement.

La complexité de toutes ces variables rend très difficile la gestion de l'approvisionnement en carburant. Le département de transport décide donc souvent d'aller au port le plus proche lorsque les réservoirs de carburants atteignent un point de ravitaillement arbitraire. L'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour déterminer le moment, l'endroit et la quantité appropriée de carburant à prendre aux ports pourrait faire diminuer les coûts de ravitaillement à la flotte.

Cette gestion du carburant pourrait être incorporée de deux manières dans les processus de l'entreprise : dans le modèle actuel ou via un module externe. La gestion du carburant pourrait faire partie des contraintes et paramètres du modèle utilisé pour créer l'horaire de transport. En créant l'horaire, l'algorithme tenterait de trouver les points de ravitaillement optimaux afin que le navire ne puisse jamais manquer de carburant. La gestion du carburant pourrait également être effectuée à l'aide d'un module qui prendrait en entrée l'horaire de transport et les caractéristiques du problème, et un algorithme pourrait insérer des points de ravitaillement dans l'horaire pour minimiser les coûts de ravitaillement.

6.2.2. Établissement des prix

Le département du marketing se charge de contacter d'éventuels clients ou de répondre aux requêtes de ces derniers. Ils sont également responsables d'établir une politique de prix pour les contrats à long terme. Le prix est déterminé en fonction d'une certaine cible de revenu que l'entreprise veut atteindre, le TCE (Time-charter equivalent). Cette cible est calculée en multipliant le revenu tiré du cargo (tonnage multiplié par le taux chargé à la tonne) moins les coûts de carburant et les coûts d'opération (canaux, frais de port, etc.).

Puisqu'un voyage comprend un segment de repositionnement à vide, le chargement, le segment chargé et le déchargement, plusieurs hypothèses doivent être prises. Pour estimer le revenu, une moyenne du tonnage transporté doit être calculée. Cette moyenne se base souvent sur toute la flotte, et non sur les navires les plus susceptibles

de transporter le cargo. Ensuite, une hypothèse de la longueur du segment en ballast doit être effectuée. Puisque l'horaire n'est pas connu à l'avance, il est difficile de déterminer la longueur moyenne de ce segment. La personne responsable de l'établissement de prix prend donc un ratio du segment à vide sur le segment chargé. Ce ratio est calculé à l'aide d'une moyenne des segments à vide et chargé des contrats des années précédentes. Si un contrat n'a jamais été effectué auparavant, appliquer ce ratio peut s'avérer délicat.

L'algorithme développé dans le cadre de ce mémoire pourrait être utilisé pour faciliter l'établissement des prix par le département du marketing. Les chargements potentiels peuvent être insérés dans l'horaire et l'algorithme peut calculer les segments à vide et l'interaction de ce chargement avec tous les autres. Ainsi, le prix d'un contrat qui permet d'optimiser les mouvements de la flotte et qui pourrait s'avérer intéressant pour la compagnie pourrait être établi plus justement. La compagnie pourrait donc charger un prix qui reflète réellement ses opérations de transport.

6.3. Améliorations à la méthodologie

Bien que l'heuristique de recherche avec tabous semble bien fonctionner pour la résolution de ce problème, il aurait été intéressant de tester des méthodes alternatives pour trouver des solutions. Certaines autres heuristiques auraient pu être testées et la combinaison d'optimisation et de simulation aurait pu permettre d'obtenir des horaires plus robustes.

Puisque le problème est relativement contraint et qu'il n'est pas trop gros, des méthodes d'optimisation exactes auraient pu être également testées. Les gains obtenus avec l'heuristique de recherche avec tabous auraient donc pu être comparés à la solution optimale pour chaque scénario testé.

Enfin, il aurait été intéressant d'inclure la vitesse comme variable de décision. Des gains potentiellement plus intéressants auraient pu être obtenus en faisant varier la vitesse de chaque navire sur chaque segment de voyage. Cette optimisation de la vitesse aurait pu permettre à l'entreprise d'atteindre des économies de carburant intéressantes tout en respectant les fenêtres de temps des clients.

En somme, l'algorithme développé dans ce mémoire a permis d'atteindre certains gains intéressants. Seule une implantation du système sur un horizon à long terme permettra

de déterminer si ces gains sont appréciables pour la compagnie et si ce genre d'outil peut réellement aider les opérations des entreprises de transport maritime.

Bibliographie

- Al-Khayyal, F., & Hwang, S.-J. (2007). Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk, Part I: Applications and model. *European Journal of Operational Research*, vol. E, 106-130.
- Anbuudayasankar, S., Ganesh, K., & Mohapatra, S. (2014). *Models for Practical Routing Problems in Logistics : Design and Practices*. Springer International Publishing Switzerland.
- Andersson, H., Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2011). The Maritime Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Split Loads. *Information Systems and Operational Research*, vol. 49, 79-91.
- Appelgren, L. H. (1969). A Column Generation Algorithm for a Ship Scheduling Problem. *Transportation Science*, vol. 3, 53-68.
- Appelgren, L. H. (1971). Integer Programming Methods for a Vessel Scheduling Problem. *Transportation Science*, vol. 5, 64-78.
- Bausch, D., Brown, G., & Ronen, D. (1998). Scheduling short-term marine transport of bulk products. *Maritime Policy and Management*, vol. 25, 335-348.
- Bialystocki, N., & Konovessis, D. (2016). On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach. *Ocean Engineering and Science*, vol. 1, 157-166.
- Boffey, T. B., Edmond, E. D., Hinxman, A. I., & Pursglove, C. J. (1979). Two Approaches to Scheduling Container Ships with an Application to the North Atlantic Route. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 30, 413-425.
- Boykin, R., & Levary, R. (1985). An Interactive Decision Support System for Analyzing Ship Voyage Alternatives. *Interfaces*, vol. 15, 81-84.
- Branch, A. E. (2007). *Elements of Shipping*. New-York: Routledge.
- Bronmo, G., Christiansen, M., & Nygreen, B. (2007). Ship Routing and Scheduling with Flexible Cargo Sizes. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 58, 1167-1177.
- Bronmo, G., Christiansen, M., Fagerholt, K., & Nygreen, B. (2007). A multi-start local search heuristic for ship scheduling— a computational study. *Computers and Operations Research*, vol. 34, 900-917.
- Brown, G. G., Graves, G. W., & Ronen, D. (1987). Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil. *Management Science*, vol. 33, 335-346.

- Canadian Shipowners Association. (2000). *CSA Submission to Canada Transportation Act Review Panel*.
- Canen, A. G., & Scott, L. G. (1995). Bridging Theory and Practice in VRP. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 46, 1-8.
- Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2002). Robust Ship Scheduling with Multiple Time Windows. *Wiley Periodicals*, vol. 49, pp. 611-625.
- Christiansen, M., & Nygreen, B. (1998). A method for solving ship routing problems with inventory constraints. *Annals of Operations Research*, vol. 81, 357-378.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004). Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science*, vol. 38, 1-18.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). Maritime Transportation. Dans C. Barnhart, & G. Laporte, *Handbook in Operational Research and Management Science*, Vol. 14 (pp. 189-282). Elsevier.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, vol. 228, 467-483.
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2003). A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research*, vol. 37, 579-594.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A Unified Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 52, 928-936.
- Dantzig, G., & Ramser, J. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, vol. 6, 80-91.
- Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling salesman problem. *Operations Research*, vol. 2, pp. 393-410.
- Dumas, Y., Desrosiers, J., & Soumis, F. (1991). The Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *European Journal of Operational Research*, vol. 54, 7-22.
- Fagerholt, K. (2004). A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling—experience and future research. *Decision Support Systems*, vol. 37, 35-47.
- Fagerholt, K., & Christiansen, M. (2000). A Combined Ship Scheduling and Allocation Problem. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 51, 834-842.
- Fagerholt, K., Christiansen, M., Hvattum, L., Johnsen, T. A., & Vabo, T. (2010). A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation. *Omega*, vol. 38, 465-474.
- Fagerholt, K., Laporte, G., & Norstad, I. (2010). Reducing Fuel Emissions by Optimizing Speed on Shipping Routes. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, 523-529.
- Flood, M. (1956). The Travelling-Salesman Problem. *Operations Research*, vol. 4, pp. 61-75.

- Gatica, R. A., & Miranda, P. A. (2010). Special Issue on Latin-American Research: A Time Based Discretization Approach for Ship Routing and Scheduling with Variable Speed. *Netw Spat Econ*, vol. 11, 465-485.
- Hennig, F., Nygreen, B., Furman, K. C., Song, J., & Kocis, G. R. (2011). Crude Oil Tanker Routing and Scheduling. *Information Systems and Operational Research*, vol. 49, 153-170.
- Hodgson, J. F., & Brooks, M. R. (2012). *Canada's Maritime Cabotage Policy*. Halifax: Dalhousie University.
- Jetlund, A. S., & Karimi, I. A. (2004). Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, 1267-1283.
- Koç, Ç., Bektas, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, vol. 249, 1-21.
- Korsvik, J. E., & Fagerholt, K. (2010). A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities. *Journal of Heuristics*, vol. 16, 117-137.
- Korsvik, J. E., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). A large neighbourhood search heuristic for ship routing and scheduling with split loads. *Computers and Operations Research*, vol. 38, 474-483.
- Korsvik, J., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2010). A tabu search heuristic for ship routing and scheduling. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, 594-603.
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. *Intelligent Information Management*, vol. 4, 66-74.
- Landrieu, A., Mati, Y., & Binder, Z. (2001). A tabu search heuristic for the single vehicle pickup and delivery problem with time windows. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 12, 497-508.
- Laporte, G. (1992). The Travelling Salesman Problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, vol. 59, pp. 231-247.
- Laporte, G. (2009). Fifty Years of Vehicle Routing. *Transportation Science*, vol. 43, 408-416.
- Laporte, G. (2010). A Concise Guide to the Travelling Salesman Problem. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, pp. 35-40.
- Lawrence, S. (1972). *International Sea Transport : The Years Ahead*. Lexington: Lexington Books.
- Lin, D.-Y., & Liu, H.-Y. (2011). Combined ship allocation, routing and freight assignment in tramp shipping. *Transportation Research*, vol. 47, 414-431.
- Malliappi, F., Bennell, J. A., & Potts, C. N. (2011). A Variable Neighborhood Search Heuristic for Tramp Ship Scheduling. Dans J. Böse, H. Hu, C. Jahn, X. Shi, R. Stahlbock, & S. Voss, *Computational Logistics* (pp. 273-285). Berlin: Springer-Verlag.
- Miller, D. M. (1987). An interactive, computer-aided ship scheduling system. *European Journal of Operational Research*, vol. 32, 363-379.

- Nanry, W. P., & Barnes, J. W. (2000). Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. *Transportation Research*, vol. 34, 107-121.
- Norstad, I., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). Tramp ship routing and scheduling with speed optimization. *Transportation Research*, vol. 19, 853-865.
- Park, J. J., & Koo, W. W. (2001). *US/Canada Grain Handling and Transportation Systems*. Fargo: Department of Agribusiness and Applied Economics, North Dakota State University.
- Počuča, M. (2006). Methodology of Day-To-Day Ship Costs Assessment. *Transportation Economics*, vol. 18, pp. 337-345.
- Ronen, D. (1983). Cargo Ships Routing and Scheduling: Surveys of models and problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 12, 119-126.
- Ronen, D. (1986). Short-Term Scheduling of Vessels for Shipping Bulk or Semi-Bulk Commodities Originating in a Single Area. *Operations Research*, vol. 34, 164-173.
- Ronen, D. (1993). Ship Scheduling: The Last Decade. *European Journal of Operational Research*, vol. 71, 325-333.
- Ronen, D. (2002). Marine Inventory Routing: Shipments Planning. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, 108-114.
- SLSDC. (2016). *Écluses, canaux et chenaux*. Consulté le 10 27, 2016, sur Réseau des grands lacs, voie maritime du Saint-Laurent: <http://www.greatlakes-seaway.com/fr/voie-maritime/ecluses/index.html>
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window. *Operations Research*, vol. 35, 254-265.
- Sombuntham, P., & Kachitvichayanukul, V. (2010). A Particle Swarm Optimization Algorithm for Multi-depot Vehicle Routing problem with Pickup and Delivery Requests. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010 Vol III*.
- Stat Can. (2016). *Gross domestic product at basic prices, by industry*. Consulté le 06 14, 2016, sur Statistics Canada: www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l01/cst01/econ41-eng.htm
- Stat Can. (2016). *Gross domestic product at basic prices, primary industries*. Consulté le 06 12, 2016, sur Statistics Canada: www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l01/cst01/prim03-eng.htm
- Stopford, M. (2009). *Maritime Economics, 3rd edition*. London: Routledge.
- Taillard, É. (1993). Parallel Iterative Search Methods for Vehicle Routing Problems. *Networks*, vol. 23, pp. 661-673.
- The Economist. (2015). *Why the Baltic Dry Index is at an all-time low*. Consulté le 01 30, 2017, sur The Economist: <http://www.economist.com/blogs/economist-explains/2015/03/economist-explains-7>
- Transport Canada. (2014). *Transportation in Canada - Overview Report*. Ottawa: Government of Canada.

- Vaughn, M. (2016). *The Jones Act*. Consulté le 06 12, 2016, sur Maritime Law Center: www.maritimelawcenter.com/html/the_jones_act.html
- Wen, M., Ropke, S., Petersen, H. L., Larsen, R., & Madsen, O. G. (2016). Full-shipload tramp ship routing and scheduling with variable speeds. *Computers and Operations Research*, vol. 70, 1-8.
- Wu, H.-J., & Dunn, S. C. (1994). Environmentally responsible logistics systems. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 25, pp. 20-38.

