

NOUVELLES APPROCHES POUR L'APPROVISIONNEMENT DES STATIONS D'ESSENCE¹

Vincent Malépart*, Fayez Boctor*, Jacques Renaud* et Stéphane Labillois**

Résumé. - La distribution des produits pétroliers est une activité logistique qui a un impact économique majeur. Au Québec, près de 5 000 stations-service composent le réseau de distribution de l'essence et du carburant diesel. Cet article étudie la logistique de l'approvisionnement des stations-service avec, à l'appui, des données réelles de l'industrie de la distribution de produits pétroliers. Quatre approches heuristiques sont élaborées et les résultats démontrent un accroissement de la qualité des opérations d'approvisionnement.

Mots-clés : logistique, réseaux de distribution, gestion de stock, approvisionnement.

1. Introduction

L'industrie des produits pétroliers est un élément stratégique de l'infrastructure industrielle au Canada. L'extraction du pétrole brut représente la partie en amont de cette industrie. À l'opposé, la partie en aval de l'industrie est composée des secteurs du raffinage et de la vente au détail où il se vend annuellement au Québec plus de sept millions de litres d'essence et de carburant diesel. Un troisième secteur complète cette industrie en acheminant les produits pétroliers raffinés vers les points de vente : il s'agit de l'industrie du transport. Les modes de transport varient selon les régions. Au Québec, il existe trois façons de distribuer les produits pétroliers raffinés : la voie maritime, la voie ferroviaire et le réseau routier. C'est par ce dernier mode de transport que les quelque 5 000 stations-service du Québec sont

¹ Cette recherche a été partiellement financée par les subventions OPG 0172633 et OPG 0036509 du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada.

* Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR), Université Laval, Québec, Canada, G1K 7P4.

** Directeur administratif, Transport Jacques Auger inc., Québec, Canada .

approvisionnées à partir de dépôts intermédiaires ou directement à partir des raffineries. C'est là le sujet de la présente étude.

Cet article traite précisément du *problème d'approvisionnement des stations d'essence*. Dans un premier temps, une description des diverses caractéristiques et des diverses contraintes du problème est effectuée. Ensuite, un bref survol de l'industrie du transport des produits pétroliers au Québec est réalisé afin d'en démontrer l'importance. Une revue de la littérature est par la suite présentée. Les sections subséquentes abordent les approches de résolution développées dans le cadre de cette recherche ainsi que leur évaluation.

Les résultats de cette recherche se matérialisent dans un prototype de logiciel de planification de l'approvisionnement des stations d'essence appelé *RépartiPro*. En comparaison avec des données réelles, les approches développées permettent de réduire le temps de génération des plans d'approvisionnement de plusieurs heures et d'améliorer plusieurs indicateurs de performance.

2. Description du problème

Le *problème d'approvisionnement des stations d'essence* consiste à déterminer comment distribuer de façon optimale plusieurs *produits* (principalement essences et carburant diesel) vers des *clients* (stations d'essence) à partir d'un *dépôt* (raffinerie ou dépôt régional) selon un horizon de planification choisi. Il faut donc déterminer, pour chaque période de l'horizon de planification, les stations à visiter, les tournées et les camions à utiliser, la quantité à livrer de chaque produit et leur affectation aux camions, et ce, en s'assurant qu'aucune station cliente ne soit en rupture de stock. Les différentes sortes de produit sont stockées dans des réservoirs chez les clients et sont vendues à des taux journaliers moyens. Un parc hétérogène de véhicules est disponible. Chaque camion possède plusieurs compartiments de capacités différentes, chaque compartiment ne transporte qu'un seul produit et le contenu d'un compartiment est destiné à une seule station. L'objectif de ce problème est de tenir compte de tous ces aspects de façon à minimiser le coût total de distribution, ou de maximiser la quantité à livrer, ou d'optimiser tout autre objectif économique sur un horizon de planification donné.

3. L'industrie du transport des produits pétroliers au Québec

En 1995, plus de sept milliards de litres de carburant (essence sans plomb et diesel) ont été vendus dans le réseau de stations-service du Québec. De cette quantité, 6,1 milliards étaient de l'essence sans plomb et 1,1 milliard du carburant diesel. Le tableau 1 fait ressortir l'importance de cette activité économique par région administrative au Québec (Malépart *et al.*, 1998).

Il existe deux types de station-service : les *stations indépendantes* (type I) qui passent elles-mêmes leurs commandes à un transporteur, et les stations dites en *réseau d'approvisionnement*

automatique (type II) qui voient leur stock géré par le transporteur. En général, chaque station est équipée de trois ou quatre réservoirs souterrains. Il existe certains standards de volume de réservoirs tels que 22 700, 25 000, 31 800, 35 000, 45 400 et 50 000 litres. La gestion des stocks des stations-service dépend du nombre et de la capacité des réservoirs.

Régions administratives	Ventes moyennes par stations-service/an [litres]	Ventes moyennes par stations-service/jour [litres]
01 - Bas Saint-Laurent	931 400	2 552
02 - Saguenay / Lac-Saint-Jean	1 468 900	4 024
03 - Québec	1 602 700	4 391
04 - Mauricie / Bois-Francs	1 432 100	3 924
05 - Estrie	1 260 700	3 454
06 - Montréal	2 151 000	5 893
07 - Outaouais	1 697 800	4 652
08 - Abitibi-Témiscamingue	1 279 000	3 504
09 - Côte-Nord	1 144 300	3 135
10 - Nord-du-Québec	1 121 900	3 074
11 - Gaspésie / Îles-de-la-Madeleine	705 400	1 933
12 - Chaudière-Appalaches	976 300	2 675
13 - Laval	2 196 900	6 019
14 - Lanaudière	1 599 900	4 383
15 - Laurentides	1 586 600	4 347
16 - Montérégie	1 699 400	4 656
MOYENNES	1 504 300	4 121

Source : Ministère des Ressources naturelles du Québec

Tableau 1 : Ventes de carburant par stations-service et régions administratives (1995).

Le véhicule transportant les produits pétroliers est un camion-citerne composé d'un tracteur équipé d'une sellette d'attelage et d'une ou deux remorques (citernes) compartimentées. Les citernes des véhicules sont composées de quatre à six compartiments de volumes différents. La quantité maximale qu'un compartiment peut contenir dépend de la densité volumique du produit transporté et de la température. Les chauffeurs des véhicules travaillent généralement du lundi au samedi en deux quarts de travail (jour et nuit) quotidiens de douze heures chacun.

Depuis quelques années, les compagnies pétrolières attribuent par contrats à des transporteurs privés la distribution des produits pétroliers à leurs stations-service d'un territoire déterminé. À notre connaissance, chez les transporteurs, la planification de l'approvisionnement se fait manuellement. En effet, cette activité est principalement basée sur l'expérience du répartiteur qui doit avoir une bonne connaissance de la géographie du territoire à desservir. Au moment de cette planification, en plus des contraintes déjà présentées, il faut respecter les aspects suivants : (1) pour des raisons de sécurité et d'équilibre du camion, le contenu du premier ou du deuxième compartiment (du côté du tracteur) doit être livré à la dernière station

visitée au cours d'un voyage ; (2) au cours d'un voyage desservant plusieurs stations, les stations les plus proches doivent être visitées en premier afin de diminuer le poids du camion pendant le transport ; (3) les camions à quatre essieux doivent avoir un poids inférieur ou égal à 55 500 kg incluant le poids du camion et de la marchandise. Le poids des trains routiers ne doit pas dépasser 62 500 kg (Transport Québec, 1998) ; (4) durant la période de dégel, au printemps, la capacité de chargement des véhicules doit être réduite de 15 à 20 % (Transport Québec, 1998) ; (5) le temps de travail par jour qu'un chauffeur peut effectuer est limité à treize heures de conduite ou quinze heures de travail incluant la période d'arrêt (Société de l'assurance automobile du Québec, 1998). Suivant une étude du ministère des Transports (Ministère des Transports, 1994) et selon des données de l'industrie, le coût d'utilisation des véhicules pour le transport des produits pétroliers est d'environ 1 \$/km. Ce coût inclut le salaire du chauffeur, l'entretien du véhicule, le carburant, l'amortissement de l'équipement, les frais d'immatriculation, les taxes et les assurances. D'un autre côté, le montant que reçoit le transporteur est un prix par litre livré. Ce prix est fixé par contrat et peut varier d'une station à l'autre. Il se situe entre quelques dixièmes de cent le litre et un peu plus d'un cent le litre selon l'éloignement de la station à ravitailler. Une bonne planification des tournées peut donc permettre d'améliorer grandement la rentabilité d'un transporteur.

4. Revue de la littérature

La littérature scientifique couvre plusieurs problèmes de distribution de marchandises qui peuvent être classés selon diverses caractéristiques telles que le nombre de produits livrés (un ou plusieurs), l'horizon de planification (une ou plusieurs périodes), le nombre de compartiments des véhicules (un ou plusieurs compartiments) ainsi que le nombre de visites par voyage (un ou plusieurs clients). Les principaux problèmes de transport liés à l'approvisionnement des stations d'essence ainsi que les caractéristiques qui les distinguent sont présentés ci-dessous.

Le *problème des tournées et de l'inventaire* (Dror, 1983) consiste à distribuer un produit unique à partir d'un dépôt central vers plusieurs clients selon un horizon de planification de plusieurs périodes. Chaque client consomme le produit suivant un taux donné plus ou moins constant et a la capacité d'entreposer localement le produit dans un seul réservoir. La distribution se fait au moyen d'un parc de véhicules identiques à citernes non compartimentées. Le problème consiste à déterminer, pour chaque période de l'horizon de planification, les clients à visiter, la quantité à livrer et le trajet à suivre pour chaque camion de façon à minimiser les coûts de distribution (Anily & Federgruen, 1993 ; Campbell *et al.*, 1997 ; Chien *et al.*, 1989 ; Dror & Ball, 1987 ; Dror & Levy, 1986 ; Dror *et al.*, 1985 ; Federgruen & Zipkin, 1984 ; Golden *et al.*, 1984 ; Trudeau & Dror, 1992 ; Webb & Larson, 1995).

La littérature traitant du *problème de la distribution des produits pétroliers* est relativement limitée. Le tableau 2 résume les caractéristiques des principales contributions dans ce domaine. Une politique de distribution décentralisée implique que les stations d'essence passent elles-mêmes leurs commandes. D'un autre côté, une politique centralisée implique que les quantités à livrer sont déterminées par le fournisseur ou le transporteur. Une analyse rapide de cette littérature démontre que le *problème d'approvisionnement des stations d'essence* tel qu'il est défini dans cet article n'a jamais été abordé auparavant.

	Nombre de produits	Nombre de périodes	Nombre de compartiments	Nombre de clients par voyage	Politique de distribution
Brown & Graves, 1981	Plusieurs	Une	Plusieurs	Un	Décentralisée
Bell <i>et al.</i> , 1983	Un	Plusieurs	Un	Plusieurs	Centralisée
Brown <i>et al.</i> , 1987	Plusieurs	Une	Plusieurs	Plusieurs	Décentralisée
Russell & Challinor, 1988	Un	Une	Un	Un	Décentralisée
Franz & Woodmansee, 1990	Plusieurs	Une	Plusieurs	Un	Décentralisée
Fölsz <i>et al.</i> , 1995	Un	Une	Un	Plusieurs	Centralisée

Tableau 2 :Caractéristiques des publications portant sur la distribution des produits pétroliers.

5. Les heuristiques proposées

Deux heuristiques appelées H1 et H2 sont présentées. Deux étapes les différencient. Deux versions itératives de ces heuristiques, appelées H1+ et H2+, sont ensuite décrites. La notation nécessaire est donnée ci-dessous.

Notation

α	Taux de remplissage minimum des compartiments. Indique la fraction de la capacité d'un compartiment qui doit obligatoirement être remplie au moment des livraisons des commandes ($0\% \leq \alpha \leq 100\%$).
β	Taux de satisfaction minimum des commandes ou la fraction de la quantité de chaque produit d'une commande qui doit obligatoirement être livrée ($0\% \leq \beta \leq 100\%$).
N	Nombre de stations.
i	Indice des stations, $i = 1, \dots, N$.
M	Nombre de commandes à livrer.
m	Indice des commandes, $m = 1, \dots, M$.
j	Indice des produits.
K	Nombre de camions du parc de véhicules.
c	Indice des camions, $c = 1, \dots, K$.
v	Indice des voyages.
r	Indice des réservoirs.

S_{ir}	Inventaire du produit dans le réservoir r de la station i .
s_{ir}	Seuil d'inventaire critique du réservoir r en dessous duquel la station i doit être approvisionnée.
V_{ir}	Capacité du réservoir r de la station i .
Q_{ir}	Quantité à livrer à la station i dans le réservoir r .
q_{mj}	Quantité commandée du produit j de la commande m .
t_i	Temps d'un aller-retour pour une livraison à la station i .
T	Temps d'un quart de travail.
t_{iv}	Temps additionnel pour ajouter la station i dans le voyage v .
h_c	Temps d'utilisation du camion-citerne c durant le quart de travail. Ce temps est la somme des temps des voyages (somme du temps d'un aller-retour de la station la plus éloignée du voyage v et des temps t_{iv} des autres stations pour ce voyage) à effectuer par le camion c durant ce quart de travail.
E_i	Ensemble des stations dites sur le chemin de la station i , c'est-à-dire celles qui peuvent être visitées sans effectuer un grand détour en allant à la station i . Cet ensemble est déterminé par le planificateur.

Heuristique H1

Les principales étapes de cette heuristique consistent à :

1. *Établir la liste des véhicules* : l'objectif de cette étape est de générer une liste de véhicules. Habituellement, cette liste est classée selon l'ordre d'ancienneté des chauffeurs des camions (séquence de camions).
2. *Établir la liste des commandes à livrer* : la liste des commandes est composée, d'une part, des commandes passées par les stations de type I et, d'autre part, par les commandes que le transporteur planifie pour les stations de type II. Les commandes des stations de type II sont établies en utilisant la procédure *PI* ci-dessous. La liste des commandes est ensuite triée en ordre décroissant d'éloignement des stations.

<i>PI</i> :	<p><i>Identifier les stations de type II urgentes et déterminer les quantités à livrer à ces stations</i></p> <p>Pour les stations dont l'inventaire est géré par le transporteur, si, pour au moins un réservoir r, $S_{ir} < s_{ir}$, alors la station sera dite urgente et il faut livrer une quantité à cette station pour chaque réservoir r dont l'inventaire est en-dessous du seuil critique. Pour des raisons pratiques, les quantités à livrer sont des multiples de 500 litres. La quantité Q_{ir} est telle que $Q_{ir} = 500 \lfloor (V_{ir} - S_{ir}) / 500 \rfloor$.</p>
-------------	---

3. *Ajouter un voyage et choisir le véhicule qui effectue le voyage* : si toutes les commandes ont été affectées (ou si l'on a tenté de le faire), alors c'est la fin de l'heuristique. Par contre, s'il reste

au moins une commande m d'une station i telle que le temps de voyage t_i est inférieur ou égal au temps restant du camion c considéré à ce stade (c'est-à-dire $t_i \leq T - h_c$), alors un voyage supplémentaire est ajouté au camion c . Dans le cas contraire, un voyage sera ajouté au camion suivant. Soit v le numéro attribué à ce voyage.

4. *Affecter une commande initiale au voyage v* : l'objectif de cette étape est de choisir la commande dite initiale du voyage v (celle qui sera livrée la dernière au cours de ce voyage) et de choisir les compartiments du camion qui seront utilisés pour livrer les différents produits ainsi que les quantités à livrer pour cette commande. Pour réaliser cet objectif, suivre les étapes suivantes :

- Parcourir la liste des commandes et choisir la première commande non affectée à un camion.
- Construire la liste des affectations potentielles des produits de la commande choisie, notée m_0 , en utilisant la procédure P2 décrite ci-dessous.
- Parmi les affectations potentielles trouvées, ne retenir que celles qui respectent la contrainte de l'ordre de déchargement (présence d'au moins un produit dans l'un ou l'autre des deux premiers compartiments). Rappelons que cette commande sera livrée la dernière. S'il y a au moins une affectation potentielle retenue, alors effectuer l'étape (iv) ; sinon, retour à l'étape (i).
- Rechercher l'affectation potentielle qui maximise la somme des quantités qui seront réellement livrées.
- Attribuer cette commande m_0 au voyage v du camion c en utilisant l'affectation trouvée à l'étape (iv).

P2 :	<p><i>Établir une liste d'affectations potentielles des produits d'une commande aux compartiments d'un camion-citerne</i></p> <p>Générer une affectation potentielle consiste à déterminer dans quels compartiments d'un camion-citerne chaque produit d'une commande doit être affecté. Pour établir la liste des affectations potentielles des produits d'une commande m en utilisant le camion-citerne c, suivre les étapes suivantes :</p> <p>Pour chaque produit j de la commande m (dont la quantité commandée est q_{mj}), énumérer toutes les combinaisons de compartiments du camion c susceptibles de contenir une quantité supérieure ou égale à βq_{mj} et telle que la quantité q_{mj} représente au moins un pourcentage α de la capacité totale de la combinaison de compartiments.</p> <p>À partir de l'ensemble de combinaisons de compartiments possibles pour chaque produit j de la commande m, construire la liste de toutes les affectations potentielles de l'ensemble des produits de la commande m au camion-citerne c.</p>
------	---

5. *Affecter des commandes additionnelles au voyage v* : l'objectif de cette étape est d'essayer d'ajouter une ou plusieurs commandes au voyage v du camion c . Les produits de chaque commande sont affectés à une combinaison de compartiments encore vides du camion-citerne de façon à minimiser la quantité non livrée. Pour atteindre cet objectif, suivre les étapes suivantes :

Parcourir la liste des commandes et choisir la première commande non affectée dont la station correspondante est sur le même chemin que la station de la commande initiale.

Construire la liste des affectations potentielles de la commande choisie, notée m , en utilisant la procédure $P2$. S'il y a au moins une affectation potentielle trouvée, alors effectuer l'étape (iii) ; sinon, aller à l'étape (v).

Rechercher l'affectation potentielle qui maximise la somme des quantités qui seront réellement livrées.

Attribuer cette affectation de la commande m au voyage v du camion c .

Répéter les étapes (i) à (iv) tant qu'il reste au moins une commande dont la station i correspondante est sur le chemin de la station j de la commande initiale m_0 (c'est-à-dire $i \in E_j$), que $t_{iv} \leq T - h_c$ et qu'il y a au moins un compartiment vide dans le camion c . S'il n'y a aucun compartiment vide, retourner à l'étape 3.

6. *Ajouter des quantités supplémentaires aux stations de type II présentes dans le voyage v* : si un ou plusieurs compartiments du camion ne sont pas encore utilisés pour le voyage v , cette phase permet l'ajout d'une quantité de produit à livrer à une ou plusieurs stations de type II présentes dans ce voyage. Si aucune station de type II n'est visitée au cours du voyage v , alors passer à l'étape 7. Pour atteindre cet objectif, suivre les étapes suivantes :

En considérant toutes les stations de type II présentes dans le voyage v , utiliser la procédure $P3$ pour déterminer la quantité additionnelle à livrer au cours du voyage v .

Construire la liste des affectations potentielles de la quantité Q_{ir} en utilisant la procédure $P2$ et en fixant le taux de satisfaction minimum des commandes à zéro. S'il y a au moins une affectation potentielle trouvée, alors effectuer l'étape (iii) ; sinon, aller à l'étape (v).

Rechercher l'affectation potentielle qui maximise la quantité qui sera réellement livrée.

Attribuer cette affectation de la quantité Q_{ir} au voyage v du camion c .

Répéter les étapes (i) à (iv) tant qu'il y a des quantités à livrer et qu'il y a au moins un compartiment vide dans la citerne c .

Dans le cas contraire, retourner à l'étape 3.

<i>P3 :</i>	<i>Déterminer une quantité supplémentaire à affecter à une citerne</i> Parmi l'ensemble des stations de type II considéré, choisir le réservoir r non considéré jusqu'à présent de la station i ayant l'inventaire qui couvre le plus faible nombre de jours de consommation. La quantité à livrer à la station i dans le réservoir r est $Q_{ir} = 500 \lfloor (V_{ir} - s_{ir}) / 500 \rfloor$.
-------------	---

7. *Ajouter une station de type II au voyage v* : si un ou plusieurs compartiments du camion ne sont pas encore utilisés pour le voyage v , cette étape permet d'ajouter une ou plusieurs stations de type II à ce voyage. Une station ajoutée i doit se trouver sur le chemin de la station j de la commande initiale du voyage (c'est-à-dire $i \in E_j$). Pour atteindre cet objectif, suivre les étapes suivantes :

En considérant toutes les stations de type II sur le chemin de la station de la commande initiale du voyage v , calculer la quantité à livrer à l'aide de la procédure *P3*.

Construire la liste des affectations potentielles de la quantité Q_{ir} en utilisant la procédure *P2* et en fixant le taux de satisfaction minimum des commandes à zéro. S'il y a au moins une affectation potentielle trouvée, alors effectuer l'étape (iii) ; sinon, aller à l'étape (v).

Rechercher l'affectation qui maximise la quantité qui sera réellement livrée.

Attribuer cette affectation de la quantité Q_{ir} au voyage v du camion c .

Répéter les étapes (i) à (iv) tant qu'il y a des quantités à livrer dont la station i correspondante est telle que $t_{iv} \leq T - h_c$ et qu'il y a au moins un compartiment vide dans le camion c . Sinon, retourner à l'étape 3.

Heuristique H2

L'heuristique H2 remplace les étapes 4 et 5 de l'heuristique H1 par les étapes suivantes :

4. *Affecter une commande initiale au voyage v*

Cette étape est identique à l'étape 4 de l'heuristique H1 (étapes (i) à (iii)), excepté qu'à la fin de cette étape, l'affectation des produits de la commande m_0 aux compartiments du camion c n'est pas encore définitive. Par contre, toutes les affectations potentielles respectant la contrainte de l'ordre de déchargement sont retenues et l'affectation décisive sera faite à la fin de l'étape 5.

5. *Affecter des commandes additionnelles au voyage v*

L'objectif de cette étape est d'essayer d'ajouter une ou plusieurs commandes au voyage v du camion c . Pour atteindre cet objectif, suivre les étapes suivantes :

Parcourir la liste des commandes et choisir la première commande m non affectée dont la station correspondante est sur le même chemin que la station de la commande initiale m_0 .

Construire la liste des affectations potentielles de la commande choisie avec les commandes précédemment retenues en utilisant la procédure *P2*. S'il y a au moins une affectation potentielle trouvée, alors effectuer l'étape (iii) ; sinon, aller à l'étape (iv).

Ajouter la commande m à la liste des commandes retenues pour ce voyage. À ce stade, aucune affectation n'est définitivement choisie. Par contre, toutes les affectations potentielles des commandes retenues sont conservées.

Répéter les étapes (i) à (iii) tant qu'il reste au moins une commande dont la station i correspondante est sur le chemin de la station j de la commande initiale m_0 (c'est-à-dire $i \in E_j$), que $t_{iv} \leq T - h_c$ et qu'il y a au moins une affectation potentielle ayant au moins un compartiment vide dans le camion c .

Rechercher l'affectation potentielle des commandes retenues qui maximise la somme des quantités qui seront réellement livrées.

Attribuer cette affectation au voyage v du camion c . S'il n'y a aucun compartiment vide, retourner à l'étape 3.

Heuristiques H1+ et H2+

Les heuristiques H1+ et H2+ consistent à répéter les étapes des heuristiques H1 et H2 respectivement plusieurs fois. À chaque répétition, le classement de la liste des camions (étape 1) est modifié en permutant une paire de camions dans la liste initiale. La séquence (classement) des camions qui permet de maximiser le ratio entre la somme des quantités livrées et la somme des distances parcourues est ensuite utilisée comme séquence initiale. Cette procédure de permutation de paires de camions est ensuite répétée. La procédure s'arrête si aucune permutation ne permet d'améliorer ce ratio.

6. Évaluation des heuristiques proposées

L'évaluation des approches proposées est réalisée à l'aide d'un logiciel programmé en *Borland Delphi* et appelé *RépartiPro*. Ce logiciel permet de faire un plan d'approvisionnement complet pour un quart de travail précis.

Données utilisées

Pour évaluer les heuristiques proposées, des données réelles ont été utilisées. Ces données sont celles de deux quarts de travail de la succursale de Lévis de *Transport Jacques Auger inc.*, qui dessert l'est du Québec et le nord-ouest du Nouveau-Brunswick en s'approvisionnant à la raffinerie *Ultramar* de Saint-Romuald. Toutes les stations-service *Esso* de la *Compagnie Pétrolière Impériale ltée* approvisionnées par *Transport Jacques Auger inc.* ont été considérées. Le tableau 3 et

la figure 1 résume la répartition de ces 208 stations-service *Esso* sur les territoires du Québec et du Nouveau-Brunswick.

Régions	Nombre de stations-service
Chibougamau (QC)	1
Saguenay / Lac-Saint-Jean (QC)	51
Parc des Laurentides (QC)	1
Côte-Nord (QC)	7
Québec et banlieue (QC)	56
Portneuf (QC)	28
Rive-Sud (QC)	56
Nouveau-Brunswick	8
	208

Tableau 3 : Nombre de stations-service Esso par région.

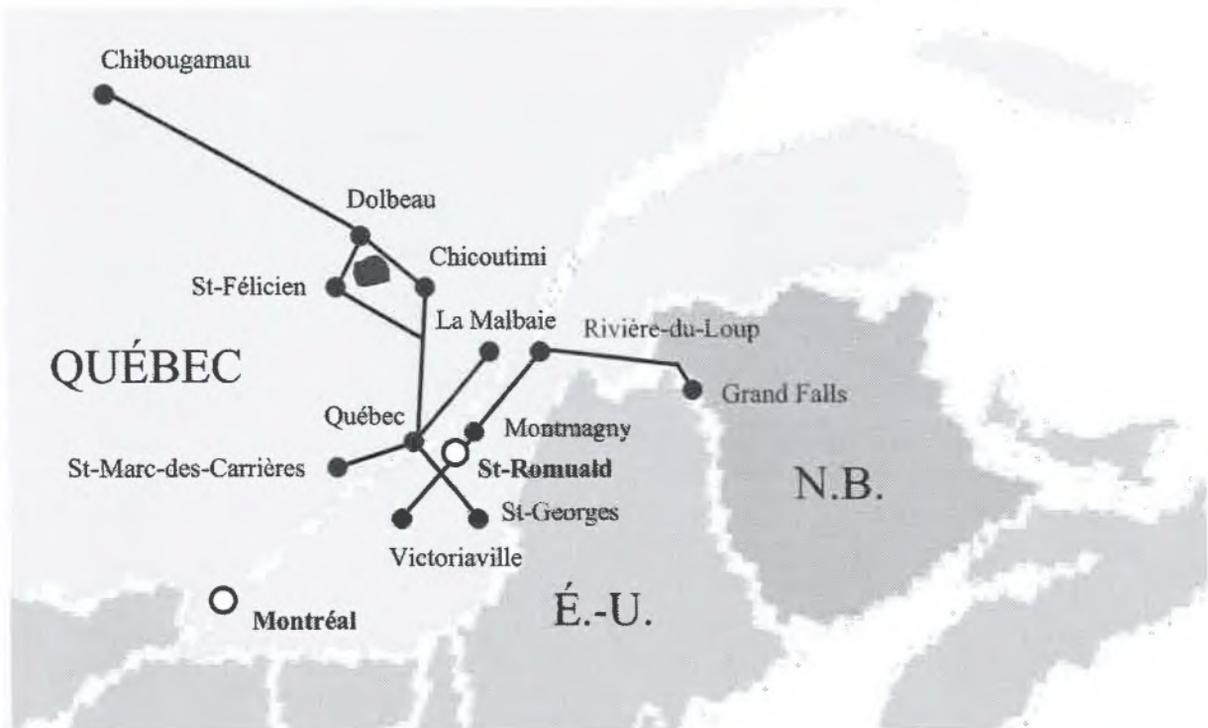


Figure 1 : Carte du réseau de distribution des stations-service Esso.

Les listes de commandes (stations de type I) de deux quarts de travail contiennent respectivement 13 commandes totalisant 474 000 litres (quart de travail de nuit) et 16 commandes pour un total de 458 000 litres de carburant (quart de travail de jour). À cela

s'ajoutent les commandes des stations de type II établies à partir de leur niveau d'inventaire réel.

Les huit véhicules disponibles pour les livraisons se divisent en cinq modèles différents et sont composés ou bien d'un tracteur qui tire une remorque unique de cinq à six compartiments ou d'un tracteur qui tire deux citernes de deux à trois compartiments chacune (train routier). La capacité nominale de ces véhicules varie entre 45 000 et 60 000 litres et la capacité nominale des compartiments varie entre 4 000 et 16 000 litres. La capacité réelle d'un compartiment dépend du type de carburant transporté.

Le temps de travail d'un quart de travail est de douze heures et aucune heure supplémentaire n'est considérée. De façon générale, le temps d'un voyage correspond au temps pour aller à la station la plus éloignée du voyage, auquel il faut ajouter 45 minutes par station supplémentaire à visiter au cours du même voyage. Les temps de chargement et de déchargement des produits pétroliers sont inclus dans ces temps.

Paramètres utilisés

Les approches développées utilisent deux paramètres, α et β , dont les valeurs respectives peuvent influencer les résultats. Afin de déterminer la meilleure valeur de ces deux paramètres, plusieurs simulations ont été réalisées où α et β prennent successivement les valeurs de 50 %, 60 %, 70 %, 75 %, 80 % et 90 %. Ainsi, 36 plans d'approvisionnement par quart de travail ont été élaborés et étudiés. La valeur retenue pour le paramètre α , tout comme pour le paramètre β , est de 75 %.

Critères d'évaluation

Les critères d'évaluation utilisés afin d'évaluer la performance des plans d'approvisionnement sont définis dans le tableau 4.

Critères d'évaluation	Définitions
Nombre de commandes livrées	Nombre de commandes incluses dans le plan d'approvisionnement.
Quantité livrée des commandes	Quantité totale incluse dans le plan d'approvisionnement provenant des commandes passées par les stations de type I et des commandes urgentes établies pour les stations de type II.
Quantité additionnelle livrée	Quantité livrée aux stations de type II (voir les étapes 6 et 7).
Quantité totale livrée	Somme des quantités livrées des commandes et des quantités additionnelles livrées.
Taux de satisfaction des commandes	Fraction de la quantité commandée (commandes des stations de type I et commandes urgentes établies pour les stations de type II) qui est réellement livrée.
Nombre total de camions utilisés	Nombre de camions-citernes utilisés parmi les véhicules du parc pour effectuer toutes les livraisons d'un quart de travail.

Nombre total de voyages	Nombre de voyages réalisés pour effectuer toutes les livraisons d'un quart de travail.
Nombre total de stations visitées	Nombre de stations visitées durant un quart de travail.
Taux d'utilisation des citernes	Ratio du nombre de compartiments non vides de tous les camions-citernes utilisés sur le nombre total de compartiments de tous les camions-citernes utilisés.
Temps total d'utilisation	Somme des durées des voyages d'un quart de travail.
Distance totale parcourue	Somme des distances des voyages d'un quart de travail.
Quantité livrée par unité de distance	Quantité totale livrée/Distance totale parcourue.
Quantité livrée par unité de temps	Quantité totale livrée/Temps total d'utilisation.
Nombre d'heures non hiérarchiques	Nombre d'heures ne respectant pas l'ancienneté des chauffeurs, où il est garanti que le nombre d'heures de travail de chaque chauffeur sera supérieur aux heures de ceux qui ont moins d'ancienneté.

Tableau 4 : Définition des critères d'évaluation.

Analyse des résultats

Les résultats des quatre méthodes de résolution sont présentés aux tableaux 5 et 6 pour les données des deux quarts de travail consécutifs. De plus, les solutions élaborées par le transporteur pour ces quarts figurent à titre de comparaison (notées Tr.). Ces calculs ont été effectués au moyen d'un micro-ordinateur doté d'un processeur Pentium II 266 MHz.

Critères d'évaluation	Tr. *	Méthodes heuristiques			
		H1	H2	H1+	H2+
Commandes					
Nombre de commandes (stations du type I)	13	13	13	13	13
Nombre de commandes (stations du type II)	1	4	4	4	4
Nombre total de commandes	14	17	17	17	17
Nombre de commandes livrées	14	17	17	17	17
Quantité commandée (commandes) [l]	498 000	536 500	536 500	536 500	536 500
Quantité livrée des commandes [l]	480 800	523 500	504 500	519 000	498 500
Quantité additionnelle livrée [l]	122 000	79 500	125 000	98 500	144 500
Quantité totale livrée [l]	602 800	603 500	629 500	617 500	643 000
Taux de satisfaction des commandes [%]	96,5	97,6	94,0	96,7	92,9
Camions-citernes					
Nombre total de camions utilisés	8	8	8	8	8
Nombre total de voyages	12	15	15	15	15
Nombre total de stations visitées	19	20	20	20	21

Nombre moyen de voyages par camion	1,50	1,88	1,88	1,88	1,88
Nombre moyen de stations visitées par voyage	1,58	1,33	1,33	1,33	1,40
Taux d'utilisation des citernes [%]	100,0	87,2	91,0	88,6	91,1
Distance totale parcourue [km]	4 164	4 508	4 500	4 508	4 500
Temps total d'utilisation	79h00	86h30	86h15	86h30	87h00
Quantité livrée par unité de distance [l/km]	145,0	133,9	139,9	137,0	142,9
Quantité livrée par unité de temps [l/h]	7 630	6 977	7 299	7 139	7 391
Chauffeurs					
Nombre de chauffeurs requis	8	8	8	8	8
Nombre moyen d'heures de travail	9h53	10h48	10h46	10h48	10h52
Nombre d'heures non hiérarchiques	6h45	3h15	3h00	6h15	6h30
Statistique					
Temps de calcul [s]	~ 10 800	0,06	0,11	3,38	10,74

* Résultats selon le plan d'approvisionnement de *Transport Jacques Auger inc.*

Tableau 5 : Résultats des plans d'approvisionnement pour le quart de travail de nuit

L'analyse des résultats révèle de meilleurs plans d'approvisionnement avec l'heuristique H2 qu'avec l'heuristique H1, et ce, pour les deux quarts de travail. En effet, les ratios les plus importants tels que « Quantité livrée par unité de distance » ainsi que « Quantité livrée par unité de temps » sont, dans les deux cas, supérieurs pour l'heuristique H2. Par surcroît, les valeurs de ces deux ratios sont encore plus élevées avec l'utilisation de l'heuristique H2+. Pour le quart de nuit, la quantité totale livrée atteint des sommets avec les méthodes de résolution H2 et H2+. Quant au quart de jour, il présente des quantités totales livrées inférieures pour les méthodes H2 et H2+. Cependant, la distance totale parcourue avec ces deux heuristiques est inférieure de 23 % et le temps total d'utilisation est inférieur d'environ 18 % par rapport à la solution des heuristiques H1 et H1+. Par le fait même, les heuristiques H2 et H2+ utilisent six camions comparativement à sept pour les deux autres heuristiques et nécessitent deux voyages de moins, soit douze au lieu de quatorze.

Critères d'évaluation	Tr. *	Méthodes heuristiques			
		H1	H2	H1+	H2+
Commandes					
Nombre de commandes (stations du type I)	16	16	16	16	16
Nombre de commandes (stations du type II)	0	0	0	0	0
Nombre total de commandes	16	16	16	16	16
Nombre de commandes livrées	16	16	16	16	16
Quantité commandée (commandes) [l]	458 000	458 000	458 000	458 000	458 000
Quantité livrée des commandes [l]	447 500	453 000	440 500	456 000	431 000
Quantité additionnelle livrée [l]	149 000	100 500	72 500	140 000	101 500
Quantité totale livrée [l]	596 500	553 500	513 000	596 000	532 500
Taux de satisfaction des commandes [%]	97,7	98,9	96,2	99,6	94,1
Camions-citernes					
Nombre total de camions utilisés	8	7	6	7	6

Nombre total de voyages	13	14	12	14	12
Nombre total de stations visitées	23	21	20	22	21
Nombre moyen de voyages par camion	1,63	1,50	1,67	1,57	1,75
Nombre moyen de stations visitées par voyage	1,77	1,14	1,33	1,14	1,33
Taux d'utilisation des citernes [%]	87,1	79,7	89,1	82,7	87,7
Distance totale parcourue [km]	3 692	3 726	2 856	3 726	2 856
Temps total d'utilisation	77h45	78h30	64h30	80h00	65h15
Quantité livrée par unité de distance [l/km]	161,6	148,6	179,6	160,0	186,4
Quantité livrée par unité de temps [l/h]	7672	7051	7953	7450	8161
Chauffeurs					
Nombre de chauffeurs requis	8	7	6	7	6
Nombre moyen d'heures de travail	9h43	11h12	10h45	11h25	10h52
Nombre d'heures non hiérarchiques	8h30	1h45	1h00	2h45	4h00
Statistique					
Temps de calcul [s]	~ 10 800	0,05	0,13	5,43	11,31

* Résultats selon le plan d'approvisionnement de *Transport Jacques Auger inc.*

Tableau 6 : Résultats des plans d'approvisionnement pour le quart de travail de jour.

Par ailleurs, les heuristiques H1 et H1+ permettent d'atteindre des taux de satisfaction des commandes légèrement supérieurs à ceux qui ont été calculés avec les heuristiques H2 et H2+. En outre, le nombre moyen de visites par voyage est plus faible avec H1 et H1+ qu'avec H2 et H2+.

L'analyse des résultats du premier quart de travail (nuit) montre dans un premier temps qu'avec les quatre méthodes de résolution la quantité livrée est supérieure en moyenne de plus de 20 000 litres à la quantité livrée par le transporteur, et ce, pour un même nombre de camions utilisés, soit huit. Le taux de satisfaction des commandes à l'aide des heuristiques se situe au même niveau que celui du transporteur. Le taux d'utilisation des citernes, la distance totale parcourue, la quantité livrée par unité de distance ainsi que la quantité livrée par unité de temps présentent des valeurs similaires à celles de la compagnie de transport. Ces derniers résultats peuvent s'expliquer par des différences dues à la gestion des stations de type II. En effet, le plan d'approvisionnement du transporteur impose la visite de stations dites non urgentes et néglige de visiter certaines stations urgentes, tandis que les méthodes proposées suivent des règles strictes qui imposent de visiter toutes les stations qui ont un besoin urgent d'être ravitaillées. C'est pourquoi 17 commandes sont considérées au lieu de 14.

Les résultats du deuxième quart de travail (jour) présentent des améliorations significatives par rapport aux résultats de la compagnie de transport. Cette dernière utilise 8 véhicules pour livrer les 16 commandes, comparativement à 6 ou 7 véhicules pour les méthodes proposées. Les méthodes H2 et H2+ génèrent des résultats nécessitant moins d'heures d'utilisation de véhicules et une distance totale à parcourir moindre de plus de 800 km pour ce quart de travail. Plus particulièrement, l'heuristique H2+ permet une augmentation de 15 % de

la quantité livrée par unité de distance, tandis que la quantité livrée par unité de temps augmente d'environ 6 %. Enfin, la quantité totale livrée, le temps d'utilisation du parc de véhicules, la distance totale à parcourir, le nombre de chauffeurs nécessaires et le nombre d'heures non hiérarchiques sont autant d'autres critères pour lesquels des signes d'amélioration par rapport aux résultats réels ont été observés. Finalement, les temps de calcul sont négligeables, ne dépassant pas les 12 secondes, alors qu'un répartiteur prend environ 3 heures pour effectuer une répartition équivalente de façon manuelle.

7. Conclusion

Les résultats obtenus par les heuristiques développées permettent de réaliser des gains de productivité importants. La quantité livrée par unité de distance, le nombre de camions utilisés, la quantité livrée totale ainsi que la distance totale parcourue sont tous des critères où une amélioration substantielle est observée. Ces résultats pourraient s'améliorer de façon significative avec un accès à l'ensemble des données de l'entreprise et en considérant un plus vaste échantillon de quarts de travail. Bref, les résultats actuels démontrent que les méthodes présentées dans cet article et mises en œuvre au moyen du logiciel *RépartiPro* constituent une alternative rapide et efficace à la répartition manuelle.

8. Bibliographie

- Anily, S. and Federgruen, A. (1993). Two-echelon distribution systems with vehicle routing costs and central inventories. *Operations Research*, 41, 37-47.
- Bell, W., Dalberto, L., Fisher, M., Greenfield A., Jaikumar R., Kedia P., Mack R. and Prutzman P. (1983). Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, 13 (6), 4-23.
- Brown, G.G., Ellis, C. J., Graves, G.W. and Ronen, D. (1987). Real-time, wide area dispatch of Mobil tank trucks. *Interfaces*, 17 (1), 107-120.
- Brown, G. G. and Graves, G. W. (1981). Real-time dispatch of petroleum tank trucks. *Management Science*, 27 (1), 19-31.
- Campbell, A., Clarke, L., Kleywegt, A. and Savelsbergh, M. (1997). The inventory routing problem, Working paper. *The Logistic Institute, Georgia Institute of technology*.
- Chien, T.W., Balakrishnan, A. and Wong, R.T. (1989). An integrated inventory allocation and vehicle routing problem. *Transportation Science*, 23, 67-76.
- Dror, M. (1983). The inventory routing problem, Ph. D. thesis. University of Maryland.
- Dror, M. and Ball, M. (1987). Inventory / Routing : Reduction from an annual to a short-period problem. *Naval Research Logistics*, 34, 891-905.
- Dror, M., Ball, M. and Golden, B. (1985). A computational comparison of algorithms for the inventory routing problem. *Annals of Operations Research*, 4, 3-23.

- Dror, M. and Levy, L. (1986). A vehicle routing improvement algorithm: comparison of a greedy and a matching implementation for inventory routing. *Computers and Operations Research*, 13, 33-45.
- Federgruen, A. and Zipkin, P. (1984). A combined vehicle routing and inventory allocation problem. *Operations Research*, 32, 1019-1037.
- Fölsz, F., Mészáros, C. and Rapcsák, T. (1995). Distribution of gas cylinders. *European Journal of Operational Research*, 87, 613-623.
- Franz, L. S. and Woodmansee, J. (1990). Computer-aided truck dispatching under condition of product price variance with limited supply. *Journal of Business Logistics*, 11, 127-139.
- Golden, B., Assad, A. and Dahl, R. (1984). Analysis of a large scale vehicle routing problem with an inventory component. *Large Scale Systems*, 7, 181-190.
- Malépart, V., Renaud, J. and Boctor, F.F. (1998). *La distribution des produits pétroliers au Québec : État de la situation*, Notes de recherche. Télé-université, Université du Québec.
- Malépart, V. (1999). *Planification de la distribution des produits pétroliers*. Essai de maîtrise, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval.
- Ministère des Transports, Gouvernement du Québec, Services des politiques en transport multimodal (1994). *Étude comparative des options de transport pour l'approvisionnement en hydrocarbures de la région du Saguenay Lac Saint-Jean*.
- Russell, R. A. and Challinor, P. E. (1988). Effective methods for petroleum tank truck dispatching. *Computers and Operations Research*, 15 (4), 323-331.
- Société de l'assurance automobile du Québec, Direction des politiques et des programmes de sécurité routière (1998). *Obligations des transporteurs et conducteurs de véhicules lourds*.
- Transport Québec, Direction de la sécurité en transport, novembre (1998). *Guide des normes de charges et de dimensions des véhicules*.
- Trudeau, P. and Dror, M. (1992). Stochastic inventory routing: Route design with stockouts and route failures. *Transportation Science*, 26, 171-184.
- Webb, I. and Larson, R. (1995). Period and phase of customer replenishment: A new approach to the strategic inventory / routing problem. *European Journal of Operational Research*, 85, 132-148.