

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL  
(CONCENTRATION EN PRODUCTIQUE)**

**PAR  
MOHAMED MAHDI TABKA**

**OPTIMISATION DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION DES  
PRODUITS LAITIERS**

**Juillet 2008**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## Remerciements

Je tiens à remercier les personnes suivantes : M. Georges Abdul-Nour, directeur de recherche, pour son temps et son support technique et moral. De même que M. Dong Cao, co-directeur de recherche pour son temps et ses conseils.

Je remercie également M. Dragan Komljenovic et M. Serge Lambert pour leurs conseils qui ont enrichi ce travail.

## **Optimisation du réseau de distribution des produits laitiers**

Mohamed Mahdi Tabka

(SOMMAIRE)

Ce mémoire vise à créer un modèle capable d'aider les responsables de la logistique de transport des entreprises à prendre une décision quant à l'organisation de leurs réseaux de distribution.

On a pris le cas d'un réseau de distribution de produits laitiers d'une entreprise implantée en Tunisie et on a conçu un modèle en tenant compte des particularités de ces produits périssables.

L'objectif étant la minimisation des coûts fixes et des coûts de transport, une solution optimale a donc été trouvée pour ce réseau et différents scénarios ont été étudiés.

Par la suite, on a ajouté une autre variante au modèle afin qu'il soit plus flexible. Pour ce faire, la relocalisation des capacités de stockage des centres de distributions est devenue possible moyennant un coût de relocalisation. Après avoir trouvé une solution optimale, une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'étudier l'effet de la variation des différents coûts sur l'organisation du réseau.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE .....	II
TABLE DES MATIÈRES .....	III
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
<b>Chapitre 1 : Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
1.1 Importance des produits périssables .....	1
1.2 Définition du problème.....	2
1.2.1 Le problème de transport .....	2
1.2.2 Les produits périssables.....	3
1.3 Particularités des produits périssables .....	4
1.4 Problématique .....	6
1.5 Méthodologie .....	6
1.6 Objectifs.....	7
1.7 Résultats visés .....	7
<b>Chapitre 2 : Modèles de transport des produits périssables</b> .....	<b>8</b>
2.1 Le transport du sucre.....	8
2.1.1 Optimisation du transport du sucre en Allemagne (Van Vliet et al., 1992) .....	8
2.1.1.1 Définition du problème et objectif visé.....	8
2.1.1.2 La fonction objectif et les contraintes .....	9
2.1.1.3 Méthodes de solution .....	13
2.1.1.4 Conclusion et résultats .....	13
2.1.1.5 Remarque .....	13
2.1.2 Problème de transport de canne à sucre en Australie (Higgins, 2004) .....	13
2.1.2.1 Définition du problème et objectif visé.....	13
2.1.2.2 La fonction objectif et les contraintes .....	13
2.1.2.3 Méthodes de solution .....	16
2.1.2.4 Conclusion et résultats .....	17
2.1.2.5 Remarque .....	17
2.2 Distribution de la viande .....	17
2.2.1 Distribution de la viande fraîche en Grèce (Tarantilis et Kiranoudis, 2001)..	17
2.2.1.1 Définition du problème et objectif visé.....	17
2.2.1.2 La fonction objectif et les contraintes .....	17
2.2.1.3 Méthode de solution.....	19
2.2.1.4 Résultats et conclusion .....	19

2.2.2 Cas du transport de la viande en Espagne (Belenguer et al., 2004) .....	20
2.2.2.1 Définition du problème et objectif visé .....	20
2.2.2.2 La fonction objectif et les contraintes .....	20
2.2.2.3 Méthode de solution .....	23
2.2.2.4 Résultats et conclusion .....	23
2.2.2.5 Remarque .....	23
2.3 Transport du lait.....	23
2.3.1 Problème de la collecte du lait (Basnet et al., 1999) .....	23
2.3.1.1 Définition du problème et objectif visé.....	23
2.3.1.2 La fonction objectif .....	24
2.3.1.3 Méthode de solution .....	25
2.3.1.4 Résultats et Conclusion.....	25
2.3.2 Modèle de collecte du lait (Foulds et Wilson, 1997) .....	26
2.3.2.1 Définition du problème et objectif visé.....	26
2.3.2.2 La fonction objectif .....	26
2.3.2.3 Méthodes de solution .....	28
2.3.2.4 Résultats et conclusion .....	28
2.3.3 Planification de la production et de la distribution des produits laitiers (Pooley, 1994).....	28
2.3.1.1 Définition du problème et objectif visé.....	28
2.3.1.2 La fonction objectif .....	28
2.3.1.3 Méthode de solution .....	30
2.3.1.4 Résultats et Conclusion.....	30
2.4 Transport des aliments congelés : .....	31
2.4.1 Optimisation de la livraison d'aliments surgelés (Faulin, 2003).....	31
2.4.1.1 Définition du problème et objectif visé.....	31
2.4.1.2 La formulation du problème.....	31
2.4.1.3 Méthode de Solution .....	35
2.4.1.4 Résultats et conclusion .....	35
2.4.1.5 Remarque .....	35
2.4.2 Optimisation du transport d'aliments réfrigérés (Hsu et Hung ,2003).....	35
2.4.2.1 Définition du problème et objectif visé.....	35
2.4.2.2 La fonction objectif .....	35
2.4.2.3 Méthode de solution .....	38
2.4.2.4 Résultats et conclusion .....	38
2.4.2.5 Remarque .....	38
2.4.3 Transport des aliments congelés à Bangkok (Panapinun et Charnsethikul, 2002).....	38
2.4.3.1 Définition du problème et objectif visé.....	38
2.4.3.2 La fonction objectif .....	39
2.4.3.3 Méthode de solution .....	40

2.4.3.4 Résultats et conclusion .....	40
2.4.4 Optimisation de la distribution d'aliments congelés et surgelés (Cho et Li, 2005).....	40
2.4.4.1 Définition du problème et objectif visé.....	40
2.4.4.2 La fonction objectif et les contraintes .....	41
2.4.4.3 Méthode de solution.....	42
2.4.4.4 Résultats et conclusion .....	42
2.4.5 Problème d'allocation et distribution de produits périssables (Federgruen et al., 1985).....	43
2.4.5.1 Définition du problème et objectif visé.....	43
2.4.5.2 La fonction objectif et les contraintes .....	43
2.4.5.3 Méthode de solution.....	45
2.4.5.5 Résultats et conclusion .....	45
<b>Chapitre 3 : Classification des modèles de distribution des produits périssables .....</b>	<b>46</b>
3.1 Classification par types de contraintes .....	46
3.2 Classification par produits à transporter .....	48
3.3 Classification par outils de solution.....	50
3.4 Classification par techniques de solution.....	51
3.5 Classification des modèles par composantes de la fonction objectif .....	52
3.6 Classification des modèles selon les activités .....	54
<b>Chapitre 4 : Sélection et choix du modèle.....</b>	<b>57</b>
4.1 Critères de sélection.....	57
4.2 La fonction objectif.....	58
4.3 Les contraintes .....	60
<b>Chapitre 5 : Le problème d'optimisation du réseau de distribution de produits laitiers.....</b>	<b>62</b>
5.1 Introduction.....	62
5.2 Présentation du problème actuel .....	62
5.3 Les données.....	64
5.4 La fonction objectif et les contraintes.....	70
5.5 La modélisation .....	71
5.6 L'outil de solution.....	72
5.7 Les résultats .....	72
5.8 Conclusion.....	77
5.9 Les scénarios .....	78
5.9.1 Scénario 1 .....	78
5.9.2 Scénario 2 .....	80
5.9.3 Scénario 3.....	82
5.10 Comparaison des différents scénarios.....	84

<b>Chapitre 6 : Optimisation du réseau de distribution des produits laitiers avec relocalisation des unités de stockage</b> .....	<b>87</b>
6.1 Présentation du problème actuel .....	87
6.2 Les données .....	87
6.3 La fonction objectif et les contraintes.....	91
6.4 Les résultats .....	93
6.5 Analyse de sensibilité .....	100
6.5.1 Augmentation des coûts fixes .....	100
6.5.2 Augmentation des coûts de relocalisation .....	102
6.5.3 Augmentation des coûts de transport.....	102
6.6 Conclusion.....	103
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	<b>104</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>106</b>

## LISTE DES FIGURES

<b><u>Figure 1</u></b> : Problème de transport ( Housroum et al., 2003) .....	3
<b><u>Figure 2</u></b> : Un exemple simple d'un itinéraire de camion (Van Vliet et al., 1992).....	9
<b><u>Figure 3</u></b> : Description de la procédure MIXALAG (Faulin, 2003) .....	34
<b><u>Figure 4</u></b> : Représentation schématique du réseau de distribution actuel des produits laitiers .....	63
<b><u>Figure 5</u></b> : Le réseau optimal de distribution des différents produits .....	74
<b><u>Figure 6</u></b> : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux .....	77
<b><u>Figure 7</u></b> : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux (scénario 1) .....	80
<b><u>Figure 8</u></b> : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux (scénario 2) .....	82
<b><u>Figure 9</u></b> : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux (scénario 3) .....	84
<b><u>Figure 10</u></b> : Comparaison entre les coûts totaux, les coûts de transport et les coûts fixes des différents scénarios. ....	86
<b><u>Figure 11</u></b> : Le réseau optimal de distribution des différents produits (en considérant une possibilité de relocalisation) .....	96
<b><u>Figure 12</u></b> : Répartition des différents coûts en pourcentage des coûts totaux.....	99
<b><u>Figure 13</u></b> : Variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts fixes.....	101

## LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1</u> : Classification des modèles par types de contraintes .....	47
<u>Tableau 2</u> : Classification des modèles par produit à transporter .....	49
<u>Tableau 3</u> : Classification des modèles par outil de solution .....	50
<u>Tableau 4</u> : Classification des modèles par technique de solution .....	51
<u>Tableau 5</u> : Classification des modèles par composante de la fonction objectif .....	53
<u>Tableau 6</u> : Classification des modèles selon les activités .....	55
<u>Tableau 7</u> : Production mensuelle de chacune des usines (en tonne/mois) .....	64
<u>Tableau 8</u> : Quantités demandées par les grossistes pour chaque produit (en tonne/mois). .....	65
<u>Tableau 9</u> : Distances entre les usines et les centres de distribution (en Km) .....	65
<u>Tableau 10</u> : Distances entre les centres de distribution et les grossistes (en Km) .....	66
<u>Tableau 11</u> : Coûts de transport par tonne de produit par Km parcouru entre les usines et les centres de distribution et entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars/ Km/tonne).....	67
<u>Tableau 12</u> : Coûts de transport par tonne de produit entre les usines et les centres de distribution (en Dinars/tonne).....	67
<u>Tableau 13</u> : Coûts de transport par tonne de produit entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars/tonne). .....	68
<u>Tableau 14</u> : Coûts fixes reliés aux différents centres de distribution (en Dinars) ....	69
<u>Tableau 15</u> : Capacités de stockage des différents centres de distribution (en tonnes /mois) .....	69
<u>Tableau 16</u> : Quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes).....	72

<u>Tableau 17</u> : Quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes).....	73
<u>Tableau 18</u> : Coûts de transport par quantité et type de produit acheminé entre les usines et les centres de distribution (en Dinars). ....	75
<u>Tableau 19</u> : Coûts de transport par quantité et type de produit acheminé entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars).....	76
<u>Tableau 20</u> : Quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution pour le scénario 1 (en tonnes). ....	78
<u>Tableau 21</u> : Quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes pour le scénario 1 (en tonnes). ....	79
<u>Tableau 22</u> : Quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution pour le scénario 2 (en tonnes). ....	80
<u>Tableau 23</u> : Quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes pour le scénario 2 (en tonnes). ....	81
<u>Tableau 24</u> : Quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution pour le scénario 3 (en tonnes). ....	82
<u>Tableau 25</u> : Quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes pour le scénario 3 (en tonnes). ....	83
<u>Tableau 26</u> : Comparaison des différents scénarios. ....	85
<u>Tableau 27</u> : Distances entre les centres de distribution (en kilomètres).....	88
<u>Tableau 28</u> : Coûts d’extension, coûts de relocalisation des équipements et coûts totaux de relocalisation pour chaque centre de distribution et pour chaque produit	89
<u>Tableau 29</u> : quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes) .....	93
<u>Tableau 30</u> : quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes).....	94
<u>Tableau 31</u> : Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les usines et les centres de distribution (en Dinars) .....	97

<b><u>Tableau 32</u></b> : Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars) .....	97
<b><u>Tableau 33</u></b> : Variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts de fixes .....	100
<b><u>Tableau 34</u></b> : Variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts de relocalisation .....	102
<b><u>Tableau 35</u></b> : Variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts de transport.....	103

# Chapitre 1

## Introduction générale

Dans ce chapitre, les éléments suivants seront présentés : l'introduction, la définition du problème de transport ainsi que la définition des produits périssables, la particularité des produits périssables, la problématique, la méthodologie, les objectifs et les résultats visés.

### 1.1 Importance des produits périssables

Les produits périssables présentent aujourd'hui un réel intérêt dans le monde des affaires étant donné que le consommateur est plus exigeant quant à la qualité. Cette catégorie de produit gagne donc des parts de marché considérables.

D'après Supermarket Business (2000), la rentabilité et l'image des supermarchés sont directement liées à la qualité de leurs denrées périssables. En effet, en 1999, les ventes des denrées périssables ont augmenté de 4,5 % et ont représenté 69,4 % (approximativement 305 milliards de Dollars Américain) de toutes les ventes au détail de nourriture. De plus, le produit représente 12,7 % des ventes totales des magasins et est la deuxième catégorie la plus profitable derrière les aliments surgelés (Berner, 1999).

Selon l'institut américain de recherche sur les aliments congelés (AFFI), le taux de croissance annuel de la moyenne des ventes au détail des aliments congelés aux États-Unis a atteint plus de 20 % en 1999 et 16 % des personnes ont indiqué qu'elles continueraient à augmenter leur consommation (Hsu et Hung, 2003). L'importance des produits périssables confère donc aux consommateurs un réel intérêt. Ainsi, un outil d'aide à la décision capable de planifier les réseaux de

distribution des produits périssables peut diminuer les coûts logistiques et améliorer la qualité du produit qui arrive au client.

## **1.2 Définition du problème**

Cette partie de l'étude définit des termes employés dans ce rapport à savoir le problème de transport et les produits périssables.

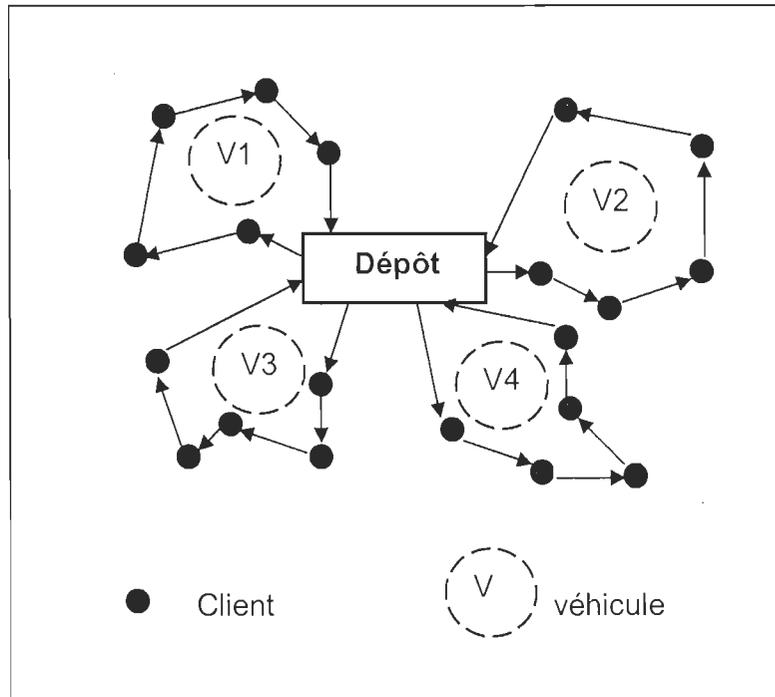
### **1.2.1 Le problème de transport**

Le problème de transport est présentement l'un des problèmes les plus importants auxquels les compagnies publiques et privées font face. Ceci est d'autant plus vrai pour les compagnies spécialisées dans la livraison dont leur revenu est directement dépendant de l'efficacité de leur réseau de transport (Belenguer et al., 2005).

Dans la littérature scientifique, ce problème est appelé « problème de transport » (Vehicle Routing Problem). Ce problème, ainsi que ses extensions, présentent un intérêt majeur auprès des théoriciens en recherche opérationnelle et est très utilisé dans les applications de la vie réelle (Panapinun et Charnsethikul, 2005).

Le problème considère que les véhicules situés dans un dépôt central vont visiter des clients dans un temps donné leur livrant une quantité connue. L'objectif est généralement de minimiser les coûts de transport en satisfaisant la demande des clients.

Une représentation simplifiée du problème de transport est illustrée par la figure 1.



**Figure 1** : Le problème de transport (Housroum et al., 2003)

Dans cette étude, nous verrons une variante du problème de transport qui est le transport des produits périssables.

### 1.2.2 Les produits périssables

Un produit périssable est un produit qui devient périmé et ne peut être utilisé après une certaine période de temps. La durée de temps durant laquelle le produit est encore bon est appelée durée de vie. Quand sa durée de vie expire, le produit ne peut plus être utilisé (Prastacos, 1981).

Sarmiento et Nagi (1999) définissent un produit périssable comme un produit qui a une durée déterminée d'utilisation, après quoi il doit « être jeté » moyennant un coût donné. Ceci est dû à la dégradation accrue de la qualité du produit.

Fu et Labuza (1993) définissent la qualité de conservation ou la durée de conservation comme période moyenne durant laquelle un produit est apte « pour l'usage » s'il est gardé dans des conditions constantes de stockage. La qualité du produit peut être maintenue plus longtemps dans des conditions de stockage adéquates telles qu'une humidité relative et une température convenables (Ryall et Lipton, 1979).

Par ailleurs, la qualité peut être définie comme l'ensemble des propriétés et des caractéristiques d'un produit qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins exprimés ou implicites d'un client (Panozzo et al., 1999).

### **1.3 Particularités des produits périssables**

Dans l'industrie d'aujourd'hui, les coûts de distribution des produits périssables constituent une partie significative des coûts opérationnels de la compagnie, surtout qu'ils observent une augmentation régulière et les exigences des clients sont devenues beaucoup plus grandes.

De plus, l'altérabilité du produit rend la période de temps entre la préparation des produits et la date de commerce d'un grand intérêt pour les producteurs et les commerçants. Les compagnies doivent donc utiliser des systèmes de distribution efficaces (Tarantilis et Kiranoudis, 2001).

On estime que les coûts de distribution représentent presque la moitié des coûts de logistique totaux et que dans les industries alimentaires les coûts de distribution peuvent représenter jusqu'à 70% des coûts de valeur ajoutée (Backer et al., 1997).

Selon Hoogerwerf et al. (1990), la part du coût de distribution dans le prix de consommation pour certains produits périssables est deux fois plus grande que le coût de distribution des produits non périssables.

Cette différence est due à deux facteurs qui sont la manipulation rapide et les conditions de stockage spéciales. De plus, pour certaines industries qui se spécialisent dans la vente des produits périssables comme le pain et la viande, les pertes de marchandises pour cause de détérioration est approximativement 4,5 % comparée à 2 % pour les autres produits non périssables (Supermarket News, 1997).

Chung et Norback (1991) notent que les produits périssables sont distribués dans un temps relativement court afin de réduire au minimum la dégradation du produit.

Les produits périssables se détériorent progressivement avec le processus d'expédition, cette diminution de la qualité est due à la fonction organique. Les aliments avec un cycle de vie court ayant subi un retard lors de la distribution peuvent être vendus avec une dépréciation de leur valeur marchande. De plus, la perte de revenus des détaillants est habituellement transférée aux distributeurs en termes de coûts de pénalité (Hsu et Hung, 2003).

Les industries de distribution alimentaire sont des industries à haut volume et avec une petite marge de profit étant donné qu'ils nécessitent des livraisons fréquentes et un volume réduit pour leurs clients (Chung et Norback, 1991).

Les caractéristiques des produits périssables rendent donc la gestion d'opérations d'un centre de distribution plus complexe que celle d'un centre de distribution moyen (Broekmulen, 1998).

#### **1.4 Problématique**

La complexité du réseau de distribution des produits périssables provient de la nécessité de gérer le flux de produits à partir du point d'origine (l'usine) jusqu'aux points d'utilisations (les clients) en ayant un bon service (pas de retard, livrer exactement la quantité demandée...) et de veiller à livrer un produit de bonne qualité (produit qui n'est pas altéré) et cela au moindre coût.

La gestion de ce réseau nécessite un outil de planification qui permet aux gestionnaires d'optimiser leurs chaînes logistiques. En général, le processus de logistique envisagé comporte principalement les activités suivantes : l'ordonnancement, le transport et la livraison.

Le modèle aura pour objectif de déterminer les quantités de produits expédiées, les points d'origine et de destination, les routages et la sélection des centres de distribution tout en minimisant les coûts totaux de transport et en organisant le réseau de distribution des produits périssables.

Les paramètres utilisés sont comme suit :

- des variables continues seront utilisées pour les coûts de transport.
- des variables entières seront utilisées pour modéliser les quantités de produits à livrer.
- des variables binaires seront utilisées pour la sélection des centres de distribution.

#### **1.5 Méthodologie**

La première étape de cette étude consiste en une recherche bibliographique. Cette étape portera sur la documentation et la compréhension des modèles déjà développés pour résoudre des problèmes similaires de transport de produits périssables. Une classification des modèles suivant le produit à transporter (viande, lait, produits réfrigérés etc.) sera faite dans le chapitre suivant.

Ces modèles serviront à déterminer les caractéristiques principales de la chaîne logistique des produits périssables dans les différentes industries ainsi que leurs variables principales et les contraintes qui les gouvernent. Ensuite, la conception du modèle mathématique pour l'optimisation d'un réseau de distribution de produits périssables spécifiques (les produits laitiers) sera effectuée.

Finalement, une étude de différents scénarios comportant des changements dans les éléments principaux de la fonction objectif sera réalisée.

### **1.6 Objectifs**

Afin d'optimiser le réseau de distribution des produits laitiers, il est important de déterminer les facteurs principaux qui influencent ce réseau et de mesurer l'impact de chacun de ces facteurs sur les coûts totaux des activités. Par la suite, l'analyse de l'effet de chacun de ces facteurs doit être faite.

Le but est de présenter un modèle qui peut être utilisé par les gestionnaires de produits laitiers pour les aider à optimiser leurs réseaux mais également à fin que d'autres industries ayant besoin de l'implantation d'un nouveau réseau de distribution puissent l'utiliser.

### **1.7 Résultats visés**

Suite à la détermination des facteurs d'influence de la chaîne logistique ainsi que les contraintes qui les gouvernent, les résultats visés sont : la conception d'un réseau optimal de distribution de produits périssables, la sélection des centres de distribution, la détermination des quantités acheminées à travers ce réseau et la conception du routage. L'application du modèle mathématique servira à améliorer l'efficacité des opérations du système logistique et à trouver la solution la plus économique qui assurera un meilleur fonctionnement de ce système.

## Chapitre 2

### Modèles de transport des produits périssables

Le modèle envisagé a pour but de traiter le problème de transport des produits laitiers, qui sont d'un côté des aliments périssables et d'un autre côté des produits devant être transportés par des véhicules réfrigérés pour la préservation de leur qualité. Dans ce chapitre, les modèles à étudier auront donc au moins l'une de ces deux caractéristiques et seront regroupés selon la nature du produit transporté (sucre, viande, lait et aliments congelés).

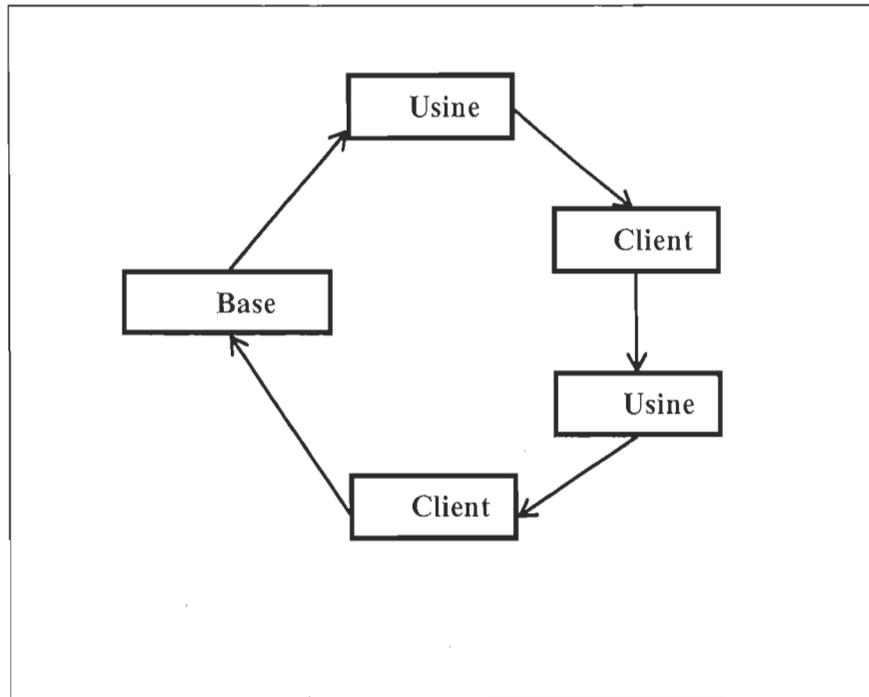
#### 2.1 Le transport du sucre

##### 2.1.1 Optimisation du transport du sucre en Allemagne (Van Vliet et al., 1992)

###### 2.1.1.1 Définition du problème et objectif visé

*Suiker Unie* est une coopérative agricole située en Allemagne qui distribue le sucre depuis des dépôts situés dans les usines de transformation jusqu'à ses clients. Chaque fois qu'un client est servi le véhicule doit retourner à l'une des usines pour un nouveau chargement. La Figure 2 représente un exemple simple d'un itinéraire de camion.

Les responsables ont remarqué une perte de temps considérable lors du chargement des camions suite à la file d'attente et veulent donc la réduire. L'objectif de ce modèle est donc de planifier la tournée de véhicules.



**Figure 2** : Un exemple simple d'un itinéraire de camion (Van Vliet et al., 1992)

### 2.1.1.2 La fonction objectif et les contraintes

#### Notations

$N$  : ensemble des clients.

$W$  : ensemble des véhicules.

$D$  : ensemble d'usines.

$q_i$  : demande du client  $i$ .

$[e_i; l_i]$  : intervalle dans lequel doit commencer le déchargement.

$u_{ik}$  : temps de déchargement qui dépend du client  $i$  et du véhicule  $k$ .

$[e\omega_k; l\omega_k]$  : intervalle auquel le véhicule peut être utilisé.

$[ed_l; ld_l]$  : quantité minimale et maximale qui peut être livrée par l'usine  $l$ .

- $v_{il}$  : temps de chargement.  
 $rdk_{lj}$  : temps de passage entre l'usine  $l$  et le client  $j$ .  
 $rdk_{il}$  : temps de passage entre le client  $i$  et l'usine  $l$ .  
 $fx$  : coût fixe d'un véhicule par unité de temps.  
 $q \min_l$  : quantité minimale qui peut être livrée à l'usine  $l$ .  
 $q \max_l$  : quantité maximale qui peut être livrée à l'usine  $l$ .

### **Variables de décision**

- $X_{ijk} = 1$  si le client  $j$  est visité immédiatement après le client  $i$  et 0 sinon.  
 $Y_{ijl} = 1$  si le sucre pour le client  $j$  est chargé immédiatement après la visite du client  $i$  et 0 sinon.  
 $T_i$  : temps auquel le chargement du client  $i$  commence.  
 $S_i$  : temps auquel le déchargement du client  $i$  commence.  
 $U_k^s$  : temps auquel le véhicule  $k$  commence le travail.  
 $U_k^e$  : temps auquel le véhicule  $k$  termine le travail.  
 $f\omega_{ik}$  : égale à 1 si la combinaison client - véhicule est permise et 0 sinon.  
 $fd_{il}$  : égale à 1 si la combinaison client - usine est permise et 0 sinon.

### **La fonction Objectif**

Il s'agit de minimiser le temps de travail des camions et le nombre de véhicules utilisés.

$$\min \sum_{k \in W} (U_k^e - U_k^s) + fx \sum_{i \in N} \sum_{k \in W} X_{0ik}$$

**Les contraintes**

$$X_{ijk} \leq f\omega_{jk} \quad \forall i \in N^0, j \in N, k \in W \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N^0} \sum_{k \in W} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N^0} X_{ijk} = 1 \quad \forall k \in W \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N^0} X_{ijk} = \sum_{i \in N^0} X_{jik} \quad \forall j \in N^0, k \in W \quad (4)$$

$$Y_{ijl} \leq fd_{jl} \quad \forall i \in N^0, j \in N, l \in D \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N^0} \sum_{l \in D} Y_{ijl} = 1 \quad \forall j \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N^0} Y_{i0l} = 1 \quad \forall l \in D \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N^0} Y_{ijl} = \sum_{i \in N^0} Y_{jil} \quad \forall j \in N^0, l \in D \quad (8)$$

$$q \min_l \leq \sum_{i \in N^0} \sum_{j \in N} q_j Y_{ijl} \leq q \max_l \quad \forall l \in D \quad (9)$$

$$e_i \leq S_i \leq l_i \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$T_j + \sum_{i \in N^0} \sum_{l \in D} (v_{jl} + rdk_{ij}) Y_{ijl} \leq S_j \quad \forall j \in N \quad (11)$$

$$Y_{ijl} = 1 \rightarrow T_i + v_{il} \leq T_j \quad \forall i \in N, j \in N, l \in D \quad (12)$$

$$X_{ijk} = 1 \rightarrow S_i + u_{ik} + \sum_{m \in N^0} \sum_{l \in D} rkd_{il} Y_{mjl} \leq T_j \quad \forall i \in N, j \in N, k \in W \quad (13)$$

$$T_j \geq \sum_{i \in N^0} \sum_{l \in D} ed_i Y_{ijl} \quad \forall j \in N \quad (14)$$

$$T_j \leq \sum_{i \in N^0} \sum_{l \in D} (ld_i - v_{jl}) Y_{ijl} \quad \forall j \in N \quad (15)$$

$$U_k^s \geq e\omega_k \quad \forall k \in W \quad (16)$$

$$U_k^e \leq l\omega_k \quad \forall k \in W \quad (17)$$

$$U_k^s \leq U_k^e \quad \forall k \in W \quad (18)$$

$$X_{0jk} = 1 \rightarrow U_k^s + \sum_{i \in N^0} \sum_{l \in D} r\omega_{kl} Y_{ijl} \leq T_j \quad \forall j \in N, k \in W \quad (19)$$

$$X_{j0k} = 1 \rightarrow S_j + u_{jk} + rk\omega_{jk} \leq U_k^e \quad \forall j \in N, k \in W \quad (20)$$

Les contraintes (1), (2), (3), (4), (11) et (13) assurent un cheminement correct des camions.

Les contraintes (5), (6), (7), (8) et (12) assurent un chargement correct aux usines.

### 2.1.1.3 Méthodes de solution

Étant donné que le problème est n-p complet, une relaxation lagrangienne ainsi qu'une heuristique ont été utilisées afin de résoudre le problème dans un temps acceptable, la programmation a été faite avec le langage C.

### 2.1.1.4 Conclusion et résultats

Suite à l'implantation de ce modèle, l'entreprise a vu une diminution des coûts de transport de 7%.

### 2.1.1.5 Remarque

Dans ce modèle, les contraintes ne sont pas toutes respectées et sont juste indicatives, le logiciel est donc un outil d'aide à la décision et ne remplace pas le planificateur qui ajuste les résultats selon les données additionnelles de ses clients.

## 2.1.2 Problème de transport de canne à sucre en Australie (Higgins, 2006)

### 2.1.2.1 Définition du problème et objectif visé

Des camions vont transporter des remorques de canne à sucre, situées dans des fermes, jusqu'à l'usine de transformation. L'aller-retour du moulin jusqu'aux usines se faisant plusieurs fois, le but du modèle développé est donc de minimiser le temps d'attente des véhicules ainsi que le temps d'inactivité de l'usine. Il a pour objectif de gérer une tournée de véhicules.

### 2.1.2.2 La fonction objectif et les contraintes

#### Notation

$I$  : ensemble de véhicules.

$J$  : ensemble de remorques qui doivent être transportées.

$a_j$  : temps auquel la remorque  $j$  est pleine et prête à être transportée.

$r_j$  : temps de parcours entre la remorque  $j$  et l'usine.

$p_j$  : temps de transformation de la remorque  $j$ .

$M$  : un grand nombre.

### **Variables de décision**

$x_{ijk}$  : prend la valeur 1 si le véhicule  $i$  transporte la remorque  $k$  après avoir transporté la remorque  $j$  et 0 sinon.

$c_{jk}$  : prend la valeur 1 si la remorque  $k$  arrive au moulin après la remorque  $j$  et 0 sinon.

$y_j$  : temps de départ du moulin en transportant la remorque  $j$ .

$z_j$  : temps d'arrivée de la remorque  $j$ .

$d_j$  : temps de début de transformation de la remorque  $j$ .

$q_j$  : temps d'attente de la remorque  $j$  dans la file.

$e$  : période de fin de transformation des remorques transportées avant l'horizon de planification.

$C$  : délai maximum permis entre la découpe de la canne à sucre et sa transformation.

### **La fonction Objectif**

L'objectif est de minimiser le temps d'attente ainsi que le temps d'inactivité du moulin.

$$\min Z = \sum_{j \in J} q_j + D - e - \sum_{j \in J} p_j$$

où :  $D \geq d_j + p_j \quad \forall j \in J$  est le temps auquel la dernière remorque finit d'être transformée.

### Les contraintes

Le véhicule  $i$  ne peut transporter qu'une seule remorque avant la remorque  $j$  et au plus une remorque après :

$$\sum_{k \in J} x_{ijk} \leq \sum_{l \in J} x_{ijl} \quad \forall i \in I, j \in K : k > 0 \quad (1)$$

Un véhicule ne peut transporter la remorque  $j$  qu'après que la moissonneuse ait fini de la remplir à l'instant  $a_j$  :

$$y_j + r_j > a_j \quad \forall j \in J \quad (2)$$

Le véhicule ne peut transporter la remorque  $k$  que quand la remorque  $j$  a été transformée :

$$y_k \geq z_j + p_j - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall j, k \in J; i \in I \quad (3)$$

La contrainte (4) prend en considération les remorques déjà transportées avant le début de l'horizon de planification :

$$y_k \geq e + p_j - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall j, k \in J; i \in I \quad (4)$$

Les contraintes (5) et (6) régulent la variable  $c$  :

$$c_{jk} \geq (z_k - z_j) / M \quad \forall j, k \in J \quad (5)$$

$$c_{jk} + c_{kj} = 1 \quad \forall j, k \in J : j \neq k \quad (6)$$

Les contraintes (7), (8) et (9) assurent que les véhicules qui arrivent en premier sont les premiers servis :

$$y_k \geq y_v + p_j - Mc_{jw} - M(1 - x_{uvw}) - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall j, k, v, w \in J; i, u \in I \quad (7)$$

$$d_j \geq y_k - Mc_{jk} \quad \forall j, k \in J : j \neq k \quad (8)$$

$$q_j \geq y_k - z_j - p_j - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i \in I; j, k \in J : j \neq k \quad (9)$$

Les contraintes (10) et (11) assurent que chaque remorque doit être transportée par un seul véhicule :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{i0k} = 1 \quad \forall k \in J : j > 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in J} x_{i0k} = 1 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

La contrainte (12) assure un délai maximum entre la découpe de la canne à sucre et sa transformation :

$$z_j - a_j \leq C \quad \forall j \in J \quad (12)$$

La contrainte (13) assure qu'un véhicule ne peut pas transporter consécutivement la même remorque :

$$x_{ijj} = 0 \quad \forall i \in I; j \in J \quad (13)$$

### 2.1.2.3 Méthodes de solution

Les auteurs ont utilisé deux méta-heuristiques pour résoudre le problème, qui sont la « Recherche Tabou » et la « Recherche locale à voisinage variable ».

#### 2.1.2.4 Conclusion et résultats

Suite à l'implantation de ce modèle, on a réduit le temps d'attente de 90 % comparativement à la méthode traditionnelle.

#### 2.1.2.5 Remarque

Les auteurs ont essayé de solutionner un problème simple avec deux camions et cinq remorques puis avec six remorques en utilisant le logiciel « *OSL 3 Solver* ».

Le résultat optimal a été trouvé en 10 minutes pour le premier cas et en plus de deux heures pour le deuxième. Le problème étant n-p complet, ils ont utilisé ainsi des méta-heuristiques.

### 2.2 Distribution de la viande

#### 2.2.1 Distribution de la viande fraîche en Grèce (Tarantilis et Kiranoudis, 2001)

##### 2.2.1.1 Définition du problème et objectif visé

Le modèle traite un problème réel de transport de la viande à Athènes. Dans cette entreprise, les véhicules sont garés dans deux dépôts situés à côté des abattoirs de la compagnie. Le but du modèle développé est de trouver un itinéraire pour les véhicules qui réduirait au minimum leurs frais d'exploitation et de déplacement des dépôts jusqu'aux clients.

##### 2.2.1.2 La fonction objectif et les contraintes

###### Notation

$V = \{1, \dots, n\}$  : ensemble des nœuds.

$A = \{1, \dots, v\}$  : ensemble des véhicules.

$J = \{1, \dots, d\}$  : ensemble des dépôts.

$RL_i$  : longueur maximale de la route pour le véhicule  $i$ .

$CAP_i$  : capacité maximum du véhicule  $i$ .

$MAX_j$  : nombre maximum de véhicules permis au dépôt  $j$ .

$dis_{k,l}$  : distance de l'arc  $(k, l)$ .

$dem_k$  : demande du client localisé au nœud  $k$ .

$f cost_{ij}$  : coût fixe de localisation du véhicule  $i$  au dépôt  $j$ .

$t cost_{ijkl}$  : coût du véhicule  $i$  assigné au dépôt  $j$  et voyageant le long de l'arc  $(k, l)$ .

### Variables de décision

$x_{ij} = 1$  si le véhicule  $i$  est localisé au dépôt  $j$  et 0 sinon.

$x_{ijkl} = 1$  si le véhicule  $i$ , localisé au dépôt  $j$ , circule le long de l'arc  $(k, l)$  et 0 sinon.

### Fonction objectif

La fonction objectif minimise les coûts totaux de transport :

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{(k,l) \in A} c_{ijkl} x_{ijkl}$$

### Contraintes

Capacité du dépôt :

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq MAX_j \quad \forall j \in J \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

Chaque client doit être assigné à un véhicule :

$$x_{ijkl} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, (k,l) \in A \quad (3)$$

Chaque client doit avoir un véhicule qui va arriver à le servir :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k:(k,l) \in A} x_{ijkl} = 1 \quad \forall l \in V \quad (4)$$

Chaque client doit avoir un véhicule qui va partir de son magasin :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l:(k,l) \in A} x_{ijkl} = 1 \quad \forall k \in V \quad (5)$$

La voiture qui va arriver au client doit être celle qui va partir :

$$\sum_{(k,l) \in A} x_{ijkl} - \sum_{(l,m) \in A} x_{ijlm} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, l \in V \quad (6)$$

Rupture des tours incomplets :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\substack{(k,l) \in A \\ k \in U, l \in V \cup U}} x_{ijkl} \geq 1 \quad (7)$$

Longueur de la route :

$$\sum_{j \in I} \sum_{(k,l) \in A} dist_{kl} x_{ijkl} \leq RL_i \quad \forall i \in I \quad (8)$$

Capacité du véhicule :

$$\sum_{j \in J} \sum_{(kl) \in A} dem_k x_{ijkl} \leq CAP_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

### 2.2.1.3 Méthode de solution

Pour résoudre le problème, les auteurs ont utilisé une méta-heuristique nommée « *List-Based Threshold Accepting Algorithm* ».

### 2.2.1.4 Résultats et conclusion

Une programmation a été effectuée en utilisant le logiciel « *Langage C++ Version 6* ». La compagnie a diminué la distance parcourue de 17 % en comparaison avec le programme qui était utilisé auparavant.

## 2.2.2 Cas du transport de la viande en Espagne (Belenguer et al., 2005)

### 2.2.2.1 Définition du problème et objectif visé

Une compagnie, située en Espagne, effectue l'abattage et la distribution de différents types de viandes. Une demande quotidienne est reçue par le département de distribution et doit être livrée le lendemain en respectant une fenêtre horaire pour chaque client.

Le but est donc de développer un modèle capable de désigner une série de routes.

### 2.2.2.2 La fonction objectif et les contraintes

#### Notations

$c_{ij}$  : coût de transport du client  $i$  au client  $j$ .

$t_{ij}$  : temps de parcours du client  $i$  au client  $j$ .

$q_i$  : demande du client  $i$ .

$s_i$  : temps de service pour le client  $i$ .

$[e_i, l_i]$  : intervalle dans lequel le client  $i$  veut être livré.

$C_k$  : capacité du véhicule  $k$ .

$W_k$  : coût d'utilisation du véhicule  $k$ .

$x_{ij}^k$  : égale à 1 si le véhicule  $k$  va directement du nœud  $i$  au nœud  $j$  et 0 sinon.

$z_k$  : égale à 1 si le véhicule est utilisé et 0 sinon.

$a_i$  : temps d'arrivée au client  $i$ .

$p_i$  : temps de départ du client  $i$ .

$p_1^k$  : temps de départ du véhicule  $k$  depuis le dépôt.

$g_i^+, \tilde{g}_i^+$  et  $\hat{g}^+$  : variables de déviation représentant numériquement l'excès par rapport au but.

$\bar{g}_i, \tilde{g}_i^-$  : variables de déviation représentant le manque par rapport au but.

$\dot{H}, H_i$  et  $\ddot{H}_i$  : variables de pénalité par rapport au but.

### **Fonction objectif**

La fonction objectif tend à minimiser les coûts totaux et à satisfaire la fenêtre horaire des clients:

$$\min \hat{H}\hat{g}^+ + \sum_{i=2}^n H_i g_i^- + \sum_{i=2}^n \tilde{H}_i \tilde{g}_i^+$$

### **Contraintes**

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^V x_{ij}^k = 1 \quad j = 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^V x_{ij}^k = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (2)$$

$$x_{ij}^k - z_k \leq 0 \quad i, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{1j}^k \leq 1 \quad k = 1, \dots, V \quad (4)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1}^k \leq 1 \quad k = 1, \dots, V \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ir}^k - \sum_{j=1}^n x_{rj}^k = 0 \quad r = 1, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (6)$$

$$\sum_{i=2}^n q_i \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \leq C_k \quad k = 1, \dots, V \quad (7)$$

$$p_j - p_1^k + (1 - x_{1j}^k)M \geq s_j + t_{1j} \quad j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (8)$$

$$p_j - p_1^k - (1 - x_{1j}^k)M \leq s_j + t_{1j} \quad j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (9)$$

$$p_j - p_i + (1 - x_{ij}^k)M \geq s_j + t_{ij} \quad i, j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (10)$$

$$p_j - p_i - (1 - x_{ij}^k)M \geq s_j + t_{ij} \quad i, j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (11)$$

$$p_i + g_i^+ = e_i + s_i \quad i = 2, \dots, n \quad (12)$$

$$p_i + \tilde{g}_i^- - \tilde{g}_i^+ = l_i \quad i = 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^V \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k=1}^V \omega_k z_k - \hat{g}^+ = Z \quad (14)$$

$$x_{ij}^k = 0, 1 \quad z_k = 0, 1 \quad i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (15)$$

$$p_1^k, p_i, g_i^-, g_i^+, \tilde{g}_i^-, \tilde{g}_i^+, \hat{g}^+ \geq 0 \quad i = 2, \dots, n; k = 1, \dots, V \quad (16)$$

La contrainte (1) assure l'arrivée d'un seul véhicule au client  $j$ .

La contrainte (2) garantit qu'il y a un seul véhicule qui quitte le client  $i$ .

La contrainte (4) assure que tous les véhicules sortent du dépôt.

La contrainte (5) garantit que tous les véhicules retournent au dépôt.

La contrainte (6) assure la conservation du flux.

La contrainte (7) garantit que la capacité de chaque véhicule n'est pas excédée.

Les contraintes (8), (9), (10) et (11) assurent la faisabilité du trajet de chaque véhicule.

Les contraintes (12) et (13) et (14) sont des contraintes relatives à la fenêtre horaire.

### **2.2.2.3 Méthode de solution**

Pour programmer le logiciel d'aide à la décision, les auteurs ont utilisé le logiciel « *Visual C++* » ainsi qu'une méta-heuristique nommée la « Recherche Tabou ».

### **2.2.2.4 Résultats et conclusion**

En utilisant ce programme, la compagnie a vu une diminution de la distance parcourue par les véhicules ainsi qu'une amélioration globale du service.

### **2.2.2.5 Remarque**

Dans ce modèle, la fenêtre horaire n'est pas stricte. Certains clients peuvent donc être servis en dehors de cette fenêtre moyennant une pénalité.

## **2.3 Transport du lait**

### **2.3.1 Problème de la collecte du lait (Basnet et al., 1999)**

#### **2.3.1.1 Définition du problème et objectif visé**

Une compagnie laitière située en Nouvelle-Zélande collecte le lait dans des fermes par l'intermédiaire de camions-citernes. Les fermes sont regroupées selon leur proximité géographique. Pour une tournée donnée, un camion-citerne a seulement la capacité de rassembler le lait des fermes d'un même groupe.

Les camions retournent au dépôt central pleins et entrent dans un compartiment contenant une pompe où ils seront vidés. Étant donné qu'il y a un nombre limité de compartiments, une file d'attente peut alors se former.

Le but de ce modèle est donc d'organiser les camions-citernes de sorte que toutes les tournées soient complétées et la file d'attente minimisée.

### 2.3.1.2 La fonction objectif

#### Variables

$i = \{1, 2, \dots, r\}$  : ensemble de tournées.

$j = \{1, 2, \dots, t\}$  : ensemble de camions citernes.

$x_{ij} = 1$  si la tournée  $i$  est assignée au camion  $j$  et 0 sinon.

$\delta_{ij}$  : temps de pompage du lait de la tournée  $i$  avec le camion  $j$ .

$d_i$  : temps de pompage du lait de la tournée  $i$ .

$e$  : temps nécessaire pour compléter toutes les tournées.

$s_{emp}$  : temps de déchargement du camion citerne.

#### Fonction objectif

La fonction objectif vise à minimiser le temps nécessaire pour effectuer toutes les tournées :  $\min e$

#### Contraintes

La contrainte (1) assure que l'allocation est faisable :

$$x_{ij} \leq c_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, t) \quad (1)$$

La contrainte (2) garantit que chaque tournée doit être assignée à un camion citerne

:

$$\sum_{j=1}^t x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (2)$$

La contrainte (3) assure que  $e$  doit être supérieur ou égal au : temps de transport + délai d'attente :

$$\sum_{i=1}^r (s_i x_{ij} + \delta_{ij}) \leq e (j = 1, 2, \dots, t) \quad (3)$$

La contrainte (4) assure des bornes pour la variable  $d_i$  :

$$d_i \geq b_i (i = 1, 2, \dots, r) \quad (4)$$

Les contraintes (5) et (6) modélisent les liens suivants :

$$\delta_{ij} - d_i \geq M(x_{ij} - 1) \quad (5)$$

$$\delta_{ij} \leq Mx_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, t) \quad (6)$$

avec :  $x_{ij} = 1 \Rightarrow \delta_{ij} \geq d_i$ ,

$$x_{ij} = 0 \Rightarrow \delta_{ij} = 0.$$

### 2.3.1.3 Méthode de solution

Le modèle a été résolu en utilisant le « *Branch and Bound* » et a été programmé par le logiciel « *Xpress-Mp* ».

### 2.3.1.4 Résultats et Conclusion

La méthode exacte donne une résolution rapide pour un nombre de tournées égal à 30. Cependant quand le nombre de tournées est de 50, la résolution est impossible en utilisant le « *Branch and Bound* ». Les heuristiques sont alors nécessaires.

## 2.3.2 Modèle de collecte du lait (Foulds et Wilson, 1997)

### 2.3.2.1 Définition du problème et objectif visé

Dans une industrie laitière de la Nouvelle-Zélande, du lait est rassemblé depuis des fermes par des camions-citernes et est livré aux usines d'une compagnie laitière pour sa transformation. L'objectif de ce modèle est donc d'organiser la flotte de camions-citernes afin de réduire au minimum le coût de transport par kilogramme de lait livré aux usines tout en respectant la quantité demandée.

### 2.3.2.2 La fonction objectif

#### Variables

$n$  : nombre de fermes à visiter.

$m$  : nombre d'usines.

$a_i$  : quantité de lait à collecter dans la ferme  $i$ .

$b_j$  : demande totale de l'usine  $j$ .

$c_{ij}$  : coût de transport de la quantité de lait de la ferme  $i$  à l'usine  $j$ .

$x_{ij}$  : égale à 1 si le lait de la ferme  $i$  va être transporté à l'usine  $j$  et 0 sinon.

- **problème primal :**

La fonction objectif tend à minimiser les coûts de transport :

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

**Contraintes**

La contrainte (1) assure que chaque camion sert exactement une usine et une seule :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

La contrainte (2) garantit que chaque usine doit voir sa demande satisfaite :

$$\sum_{i=1}^n a_i x_{ij} \geq b_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Chaque ferme sert exactement une seule usine :

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

- **Problème dual**

$$\max z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij}$$

**Contraintes**

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \leq d_i \quad i \in M = \{1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j \in N = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

$$x_{ij} = 1 \text{ ou } 0 \quad i \in M, j \in N \quad (3)$$

### 2.3.2.3 Méthodes de solution

Les auteurs ont utilisé deux heuristiques qui sont le « *Knapsack* » et « *La méthode d'affectation* ». La programmation a été effectuée avec le logiciel « *Fortran 77* ».

### 2.3.2.4 Résultats et conclusion

Les auteurs ont comparé les deux heuristiques avec la solution exacte trouvée en utilisant un logiciel se basant sur le « *Branch and Bound* ». Ils ont alors trouvé que « *La méthode d'affectation* » présentait des solutions qui se rapprochaient plus de la solution optimale avec un temps de résolution moindre.

## 2.3.3 Planification de la production et de la distribution des produits laitiers (Pooley, 1994)

### 2.3.1.1 Définition du problème et objectif visé

Le but de ce modèle est de réorganiser le réseau de distribution d'une division de la compagnie « *Ault Foods* » située en Ontario qui produit du lait et du beurre. L'objectif visé est de déterminer l'emplacement des usines et des centres de distribution afin de minimiser les coûts fixes et les coûts de transport totaux.

### 2.3.1.2 La fonction objectif

#### Variables

$i$  : ensemble d'usines.

$j$  : ensemble des centres de distribution.

$k$  : ensemble des marchés.

$l$  : ensemble des produits.

$X_{ijl}$  : quantités de produits  $l$  transportés entre les usines  $i$  et les centres de distribution  $j$ .

$A_i$  : égale à 1 si l'usine est implantée dans site  $i$  et 0 sinon.

$B_j$  : égale à 1 si le centre de distribution est implantée dans le site  $j$  et 0 sinon.

$C_{jk}$  : égale à 1 si le centre de distribution  $j$  sert le client  $k$  et 0 sinon.

$P_i$  : capacité de production annuelle de l'usine  $i$ .

$W_j$  : capacité annuelle du centre de distribution  $j$ .

$e_i$  : coûts fixes de l'usine dans le site  $i$ .

$f_j$  : coûts fixes du centre de distribution dans le site  $j$ .

$P_{il}$  : coût unitaire de production du produit  $l$  à l'usine  $i$ .

$v_j$  : coût moyen variable par unité dans le centre de distribution  $j$ .

$c_{ijl}$  : coût de transport par unité de produit  $l$  acheminé de l'usine  $i$  vers le centre de distribution  $j$ .

$h_{jkl}$  : coûts totaux de transport du produit  $l$  acheminé du centre de distribution  $j$  vers le marché  $k$ .

$d_{kl}$  : demande du marché  $k$  pour le produit  $l$ .

### **Fonction objectif**

La fonction objectif vise à minimiser les coûts fixes et les coûts de transport totaux :

$$\min \sum_i \left( e_i A_i + \sum_{jl} p_{il} X_{ijl} \right) + \sum_j \left( f_j B_j + v_j \sum_{kl} C_{jk} d_{kl} \right) + \sum_{ijl} c_{ijl} X_{ijl} + \sum_{jkl} h_{jkl} C_{jk}$$

### **Contraintes**

La contrainte (1) est une contrainte de capacité de production :

$$\sum_{jl} X_{ijl} \leq A_i P_i \quad \text{pour tout } i \quad (1)$$

La contrainte (2) est une contrainte de capacité des centres de distribution :

$$\sum_{kl} Y_{jkl} \leq B_j W_j \quad \text{pour tout } j \quad (2)$$

La contrainte (3) assure que la production soit égale à la demande

$$\sum_{ij} X_{ijl} = \sum_{jk} C_{jk} d_{kl} \quad \text{pour tout } l \quad (3)$$

La contrainte (4) assure que chaque marché ne soit approvisionné que par un seul centre de distribution :

$$\sum_j C_{jk} = 1 \quad \text{pour tout } k \quad (4)$$

$$X_{ijl} \geq 0 \quad (5)$$

$$A_i, B_j, C_{jk} = 0 \text{ ou } 1 \quad (6)$$

### 2.3.1.3 Méthode de solution

Le modèle a été résolu en utilisant le logiciel « Super-Lindo ».

### 2.3.1.4 Résultats et Conclusion

Grâce à ce modèle, la compagnie s'est vu diminuer ses coûts logistiques de 200000 \$ par an sans pour autant qu'il n'y est eu de changements majeurs ni d'effets négatifs sur les ventes.

## 2.4 Transport des aliments congelés :

### 2.4.1 Optimisation de la livraison d'aliments surgelés (Faulin, 2003)

#### 2.4.1.1 Définition du problème et objectif visé

Dans cet article, il est question d'une compagnie spécialisée dans la mise en boîte et la distribution de produits alimentaires surgelés. Les camions utilisés pour l'approvisionnement en matières premières et pour la distribution des produits finis sont loués, leur nombre n'est donc pas connu à l'avance. Toutefois, la flotte de véhicules est homogène et leur capacité connue. Le but de ce modèle est donc de connaître le nombre de véhicules à louer et de minimiser la distance parcourue. Pour ce, l'auteur a développé des algorithmes heuristiques et exacts afin d'optimiser les coûts totaux de transport.

#### 2.4.1.2 La formulation du problème

Pour déterminer le nombre de camions nécessaires et les nœuds à visiter pour chaque itinéraire, deux heuristiques ont été utilisées :

- **L'algorithme de Clark–Wright :**

En utilisant l'expression :  $S_{i,j} = d_{1,i} + d_{1,j} - d_{i,j}$

avec :

$d_{1,i}$  : distance du nœud 1 (dépôt) au centre de livraison  $i$

$d_{1,j}$  : distance du nœud 1 au centre de livraison  $j$

$d_{i,j}$  : distance du centre de livraison  $i$  au centre de livraison  $j$

- **ALGACEA :**

C'est une méthode développée par Faulin et Gil (2002) qui permet de choisir les nœuds en utilisant la probabilité :

$$p_{i,j} = \frac{S_{i,j}^{\alpha}}{\sum_{k,l} S_{k,l}^{\alpha}}$$

Les résultats de chaque heuristique sont par la suite résolus pour chaque itinéraire et véhicule en utilisant la programmation linéaire (PLG). Cette procédure est appelée « MIXALG » et est représentée par la figure 3.

**Fonction objectif (PLG)**

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum d_{ij} x_{ijk} \quad (i \neq j)$$

**Contraintes**

Les contraintes (1), (2) et (3) assurent que chaque nœud est visité une fois et que les véhicules sortent du dépôt et y retournent :

$$\sum_{j=2}^n x_{1j1} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^n x_{ijk} = 1 \quad (k = 2,3,\dots,n-1; i \neq j) \quad (2)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1n} = 1 \quad (3)$$

Les contraintes (4) et (5) garantissent que chaque nœud a une seule branche entrante et une seule branche sortante :

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=2}^n x_{ijk} = 1 \quad (i = 2, 3, \dots, n; i \neq j) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{n-1} x_{ijk} = 1 \quad (j = 2, 3, \dots, n; i \neq j) \quad (5)$$

Les contraintes (6), (7) et (8) soutiennent une solution finale réalisable :

$$x_{1j1} = \sum_{p=2}^n x_{jp2} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{ijk} = \sum_{p=2}^n x_{jp(k+1)} \quad j = 2, 3, \dots, n; 1 \neq j; k = 2, 3, \dots, n-2) \quad (7)$$

$$\sum_{l=2}^N x_{ij(n-1)} = x_{j1n} \quad (j = 2, 3, \dots, n; i \neq j)$$

### Variables

$d_{ij}$  : distance entre les nœuds  $i$  et  $j$ .

$x_{ij}$  : variable de décision binaire qui prend la valeur 1 si l'itinéraire optimum contient un voyage du nœud  $i$  au nœud  $j$  dans la branche  $k$  et 0 autrement.

$n$  : nombre de nœuds.

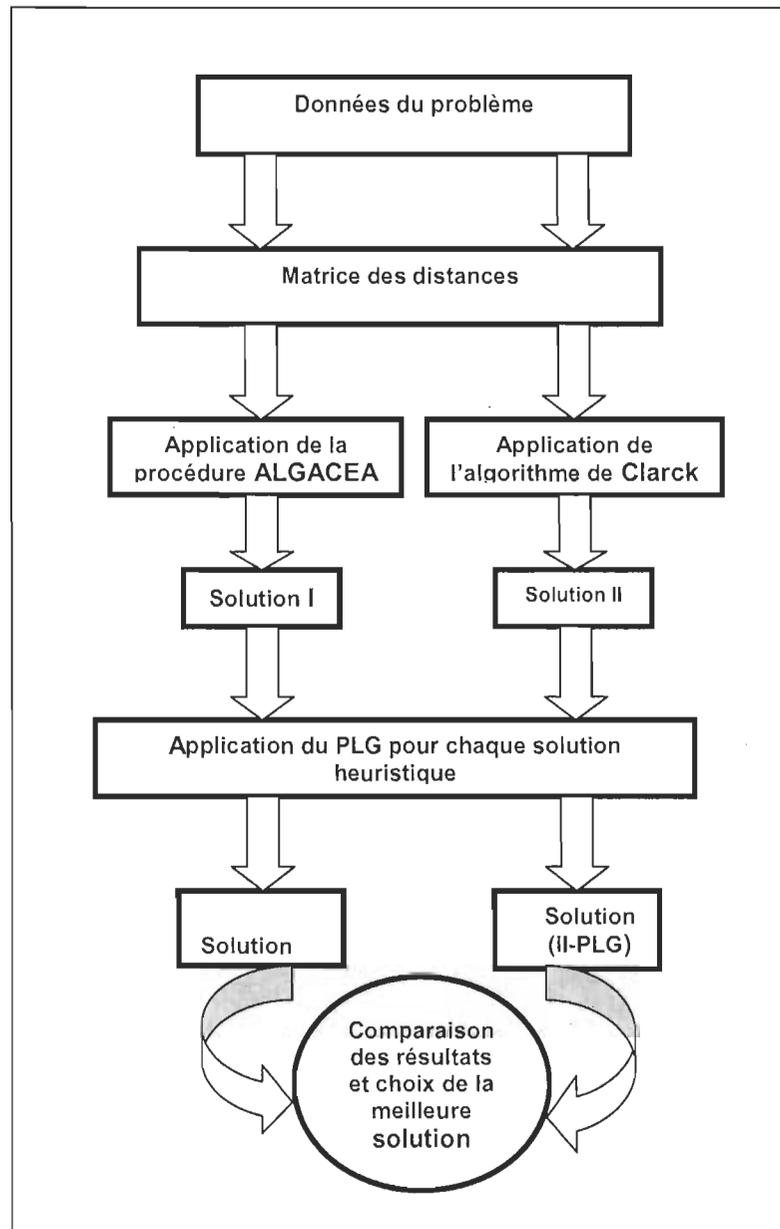


Figure 3 : Description de la procédure MIXALG (Faulin, 2003)

### 2.4.1.3 Méthode de Solution

Le logiciel « *Matlab 6.0* » a été utilisé pour résoudre les heuristiques et le logiciel « *Lindo* » pour trouver une solution à chacune d'elles.

### 2.4.1.4 Résultats et conclusion

En utilisant ce modèle, la compagnie a vu une réduction des coûts de transport variant entre 7,43% et 30,37%.

### 2.4.1.5 Remarque

Le modèle proposé présente toutefois des limites du fait qu'il n'y a pas de contrainte de temps imposée aux centres de livraison.

## 2.4.2 Optimisation du transport d'aliments réfrigérés (Hsu et Hung ,2003)

### 2.4.2.1 Définition du problème et objectif visé

Dans la compagnie dont il est question dans cet article, les véhicules sortent d'un seul dépôt pour servir des clients connaissant leur emplacement, la quantité demandée et leur fenêtre horaire. Ces véhicules transportent un seul type d'aliment réfrigéré.

Les auteurs ont donc développé un modèle résolvant le problème de livraison des aliments réfrigérés en minimisant les coûts de transport, d'inventaire et d'énergie.

### 2.4.2.2 La fonction objectif

#### Variables

$v = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  : ensemble des nœuds.

$v_0$  : dépôt.

$v_i$  : localisation des clients avec :  $i = 1, 2, \dots, n$

$A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$  : ensemble des liens.

$l = 1, 2, \dots, m$  : ensemble des véhicules.

$d_i$  : demande du client  $i$ .

$m$  : nombre de véhicules.

$n$  : nombre de clients.

$s_i$  : limite supérieure de la fenêtre horaire.

$r_i$  : limite inférieure de la fenêtre horaire.

$M$  : très grand nombre positif.

$K^l$  : capacité du véhicule  $l$ .

$v^l$  : quantité d'aliment excédentaire transportée dans le véhicule  $l$ .

### **Fonction objectif**

La fonction objectif tend à réduire les coûts de transport et le coût d'inventaire :

$$\text{Min} \quad \sum_{l=1}^m f^l + \varepsilon \sum_{l=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij}^l x_{ij}^l + p \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n z_j^l \bar{b}_j + \sum_{l=1}^m [\alpha (y_f^l - y_s^l)]$$

avec :

$$\sum_{l=1}^m f^l \quad : \text{coûts fixes totaux.}$$

$$\varepsilon \sum_{l=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij}^l x_{ij}^l \quad : \text{coûts de transport incluant le coût du gasoil et le coût de la maintenance.}$$

$$p \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n z_j^l \bar{b}_j \quad : \text{coût total d'inventaire.}$$

$$\sum_{l=1}^m [\alpha (y_f^l - y_s^l)] \quad : \text{coût total d'énergie dépensée pour le refroidissement des aliments.}$$

### Contraintes

La contrainte (1) garantit que chaque client est servi par un véhicule et que chaque route commence et se termine par le dépôt :

$$\sum_{l=1}^m z_i^l = m \quad \text{si } i = 0 \quad \text{et} \quad 1 \quad \text{si } i=1, \dots, n \quad (1)$$

Les contraintes (2) et (3) assurent la conservation du flux :

$$\sum_{l=1}^m x_{ij}^l = z_j^l \quad j = 0, \dots, n \quad l = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij}^l = z_i^l \quad i = 0, \dots, n \quad l = 1, \dots, m \quad (3)$$

Les contraintes (4), (5) et (6) soutiennent qu'il n'y a pas de conflit horaire entre deux clients :

$$y_j \geq y_i + u_i + t_{ij}^l - (1 - x_{ij}^l)M \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad l = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$y_i \geq y_s + t_{0i}^l - (1 - x_{0i}^l)M \quad i = 1, \dots, n \quad l = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$y_f^l \geq y_j + u_j + t_{j0}^l - (1 - x_{j0}^l)M \quad j = 1, \dots, n \quad l = 1, \dots, m \quad (6)$$

La contrainte (7) assure le respect de la fenêtre horaire :

$$r_i \leq y_i \leq s_i \quad (7)$$

La contrainte (8) assure le respect de la capacité des véhicules :

$$L^l = \sum_{i=1}^n z_i^l d_i + v^l \leq K^l \quad l = 1, \dots, m \quad (8)$$

Les contraintes (9) et (10) estiment la quantité de produit détériorée :

$$x'_{0i} \bar{b}_i = x'_{0i} \times [F(y_i - y'_s + u_i) + G(d_i)] \quad (9)$$

$$\bar{b}_j = L'_i \times [F(y_j - y'_s + u_j) - F(y_i - y'_s + u_i) + G(d_j)] \quad (10)$$

#### 2.4.2.3 Méthode de solution

Étant donné que le problème est n-p complet, les auteurs ont utilisé une heuristique nommée « *Time-Oriented Nearest-Neighbor Heuristic* ».

#### 2.4.2.4 Résultats et conclusion

Les auteurs ont comparé ce modèle avec un autre qui ne considère pas dans la fonction objectif les pertes en inventaire et les coûts d'énergie. Ils trouvèrent alors que les coûts d'énergie s'élevaient à 6 % et que les coûts d'inventaire représentaient 17 % des coûts totaux de transport.

#### 2.4.2.5 Remarque

Dans ce modèle, les auteurs ont considéré une fenêtre horaire stricte. Cependant, les clients ont le plus souvent des fenêtres horaires assez comparables. Il est intéressant de constater alors, qu'en ayant une fenêtre horaire plus souple mais avec pénalités, les coûts de transport seront moindres.

### 2.4.3 Transport des aliments congelés à Bangkok (Panapinun et Charnsethikul, 2005)

#### 2.4.3.1 Définition du problème et objectif visé

Dans cet article, il s'agit d'une chaîne de restaurants située à Bangkok. Le dépôt se trouvant au centre-ville, les aliments doivent alors être acheminés quotidiennement vers les divers restaurants des environs.

Les aliments étant périssables, la compagnie possède donc 3 camions à congélation et 6 camions à refroidissement. Chaque type d'aliment doit alors être transporté dans un type de camion bien spécifique. L'objectif visé est d'établir un modèle capable d'améliorer l'efficacité de la distribution de produits congelés.

### 2.4.3.2 La fonction objectif

#### Notation

$i$  : nœud assigné à un camion avec :  $i \in \{1, 2, 3, \dots, rm\}$ .

$l$  : position occupée par le nœud dans un tour.

$k$  : numéro du camion.

$m$  : nombre de camions ( $m=3$  pour les camions à congélation et  $m=6$  pour les camions à refroidissement).

$n$  : nombre actuel de locations.

$r$  : nombre maximal de nœuds à visiter quotidiennement.

$d_{i,j}$  : distance entre les nœuds  $i$  et  $j$ .

$w_i$  : quantité à transporter pour le nœud  $i$ .

$W$  : capacité des camions ( $W=1000$  kg pour les camions à congélation et  $W=1500$  kg pour les camions à refroidissement).

#### Variables de décision

$x_{ik} = 1$  si le nœud  $i$  est assigné au camion  $k$  et 0 sinon.

$y_{ilk} = 1$  si le nœud  $i$  occupe la position 1 dans le tour pour le camion  $k$  et 0 sinon.

#### Fonction objectif

L'objectif est de minimiser la distance totale de distribution pour tous les camions :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{rm} \sum_{j=1}^{rm} \sum_{l=1}^{r-1} \sum_{k=1}^m d_{i,j} y_{i,l,k} y_{j,l+1,k} + \sum_{i=1}^{rm} \sum_{k=1}^m d_{0,i} y_{i,r,k} + \sum_{i=1}^{rm} \sum_{k=1}^m d_{0,i} y_{i,1,k}$$

### Contraintes

La contrainte (1) est une contrainte de capacité :

$$\sum_{i=1}^{rm} \sum_{l=1}^r w_i y_{i,l,k} \leq W \quad \text{pour } 1 \leq k \leq m \quad (1)$$

Les contraintes (2), (3) et (4) sont des contraintes d'assignation :

$$\sum_{k=1}^m x_{i,k} = 1 \quad \text{pour } 1 \leq i \leq rm \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{rm} \sum_{k=1}^m y_{i,l,k} = 1 \quad \text{pour } 1 \leq l \leq r \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^m y_{i,l,k} = 1 \quad \text{pour } 1 \leq i \leq rm \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^r y_{i,l,k} \leq x_{i,k} \quad \text{pour } 1 \leq i \leq rm \quad \text{et} \quad \text{pour } 1 \leq k \leq m \quad (5)$$

#### 2.4.3.3 Méthode de solution

Les auteurs ont utilisé l'heuristique de « Tillman et Cochran » pour résoudre ce problème. La programmation a été faite par le logiciel « Borlan Delphi ».

#### 2.4.3.4 Résultats et conclusion

En utilisant ce logiciel, l'entreprise a vu la distance réduite de 10,9 % pour les camions réfrigérés et de 23,4 % pour les camions à refroidissement.

### 2.4.4 Optimisation de la distribution d'aliments congelés et surgelés (Cho et Li, 2005)

#### 2.4.4.1 Définition du problème et objectif visé

Ayant un ensemble de clients demandant différentes marchandises, la compagnie dont il est question dans cet article, possède des camions frigorifiés ayant différents compartiments de différentes températures.

La flotte de camions doit partir du dépôt central livrer séquentiellement tous les clients et y revenir finalement. Le but de cette étude est donc de développer une tournée de véhicules sous les restrictions de capacité des camions frigorifiés et de leurs compartiments.

#### 2.4.4.2 La fonction objectif et les contraintes

##### Variables

$M = \{1, 2, \dots, m\}$  : ensemble d'aliments avec un niveau de température pour chacun d'eux.

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  : ensemble de nœuds.

$V = \{1, 2, \dots, v\}$  : ensemble de véhicules.

$c_{ij}$  : coût de transport de l'arc  $i$  vers l'arc  $j$ .

$d_{hi}$  : demande de l'aliment de type  $h$  par le client  $i$ .

$f$  : coût fixe d'un véhicule.

$g$  : coût fixe du container réfrigéré.

$p$  : nombre maximum de compartiments réfrigérés qui peuvent être mis dans un véhicule.

$q$  : capacité fixe d'un container.

$x_{ijk} = 1$  si l'arc  $(i, j)$  est traversé par le véhicule  $k$  et 0 sinon.

$y_{hk}$  : nombre de container transportant le type d'aliment  $h$  dans le véhicule  $k$ .

$z_i$  : variable pour éliminer les tours incomplets.

##### Fonction objectif

L'objectif est de minimiser les coûts totaux :

$$\min f \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v x_{0jk} + g \cdot \sum_{h=1}^m \sum_{k=1}^v y_{hk} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^v c_{ij} \cdot x_{ijk}$$

### Contraintes

La contrainte (1) garantit que chaque véhicule est utilisé une seule fois :

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (1)$$

La contrainte (2) assure la conservation du flux :

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} - \sum_{j=0}^n x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N, k \in V \quad (2)$$

La contrainte (3) assure que chaque client est servi par un seul véhicule :

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^v x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N / \{0\} \quad (3)$$

Les contraintes (4) et (5) assurent de ne pas excéder la capacité permise :

$$\sum_{i=1}^n \left( d_{hi} \cdot \sum_{j=0}^n x_{ijk} \right) - q \cdot y_{hk} \leq 0 \quad \forall h \in M, k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^m y_{hk} \leq p \quad \forall k \in V \quad (5)$$

La contrainte (6) élimine les tournées incomplètes :

$$z_i - z_j + n \cdot x_{ijk} \leq n - 1 \quad \forall i \text{ et } j \in N / \{0\}, k \in V \quad (6)$$

La contrainte (7) définit le domaine des variables :

$$x_{ijk} = 0 \text{ ou } 1, \quad y_{hk} \in I^+, z_i \geq 0 \quad \forall h \in M, i \text{ et } j \in N, k \in V \quad (7)$$

#### 2.4.4.3 Méthode de solution

Les auteurs ont utilisé l'heuristique de « *Clarck et Wright* » pour résoudre ce problème.

#### 2.4.4.4 Résultats et conclusion

Les auteurs ont comparé cette méthode avec le VRP classique et ils ont trouvé que leur méthode minimisait plus la distance parcourue.

## 2.4.5 Problème d'allocation et distribution de produits périssables (Federgruen et al., 1985)

### 2.4.5.1 Définition du problème et objectif visé

Ce modèle a pour but d'assurer que le transport s'effectue depuis un dépôt central jusqu'aux clients avec une demande aléatoire.

Dans l'article suivant, le produit livré est divisé en deux catégories selon sa fraîcheur. Chaque client aura la même proportion de produit « frais » et de produit « âgé ». Le but du modèle développé est d'ordonnancer ces deux types de produits et de les livrer à destination en minimisant les coûts totaux. Les auteurs traitent donc un problème combiné d'allocation et de transport.

### 2.4.5.2 La fonction objectif et les contraintes

#### Variables

$Y = \{1, 2, \dots, n\}$  : ensemble de points de livraison.

$K$  : nombre de véhicules.

$b_k$  : capacité du véhicule  $k$ .

$y_{ik}$  : égale à 1 si le point de livraison est assigné au véhicule  $k$  et 0 sinon.

$h_i^-$  : coût de rupture de stock par unité pour le client  $i$ .

$h_i^+$  : coût de péremption par unité pour le client  $i$ .

$\gamma_i$  : coût de transport du dépôt au client  $i$  par unité.

$A_i$  : inventaire du client  $i$  en produits « frais ».

$B_i$  : inventaire du client  $i$  en produits « âgés ».

$v_i$  : quantité de produits frais à livrer au client  $i$ .

$w_i$  : quantité de produits âgés à livrer au client  $i$ .

$$T_i = A_i + B_i$$

$$z_i = v_i + w_i$$

$$\sum_{k=0}^k y_{ik} = 1 \quad \text{pour : } i \in Y$$

### **Fonction objectif**

L'objectif est de minimiser les coûts de transport, de rupture de stock et de péremption :

$$\text{Min} \sum_{i \in Y} [p_i(z_i) + r_i(w_i)]$$

avec :

$$p_i(z) = \int_{T_i+z}^{\infty} h_i^-(\xi - T_i - z) dF_i(\xi) + \gamma_i z$$

$$r_i(w_i) = \int_0^{A_i+w_i} h_i^+(A_i + w_i - \xi) dF_i(\xi)$$

$$Dp_i(z) = h_i^- [F_i(T_i + z) - 1] + \gamma_i$$

$$Dr_i(w_i) = h_i^+ F_i(A_i + w_i) \quad i \in Y$$

$p_i(z_i)$  : coûts de transport et de rupture de stock.

$r_i(w_i)$  : coûts de péremption.

### Contraintes

La contrainte (1) est une contrainte qui assure que le produit total livré ne peut être supérieur au stock présent :

$$\sum_{i \in Y} z_i \leq A + B \quad (1)$$

La contrainte (2) assure que tous les produits « âgés » vont être distribués avant leur péremption :

$$\sum_{i \in Y} w_i = B \quad (2)$$

La contrainte (3) est une contrainte de capacité des véhicules :

$$\sum_{i \in Y_k} z_i \leq b_k \quad k = 0, \dots, K \quad (3)$$

$$z_i \geq w_i \geq 0 \quad i \in Y \quad (4)$$

#### **2.4.5.3 Méthode de solution**

Les auteurs ont utilisé une solution exacte avec la dualisation Lagrangienne ainsi qu'une heuristique.

#### **2.4.5.5 Résultats et conclusion**

Les auteurs ont trouvé que leur modèle donnait de meilleurs résultats en comparaison à un autre modèle traitant le problème d'allocation et de transport séparément.

## **Chapitre 3**

### **Classification des modèles de distribution des produits périssables**

Dans cette section, le but est de classer des modèles de transport de produits périssables en catégories jugées pertinentes pour cette recherche.

Les modèles ont été ainsi classifiés en 6 catégories qui sont les suivantes :

1) Les contraintes, 2) Les produits à transporter, 3) L'outil de solution, 4) La technique de solution, 5) Les composantes de la fonction objectif, 6) Les activités.

#### **3.1 Classification par types de contraintes**

En général, les contraintes utilisées dans les modèles d'optimisation de transport et de distribution des produits périssables servent à contrôler le réseau de distribution et/ou de transport ainsi qu'à l'acheminement correct du produit à travers le réseau. Ces contraintes aident également à satisfaire au mieux les exigences du client.

Dans cette section, la classification des modèles mathématiques selon les contraintes sera présentée dans le tableau 1.

**Tableau 1 : Classification des modèles par types de contraintes**

<b>Auteurs</b> / <b>Types de contraintes</b>	Conservation de flux	Capacité des centres de distribution	Capacité de production	Capacité des véhicules	Fenêtre horaire	Longueur de la tournée des véhicules	Quantité à livrer par client	Péréemption du produit
Van Vliet et al. (1992)	X						X	
Higgins (2006)	X							X
Tarantilis et Kiranoudis (2001)	X	X		X		X	X	
Belenguer et al. (2005)	X			X	X		X	
Basnet et al. (1999)	X			X				
Foulds et Wilson (1997)	X						X	
Faulin (2003)	X			X			X	
Hsu et Hung (2003)	X			X	X		X	X
Panapinun et Charnsethikul, (2005)	X			X		X	X	
Cho et Li (2005)	X			X			X	
Federgruen et al. (1985)	X		X	X			X	X
Pooley (1994)	X	X	X				X	

### **3.2 Classification par produits à transporter**

On remarque que certains modèles étudiés peuvent être applicables à plusieurs types d'industries, comme le modèle de Federgruen et al. (1985). De plus, les modèles de transport de viande et de lait peuvent être considérés comme un cas particulier des produits congelés et réfrigérés. Cette classification est présentée dans le tableau 2.

**Tableau 2 : Classification des modèles par produit à transporter**

Types de produits Auteurs	sucre	lait	Produits congelés et réfrigérés	viande	Théorique
Van Vliet et al. (1992)	X				
Higgins (2006)	X				
Tarantilis et Kiranoudis (2001)			X	X	
Belenguer et al. (2005)			X	X	
Basnet et al. (1999)		X	X		
Foulds et Wilson (1997)		X	X		
Faulin (2003)			X		
Hsu et Hung (2003)			X		
Panapinun et Charnsethikul, (2005)			X		
Cho et Li (2005)			X		
Federgruen et al. (1985)					X
Pooley (1994)		X	X		

### 3.3 Classification par outils de solution

Cette classification a pour but de détecter l'outil informatique le plus utilisé par les auteurs : c'est le langage C++. On remarque toutefois qu'il y a des modèles qui utilisent plus d'un outil de solution (Faulin, 2003). Cette classification est présentée dans le tableau 3.

**Tableau 3** : Classification des modèles par outil de solution

Modèles	Outils de solution
Van Vliet et al. (1992)	Langage C
Higgins (2006)	Lahey Fortran 95
Tarantilis et Kiranoudis (2001)	Langage C++
Belenguer et al. (2005)	Langage C++
Basnet et al. (1999)	Xpress-Mp
Foulds et Wilson (1997)	Fortran
Faulin (2003)	Matlab 6.0 \ Lindo \ Visual Map 2002
Panapinun et Charnsethikul, (2005)	Borlan Delphi
Pooley (1994)	Super-Lindo

### 3.4 Classification par techniques de solution

Pour connaître les techniques de recherche opérationnelle utilisées en optimisation de transport des produits périssables, nous avons classifié les auteurs selon leurs techniques de solution. Cette classification est montrée dans le tableau 4.

On remarque alors que les heuristiques sont les techniques de solution les plus adéquates à ce genre de problèmes, étant donné que le problème de transport est n-p complet (Van Vliet et al., 1992), (Foulds et Wilson 1997), (Faulin, 2003), (Hsu et Hung, 2003), (Cho et Li, 2005) (Federgruen et al., 1985).

Néanmoins, il est à noter que dans le cas de Pooley (1994), c'est la programmation linéaire qui a été utilisée pour trouver une solution exacte optimale.

**Tableau 4** : Classification des modèles par technique de solution

Modèles	Techniques de solution
Van Vliet et al. (1992)	Heuristique + relaxation Lagrangienne
Higgins (2006)	Metaheuristiques : "Tabu Search" et "Variable Neighborhood Search"
Tarantilis et Kiranoudis (2001)	Metaheuristique : "List Based Threshold Algorithm"
Belenguer et al. (2005)	Metaheuristique : "Tabu Search"
Basnet et al. (1999)	Branch and Bound
Foulds et Wilson (1997)	Heuristiques : "Knapsack" et "The Assignment Approach"
Faulin (2003)	Heuristiques de "Clarck and Wright" et ALGACEA de "Faulin et Gil"

**Tableau 4** : Classification des modèles par technique de solution (suite)

Modèles	Techniques de solution
Hsu et Hung (2003)	Heuristique : "Time Oriented Nearest-Neighbor Heuristic"
Panapinun et Charnsethikul, (2005)	Heuristique de "Tillman et Cochran"
Cho et Li (2005)	Heuristique de "Clarck et Wright"
Federgruen et al. (1985)	Heuristique +dualisation Lagrangienne
Pooley (1994)	Programmation linéaire

### 3.5 Classification des modèles par composantes de la fonction objectif

Cette classification a pour but de distinguer les composantes essentielles de la fonction objectif utilisée pour l'optimisation du système de transport. Dans les modèles étudiés, toutes les composantes tendent à diminuer la fonction objectif. La composante la plus utilisée est le coût de transport. De plus, le modèle de Pooley (1994) est le seul qui inclut dans la fonction objectif des coûts fixes relatifs à l'utilisation des centres de distribution. Cette classification est montrée dans le tableau 5.

**Tableau 5** : Classification des modèles par composante de la fonction objectif

<b>Objectifs</b> <b>Auteurs</b>	Temps de travail des véhicules	Nombre de véhicules utilisés	Temps d'attente	Coût de transport	Coût d'inventaire	Coût d'énergie	Distance de parcours	Coût de péremption	Coût de rupture de stock	Coûts fixes
Van Vliet et al. (1992)	X	X								
Higgins (2006)			X							
Tarantilis et Kiranoudis (2001)				X						
Belenguer et al. (2005)				X						
Basnet et al. (1999)				X						
Foulds et Wilson (1997)	X									
Faulin (2003)				X						
Hsu et Hung (2003)				X	X	X				
Panapinun et Chamsethikul, (2005)							X			
Cho et Li (2005)				X						
Federgruen et al. (1985)				X				X	X	
Pooley (1994)				X						X

### **3.6 Classification des modèles selon les activités**

Les activités typiques de la distribution de produits périssables sont le transport et la livraison. Cependant, et selon le produit, on peut trouver d'autres activités comme par exemple pour les modèles de Basnet et al. (2004) ainsi que celui de Foulds et Wilson (1997). On trouve également des activités de collecte et de déchargement qui sont propres à la distribution du lait. Par ailleurs, on remarque que l'activité d'allocation n'est présente que dans le modèle de Federgruen et al. (1985) et celui de Pooley (1994). Cette classification est montrée dans le tableau 6.

**Tableau 6** : Classification des modèles selon les activités

<b>Auteurs</b> \ <b>Types d'activités</b>	collecte	transport	livraison	Chargement\ Déchargement	Allocation
Van Vliet et al. (1992)		X		X	
Higgins (2006)		X		X	
Tarantilis et Kiranoudis (2001)		X	X		
Belenguer et al. (2005)		X	X		
Basnet et al. (1999)	X	X		X	
Foulds et Wilson (1997)	X	X		X	
Faulin (2003)		X	X		
Hsu et Hung (2003)		X	X		
Panapinun et Chamsethikul, (2005)		X	X		
Cho et Li (2005)		X	X		
Federgruen et al. (1985)		X	X		X
Pooley (1994)		X	X		X

Les classifications précédentes nous serviront comme guide dans les volets suivants lors de la construction de notre modèle afin de déterminer :

- Les paramètres et des variables décisionnelles du modèle
- La formulation
- Les composantes de la fonction objectif
- Les méthodes de solution
- Les outils informatiques de solution

## **Chapitre 4**

### **Sélection et choix du modèle**

#### **4.1 Critères de sélection**

Suite à l'étude des modèles mathématiques et leur classification qui a été présentée dans les chapitres précédents, le modèle qui répond le plus à notre recherche est celui de Pooley (1994). Plusieurs raisons justifient ce choix :

- 1- Ce modèle est conçu pour la distribution de plusieurs produits périssables. De plus, il s'agit de produits laitiers réfrigérés, tel qu'il sera le cas dans notre étude.
  
- 2- Le modèle traite le problème d'optimisation d'un réseau de distribution à trois niveaux (usines, centres de distribution et marchés), ce qui est similaire à la recherche présente.
  
- 3- Il s'agit d'un modèle linéaire mixte capable de sélectionner les usines et les centres de distribution qui entrent dans le réseau de distribution optimal ainsi que d'assigner les quantités à transporter entre les différents points de ce réseau.
  
- 4- Les composantes de la fonction objectif traitées dans le modèle de Pooley (1994) sont les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution, les coûts de transport entre les centres de distribution et les marchés et les coûts fixes. Ces éléments représentent les composantes principales dans la modélisation d'un problème d'optimisation d'un réseau de distribution. La structure de ce modèle ressemble à la structure du modèle envisagé.

5- Ce modèle présente des contraintes relatives à la capacité de production des usines et à celles des centres de distribution. Ces deux types de contraintes vont être utilisés dans notre modèle.

En étudiant le modèle de Pooley (1994), plusieurs éléments nécessaires dans le cas du transport des produits laitiers réfrigérés sont retrouvés. Cela se manifeste par ce qui suit :

#### 4.2 La fonction objectif

La fonction objectif consiste à minimiser les coûts totaux et elle contient cinq composantes :

- les coûts de production des produits
- les coûts fixes relatifs aux usines
- les coûts fixes relatifs aux centres de distribution
- les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution
- les coûts de transport entre les centres de distribution et les marchés

Les composantes en commun entre le modèle de Pooley (1994) et le modèle envisagé dans notre étude sont celles des coûts fixes relatifs aux centres de distribution, les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution et les coûts de transport entre les centres de distribution et les marchés.

La fonction objectif du modèle de Pooley (1994) vise à minimiser les coûts de production, les coûts fixes et les coûts de transport totaux :

$$\min \sum_i \left( e_i A_i + \sum_{jl} p_{il} X_{ijl} \right) + \sum_j \left( f_j B_j + v_j \sum_{kl} C_{jk} d_{kl} \right) + \sum_{ijl} c_{ijl} X_{ijl} + \sum_{jkl} h_{jkl} C_{jk}$$

avec les variables suivantes :

- $i$  : ensemble d'usines.
- $j$  : ensemble des centres de distribution
- $k$  : ensemble des marchés.
- $l$  : ensemble des produits.
- $X_{ijl}$  : quantités de produits  $l$  transportés entre les usines  $i$  et les centres de distribution  $j$ .
- $A_i$  : égale à 1 si l'usine est implantée dans site  $i$  et 0 sinon.
- $B_j$  : égale à 1 si le centre de distribution est implantée dans le site  $j$  et 0 sinon.
- $C_{jk}$  : égale à 1 si le centre de distribution  $j$  sert le client  $k$  et 0 sinon.
- $P_i$  : capacité de production annuelle de l'usine  $i$ .
- $W_j$  : capacité annuelle du centre de distribution  $j$ .
- $e_i$  : coûts fixes de l'usine dans le site  $i$ .
- $f_j$  : coûts fixes du centre de distribution dans le site  $j$ .
- $P_{il}$  : coût unitaire de production du produit  $l$  a l'usine  $i$ .
- $v_j$  : coût moyen variable par unité dans le centre de distribution  $j$ .
- $c_{ijl}$  : coût de transport par unité de produit  $l$  acheminé de l'usine  $i$  vers le centre de distribution  $j$ .
- $h_{jkl}$  : coûts totaux de transport du produit  $l$  acheminé du centre de distribution  $j$  vers le marché  $k$ .
- $d_{kl}$  : demande du marché  $k$  pour le produit  $l$ .

### 4.3 Les contraintes

Le modèle comprend 3 types de contraintes :

- contrainte de capacité de production des usines :

$$\sum_{jl} X_{ijl} \leq A_i P_i \quad \text{pour tout } i$$

- contrainte de capacité des centres de distribution :

$$\sum_{kl} Y_{jkl} \leq B_j W_j \quad \text{pour tout } j$$

- contraintes de conservation du flux :

$$\sum_{ij} X_{ijl} = \sum_{jk} C_{jk} d_{kl} \quad \text{pour tout } l$$

$$\sum_j C_{jk} = 1 \quad \text{pour tout } k$$

$$X_{ijl} \geq 0$$

$$A_i, B_j, C_{jk} = 0 \text{ ou } 1$$

Ces quatre types de contraintes seront utiles pour notre modèle.

Le modèle proposé aura donc comme objectif de minimiser les coûts totaux de transport en ayant comme composantes :

- une composante qui tend à diminuer les coûts de transport totaux.
- une composante qui tend à diminuer les coûts fixes des centres de distribution.

Tout en respectant les contraintes suivantes :

- contrainte de capacité de production des usines.
- contrainte de capacité des centres de distribution.
- contraintes de conservation du flux.

## Chapitre 5

### Le problème d'optimisation du réseau de distribution de produits laitiers

#### 5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, les spécificités reliées au transport des produits périssables ont été mises en relief. En effet, les produits périssables nécessitent des conditions de transport bien déterminées. Dans le cas suivant, il s'agit de produits laitiers dont la réfrigération durant tout le trajet est essentielle. De plus, ce type de denrées présente une durée de conservation limitée. Le respect de la chaîne de froid, des quantités restreintes de produits acheminés et des livraisons plus fréquentes sont donc nécessaires. Ceci influera donc sur les coûts de transport totaux.

#### 5.2 Présentation du problème actuel

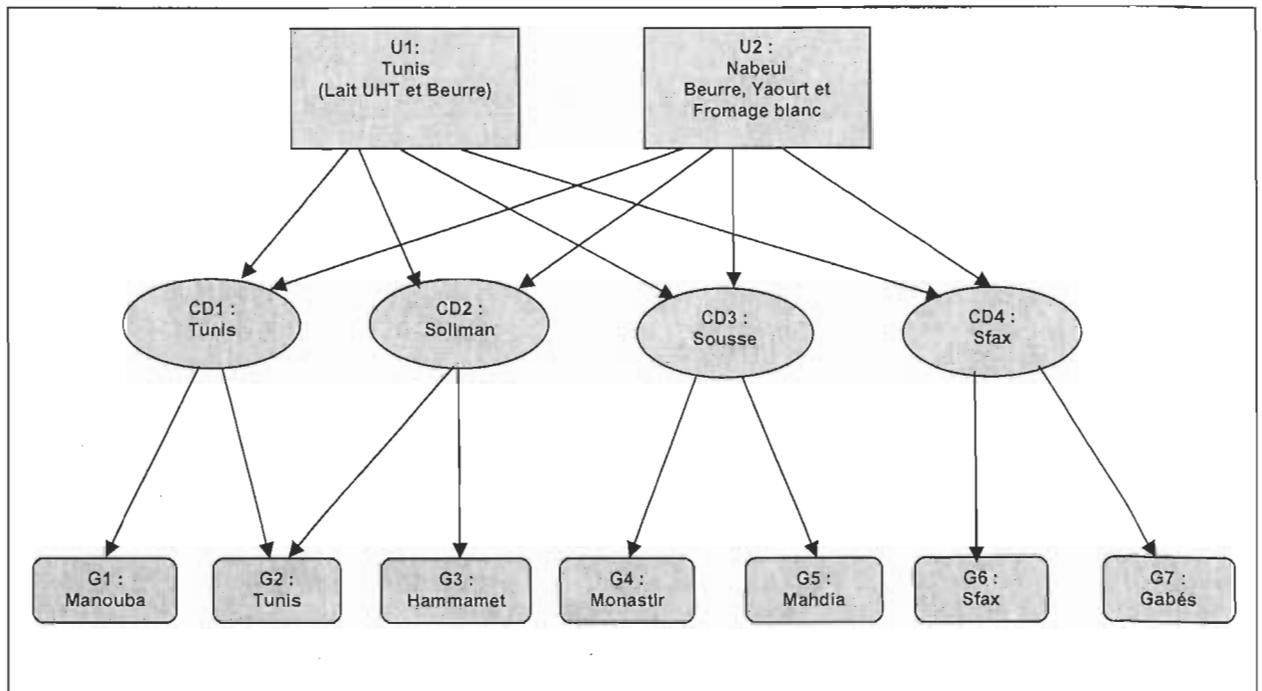
Le cas présent est celui du réseau de distribution de produits laitiers. Ceci est dans le cadre d'une compagnie qui possède des installations réparties sur toute la Tunisie.

Le réseau de distribution comprend trois niveaux distincts :

- deux usines de transformation du lait
- quatre centres de distribution
- sept grossistes

La compagnie possède deux unités de production : la première usine située à Tunis étant spécialisée dans la transformation du lait en lait UHT et la fabrication du beurre, la seconde usine située à Nabeul produit du yaourt, du beurre et du fromage blanc. Les produits sont ensuite acheminés vers les 4 centres de distribution (CD) affiliés à la compagnie, ces derniers se chargent alors de l'approvisionnement des grossistes (G).

Se basant sur l'emplacement de ses centres de distribution par rapport aux grossistes, la compagnie a établi un réseau de distribution bien déterminé de manière à ce que chaque centre de distribution desserve les grossistes les plus proches. Ce réseau est représenté dans la figure 4.



**Figure 4 :** représentation schématique du réseau de distribution actuel des produits laitiers

Toutefois, la compagnie prévoit une augmentation de la demande pour ses différents produits. La capacité actuelle des centres de distribution ne permettra donc plus de couvrir la demande des différents grossistes qui leur sont assignés. En effet, avec l'organisation actuelle du réseau, certains de ces centres recevront des quantités qui dépasseront leur capacité de stockage. Ceci entraînera alors un déséquilibre dans le flux de distribution vers les grossistes mais également des problèmes quant à la qualité des produits périssables nécessitant une réfrigération adéquate (le beurre, le yaourt et le fromage blanc).

La demande des grossistes devant être respectée et leur approvisionnement continu, les centres de distribution sont donc tenus de les fournir suffisamment en produits tout en respectant leur propre capacité mais également la contrainte de capacité de production des usines. Les grossistes doivent également être approvisionnés par des centres de distribution bien déterminés de manière à minimiser les coûts totaux de transport : entre les usines et les centres de distribution et entre ces centres de distribution et les grossistes. Une nouvelle réorganisation du réseau de distribution devra donc être établie.

### 5.3 Les données

Les données utilisées dans cette étude dont le but est de trouver le réseau de distribution optimum sont basées sur les prévisions de la compagnie pour l'année 2008. Ces données comportent la production mensuelle de chacune des deux usines ainsi que les quantités demandées par les grossistes pour chacun des quatre produits. Ces données sont présentées dans les tableaux 7 et 8.

**Tableau 7** : production mensuelle de chacune des usines (en tonnes/mois)

	Lait UHT	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Usine 1	520	230	0	0
Usine 2	0	47	342	62

**Tableau 8 :** quantités demandées par les grossistes pour chaque produit (en tonnes/mois)

grossistes produits	1	2	3	4	5	6	7
Lait	67	53	87	46	58	84	65
Beurre	22	37	24	21	32	30	37
yaourt	35	27	72	47	68	18	39
fromage	12	5	7	8	10	14	3

Étant donné que les coûts de transport sont directement reliés à la distance parcourue entre les différents points du réseau de distribution, deux matrices de distances (usines-centres de distribution et centres de distribution-grossistes) ont été établies et sont représentées dans les tableaux 9 et 10.

**Tableau 9 :** distances entre les usines et les centres de distribution (en Km)

	Usine 1	Usine 2
Centre de distribution 1	12	70
Centre de distribution 2	34	35
Centre de distribution 3	142	67
Centre de distribution 4	285	210

**Tableau 10** : distances entre les centres de distribution et les grossistes (en Km)

	Centre de distribution 1	Centre de distribution 2	Centre de distribution 3	Centre de distribution 4
Grossiste 1	10	42	155	295
Grossiste 2	7	31	138	282
Grossiste 3	62	26	67	182
Grossiste 4	137	115	22	141
Grossiste 5	181	132	52	72
Grossiste 6	276	253	135	8
Grossiste 7	370	352	245	125

Les véhicules utilisés lors du transport de la marchandise entre les différents points du réseau de distribution sont de deux types :

- des camions non frigorifiques pour le transport du lait UHT
- des camions frigorifiques pour le transport du beurre, du yaourt et du fromage blanc

Les données représentées dans le tableau 11 se rapportent au coût de transport d'une tonne de produit par Km parcouru.

**Tableau 11** : coûts de transport par tonne de produit par Km parcouru entre les usines et les centres de distribution et entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars/Km/tonne) :

	produits non réfrigérés	Produits réfrigérés
Usines → Centres de distribution	0,024	0,032
Centres de distribution → Grossistes	0,045	0,063

En se basant sur les matrices de distances vues dans les tableaux 9 et 10 et sur les données représentées dans le tableau 11 se rapportant au coût de transport d'une tonne de produit par Km parcouru, les coûts de transport par tonne de produit acheminé entre les usines et les centres de distribution (tableau 12) et entre les centres de distribution et les grossistes (tableau 13) ont été calculés.

**Tableau 12** : coûts de transport par tonne de produit entre les usines et les centres de distribution (en Dinars/tonne)

	Produits non réfrigérés	Produits réfrigérés	
	Usine 1	Usine 1	Usine 2
Centre de distribution 1	0,29	0,38	2,24
Centre de distribution 2	0,82	1,09	1,12
Centre de distribution 3	3,41	4,54	2,14
Centre de distribution 4	6,84	9,12	6,72

**Tableau 13 :** coût de transport par tonne de produit entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars/tonne)

	Produits non réfrigérés				Produits réfrigérés			
	Centre de distribution	Centre de distribution	Centre de distribution	Centre de distribution	Centre de distribution	Centre de distribution	Centre de distribution	Centre de distribution
	1	2	3	4	1	2	3	4
Grossiste 1	0,45	1,89	6,98	13,28	0,63	2,65	9,77	18,59
Grossiste 2	0,32	1,40	6,21	12,69	0,44	1,95	8,69	17,77
Grossiste 3	2,79	1,17	3,02	8,19	3,91	1,64	4,22	11,47
Grossiste 4	6,17	5,18	0,99	6,35	8,63	7,25	1,39	8,88
Grossiste 5	8,15	5,94	2,34	3,24	11,40	8,32	3,28	4,54
Grossiste 6	12,42	11,39	6,08	0,36	17,39	15,94	8,51	0,50
Grossiste 7	16,65	15,84	11,03	5,63	23,31	22,18	15,44	7,88

En plus d'avoir des coûts variables qui sont dans notre cas les coûts de transport, des coûts fixes sont considérés pour chacun des centres de distribution. Ces coûts fixes représentent l'amortissement des bâtiments, les coûts liés à la réfrigération et les taxes foncières. Ces données sont représentées dans le tableau 14.

**Tableau 14** : coûts fixes reliés aux différents centres de distribution (en Dinars)

	Coûts fixes
Centre de distribution 1	1580
Centre de distribution 2	1620
Centre de distribution 3	1425
Centre de distribution 4	1320

Les différents centres de distribution sont tenus de respecter une capacité de stockage qui leur est propre, d'autant plus que dans notre cas il s'agit de produits laitiers réfrigérés, donc périssables, qui nécessitent certaines précautions quant à la réfrigération mais surtout la durée stockage. Les capacités de stockage pour chaque centre de distribution sont données dans le tableau 15.

Toutefois, il est à noter que ces capacités représentent la quantité maximale mensuelle de produits qui peuvent transiter entre le centre de distribution en question et les grossistes qu'il dessert.

**Tableau 15** : capacités de stockage des différents centres de distribution (en tonnes/mois)

	Lait UHT	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Centre de distribution 1	90	70	90	15
Centre de distribution 2	115	40	72	27
Centre de distribution 3	150	83	88	5
Centre de distribution 4	145	80	87	12

#### 5.4 La fonction objectif et les contraintes

Les éléments dont la fonction objectif tient compte sont les suivants :

- les quantités de produit livrées des usines vers les centres de distribution
- les quantités de produit livrées des centres de distribution vers les grossistes
- les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution
- les coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes
- les coûts fixes des centres de distribution

Les variables du modèle, la fonction objectif ainsi que les contraintes sont présentées ci-dessous :

<b>Indices</b>	
$i$	produits
$j$	usines
$k$	centres de distribution
$l$	grossistes
<b>Paramètres</b>	
$D_{il}$	Quantité de produit $i$ demandée par le grossiste $l$ par mois
$S_{ij}$	Capacité de production l'usine $j$ pour le produit $i$ par mois
$C_{ijk}$	Coût de transport par tonne de produit $i$ livré de l'usine $j$ vers le centre de distribution $k$
$G_{ikl}$	Coût de transport par tonne de produit $i$ livré du centre de distribution $k$ vers le grossiste $l$
$F_k$	Coûts fixes du centre de distribution $k$ par mois
$K_{ik}$	Capacité de stockage du centre de distribution $k$ pour le produit $i$ par mois
<b>Variables de décision</b>	
$Z_k$	0 ou 1 pour la sélection d'un centre de distribution $k$
$X_{ijk}$	Quantité de produit $i$ livrée de l'usine $j$ au centre de distribution $k$
$Y_{ikl}$	Quantité de produit $i$ livrée du centre de distribution $k$ au grossiste $l$

La fonction objectif tend à minimiser les coûts totaux de transport et les coûts fixes :

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j \sum_k C_{ijk} * X_{ijk} + \sum_i \sum_k \sum_l G_{ikl} * Y_{ikl} + \sum_k F_k * Z_k \quad (1)$$

Sujet à :

$$\sum_k X_{ijk} \leq S_{ij} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_j X_{ijk} \leq K_{ik} * Z_k \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{ikl} = D_{il} \quad \forall i, l \quad (4)$$

$$\sum_l Y_{ikl} = \sum_j X_{ijk} \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$Z_k = 0,1 \quad (6)$$

La contrainte (2) assure le respect de la capacité de production des usines.

La contrainte (3) assure le respect de la capacité de stockage des centres de distribution.

La contrainte (4) assure que la demande des grossistes soit satisfaite.

La contrainte (5) assure la conservation du flux.

### 5.5 La modélisation

Le modèle utilisé est un modèle mixte qui comprend des variables entières et des variables binaires. Les quantités désignées dans le modèle sont des quantités mensuelles. Les variables décisionnelles sont les quantités transportées des usines vers les centres de distribution et des centres de distribution vers les différents grossistes ainsi que l'utilisation ou non de tous les centres de distribution.

## 5.6 L'outil de solution

L'outil de solution choisi pour cette étude est le logiciel LINDO. Ceci est expliqué par sa capacité à utiliser jusqu'à 150 contraintes, 300 variables et 50 variables entières. Ceci nous permet donc de résoudre notre problème actuel du réseau de distribution des produits laitiers.

## 5.7 Les résultats

Les quantités optimales des différents produits acheminés entre les usines et leurs centres de distribution sont représentées dans le tableau 16.

**Tableau 16** : quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes) :

	Usine 1		Usine 2		
	Lait UHT	Beurre	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Centre de distribution 1	90	59	0	62	15
Centre de distribution 2	115	24	0	72	27
Centre de distribution 3	110	6	47	88	5
Centre de distribution 4	145	67	0	84	12

D'après le tableau 16, nous pouvons constater que tous les centres de distributions sont fournis par chacune des deux usines. Ceci s'explique par le fait que l'usine 1 est la seule à produire le lait UHT et que l'usine 2 a l'exclusivité pour produire le yaourt et le fromage blanc. Toutefois, en ce qui concerne le beurre, la totalité de la production de l'usine 2 est acheminée vers un seul centre de distribution, le centre de distribution 3.

Néanmoins, du à la contrainte de capacité de production de l'usine 2 (47 tonnes de beurre/mois), ces quantités produites ne suffisent pas à couvrir totalement la demande en beurre du centre de distribution 3. Ce dernier est alors contraint d'être approvisionné en plus par l'usine 1.

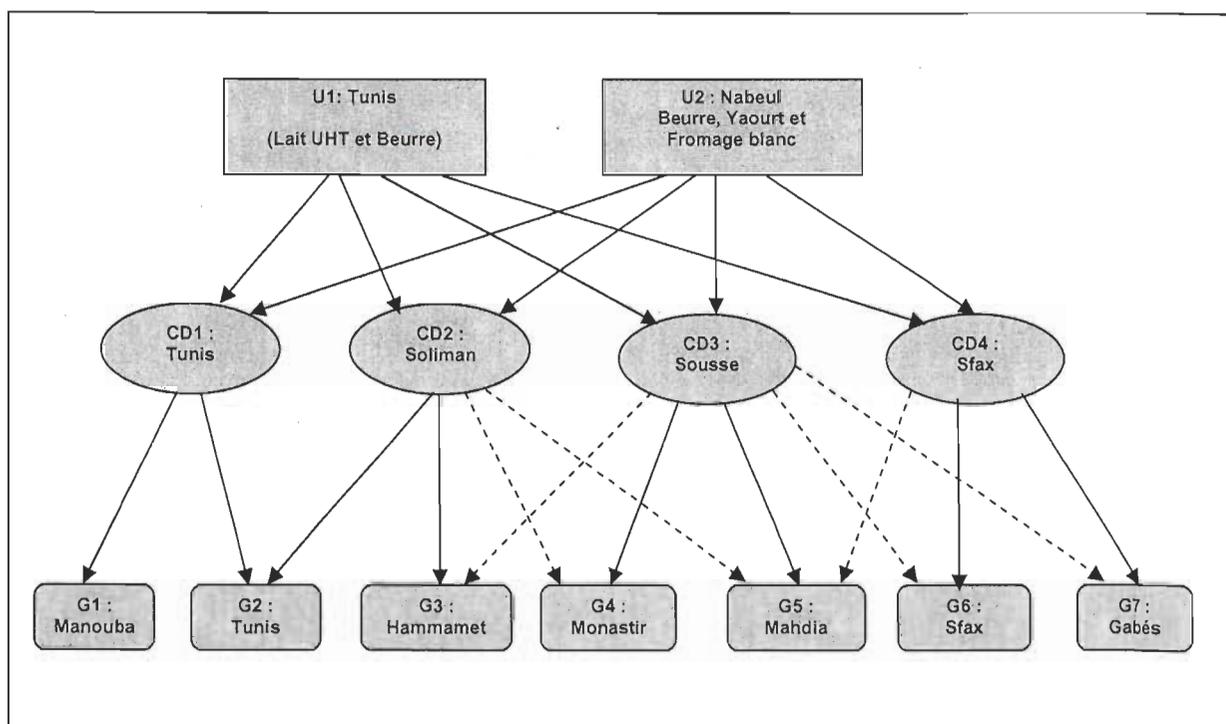
Les quantités optimales des différents produits acheminés entre les centres de distribution et les grossistes sont représentées dans le tableau 17.

**Tableau 17** : quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes)

	Produits	Grossiste 1	Grossiste 2	Grossiste 3	Grossiste 4	Grossiste 5	Grossiste 6	Grossiste 7
<b>Centre de distribution 1</b>	Lait UHT	67	23	0	0	0	0	0
	beurre	22	37	0	0	0	0	0
	yaourt	35	27	0	0	0	0	0
	Fromage blanc	12	3	0	0	0	0	0
<b>Centre de distribution 2</b>	Lait UHT	0	30	85	0	0	0	0
	beurre	0	0	24	0	0	0	0
	yaourt	0	0	72	0	0	0	0
	Fromage blanc	0	2	7	8	10	0	0
<b>Centre de distribution 3</b>	Lait UHT	0	0	2	46	58	0	4
	beurre	0	0	0	21	32	0	0
	yaourt	0	0	0	47	41	0	0
	Fromage blanc	0	0	0	0	0	2	3
<b>Centre de distribution 4</b>	Lait UHT	0	0	0	0	0	84	61
	beurre	0	0	0	0	0	30	37
	yaourt	0	0	0	0	27	18	39
	Fromage blanc	0	0	0	0	0	12	0

D'après le tableau 17 nous pouvons constater qu'en ce qui concerne le grossiste 1, le facteur de transport a été le plus influençant pour déterminer par quel centre de distribution il sera approvisionné par les différents produits. En effet, le grossiste 1 est fourni en totalité par le centre de distribution 1. Il en est de même pour le grossiste 2. Toutefois, pour des raisons de capacité du centre de distribution 1, le grossiste 2 s'est vu couvrir le reste de sa demande en lait UHT et en fromage blanc par le centre de distribution 2.

Dans notre cas, tous les centres de distribution ont été sollicités. Ceci est dû à leur localisation actuelle par rapport aux usines et par rapport aux différents grossistes mais surtout à cause de la contrainte de capacité afférente à chacun d'entre eux. Le réseau optimal de distribution des différents produits est représenté dans la figure 5 (illustré par des traits pleins).



**Figure 5 :** Le réseau optimal de distribution des différents produits

En comparaison par rapport à la situation actuelle (illustré par des traits hachurés), certains centres de distribution se verront approvisionner des grossistes qu'ils ne fournissaient pas avant. C'est le cas des centres de distribution 2, 3 et 4. Ceci est dû aux contraintes de capacité.

Tous les coûts fixes liés à chacun des centres de distribution seront donc pris en compte, ce qui affectera les coûts de transport totaux.

Ces coûts s'élèveront alors à **11665,28 Dinars Tunisiens** et seront répartis comme suit :

**Tableau 18** : Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les usines et les centres de distribution :

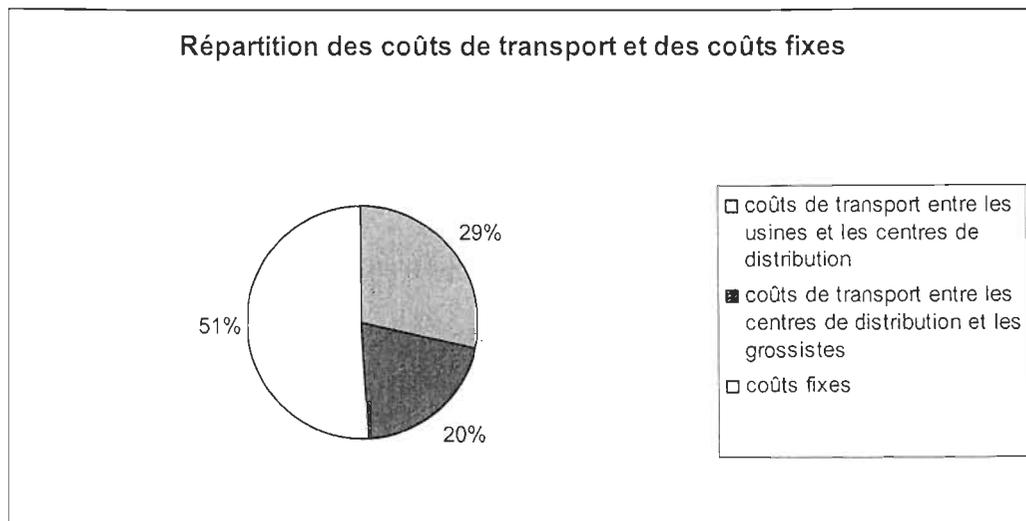
		Centre de distribution 1			Centre de distribution 2			Centre de distribution 3			Centre de distribution 4		
		Coût/t	Qt.	Coût tot.									
<b>Usine 1</b>	Produits non réfrigérés	0,29	90	<b>25,92</b>	0,812	115	<b>93,84</b>	3,41	110	<b>374,88</b>	6,84	145	<b>991,8</b>
	Produits réfrigérés	0,38	59	<b>22,66</b>	1,09	24	<b>26,11</b>	4,54	6	<b>27,26</b>	9,12	67	<b>611,04</b>
<b>Usine 2</b>	Produits réfrigérés	2,24	77	<b>172,48</b>	1,12	99	<b>110,88</b>	2,14	140	<b>299,60</b>	6,72	96	<b>645,12</b>

Le total des coûts de transport des différents produits entre les usines et les centres de distribution s'élèveront à **3401,96 Dinars Tunisiens**.

**Tableau 19** : Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les centres de distribution et les grossistes :

		Centre de distribution 1			Centre de distribution 2			Centre de distribution 3			Centre de distribution 4		
		Coût/t	Qt.	Coût tot.									
Grossiste 1	Produits non réfrigérés	0,45	67	30,15	1,89	0	0	6,98	0	0	13,28	0	0
	Produits réfrigérés	0,63	69	43,47	2,65	0	0	9,77	0	0	18,59	0	0
Grossiste 2	Produits non réfrigérés	0,32	23	7,36	1,4	30	42	6,21	0	0	12,69	0	0
	Produits réfrigérés	0,44	67	29,48	1,95	2	3,9	8,69	0	0	17,77	0	0
Grossiste 3	Produits non réfrigérés	2,79	0	0	1,17	85	99,45	3,02	2	6,04	8,19	0	0
	Produits réfrigérés	3,91	0	0	1,64	103	168,9	4,22	0	0	11,47	0	0
Grossiste 4	Produits non réfrigérés	6,17	0	0	5,18	0	0	0,99	46	45,54	6,35	0	0
	Produits réfrigérés	8,63	0	0	7,25	8	58	1,39	68	94,52	8,88	0	0
Grossiste 5	Produits non réfrigérés	8,15	0	0	5,94	0	0	2,34	58	135,7	3,24	0	0
	Produits réfrigérés	11,40	0	0	8,32	10	83,2	3,28	73	239,4	4,54	27	122,6
Grossiste 6	Produits non réfrigérés	12,42	0	0	11,39	0	0	6,08	0	0	0,36	84	30,2
	Produits réfrigérés	17,39	0	0	15,94	0	0	8,51	2	17,02	0,50	60	30
Grossiste 7	Produits non réfrigérés	16,65	0	0	15,84	0	0	11	4	44,12	5,63	61	343,4
	Produits réfrigérés	23,31	0	0	22,18	0	0	15,4	3	46,32	7,88	76	598,9

Le total des coûts de transport des différents produits entre les centres de distribution et les grossistes s'élèveront à **2319,78 Dinars Tunisiens.**



**Figure 6** : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux.

La figure 6 montre que les coûts fixes représentent 51% des coûts totaux. Ceci s'explique par le fait que nous avons affaire à des produits périssables qui nécessitent une réfrigération continue. On remarque également que les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution sont supérieurs aux coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes. Ceci est dû à la proximité des centres par rapport aux grossistes.

### 5.8 Conclusion

Le modèle développé pour résoudre le problème d'acheminement des produits laitiers entre les différents points du réseau distribution a l'avantage de prendre en compte 3 niveaux différents : les usines, les centres de distribution et les grossistes. Il permet donc la planification des différents trajets pour la régulation des tournées de véhicules et des quantités de produits acheminées et ce en se basant sur la demande des grossistes, la capacité de stockage des centres de distribution, les coûts de transport et sur la capacité de production des usines. Ce modèle peut donc être utilisé pour résoudre des problèmes similaires lors du transport de produits périssables.

## 5.9 Les scénarios

Dans les scénarios qui suivent, différentes options concernant le réseau de distribution seront explorées. Ces scénarios sont étudiés afin de mesurer l'impact qu'auront les changements proposés sur les coûts totaux de transport et seront comparés au cas précédent.

### 5.9.1 Scénario 1

Sachant que les coûts fixes représentent plus de la moitié des coûts totaux, la fermeture d'un des centres de distribution est envisageable afin de diminuer les coûts totaux. La capacité du centre fermé sera répartie également sur les trois centres restants. Toutefois, une augmentation des coûts de transport est attendue. Dans ce scénario, l'option de fermer le centre de distribution 2 (Soliman) a été retenue. En effet, en plus d'avoir les coûts fixes les plus élevés, ce centre présenterait l'emplacement le moins stratégique.

Les quantités optimales acheminées dans le cadre du scénario 1 sont représentées dans les tableaux 20 et 21.

**Tableau 20** : quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes)

	Usine 1		Usine 2		
	Lait UHT	Beurre	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Centre de distribution 1	128	83	0	114	24
Centre de distribution 3	183	6	47	112	14
Centre de distribution 4	149	67	0	80	21

**Tableau 21** : quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes)

	Produits	Grossiste						
		1	2	3	4	5	6	7
<b>Centre de distribution 1</b>	Lait UHT	67	53	8	0	0	0	0
	beurre	22	37	24	0	0	0	0
	yaourt	35	27	52	0	0	0	0
	Fromage blanc	12	5	7	0	0	0	0
<b>Centre de distribution 3</b>	Lait UHT	0	0	79	46	58	0	0
	beurre	0	0	0	21	32	0	0
	yaourt	0	0	20	47	45	0	0
	Fromage blanc	0	0	0	8	6	0	0
<b>Centre de distribution 4</b>	Lait UHT	0	0	0	0	0	84	65
	beurre	0	0	0	0	0	30	37
	yaourt	0	0	0	0	23	18	39
	Fromage blanc	0	0	0	0	4	14	3

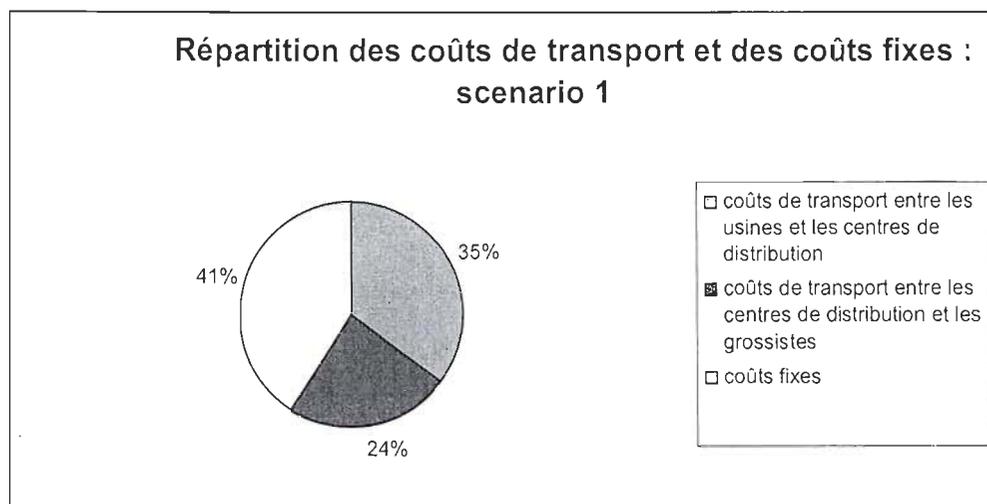
Les coûts totaux de transport et les coûts fixes s'élèveraient donc à **10553,7**

**Dinars :**

- Les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution s'élèveraient à 3708,19 Dinars.

- Les coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes s'élèveraient à 2520,51 Dinars.

- Les coûts fixes seraient de 4325 Dinars.



**Figure 7** : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux (scénario 1).

### 5.9.2 Scénario 2

Dans le but de diminuer les coûts totaux de transport, l'alternative de rapprocher un des centres de distribution des grossistes a été étudiée. Se basant sur la matrice des distances, le centre de distribution 3 (Sousse) a été rapproché des grossistes 4 et 5 (c'est-à-dire déplacé à Monastir). Une diminution des coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes est attendue.

**Tableau 22** : quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes)

	Usine 1		Usine 2		
	Lait UHT	Beurre	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Centre de distribution 1	90	59	0	62	15
Centre de distribution 2	115	24	0	72	27
Centre de distribution 3	110	6	47	88	5
Centre de distribution 4	145	67	0	84	12

**Tableau 23** : quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes)

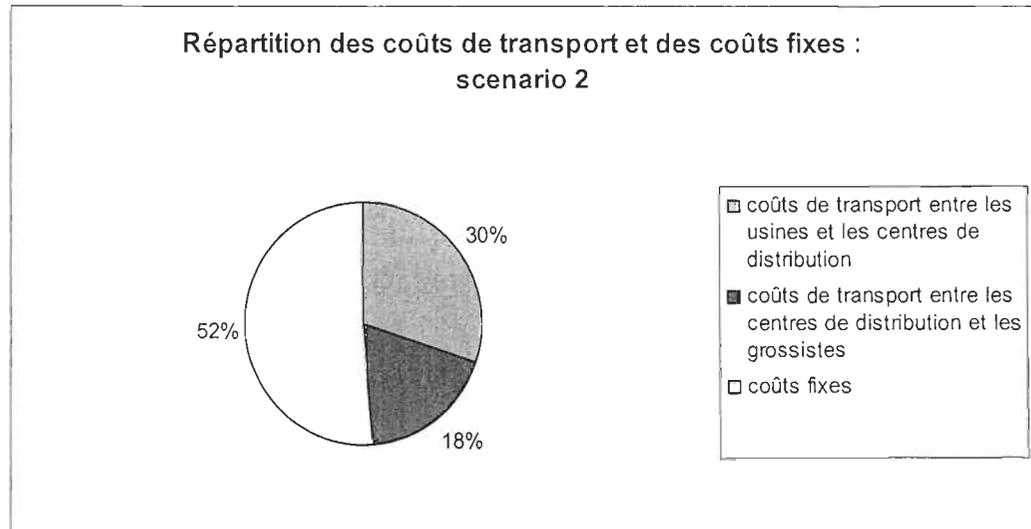
	Produits	Grossiste 1	Grossiste 2	Grossiste 3	Grossiste 4	Grossiste 5	Grossiste 6	Grossiste 7
<b>Centre de distribution 1</b>	Lait UHT	67	23	0	0	0	0	0
	beurre	22	37	0	0	0	0	0
	yaourt	35	27	0	0	0	0	0
	Fromage blanc	12	3	0	0	0	0	0
<b>Centre de distribution 2</b>	Lait UHT	0	30	85	0	0	0	0
	beurre	0	0	24	0	0	0	0
	yaourt	0	0	72	0	0	0	0
	Fromage blanc	0	2	7	8	10	0	0
<b>Centre de distribution 3</b>	Lait UHT	0	0	2	46	58	0	4
	beurre	0	0	0	21	32	0	0
	yaourt	0	0	0	47	41	0	0
	Fromage blanc	0	0	0	0	0	2	3
<b>Centre de distribution 4</b>	Lait UHT	0	0	0	0	0	84	61
	beurre	0	0	0	0	0	30	37
	yaourt	0	0	0	0	27	18	39
	Fromage blanc	0	0	0	0	0	12	0

Les coûts totaux de transport et les coûts fixes s'élèveraient donc à **11561,05 Dinars** :

- Les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution s'élèveraient à 3490,27 Dinars.

- Les coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes s'élèveraient à 2125,78 Dinars.

- Les coûts fixes seraient de 5945 Dinars.



**Figure 8** : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux (scénario 2)

### 5.9.3 Scénario 3

Le scénario suivant ne comporte aucune restriction quant aux capacités des centres de distribution. Ceci offre au modèle une plus grande liberté pour la sélection des sites. Cette sélection est basée principalement sur les coûts fixes et les coûts totaux de transport.

Les quantités optimales acheminées et les sites sélectionnés sont représentés dans les tableaux 24 et 25.

**Tableau 24** : quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes) :

	Usine 1		Usine 2		
	Lait UHT	Beurre	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Centre de distribution 2	311	136	0	249	42
Centre de distribution 4	149	20	47	57	17

**Tableau 25** : quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes)

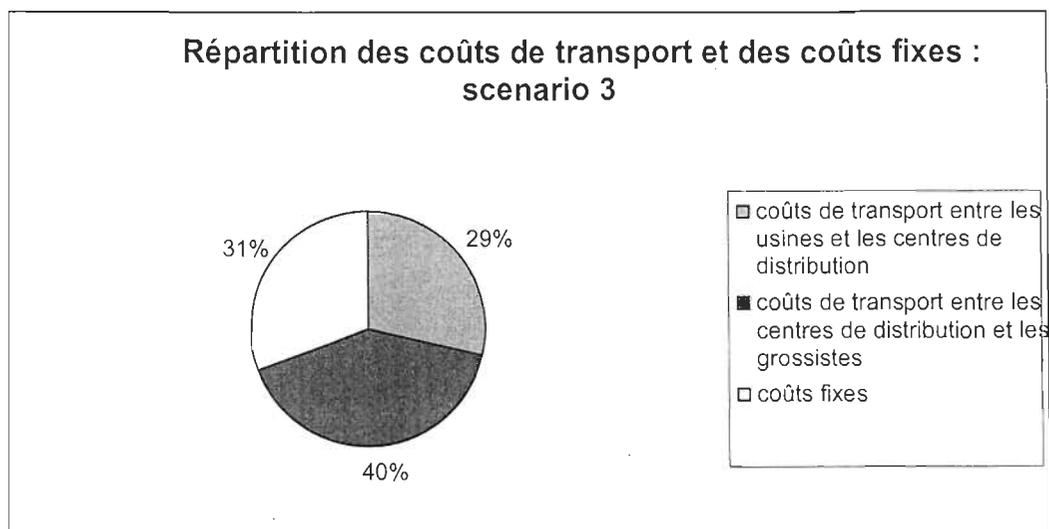
	Produits	Grossiste 1	Grossiste 2	Grossiste 3	Grossiste 4	Grossiste 5	Grossiste 6	Grossiste 7
<b>Centre de distribution 2</b>	Lait UHT	67	53	87	46	58	0	0
	beurre	22	37	24	21	32	0	0
	yaourt	35	27	72	47	68	0	0
	Fromage blanc	12	5	7	8	10	0	0
<b>Centre de distribution 4</b>	Lait UHT	0	0	0	0	0	84	65
	beurre	0	0	0	0	0	30	37
	yaourt	0	0	0	0	0	18	39
	Fromage blanc	0	0	0	0	0	14	3

Les coûts totaux de transport et les coûts fixes s'élèveraient donc à **9567,93 Dinars** :

- Les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution s'élèveraient à 2740,75 Dinars.

- Les coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes s'élèveraient à 3887,18 Dinars.

- Les coûts fixes seraient de 2940 Dinars.



**Figure 9** : Répartition des coûts de transport et des coûts fixes en pourcentage des coûts totaux (scénario 3)

D'après les données précédentes, nous pouvons constater que le modèle n'a retenu que deux des quatre centres de distribution. Ceci s'est traduit par une diminution considérable du pourcentage des coûts fixes par rapport aux coûts totaux et une augmentation des coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes.

### 5.10 Comparaison des différents scénarios

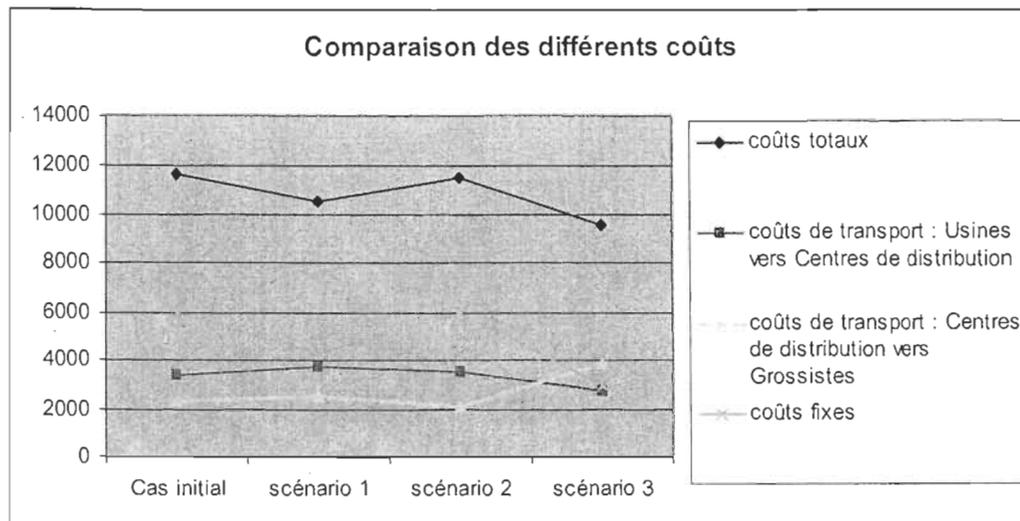
Le tableau suivant résume les coûts totaux associés aux différents scénarios.

**Tableau 26** : comparaison des différents scénarios

	<b>Changements effectués</b>	<b>Coûts totaux (en Dinars)</b>
<b>Cas initial</b>	aucun	11665,28
<b>Scénario 1</b>	Élimination du centre de distribution 2	10553,70
<b>Scénario 2</b>	Rapprochement du centre de distribution 3 des grossistes 4 et 5	11561,05
<b>Scénario 3</b>	Pas de contraintes de capacité des centres de distribution	9567,93

Parmi les scénarios proposés, il est facile de remarquer que le scénario 3, où les contraintes de capacités de tous les centres de distribution ont été levées, est le scénario dont les coûts totaux sont les plus bas. Cette baisse considérable des coûts totaux est surtout due à la fermeture de deux centres de distribution. Ceci nous a donc permis de nous libérer des coûts fixes qui leurs étaient reliés (voir la figure 10). Toutefois, le modèle utilisé ne prend pas en considération les coûts relatifs à l'augmentation de la capacité de stockage des sites restants. Il en est de même pour le scénario 1, où il est question de fermer le centre de distribution 2. En effet, la baisse des coûts totaux est surtout reliée à la baisse de ses coûts fixes.

Concernant les coûts totaux de transport, il est à noter que c'est le scénario 3 qui présente les valeurs les plus élevées. Ceci s'explique par une augmentation considérable des coûts de transport entre les centres retenus et les grossistes (voir figure 10). Cette augmentation est surtout causée par l'augmentation des trajets parcourus.



**Figure 10 :** comparaison des différents scénarios selon les coûts totaux, les coûts de transport et les coûts fixes.

## Chapitre 6

### Optimisation du réseau de distribution des produits laitiers avec relocalisation des unités de stockage

#### 6.1 Présentation du problème actuel

Dans le chapitre précédant, nous avons étudié un problème de distribution de produits laitiers avec des capacités de stockage propres à chaque centre de distribution.

Dans ce chapitre, nous allons concevoir un modèle offrant la possibilité de relocaliser les capacités de stockage des centres de distribution moyennant des coûts de relocalisation. Ces coûts vont dépendre de la nature du produit, de la distance entre les centres de distribution et de la quantité de produits à relocaliser.

#### 6.2 Les données

Dans notre modèle, les coûts de relocalisation sont composés de deux éléments : des coûts de relocalisation des équipements et des coûts d'extension des dépôts.

Les coûts de relocalisation des équipements dépendent de la quantité des produits à relocaliser ainsi que de la distance entre les centres de distribution. Ces distances sont présentées dans le tableau 27.

**Tableau 27** : distances entre les centres de distribution (en kilomètres)

	<b>Centre de distribution 1</b>	<b>Centre de distribution 2</b>	<b>Centre de distribution 3</b>	<b>Centre de distribution 4</b>
<b>Centre de distribution 1</b>	0	32	125	253
<b>Centre de distribution 2</b>	32	0	93	210
<b>Centre de distribution 3</b>	125	93	0	132
<b>Centre de distribution 4</b>	253	210	132	0

On va considérer maintenant que les coûts de relocalisation des équipements sont de 0,01Dinar par tonne et par kilomètre parcouru pour relocaliser la capacité de stockage d'un centre de distribution dans un autre centre de distribution. Les coûts de relocalisation des équipements de chaque centre de distribution vers les autres centres de distribution pour chaque produit sont présentés dans le tableau 28.

Les coûts d'extension des dépôts dépendent de la capacité de stockage à relocaliser ainsi que de la nature du produit. Ces coûts sont de 1 Dinar/tonne pour les produits non réfrigérés (lait UHT) et de 1,5 Dinar/tonne pour les produits réfrigérés (beurre, yaourt et fromage blanc). Les coûts d'extension des dépôts pour chaque produit et chaque centre de distribution sont présentés dans le tableau 28.

**Tableau 28** : coûts d'extension, coûts de relocalisation des équipements et coûts totaux de relocalisation pour chaque centre de distribution et pour chaque produit

	produit	coûts	Centre de distribution 1	Centre de distribution 2	Centre de distribution 3	Centre de distribution 4
Centre de distribution 1	lait UHT	extension	-	90	90	90
		relocalisation	-	28,8	112,5	227,7
		total	-	118,8	202,5	317,7
	beurre	extension	-	105	105	105
		relocalisation	-	22,4	87,5	177,1
		total	-	127,4	192,5	282,1
	yaourt	extension	-	135	135	135
		relocalisation	-	28,8	112,5	227,7
		total	-	163,8	247,5	362,7
	Fromage	extension	-	22,5	22,5	22,5
		relocalisation	-	4,8	18,75	37,95
		total	-	27,3	41,25	60,45
Centre de distribution 2	lait UHT	extension	115	-	115	115
		relocalisation	36,8	-	106,95	241,5
		total	151,8	-	221,95	356,5
	beurre	extension	60	-	60	60
		relocalisation	12,8	-	37,2	84
		total	72,8	-	97,2	144
	yaourt	extension	108	-	108	108
		relocalisation	58,24	-	77,76	115,2
		total	131,04	-	174,96	259,2
	Fromage	extension	40,5	-	40,5	40,5
		relocalisation	8,64	-	25,11	56,7
		total	49,14	-	65,61	97,2

**Tableau 28** : coûts d'extension, coûts de relocalisation des équipements et coûts totaux de relocalisation pour chaque centre de distribution et pour chaque produit (suite)

	produit	coûts	Centre de distribution 1	Centre de distribution 2	Centre de distribution 3	Centre de distribution 4
<b>Centre de distribution 3</b>	lait UHT	extension	150	150	-	150
		relocalisation	187,5	139,5	-	198
		total	337,5	289,5	-	348
	beurre	extension	124,5	124,5	-	124,5
		relocalisation	103,75	77,19	-	109,56
		total	228,25	201,69	-	234,06
	yaourt	extension	132	132	-	132
		relocalisation	110	81,84	-	116,16
		total	242	213,84	-	248,16
	Fromage	extension	7,5	7,5	-	7,5
		relocalisation	6,25	4,65	-	6,6
		total	13,75	12,15	-	14,1
<b>Centre de distribution 4</b>	lait UHT	extension	145	145	145	-
		relocalisation	366,85	304,5	191,4	-
		total	511,85	449,5	336,4	-
	beurre	extension	120	120	120	-
		relocalisation	202,4	168	105,6	-
		total	322,4	288	225,6	-
	yaourt	extension	130,5	130,5	130,5	-
		relocalisation	220,11	182,7	114,84	-
		total	350,61	313,2	245,34	-
	Fromage	extension	18	18	18	-
		relocalisation	30,36	25,2	15,84	-
		total	48,36	43,2	33,84	-

### 6.3 La fonction objectif et les contraintes

La fonction objectif tient compte des éléments suivants :

- les quantités de produit livrées des usines vers les centres de distribution
- les quantités de produit livrées des centres de distribution vers les grossistes
- les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution
- les coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes
- les coûts fixes des centres de distribution
- les coûts de relocalisation des centres de distribution

Les variables du modèle, la fonction objectif ainsi que les contraintes sont présentées ci-dessous :

<b>Indices</b>	
$i$	produits
$j$	usines
$k$	centres de distribution
$l$	grossistes
<b>Paramètres</b>	
$D_{il}$	Quantité de produit $i$ demandée par le grossiste $l$ par mois
$S_{ij}$	Capacité de production l'usine $j$ pour le produit $i$ par mois
$C_{ijk}$	Coût de transport par tonne de produit $i$ livré de l'usine $j$ vers le centre de distribution $k$
$G_{ikl}$	Coût de transport par tonne de produit $i$ livré du centre de distribution $k$ vers le grossiste $l$
$F_k$	Coûts fixes du centre de distribution $k$ par mois
$A_{ikk'}$	Coût du transfert de la capacité de stockage du produit du centre de distribution $k$ au centre de distribution $k'$
$K_{ik}$	Capacité de stockage du centre de distribution $k$ pour le produit $i$ par mois

Variables de décision	
$Z_k$	0 ou 1 pour la sélection d'un centre de distribution $k$
$B_{ikk'}$	0 ou 1 pour la relocalisation de la capacité de stockage du produit $i$ du centre de distribution $k$ vers le centre de distribution $k'$
$X_{ijk}$	Quantité de produit $i$ livrée de l'usine $j$ au centre de distribution $k$
$Y_{ikl}$	Quantité de produit $i$ livrée du centre de distribution $k$ au grossiste $l$

La fonction objectif tend à minimiser les coûts totaux de transport, les coûts fixes et les coûts de relocalisation :

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j \sum_k C_{ijk} * X_{ijk} + \sum_i \sum_k \sum_l G_{ikl} * Y_{ikl} + \sum_k F_k * Z_k + \sum_i \sum_k \sum_{k'} A_{ikk'} * B_{ikk'} \quad (1)$$

Sujet à :

$$\sum_k X_{ijk} \leq S_{ij} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_j X_{ijk} \leq K_{ik} - K_{ik} \sum_{ikk'} B_{ikk'} + K_{ik'} \sum_{ikk'} B_{ikk'} \quad \forall k, \forall k' \text{ avec } k \neq k' \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{ikl} = D_{il} \quad \forall i, l \quad (4)$$

$$\sum_l Y_{ikl} = \sum_j X_{ijk} \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_j X_{ijk} \leq M \times Z_k \quad \forall k \quad (6)$$

$$Z_k = 0,1 \quad (7)$$

$$B_{ikk'} = 0,1 \quad (8)$$

La contrainte (2) assure le respect de la capacité de production des usines.

La contrainte (3) assure le respect de la capacité de stockage des centres de distribution.

La contrainte (4) assure que la demande des grossistes soit satisfaite.

Les contraintes (5) et (6) assurent la conservation du flux.

#### 6.4 Les résultats

Les quantités optimales des différents produits acheminés entre les usines et leurs centres de distribution sont représentées dans le tableau 29.

**Tableau 29** : quantités optimales acheminées entre les usines et les centres de distribution (en tonnes)

	Usine 1		Usine 2		
	Lait UHT	Beurre	Beurre	Yaourt	Fromage blanc
Centre de distribution 1	205	70	0	90	15
Centre de distribution 2	0	0	0	0	0
Centre de distribution 3	110	66	0	159	32
Centre de distribution 4	145	20	47	57	12

D'après le tableau 29, nous pouvons constater que le centre de distribution 2 n'a pas été approvisionné par les deux usines. Ceci s'explique par le fait que la somme des coûts de relocalisation et de transport additionnels due à sa non utilisation ont été inférieurs aux coûts fixes de son utilisation.

Par ailleurs, la totalité de la production de beurre de l'usine 2 est acheminée vers un seul centre de distribution, le centre de distribution 4. Ces quantités produites ne suffisent pas à couvrir totalement la demande en beurre du centre de distribution 4. Ce centre est donc contraint d'être approvisionné aussi par l'usine 1.

Les quantités optimales des différents produits acheminés entre les centres de distribution et les grossistes sont représentées dans le tableau 30.

**Tableau 30** : quantités optimales acheminées entre les centres de distribution et les grossistes (en tonnes)

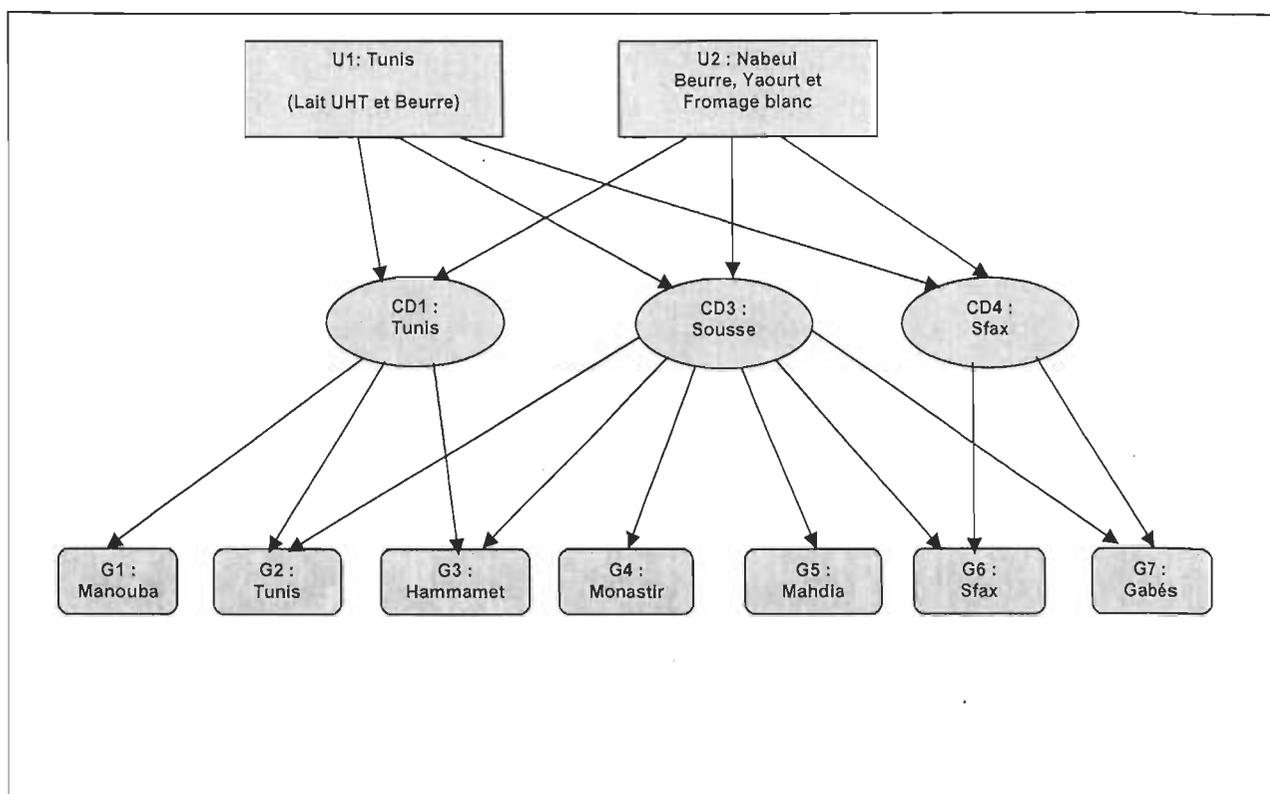
	Produits	Grossiste 1	Grossiste 2	Grossiste 3	Grossiste 4	Grossiste 5	Grossiste 6	Grossiste 7
Centre de distribution 1	Lait UHT	67	53	85	0	0	0	0
	beurre	22	37	11	0	0	0	0
	yaourt	35	27	28	0	0	0	0
	Fromage blanc	12	3	0	0	0	0	0
Centre de distribution 3	Lait UHT	0	0	2	46	58	0	4
	beurre	0	0	13	21	32	0	0
	yaourt	0	0	44	47	68	0	0
	Fromage blanc	0	2	7	8	10	2	3
Centre de distribution 4	Lait UHT	0	0	0	0	0	84	61
	beurre	0	0	0	0	0	30	37
	yaourt	0	0	0	0	0	18	39
	Fromage blanc	0	0	0	0	0	12	0

D'après le tableau 30 nous pouvons constater qu'en ce qui concerne le grossiste 1, le facteur de transport a été le plus influençant pour déterminer par quel centre de distribution il sera approvisionné. En effet, le grossiste 1 est fourni en totalité par le centre de distribution 1. Il en est de même pour le grossiste 2. Toutefois, pour des raisons de capacité du centre de distribution 1, le grossiste 2 s'est vu couvrir le reste de sa demande en fromage blanc par le centre de distribution 3. La contrainte de capacité en fromage blanc des centres de distribution 1 et 4 a même fait en sorte que le centre de distribution 3 desserve six des sept grossistes en cet aliment.

Par ailleurs, il y a eu les relocalisations suivantes :

- La capacité de stockage du lait du CD 2 a été transférée au CD 1
- La capacité de stockage du yaourt du CD 2 a été transférée au CD 3
- La capacité de stockage du fromage frais du CD 2 a été transférée au CD 3

On remarque donc que le CD 2 n'a pas été pris en compte dans le réseau et que ses capacités de stockage en lait UHT, yaourt et fromage blanc ont été relocalisées. Cependant, il n'y a pas eu de relocalisation en ce qui concerne le beurre. Ceci est dû au fait que contrairement aux autres produits où une relocalisation était nécessaire à cause d'une contrainte de capacité, la capacité des centres de distribution 1, 3 et 4 suffisait pour satisfaire la demande en beurre de tous les grossistes. La relocalisation de la capacité de stockage du beurre du CD2 n'a donc pas eu lieu puisque les coûts de transport additionnels ont été inférieurs aux coûts de relocalisation. Le réseau optimal de distribution des différents produits est représenté par la figure 11.



**Figure 11** : Le réseau optimal de distribution des différents produits en considérant une possibilité de relocalisation

Avec l'utilisation de 3 centres de distribution au lieu de 4 l'organisation du réseau va changer considérablement. En effet, les grossistes desservis initialement par le centre de distribution 2 vont être réaffectés à d'autres centres dépendamment de leur proximité ainsi que des nouvelles capacités de stockage. Avec cette organisation, les coûts totaux s'élèvent à **10637,23 Dinars Tunisiens**.

**Tableau 31** : Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les usines et les centres de distribution (en Dinars)

		Centre de distribution 1			Centre de distribution 3			Centre de distribution 4		
		Coût/t	Qt.	Coût tot.	Coût/t	Qt.	Coût tot.	Coût/t	Qt.	Coût tot.
<b>Usine 1</b>	Produits non réfrigérés	0,29	205	<b>59,45</b>	3,41	110	<b>375,1</b>	6,84	145	<b>991,8</b>
	Produits réfrigérés	0,38	70	<b>26,6</b>	4,54	19	<b>86,26</b>	9,12	67	<b>611,04</b>
<b>Usine 2</b>	Produits réfrigérés	2,24	110	<b>246,4</b>	2,14	233	<b>498,62</b>	6,72	69	<b>463,68</b>

Le total des coûts de transport entre les usines et les centres de distribution des différents produits s'élèveront à **3358,95 Dinars Tunisiens**.

**Tableau 32** : Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars)

		Centre de distribution 1			Centre de distribution 3			Centre de distribution 4		
		Coût/t	Qt.	Coût tot.	Coût/t	Qt.	Coût tot.	Coût/t	Qt.	Coût tot.
<b>Grossiste 1</b>	Produits non réfrigérés	0,45	67	<b>30,15</b>	6,98	0	<b>0</b>	13,28	0	<b>0</b>
	Produits réfrigérés	0,63	69	<b>43,47</b>	9,77	0	<b>0</b>	18,59	0	<b>0</b>
<b>Grossiste 2</b>	Produits non réfrigérés	0,32	53	<b>16,96</b>	6,21	0	<b>0</b>	12,69	0	<b>0</b>
	Produits réfrigérés	0,44	67	<b>29,48</b>	8,69	2	<b>17,38</b>	17,77	0	<b>0</b>

**Tableau 32 :** Coûts de transport par quantités et types de produits acheminés entre les centres de distribution et les grossistes (en Dinars) (suite)

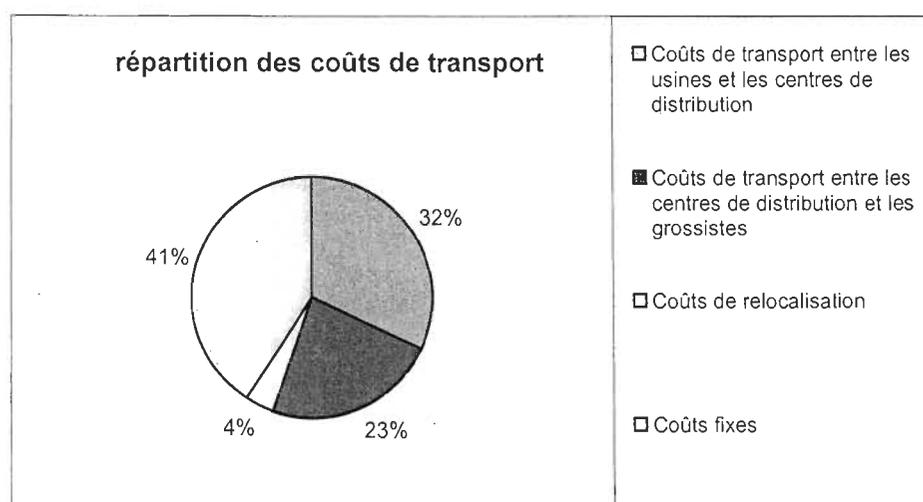
		Centre de distribution 1			Centre de distribution 3			Centre de distribution 4		
		Coût/t	Qt.	Coût tot.	Coût/t	Qt.	Coût tot.	Coût/t	Qt.	Coût tot.
<b>Grossiste</b> <b>3</b>	Produits non réfrigérés	2,79	85	237,15	3,02	2	6,04	8,19	0	0
	Produits réfrigérés	3,91	39	152,49	4,22	64	270,08	11,47	0	0
<b>Grossiste</b> <b>4</b>	Produits non réfrigérés	6,17	0	0	0,99	46	45,54	6,35	0	0
	Produits réfrigérés	8,63	0	0	1,39	76	105,64	8,88	0	0
<b>Grossiste</b> <b>5</b>	Produits non réfrigérés	8,15	0	0	2,34	58	135,72	3,24	0	0
	Produits réfrigérés	11,40	0	0	3,28	110	360,8	4,54	0	0
<b>Grossiste</b> <b>6</b>	Produits non réfrigérés	12,42	0	0	6,08	0	0	0,36	84	30,24
	Produits réfrigérés	17,39	0	0	8,51	2	17,02	0,50	60	30
<b>Grossiste</b> <b>7</b>	Produits non réfrigérés	16,65	0	0	11,03	4	44,12	5,63	61	343,43
	Produits réfrigérés	23,31	0	0	15,44	3	46,32	7,88	76	598,88

Le total des coûts de transport entre les centres de distribution et les grossistes des différents produits s'élèveront à **2560,91 Dinars Tunisiens**.

La figure 12 ci-dessous, montre que les coûts fixes représentent 41% des coûts totaux contre 51% dans le cas où on n'a pas pris en considération une possibilité de relocalisation.

Ceci s'explique par le fait que dans le cas actuel nous avons utilisé uniquement 3 centres de distribution donc les coûts fixes vont être inférieurs. En contrepartie, on remarque l'augmentation de la proportion des coûts de transport entre les usines et les centres de distribution (32% contre 29%) et entre les centres de distribution et les grossistes (23% contre 20%).

Ceci est dû à un problème de proximité. En effet, avec un centre de distribution en moins, les distances à parcourir sont plus grandes et les coûts de transport vont donc être plus importants.



**Figure 12 :** Répartition des différents coûts en pourcentage des coûts totaux

## 6.5 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité sera effectuée afin de déterminer les éléments de la fonction objectif auxquels le système est sensible. Les éléments à étudier sont les coûts fixes des centres de distribution, les coûts de la relocalisation des centres de distribution et les coûts de transport (qui regroupent les coûts de transport entre les usines et les centres de distribution et ceux entre les centres de distribution et les grossistes).

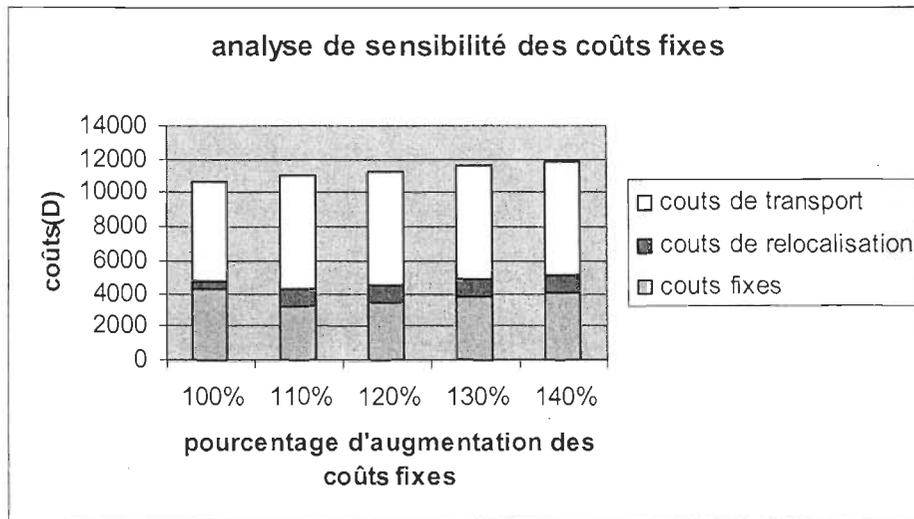
Une augmentation graduelle de 10% de chaque type de coût sera faite jusqu'à atteindre 40%. Ensuite, l'impact de cette augmentation sur les différents coûts sera observé.

### 6.5.1 Augmentation des coûts fixes

L'effet de l'augmentation des coûts fixes sur la variation des différents coûts est représenté dans le tableau 33 et la figure 13.

**Tableau 33** : variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts fixes (en Dinars)

Augmentation en %	coûts fixes	coûts de relocalisation	coûts de transport	coûts totaux
100%	4325	392,37	5919,86	10637,23
110%	3234	1029,03	6699,97	10963
120%	3528	1029,03	6699,97	11257
130%	3822	1029,03	6699,97	11551
140%	4116	1029,03	6699,97	11845



**Figure 13** : variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts fixes

D'après le tableau 20 et la figure 13, on remarque qu'une augmentation de 10 % des coûts fixes des 4 centres de distribution entraîne une diminution des coûts fixes totaux dans notre modèle. Ceci s'explique par une diminution du nombre de centres de distribution utilisés. En effet, dans le modèle original on utilisait les 3 centres de distribution (1, 3 et 4), avec une augmentation de 10% de ces coûts, on ne va plus utiliser que les 2 centres de distribution (2 et 4). Une augmentation des coûts fixes entraîne également une augmentation considérable des coûts de relocalisation. En effet, avec la diminution du nombre de centres de distribution et étant donné la contrainte de capacité, la relocalisation sera nécessairement plus importante.

De même, les coûts de transport vont être plus importants car les distances entre les centres de distribution et les grossistes vont être plus grandes.

L'augmentation des coûts de 20%, 30% et 40% n'entraîne pas de changements de réorganisation du réseau par rapport à l'augmentation de 10%. Les coûts de transport et les coûts de relocalisation restant inchangés, l'augmentation des coûts totaux est due uniquement à l'augmentation des coûts fixes.

### 6.5.2 Augmentation des coûts de relocalisation

L'effet de l'augmentation des coûts de relocalisation sur la variation des différents coûts est représenté dans le tableau 34.

**Tableau 34 :** variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts de relocalisation (en Dinars)

Augmentation en %	coûts de relocalisation	coûts fixes	coûts de transport	coûts totaux
100%	392,37	4325	5919,86	10637,23
110%	431,61	4325	5918,52	10675,12
120%	470,844	4325	5918,52	10714,36
130%	510,081	4325	5918,52	10753,59
140%	549,318	4325	5918,52	10792,83

D'après le tableau 34, on remarque que l'augmentation des coûts de relocalisation n'a aucun effet sur l'organisation du réseau. Les coûts fixes et les coûts de transport restent inchangés. L'augmentation des coûts totaux est due uniquement à l'augmentation graduelle des coûts de relocalisation. Le modèle n'est donc pas sensible à une augmentation des coûts de relocalisation.

### 6.5.3 Augmentation des coûts de transport

L'effet de l'augmentation des coûts de transport sur la variation des différents coûts est représenté dans le tableau 35.

**Tableau 35** : variation des différents coûts en fonction de l'augmentation des coûts de transport

Augmentation en %	coûts de transport	coûts de relocalisation	coûts fixes	coûts totaux
100%	5919,86	392,37	4325	10637,23
110%	6510,37	392,37	4325	11227,73
120%	7102,21	392,37	4325	11819,58
130%	7618,44	465,17	4325	12408,61
140%	8204,47	465,17	4325	12994,64

D'après le tableau 35, on remarque qu'une augmentation des coûts de transport de 10% ou 20% n'entraîne pas de changements des coûts de relocalisation et des coûts fixes. Le modèle n'est donc pas sensible à ces augmentations.

Cependant, une augmentation des coûts de transport de 30% et 40% entraîne une augmentation des coûts de relocalisation. Cette augmentation est due à la relocalisation des capacités de stockage de beurre du centre de distribution 2 au centre de distribution 1.

## 6.6 Conclusion

Le modèle développé, considérant une possibilité de relocalisation des capacités de stockage, a un avantage supplémentaire par rapport au modèle précédent étant donné qu'il permet plus de flexibilité du réseau. En effet, ce modèle prend en considération trois différents types de coûts et permet de plus grandes possibilités de réorganisations. Ceci peut être très avantageux pour une réorganisation efficace du réseau suite à une augmentation des coûts (augmentation des coûts de transport suite à l'augmentation du prix de pétrole, augmentation des coûts fixes...) ou une variation importante de la demande des grossistes.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le premier objectif de cette recherche était de mettre l'emphase sur l'importance des produits périssables dans le monde des affaires. De même, il était important de présenter les défis liés à la complexité de la distribution de ce type de produits et ce en présentant les particularités des produits périssables.

Lors de la revue de littérature, il a été possible de déterminer les paramètres et les caractéristiques principales du réseau de distribution des produits périssable, ainsi que les activités essentielles au fonctionnement de ce réseau. Dans une étape ultérieure, l'étude, l'analyse et la classification de plusieurs modèles mathématiques traitant le problème de distribution ont été faites dans les chapitres 2 et 3.

Cette étude a permis de :

- comprendre suffisamment les problèmes de transport et de distribution des produits périssables.
- définir les paramètres et les variables décisionnelles du réseau.
- développer un modèle d'optimisation et déterminer les éléments de la fonction objectif.
- choisir l'outil de solution.

Suite à la connaissance approfondie des spécificités du problème de distribution des produits périssables, des étapes et de l'approche à suivre, le traitement d'un problème de distribution de produits périssables dans un contexte industriel a été envisagé.

Ainsi, une application sur un cas d'étude qui est le réseau de distribution des produits laitiers a été faite. Une solution optimale a été atteinte pour ce système en déterminant les quantités optimales acheminées à travers le réseau.

De même, l'impact de la variation des composantes de la fonction objectif a été mesuré en étudiant différents scénarios. Une comparaison entre ces différents scénarios a été présentée.

Suite à cela, on a incorporé une variante au modèle en permettant des relocalisations des capacités de stockage des centres de distribution moyennant un coût de relocalisation.

Une solution optimale a été trouvée et une analyse de sensibilité des différentes composantes de la fonction objectif a été effectuée.

Ce modèle peut servir aux gérants des réseaux de distribution de produits périssables à planifier leurs réseaux et avoir une idée sur l'impact des changements des composantes de leurs modèles sur le réseau de distribution.

De plus, les industriels pourraient mieux simuler l'effet d'un changement d'une composante du réseau sur les coûts totaux. Ceci peut être très utile comme outil d'aide à la décision afin de choisir l'alternative la plus appropriée.

### **Les recherches futures**

Le modèle traité étudie une planification globale pour déterminer chaque quantité à distribuer par mois entre chaque segment du réseau. Cependant en fonction de ces résultats, une étape qui suivrait cette recherche pourrait avoir lieu : c'est l'optimisation des tournées des véhicules entre chaque usine et chaque centre de distribution ainsi qu'entre chaque centre de distribution et chaque grossiste. Des contraintes relatives à la qualité du produit pourraient aussi être considérées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**BACKER B., FURNON V., PROSSER P., KILBY P. et SHAW P. (1997).** Local Search in Constraint Programming: Application to the Vehicle Routing Problem. Presented at the CP-97 Workshop on Industrial Constraint-based Scheduling, Schloss Hagenberg, Austria.

**BASNET C., FOULDS L. et WILSON J. (1999).** An exact algorithm for a milk tanker scheduling and sequencing problem. *Annals of Operations Research*, Vol. 86, pp. 559-568.

**BELENGUER J.M., BENAVENT E., et MARTINEZ M. C. (2005).** Rutarep: a computer package to design dispatching routes in the meat industry. *Journal of Food Engineering*, 70: 435-445.

**BERNER R. (1999).** A Battle Fought With Kiwis and Kale. *The Wall Street Journal*, (March 15), B1.

**BROEKMEULEN R. (1998).** Operations Management of Distribution Centers for Vegetables and Fruits. *International Transactions in Operational Research*, Vol 5: 501-508.

**CHUNG H. et NORBACK J. (1991).** A clustering and insertion heuristic applied to a large routing problem in food distribution. *Journal of Operational Research Society*, 42: 555-564.

**CHO Y.J. et LI C.C. (2005).** Application of Multi-Temperature Refrigerated Container to Improve the Distribution of Cold Logistics. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 2794 – 2808.

**FEDERGRUEN A., PRASTACOS G. et ZIPKIN P. (1986).** An allocation and distribution model for perishable products. *Operations Research*, 34 (1), 75–82.

**FOULDS L. R. et WILSON J.M. (1997).** A Variation of the Generalized Assignment Problem Arising in the New Zealand Dairy Industry. *Annals of Operations Research* 69, 105 - 114.

**FU B. et LABUZA T.P. (1993).** Shelf-life prediction: theory and application. *Food Control* 4, 125-133.

**FAULIN J. et GIL I. (2002).** Using the Monte Carlo simulation in the ALGACEA model for the logistic optimization. *IFORS 2002 Edinburg July 8–12. Session: Simulation III : TA22.*

**FAULIN J. (2003).** Applying MIXALG Procedure in a Routing Problem to Optimize Food Product Deliver. *Omega - The International Journal of Management Science*, Vol. 31, August 2003, pp. 387-395.

**HIGGINS A. (2006).** Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research* 170: 987–1000.

**HOOGERWERF A., REINDERS M.P., OOSTERLOO S.K. et KANIS J. (1990).** Final Report of the Program Study Agro-Logistics. Technical Report.

**HOUSROUM H., DUPAS R., HSU T. et GONCALVES G. (2003).** Une approche évolutionniste du problème de la gestion dynamique de tournées de véhicules avec fenêtre de temps. International Conference: Integrated Design and Production, Meknes, Maroc, 22-24, Octobre 2003.

**HSU C. I. et HUNG S. F. (2003).** Vehicle Routing Problem for Distributing Refrigerated Food. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5: 2261-2272.

**PANAPINUN K. et CHARNSETHIKUL P. (2005).** Vehicle routing and scheduling problems: a case study of food distribution in greater Bangkok. Technical Report, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University.

**PANOZZO G., MINOTT G. et Barizza A. (1999).** Transport et distribution de produits alimentaires : situation actuelle et tendances futures. International Journal of Refrigeration. 22 : 625-639.

**POOLEY J. (1994).** Integrated production and distribution facility planning at Aults Foods. Interfaces 24: 4 (113-121).

**PRASTACOS G. (1981).** Allocation of a Perishable Product Inventory. Operations research 29: 95-108.

**RYALL L.A. et LIPTON W.J. (1979).** Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables, 2nd ed. AVI. Publishing Co., Westport.

**SARMIENTO A. M. et NAGI R. (1999).** A review of integrated analysis of production-distribution Systems. IIE Transactions 31:1061-1074.

**SUPERMARKET BUSINESS (2000).** Annual Consumer Expenditures Study [[http://www.agr.gc.ca/food/industryinfo/data/retail/trends\\_e.html](http://www.agr.gc.ca/food/industryinfo/data/retail/trends_e.html)].

**SUPERMARKET NEWS (1997).** Supermarkets Battling High Shrink in Perishables, 47 (14), 25–26.

**TARANTILIS C. D. et KIRANOUDIS C. T. (2001).** A metaheuristic algorithm for the efficient distribution of perishable foods. *Journal of Food Engineering* 50: 1-9.

**TARANTILIS C.D. et KIRANOUDIS C.T. (2002).** Distribution of Fresh Meat. *Journal of Food Engineering*, Vol. 51, 85-91.

**VAN VLIET A., BOENDER C., GUUS E. et RINNOOY KAN A.H.G. (1992).** Interactive optimization of bulk sugar delivery, *Interfaces* 22 (3) 4.