



**HAL**  
open science

# Prise en compte des politiques de transport dans le choix des fournisseurs

Aicha Aguezzoul

► **To cite this version:**

Aicha Aguezzoul. Prise en compte des politiques de transport dans le choix des fournisseurs. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005. Français. NNT : . tel-00168637

**HAL Id: tel-00168637**

**<https://theses.hal.science/tel-00168637>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L’I.N.P.G.**

**Spécialité : Génie Industriel**

Préparée au Laboratoire d’Automatique de Grenoble

Dans le cadre de l’Ecole Doctorale : **Organisation Industrielle et Systèmes de Production**

Présentée et soutenue publiquement

Par

**Aïcha AGUEZZOUL**

Le 19 septembre 2005

---

## **Prise en compte des politiques de transport dans le choix des fournisseurs**

---

**Directeur de thèse : M. Pierre LADET**

### **JURY**

M. Bernard DESCOTES-GENON	, Président
M. Alain HAURAT	, Rapporteur
M. Aziz MOUKRIM	, Rapporteur
M. Pierre LADET	, Directeur de thèse
Mme. Bahia BENCHEKROUN	, Examinatrice

# Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire Automatique de Grenoble (LAG) de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), au sein de l'équipe Conduite et Organisation des Systèmes de Production (COSP).

Je tiens tout d'abord à témoigner toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Pierre Ladet, Professeur à l'INPG, qui m'a proposé ce sujet intéressant et qui a accepté de le diriger. Ses conseils et ses recommandations m'ont guidé tout au long de ce travail.

Je suis extrêmement honorée de compter Monsieur Bernard Descontes-Genon, Professeur à l'Université de Joseph Fourier (UJF) de Grenoble, parmi les membres du jury de cette thèse, et qui a bien accepté d'en être le président.

Toute ma reconnaissance va à Messieurs Alain Haurat, Professeur émérite de l'Université de Savoie et Aziz Moukrim, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à Madame Bahia Benchekroun, Professeur à l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI) au Maroc, qui a accepté d'examiner mon travail et de participer à mon jury.

J'adresse également tous mes remerciements à l'ensemble des personnes que j'ai côtoyé durant ces quatre années au sein de LAG. Je pense plus particulièrement à toute l'équipe administrative, technique et les doctorants du LAG, pour leur disponibilité, leur aide et les moments de joie et de détente qu'ils ont su m'apporter.

Enfin, je dédie ce mémoire à mes chers parents, à mes frères et à mes sœurs, qui ont fourni tant de leurs efforts et leur patience pour assurer ma réussite. Je leurs dois beaucoup.

# Table des matières

<b>Liste des figures.....</b>	<b>6</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>7</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>8</b>
<b>Chapitre 1 : Sélection et évaluation des fournisseurs.....</b>	<b>11</b>
1.1. Introduction.....	11
1.2. Phénomène de l'externalisation.....	11
1.2.1. Introduction.....	11
1.2.2. Facteurs favorisant l'externalisation.....	12
1.2.3. Bénéfices et risques de l'externalisation.....	13
1.3. Sélection et évaluation des fournisseurs.....	16
1.3.1. Introduction.....	16
1.3.2. Critères de sélection et d'évaluation des fournisseurs.....	16
1.3.3. Méthodes de sélection des fournisseurs.....	20
1.3.4. Avantages et inconvénients des méthodes de sélection des fournisseurs.....	26
1.4. Stratégie à un fournisseur ou à plusieurs fournisseurs.....	27
1.5. Impact des politiques de gestion des stocks.....	28
1.6. Conclusion.....	30
<b>Chapitre 2 : Transport de marchandises.....</b>	<b>31</b>
2.1. Introduction.....	31
2.2. Niveaux de planification du transport.....	31
2.3. Modes de gestion du transport.....	32
2.4. Différents modes de transport.....	32
2.4.1. Transport routier.....	32
2.4.2. Transport ferroviaire.....	34
2.4.3. Transport aérien.....	34
2.4.4. Navigation fluviale.....	35
2.4.5. Navigation maritime.....	36
2.4.6. Transport intermodal.....	36
2.5. Impact du transport sur l'environnement.....	38
2.5.1. Principaux effets du transport sur l'environnement.....	38
2.5.2. Coûts externes du transport.....	40
2.6. Avantages et inconvénients des différents modes de transport.....	41
2.7. Modélisation du transport.....	42
2.7.1. Introduction.....	42
2.7.2. Modélisation du coût de transport : état de l'art.....	43
2.8. Conclusion.....	45

<b>Chapitre 3 : Transport et relations DO/Fournisseurs .....</b>	<b>46</b>
3.1. Introduction .....	46
3.2. Architecture des réseaux logistiques de distribution.....	46
3.2.1. Introduction .....	46
3.2.2. Entrepôt et plate-forme.....	47
3.2.3. Types de réseaux logistiques .....	47
3.3. Intégration des plates-formes de distribution dans la chaîne logistique globale	51
3.3.1 Intégration par les systèmes d'information .....	51
3.3.2. Intégration par le p-manufacturing .....	52
3.4. Impact du transport sur la gestion de la chaîne logistique .....	53
3.5. Transport et relations DO/Fournisseurs : état de l'art .....	55
3.6. Conclusion .....	57
<b>Chapitre 4 : Modélisation du choix des fournisseurs en considérant le transport .....</b>	<b>59</b>
4.1. Introduction .....	59
4.2. Cadre de l'étude .....	59
4.3. Formulation mathématique .....	61
4.3.1. Description du problème .....	61
4.3.2. Variables de décision .....	62
4.3.3. Hypothèses du problème .....	63
4.3.4. Expression du coût total .....	63
4.3.5. Contraintes du modèle.....	67
4.3.6. Expression du modèle final .....	69
4.4. Modélisation du transport intermodal : état de l'art.....	70
4.5. Algorithme de résolution .....	72
4.6. Validation du modèle.....	74
4.6.1. Scénario 1 : Etude de cas d'un seul fournisseur.....	74
4.6.2. Scénario 2 : Etude de cas de deux fournisseurs.....	76
4.6.3. Scénario 3 : Etude général du choix de plus de deux fournisseurs.....	80
4.7. Analyse de sensibilité .....	81
4.8. Prise en compte du coût externe du transport .....	84
4.9. Conclusion .....	85
<b>Chapitre 5 : Modélisation multiobjectif.....</b>	<b>86</b>
5.1. Introduction .....	86
5.2. Optimisation multiobjectif.....	86
5.2.1. Description.....	86
5.2.2. Définitions .....	87
5.2.3. Approches de résolution des MOP .....	89
5.2.3.1. Approches scalaires .....	89
5.2.3.2. Approches non scalaires et non Pareto.....	91
5.2.3.3. Approches Pareto .....	92
5.3. Modélisation multiobjectif et problème du choix des fournisseurs .....	93
5.3.1. MOP et choix des fournisseurs : état de l'art .....	93
5.3.2. Approche multiobjectif proposée.....	93
5.3.2.1. Objectifs retenus .....	93

5.3.2.2. Fonction multiobjectif .....	93
5.3.2.3. Expression du MOP .....	94
5.3.2.4. Validation du MOP .....	95
5. 4. Comparaison avec d'autres méthodes .....	100
5. 5. Conclusion .....	101
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>102</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>105</b>

## Liste des figures

1.1 : Externalisation des fonctions logistiques.....	12
1.2 : Modélisation du fournisseur sous forme d'un système dynamique .....	19
1.3 : Positionnement approximatif des méthodes de sélection des fournisseurs .....	25
1.4 : Stock moyen du DO dans le cas de dual sourcing (Ganeshan et al. 1999).....	29
2.1 : Coût de transport des LTL et TL.....	43
3.1 : Livraison directe.....	48
3.2 : Livraison avec entrepôt central .....	48
3.3 : Livraison avec entrepôts spécialisés.....	49
3.4 : Livraison avec entrepôts régionaux/plates formes régionales .....	49
3.5 : Niveaux d'échange de données dans une chaîne logistique globale .....	52
3.6 : Modèle conceptuel du temps total de cycle .....	53
3.7 : Coût total dans un réseau logistique (Blumenfeld et al. 1987) .....	55
4.1 : Structure du réseau du transport reliant les fournisseurs et le DO .....	61
4.2 : Exemple de niveau du stock du DO dans le cas de dual sourcing .....	65
4.3 : Algorithme de résolution du modèle .....	73
4.4 : Réseau de transport reliant un fournisseur et le DO.....	75
4.5 : Réseau de transport reliant deux fournisseurs et le DO.....	77
4.6 : Coût total de dual sourcing en fonction de d et f .....	80
4.7 : Gains associés au dual sourcing en fonction de la demande.....	82
5.1 : Optimalité locale au sens de Pareto.....	88
5.2 : Point idéal et point nadir.....	88
5.3 : Solutions du MOP dans le cas du scénario 1 .....	99
5.4 : Niveau du stock du DO pour $\delta=0.5$ .....	99

## Liste des tableaux

1.1 : Avantages et inconvénients de l'externalisation et de l'internalisation.....	15
1.2 : Critères de sélection des fournisseurs et leurs poids selon Dickson et Weber .....	17
1.3 : Différents types de relations DO/Fournisseurs .....	19
1.4 : Méthodes de sélection des fournisseurs en fonction du type d'achat.....	25
1.5 : Avantages et inconvénients des méthodes de sélection des fournisseurs.....	27
2.1 : Fourchettes des coefficients d'émission atmosphérique par mode de transport.....	39
2.2 : Coûts externes et d'infrastructure du transport routier.....	40
2.3 : Coûts externes par mode de transport (€/1000 t.Km).....	41
2.4 : Avantages et inconvénients des différents modes de transport.....	42
3.1 : Caractéristiques des modèles du choix des fournisseurs intégrant le transport .....	57
4.1 : Comparaison avec Ganeshan et al. (1999) dans le cas de mono sourcing.....	75
4.2 : Comparaison avec Ghodsypour et O'Brien (2001) dans le cas de dual sourcing.....	78
4.3 : Résultats du modèle dans le cas de dual sourcing avec $P2 = 4 \text{ €}$ .....	79
4.4 : Résultats de Ganeshan et al. (1999) dans le cas de dual sourcing.....	80
4.5 : CPU du modèle en fonction du nombre de fournisseurs et de terminaux .....	81
4.6 : Effets de la demande sur les gains associés au dual sourcing.....	82
4.7 : Effets de la distance et du prix d'achat sur les gains associés au dual sourcing .....	83
4.8 : Effets de la distance entre terminaux sur les coûts logistiques .....	84
4.9 : Coût externe par mode du transport .....	84
4.10 : Résultats du modèle dans le cas de mono sourcing, intégrant le coût externe.....	85
5.1 : MOP et problème du choix des fournisseurs .....	93
5.2 : Autres données du MOP .....	96
5.3 : Valeurs des buts pour les différents options et scénarios du MOP .....	96
5.4 : Résultats du MOP.....	98
5.5 : Comparaison avec d'autres approches.....	100

## Introduction générale

Face à des marchés fortement compétitifs, caractérisés par une demande de produits personnalisés, de bonne qualité, livrés dans des délais minimaux et le tout au moindre coût, les entreprises d'aujourd'hui réalisent qu'une gestion efficace de leurs achats locaux et/ou internationaux peut constituer un avantage concurrentiel substantiel. En effet, la part du poids des achats se situe fréquemment entre 40 % et 80 % du coût total du produit. Ce phénomène de l'augmentation du poids des achats s'explique, de manière synthétique, par le recours à la propension à faire-faire plutôt qu'à faire soi-même et ainsi à déléguer aux prestataires externes (fournisseurs et/ou sous-traitants) des activités qui ne sont pas reliées au cœur de métier de l'entreprise plutôt que de procéder à une intégration verticale dans la chaîne de valeur.

De plus, cette même compétition ainsi que la mondialisation des marchés ont conduit à porter une attention particulière à la distribution physique des marchandises qui engendre d'importants coûts de transport, d'entreposage et d'immobilisation.

La maîtrise des transports, l'amélioration de leurs performances, la réduction de leur coût et de leur prix rendent accessibles de nouveaux espaces d'approvisionnement, dont profitent également les fournisseurs. Le développement des nouvelles technologies de l'information et de communication (NTIC) permet de synchroniser des processus répartis dans des sites distants, avant d'en confier le flux résultant au transport, qui est de moins en moins freiné par l'abaissement des barrières réglementaires, fiscales ou commerciales, et cela à l'échelle de la planète.

Enfin, les politiques du transport prennent aussi place dans le contexte actuel de développement durable, où les préoccupations environnementales, de qualité de vie, de congestion et de sécurité prennent de l'ampleur face au développement du trafic de fret.

Par conséquent, pour générer une réduction des coûts et une optimisation de sa chaîne de valeur, l'entreprise donneur d'ordres (DO) doit d'une part, gérer de manière proactive ses achats et établir des relations étroites avec un réseau de fournisseurs efficaces et fiables, et d'autre part, organiser son réseau de transport de marchandises le long de sa chaîne logistique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons plus particulièrement au problème du choix des fournisseurs et aux stratégies de transport amont d'une chaîne logistique. A ce niveau se posent plusieurs questions d'ordre stratégique, les principales sont :

- Quel nombre de fournisseurs considérer ?
- Quels critères de sélection établir ?
- Quelles méthodes d'évaluation utiliser ?
- Combien de fournisseurs choisir ?
- Quelles quantités commander aux fournisseurs choisis ?
- Quelle organisation de transport adopter ?
- Quels modes de transport utiliser et à quelle fréquence de livraison ?
- Quelle gestion des stocks à adopter en amont chez les fournisseurs, en transit et en aval chez le DO ?

La question de la fréquence d'expédition logistique ou de la livraison se pose : faut-il recevoir en une seule fois et constituer un stock chez le DO ou chez les fournisseurs ou au contraire se faire livrer fréquemment ? Une livraison unique coûtera moins cher en transport mais engendrera un coût de stockage supérieur par rapport à des livraisons multiples.

Pour répondre à la problématique et aux objectifs de cette thèse et présenter les différentes démarches poursuivies ainsi que les résultats obtenus, ce mémoire est organisé comme suit :

- **Le chapitre 1** aborde le problème de la sélection et de l'évaluation des fournisseurs. On discutera dans un premier temps de la décision de l'externalisation, de ses bénéfices et de ses risques. On présentera dans un deuxième temps, une analyse très large de la littérature sur le problème du choix des fournisseurs et, plus précisément, sur les critères et les méthodes de sélection des fournisseurs. Une comparaison des différentes méthodes en termes d'avantages et d'inconvénients est également présentée. Dans un troisième temps, on présentera les différentes stratégies d'approvisionnements (mono sourcing ou multiple sourcing) utilisées par les entreprises, suivies à la fin par une étude de l'impact de ces stratégies sur la gestion des stocks ;
- **Le chapitre 2** sera consacré à une étude générale sur la distribution physique des marchandises en termes de ses niveaux de planification (stratégique, tactique et opérationnelle) et ses modes de gestion (transport pour compte propre ou transport pour compte d'autrui). On présentera après les divers modes de transport (routier, ferroviaire, aérien, maritime, fluvial et intermodal), leurs particularités et leurs exigences opérationnelles. On abordera ensuite l'étude de l'impact du transport sur l'environnement ainsi que les coûts externes générés par mode de transport et on exposera par la suite les avantages et inconvénients de chacun des modes de transport. On terminera ce chapitre par un état de l'art des différentes modélisations de coût du transport de fret ;
- **Le chapitre 3** représente une analyse des chapitres 1 et 2 dans lequel on discutera d'abord de la topologie des réseaux logistiques de distribution reliant les fournisseurs aux clients puis de l'intégration de ces réseaux dans la chaîne logistique globale à travers les systèmes d'information et le p-manufacturing. On abordera ensuite les principaux facteurs liés au transport et qui ont un impact sur l'approvisionnement amont d'une chaîne de valeur. Enfin, on présentera un état de l'art des principaux travaux sur le transport et la stratégie à plusieurs fournisseurs ;
- **Le chapitre 4** décrit de manière explicite, la formulation mathématique de l'approche qu'on propose pour répondre à notre problématique. Une revue de littérature sur les principaux travaux dans le domaine du transport et en particulier du transport intermodal est également présentée, ce qui nous permet de situer notre modèle et de proposer la démarche à suivre pour le résoudre. Le modèle développé est implémenté sous le logiciel Matlab et il est illustré sous divers scénarios. Dans les deux premiers scénarios et qui s'intéressent aux cas de l'utilisation d'un seul fournisseur d'une part et de deux fournisseurs d'autre part, nous avons comparé nos résultats avec ceux trouvés dans certains travaux de recherche sur le choix des fournisseurs. Une analyse de sensibilité est également présentée. Enfin, nous avons étudié le cas de la prise en compte du coût externe du transport dans notre modèle.
- **Le chapitre 5** montre une extension du modèle présenté dans le chapitre 4 et dans lequel on prend en compte l'aspect multiobjectif de la décision du choix des fournisseurs. On présentera d'abord les concepts généraux de l'optimisation

multiobjectif ainsi que les principales approches utilisées pour résoudre ce type de problème. Un état de l'art des travaux utilisant la modélisation multiobjectif dans la décision du choix des fournisseurs est également présenté avant d'explicitier l'approche que nous proposons dans notre cas. Une comparaison de notre approche avec d'autres approches de résolution est présentée à la fin de ce chapitre.

- Finalement, une conclusion générale récapitule les points importants de notre étude et les principales contributions. Des perspectives possibles de ce travail sont également présentées.

# Chapitre 1 : Sélection et évaluation des fournisseurs

## 1.1. Introduction

Comme on l'a mentionné en introduction, pour générer une réduction des coûts le long de sa chaîne de valeur, l'entreprise donneur d'ordres (DO) doit d'une part, gérer de manière proactive ses achats et établir des relations étroites avec un réseau de fournisseurs efficaces et fiables et d'autre part, organiser et de manière optimale, son réseau de transport le long de cette chaîne logistique. Plusieurs questions d'ordre stratégique se posent : Quel nombre de fournisseurs considérer ? Quels critères de sélection établir ? Quelles méthodes d'évaluation utiliser ? Combien de fournisseurs choisir ? Quelles quantités commander aux fournisseurs choisis ? Quelle gestion des stocks à adopter dans le réseau logistique ? , etc.

Pour apporter les éléments de réponse à ces questions, nous proposons d'organiser ce chapitre comme suit : On discutera dans la section 2 de la décision de l'externalisation, de ses bénéfices et de ses risques. La section 3 donnera une analyse très large de la littérature sur le problème du choix des fournisseurs et, plus précisément, sur les critères et les méthodes de sélection des fournisseurs. Une comparaison des différentes méthodes en termes d'avantages et d'inconvénients est également présentée. La section 4 présentera les différentes stratégies d'approvisionnements (mono sourcing ou multiple sourcing) utilisées par les entreprises. La section 5 sera consacrée à l'étude de l'impact de ces stratégies sur la gestion des stocks. Enfin, une conclusion récapitule les points importants de ce chapitre.

## 1.2. Phénomène de l'externalisation

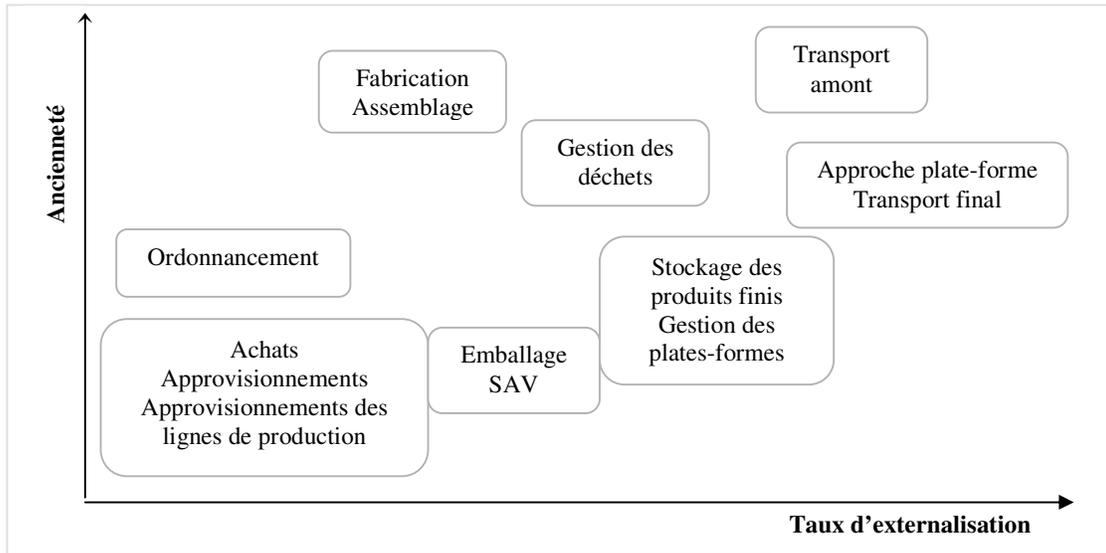
### 1.2.1. Introduction

Avec l'obsolescence accélérée des technologies et la complexité croissante des produits, les entreprises ne peuvent plus maîtriser tous les métiers qui concourent à leur activité. Elles décident donc de se recentrer sur leur métier principal et sur leurs compétences-clefs et recourent à l'externalisation (outsourcing) des activités jugées non stratégiques. Au terme de ce processus d'externalisation stratégique se dessine un modèle d'entreprise "virtuelle" dont l'activité consisterait en un rôle d'interface entre différents métiers en vue d'un projet commun.

L'externalisation se distingue de la sous-traitance traditionnelle par le fait qu'elle concerne des activités qui contribuent substantiellement à la création d'une partie de la valeur ajoutée par l'entreprise DO à travers un contrat à long terme (6 à 7 ans). Ce sont des activités supports comme le transport et la logistique, l'informatique et les télécommunications ou bien des activités qui contribuent fortement à la qualité du service ou du produit, et donc à la création de valeur pour l'entreprise qui sont les plus concernées par ce phénomène d'externalisation.

L'automobile et l'aéronautique sont parmi les secteurs où les stratégies d'externalisation sont les plus répandues. En Europe, par exemple, 70 % de la valeur ajoutée d'une automobile le

serait par les entreprises autres que le concepteur-assembleur. Dans l'aéronautique civile, le montant des achats serait de 65 % du chiffre d'affaires de l'avionneur (l'Usine nouvelle, 1999). Enfin, notons que plus de 65% des entreprises françaises ont recours à l'externalisation (Le Journal du Management, 2003). La figure 1.1 ci-dessous situe les tendances de l'externalisation logistique (ISLI, Logistique et Management, 1996).



**Figure 1.1.** Externalisation des fonctions logistiques

Le transport et les stocks, qui ne sont pas les métiers de base de l'entreprise, sont les activités logistiques les plus externalisées.

### 1.2.2. Facteurs favorisant l'externalisation

Plusieurs facteurs expliquent l'utilisation des ressources en amont de l'entreprise DO et le recours aux fournisseurs. On peut citer :

- *Facteurs technologiques* : Les progrès des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) ont permis de réduire les distances entre les entreprises, de faciliter la communication ainsi que l'achat en ligne via Internet ;
- *Facteurs institutionnels* : La libéralisation des échanges au sein de l'Union Européenne et dans le cadre du GATT facilite les achats internationaux, ce qui pousse les entreprises à sous-traiter dans les pays à coûts très faibles. De plus, l'instauration des normes internationales d'assurance qualité ISO 9000 facilite la certification des fournisseurs ;
- *Facteurs économiques* : La concurrence mondiale a poussé la plupart des entreprises à chercher des fournisseurs potentiels garantissant les meilleurs rapports qualité/prix et qui sont spécialisés dans des métiers (transport routier par exemple) jugés non rentables pour l'entreprise ;
- *Facteurs culturels* : L'externalisation s'explique également par le progrès dans les sciences de gestion, notamment en matière de management stratégique et par la diffusion des méthodes modernes d'achat. Des moyens organisationnels spécifiques aux fonctions des achats à travers des formations des responsables des achats ont été développés.

D'un point de vue économique, la possibilité de recourir à l'externalisation représente un soutien important de la croissance des activités des entreprises et de l'amélioration de leur compétence et de leur capacité à s'adapter à un environnement de plus en plus dynamique tout en amenuisant les risques. Cependant, avant de prendre une telle décision, l'entreprise doit mesurer les bénéfices et les risques encourus à la suite de l'externalisation.

### 1.2.3. Bénéfices et risques de l'externalisation

L'essor de l'externalisation s'explique par les bénéfices qu'elle apporte aux entreprises en matière de coûts, de performance et de spécialisation. Dans son étude sur le sujet, Barthélemy (2000) a classé ces bénéfices en quatre groupes :

- *Les bénéfices financiers* : L'externalisation permet de faire des économies d'équipements, de personnel et d'investissement. Des réductions très significatives des coûts peuvent être de l'ordre de 15 % à 30 % ;
- *L'amélioration de la performance* : Elle est imputable à la spécialisation des prestataires qui leur permet d'accéder à des ressources plus évoluées ;
- *L'optimisation stratégique* : L'externalisation des activités jugées non créatrices de valeur pour l'entreprise et qualifiées d'activités "périphériques" ou activités "support" permet de libérer des ressources pour les réinvestir dans les activités stratégiques et qui représentent son "cœur de métier" ou "core business" ;
- *Une meilleure gestion de l'activité externalisée*, ce qui implique une meilleure visibilité sur les coûts. On connaît les factures des fournisseurs alors qu'on a du mal à cerner le véritable coût d'une fonction. De plus, il est parfois plus facile et plus rapide de faire pression sur un fournisseur extérieur pour qu'il baisse ses prix que de demander des efforts de productivité à un service interne.

La décision de l'externalisation apparaît a priori comme économiquement favorable. Cependant, cette décision est également porteuse de risques qu'il importe de maîtriser et qui peuvent être regroupés en trois catégories :

- *La perte de savoir-faire et de compétences* : Selon une étude empirique récente, 70 % des entreprises seraient incapables de réinternaliser leur fonction logistique après l'avoir externalisée (Logistique et management, 1996). La difficulté de la réintégration provient de la perte de savoir-faire et de compétences qui résulte inévitablement d'une opération d'externalisation ;
- *La dépendance vis-à-vis du prestataire* : L'externalisation crée une situation de dépendance quasi-irréversible vis-à-vis du prestataire, ce qui peut générer des comportements opportunistes de ce prestataire ;
- *Le risque social* : Les opérations d'externalisation sont très fréquemment accompagnées de transferts de personnel et de licenciements. Le transfert d'une partie de personnel implique également une perte de compétences et de connaissances individuelles et organisationnelles.

Dans leur étude sur le sujet, Arfaoui et al. (2004) ont classé ces risques selon différents points de vue :

- *Risques liés à l'approche stratégique des activités* : Les fonctions exercées par l'entreprise et qui sont considérées comme non stratégiques à un moment donné peuvent le devenir au regard de l'évolution de l'activité et du marché. Ainsi, la logistique est devenue une fonction stratégique et non plus une affaire de techniciens.

- Par ailleurs, l'externalisation peut s'accompagner de transferts de technologie parfois irrévocables et de perte de savoir-faire ;
- *Risques liés au contrôle de l'exploitation* : L'externalisation peut modifier les rapports de forces entre l'entreprise et son fournisseur en provoquant un accroissement de la dépendance de celle-ci. Ainsi, beaucoup d'entreprises qui avaient confié tout leur système de développement à des fournisseurs informatiques sont devenues dépendantes de ceux-ci. En outre, les activités externalisées ne sont pas toujours exercées avec le niveau de qualité requis surtout si elles concernent des tâches peu qualifiées ;
  - *Risques liés à la maîtrise de la rentabilité* : Bien que l'externalisation génère une réduction très significative des coûts "visibles", elle provoque par ailleurs un accroissement des coûts induits "coûts cachés" qui sont souvent sous-estimés par les entreprises. Ces coûts sont consécutifs à la nécessité de mettre en place un dispositif de surveillance et de contrôle des activités externalisées (coordination des équipes, actualisation périodique des contrats, définition du cahier de charge, suivi des activités du prestataire). Par ailleurs, il n'est pas toujours facile pour le donneur d'ordre de maîtriser les éléments de la facturation, ce qui a pour conséquence de limiter à terme les gains escomptés ;
  - *Risques juridiques liés à la gestion du personnel* : Bien que la loi autorise le transfert du personnel dans le cas d'une externalisation des activités, l'entreprise ne doit l'entreprendre qu'avec prudence. Ainsi, le transfert de services ou d'activités avec leurs salariés n'est admis juridiquement que si ces activités sont des entités économiques autonomes c'est-à-dire "un ensemble organisé de personnes et d'éléments corporels ou incorporels permettant l'exercice d'une activité économique poursuivant un objectif propre".

Le tableau 1.1 ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients d'une décision d'externalisation ou d'internalisation (Lucquin, 2002) :

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Externalisation</i>	Concentration sur le métier et utilisation optimale des actifs de l'entreprise	Contraintes de coordination des flux, de contrôle et de motivation des réseaux
	Développement d'avantages concurrentiels et stratégiques par l'optimisation des compétences distinctives	Difficulté de contrôle de la chaîne logistique globale
	Développement du système d'information pour satisfaire au besoin d'assurer le contrôle de la chaîne logistique	Difficulté de contrôle de la qualité du service au client
	Faible coût logistique total	Difficulté relative de mise en œuvre d'un système de Juste-A-Temps (JAT)
<i>Internalisation</i>	Contrôle optimal des flux (produits, finances et information)	Exigence d'un savoir-faire supplémentaire (logistique)
	Économies d'échelle en termes d'entrepôt, de transport et de gestion des stocks	Besoin de restructuration fonctionnelle et organisationnelle
	Flexibilité, fortes synergies (marketing et logistique)	Éparpillement possible des ressources de l'entreprise
	Développement permanent des stratégies novatrices et de contrôle du service au client	Faible développement du système d'information externe
	Facilité relative de mise en œuvre d'un système JAT	Coût logistique total élevé

**Tableau 1.1.** *Avantages et inconvénients de l'externalisation et de l'internalisation*

Une opération d'externalisation atteint véritablement son objectif lorsqu'elle est à la fois très bénéfique et très peu risquée. Par conséquent, pour que l'entreprise bénéficie pleinement de toutes les économies liées à une stratégie de l'externalisation, elle doit nouer des liens étroits et efficaces avec des fournisseurs censés se substituer à ses services internes et devenir des extensions logistiques de son système manufacturier. Dans cette optique, la sélection des "meilleurs" fournisseurs est primordiale. Cette sélection est influencée par plusieurs paramètres tels que le prix, les délais, la qualité, etc.

Le paragraphe qui suit présente une synthèse de la littérature sur le problème de la sélection et de l'évaluation des fournisseurs.

## 1.3. Sélection et évaluation des fournisseurs

### 1.3.1. Introduction

La sélection des fournisseurs est la décision la plus importante du système d'approvisionnement de l'entreprise car d'une part, le coût d'achat représente une part importante du coût total du produit (40 % à 80 %) et d'autre part car cette décision influe le fonctionnement de tous les autres services de l'entreprise (transport, stock, production, etc.).

Cette décision vise à créer et à maintenir un réseau de fournisseurs fiables et efficaces nécessaires au DO pour relever les défis concurrentiels croissants. La capacité du DO à produire un produit de qualité, à un coût raisonnable et de manière opportune est fortement influencée par la performance des fournisseurs qui est considérée comme l'un des facteurs déterminants pour le succès du DO.

Le problème du choix des fournisseurs est étudié sous deux aspects (Akbari Jokar, 2001) :

- *La détermination du nombre de fournisseurs et le mode de relation avec eux* : Selon les caractéristiques de l'entreprise DO, du produit et du marché, le plan stratégique du DO peut encourager ou non le travail avec un nombre élevé de fournisseurs. Or, pour une relation de coopération forte avec les fournisseurs, leur nombre doit être réduit pour pouvoir le gérer de manière efficace ;
- *La sélection des meilleurs fournisseurs* parmi les alternatives existantes. C'est cet aspect du problème du choix des fournisseurs qu'on considèrera dans notre travail. Cela suppose que le nombre des fournisseurs à sélectionner est déjà déterminé.

Dans la suite de cette section, on présentera les différents critères et méthodes de sélection et d'évaluation des fournisseurs utilisés dans la littérature.

### 1.3.2. Critères de sélection et d'évaluation des fournisseurs

Plusieurs études de type empirique et exploratoire sur le problème de la sélection et d'évaluation des fournisseurs sont apparues dans la littérature pour montrer l'importance stratégique de ce problème. Les premiers écrits dans ce domaine sont ceux de Dickson (1966) qui, à partir d'une enquête réalisée auprès de 274 firmes canadiennes et américaines membres du "National Association of Purchasing Managers (NAPM)", a pu identifier 23 critères utilisés par les entreprises dans les années 60 pour sélectionner leurs fournisseurs. L'étude a montré que le choix des fournisseurs est une décision multicritères qui implique souvent la considération simultanée de plusieurs critères tels que le prix, le délai de livraison et la qualité; et qu'il est extrêmement difficile de trouver un fournisseur qui excelle partout. Par exemple, le fournisseur qui offre le prix le plus bas peut ne pas avoir les meilleures performances du point de vue des délais de livraison ou de la qualité du produit.

Dans une revue de littérature ultérieure, célèbre et largement citée dans la littérature sur le problème de la sélection et de l'évaluation des fournisseurs, Weber et al. (1991) ont analysé 74 articles publiés entre 1966 et 1990 qui traitent ce problème et ont montré que les critères évoqués par Dickson sont encore étudiés dans la plupart des articles ; bien que l'importance relative à chacun des critères ait changé suite au changement du contexte industriel et du concept de JAT.

Le tableau 1.2 ci-dessous montre les deux types de classification du degré d'importance des critères relatifs au choix des fournisseurs selon Dickson et Weber :

- Une classification pratique basée sur l'étude empirique réalisée auprès des entreprises de NAPM (Dickson 1966) ;
- Une classification théorique basée sur l'analyse des travaux de recherche publiés entre 1966 et 1990 (Weber et al. 1991).

<i>Critères</i>	<i>Rang selon Dickson</i>	<i>Rang selon Weber</i>
Prix	6	1
Livraison	2	2
Qualité	1	3
Capacité de production	5	4
Localisation géographique	20	5
Capacité technique	7	6
Gestion et organisation	13	7
Réputation et position dans l'industrie	11	8
Situation financière	8	9
Performance Passée	3	9
Services de réparation	15	9
Attitude	16	10
Habilité d'emballage	18	11
Contrôle des opérations	14	11
Formation et support	22	12
Conformité des processus	9	12
Relations sociales	19	12
Système de communication	10	12
Réciprocité de la relation	23	12
Impression	17	12
Désir de faire des affaires	12	13
Volume des achats dans le passé	21	13
Politique de garantie	4	14

**Tableau 1.2.** *Critères de sélection des fournisseurs et leurs poids selon Dickson et Weber*

Comme indiqué auparavant, le changement de contexte industriel a modifié les degrés d'importance relative de ces critères. En effet, Weber insiste sur l'importance de la localisation géographique du fournisseur dans un environnement de JAT alors que ce critère ait occupé la 20<sup>ème</sup> place en 1966. De même, la réciprocité de la relation entre DO et les fournisseurs est très importante dans le contexte industriel actuel pour une bonne coordination et coopération entre eux. En effet, les entreprises d'aujourd'hui souhaitent nouer des relations étroites avec leurs fournisseurs, d'où les concepts de **partenariat**, de fournisseurs privilégiés, des alliances, des fusions, etc. La gestion traditionnelle des relations DO/fournisseurs qui encourageait la mise en concurrence des fournisseurs a fait place à de nouveaux modes d'arrangement basés sur la coopération dès la phase de conception du produit.

Notons que la classification des critères présentés dans le tableau 1.2 n'est pas générique. L'ordre de l'importance du critère dépend du niveau d'exigence du DO, de son secteur d'activité, de la criticité du produit et du type de relation qu'il projette de créer avec le fournisseur. En effet, plusieurs études et analyses de ce sujet existent dans la littérature, nous pouvons citer :

- Vonderembse et al. (1995) ont analysé 268 réponses de l'étude empirique qu'ils ont réalisée auprès des entreprises américaines membres de NAPM, localisées dans la région Ouest des USA et utilisant ou non le concept de JAT. Leur étude indique que le

- processus de sélection des fournisseurs est multicritères et que les critères les plus importants sont dans cet ordre : qualité, performance du produit, fiabilité de la livraison, disponibilité du produit, coût, délai, capacité technique du fournisseur, service après vente, situation financière et en dernière position la localisation géographique du fournisseur. Cette étude précise également que la performance ainsi que la qualité du produit sont les deux critères déterminants dans la sélection des fournisseurs entre les entreprises utilisant le concept de JAT et celles qui n'utilisent pas ce concept. Enfin, ces entreprises tendent à réduire le nombre de leurs fournisseurs et à nouer des relations de partenariat stratégique avec eux ;
- L'étude empirique de Verma et Pullma (1998) auprès de 323 entreprises américaines opérant dans l'industrie métallique montre que l'évaluation des fournisseurs se fait principalement selon quatre critères : qualité, prix, délai et flexibilité. Cette étude montre également que les entreprises perçoivent la qualité comme le critère le plus important ; cependant en pratique, elles attribuent plus de poids aux critères de coût et de délai de livraison ;
  - Kannan et Tan (2002) ont réalisé une enquête auprès de 411 entreprises américaines sur l'importance des critères de choix et d'évaluation des fournisseurs. Cette étude a permis d'identifier les relations entre ces critères et la performance de l'entreprise acheteuse. Elle renforce également la nécessité de regarder les fournisseurs comme des prolongements de l'entreprise et non pas comme des entités indépendantes ;
  - La très récente étude empirique de Katsikeas et al. (2004) auprès de 237 entreprises U.K opérant dans l'industrie des technologies d'information montre que l'évaluation de la performance des fournisseurs se base essentiellement sur les quatre critères : fiabilité des délais, compétitivité des prix, service offert et capacité technologique ;
  - Enfin, Weber et al. (1991) ont montré que :
    - Parmi les 23 critères présentés par Dickson, 64 % des articles (47/74) considèrent plus qu'un seul critère à la fois. Ceci confirme bien la nature multicritères du problème ;
    - 57 % des articles (42/74) sont apparus depuis 1985, ce qui montre l'intérêt croissant au problème de sélection des fournisseurs pendant ces dernières années ;
    - Les critères prix (80 %), livraison (59 %) et qualité (54 %) sont les plus discutés dans la littérature.

Concernant les types de relations entre le DO et les fournisseurs :

- Larson (1993) a présenté une étude exploratoire auprès de 500 professionnels des achats dans les entreprises membres de NAPM sur les relations de coopération entre le DO et le fournisseur, la qualité et le coût total du produit acheté. L'analyse statistique des résultats montre que la coopération entre le DO et le fournisseur est d'autant plus élevée si le produit est de grande bonne qualité et à très faible coût ;
- Masella et Rangone (2000) ont groupé ces relations en quatre classes. Chaque classe dépend de l'horizon de la relation et du degré d'intégration entre le DO et le fournisseur :
  - **L'horizon de la relation** : On distingue entre une relation à court terme, c'est le cas d'une sous-traitance occasionnelle (ou conjoncturelle) et une relation à long terme, c'est le cas d'une sous-traitance permanente (ou structurelle). La durée de la relation dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- Le niveau de l’investissement dans des biens spécifiques tels que les infrastructures, les équipements, les systèmes d’informations, etc., que le DO doit créer pour rendre la relation opérationnelle et de façon à ne pas être utilisée dans d’autres relations d’achat ;
- Le coût de changement des fournisseurs : Il inclut le coût de la recherche de nouveaux fournisseurs dans le cas de faible performance ou de l’existence d’un risque important.

Ainsi, moins importants sont ces deux facteurs, plus courte est la durée de la relation.

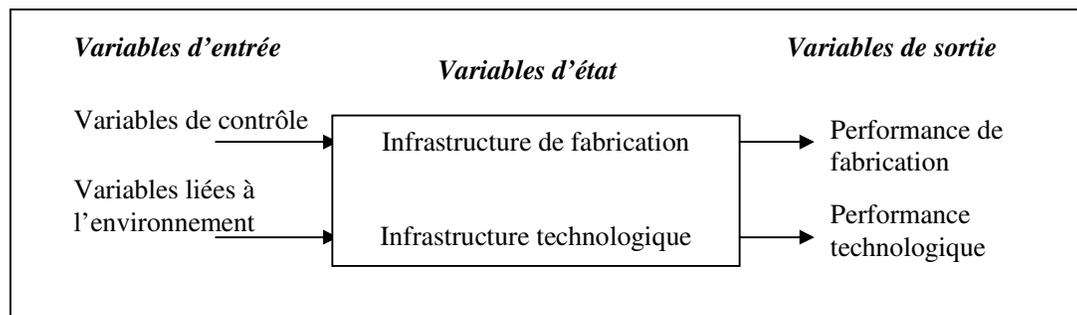
- **Le degré d’intégration** entre le DO et le fournisseur en termes logistique et stratégique :
  - L’intégration logistique suppose des arrangements sur la performance tels que la qualité, le service et le délai, ce qui se réfère souvent à l’implémentation du système de JAT ;
  - L’intégration stratégique se réfère à des arrangements qui impliquent le savoir-faire du fournisseur pour développer de nouveaux produits et technologies.

Par conséquent, le type de relation entre un DO et un fournisseur peut être de l’un des quatre scénarii A, B, C et D suivants (tableau 1.3) :

	<i>Court terme</i>	<i>Long terme</i>
<i>Intégration logistique</i>	A	B
<i>Intégration stratégique</i>	C	D

**Tableau 1.3.** Différents types de relations DO/Fournisseurs

Pour déterminer les critères de sélection de chacun de ces scénarii, le fournisseur est modélisé comme un système dynamique, présenté par trois types de variables (figure 1.2).



**Figure 1.2.** Modélisation du fournisseur sous forme d’un système dynamique

- *Les variables de sortie* : Elles correspondent aux performances du fournisseur et sont de deux classes : des performances de fabrication telles que le coût, la qualité, le délai, la flexibilité et le service, et des performances technologiques telles que les dispositifs d’innovation des produits achetés ;
- *Les variables d’entrée* : Elles incluent des variables de contrôle utilisées par le fournisseur pour achever une certaine performance et des variables liées à

l'environnement telles que l'évolution du marché, les actions des concurrents, etc., et qui ne sont pas complètement sous le contrôle du fournisseur ;

- Les variables d'état : Elles sont responsables avec les variables d'entrée de la dynamique des variables de sortie du système qui est le fournisseur. Pour définir les variables d'état, la théorie basée sur les ressources est utilisée.

Grâce à cette vision, et contrairement au fait que la compétitivité de la firme est mesurée en terme de coût ou encore de performance mesurée directement sur le produit actuel, à long terme, cette compétitivité est mesurée à travers la dotation des ressources. Celles-ci sont uniques, durables et difficiles à imiter ou à substituer, d'où l'infrastructure mise en œuvre par le fournisseur. Ces infrastructures sont liées à des ressources de fabrication (organisation de la fabrication, gestion des ressources humaines, planification de la production, système d'information, etc.) ou à des ressources techniques (organisation en recherche et développement, qualification de la main d'œuvre, investissement en laboratoires de recherche et en équipements de contrôle, relations avec des experts externes, etc.). Ainsi, pour chaque type de relation, le modèle proposé définit les critères correspondants à la sélection des fournisseurs.

En conclusion, la sélection des fournisseurs est un processus très complexe qui dépend de plusieurs facteurs tels que le secteur d'activité du DO, le type de relation à engager entre le DO et les fournisseurs, etc. Les différents travaux dans ce domaine montrent cependant, que le triptyque QCD (Qualité, Coût, Délai) demeure le plus utilisé dans ce processus. Ces critères et d'autres sont parfois conflictuels, ce qui rend le processus de sélection des fournisseurs compliqué. Plusieurs méthodes ont été publiées dans la littérature pour résoudre ce problème. Le paragraphe qui suit présente un état de l'art des principales méthodes.

### 1.3.3. Méthodes de sélection des fournisseurs

Notre analyse de 36 articles publiés dans les revues spécialisées dans les domaines des achats et de la gestion de la chaîne logistique ainsi que de l'étude de Weber et al. (1991) nous ont permis de classer les différentes méthodes de sélection et d'évaluation des fournisseurs selon six catégories suivantes :

- **Modèles linéaires de pondération** : En attribuant un poids à chaque critère défini de manière subjective, un score est calculé pour chaque fournisseur en effectuant la somme des performances des fournisseurs relatives à chaque critère multipliée par le facteur de pondération associé. Cette méthode repose également sur le jugement et l'expérience de l'acheteur pour affecter les pondérations. Timmerman (1986) est parmi les premiers auteurs ayant proposé cette méthode dans ce domaine. Nous classons dans cette catégorie, les méthodes suivantes :
  - **AHP** (*Analytic Hierarchy Process*) (Narasimhan 1983, Nydick et Hill 1992, Masella et Rangone 2000) : C'est un processus qui se distingue par sa façon de déterminer les poids des critères par combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur. Le premier niveau de cette hiérarchie contient les critères principaux, suivi au deuxième niveau par les critères secondaires associés à chacun des critères principaux et ainsi de suite. Le dernier niveau donne l'arrangement relatif des fournisseurs potentiels ;
  - **FST** (*Fuzzy Sets Theory*) (Kumar et al. 2004) : La théorie des ensembles flous permet de modéliser l'incertitude et l'imprécision relatives aux valeurs des poids attribués aux critères.

- **Modèles de programmation mathématique (MP : Mathematical Programming)** : Ils représentent une fonction objectif à optimiser (minimiser ou maximiser) et peuvent inclure des contraintes sur les fournisseurs, sur le DO, etc. Les plus utilisés sont :
  - La programmation entière linéaire/non linéaire : Hong et Hayya (1992) ont proposé un modèle mathématique non linéaire à variables entières dont l'objectif est de minimiser la somme des coûts agrégés de stockage et de commande sous les contraintes de minimisation du coût d'expédition et du coût de non-qualité ;
  - La programmation linéaire/non linéaire à variables entières mixtes ; on distingue :
    - ♦ Chaudhry et al. (1993) ont proposé un modèle mathématique non linéaire qui minimise le coût d'achat sous des contraintes liées à la demande du DO, au délai de livraison et à la qualité des produits. La fonction objectif est concave et elle est représentée sous forme d'une fonction linéaire par parties ;
    - ♦ Rayaraman et al. (1999) ont présenté un modèle linéaire à variables mixtes. Le coût total à minimiser comprend un coût fixe associé à l'utilisation des fournisseurs et un coût variable correspondant au coût d'acquisition des produits. Les contraintes du modèle sont liées à la demande du DO, au délai de livraison, à la qualité des produits et aux capacités de production et de stockage des fournisseurs ;
    - ♦ Ghodsypour et O'Brien (2001) ont développé un modèle non linéaire à variables mixtes. L'objectif à minimiser est composé des coûts d'achat, de commande et de stockage. Les contraintes utilisées dans ce modèle sont liées à la demande du DO, à la qualité des produits et aux capacités de production des fournisseurs ;
    - ♦ Murthy et al. (2004) ont proposé un programme mathématique linéaire à variables mixtes dont l'objectif est de minimiser la somme des coûts d'achat, de production des fournisseurs et d'établissement de relations avec eux. Les contraintes considérées dans le modèle portent sur la demande du DO et les capacités de production des fournisseurs.
  - **GP (Goal Programming)** ou programmation *multi-objectifs* : Cette technique élaborée pour la première fois par Weber et Current (1993) permet de poursuivre simultanément plusieurs objectifs (qualitatifs et/ou quantitatifs) souvent contradictoires, en prenant en considération les priorités identifiées préalablement. D'utilisation plus complexe, la fonction objectif de cette méthode consiste à minimiser les écarts entre les finalités et les réalisations tout en traitant en priorité les écarts relatifs aux objectifs les plus importants. La recherche de l'optimum revient à minimiser ces écarts selon l'ordre de priorité de chacun. D'autres auteurs ont montré l'importance de cette méthode dans la sélection des fournisseurs (Weber et al. 2000, Liu et al. 2000, Dahel 2003, Talluri et Narasimhan (2003), Kumar et al. 2004) ;
  - **DEA (Data Envelopment Analysis)** (Weber 1996, Weber et al. 2000, Liu et al. 2000) : C'est une approche déterministe non paramétrique. Elle permet d'élaborer une enveloppe linéaire qui relie les critères par rapport auxquels il est possible de calculer l'efficacité des fournisseurs. Cette efficacité est définie comme le ratio de la somme pondérée des inputs du fournisseur (performance du fournisseur) par rapport à la somme pondérée de ses outputs (coûts d'utilisation du fournisseur). Un fournisseur est plus efficace si son efficacité est maximum. Cette méthode

peut également être utilisée comme un outil de négociation avec les fournisseurs non efficaces. Weber et al. (2000) ont d'abord utilisé la méthode de goal programming pour sélectionner les fournisseurs et l'approche DEA par la suite pour évaluer leur efficacité.

- **Méthodes basées sur le coût total** : Ce sont des techniques assez complexes et qui nécessitent l'identification et le calcul des coûts générés par les différentes activités intervenant dans l'opération d'achat telles que le contrôle de la qualité des produits, le transport, les frais administratifs, etc. Nous classons dans cette catégorie les modèles suivants :
  - **ABC** (Activity Based Costing) ou loi de Pareto ou méthode 80/20 (Roodhooft et Konings 1997) : Dans le cas de la sélection des fournisseurs, il s'agit de classer et par ordre décroissant, les achats réalisés auprès des fournisseurs en trois catégories : les 20 % des fournisseurs (classe A) représentent 80 % de la valeur des achats, les 30 % suivants (classe B) correspondent à 15 % de la valeur des achats et les 50 % (classe C) se partagent les derniers 5 % ;
  - **TCO** (Total Cost of Ownership) (Smytka et Clemens 1993, Ellram 1995) : C'est la méthode avancée de la méthode du ratio de coûts (Cost-Ratio) et qui nécessite le calcul du *coût total d'acquisition* d'un produit et qui inclut le prix d'acquisition et tous les coûts opérationnels sous jacents tels que la qualité, l'inspection, la livraison, etc.
- **Modèles statistiques/probabilistes** : Diverses approches sont suggérées dans la littérature, on distingue :
  - **Payoff Matrix** (Soukoup 1987) : Ce modèle permet de définir plusieurs scénarios du comportement futur des fournisseurs. Dans chaque scénario, une note probable est associée vis-à-vis des critères. Le fournisseur choisi est celui qui a une note stable selon différents scénarios ;
  - **VPA** (*Vendor Profile Analysis*) (Ellram 1990) : Ce modèle prend une fonction probabiliste pour chaque fournisseur vis-à-vis de chaque critère. Par simulation, on peut estimer le comportement des fournisseurs ;
  - **MNL** (*MultiNomial Logit*) : Similaire au VPA, ce modèle est utilisé pour la première fois par Verma et Pullma (1998) pour sélectionner les fournisseurs. MNL est un modèle de régression qui représente la probabilité de choisir une alternative parmi un ensemble possible de choix. L'alternative (ou profil) est définie par les niveaux d'importance attribués aux critères ;
  - **UT** (*Utility Theory*) ou théorie de l'utilité : Faisant partie de la théorie des jeux, cette méthode consiste à faire l'étude des décisions subjectives des fournisseurs en les décrivant qualitativement. Cet outil a été proposé par Min (1994) pour évaluer les fournisseurs dans le cas d'un approvisionnement international. Dans un tel contexte, la sélection des fournisseurs est plus compliquée car elle dépend d'autres facteurs tels que les différences culturelles, les barrières douanières, etc ;
  - **FA** (*Factor Analysis*) ou analyse factorielle (Tracey et Tan 2001) : Elle permet d'examiner les relations entre les critères de sélection des fournisseurs, la contribution des fournisseurs dans l'amélioration de la performance du produit, les quatre dimensions de satisfaction de client (compétitivité des prix, qualité du produit, variété des produits et service de livraison) et la performance globale de l'entreprise. Cette recherche confirme que les niveaux de satisfaction des clients

et la performance de l'entreprise dépendent des critères pris en compte dans le processus du choix et de l'évaluation des fournisseurs ;

- **ISM** (*Interpretive Structural Modeling*) (Mandal et Deshmukh 1994) : C'est une méthode analytique qui permet de déterminer les relations entre les critères et leurs niveaux d'importance pour les classer en secteurs. Représentée graphiquement, cette méthode permet d'identifier les critères dépendants des critères indépendants ;
  - **CA** (*Cluster Analysis*) (Hinkle et al. 1969) : C'est une méthode statistique qui permet de grouper les fournisseurs selon les scores obtenus pour les critères considérés dans l'analyse en un nombre de clusters (groupes). Les différences entre les fournisseurs de même cluster doivent être minimales et les différences entre les fournisseurs de différents clusters doivent être importantes.
- **Méthodes de catégorisation** : Elles permettent de regrouper les fournisseurs en fonction de leur positionnement stratégique et de la criticité du produit en des catégories homogènes afin de mieux gérer le réseau des fournisseurs. Des travaux de nature exploratoire de D'Amours et al. (2001) et qui sont basés sur un benchmark des pratiques des entreprises canadiennes ont permis d'identifier cinq catégories de fournisseurs : partenaires, stratégiques, niches, préférés ou généraux.
- Les fournisseurs *partenaires* sont ceux avec qui l'entreprise veut développer une relation de partenariat à long terme et échanger des informations stratégiques ;
  - Les fournisseurs *stratégiques* sont ceux qui ont un impact important sur la performance de l'entreprise. Sans eux, l'entreprise a des difficultés à fonctionner correctement. La relation avec ces fournisseurs est à court terme ;
  - Les fournisseurs *niches* sont ceux qui possèdent une technologie de pointe mais dont la capacité de production est limitée. Ils sont généralement localisés dans des zones géographiques spécifiques ou sont utilisés dans le cadre du développement de nouveaux produits ;
  - Les fournisseurs *préférés* sont ceux qui offrent des produits ou des services relativement faciles à remplacer et à trouver chez d'autres fournisseurs. Le nombre de ces fournisseurs par produit est limité à un ou deux ;
  - Les fournisseurs *généraux* sont ceux qui ont un impact minimal sur la performance de l'entreprise. Généralement, plusieurs fournisseurs de ce type sont disponibles et sont de plus en plus visibles sur Internet, ce qui implique l'utilisation du commerce électronique pour réaliser des achats auprès d'eux.

D'autres études de segmentation des fournisseurs sont également proposées dans la littérature. Nous pouvons citer :

- L'étude de Masella et Rangone (2000) citée auparavant et qui consiste en une segmentation des fournisseurs selon le type de relation à laquelle ils appartiennent. Cette relation dépend de l'horizon (court ou long terme) et du degré d'intégration entre le DO et le fournisseur ;
- L'étude empirique de Svensson (2004) auprès d'entreprises européennes opérant dans l'industrie automobile montre que les relations avec les fournisseurs sont de quatre types : transactionnel, amical, partenariat ou familial.

Les critères de sélection dépendent de la catégorie à laquelle appartient le fournisseur. Il est à noter que la catégorisation des fournisseurs est un processus évolutif étant

donné qu'un fournisseur peut changer de catégorie au cours de sa relation d'affaires avec le DO.

- **Intelligence Artificielle** : Contrairement aux approches quantitatives présentées auparavant, les outils de l'intelligence artificielle visent à intégrer les facteurs qualitatifs et l'expertise humaine dans le processus de sélection des fournisseurs. On distingue dans cette catégorie les systèmes suivants :
  - **ES** (*Expert System*) (Vokurka et al. 1996) : Les systèmes experts sont utilisés pour représenter les connaissances et l'expertise que détiennent les professionnels des achats sur les fournisseurs ainsi que les informations recueillies de la littérature sur les différentes étapes du choix et de l'évaluation des fournisseurs tels que la formulation des critères de sélection, etc. ;
  - **CBR** (*Case-Based-Reasoning system*) : C'est une approche qui utilise les connaissances déduites des expériences similaires ou antérieures sur les fournisseurs afin de prendre les décisions sur leur pré-qualification. La pré-qualification consiste à réduire le nombre des fournisseurs en un ensemble de fournisseurs acceptables ou approuvés (Ng et Skitmore 1995).

Dans leur étude sur les différentes méthodes de sélection des fournisseurs publiées dans la littérature après l'étude de Weber et al. (1991), De Boer et al. (2001) ont montré que ces méthodes varient selon les quatre étapes du processus de sélection des fournisseurs et du type de l'achat à réaliser. Un positionnement approximatif de ces méthodes ainsi que leur répartition selon le type d'achat sont respectivement donnés dans la figure 1.3 et le tableau 1.4 suivants :

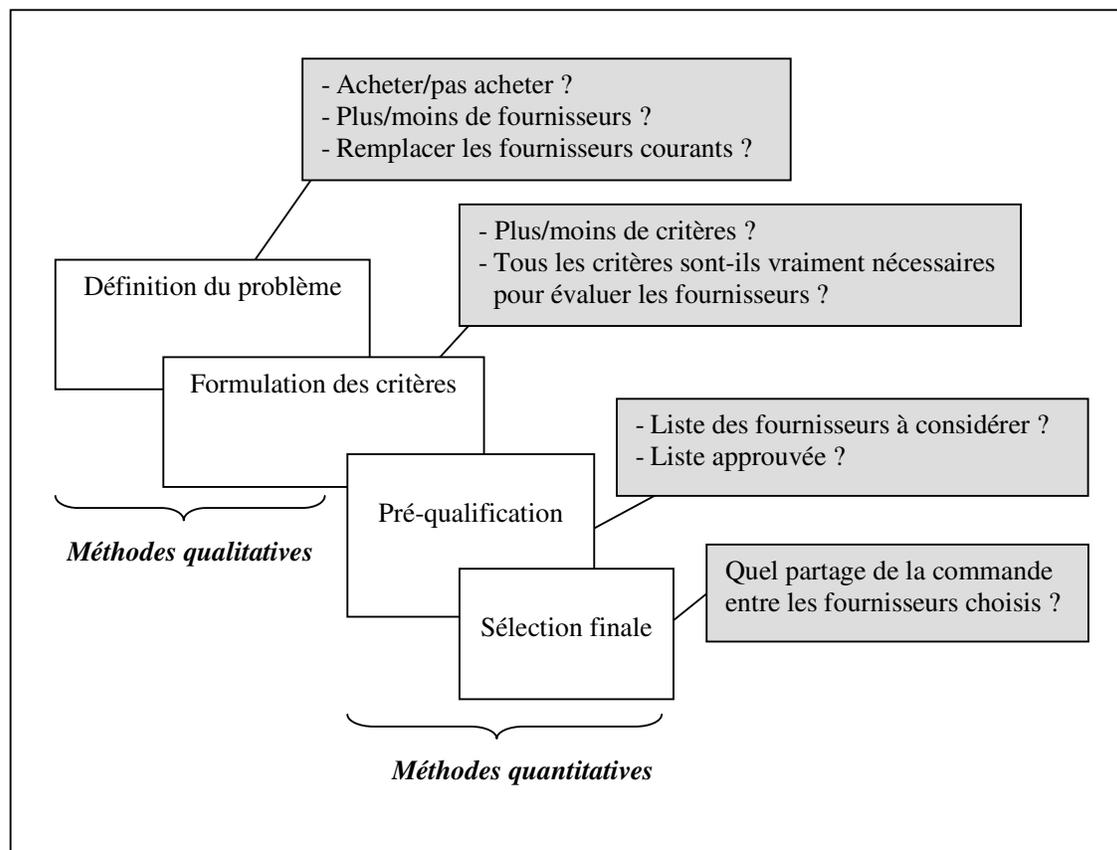


Figure 1.3. Positionnement approximatif des méthodes de sélection des fournisseurs

Type d'achat \ Etapes de Sélection des fournisseurs	Achat de nouveau produit	Achat modifié (produit influent)	Achat urgent (produit courant)	Achat urgent (stratégique/goulot d'étranglement)
Définition du problème				
Formulation des critères			ISM	ISM, ES
Pré-qualification des fournisseurs	Catégorisation	AHP, CA, DEA, ES, CRB, UT, Catégorisation	AHP, CA, DEA, Catégorisation	Catégorisation
Sélection finale	AHP, ES, CA, FST, UT	AHP, CA, DEA, GP, TCO, MP	AHP, CA, MP, UT	ABC, AHP, CA, FST, UT

Tableau 1.4. Méthodes de sélection des fournisseurs en fonctions du type d'achat

- Dans le cas de l'achat d'un nouveau produit, les fournisseurs sont inconnus et l'incertitude sur la spécification du produit et sur les fournisseurs est à un niveau élevé ;
- L'achat modifié correspond soit à l'achat d'un nouveau produit chez des fournisseurs connus, soit à l'achat du produit habituel (existant) chez de nouveaux fournisseurs ;
- Dans le cas de l'achat urgent, des informations cohérentes sur la spécification des produits et sur les fournisseurs sont nécessaires. De plus, ce type d'achat implique de placer un ordre auprès des fournisseurs sans existence de contrat préalable avec eux.
  - Dans une situation "goulot d'étranglement", le marché d'approvisionnement est monopolistique et les contrats avec les fournisseurs doivent être à long terme ;
  - Dans le cas d'un produit "stratégique", des relations de partenariat avec quelques fournisseurs sont à développer.

Notons que dans cette étude, aucune publication traitant l'étape de définition du problème de sélection des fournisseurs n'a été identifiée.

Enfin, Gargeya et Su (2004) ont analysé 27 articles basés sur des études de type empirique réalisées durant les dix dernières années (1993-2002) sur l'approvisionnement stratégique et la sélection des fournisseurs dans les entreprises en majorité membres de NAPM. Cette analyse montre les méthodes d'analyse statistique des données (analyse de variance, corrélation, régression, etc.) sont les plus utilisées.

Des méthodes intégrant deux à plusieurs de ces différentes méthodes sont également proposées dans la littérature, nous pouvons citer :

- Youssef et al. (1996) qui ont proposé un modèle combinant les méthodes multicritères et le méthode du coût total d'acquisition (TCO) ;
- Degraeve et Roodhooft (1999) ont utilisé un modèle composé de la programmation mathématique et du TCO ;
- Çebi et Bayraktar (2003) ont développé un modèle composé des méthodes AHP et GP ;
- Kumar et al. (2004) ont utilisé une approche composée de FST et GP.

L'utilisation de l'une ou de l'autre des différentes approches présente des avantages et des inconvénients que nous définissons dans le paragraphe suivant.

#### **1.3.4. Avantages et inconvénients des méthodes de sélection des fournisseurs**

Le tableau 1.5 ci-dessous regroupe les principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes de sélection des fournisseurs :

<i>Méthodes</i>		<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Pondération</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapide et simple à utiliser</li> <li>- Tient compte des critères subjectifs</li> <li>- Mise en œuvre peu coûteuse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépend du jugement humain</li> <li>- Pas de possibilité d'introduire des contraintes dans le modèle.</li> </ul>
<i>Programmation mathématique</i>	<i>Multi objectifs</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les critères n'ont pas forcément une dimension commune</li> <li>- Propose plusieurs solutions</li> <li>- Possibilité d'introduire ou non les contraintes dans le modèle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tient compte avec difficulté des critères subjectifs</li> <li>- Ne propose pas une solution optimale</li> <li>- Difficile d'analyser les résultats de la méthode.</li> </ul>
	<i>Mono-objectif</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propose une solution optimale</li> <li>- Possibilité d'introduire ou non des contraintes dans le modèle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne tient pas compte des critères subjectifs.</li> </ul>
<i>Méthode basée sur le coût</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aide à identifier la structure de tous les coûts</li> <li>- Permet de négocier les valeurs des coûts avec les fournisseurs</li> <li>- Très flexible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accès aux données sur les coûts parfois limité</li> <li>- Expression de certains coûts en monétaire difficile.</li> </ul>
<i>Statistiqu et /ou probabiliste</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse le comportement incertain des fournisseurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de solution optimale</li> <li>- difficile à analyser</li> <li>- Pas de possibilité d'introduire des contraintes mathématiques dans le modèle.</li> </ul>
<i>Catégorisation</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Structure de manière claire et systématique, le processus d'évaluation des fournisseurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne définit pas clairement l'importance relative de chaque critère</li> <li>- Méthode subjective.</li> </ul>
<i>Intelligence artificielle</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Offre une base de connaissance flexible ;</li> <li>- Tient compte des facteurs qualitatifs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La collecte des connaissances sur les fournisseurs et l'accès à l'expertise est longue et difficile.</li> </ul>

**Tableau 1.5.** *Avantages et inconvénients des méthodes de sélection des fournisseurs*

Ainsi, après avoir décider des critères et des méthodes de sélection des fournisseurs à utiliser, l'entreprise DO sera amenée à choisir entre la stratégie de s'approvisionner auprès d'un seul fournisseur ou de plusieurs fournisseurs. Le paragraphe suivant illustre les avantages et les limites de l'utilisation de l'une ou de l'autre stratégie.

## 1.4. Stratégie à un fournisseur ou à plusieurs fournisseurs

La problématique de choisir un seul fournisseur ou de partager l'offre entre plusieurs fournisseurs est très largement traitée dans la littérature. L'une et l'autre présentent des avantages et des inconvénients.

- **Stratégie à un seul fournisseur (mono sourcing)** : Le travail avec un seul fournisseur permet de nouer des relations pouvant aller jusqu'au partenariat et à la mise en place de programme de JAT. Ainsi, le DO et le fournisseur peuvent participer à la synchronisation de leurs systèmes de production et de livraison, ce qui permet de réduire les stocks. En effet, des livraisons multiples en petites quantités et à intervalles d'arrivée déterminés de manière optimale permet au DO de minimiser les coûts et gagner en productivité (Chiang et Chiang 1996).

L'inconvénient majeur de cette stratégie est qu'elle peut produire des réactions monopolistiques et opportunistes chez le fournisseur en raison de l'éloignement de la pression de la concurrence. Pour éviter cet effet, et dans le cas où le DO ne pourrait s'approvisionner qu'en mono-source, il est nécessaire que celui-ci mette en place un système d'évaluation dynamique du fournisseur. Mais dans le cas le plus général, le DO s'oriente vers une stratégie à plusieurs fournisseurs ;

- **Stratégie à plusieurs fournisseurs (multiple sourcing)** : La concurrence entre les fournisseurs les amène à atteindre le niveau de performance souhaité et augmente le pouvoir de négociation du DO, ce qui limite l'apparition de comportements opportunistes de la part des fournisseurs et minimise la dépendance du DO vis-à-vis d'un seul fournisseur. De plus, cette stratégie peut impliquer le partage de la commande entre plusieurs fournisseurs, ce qui permet de réduire l'incertitude sur les délais de livraison et diminuer les coûts de stockage et le risque de rupture de stock (Ganeshan et al. 1999, Sedarage et al. 1999). Ces gains réalisés sur les coûts de stock peuvent compenser les coûts importants de commande. L'étude exploratoire de Goffin et al. (1997) indique que les entreprises tendent de réduire la base de leurs fournisseurs, ce qui leur permet de gérer de manière efficace les fournisseurs retenus en améliorant leur performance en terme de qualité, délai et coût. Cette réduction favorise également l'établissement de relations de coopération à long terme avec les fournisseurs, pouvant aller jusqu'au partenariat. Le temps nécessaire pour développer ces relations de long terme est directement proportionnel au nombre de fournisseurs.

Par conséquent, un compromis doit être fait pour choisir entre l'une ou l'autre des deux stratégies. De plus, des contraintes internes liées au nombre maximum de fournisseurs à utiliser, les quantités à commander, la gestion des stocks, etc., et externes telles que la capacité de production des fournisseurs, la capacité de transport, le nombre et les délais de livraisons, etc., ont une incidence sur le choix du nombre de fournisseurs à contracter.

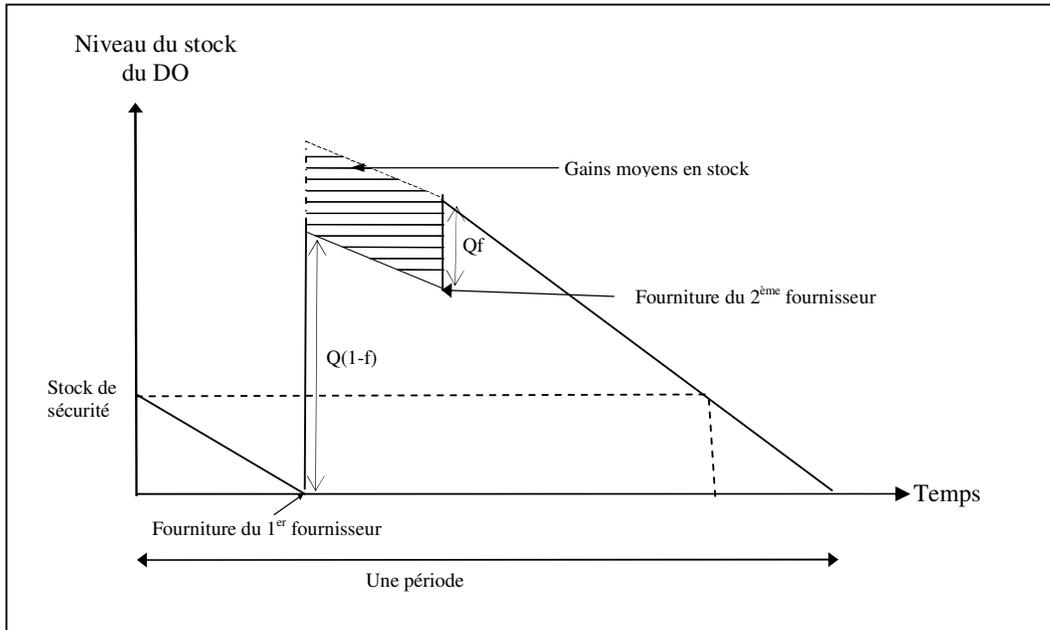
## 1.5. Impact des politiques de gestion des stocks

Les modèles de gestion de stock que l'on retrouve dans la littérature classique de gestion industrielle Giard (2003) se rapportent toujours à un seul fournisseur. En effet, en considérant une demande donnée (déterministe ou aléatoire) et des délais de livraison (déterministes ou aléatoires), le point de commande et les lots d'approvisionnement (fixes ou variables), se rapportent toujours à l'utilisation d'un seul fournisseur.

Dans le cas de plusieurs fournisseurs, les modèles standard des coûts définissant la variation du coût de stockage en fonction de temps changent. La plupart des études dans ce domaine considèrent surtout le cas de deux fournisseurs. Nous pouvons citer :

- Ganeshan et al. (1999) se sont intéressés à la détermination des points de commande associés aux fournisseurs ainsi qu'aux quantités à leur commander. Les auteurs supposent que l'entreprise a un fournisseur préféré, responsable de la majorité des ordres placés et caractérisé par un faible temps de réponse (moyenne et variance). En plus, l'entreprise a une option d'utiliser un second fournisseur qui offre des remises sur le prix d'achat. Cependant, il n'est pas fiable car le temps de réponse (moyenne et variance) est plus long. Toutefois l'entreprise gagne en la valeur du stock en s'approvisionnant auprès des deux fournisseurs. La figure 1.4 ci-dessous illustre les deux points de commande : le premier correspond au 1<sup>er</sup> fournisseur avec une quantité commandée de  $Q(1-f)$  et le 2<sup>ème</sup> point de commande correspond à l'arrivée du reste de la commande  $Qf$  du 2<sup>ème</sup> fournisseur.  $Q$  et  $f$

désignent respectivement la quantité totale à commander aux deux fournisseurs et la fraction de cette quantité à attribuer au 2<sup>ème</sup> fournisseur ;



**Figure 1.4.** Stock moyen du DO dans le cas de dual sourcing (Ganeshan et al. 1999)

- Anupindi et Akella (1993) ont étudié les effets de l'approvisionnement auprès de deux fournisseurs sur le système de stockage du DO, dans le cas d'un environnement incertain. Dans ce cas, la demande, les délais de livraisons, les prix, les capacités des fournisseurs, etc. peuvent être aléatoires. Les auteurs ont proposé trois modèles de minimisation de la somme des coûts de commande, de stockage et de pénalité. La demande suit une loi de distribution continue. Chaque modèle correspond à l'une des trois différentes stratégies de livraison suivantes:
  - Une seule livraison en une seule période : Les fournisseurs doivent livrer toute la demande durant la période considérée si celle-ci est disponible en totalité, sinon, tous les ordres seront déplacés à la prochaine période. Ce cas d'étude reflète par exemple l'aspect incertain des capacités des fournisseurs ;
  - Même situation que dans le premier cas, mais la fraction de la demande non disponible durant la période considérée ne sera pas livrée à la prochaine période mais sera annulée. Dans cette situation, le DO peut par exemple n'utiliser qu'un seul fournisseur, celui qui offre un prix plus bas ;
  - Plusieurs livraisons en plusieurs périodes : Les fournisseurs doivent livrer les quantités disponibles durant la période considérée et le reste de la commande à la prochaine période.
- Swaminathan et Shanthikumar (1999) ont utilisé le même modèle pour montrer qu'il est aussi possible de commander la majorité de la demande auprès du fournisseur le plus cher mais très performant en terme de délai. Dans ce cas, la demande est approximée par une loi discrète (loi Poisson, en particulier) contrairement à l'étude précédente où la demande est décrite par une loi continue (loi Normale, en particulier) ;
- Janssen et De Kok (1999) ont montré que le coefficient de variation de la demande représente un facteur déterminant de la valeur optimale de la quantité à commander par

période. En effet, plus ce coefficient est grand, plus c'est avantageux de commander la plus large part de la demande au fournisseur le plus cher et flexible. Cette situation coïncide avec la décision "faire à la commande (*Make-To-Order*)" dans laquelle la flexibilité est très importante. Dans le cas où ce coefficient serait faible, le besoin de la flexibilité est faible et le coût d'achat domine ;

- Dans le cas où les délais de livraison des fournisseurs et la demande du DO seraient aléatoires, Sedarage et al. (1999) ont élaboré un modèle analytique qui minimise le coût total par unité de temps. Ce coût inclut les coûts d'achat, de commande, de possession et de pénurie. Le modèle permet de déterminer le niveau du stock pour lequel il y a émission d'un ordre ainsi que la quantité à commander à chaque fournisseur. Cette quantité décroît quand le nombre de fournisseurs augmente.

## 1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse large de la littérature sur le problème de la sélection et d'évaluation des fournisseurs. Ceci nous a permis de déduire que ce problème est complexe par le fait qu'il requiert l'utilisation de plusieurs critères souvent conflictuels. De plus, cette analyse nous a permis de classer les différentes approches de sélection des fournisseurs en six catégories et qui sont : les modèles linéaires de pondération, la programmation mathématique, les modèles statistiques/probabilistes, les modèles basés sur le coût, la catégorisation et l'intelligence artificielle.

Nous avons aussi abordé les différentes stratégies d'approvisionnement (mono ou multiple sourcing) auxquelles ont recours les industriels, les limites et les risques de chacune de ces stratégies ainsi que l'impact de l'utilisation d'un réseau de plusieurs fournisseurs sur la gestion des stocks du DO.

Il découle de cette analyse que le transport représente une des contraintes externes importantes dans la décision d'approvisionnement vue son impact direct sur le coût total du produit, sur les délais de livraisons et sur le système de stockage dans tout le réseau logistique.

Par conséquent, pour étudier de manière explicite l'impact du transport sur la décision du choix des fournisseurs, et qui est l'objet du chapitre 3, on envisage d'aborder dans le chapitre 2 suivant, une étude générale des différentes caractéristiques du transport de marchandises dans une chaîne logistique de distribution.

## Chapitre 2 : Transport de marchandises

### 2.1. Introduction

En raison de la mondialisation et de la globalisation des économies, les flux de matière entre les centres de production et de distribution ont connu un accroissement important. Par ailleurs, les politiques de JAT et de la logique des flux tendus contribuent également à cette croissance en conduisant à de plus fréquents trajets des véhicules par la diminution des tailles des envois. Simultanément, les systèmes informatiques permettent l'organisation et le contrôle des flux physiques par le suivi télématique individuel des objets, grâce aux outils de tracing (traçabilité), de tracking (suivi en temps réel) et d'échanges de données informatisés (EDI). Enfin, et d'un point de vue macro-économique, l'abaissement continu des coûts de transport contribue directement à l'augmentation des échanges et à l'élargissement d'espaces géographiques de plus en plus indépendants.

Cependant, cette forte croissance de transport de fret implique une consommation accrue de l'énergie et d'autres nuisances, et en retour, un accroissement des pressions sur l'environnement.

L'objectif de ce chapitre est alors de décrire les éléments d'un système de transport. Dans la section 2, on présentera les différents niveaux de planification du transport. La section 3 sera consacrée à la présentation des différents modes de gestion de transport. On discutera dans la section 4 des divers modes de transport à travers leurs caractéristiques et leurs particularités. Dans la section 5, on étudiera l'impact du transport sur l'environnement ainsi que les coûts externes générés par chacun des modes de transport. La section 6 présente les avantages et les inconvénients de chaque mode de transport. Dans la section 7, on passera en revue les différentes modélisations de transport de fret. Finalement, une conclusion récapitulera les points essentiels de ce chapitre.

### 2.2. Niveaux de planification du transport

La planification du transport de marchandises est parmi les principales décisions logistiques d'une entreprise et qui se rattache aux trois niveaux suivants :

- **Niveau stratégique** : Ce niveau concerne les décisions planifiées à long terme et qui se rapportent à la conception du système du transport telles que la configuration et la conception du réseau de distribution en terme de l'espace couvert, de la détermination du nombre des sites logistiques (terminaux, dépôts, etc.) à utiliser et de leur localisation, le type du service offert au client en terme de chargement (chargement partiel ou complet), du mode du transport (rail, route, mer, air ou voie d'eau), du type de gestion (compte propre ou compte d'autrui), du type de livraison (directe ou intermodale), etc. Les décisions stratégiques ont un impact sur les décisions tactiques et opérationnelles ;

- **Niveau tactique :** À ce niveau, les décisions sont à moyen terme et elles concernent le plan de chargement, les itinéraires à choisir, les équipements à acheter, la taille des envois, etc. Ce niveau influe sur les décisions prises au niveau opérationnel ;
- **Niveau opérationnel :** Il s'agit à ce niveau des décisions à prendre à court terme et qui concernent la planification des opérations courantes du transport telles que l'affectation des véhicules aux axes du réseau suite à une variation de la demande, la répartition des véhicules en temps réel, le contrôle des transporteurs, etc.

## 2.3. Modes de gestion du transport

En termes d'organisation économique, certaines entreprises choisissent encore de travailler avec leur propre flotte ou avec des véhicules loués pour garder le contrôle des coûts ; et dans ce cas se pose le problème de la rentabilité des retours. On parle alors de **transport pour compte propre**. Mais une large part du transport est assurée par des entreprises spécialisées qui offrent des services de haut niveau et on parle alors de **transport pour compte d'autrui**.

En général, le transport pour compte propre est préféré quand il est intimement lié à l'activité industrielle ou commerciale du chargeur. De plus, il porte sur des distances courtes, sur des trajets en forme de circuit ou de navette. Quand le transport est plus occasionnel, plus facilement isolable comme prestation spécifique et sur une plus longue distance, il est plus souvent confié à une entreprise spécialisée. Une enquête réalisée en 2001 par le service économique et statistique (SES) du ministère des transports (voir <http://www.transports.equipement.gouv.fr>) indique que la distance moyenne de transport d'une tonne s'élevait à 132 Km en compte d'autrui contre 38 Km en compte propre. De plus, le compte d'autrui représentait environ 84 % des tonnes kilomètres (t Km) produites par le transport routier.

Dans le paragraphe qui suit, nous allons étudier les pratiques industrielles de transport en considérant l'importance économique de chaque mode ainsi que les différentes organisations adoptées. Les informations et les données statistiques indiquées dans ce paragraphe sont issues des différentes études produites par SES en 2001, le Livre blanc de 2001 et les sites Web du conseil national des transports (<http://www.cnt.fr>), de la SNCF (<http://www.sncf.com>) et des techniques de l'ingénieur (<http://www.techniques-ingenieur.fr>).

## 2.4. Différents modes de transport

Chaque mode de transport est caractérisé par une structure technique (infrastructures, matériels), logistique et économique différente. Il en résulte que, pour assurer un type de trafic déterminé sur un trajet défini, il existe le choix entre plusieurs modes transport. Ces modes peuvent se concurrencer ou se compléter en termes de coût, de rapidité, de service, d'accessibilité, de sécurité, etc. Dans ce paragraphe, on exclut l'étude du transport par oléoducs et gazoducs, spécifié aux produits pétroliers et aux gaz naturels.

### 2.4.1. Transport routier

Le transport routier de marchandises est le principal mode de transport et il représente une part majoritaire des tonnes-kilomètres produites, compte tenu de sa flexibilité et sa compétitivité, surtout pour des distances moyennes faibles. Les autres modes sont en effet désavantageux par les coûts de ruptures de charge qu'ils entraînent en général, mais ils offrent

des coûts plus faibles sur des axes massifs. Ainsi, à moins de 50 Km, la part modale du transport routier est presque totale (96,8 %). A plus de 300 Km, elle reste encore nettement majoritaire (66,3 %).

Le Livre blanc de 2001 signale que la route représente 44 % du transport de marchandises dans l'Union Européenne en 1989, contre 41 % à la navigation maritime à courte distance, 8 % au rail et 4 % à la voie fluviale.

Le type de chargement des camions représente également un aspect important dans l'organisation du transport routier. Deux types sont utilisés et qui sont :

- *Le chargement complet ou le transport à charge entière* : Connu en terminologie anglaise par *TL (TruckLoad)*, il est effectué par un véhicule allant d'un point à un autre avec un seul envoi. On parle aussi de *transport de lot* et il représente environ deux tiers du volume du transport routier de marchandises exprimé en tonnes-kilomètres. Son objectif consiste à la recherche d'un meilleur remplissage des véhicules ;
- *Le chargement partiel ou le chargement de lots brisés ou LTL (Less-than-TruckLoad)* : Il est effectué par un véhicule qui prend plusieurs envois depuis et/ou à destinations de lieux différents. On parle aussi de *la messagerie*. Les envois sont de moins de 3 tonnes et sont constitués de colis de deux dimensions : monocolis ou multicolis :
  - La messagerie *monocolis* s'applique à un colis, d'un poids limité à une trentaine de Kg, son tarif est assez économique (moins de 4 € par colis) et ses dimensions sont en général calibrées ;
  - La messagerie *multicolis* est segmentée, selon le délai de livraison, en trois types de messageries :
    - ♦ La messagerie *express* consiste en un enlèvement de l'envoi (un ou plusieurs colis) avant 18 heures pour une livraison le lendemain avant 10 heures ou 12 heures, avec des délais garantis, une remontée d'informations et un suivi des livraisons. Le poids moyen est de 29 kg et le prix moyen de l'ordre de 80 c€/kg ;
    - ♦ La messagerie *traditionnelle* conduit à des délais de livraison qui dépassent 24 heures. Le poids moyen est de 102 kg et le prix moyen est de 25 c€/kg ;
    - ♦ La messagerie *rapide*, où l'enlèvement d'un envoi avant 18 heures conduit à une livraison le lendemain avant 18 heures. Ce type de messagerie peut être, selon les cas, intégré à la messagerie express ou traditionnelle.

A cette segmentation de la messagerie selon le délai de livraison, s'ajoute une dimension internationale ou nationale.

L'activité de TL qui était la plus fréquente pour les transports à longue distance tend à diminuer avec la réduction des stocks et l'augmentation corrélative de la fréquence des livraisons, en faveur de l'activité de LTL.

Notons enfin que le transport routier à l'avantage d'être direct ou combiné aux autres modes de transport.

### 2.4.2. Transport ferroviaire

En 1989, la part du fret ferroviaire en tonnes-kilomètres est de 8 % en Europe contre 40 % aux USA. En terme de coût, le transport par rail est de moins en moins cher et il a le potentiel de croissance le plus prometteur sur les grandes distances.

L'acheminement de fret par rail se fait selon trois systèmes :

- **Les trains entiers** : Dans cette catégorie, on distingue :
  - *Le train complet* : C'est un groupe de wagons, généralement 20 à 30, circulant sur tout leur parcours, sans passage par les triages et remis par un même expéditeur pour un même destinataire ;
  - *Le train de wagons de particuliers vides* : Il constitue moins de 360 tonnes ou 300 m de longueur ;
  - *Le rapilège*, acronyme de *rapide et léger* : C'est un train d'une dizaine de wagons, le plus souvent pour une masse brute de 800 à 1000 tonnes et bénéficiant généralement d'un acheminement privilégié ;
  - *Le train par association de rames* : Il est composé de wagons acheminés en commun seulement sur la majeure partie de leur parcours.
- **Le lotissement** : Il s'agit de l'acheminement des wagons isolés et de petits groupes de wagons. La nature de service offert au client dépend de la nature de la marchandise et de délai du parcours entre triages d'escale des wagons. Le lotissement répond à des besoins inférieurs au train entier ;
- **Les trains de l'organisation spéciale** : Ce sont des trains dont l'exploitation n'est ni lotissements ni trains complets. C'est le cas du transport d'automobiles, des denrées périssables, du transport intermodal, etc. L'organisation spéciale est fondée sur deux types de trains : les trains de point à point et les trains passant par un *point nodal*.

Le point nodal est un triage dédié, en totalité ou en partie, au traitement des trains de l'organisation spéciale en provenance et à destination directe de terminaux. Ce point permet de traiter les trains en un lieu unique, avec un gain de temps (correspondances rapides entre les trains) et de rentabilité (meilleur taux de remplissage).

Le transport par rail peut être direct entre deux sites industriels s'ils possèdent un prolongement de la voie ferrée jusqu'à leur site de production, c'est ce que l'on appelle l'installation terminale embranchée (ITE). Les ITE offrent des délais performants pour les transports massifs (de 200 à 1200 tonnes). En France, plus de 5000 entreprises industrielles ont adopté cette technique de ITE (source SNCF 2002).

Dans le cas le plus général, le transport par rail est combiné avec les autres modes de transport et en particulier avec la route.

### 2.4.3. Transport aérien

Bénéficiant de la libéralisation du ciel, le transport aérien a vu son volume de marchandises quadrupler depuis 1970. Ses principaux avantages, à savoir sa rapidité, sa sécurité et sa capacité volumétrique, assurent les échanges internationaux. De plus, il est particulièrement adapté au transport des denrées périssables et des biens de luxe. Cependant, son coût élevé reste un facteur désavantageux de son choix en comparaison avec le transport terrestre.

Le transport aérien se distingue de ses concurrents par l'hétérogénéité de l'offre. Celle-ci se répartit entre :

- *Les capacités fret dans les soutes des avions passagers* : Elles représentent plus de la moitié de l'offre fret mondiale. En effet, tous les avions de passagers sont équipés de soutes pour le transport des bagages, de la poste et du fret. Leurs capacités varient de quelques dizaines ou centaines de kg pour les appareils régionaux à 25 tonnes pour les avions longs courriers (Boeing 747, Airbus A340). De plus, les avions passagers apportent un autre atout : l'effet fréquence ;
- *Les capacités sur avions cargo* : Les avions cargo offrent des capacités importantes pouvant aller jusqu'à 150 tonnes. Ils sont particulièrement bien adaptés aux opérations militaires, aux opérations humanitaires de l'ONU ainsi qu'aux transports exceptionnels civils.

L'on estime que 2/3 des marchandises acheminées par voie aérienne le sont par des vols commerciaux transportant les passagers.

Le transport aérien entre les sites industriels n'est jamais direct, mais combiné avec la route.

#### **2.4.4. Navigation fluviale**

Silencieux, fiable, d'une grande capacité d'emport et peu consommateur d'énergie, le transport fluvial peut apporter une alternative pertinente face à l'engorgement des villes et aux enjeux liés à l'environnement. De plus, il garantit un degré élevé de sécurité, en particulier pour le transport de marchandises dangereuses. Sa vitesse est faible de 10 à 30 Km/h.

Deux catégories de transport de fret par voie navigable sont utilisées :

- *Les automoteurs*, qui sont de deux types :
  - *Le petit gabarit* : Il est caractérisé par une longueur de 38,50 m et une largeur 5,05 m. Sa capacité varie de 250 à 400 tonnes ;
  - *Le grand gabarit* possède une longueur pouvant aller jusqu'à 95 m et une largeur de 11,40 m. Sa capacité peut être de 3500 tonnes.
- *Les barges* : Unités de transport fluvial non motorisées, généralement propulsés par des bateaux pousseurs (petits bateaux remplis par de gros moteurs), et dont l'accouplement à plusieurs forme un convoi. Leur largeur peut aller jusqu'à 23 m (cas des convois sur le Rhin et le nord de la Belgique) et leur capacité peut atteindre 25000 tonnes par convoi.

Les barges ont une double vocation puisqu'elles servent également d'unités de stockage.

Ainsi, par exemple, une péniche de 250 tonnes transporte autant qu'une dizaine de camions et un automoteur rhénan autant qu'un train complet. De même, un convoi de 3800 tonnes équivaut à 66 wagons de 58 tonnes chacun ou à 127 camions semi-remorques de 30 tonnes chacun.

En moyenne, le transport intraeuropéen par voie fluviale représente environ 8 % en tonne/Km du transport total, mais près de 20 % dans le Benelux. En France, 47 % du trafic par voie d'eau est réalisé avec l'Union Européenne et, à l'intérieur, 35 % du trafic se fait depuis ou vers les ports maritimes.

Le transport fluvial est rarement direct puisqu'il suppose que l'entreprise soit implantée au bord d'eau. Dans le cas le plus général, il est combiné à la route et/ou au transport maritime.

### 2.4.5. Navigation maritime

La mondialisation croissante de l'économie a été largement autorisée par le transport maritime et sa rapide évolution, tant au niveau de l'organisation, de l'évolution technologique que des prix de transport. Il génère un trafic couvrant près de 90 % de la demande de transport intercontinentale de fret. Sa force repose surtout sur sa grande capacité permettant d'assurer des transports lourds et volumineux. Ainsi, un navire de 30000 tonnes par exemple peut transporter autant que 750 poids lourds ou 20 barges. C'est également le plus économe des modes de transport. Cependant, sa vitesse moyenne demeure très faible (28 Km/h).

Le transport maritime est très ancien et reste vital pour le commerce international et les échanges massifs (notamment pétroliers) à longue distance. Il est aussi très important pour les échanges à courte distance (cabotage) dans les régions irriguées par les mers, notamment en Europe où la navigation maritime est l'une des plus importantes au monde en termes de volume de trafic ou de densité de port. Le triangle de plus grande concentration, formé par Londres, le Havre et Hambourg, traite plus de 60 % du trafic maritime des conteneurs.

Deux grands marchés composent l'offre maritime, à savoir le transport à la demande et le transport de ligne régulière :

- *Le transport à la demande ou l'affrètement ou tramping en anglais* : C'est un service de transport maritime à la demande, c'est à dire que le navire est affrété au voyage ou à temps. Ce type de service concerne le transport du pétrole, des minerais de fer, du charbon et des céréales. Le chargeur recourt à ce type de transport dès qu'il a la quantité suffisante pour charger son navire et qu'il n'est pas contraint par des fréquences de livraison en approvisionnements élevées ;
- *Le transport de ligne régulière* : Il concerne le transport de lots plus petits et plus fréquents. Ce type de transport a connu les plus grandes évolutions suite à l'augmentation des échanges manufacturés et la nécessité d'ajuster au mieux les flux par rapport à la demande. Dans cette catégorie, on distingue :
  - *La ligne régulière appartenant à une conférence* : C'est un service qui est assuré par des navires naviguant à des intervalles réguliers entre des ports déterminés. La conférence correspond à l'association d'armateurs constituée pour fixer les conditions d'exploitation des lignes régulières ;
  - *La ligne hors-conférence* : C'est un service assuré par des transporteurs indépendants qui ont des prix plus bas mais pas de service régulier.

Le transport maritime est dans la majorité des cas, combiné aux autres modes de transport. Un exemple type est celui des produits à destination de l'Ile de France qui arrivent par bateau jusqu'à Rouen, puis continuent leur trajet sur la Seine avant de terminer leur voyage par camion.

### 2.4.6. Transport intermodal

Le principe du transport intermodal est l'acheminement de la marchandise entre une source et une destination au moyen d'un seul contenant, appelé unité de transport intermodal (UTI), utilisant plusieurs modes de transport et sans manutention de la marchandise lors des changements de mode.

Le transport *combiné* correspond au transport intermodal dont les parcours initiaux et/ou terminaux, généralement les plus courts possibles, s'effectuent en principe par route (appelé en terminologie anglaise "drayage"). Dans le cas de transport combiné rail-route, la distance minimale retenue pour l'acheminement ferroviaire est de 500 km.

Le transport combiné représente l'un des axes stratégiques de développement du transport en Europe. Actuellement, l'Allemagne est le leader européen de ce mode de transport avec une part de 60 %.

Les UTI utilisées sont de trois types :

- *Les semi-remorques*, qui sont les premiers UTI, surtout pour le transport combiné terrestre ;
- *Les conteneurs maritimes*, qui sont d'une grande résistance mécanique pour permettre leur gerbage (jusqu'à 7 niveaux) à bord des navires. Il existe diverses dimensions de conteneurs, selon la nature de la marchandise à transporter (fourgons, citernes, conteneurs vrac, isothermes, frigorifiques, etc.), mais la dimension de référence est l'unité Equivalent Vingt Pied (EVP) : 6,20 m × 2,50 m × 2,50 m. L'utilisation des conteneurs a permis le développement des lignes régulières ;
- *Les caisses mobiles*, qui sont adaptées de manière optimale en fonction des véhicules routiers et équipées d'éléments de préhension permettant le transbordement entre modes, habituellement rail-route.

Le changement de modes des UTI se déroule dans ce qu'on appelle le terminal de transbordement et qui possède de nombreuses fonctions telles que :

- La préparation des chargements du mode de transport et l'optimisation de ce chargement ;
- Le contrôle de poids des UTI et de la sécurité du transport des matières dangereuses par exemple ;
- La gestion du stock d'UTI ;
- La transmission des informations aux différents intervenants de la chaîne du transport ;
- La réparation des UTI en cas de besoin, etc.

L'intermodalité a ses racines dans l'espace maritime avec l'avènement du conteneur à la fin des années 1960. A l'aube des années 1980, le phénomène a pris de l'expansion vers l'intérieur des terres. La tendance au développement de ce type de transport est due à des raisons techniques et économiques. D'une part, l'usage du réseau ferré ou de la voie d'eau impose souvent un transport d'approche, par la route, qui ne se justifie que pour de longs parcours ferroviaires ou fluviaux. D'autre part, la structure des coûts du transport n'est pas la même selon les modes. Le coût de transport est par exemple, inférieur par la route sur les courtes distances et par le fer, la mer ou le fleuve sur les longues distances. Enfin, l'intermodalité implique la massification des marchandises, ce qui permet de faire des économies d'échelle : plus les quantités transportées sont importantes, plus le coût moyen de transport baisse.

Plusieurs catégories de transport intermodal sont possibles :

- L'exploitation en série du rail et de la route (*Ferroulage* ou *Piggyback*) à l'aide de conteneurs ou de remorques. Ce transport peut prendre plusieurs formes :
  - Le transport par rail puis par route de conteneurs ou de caisses mobiles ;

- Le transport par rail de véhicules routiers entiers (camions, tracteurs et remorques). C'est la technique de *la route roulante* ;
  - Le transport de wagons sur des remorques routiers, dites remorques porte-wagons (RPW) ;
  - La livraison terminale par route d'envois ferroviaires. C'est la technique de *Fercam* à la SNCF.
- Le transport bimodal air-route ;
  - La combinaison du transport maritime avec le rail et la route : Deux types de systèmes sont en opération: le « lo-lo » (*load on-load off*) qui se fait à l'aide de *containerships* et le « ro-ro » (*roll on-roll off*) qui exploite des vaisseaux équipés pour recevoir des cargaisons sur roues. Ce type de service a conduit à la mise en oeuvre de *ponts terrestres* pour passer d'un océan à l'autre.

Afin de mesurer l'intérêt de l'utilisation de chacun des divers modes de transport, il semble aussi pertinent de se référer aux externalités procurées par chacun des modes, et cela à travers l'étude de l'impact du transport sur l'environnement.

## 2.5. Impact du transport sur l'environnement

### 2.5.1. Principaux effets du transport sur l'environnement

La forte croissance du transport de fret va particulièrement à l'encontre des objectifs actuels de développement durable. Les nuisances environnementales causées par le transport de marchandises sont diverses, les principales sont :

- *La pollution atmosphérique* : La plupart des polluants de l'air sont émis par les modes de transport. Les principaux polluants sont le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), l'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), les hydrocarbures (HC) et les composés organiques volatils (COV). La combinaison de ces substances chimiques provoque des effets supplémentaires. Le transport routier est complètement dépendant des énergies fossiles contribuant fortement à la production de CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre. En Europe, il représente à lui seul 84 % des émissions de CO<sub>2</sub> imputables aux transports ;
- *Les nuisances sonores* : Le bruit des transports est une des nuisances les plus intensément ressenties par les populations, qu'elles soient urbaines ou rurales et proches de grandes infrastructures (aéroports, voies ferrées ou grands axes routiers). Son importance va grandissant en raison d'une sensibilité de plus en plus aiguë des populations exposées à cette nuisance, et de la croissance continue des trafics de marchandises. L'avion conduit à des nuisances sonores très importantes. De plus, et vue qu'il représente un transport bimodal air-route dans une grande mesure, il génère une importante activité routière qui implique d'autres nuisances ;
- *La pollution de l'eau* : Le transport contribue indirectement à l'altération de la qualité de l'eau, par la retombée de ses émissions atmosphériques, par les produits d'entretien, et par des résidus d'huile, de pneus, d'hydrocarbures, etc. Les rejets des navires en mer constituent l'un des sources majeures de la pollution de l'eau. On en constate plusieurs : l'eau de lest déversée par les navires-citernes vides, les dispositifs d'arrimage (fardage), les résidus de dragage, etc.

- *Les accidents* : Les transports de marchandises sont souvent impliqués dans des accidents touchant à la qualité de vie des personnes tels que les accidents de la route, le déraillement de trains, l'écrasement des avions, etc. ; mais également dans des incidences sur la nature et les écosystèmes tels que les marées noires que provoquent les navires ou les oléoducs ;
- *La consommation d'espace* : Les effets dus aux infrastructures de transport sont elles mêmes des effets de consommation d'espace et d'utilisation du sol, d'altération du paysage, d'isolement de quartiers, etc. ;
- *La congestion* : La plupart des réseaux de transport souffrent de la saturation de leurs grands axes de transit, ce qui menace la compétitivité économique. Une des causes principales de la congestion est le changement des pratiques de production et de distribution qui implique une demande croissante des livraisons JAT.

En Europe, 10 % du réseau routier est quotidiennement affecté par des encombrements et 20 % des voies ferrées peuvent être considérées comme des goulots d'étranglement. Les transports fluvial et maritime sont les deux modes capables de faire face à la congestion de grands axes routiers et au manque d'infrastructures ferroviaires. Ces deux modes sont restés sous-exploités.

Le tableau 2.1 suivant donne une idée générale sur les coefficients d'émission des polluants atmosphériques par mode de transport, en grammes/t Km (*source : OCDE 1997*).

<i>Polluant</i>	<i>Route</i>	<i>Rail</i>	<i>Mer</i>	<i>Fleuve</i>	<i>Air</i>
<i>CO</i>	0.25 - 2.4	0.02 - 0.15	0.018 - 0.20	0.04	-
<i>CO<sub>2</sub></i>	127 - 451	41 - 102	30 - 40	0.03	1.61
<i>HC</i>	0.3 - 1.57	0.01 - 0.07	0.04 - 0.08	0.01	-
<i>NO<sub>x</sub></i>	1.85 - 565	0.2 - 1.01	0.26 - 0.58	0.3	5.56
<i>SO<sub>2</sub></i>	0.1 - 0.43	0.07 - 0.18	0.02 - 0.05	0.3	-
<i>COV</i>	1.1	0.08	0.04 - 0.1	0.06	-

**Tableau 2.1.** Fourchettes des coefficients d'émission atmosphérique par mode de transport

Comme l'indique ce tableau, le transport routier est nettement plus polluant que les autres modes. Le rail peut se montrer plus préjudiciable que le transport maritime. A titre d'alternative au transport routier, le transport fluvial offre de larges avantages en terme de respect de l'environnement :

- *Une faible consommation énergétique* : Un kilo-équivalent pétrole consommé permet de transporter 1 tonne sur 50 Km par camion sur autoroute, 130 Km par train complet, 175 Km par bateau de type grand Rhéan (2000 à 3000 tonnes) et 275 Km par bateau-convoi de 4400 tonnes ;
- *Une faible pollution atmosphérique et peu d'impact sur l'effet de serre* : Le transport fluvial émet 2.6 fois moins de gaz à effet de serre que le transport routier et ce, sans mettre en œuvre d'autres énergies comme l'électricité ;
- *Une émission de bruit limitée* : La voie d'eau produit même à 25 mètres de distance un son inférieur à la norme minimale, alors que les deux autres modes terrestres sont toujours au-dessus et ce même à 100 mètres ;

- *Un intérêt réel pour contribuer à la lutte contre l'insécurité routière* : La voie d'eau peut contribuer à deux niveaux : par le transfert des camions des routes aux fleuves et par son adaptation au transport des matières dangereuses.

Ainsi le recours au transport intermodal combinant la route et les modes les plus compatibles avec l'environnement tels que le rail, la mer ou le fleuve, peut constituer une solution pour une réduction de l'effet néfaste du transport sur l'environnement.

### 2.5.2. Coûts externes du transport

Les coûts externes du transport sont devenus un sujet important, surtout depuis que la commission européenne a identifié l'internalisation de ces coûts comme un des outils essentiels pour le développement durable. Les principaux coûts externes de transport correspondent aux coûts suivants :

- Les coûts liés à l'infrastructure routière, qui se décomposent eux-mêmes en coûts d'investissement et de fonctionnement (entretien routier), et qui doivent être ventilés entre les usagers de la route ;
- Les coûts liés à la dégradation de l'environnement ;
- Les coûts liés à l'insécurité (accidents corporels), au-delà de la part internalisée par les contrats d'assurance ;
- Les coûts liés à la contribution des transports à la congestion.

Ces coûts sont sous forme de tarification d'usage des infrastructures tels que les redevances d'accès aux ports, aux gares, aux péages autoroutiers, etc. et de taxation des véhicules et des carburants. Les effets du transport sur l'environnement ne peuvent pas tous être quantifiables en unités normalisées. Un exemple de niveaux des coûts générés par le parcours sur 100 Km d'un poids lourd sur une autoroute est donné dans le tableau 2.2 ci-dessous (*source : direction générale de l'énergie et des transports, 1998*) :

<i>Coûts externes et d'infrastructure</i>	<i>Fourchette moyenne (€)</i>
Pollution atmosphérique	2.5 – 15
Infrastructure	2.1 – 3.3
Bruit	0.7 - 4
Accidents	0.2 – 2.6
Congestion	2.7 – 9.3

**Tableau 2.2.** *Coûts externes et d'infrastructure du transport routier*

Enfin, le tableau 2.3 donne une estimation des différentes composantes du coût externe en € pour 1000 tonne .Km et par mode de transport (Kreutzberger et al. 2003) :

<i>Composante du coût</i>	<i>route</i>	<i>rail</i>	<i>fleuve</i>	<i>mer</i>
<i>Accidents</i>	5.4	1.5	0	0
<i>Bruit</i>	2.1	3.5	0	0
<i>Pollution</i>	7.9	3.8	3	2
<i>Changement de climat</i>	0.8	0.5	Marginal	Marginal
<i>Infrastructure</i>	2.5	2.9	1	Moins de 1
<i>Congestion</i>	5.5	0.2	Marginal	Marginal
<i>Total</i>	24.2	12.4	Maximum 5	Maximum 4

**Tableau 2.3.** Coûts externes par mode de transport (€/1000 t. Km)

## 2.6. Avantages et inconvénients des différents modes de transport

Le tableau 2.4 ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients des divers modes de transport.

<i>Mode de transport</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Routier</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Souplesse et autonomie</li> <li>- Rapidité et fiabilité</li> <li>- Possibilité de rejoindre des localités lointaines et cueillettes et livraisons porte à porte</li> <li>- Peut être direct ou combiné</li> <li>- Absence de rupture de charge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restriction de poids et de dimensions</li> <li>- Coût élevé</li> <li>- Sécurité et délais dépendent des pays parcourus et des conditions climatiques</li> <li>- Très polluant</li> </ul>
<i>Ferroviaire</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût peu élevé</li> <li>- Fluidité du trafic et respect des délais</li> <li>- Existence de wagons adaptés aux besoins spécifiques.</li> <li>- Adaptation aux longues distances et aux tonnages importants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inadapté aux courtes distances</li> <li>- Non-accessibilité de plusieurs localités</li> <li>- Rupture de charge</li> <li>- Problème de compatibilité de voies vers certains pays</li> <li>- Impossibilité des livraisons porte à porte</li> </ul>
<i>Maritime</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peu coûteux</li> <li>- Très grande capacité</li> <li>- Possibilités de stockage dans des zones portuaires</li> <li>- Adaptation au transport de matières dangereuses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lenteur</li> <li>- Non-accessibilité de plusieurs localités</li> <li>- Rupture de charge</li> <li>- Assurances et emballages plus onéreux</li> <li>- Impossibilité des livraisons porte à porte</li> </ul>
<i>Fluvial</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût faible</li> <li>- Fluidité du trafic</li> <li>- Capacité assez importante</li> <li>- Faible consommation d'énergie</li> <li>- Respectueux de l'environnement</li> <li>- Adaptation au transport de matières dangereuses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lenteur</li> <li>- Non-accessibilité de plusieurs localités</li> <li>- Rupture de charge</li> <li>- Impossibilité des livraisons porte à porte</li> </ul>

<i>Aérien</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapidité et sécurité</li> <li>- Régularité et fiabilité</li> <li>- Possibilité de groupage par des transitaires internationaux</li> <li>- Taux d'avarie faible</li> <li>- Garanties assez élevées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût très élevé</li> <li>- Interdiction au transport de certains produits dangereux</li> <li>- Rupture de charge</li> <li>- Impossibilité des livraisons porte à porte</li> </ul>
<i>Intermodal</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avantageux en terme de délai et coût, surtout pour des grandes distances</li> <li>- Economie dans l'utilisation des véhicules</li> <li>- Combinaison des avantages propres aux modes utilisés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rupture de charge</li> <li>- Coûts des infrastructures de transbordement importants</li> <li>- Coût de retour à vide important</li> </ul>

**Tableau 2.4.** *Avantages et inconvénients des différents modes de transport*

Par conséquent, les avantages et les inconvénients des divers modes de transport ne sont pas les mêmes. Le choix de l'un ou de l'autre mode fait généralement intervenir les critères suivants :

- La distance moyenne à parcourir entre la source et la destination ;
- Le temps moyen de transit : Les chargeurs qui accordent plus de valeur à la minimisation du temps de trajet de leurs marchandises auront davantage tendance à choisir le transport routier ;
- Les coûts : Il faut considérer tous les coûts encourus lorsqu'un mode de transport est choisi tels que les coûts de fret, d'emballage, de chargement/déchargement, d'entreposage, de manutention et des assurances. Le transport routier est plus cher en comparaison des transports ferroviaire, fluvial ou maritime, mais un transport intermodal incluant la route est moins cher ;
- L'importance du tonnage expédié par le chargeur : Un chargeur dont le tonnage annuel est important aura davantage recours au transport ferroviaire ou fluvial ;
- La nature ou la classe de la marchandise, etc.

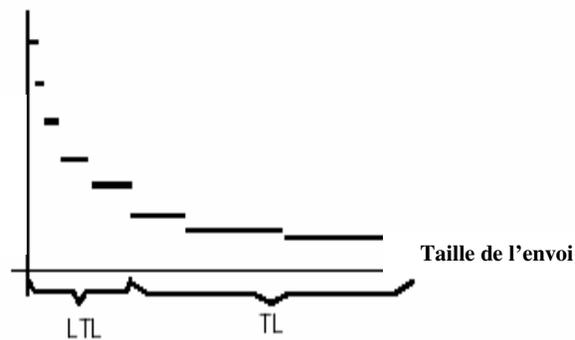
## 2.7. Modélisation du transport

### 2.7.1. Introduction

Le transport de marchandises est une activité de service qui se prête difficilement à une mesure unique : la diversité des modes de transport et des types de prestations reflète un ensemble très vaste d'éléments de qualité qui ne sont pas toujours présents dans la seule dimension traditionnellement mesurée par la tonne Km. En effet, si on décompose le coût de transport en un coût fixe indépendant de la distance (préparation et chargement du véhicule) et un coût variable en fonction de la distance (main-d'œuvre, énergie, usure du véhicule, péage, etc.), le coût fixe est comparativement élevé pour le rail du fait des rigidités techniques des dessertes terminales, tandis que le coût variable est plus bas. En outre, il convient de prendre en compte la taille des lots. La route est plus facile aux activités de groupage des petits lots quant au rail, il trouve sa meilleure efficacité pour les trains complets en recourant aux systèmes modernes de massification.

De même, pour une quantité donnée de marchandises, le coût de transport par route inclura les deux étapes suivantes :

- *Identification de la classe de l'item* : Les taux initiaux sont élaborés en fonction d'une classe standard (classe 100). Les autres classes sont numérotées de façon à spécifier le taux de la classe en % du taux de la classe 100. Par exemple, à une marchandise de classe 80, on appliquera un taux égal à 80 % du taux de la classe 100. La structure de classe tient compte de la valeur des marchandises, de leur volume, du caractère périssable, des dangers d'avaries, etc. ;
- *Détermination du taux en fonction de la distance et du poids* : Selon le type de transporteur, les taux peuvent varier en fonction de la distance mais aussi en fonction du poids de la cargaison. En particulier, comme la figure 2.1 le montre, il peut y avoir des différences considérables entre les charges partielles (LTL) et les charges complètes (TL).



**Figure 2.1.** Coût du transport des LTL et TL

Dans la suite de ce paragraphe, nous analyserons les différents travaux de recherche se rapportant à la modélisation des coûts de transport de marchandises.

### 2.7.2. Modélisation du coût de transport : état de l'art

Le développement de la logistique, comme fonction d'organisation de la production fondée sur le contrôle des flux de matières et d'informations, concrétise à l'évolution technique et organisationnelle du système de transport. En terme de coût, le transport représente généralement un poste significatif de coût logistique. En amont de la chaîne de valeur, il représente environ 29 % du coût logistique total, contre 64 % en aval. Le coût de transport amont est généralement incorporé à la valeur totale du produit acheté, qui additionne les coûts des matières premières, de fabrication, de stockage, etc.

Une revue de littérature indique que les coûts de transport d'un chargement de marchandises ne sont pas linéaires : ils reflètent les économies d'échelle que l'industrie peut réaliser en transportant de plus grosses charges. Plusieurs modélisations sont alors proposées, les plus utilisées sont :

- A. Martel (2001) retient l'allure exponentielle de la variation des coûts de transport et propose l'expression approximative suivante :

$$C_t = a \cdot d^\alpha Q^b = aQ^b$$

- $C_t$  : Coût de transport de la cargaison de l'origine à la destination.
- $d$  : Distance aller-retour entre l'origine et la destination.

- Q : Taille de la cargaison.
- $a, \alpha, b$  : Paramètres obtenus par régression multiple.
- a : Paramètre calculé pour une origine - destination donnée ( $a = a'd^\alpha$ ).

Cette expression des coûts de transport en fonction des distances parcourues et des quantités transportées peut mener à des modèles non linéaires difficiles.

- A. Martel (2001) a également proposé une deuxième approximation adéquate, plus simple que la première, qui consiste à trouver une approximation linéaire des coûts de transport par régression entre une origine et une destination donnée.

La fonction du coût de transport dans ce cas correspond à l'expression linéaire suivante :

$$C_t = C_a + C_d d + C_v Q = C_f + C_v Q$$

- $C_a, C_d, C_v$  : Paramètres obtenus par régression multiple et ayant la signification physique suivante :
  - $C_a$  : Coût d'arrêt (indépendant de la distance à parcourir et du contenu du chargement) encouru en particulier à cause du temps perdu au départ et à l'arrivée ;
  - $C_d$  : Coût de distance (indépendant du contenu du chargement) et correspond en général au coût de l'essence, du chauffeur, etc. (par kilomètre parcouru) ;
  - $C_v$  : Coût de charge (indépendant de la distance parcourue) encouru par chaque article inclus dans le véhicule (chargement et déchargement de l'article, manutention dans le véhicule).
- $C_f$  : Paramètre calculé pour une origine - destination donnée ( $C_f = C_a + C_d d$ ) ;
- Q : Taille d'une cargaison.

Si la demande par période est D et que chaque cargaison contient Q produits, il faudrait expédier D/Q cargaisons pour satisfaire la commande ; ce qui correspond à un coût total de transport par période :

$$C_t = C_f D/Q + C_v D$$

Hall (1985) a utilisé ce même résultat.

- D'autres travaux postulent que les coûts de transport par lot d'expédition sont fixes et ne dépendent pas des quantités correspondant à un lot d'expédition. Ainsi, Burns et al (1985) postulent que le coût de transport par lot d'expédition est :

$$C_t = \gamma + \sigma + \alpha d$$

- $\gamma$  : Coût d'initialisation d'une distribution ;
- $\sigma$  : Coût fixe d'arrêt ;
- $\alpha$  : Coût de transport par unité de distance ;
- d : Distance entre l'origine et la destination.

Ainsi, si Q correspond à la quantité d'un lot, le coût unitaire de transport est :

$$C_{ut} = (\gamma + \sigma + \alpha d)/Q$$

Ce résultat est confirmé par Blumenfeld et al. (1987) ainsi que par Tyworth et al (2000) qui stipulent que les coûts unitaires de transport sont de la forme :

$$C_{ut} = K/Q$$

Où K désigne le coût fixe par un envoi de taille Q. Ce coût fixe est a priori en fonction du prix moyen pour un chargement complet et il est indépendant de la taille de l'envoi.

- Ganeshan et al (1999) indiquent que le coût du transport pour un envoi de taille Q peut être formulé de la forme :

$$C_t = a + b \ln (Q), \text{ a et b sont estimés par régression avec } b < 0$$

- Arcelus et Rowcroff (1991) utilisent cette même expression pour formuler la fonction logarithmique du coût de transport :  $\ln (C_t) = a + b \ln (Q)$  ou lieu de  $C_t$ .
- Jayaraman (1998) a montré que le coût du transport doit tenir compte du type du produit, du mode de transport et de la distance et a proposé la modélisation suivante :

$$C_t = C(P, T) d Q$$

- $C(P, T)$  : Coût unitaire du transport du produit P par le mode de transport T ;
- $d$  : Distance euclidienne entre l'origine et la destination.

Ainsi, nous pouvons conclure qu'il existe plusieurs façons de modéliser les coûts de transport dans la littérature. On aboutit en général, à des fonctions de transport ayant des formes assez complexes.

## 2.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude générale sur les transports de marchandises en termes de leurs niveaux de planification, de leurs modes de gestion et de leurs différents modes.

Nous avons également présenté les multiples défis environnementaux que le transport doit relever en termes de la lutte contre l'effet de serre, la pollution, le bruit, la consommation de l'espace et la congestion ainsi que les coûts externes engendrés par les divers modes.

Ceci nous a permis de déduire les avantages et les inconvénients de chaque mode de transport.

Enfin, notre analyse bibliographique des principales études dans le domaine de la distribution nous a permis de conclure qu'il existe plusieurs façons de modéliser les coûts de transport et qu'on aboutit en général, des fonctions de transport ayant des formes assez complexes.

Dans le chapitre suivant, on abordera en détail le rôle du transport dans une chaîne logistique globale, reliant les fournisseurs, les sites logistiques et le DO.

## Chapitre 3 : Transport et relations DO/Fournisseurs

### 3.1. Introduction

Dans le contexte industriel d'aujourd'hui, la notion de la gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management : SCM) a pris une importance considérable. Ce concept de SCM vise à optimiser les flux physiques, monétaires et informationnels à travers la chaîne complète ou "pipeline", composée des fournisseurs, des DO et des clients. Par conséquent, son développement nécessite le choix des meilleurs fournisseurs et l'organisation optimale du réseau de distribution (Vidal et al. 1997). De plus, le transport fait partie intégrante de la chaîne logistique puisqu'il prend en charge les flux physiques entre les sites et la distribution des produits finis aux clients. Cependant, rare sont les travaux qui ont traité et de manière explicite, le rôle du transport dans le problème du choix des fournisseurs, lors de la conception et la gestion de la chaîne logistique.

Notre analyse des critères de sélection des fournisseurs présentés au chapitre 1 nous a permis de constater que le transport est implicitement indiqué dans les critères liés au coût total du produit, au délai de livraison et à la localisation géographique des fournisseurs. Cependant, dans les différentes approches utilisées dans la littérature, le transport est rarement explicité ; ce qui représente une limitation importante. En effet, le partage de la demande entre plusieurs fournisseurs implique des coûts de transport importants pouvant représenter jusqu'à 30 % du coût logistique total (Thomas et Griffin 1996, Stank et Goldsby 2000), ce qui est extrêmement lourd pour le DO ou pour le fournisseur. De plus, le transport et les stocks sont des éléments fortement liés et ils engendrent plusieurs coûts : les coûts encourus chez les fournisseurs pendant que les produits attendent d'être transportés, les coûts représentés par les produits en transit et les coûts encourus chez le DO pendant que les produits attendent d'être utilisés. Enfin, le transport a un impact sur les délais de livraison, ce qui affecte directement le temps total de cycle des produits.

Pour donner quelques éclaircissements sur ce problème, ce chapitre sera organisé comme suit : Dans la section 2, on présentera les différents types des réseaux logistiques de distribution. La section 3 discutera des divers niveaux d'intégration des plates-formes dans une chaîne logistique globale. La section 4 sera consacrée à l'étude de l'impact du transport sur les principaux facteurs liés à la sélection des fournisseurs. Dans la section 5, un état de l'art des principaux travaux sur le transport et l'approvisionnement amont est présenté. Enfin, une conclusion récapitule les points importants de ce chapitre.

### 3.2. Architecture des réseaux logistiques de distribution

#### 3.2.1. Introduction

Réduire les délais de livraison, réduire les coûts logistiques et le niveau des stocks, améliorer la qualité de service impliquent la mise en place de réseaux de distribution en interface entre les usines ou entrepôts des fournisseurs et les points de vente.

Un réseau logistique est composé de :

- Des lieux d'émission, qui sont en général les usines des fournisseurs ;
- Des lieux de réception, qui sont en général les lieux de vente, voire le consommateur final ;
- De nœuds, qui sont les plates-formes et entrepôts recevant les marchandises des usines et les réexpédiant vers les clients
- D'arcs, qui sont les liens entre les lieux d'émission, les nœuds et les lieux de réception, dont les flux sont assurés par le transport.

Ces sites ont une fonction d'optimisation des flux au travers du processus de groupage-dégroupage des marchandises.

### 3.2.2. Entrepôt et plate-forme

Un **entrepôt** a pour vocation de stocker pendant un certain temps les produits et préparer les commandes.

Une **plate-forme** (ou **hub** en anglais) est un site logistique spécialisé par lequel les matières, les composants et/ou les marchandises ne font que transiter pour être triés (groupage, dégroupage), déconditionnés ou reconditionnés, etc. S'y exerce donc un simple passage à quai de brève durée sans phase de stockage - un *cross-docking* dans la terminologie anglo-saxonne.

La plate-forme (cinétique) s'oppose à l'entrepôt (statique) conçu pour assumer cette phase de stockage, parfois de plusieurs semaines lors d'achats spéculatifs. La capacité d'une plate-forme s'exprime en  $m^2$  ; celle d'un entrepôt en  $m^2$ , en  $m^3$  ou en emplacements-palettes (Aurifielle et al. 1997).

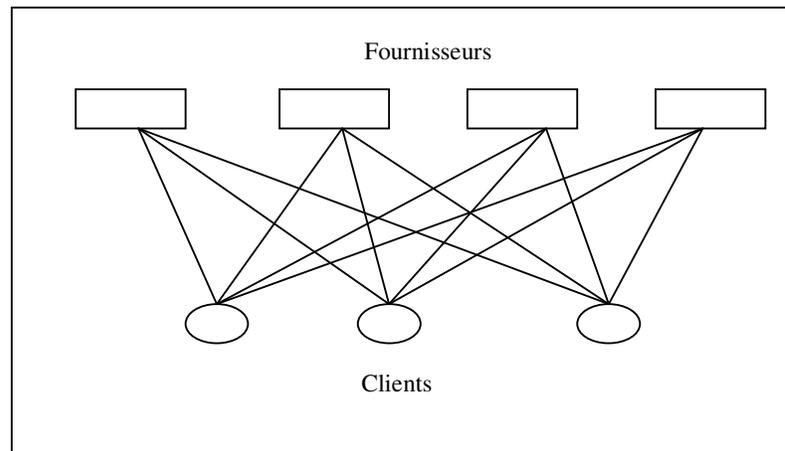
La vocation des plates-formes est toujours naturellement de massifier les transports sur longue distance afin de réduire le coût. Elles ont beaucoup évolué ces dernières années tant sur le plan géographique que sur le plan organisationnel. Sur le plan géographique, on assiste à une concentration des sites de la part des industriels, notamment au niveau européen, et à une réorganisation de la logistique des distributeurs, afin de prendre en compte les réductions d'échelle et les contraintes spécifiques de la vente (proximité du client).

Le port est un lieu naturel de localisation des plates-formes logistiques. C'est donc un lieu de rupture de charge afin de transférer la marchandise ou son contenant d'un mode de transport à un autre. La rupture de charge de la marchandise correspond au moment où s'opèrent un chargement et un déchargement de la marchandise et elle dépend du nombre de véhicules à charger/décharger et du volume de marchandises. Cette interruption dans la chaîne de transport représente un coût en temps et en opérations de manutention.

### 3.2.3. Types de réseaux logistiques

Il existe différents types de réseaux logistiques, on peut distinguer :

- **La livraison directe** depuis les fournisseurs jusqu'aux clients : Le système logistique est réduit au minimum et le transport est effectué sans rupture de charge. Cependant, il se développe souvent des stocks d'arrière-magasin chez les clients (figure 3.1). Cette structure conduit à l'existence de flux suffisamment important pour saturer un véhicule.

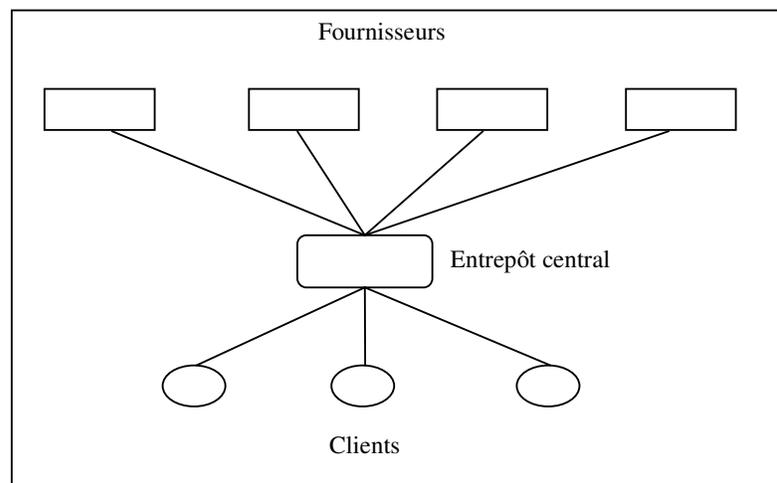


**Figure 3.1.** *Livraison directe*

- **La livraison avec un seul entrepôt central** : Le nombre de trajets est fortement réduit par rapport à la livraison directe et il existe une rupture de charge au niveau de l'entrepôt, le plus souvent stockage et préparation des commandes. Ce type d'entrepôt réunit plusieurs types de produits et livrant des clients de taille variable (exemple d'Intermarché, de Casino et de système U) (figure 3.2).

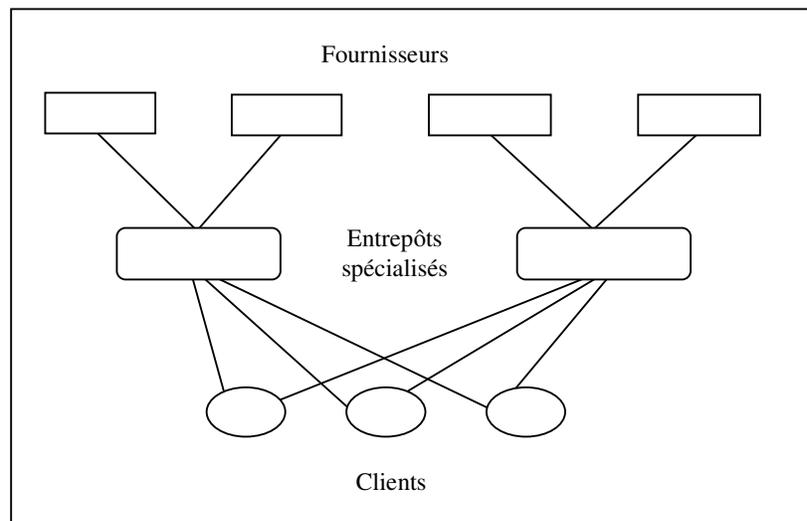
Le système de distribution centralisé conduit cependant, à l'accroissement des coûts de transport puisque les distances entre l'entrepôt central, les fournisseurs et les clients augmentent. Néanmoins, cette augmentation des coûts peut être compensée par la réduction des coûts de stockage vue qu'il y a moins d'entrepôts à gérer. De plus, des économies d'échelle dues à un volume large de transport permettent de réduire les coûts de transport.

En Europe, les entreprises ont tendance à réduire le nombre de leurs centres de distribution. Ainsi, Nike est passé de 25 centres dans toute l'Europe à 1 seul centre et IBM de 18 à 7 centres en 1995.



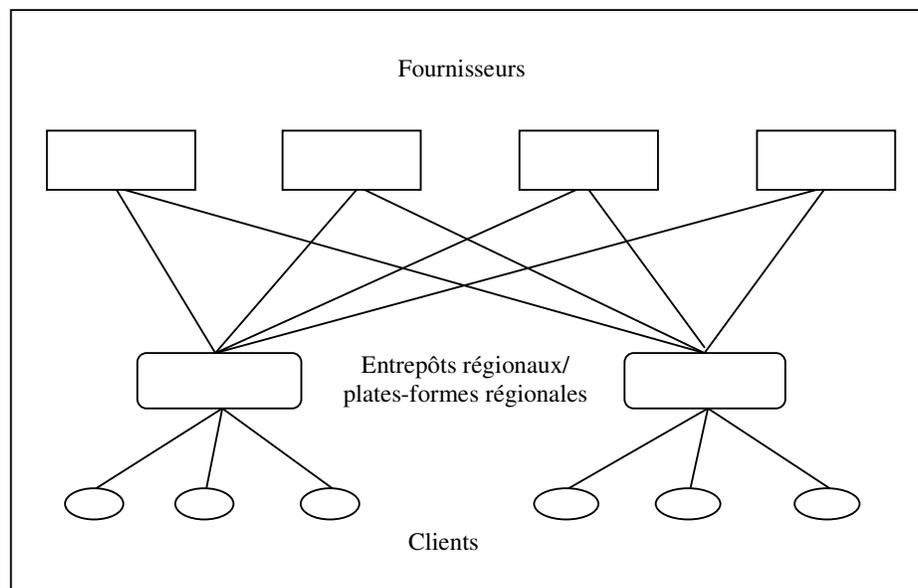
**Figure 3.2.** *Livraison avec entrepôt central*

- **Les entrepôts spécialisés** : La spécialisation des entrepôts répond le plus souvent à la nature des marchandises (cas des produits frais), au type de client (cas de Carrefour-Promodès) ou aux produits importés (figure 3.3).



**Figure 3.3.** *Livraison avec entrepôts spécialisés*

- **Les entrepôts régionaux/plates-formes régionales :** Les entrepôts régionaux ravitaillent les clients qui sont dans une même région. Dans ce dernier cas, on minimise les coûts de transport entrepôts/clients avec une seule rupture de charge. Dans le cas des plates-formes régionales, ce sont les fournisseurs qui préparent les commandes des clients. Cette structure permet d'optimiser les coûts de stockage et de transport (figure 3.4).



**Figure 3.4.** *Livraison avec entrepôts régionaux/plates-formes régionales*

- **Les systèmes mixtes :** On peut imaginer des systèmes mixtes tels que :
  - Plusieurs entrepôts centraux spécialisés et des plates-formes régionales. C'est le cas assez souvent dans la grande distribution ;
  - Un entrepôt central, des entrepôts régionaux et des sous-entrepôts. Cette pyramide d'entrepôts était assez caractéristique des grandes administrations où chaque client

ou groupement de clients avait son propre magasin. Il peut même y avoir une cascade plus importante de magasins ;

- Un entrepôt central et des plates-formes régionales : Dans ce cas, l'entrepôt central peut livrer directement certaines commandes importantes ou urgentes à un client comme il peut livrer directement tous les clients d'une même région ;
- Les entrepôts régionaux peuvent jouer le rôle de plates-formes pour certains articles et d'entrepôts pour d'autres ;
- A côté des plates-formes régionales peuvent se constituer des plates-formes de regroupement ou *hubs*, à partir desquelles le fret est réexpédié vers des plates-formes régionales. On parle alors de systèmes *hubs and spokes*.

Le choix de l'une ou de l'autre structure de réseau logistique dépend de plusieurs facteurs, nous pouvons citer :

- Les distances entre chaque fournisseur, entrepôt, plate-forme et client ;
- Les moyens de transport, leur capacité, leur vitesse moyenne et leurs coûts ;
- Les conditions de fonctionnement du système logistique en termes de capacités de stockage, de manutention, de chargement et de déchargement, etc. ;
- Les coûts du système logistique tant en charges fixes (amortissements par exemple) qu'en charges variables (frais de fonctionnement, frais de personnel, etc.), etc.

Quel que soit le réseau, certains fournisseurs peuvent livrer directement quelques clients sans passer par un entrepôt ou une plate-forme, ceci en fonction des quantités commandées ou de l'urgence, en back-up des plates-formes régionales ou entrepôts. Néanmoins, le transit par des infrastructures logistiques intermédiaires présente des avantages importants :

- Une plus grande efficacité au niveau du canal de distribution, qui se traduit par une optimisation du taux de remplissage des véhicules et une centralisation des stocks, réduisant ainsi les coûts de leur gestion ;
- Une plus grande efficacité au niveau du destinataire : Le contrôle de l'amont du réseau a également des effets positifs en matière de productivité des opérations de manutention du destinataire. En effet, comme les flux de marchandises sont consolidés, après une programmation préalable des livraisons, le déchargement et la mise au destinataire sont rigoureusement ordonnancés ; réduisant ainsi les durées des files d'attente aux quais d'arrivée.

En général, pour garder un niveau de service performant, l'organisation logistique devra permettre le pilotage des flux au niveau de plusieurs régions, au niveau d'un continent ou au niveau mondial.

Dans l'industrie de l'automobile par exemple, on distingue trois espaces distincts d'approvisionnement :

- *Un espace d'approvisionnement régional* : L'usine de montage s'approvisionne en flux tendus, et le plus souvent synchrones auprès de fournisseurs de proximité, aux sites les plus souvent dédiés et situés sur de grandes infrastructures routières. Le mode de transport choisi est systématiquement le camion ;
- *Un espace d'approvisionnement national* : L'usine de montage fait appel à des fournisseurs qui, depuis un même site, approvisionnent plusieurs unités de l'assemblage. Le mode de transport choisi est alors presque exclusivement le camion

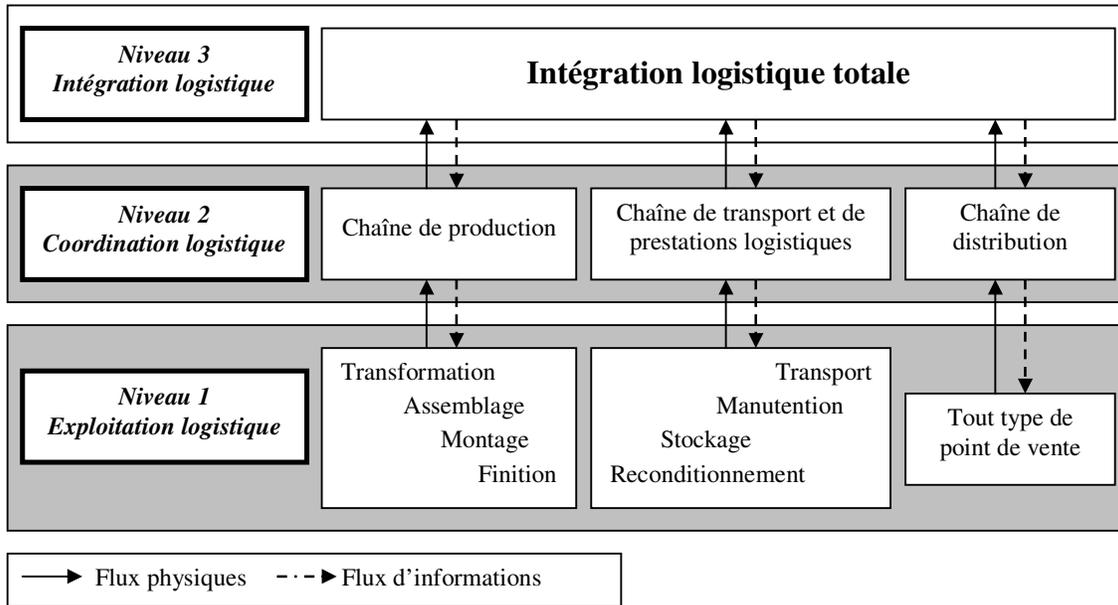
- semi-remorque livrant l'usine en flux tendus et, parfois, des magasins avancés ou des centres de préparation logistique ;
- *Un espace d'approvisionnement international* : L'usine s'est d'abord approvisionné auprès de filiales spécialisées, implantées dans des pays où le constructeur, cherchant à obtenir des parts de marché, s'est vu imposer par le gouvernement local l'obligation de réaliser sur place une partie de la production. Plus tard, les constructeurs maîtrisant les techniques de commerce international ont commencé à faire appel à des fournisseurs implantés dans des pays à faible coût de main-d'œuvre et disposant d'un niveau technologique satisfaisant. Les modes de transport utilisés dans ce cas sont de différentes natures (routier, maritime et ferroviaire). Le transport aérien, quant à lui, peut être utilisé soit pour des flux à forte valeur et à faible volume, soit pour pallier une défaillance intervenue quelque part dans une chaîne d'approvisionnement. A l'évidence, les flux originaires des espaces d'approvisionnement internationaux ne peuvent être synchrones, compte tenu des délais d'acheminement. Ils livrent, pour l'essentiel, des magasins de stockage et, plus rarement, des centres de préparation logistique.
- En fait, une usine d'assemblage dépend toujours de plusieurs espaces d'approvisionnement.

### **3.3. Intégration des plates-formes de distribution dans la chaîne logistique globale**

Les sites logistiques de distribution représentent l'interface entre les distributeurs et les industriels. L'apparition du concept de la gestion de la chaîne logistique (SCM) ne fait que renforcer l'intégration des sites logistiques de distribution dans cette chaîne logistique globale. Cette intégration passe d'une part, par la maîtrise des échanges de données entre les partenaires de la SCM et d'autre part, par la délocalisation du p-manufacturing des produits.

#### **3.3.1 Intégration par les systèmes d'information**

La figure 3.5 ci-dessous décrit les différents niveaux d'échange de données dans une chaîne logistique globale (Tixier et al. 1996) :



**Figure 3.5.** Niveaux d'échange de données dans une chaîne logistique globale

- **L'exploitation logistique** : Ce niveau correspond aux différents systèmes et réseaux d'information orientés vers l'optimisation des opérations "élémentaires" (assemblage, stockage, manutention, etc.), que ce soit dans le transport, la production ou la distribution ;
- **La coordination logistique** : A ce niveau, il ne s'agit plus d'optimiser des opérations élémentaires mais d'assurer leur coordination au sein de chaque sous-système (chaîne de production, chaîne de transport et de prestations logistiques et chaîne de distribution) par la communication et l'échange de données entre les réseaux de niveau 1. Le système Galia (Groupement pour l'amélioration des liaisons dans l'industrie automobile) est un bon exemple. Il définit des standards (emballages, étiquettes, protocoles d'échange de données) qui s'imposent aux partenaires de l'industrie automobile (équipementiers et prestataires) ;
- **L'intégration logistique** : Ce niveau correspond à l'intégration informatique des trois sous-ensembles dans la chaîne logistique globale. Ainsi, il sera possible de contrôler l'ensemble des opérations effectuées et d'atteindre un niveau de performance très élevé grâce aux synergies entre les différents sous-ensembles. Un tel réseau pourrait être développé par un distributeur remontant la chaîne. En effet, le distributeur possède de nombreuses données nécessaires à la chaîne entière (prévisions de consommation, besoins d'approvisionnement, de prestation, de transport et même de production exprimés auprès de ses fournisseurs).

### 3.3.2. Intégration par le p-manufacturing

Actuellement, on assiste à l'apparition du phénomène de délocalisation du p-manufacturing des produits vers les plates-formes.

Le p-manufacturing est une activité qui peut se manifester sous forme de différenciation des produits ou de traitement des flux de retour des produits (Dornier et Fender, 2001). Elle permet d'apporter une valeur ajoutée au produit et elle est réalisée hors des usines, en général dans des plates-formes de transit ou dans des entrepôts.

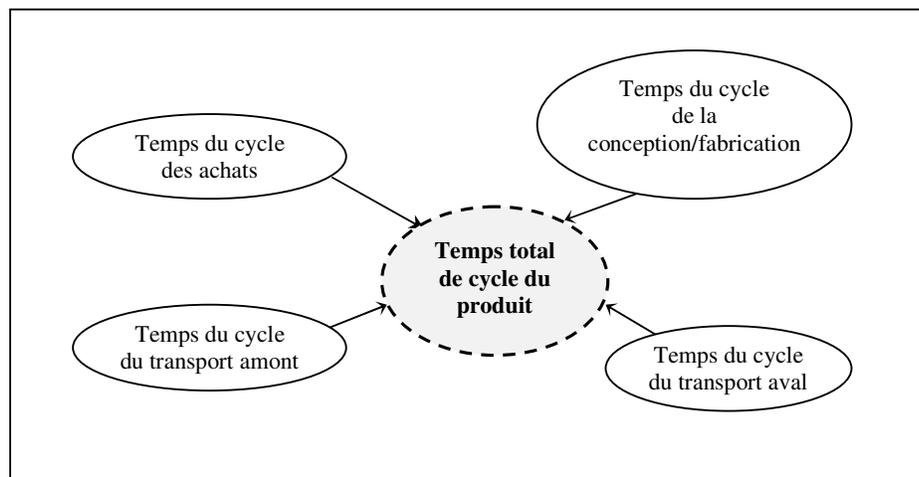
- *La différenciation des produits* : Dans le cas de Compaq, la distribution des micro-ordinateurs en France par exemple était réalisée à partir de l'entrepôt de Marne-la-Vallée. Ces produits étaient fabriqués à l'échelle mondiale puis étaient livrés sous leur forme standard à cet entrepôt. Des opérations d'adaptation y étaient réalisées afin d'adapter les produits au marché français et aux exigences du client (post-manufacturing). Aujourd'hui, ces opérations sont réalisées en Pays-Bas, à la suite de la création du site logistique européen ;
- *Le traitement des flux de retour* : Les industriels utilisent les plates-formes de distribution pour faire des diagnostics concernant la possibilité de réparer ou non les produits récupérés de leurs clients avant de les renvoyer dans les usines. Ce traitement permet d'éviter de faire remonter aux usines des produits non réparables.

Les plates-formes de distribution qui réalisent ces opérations entrent dans la chaîne de création de valeur et deviennent ainsi des points de pénétration des commandes des clients et non plus de simples lieux de transit des produits.

### 3.4. Impact du transport sur la gestion de la chaîne logistique

Le transport joue un rôle critique dans la gestion d'une chaîne logistique puisqu'il a un impact direct sur les principaux facteurs suivants :

- **Le temps total de cycle du produit** : Pour identifier les facteurs des processus d'achat et du transport qui ont une influence sur la réduction du temps total de cycle des produits, Ng et al. (1997) se sont basés sur le modèle conceptuel de ce temps, représenté dans la figure 3.6 ci-dessous :



**Figure 3.6.** *Modèle conceptuel du temps total de cycle*

Le concept du temps total de cycle comprend tous les processus d'une entreprise : les achats, la logistique amont, la fabrication et la logistique aval. Une réduction de ce temps dans le but d'augmenter la productivité de l'entreprise implique des actions sur les principaux facteurs qui influencent des différents processus.

En plus des temps de cycle correspondant aux processus de conception/fabrication et du transport aval des produits dans une chaîne de valeur, les temps de cycle associés aux achats et au transport amont sont très importants :

- *Le temps de cycle des achats* : C'est le temps total encouru par toutes les opérations des achats telles que *la sélection des fournisseurs*, la gestion des relations avec eux, leur certification en terme de qualité, leur fiabilité en terme des délais de livraison, etc. Ce temps est directement proportionnel au nombre des fournisseurs. Ainsi, les stratégies des achats et les relations avec les fournisseurs représentent des aspects critiques de la gestion du temps total de cycle ;
  - *Le temps de cycle du transport amont* : C'est le temps total nécessaire pour acheminer les produits achetés des fournisseurs au DO. Ce temps inclut les temps de transit, de stockage, de chargement/déchargement, etc. Plusieurs facteurs influencent sur ce temps tels que la gestion des relations avec les transporteurs pour une amélioration de la qualité, du coût et de la vitesse des livraisons, la planification tactique et stratégique du transport en terme de mode du transport à utiliser (routier, ferroviaire, aérien, naval, fluvial), du type de livraison (directe ou via des terminaux), de la zone géographique à couvrir (régional, national, international), etc.
- **Localisation géographique** : La distance entre le DO et les fournisseurs a un impact direct sur les coûts logistiques du transport. Pour réduire ces coûts, les entreprises créent des parcs de fournisseurs. Ce système se caractérise par une proximité géographique immédiate des fournisseurs. Dans le cas des entreprises automobile par exemple, les équipementiers sont basés dans l'enceinte même du site de production de leur DO. Ces fournisseurs sont alors des fournisseurs immédiats. Au niveau logistique, les parcs industriels de fournisseurs permettent de gérer la diversité au plus près de la chaîne de montage et favoriser l'approvisionnement synchrone. Cependant, face à la compétition internationale, les manufacturiers se sont tournés de plus en plus vers des fournisseurs localisés dans des pays à main d'œuvre faible même si les coûts du transport sont très importants ;
- **Gestion des stocks** : Le transport a un impact direct sur le système de stockage dans un réseau logistique. En effet, et comme le montre la figure 3.7 ci-dessous, lorsque la taille de l'envoi augmente (et de fait la fréquence est réduite), le coût de transport diminue mais le stock moyen augmente, et par conséquent, son coût aussi. Inversement, des livraisons en petites quantités entraîneront une réduction du coût de stockage, compensant ainsi l'augmentation du coût de transport. Cet arbitrage entre le coût du transport et le coût du stockage implique l'existence d'un optimum et qui correspond à la quantité économique à commander (EOQ : Economic Ordered Quantity) ou quantité de Wilson et qui minimise le coût total.

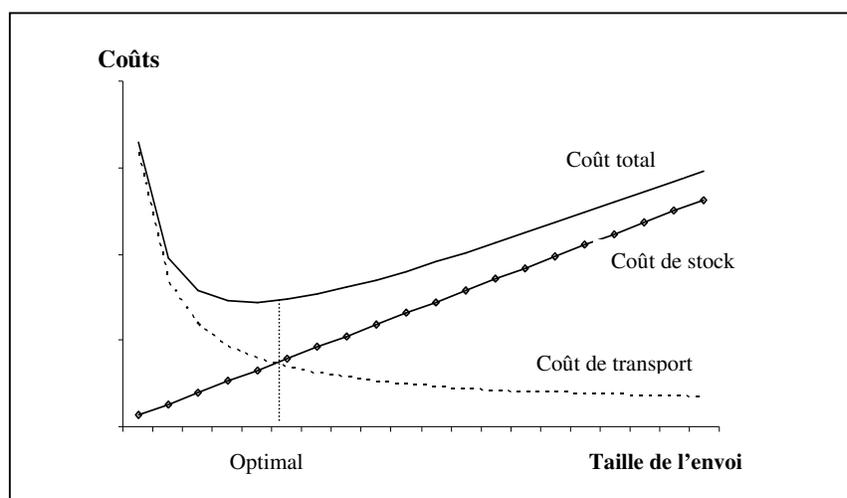


Figure 3.7. Coût total dans un réseau logistique (Blumenfeld et al. 1987)

### 3.5. Transport et relations DO/Fournisseurs : état de l'art

Une revue de la littérature sur le transport et son rôle dans la stratégie de multiple sourcing montre que les travaux dans ce domaine sont limités et les principaux sont :

- Hong et Hayya (1992) ont étudié les stratégies d'approvisionnement dans un environnement de JAT et ont proposé un programme mathématique non linéaire dont l'objectif est de minimiser les coûts agrégés de stockage et de commande, sous les contraintes de coût d'expédition et de qualité. Dans le cas de l'utilisation de plusieurs fournisseurs, le modèle permet de déterminer le nombre optimal de fournisseurs à choisir et la quantité à partager entre eux. Dans le cas de l'utilisation d'un seul fournisseur, le modèle détermine le nombre optimal de livraisons ;
- Smykta et Clemens (1993) ont analysé l'approche utilisée par GEWD (General Electric Wiring Devices) et qui basée sur le calcul du coût total d'acquisition (TCO) pour évaluer les fournisseurs. L'étude tient compte des coûts internes tels que le coût des stocks et des coûts externes tels que le coût du transport ;
- L'étude de Vonderembse et al. (1995) déjà citée dans le 1<sup>er</sup> chapitre et qui traite les effets de changement des pratiques des achats sur le transport amont montre que :
  - La localisation géographique des fournisseurs n'est pas un critère très important dans leur sélection ;
  - L'application du concept JAT conduit à de plus fréquents trajets des véhicules par la diminution des tailles des envois ; ce qui entraîne des coûts de transport importants. Cependant, une meilleure utilisation de la capacité des véhicules permet une réduction de leur nombre.
- Ganeshan et al. (1999) ont examiné la dynamique d'une chaîne logistique dans le cas de l'utilisation de deux fournisseurs : un est rentable et l'autre non rentable. Le fournisseur non rentable est caractérisé par son offre d'un délai de livraison long, ce qui affecte le transport et les stocks ; mais il est attractif par le fait qu'il offre des remises sur le prix d'achat. Dans cette étude, les auteurs ont présenté un modèle qui minimise la somme des coûts d'achat, de transport, de commande et de stockage. Le

système de stockage comprend le stock chez le DO, le stock en transit et le stock en sécurité. Une heuristique est utilisée pour déterminer le niveau d'escompte et la portion de la quantité à attribuer au 2<sup>ème</sup> fournisseur ;

- Tyworth et Ruiz-Torres (2000) ont étudié, de manière explicite, le rôle du transport dans le cas de l'approvisionnement auprès d'un seul fournisseur en comparaison avec le cas de l'utilisation de deux fournisseurs. Ils ont développé un modèle qui minimise la somme des coûts d'achat, de commande, de transport et du stockage. Aucune contrainte n'est formulée dans leur modèle. Ils ont montré que l'utilisation de deux fournisseurs permet de faire des gains au niveau des stocks et sous certaines conditions sur le prix d'achat, la demande annuelle, les délais de livraison et les distances aux fournisseurs. Par exemple, il sera favorable de partager une demande élevée auprès de deux fournisseurs situés à des distances courtes du DO même si le prix d'achat est élevé. En effet, des distances courtes et une demande élevée diminuent les effets de dédoublement des coûts annuels de transport (en comparaison avec un seul fournisseur) tandis qu'un coût d'achat élevé et une faible performance en terme de délai réduisent le coût de commande.

Le tableau 3.1 ci-dessous regroupe les caractéristiques des modèles utilisés dans ces différents travaux :

	<i>Type du modèle</i>	<i>Fonction objectif</i>	<i>Coût du transport</i>	<i>Outil de résolution</i>
<i>Hong et Hayya (1992)</i>	Programme mathématique non linéaire	Minimiser la somme des coûts de stock et de commande sous les contraintes de coût d'expédition et de la qualité	Dans le cas de la stratégie à un seul fournisseur, le coût d'expédition est étudié selon trois formes : exponentielle, logarithmique ou linéaire par parties.	Utilisation du logiciel GINO
<i>Smytka et Clemens (1993)</i>	Méthode TCO	Minimiser le coût total d'acquisition	La forme du coût du transport n'est pas explicitée	Le modèle est programmé sous le langage C.
<i>Vonderembse et al. (1995)</i>	Modèle statistique		Les coûts de transport sont donnés en valeurs et en pourcentages par rapport au volume des ventes	Aucun logiciel d'implémentation du modèle n'est indiqué dans l'article
<i>Ganeshan et al. (1999)</i>	Programme mathématique non linéaire	Minimiser la somme des coûts d'achat, de stock, de commande et du transport	Le coût du transport est de forme logarithmique : $a + b \ln(Q)$ ( $b < 0$ ), $Q$ est la quantité transportée	Propose d'utiliser le logiciel GINO ou le solveur d'Excel
<i>Tyworth et Ruiz-Torres (2000)</i>	Programme mathématique non linéaire	Minimiser la somme des coûts d'achat, de stock, de commande et du transport	Le coût du transport est de forme exponentielle : $a Q^b$ ( $b < 0$ ), $Q$ est la quantité transportée	Propose d'utiliser un tableur tel que Excel

**Tableau 3.1.** *Caractéristiques des modèles du choix des fournisseurs intégrant le transport*

Notons que la plupart de ces différents travaux sur le transport en amont d'une chaîne de valeur n'ont pas considéré les stocks chez les fournisseurs ni les stocks en transit. De plus, le transport intermodal n'a pas été pris en compte. Enfin, les différentes études se sont généralement restreintes au cas de deux fournisseurs.

### 3.6. Conclusion

La maîtrise des transports, l'amélioration de leurs performances, la réduction de leur coût et de leur prix rendent accessibles de nouveaux espaces d'approvisionnement, de différente structure et dont profitent également les fournisseurs. De plus, le développement des nouvelles technologies permet de renforcer l'intégration des sites de distribution dans la chaîne logistique globale.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact du transport sur les principaux facteurs liés à la gestion d'une chaîne de valeur, facteurs qui influent également la décision du choix des fournisseurs.

Enfin, nous avons présenté un état de l'art des principaux travaux qui ont pris en compte le transport dans la décision de l'approvisionnement auprès de plusieurs fournisseurs. Ces études se sont généralement restreintes au cas de deux fournisseurs. Les modèles proposés cependant dans ces travaux n'ont pas considéré les stocks dans tout le réseau de transport (stocks chez les fournisseurs, stocks en transit et stocks chez le DO).

Par conséquent, nous présentons dans le chapitre 4 suivant, une première modélisation du problème du choix des fournisseurs en tenant compte du transport. Le modèle proposé est sous forme d'un programme mathématique monobjectif de minimisation du coût total. Des contraintes liées aux fournisseurs, au transport et au DO sont également considérées dans le modèle.

## Chapitre 4 : Modélisation du choix des fournisseurs en considérant le transport

### 4.1. Introduction

Comme on l'a montré dans le chapitre précédent, les travaux relatifs aux stratégies d'approvisionnement (Hong et Hayya 1992, Ganeshan et al. 1999, Tyworth et Ruiz-Torres 2000) se sont restreints au cas de deux fournisseurs et n'ont pas traité le problème de gestion des stocks dans le réseau de transport reliant les fournisseurs et le DO. De plus, l'utilisation du transport intermodal n'a pas été prise en compte dans leurs modèles.

Par rapport à notre problématique, le modèle doit être étendu dans le cas d'une possibilité de la prise en considération des stocks dans tout le réseau du transport et de l'utilisation du transport direct ou combiné entre les fournisseurs et le DO.

Pour apporter des éléments de réponse à notre problématique, ce chapitre sera organisé comme suit : Dans la section 2, nous présentons le cadre général de notre étude. La section 3 sera consacrée à une description du problème, à la formulation mathématique du coût total du produit et des différentes contraintes du modèle. Le coût total inclut les coûts de possession de stock, de la passation de la commande, de transport et d'achat. Dans la section 4, nous passerons en revue les principaux travaux de recherche sur la modélisation du transport intermodal. Dans la section 5, nous décrivons l'algorithme permettant de résoudre notre modèle final. La section 6 présente une validation du modèle sur un exemple académique que nous avons construit, en testant plusieurs scénarios. Le premier scénario sera consacré à l'étude du cas d'un seul fournisseur. Ce dernier est supposé performant en terme de délai de livraison et dispose d'une capacité suffisante pour satisfaire la demande du DO. Le 2<sup>ème</sup> scénario étudie le cas de deux fournisseurs. Nous nous sommes intéressés à ces deux scénarios car ils sont les plus traités dans la littérature liée à l'approvisionnement multiple sourcing. Une étude de la performance du modèle est donnée à la fin de cette section. La section 7 présente une analyse de sensibilité du modèle dans le but de voir si le résultat change quand on agit sur un certain nombre de paramètres clés. Dans la section 8, nous indiquons le résultat obtenu dans le cas où le coût externe du transport est intégré dans le modèle. La dernière section donne une conclusion générale sur les points traités dans ce chapitre.

### 4.2. Cadre de l'étude

Comme le coût d'achat représente une part importante du coût global d'un produit (40 % à 80 %) et que le coût du transport amont de la chaîne de valeur du DO est de 30 % du coût logistique total, on s'est alors intéressé dans un premier temps à choisir les fournisseurs selon le critère de coût total du produit et à élaborer une formulation mathématique générale du problème qui minimise ce coût. On a également tenu compte dans le modèle proposé de l'ensemble des éléments suivants :

- **Pour le DO :**
  - *La demande* : Les fournisseurs à choisir doivent satisfaire la demande périodique du DO ;
  - *Le délai total de livraison* : Les fournisseurs doivent livrer les produits au délai imposé par le DO.
- **Pour les fournisseurs :**
  - Les critères retenus pour leur sélection sont : *le coût total du produit et le délai de livraison*. Le coût total du produit inclut les coûts d'achat, de commande, de stockage et du transport. Il représente l'objectif à minimiser. Les délais de livraison des fournisseurs sont formulés dans les contraintes du modèle ;
  - *La capacité du fournisseur* : Dans une stratégie à plusieurs fournisseurs, ces derniers sont supposés avoir des capacités limitées. Elle est formulée comme une contrainte du modèle.
- **Pour le transport :**
  - *Le mode de transport* ;
  - *Le type de livraison* entre les fournisseurs et le DO. Plusieurs options sont possibles :
    - *Livraison directe* : Chaque fournisseur utilise un seul mode de transport ;
    - *Livraison via des terminaux* : Le transport est intermodal ;
    - *Livraison par un seul véhicule* : Les quantités commandées aux fournisseurs peuvent être ramassées par un seul véhicule : il s'agit des tournées de véhicules. Nous ne considérons pas ce cas d'étude dans notre modèle ;
    - *Système mixte* : Certains fournisseurs livrent directement le DO tandis que d'autres utilisent un transport intermodal ;
  - *La capacité du véhicule* : On l'a utilisé comme une contrainte du modèle car elle a une influence sur le nombre d'expéditions ;
  - *Le temps de transit* : Il a un impact sur le système de stockage dans la chaîne logistique et il dépend du mode de transport (et donc de sa vitesse) et du type de livraison utilisés. En effet, si ce temps est court, les marchandises arrivent vite chez le DO, ce qui augmente son niveau de stock.

L'objectif final est d'apporter une solution aux questions suivantes :

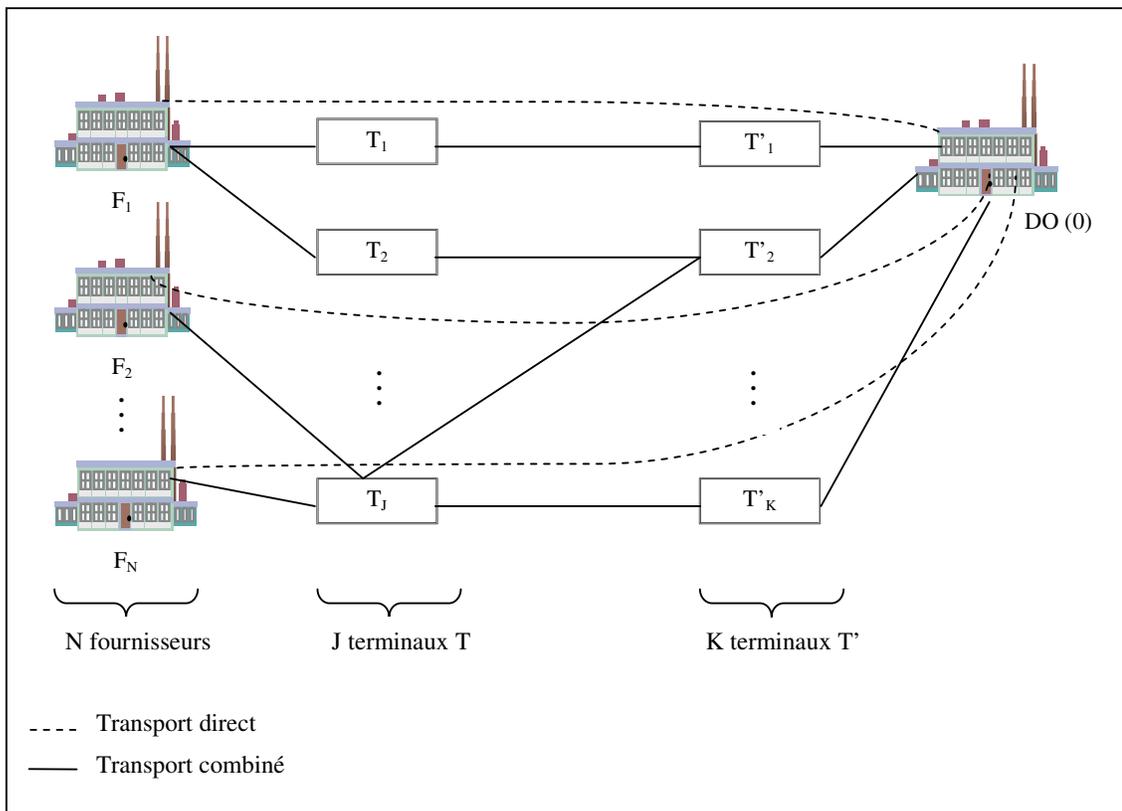
- Quel nombre optimal de fournisseurs choisir ?
- Quelle quantité commander à chacun des fournisseurs choisis ?
- Quels mode et type de l'organisation du transport adopter entre les fournisseurs choisis et le DO ?
- Quelle gestion des stocks dans le réseau logistique ?

### 4.3. Formulation mathématique

#### 4.3.1. Description du problème

La figure 4.1 ci-dessous illustre le réseau de transport reliant les  $N$  fournisseurs ( $F_1, F_2, \dots, F_N$ ) et le DO, symbolisé par l'indice 0. Le transport peut être de deux types : direct ou combiné. Les  $J$  terminaux  $T$  ( $T_1, \dots, T_J$ ) et les  $K$  terminaux  $T'$  ( $T'_1, \dots, T'_K$ ) symbolisent les points de transbordement (terminaux) du transport combiné. Un fournisseur quelconque peut utiliser l'un des terminaux  $T$  et par la suite, l'un des terminaux  $T'$ .

Notons que l'utilisation du terminal  $T_j$  implique automatiquement l'utilisation du terminal  $T'_k$  et que ces deux terminaux sont très distants.



**Figure 4.1.** Structure du réseau de transport reliant les fournisseurs et le DO

Notons que cette configuration du réseau de transport entre les fournisseurs et le DO permet de tenir compte des différentes typologies de réseaux logistiques discutés au paragraphe 2 du 3<sup>ème</sup> chapitre.

La notation que nous allons utiliser dans notre modélisation est la suivante :

$N$  : nombre de fournisseurs, chacun est représenté par l'indice  $i$  ( $i = 1, N$ ) ;

$J$  : nombre de terminaux  $T$ , chacun est symbolisé par l'indice  $j$  ( $j = 1, J$ ) ;

$K$  : nombre de terminaux  $T'$ , chacun est symbolisé par l'indice  $k$  ( $k = 1, K$ ) ;

$D$  : demande du DO durant l'horizon de temps considéré (exemple : demande annuelle) ;

$Q$  : Quantité commandée à tous les fournisseurs par période ;

- $Q_i$  : Quantité commandée au fournisseur  $i$  par période ;  
 $T_i$  : Part de la période au cours de la quelle  $Q_i$  est utilisé ( $T_i = Q_i/D$ ) ;  
 $A_i$  : Coût de commande du fournisseur  $i$  par commande ;  
 $P_i$  : Prix d'achat offert par le fournisseur  $i$  ;  
 $C_i$  : Capacité de production du fournisseur  $i$  ;  
 $l_i$  : Délai de livraison offert par le fournisseur  $i$  ;  
 $v_{ij}^m$  : Vitesse moyenne du mode de transport  $m$  utilisé entre une origine  $i$  et une destination  $j$  ;  
 $D_{ij}$  : Distance en Km entre une origine  $i$  et une destination  $j$  ( $D_{ij}/v_{ij}^m$  correspond au temps moyen de transit) ;  
 $\tau_j (\tau'_k)$  : Temps moyen de stock dans le terminal  $T_j$  ( $T'_k$ ) ;  
 $L$  : Délai de livraison imposé par le DO ;  
 $r$  : Taux de stockage par unité de temps chez le DO ;  
 $r_i$  : Taux de stockage par unité de temps chez le fournisseur  $i$  ;  
 $r_j (r'_k)$  : Taux de stockage par unité de temps dans le terminal  $T_j$  ( $T'_k$ ) ;  
 $rt_{ij}^m$  : Taux de stockage par unité du temps de transit dans le mode de transport  $m$  entre une source  $i$  et une destination  $j$  ;  
 $Cf_{ij}^m$  : Coût fixe par Km du mode de transport  $m$  entre une source  $i$  et une destination  $j$  ;  
 $Cv_{ij}^m$  : Coût variable du mode de transport  $m$  entre une source  $i$  et une destination  $j$  ;  
 $S_{ij}^m$  : Capacité du mode de transport  $m$  utilisé entre une source  $i$  et une destination  $j$ .

### 4.3.2. Variables de décision

Les variables de décision que nous considérons dans notre modèle sont :

$X_i$  : Pourcentage de  $Q$  attribuée au fournisseur  $i$

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si le fournisseur } i \text{ est choisi} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$W_{i0} = \begin{cases} 1 & \text{si le transport entre le fournisseur } i \text{ et le DO est direct} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le transport entre le fournisseur } i \text{ et le DO passe par le terminal } T_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Z_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{si le terminal } T'_k \text{ est utilisé après le terminal } T_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- La variable de décision  $Y_i$  est utilisée car elle intervient dans le calcul des coûts de commande et de transport que nous développons dans le paragraphe 4.3.4 ;
- La variable  $Z_{jk}$  indique que l'utilisation d'un terminal  $T$  implique automatiquement le passage par un terminal  $T'$ .

Les relations entre les différentes variables de décision sont explicitées dans les contraintes du problème (paragraphe 4.3.5).

### 4.3.3. Hypothèses du problème

Pour notre modélisation du problème, nous retenons les hypothèses suivantes :

- La demande du DO est supposée constante. C'est le cas général quand le DO et les fournisseurs envisagent de travailler en partenariat. Par conséquent, la demande est connue ;
- Le délai de réapprovisionnement est certain.

Ces deux hypothèses impliquent qu'il n'y a pas besoin de constituer de stock de sécurité.

Ainsi, on en déduit les relations suivantes :

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i$$

$$Q_i = X_i Q \quad i=1, N$$

$$T_i = X_i T \quad i=1, N$$

$$0 \leq X_i \leq 1 \quad i=1, N$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = 1$$

Nous supposons également que :

- Le DO recevra le lot de taille  $Q_i$  du fournisseur  $i$  après avoir utilisé le lot de taille  $Q_{i-1}$  venant du fournisseur  $i-1$  ;
- Les terminaux T et T' ont des capacités de stockage illimitées.

### 4.3.4. Expression du coût total

Dans notre modèle, nous considérons que le coût total du produit inclut les quatre coûts suivants :

- **Le coût d'achat** : Il correspond à la valeur du produit ;
- **Le coût de commande** : Il n'inclut pas le coût du transport et il correspond au coût traditionnel de commande, qui comprend les frais administratifs de préparation de la commande, d'obtention des lettres de crédit, de contrôle des échanges avec l'étranger, de contrôle de qualité, etc. ;
- **Le coût du transport** correspond au coût d'expédition de la marchandise du fournisseur au DO. Dans notre modèle, nous retenons la modélisation de ce coût telle qu'elle est présentée au chapitre 2, sous forme d'un coût fixe et d'un coût variable :

$$C_{transport} = C_f + C_v Q \quad \text{avec :}$$

- $C_f$  : Coût fixe par Km parcouru. Ce coût est indépendant du contenu du chargement et il correspond en général au coût de l'essence, du chauffeur, des douanes, etc. ;

- $C_v$  : Coût variable par quantité chargée. Il est indépendant de la distance parcourue.

- **Le coût de stockage** dans tout le réseau de transport inclut les coûts suivants :

- Le coût encouru chez le fournisseur pendant que les produits attendent d'être transportés ;
- Le coût d'immobilisation des produits en transit : Il correspond au coût de stockage dans chaque arc du réseau de transport (figure 4.1) ainsi que dans chaque terminal dans le cas où le transport combiné est utilisé ;
- Le coût encouru à l'entrepôt chez le DO pendant que les produits attendent d'être utilisés.

En tenant compte des hypothèses formulées auparavant, les expressions des différents coûts sont données ci-après :

- **Coût total d'achat :**

Comme  $X_i D$  représente la part de la demande à acheter chez le fournisseur  $i$ , le prix total d'achat est :

$$C_{achat} = \sum_{i=1}^N DX_i P_i \quad (1)$$

- **Coût total de commande :**  $A_i$  représente le coût de commande du fournisseur  $i$ . Comme  $D/Q$  est le nombre de périodes durant l'horizon de temps considéré, le coût total de commande s'écrit :

$$C_{commande} = \sum_{i=1}^N \frac{DA_i Y_i}{Q} \quad (2)$$

- **Coût total de stockage :**

Pour valoriser le stock moyen dans un réseau de transport reliant les fournisseurs, les terminaux et le DO, nous utilisons le raisonnement de Hall (1985), Burns et al. (1985) et Martel (2001) suivant :

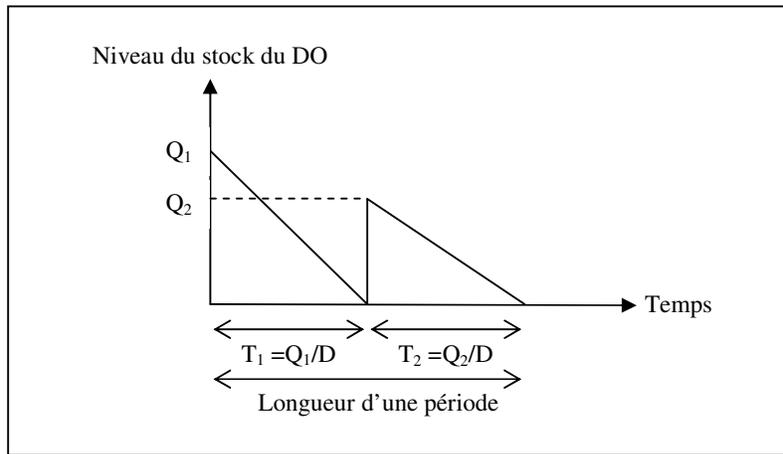
Pour effectuer une expédition de taille  $Q_i$  du fournisseur  $i$  vers le DO, il faut attendre en moyenne  $Q_i/2D$  chez le fournisseur  $i$  avant de transporter  $Q_i$ , qui sera équivalent au temps moyen d'attente à l'arrivée chez le DO. Par ailleurs, ce stock est aussi valorisé quand il circule, il s'agit de prendre en compte la durée moyenne de transport ( $D_{i0}/v_{i0}^m$ ) (si le transport est direct) ou ( $D_{ij}/v_{ij}^m + \tau_j + D_{jk}/v_{jk}^m + \tau_k + D_{k0}/v_{k0}^m$ ) (si le transport est combiné).  $m$  et  $m'$  désignent les deux modes du transport combiné. Dans ce cas, les parcours initiaux (des fournisseurs vers les terminaux  $T$ ) et finaux (des terminaux  $T'$  vers le DO) sont généralement les plus courts possibles et s'effectuent en principe par route. Ainsi,  $m$  représente le mode de transport routier et  $m'$  peut être de type ferroviaire, fluvial, maritime ou aérien.

Pour calculer le coût de stock total dans le réseau de transport reliant le fournisseur  $i$  et le DO, on utilise le même raisonnement suivant : le coût d'immobilisation par période est égal au stock moyen conservé durant la période, multiplié par le coût unitaire d'immobilisation à l'endroit où se trouve le stock ; ce qui donne l'expression suivante :

$$\frac{Q_i T_i r_i P_i}{2} + \frac{Q_i T_i r P_i}{2} + W_{i0} \left( Q_i \frac{D_{i0}}{v_{i0}^m} r t_{i0}^m P_i \right) + \sum_{j=1}^J W_{ij} \left( Q_i \frac{D_{ij}}{v_{ij}^m} r t_{ij}^m P_i + Q_i \tau_j r t_j P_i + \sum_{k=1}^K Z_{jk} \left( Q_i \frac{D_{jk}}{v_{jk}^{m'}} r t_{jk}^{m'} P_i + Q_i \tau'_k r t'_k P_i + Q_i \frac{D_{k0}}{v_{k0}^m} r t_{k0}^m P_i \right) \right) \quad (3a)$$

- Le 1<sup>er</sup> terme correspond au coût du stock chez le fournisseur  $i$  ;
- Le 2<sup>ème</sup> terme est le coût du stock chez le DO ;
- Le 3<sup>ème</sup> terme représente le coût du stock en transit dans le cas de l'utilisation du transport direct entre le fournisseur  $i$  et le DO ;
- Le 4<sup>ème</sup> terme correspond au stock en transit dans le cas de l'utilisation du transport combiné entre le fournisseur  $i$  et le DO.

La figure 4.2 illustre un exemple du niveau de stock dans le cas de l'utilisation de deux fournisseurs. Les stocks en transit ne sont pas pris en compte dans cette figure. Le stock conservé par période correspond à la somme des surfaces des deux triangles.



**Figure 4.2.** Exemple du niveau du stock du DO dans le cas de dual sourcing

En multipliant l'expression (3a) par  $D/Q$ , le coût total de stock dans tout le réseau de transport reliant le DO et les fournisseurs devient :

$$C_{stock} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i X_i^2 (r + r_i) Q}{2} + D P_i X_i W_{i0} \left( r t_{i0}^m D_{i0} / v_{i0}^m \right) \right) + \sum_{i=1}^N D X_i P_i \sum_{j=1}^J W_{ij} \left( r t_{ij}^m D_{ij} / v_{ij}^m + r t_j \tau_j + \sum_{k=1}^K Z_{jk} \left( r t_{jk}^{m'} D_{jk} / v_{jk}^{m'} + r t'_k \tau'_k + r t_{k0}^m D_{k0} / v_{k0}^m \right) \right) \quad (3)$$

**- Coût total de transport :**

- Dans le cas d'un transport direct entre chaque fournisseur et le DO, le coût de transport est :

$$C_{transport\_direct} = \sum_{i=1}^N W_{i0} (Cf_{i0}^m D_{i0} Y_i + Cv_{i0}^m Q_i) \quad (4a)$$

- Dans le cas du transport combiné, les quantités venant de plusieurs fournisseurs seront consolidées dans les terminaux T puis dans T' avant d'être reçus par le DO. Le coût de transport dans ce cas comprend 3 termes :

- Le 1<sup>er</sup> terme correspond au coût total de transport de chacun des fournisseurs vers les terminaux T et qui aura comme expression :

$$C_{transport\ 1} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J W_{ij} (Cf_{ij}^m D_{ij} Y_i + Cv_{ij}^m Q_i) \quad (4b)$$

- Le 2<sup>ème</sup> terme représente le coût total de transport entre les terminaux T et T' : Dans ce cas, les quantités livrées par les fournisseurs sont consolidées dans les terminaux T avant d'être envoyées vers les terminaux T'.

$$C_{transport\ 2} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} \left( Cf_{jk}^{m'} D_{jk} + Cv_{jk}^{m'} \left( \sum_{i=1}^N Q_i W_{ij} \right) \right) \quad (4c)$$

- Le 3<sup>ème</sup> terme correspond au coût total de transport entre les terminaux T' et le DO : Dans ce cas, les quantités sont consolidées dans les terminaux T' avant d'être livrées au DO.

$$C_{transport\ 3} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} \left( Cf_{k0}^m D_{k0} + Cv_{k0}^m \left( \sum_{i=1}^N Q_i W_{ij} \right) \right) \quad (4d)$$

En faisant la somme des expressions (4a), (4b), (4c) et (4d) et en multipliant l'expression obtenue par D/Q, l'expression finale du coût total de transport devient :

$$C_{total\_transport} = \sum_{i=1}^N \left[ W_{i0} (Cf_{i0}^m D_{i0} Y_i D/Q + Cv_{i0}^m X_i D) + \sum_{j=1}^J W_{ij} (Cf_{ij}^m D_{ij} Y_i D/Q + Cv_{ij}^m X_i D) \right] \\ + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} \left[ Cf_{jk}^{m'} D_{jk} D/Q + Cf_{k0}^m D_{k0} D/Q + (Cv_{jk}^{m'} + Cv_{k0}^m) \left( \sum_{i=1}^N D X_i W_{ij} \right) \right] \quad (4)$$

Enfin, l'expression du coût total est obtenue en faisant la somme des expressions (1), (2), (3) et (4) :

$$\begin{aligned}
C_{total} = & Q \left[ \sum_{i=1}^N \frac{P_i X_i^2 (r + r_i)}{2} \right] + \frac{D}{Q} \left[ \sum_{i=1}^N \left( A_i + W_{i0} C_{f_{i0}}^m D_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{f_{ij}}^m D_{ij} \right) Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} (C_{f_{jk}}^{m'} D_{jk} + C_{f_{k0}}^m D_{k0}) \right] \\
& + \sum_{i=1}^N DX_i \left[ P_i + W_{i0} P_i (rt_{i0}^m D_{i0} / v_{i0}^m) + W_{i0} C_{v_{i0}}^m \right] \\
& + \sum_{i=1}^N DX_i \left[ \sum_{j=1}^J W_{ij} P_i \left( rt_{ij}^m D_{ij} / v_{ij}^m + rt_j \tau_j + \sum_{k=1}^K Z_{jk} (rt_{jk}^{m'} D_{jk} / v_{jk}^{m'} + rt'_k \tau'_k + rt_{k0}^m D_{k0} / v_{k0}^m) \right) + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{v_{ij}}^m \right] \\
& + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} D \left[ (C_{v_{jk}}^{m'} + C_{v_{k0}}^m) \left( \sum_{i=1}^N X_i W_{ij} \right) \right] \quad (I)
\end{aligned}$$

Cette fonction est convexe par rapport à  $Q$ . L'optimum  $Q^*$  correspond alors à la quantité économique à commander (EOQ : Economic Order Quantity), valeur qui annule la dérivée d'ordre première de  $C_{total}$  :

$$\frac{\partial C_{total}}{\partial Q} = 0 \Rightarrow Q^* = \sqrt{\frac{2D \left[ \sum_{i=1}^N \left( A_i + W_{i0} C_{f_{i0}}^m D_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{f_{ij}}^m D_{ij} \right) Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} (C_{f_{jk}}^{m'} D_{jk} + C_{f_{k0}}^m D_{k0}) \right]}{\sum_{i=1}^N P_i X_i^2 (r + r_i)}}$$

En remplaçant  $Q$  par la valeur de  $Q^*$  dans (I), l'expression finale du  $C_{total}$  devient :

$$\begin{aligned}
C_{total} = & \sqrt{2D \left( \sum_{i=1}^N P_i X_i^2 (r + r_i) \right)} \left( \sum_{i=1}^N \left( A_i + W_{i0} C_{f_{i0}}^m D_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{f_{ij}}^m D_{ij} \right) Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} (C_{f_{jk}}^{m'} D_{jk} + C_{f_{k0}}^m D_{k0}) \right) \\
& + \sum_{i=1}^N DX_i \left[ P_i + W_{i0} P_i (rt_{i0}^m D_{i0} / v_{i0}^m) + W_{i0} C_{v_{i0}}^m \right] \\
& + \sum_{i=1}^N DX_i \left[ \sum_{j=1}^J W_{ij} P_i \left( rt_{ij}^m D_{ij} / v_{ij}^m + rt_j \tau_j + \sum_{k=1}^K Z_{jk} (rt_{jk}^{m'} D_{jk} / v_{jk}^{m'} + rt'_k \tau'_k + rt_{k0}^m D_{k0} / v_{k0}^m) \right) + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{v_{ij}}^m \right] \\
& + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} D \left[ (C_{v_{jk}}^{m'} + C_{v_{k0}}^m) \left( \sum_{i=1}^N X_i W_{ij} \right) \right]
\end{aligned}$$

### 4.3.5. Contraintes du modèle

Les principales contraintes du modèle sont :

- *Demande du DO* : Comme la demande  $D$  du DO doit être partagée entre tous les fournisseurs sélectionnés, on a la relation :

$$\sum_{i=1}^N X_i D = D \Rightarrow \sum_{i=1}^N X_i = 1$$

- *Capacité de production des fournisseurs* : Dans une stratégie à plusieurs fournisseurs, ces derniers sont supposés avoir des capacités limitées. La quantité totale à acheter chez chaque fournisseur doit être inférieure à sa capacité de production, ce qui donne la relation :

$$X_i D \leq C_i \quad i = 1, N$$

Ainsi, la demande du DO ne doit pas dépasser la somme totale des capacités des fournisseurs ; soit :  $D \leq \sum_{i=1}^N C_i$

- *Délai de livraison* : Pour mesurer la performance des fournisseurs en terme de délai de livraison, nous utilisons l'expression ci-dessous, donnée par plusieurs auteurs dans le domaine du choix des fournisseurs (Pan 1989, Chaudhy et al. 1993, Rayaraman et al. 1999) :

$$\sum_{i=1}^N X_i l_i \leq L \Rightarrow \sum_{i=1}^N X_i \frac{l_i}{L} \leq 1$$

Cette expression indique que le délai de livraison le plus long d'un fournisseur sera compensé par le délai de livraison le plus court d'un autre fournisseur.

- *Capacité des véhicules* : La quantité livrée par chaque fournisseur par période ne doit pas excéder la capacité totale des véhicules utilisés pour livrer cette quantité.

$$X_i D \leq S_i \quad i = 1, N$$

$S_i$  représente la capacité totale des véhicules utilisés pour transporter la marchandise du fournisseur  $i$  au DO.

- Dans le cas de l'utilisation du camion,  $S_i$  est la somme des capacités des camions utilisés. Si ces camions sont de même capacité,  $S_i$  sera équivalent au nombre d'expéditions multiplié par la capacité d'un seul camion ;
  - Dans le cas de l'utilisation du transport par train, avion, bateau ou barge,  $S_i$  correspond à la capacité de chacun de ces modes.
- *Intégrité des variables de décision* :
    - Relation entre  $X_i$  et  $Y_i$  :
      - Si  $Y_i = 1$  alors le fournisseur  $i$  est sélectionné et par conséquent une quantité  $X_i Q$  lui sera commandée. Ainsi,  $X_i > 0$
      - Si  $Y_i = 0$  alors le fournisseur  $i$  n'est pas sélectionné et  $X_i = 0$

On a alors la relation suivante :

$$\begin{cases} \varepsilon Y_i \leq X_i \leq Y_i & i=1, N \quad \text{avec } 0 < \varepsilon < 1 \\ Y_i = 1, 0 & i=1, N \end{cases}$$

- Utilisation du transport direct ou combiné :

$$\begin{cases} W_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} = 1 & i=1, N \\ \sum_{k=1}^K Z_{jk} = 1 & j=1, J \\ W_{i0}, W_{ij}, Z_{jk} = 0, 1 & i=1, N \quad j=1, J \quad k=1, K \end{cases}$$

- La 1<sup>ère</sup> relation indique que le transport entre le fournisseur  $i$  et le DO est soit direct soit combiné mais pas les deux à la fois ;
- La 2<sup>ème</sup> relation exprime la conservation des flux dans le terminal T. En effet, le flux de matières entrant à ce terminal doit être égal au flux qui en sort. Soit :

$$\sum_{i=1}^N QX_i W_{ij} = \sum_{k=1}^K Z_{jk} \left( \sum_{i=1}^N QX_i W_{ij} \right) \Rightarrow \sum_{k=1}^K Z_{jk} = 1$$

- La dernière relation montre le caractère binaire des variables de décision  $W_{i0}$ ,  $W_{ij}$  et  $Z_{jk}$ .

#### 4.3.6. Expression du modèle final

Le modèle final a la forme suivante :

$$\begin{aligned}
\text{Min}(C_{\text{total}}) = & \sqrt{2D \left( \sum_{i=1}^n P_i X_i^2 (r + r_i) \right) \left( \sum_{i=1}^N \left( A_i + W_{i0} C f_{i0}^m D_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} C f_{ij}^m D_{ij} \right) Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} (C f_{jk}^m D_{jk} + C f_{k0}^m D_{k0}) \right)} \\
& + \sum_{i=1}^N D X_i \left[ P_i + W_{i0} P_i (r t_{i0}^m D_{i0} / v_{i0}^m) + W_{i0} C v_{i0}^m \right] + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} D \left[ (C v_{jk}^m + C v_{k0}^m) \left( \sum_{i=1}^N X_i W_{ij} \right) \right] \\
& + \sum_{i=1}^N D X_i \left[ \sum_{j=1}^J W_{ij} P_i \left( r t_{ij}^m D_{ij} / v_{ij}^m + r t_j \tau_j + \sum_{k=1}^K Z_{jk} (r t_{jk}^m D_{jk} / v_{jk}^m + r t'_k \tau'_k + r t_{k0}^m D_{k0} / v_{k0}^m) \right) + \sum_{j=1}^J W_{ij} C v_{ij}^m \right]
\end{aligned}$$

S. C

$$X_i D \leq C_i \quad i = 1, N \quad (1)$$

$$X_i D \leq S_i \quad i = 1, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N X_i \frac{l_i}{L} \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = 1 \quad (4)$$

$$\varepsilon Y_i \leq X_i \leq Y_i \quad i = 1, N \quad (5)$$

$$W_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} = 1 \quad i = 1, N \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_{jk} = 1 \quad j = 1, J \quad (7)$$

$$Y_i, W_{i0}, W_{ij}, Z_{jk} = 0, 1 \quad i = 1, N \quad j = 1, J \quad k = 1, K \quad (8)$$

Notre modèle a la forme d'un programme non linéaire à variables mixtes  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $W_{i0}$ ,  $W_{ij}$  et  $Z_{jk}$ . Le modèle compte  $N$  variables  $X$ ,  $(2N + NJ + JK)$  variables binaires et  $(2 + 4N + J)$  contraintes.

Dans la section suivante, nous passons d'abord en revue les principales études sur la modélisation du transport intermodal avant de proposer un algorithme qui permet de résoudre notre modèle.

#### 4.4. Modélisation du transport intermodal : état de l'art

Un état de l'art sur les problèmes de transport montre que ceux-ci sont très difficiles à résoudre de manière optimale car ils sont NP-difficiles et les cas réels sont de très grande taille. Pour cette raison, les méthodes exactes ne sont pas toujours utilisables en pratique et il faut utiliser des approches heuristiques pour résoudre ces problèmes. Plusieurs heuristiques et

méthodes heuristiques sont alors apparues dans la littérature telles que la recherche tabou, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, le recuit simulé, les colonies de fourmis, etc.

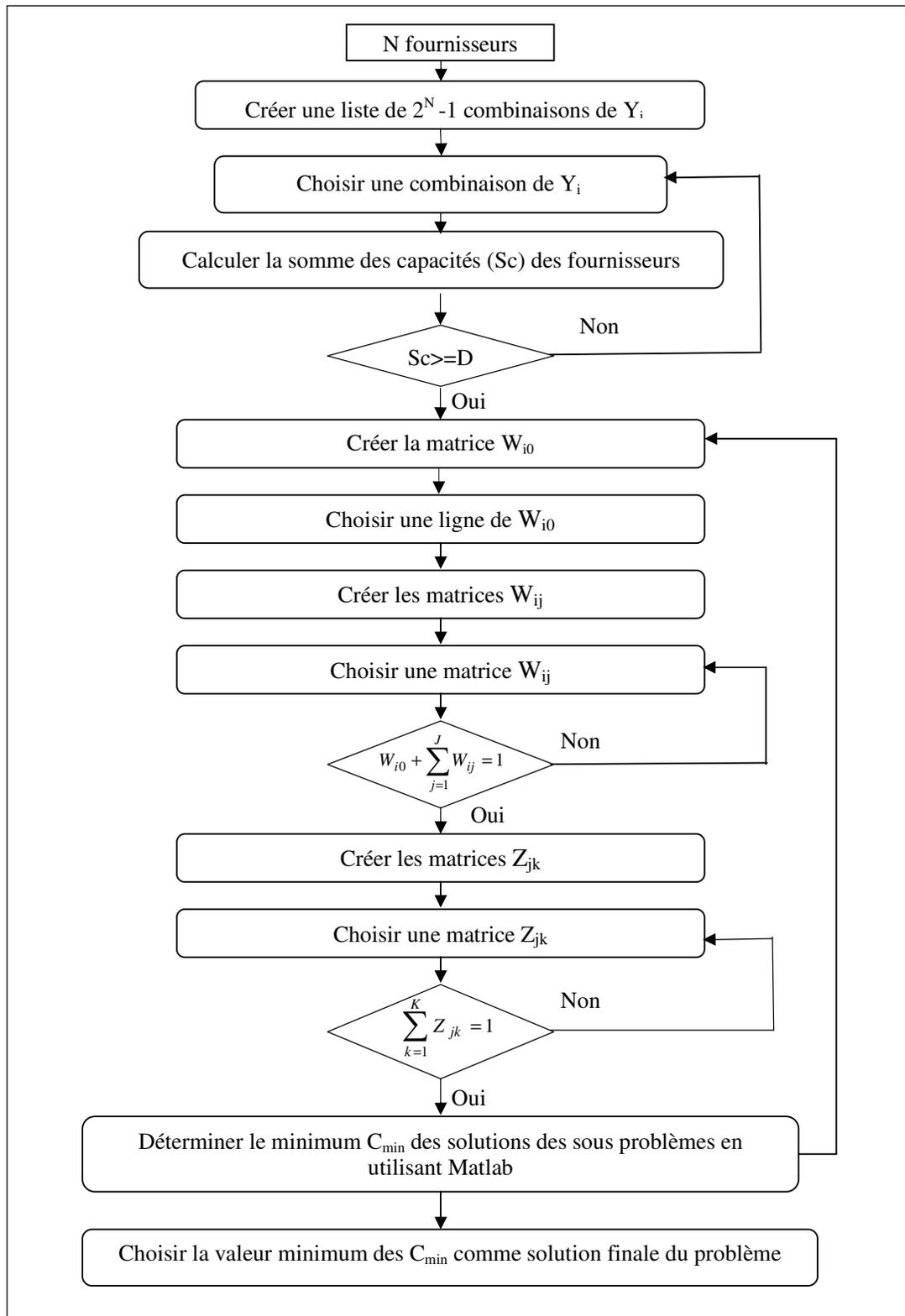
De plus, la plupart de ces méthodes se rapportent au cas de l'utilisation de transport monomodal ; c'est le cas des problèmes de voyageur de commerce, de tournées de véhicules avec ou sans fenêtres horaires, de chargement/déchargement des véhicules, etc. Des outils de recherche opérationnelle et des logiciels commerciaux très puissants (Cplex, Lindo, Lingo, etc.) développés dans le domaine d'optimisation mathématique sont les plus utilisés pour résoudre ce type de problèmes. Une revue de 92 articles dans le domaine de transport et publiés entre 1988 et 2001 (Bontekoning et al. 2004) montre que les études qui ont pris en compte l'aspect multimodal du transport sont encore à leur phase pré-paradigmatique et sont limitées vu que leur majorité n'est publiée que durant ces dix dernières années. De plus, la modélisation de ce type de transport est beaucoup plus difficile que le transport monomodal car elle doit prendre en considération plusieurs facteurs tels que les caractéristiques des divers modes de transport, les stratégies de coûts utilisées, les différents acteurs intervenant dans la coordination et le contrôle des divers maillons du réseau intermodal, etc. Les principaux travaux se sont intéressés au niveau de planification stratégique du transport intermodal. Les modèles développés représentent des extensions des modèles utilisés dans le cas de transport monomodal en ajoutant de nouveaux nœuds et arcs au réseau. Les nœuds caractérisent les terminaux quant aux arcs, ils représentent les liens entre les différents modes de transport intermodal. Ces modèles traitent particulièrement les problèmes suivants :

- **Problèmes de localisation** dont l'objectif général est de déterminer l'emplacement optimal d'un certain nombre d'installations sur un ensemble de sites possibles, de manière à minimiser le nombre de ces installations pour couvrir toutes les demandes, ou maximiser la demande couverte avec un nombre fixé d'installations, ou minimiser les coûts ou les distances, etc. Les principaux travaux dans ce domaine sont :
  - Meinert et al. (1998) ont considéré un réseau existant de trois terminaux et ont étudié l'impact de la localisation d'un nouveau terminal sur le temps et les distances des trajets par camion (drayage) dans ce réseau. Ils ont ainsi développé un outil de simulation utilisant les systèmes à événements discrets ;
  - Groothedde et Tavasszy (1999) ont utilisé la technique de recuit simulé pour optimiser la localisation des terminaux dans un réseau intermodal. Ainsi, des terminaux sont ajoutés aléatoirement au réseau et à chaque changement de la configuration du réseau, le coût total de transport est calculé pour trouver la localisation optimale des terminaux ;
  - Arnold et al. (2004) ont utilisé un modèle de programmation linéaire qui minimise le coût total de transport. Le modèle permet de trouver la localisation optimale des terminaux dans un réseau intermodal route/rail. Pour résoudre le modèle, les auteurs ont utilisé le logiciel de modélisation du trafic de marchandises NODUS, mis au point au sein du groupe de recherche Transport et Mobilité (GTM) en Belgique et le logiciel STAN utilisé dans la planification du transport national et régional de marchandises.
- **Problèmes de conception du réseau de transport** : Le but est de choisir des arcs du réseau ayant des capacités afin de permettre aux marchandises de circuler entre leur origine et destination au coût le plus bas. Les modèles résultant de ces problèmes sont généralement sous forme de programmes non linéaires à variables mixtes et qui peuvent être résolus par des heuristiques basées sur les techniques de génération de colonnes et les méthodes de descente. Un état de l'art des différents modèles, méthodes et logiciels qui permettent de résoudre ces problèmes selon les trois niveaux

de planification stratégique, tactique et opérationnel du transport est donné dans l'étude de Crainic et Laporte (1997).

Par rapport à notre modèle, nous retenons la procédure de séparation et évaluation (B & B : Branch-and-Bound en anglais), utilisée dans le cadre le plus général pour des problèmes de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) et de programmation linéaire à variables binaires (PL01). De plus, la méthode B & B est pratique pour des modèles de taille assez moyenne. Ainsi, en se référant à cette méthode, nous avons déduit l'algorithme de résolution de notre modèle suivant :

#### **4.5. Algorithme de résolution**



**Figure 4.3.** Algorithme de résolution du modèle

Cet algorithme est implémenté sous le logiciel *Matlab, version 6.50* et l'expérimentation numérique a été effectuée sur un ordinateur de type Intel Pentium IV (2.40 GHz).

Matlab est un logiciel scientifique très puissant qui offre une librairie d'outils en optimisation tels que la fonction *fmincon* que nous avons utilisé dans notre cas. Cette fonction permet de trouver le minimum d'une fonction à plusieurs variables et devant satisfaire un ensemble de contraintes. C'est le cas général de la programmation non linéaire avec des contraintes. Pour utiliser la fonction *fmincon*, le modèle doit être formulé de la manière suivante :

$$\begin{array}{l} \text{Min } f(x) \\ \text{S.C :} \\ \left\{ \begin{array}{l} c(x) \leq 0 \\ c_{eq}(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{array} \right. \end{array}$$

Avec  $x$ ,  $b$ ,  $b_{eq}$ ,  $lb$  et  $ub$  des vecteurs,  $A$  et  $A_{eq}$  sont des matrices,  $c(x)$  et  $c_{eq}(x)$  sont des fonctions qui retournent des vecteurs et  $f(x)$  une fonction qui retourne un scalaire.  $f(x)$ ,  $c(x)$  et  $c_{eq}(x)$  peuvent être des fonctions non linéaires. La fonction *fmincon* utilise la méthode de programmation quadratique séquentielle.

## 4.6. Validation du modèle

### 4.6.1. Scénario 1 : Etude de cas d'un seul fournisseur

Dans ce scénario, nous supposons que le fournisseur est performant en terme de délai de livraison et dispose d'une capacité suffisante pour satisfaire la demande du DO.

Pour le transport intermodal, nous retenons le cas de l'utilisation du transport combiné camion-rail car c'est le plus utilisé. Ainsi, trois options seront analysées ; chacune dépend du mode de transport utilisé entre le fournisseur et le DO :

- Option 1 : La livraison entre le fournisseur et le DO se fait par le camion ;
- Option 2 : La livraison entre le fournisseur et le DO se fait par le transport combiné camion-train ;
- Option 3 : La livraison entre le fournisseur et le DO se fait par le train.

L'objectif est de choisir la meilleure option, celle qui donne un coût total plus bas.

Pour illustrer ce scénario, nous utilisons les données de l'étude de Ganeshan et al. (1999) dans le cas des options 1 et 3 (transport direct) car dans cette étude, les auteurs n'ont pas étudié le cas de l'utilisation du transport combiné et qui est l'objet de l'option 2. Nous avons choisi de comparer nos résultats avec ceux de cette étude car les auteurs ont tenu compte du transport et du stock en transit dans leur modèle bien qu'ils n'ont pas considéré le stock chez le fournisseur. Pour le calcul du coût de transport, les auteurs ont utilisé la formulation suivante :  $a + b \ln(Q)$ , avec  $a=64.8264$ ,  $b=-5.6113$  et  $Q$  est la taille de lot transportée.

Les données du problème sont :

$P_1=5$  €,  $D = 5400$  unités/an,  $A = 150$  €.

1 année = 360 jours ouvrables.

Les taux de stockage par an chez le fournisseur, le DO, dans les terminaux et dans les véhicules sont supposés égaux à 30 %.

Les temps moyens de passage des véhicules dans les terminaux sont supposés égaux à 1 jour par an. Enfin,  $\epsilon$  est fixé à 0.01.

Pour les autres informations sur le transport, nous utilisons celles données dans (Martel, 2001) et qui sont :

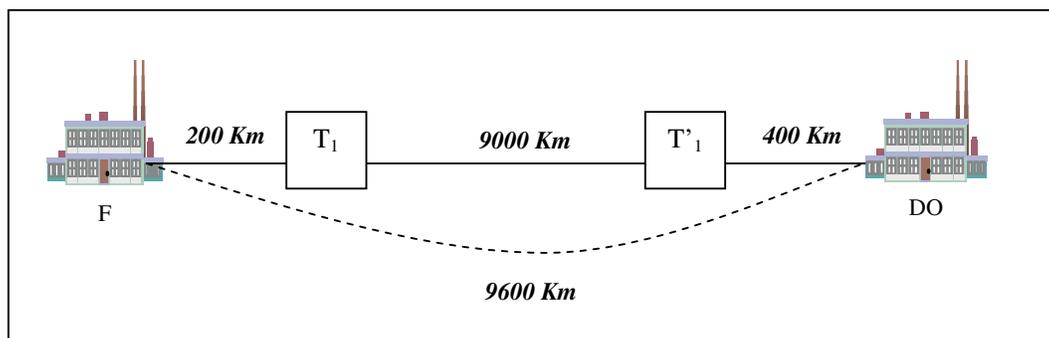
- Pour le camion :

$C_f=0.785$  €/Km,  $C_v= 0.1575$  €/unité, vitesse moyenne =80 Km/h et capacité = 60 tonnes.

- Pour le train :

$C_f=1.932$  €/Km,  $C_v= 0.09$  €/unité, vitesse moyenne = 100 Km/h et capacité large.

Les distances entre les différents arcs du réseau sont indiquées dans la figure 4.4 ci-dessous :



**Figure 4.4.** Réseau de transport reliant un fournisseur et le DO

Le tableau 4.1 suivant regroupe des résultats trouvés pour chacune des options, en comparaison avec les résultats de Ganeshan et al. (1999).

	<i>Etude de Ganeshan et al. (1999)</i>	<b>Option 1</b>	<b>Option 2</b>	<b>Option 3</b>
$Q^*$	1166	737	740	740
Nombre de périodes : $D/Q$	5	8	8	8
Nombre de livraisons par période	–	13	13	1
$C_{achat}$ (€)	27000	27000	27000	27000
$C_{commande}$ (€)	695	1099	1095	1094
$C_{stock\_transit}$ (€)	113	113	136	90
$C_{stock\_fournisseur}$ (€)	0	553	555	555
$C_{stock\_DO}$ (€)	875	553	555	555
$C_{transport}$ (€)	25	857	2202	502
$C_{total}$ (€)	29453	30174	31543	<b>29796</b>

**Tableau 4.1.** Comparaison avec Ganeshan et al. (1999) dans le cas de mono sourcing

Il découle de ce tableau les résultats suivants :

- Dans notre étude, le coût total est minimum pour l'option 3 et les livraisons entre le DO et le fournisseur sont directes par train, ce qui suppose qu'ils disposent chacun d'une installation terminale embranchée (ITE). Dans le cas contraire, l'option à choisir est la livraison directe par camion ;
- Dans ce cas, le DO recevra pour chacune des 7 premières périodes, la quantité de 740 du fournisseur, en une seule livraison. A la 8<sup>ème</sup> période, il recevra la quantité restante, soit 220, pour satisfaire sa demande qui est de 5400 unités par an ;
- Pour cette option, le coût du transport est le plus faible ainsi que le stock en transit.
- Comme dans l'option 3, les coûts de stocks chez le DO et chez le fournisseur sont les mêmes pour les options 1 et 2, cela peut s'expliquer par le fait que le mode de transport utilisé en amont ainsi qu'en aval du réseau du transport reliant le fournisseur et le DO est le camion, supposé de même capacité. Concernant le stock en transit, il est cependant plus important pour l'option 2 à cause de la rupture de charge dans les terminaux ;
- Par rapport à l'étude de Ganeshan et al. (1999), le coût total trouvé aura la valeur de 30328 si le stock chez le fournisseur est pris en compte dans leur modèle, ce qui est plus important que dans les options 1 et 3. Le coût en transit est le même que celui trouvé dans l'option 1 quant au stock chez le DO, il est plus élevé vu que la quantité commandée de 1166 est reçue en une seule livraison. Enfin, le coût de transport est plus faible que dans les autres options. Notons que dans cette étude, les auteurs n'ont pas précisé le mode de transport utilisé, ce qui ne nous a pas permis de déduire le nombre de livraisons effectuées dans le cas qu'ils ont traité ni les valeurs de a et b en fonction du mode de transport utilisé.

#### 4.6.2. Scénario 2 : Etude de cas de deux fournisseurs

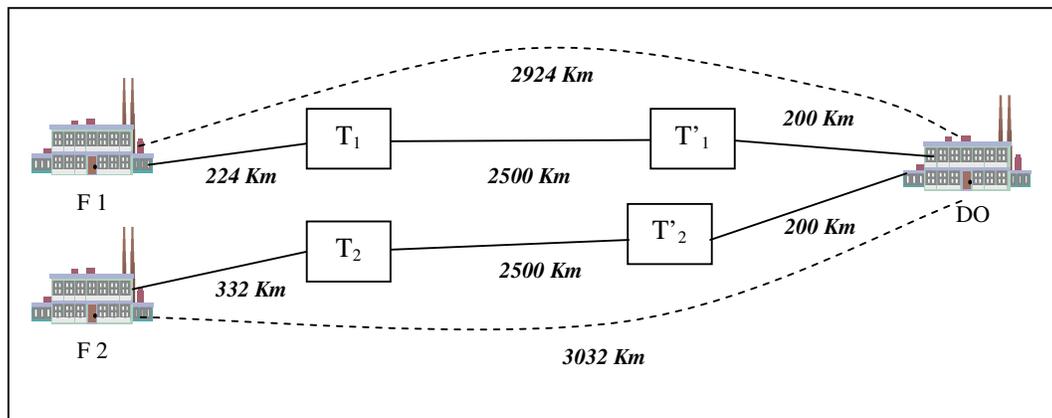
Dans ce 2<sup>ème</sup> scénario, nous comparons nos résultats avec ceux obtenus dans deux études : celle de Ghodspour et O'Brien (2001) d'une part car dans cette étude, les auteurs ont traité le problème de sélection des fournisseurs avec une demande du DO supposée constante mais sans tenir compte du transport ni du système de stockage dans tout le réseau du transport reliant les fournisseurs et le DO et celle de Ganeshan et al. (1999) déjà citée dans le 1<sup>er</sup> scénario.

##### *Etude de Ghodspour et O'Brien (2001) :*

Dans cette étude, les deux fournisseurs offrent respectivement des prix d'achat de 32 € et 16 €, des coûts de commande de 8 € et 4 €, des capacités de production de 500 et 700 et des performances en termes de délais de livraison de 0.97 % et 0.90 %. La demande du DO est de 1000 unités par an et le taux de stockage est de 20 %.

Pour montrer l'impact du transport sur la décision de l'approvisionnement auprès de deux fournisseurs, nous avons dans un premier temps exécuté notre programme sans tenir compte des paramètres liés au transport (stockage en transit et coût du transport). Dans l'étude de Ghodspour et O'Brien (2001), les auteurs n'ont pas aussi tenu compte des stocks chez les fournisseurs. Nous avons obtenu le même résultat que celui publié dans ladite étude. Dans un deuxième temps, nous avons exécuté notre programme en tenant compte des différents paramètres du transport. Les distances entre les différents nœuds du réseau de transport sont indiquées dans la figure 4.5 ci-dessous. Les valeurs des distances entre les fournisseurs et le DO sont déduites à partir des temps de transit, qui sont à peu près de 60 % des délais de

livraison (Tyworth 1991) et des vitesses de véhicules utilisés. Pour le transport combiné, nous avons choisi les mêmes distances entre les terminaux T et T' ainsi qu'entre T' et le DO.



**Figure 4.5.** Réseau de transport reliant deux fournisseurs et le DO

Les options que nous allons étudier sont :

- Option 1 : Livraison des deux fournisseurs au DO se fait par camion ;
- Option 2 : Livraison des deux fournisseurs au DO se fait par le transport combiné camion-train ;
- Option 3 : Livraison du fournisseur 1 au DO se fait par camion tandis que celle du fournisseur 2 au DO se fait par le transport combiné camion-train ;
- Option 4 : Livraison du fournisseur 1 au DO se fait par le transport combiné camion-train tandis que celle du fournisseur 2 au DO se fait par camion.

Le tableau 4.2 ci-dessous regroupe les résultats trouvés en comparaison avec ceux obtenus dans l'étude de Ghodsypour et O'Brien (2001) :

	<i>Etude de Ghodsypour et O'Brien (2001).</i>	<i>Prise en compte du transport</i>			
		<i>Option 1</i>	<i>Option 2</i>	<i>Option 3</i>	<i>Option 4</i>
$Q^*$	106	77	79	79	79
$X1$	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
$X2$	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
$Q_1$	32	23	24	24	24
$Q_2$	74	54	55	55	55
<i>Nombre de périodes : <math>D/Q^*</math></i>	10	13	13	13	13
$C_{achat} (\text{€})$	20800	20800	20800	20800	20800
$C_{commande} (\text{€})$	113	156	152	152	152
$C_{stock\_transit} (\text{€})$	0	18	63	29	27
$C_{stock\_fournisseur1} (\text{€})$	0	22	23	23	23
$C_{stock\_fournisseur2} (\text{€})$	0	60	62	62	62
$C_{stock\_DO} (\text{€})$	113	83	85	85	85
$C_{transport} (\text{€})$	0	165	668	342	243
$C_{total} (\text{€})$	21027	<b>21303</b>	21852	21492	21391

**Tableau 4.2.** Comparaison avec Ghodsypour et O'Brien (2001) dans le cas de dual sourcing

Ce tableau montre que pour tous les cas, les proportions de la commande à attribuer aux fournisseurs sont les mêmes et sont respectivement de 30 % pour le 1<sup>er</sup> fournisseur et 70 % pour le 2<sup>ème</sup> fournisseur. Une plus grande part de la demande étant attribuée au 2<sup>ème</sup> fournisseur, qui est plus loin du DO que le 1<sup>er</sup> fournisseur mais qui offre un prix d'achat plus faible.

Selon notre étude, le coût total est minimum pour l'option 1. Par conséquent, la politique du transport à adopter est le transport direct par camion de chacun des deux fournisseurs au DO.

Pour cette option, les quantités à commander aux deux fournisseurs et pour chacune des 12 premières périodes sont respectivement de 23 pour le 1<sup>er</sup> fournisseur et de 54 pour le 2<sup>ème</sup> fournisseur. A la 13<sup>ème</sup> période, le DO recevra les quantités restantes, soit 23 du 1<sup>er</sup> fournisseur et 53 du 2<sup>ème</sup> fournisseur, pour satisfaire sa demande qui est de 1000 unités par an.

Dans le cas de l'étude de Ghodsypour et O'Brien (2001), le DO recevra et pour chacune des 9 premières périodes les quantités de 32 du 1<sup>er</sup> fournisseur et 74 du 2<sup>ème</sup> fournisseur. A la 10<sup>ème</sup> période, il recevra les quantités restantes, soit 32 du 1<sup>er</sup> fournisseur et 14 du 2<sup>ème</sup> fournisseur pour satisfaire sa demande. Le coût de stock chez le DO est plus important que dans notre étude. Notons que nous avons trouvé ce même résultat par notre modèle en tenant compte des paramètres de cette étude.

Dans le cas où le transport combiné est utilisé (options 2 à 4), le coût total est minimum pour l'option 4, ce qui correspond à l'utilisation du transport combiné camion-train entre le 1<sup>er</sup> fournisseur et le DO et au transport direct par camion entre le 2<sup>ème</sup> fournisseur et le DO. Le coût total du transport est plus faible que dans les options 2 et 3.

#### ***Etude de Ganeshan et al. (1999)***

Dans cette étude, le DO utilise deux fournisseurs, le 1<sup>er</sup> est fiable en terme de délai de livraison (cas de scénario 1) et le 2<sup>ème</sup> est attractif pour le DO dans la mesure où il offre des remises sur le prix d'achat, bien que son délai de livraison soit important.

Dans ce cas, le 1<sup>er</sup> fournisseur offre un prix d'achat de 5 €, le coût total de commande pour les deux fournisseurs est 200 €. La demande du DO est de 5400 unités par an et le taux de stockage est de 30 %. Les temps moyens de transit du 1<sup>er</sup> fournisseur et du 2<sup>ème</sup> fournisseur sont respectivement de 5 jours et de 25 jours, ce qui nous a permis de déduire que les distances de ces deux fournisseurs au DO sont respectivement de 9600 Km et de 48000 Km (car la vitesse de camion est 80 Km/h).

Dans l'étude de Ganeshan et al. (1999), les auteurs ont proposé des alternatives possibles exprimant quel niveau de remise négocier avec le 2<sup>ème</sup> fournisseur pour avoir un coût total plus avantageux que la solution de l'approvisionnement unique auprès du 1<sup>er</sup> fournisseur. Pour cela, ils ont représenté le coût total optimum en fonction du taux de remise  $d$  (%) que le 2<sup>ème</sup> fournisseur offre sur le prix d'achat et cela pour les différentes valeurs  $f$  qui représente le pourcentage de la commande à attribuer à ce 2<sup>ème</sup> fournisseur.

Pour un prix de 4 € offert par le 2<sup>ème</sup> fournisseur, les résultats trouvés par notre modèle sont donnés dans le tableau 4.3 suivant :

	<i>Option 1</i>	<i>Option 2</i>	<i>Option 3</i>	<i>Option 4</i>
$Q^*$	1267	1290	1287	1271
$X1$	0.35	0.35	0.35	0.35
$X2$	0.65	0.65	0.65	0.65
$Q_1$	445	453	452	447
$Q_2$	822	837	835	824
<i>Nombre de périodes : <math>D/Q^*</math></i>	5	5	5	5
$C_{achat}$ (€)	23497	23497	23497	23497
$C_{commande}$ (€)	852	837	839	850
$C_{stock\ transit}$ (€)	331	529	297	340
$C_{stock\ fournisseur1}$ (€)	117	119	119	118
$C_{stock\ fournisseur2}$ (€)	320	326	325	321
$C_{stock\ DO}$ (€)	437	445	444	439
$C_{transport}$ (€)	873	3577	1766	1347
$C_{total}$ (€)	<b>26428</b>	29331	27287	26911

**Tableau 4.3.** Résultats du modèle dans le cas de dual sourcing avec  $P_2=4$  €

En comparaison avec les résultats trouvés dans le 1<sup>er</sup> scénario (tableau 4.1), nous remarquons que l'utilisation de deux fournisseurs est plus profitable pour le DO que l'utilisation d'un seul fournisseur. En effet, le coût total est plus bas bien que le coût de transport reste plus important. De même, le coût de stock chez le DO est plus faible. Pour l'option 1 par exemple, l'utilisation de deux fournisseurs va permettre au DO de faire une économie de 3746 € sur le coût total.

En considérant l'option 1, la figure 4.6 ci-dessous illustre les coûts totaux obtenus en fonction de taux de remise  $d$  (%) et pour les différentes valeurs de  $f$  :

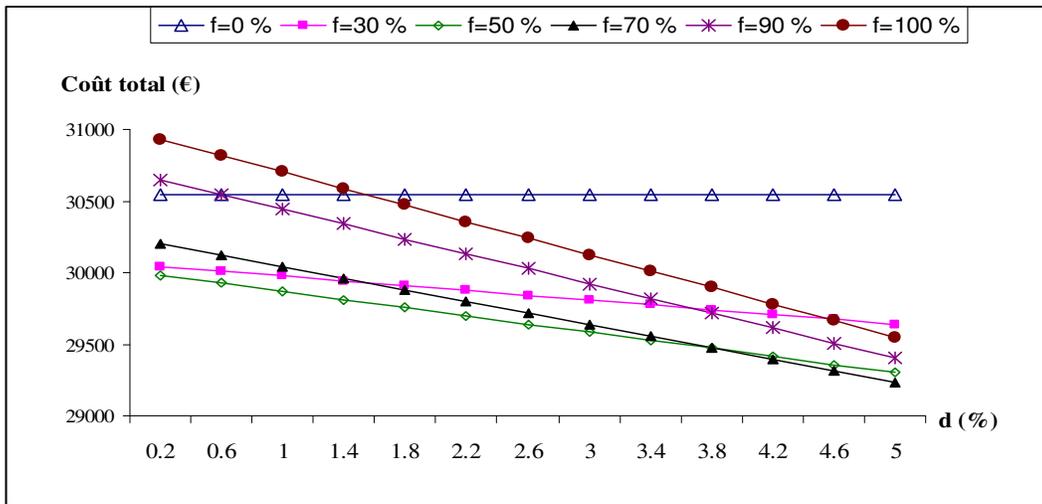


Figure 4.6. Coût total de dual sourcing en fonction de d et f

Cette figure montre que seules les droites correspondantes aux valeurs de f de 90 % et de 100 % coupent celle de f=0 %. Par conséquent, il est plus économique pour le DO de commander la totalité de la demande au 2<sup>ème</sup> fournisseur (f=100 %) si celui-ci offre une remise  $d \geq 1.6$  % et seulement 90 % de la demande (f=90 %) si  $d \geq 0.6$  %. Enfin, dans le cas où le 2<sup>ème</sup> fournisseur ne peut offrir qu’une remise  $d < 0.6$  %, il est profitable pour le DO de n’utiliser que le 1<sup>er</sup> fournisseur.

Pour les autres valeurs de f (30 %, 50 % et 70 %), nos résultats montrent que la demande ne peut être satisfaite en totalité par le 2<sup>ème</sup> fournisseur bien que les coûts associés à chacune de ces valeurs sont minimums. Ainsi, dans ces cas, le 2<sup>ème</sup> fournisseur ne peut être utilisé seul.

Par rapport à l’étude de Ganeshan et al. (1999), le DO pourra toujours faire toujours appel au 2<sup>ème</sup> fournisseur selon les valeurs de f et d indiquées dans le tableau 4.4 suivant :

<i>f (%)</i>	30	50	70	90	100
<i>d (%)</i>	$d \geq 4.2$	$d \geq 3.4$	$d \geq 2.8$	$d \geq 2.4$	$d \geq 5$

Tableau 4.4. Résultats de Ganeshan et al. (1999) dans le cas de dual sourcing

Nous remarquons que dans cette étude, le niveau de seuil de d (sauf pour f=100 %) décroît avec f.

### 4.6.3. Scénario 3 : Etude général du choix de plus de deux fournisseurs

Dans Aguezzoul et Ladet (2004a), Aguezzoul et Ladet (2004c) et Aguezzoul et Ladet (2004f), on a considéré l’étude de trois fournisseurs en ne tenant compte que d’un réseau du transport avec un entrepôt centralisé. Pour des prix d’achat égaux, nous avons montré qu’il est préférable d’utiliser des livraisons via le terminal central de chacun des trois fournisseurs vers le DO.

Dans Aguezzoul et Ladet (2003a) et Aguezzoul et Ladet (2003b), on s’est restreint au cas du transport direct entre les fournisseurs et le DO. Ces études montrent que les livraisons directes

utilisant le mode de transport LTL est plus économique que celles utilisant le mode de transport TL.

Dans la suite de cette section, on va étudier la performance du notre modèle en terme de temps d'exécution. On s'est limité au cas de l'utilisation de 6 fournisseurs au maximum car c'est le plus traité dans la littérature liée à la décision de la sélection des fournisseurs (Weber 1996 ; Sedarage et al. 1999, Weber et al. 2000, Talluri et Narasimhan 2003).

Dans le cas de la prise en compte du transport combiné, nous avons également considéré 6 terminaux de type T et T' ; ce qui correspond à la plupart des cas possibles de configurations de réseaux de transport entre les fournisseurs et le DO comme il a été mentionné dans le paragraphe 2 du 3<sup>ème</sup> chapitre.

Le tableau 4.5 suivant donne les différentes caractéristiques de notre modèle en termes de taille et de temps d'exécution (CPU) en secondes :

<i>Nombre de fournisseurs</i>	<i>Nombre de terminaux T</i>	<i>Nombre de terminaux T'</i>	<i>Nombre de variables</i>	<i>Nombre de contraintes</i>	<i>CPU (secondes)</i>
2	2	2	14	12	7.73
3	3	3	27	17	8.46
4	4	4	44	22	13.29
5	5	5	65	27	37.86
6	6	6	90	32	145.60 (2 min 26)

**Tableau 4.5.** CPU du modèle en fonction du nombre de fournisseurs et de terminaux

Il apparaît que le temps de calcul du programme est raisonnable pour les différentes valeurs de N traités dans la littérature.

La section suivante présente une analyse de sensibilité du modèle.

## 4.7. Analyse de sensibilité

L'objet de cette étude de sensibilité est de voir si le résultat change quand on agit sur un certain nombre de paramètres clés. Dans un premier temps, nous comparons nos résultats à ceux de l'étude de Tyworth et Ruiz-Torres (2000) qui ont analysé l'effet de la localisation des fournisseurs, de leur prix d'achat, de la demande du DO et des délais de livraison sur les gains dont peut bénéficier le DO s'il utilise deux fournisseurs. Dans un deuxième temps, nous analysons l'impact de la localisation des terminaux sur le résultat du modèle.

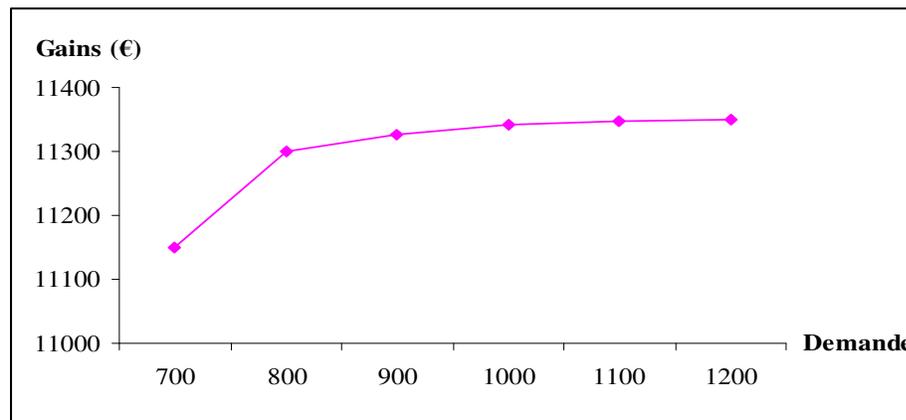
Dans notre cas, nous retenons les paramètres clés suivants et qui affectent le choix des fournisseurs et le transport :

- **La demande du DO** : En tenant compte des données du scénario 2 (étude de Ghodsypour et O'Brien, 2001) et en considérant l'option 1 (transport par camion), le tableau 4.6 ci-dessous donne le résultat obtenu par notre modèle en faisant augmenter la demande D du DO. Nous avons également représenté les gains sur le coût total et qui sont associés à l'utilisation de deux fournisseurs en comparaison par rapport à l'utilisation unique du 1<sup>er</sup> fournisseur :

$D$	$X1$	$X2$	$Q$	$C_{transport} (\text{€})$	$C_{total} (\text{€})$	$Gains (\text{€})$
700	0.01	0.99	53	117	11764	11150
800	0.13	0.88	63	133	14858	11301
900	0.22	0.78	71	149	18076	11327
1000	0.30	0.70	77	165	21303	11342
1100	0.36	0.64	81	181	24538	11347
1200	0.42	0.58	83	197	27776	11349

**Tableau 4.6.** Effets de la demande sur les gains associés au dual sourcing

- Ce tableau montre que quand la demande du DO augmente, la quantité commandée  $Q$  augmente. La part de  $Q$  attribuée au 1<sup>er</sup> fournisseur augmente alors que celle attribuée au 2<sup>ème</sup> fournisseur diminue ;
- Dans le cas où la demande est inférieure au maximum des capacités des deux fournisseurs, soit à 700, les parts de la quantité totale à commander aux fournisseurs restent constantes et sont de 0.01 pour le 1<sup>er</sup> fournisseur et de 0.99 pour le 2<sup>ème</sup> fournisseur ;
- Le coût total ainsi que le coût du transport croissent linéairement en fonction de la demande ;
- Par rapport à l'étude de Ghodsypour et O'Brien (2001), nous avons obtenu le même résultat qui est : les gains sur le coût total dus à l'utilisation de deux fournisseurs en comparaison avec un seul fournisseur, augmentent avec la demande (figure 4.7)



**Figure 4.7.** Gains associés au dual sourcing en fonction de la demande

- **Le prix d'achat :** Il a une influence sur le système de stockage dans le réseau de transport reliant les fournisseurs et le DO. Plus ce prix est bas, plus le choix se porte sur les fournisseurs qui offrent ce prix. L'étude présentée dans le scénario 2 en considérant les données de Ganeshan et al. (1999) montre que le recours au 2<sup>ème</sup> fournisseur et qui est plus loin de DO, sera intéressant si celui-ci offre des remises sur le prix d'achat ;
- **La localisation des fournisseurs :** Elle a un impact direct sur les délais de livraisons et sur le coût du transport. Ce facteur est très lié au facteur précédent. Généralement,

le DO fait appel à un fournisseur éloigné si ce dernier offre des réductions sur les prix. C'est le cas par exemple d'un DO européen qui s'approvisionne auprès des fournisseurs des pays en voie de développement, où la main d'œuvre est moins chère comme l'Asie ou l'Afrique.

Le tableau 4.7 suivant donne les résultats du modèle dans le cas où la distance  $D_{20}$  au 2<sup>ème</sup> fournisseur augmente mais que le prix d'achat  $P_2$  qu'il offre diminue. Nous utilisons les mêmes données dans le cas précédent. Le 1<sup>er</sup> fournisseur est à 2924 Km du DO et offre un prix unitaire d'achat de 32 € :

$D_{20}$ (Km)	$P_2$ (€)	$C_{total}$ (€)	Gains (€)
3100	15	15725	16920
3200	14.5	15224	17421
3300	14	14722	17923
3400	13.5	14221	18424
3500	13	13719	18926

**Tableau 4.7.** Effets de la distance et du prix d'achat sur les gains associés au dual sourcing

Comme dans l'étude de Ghodsypour et O'Brien (2001), les gains générés par l'utilisation de deux fournisseurs augmentent de manière linéaire, quand la distance au 2<sup>ème</sup> fournisseur augmente et le prix d'achat qu'il offre diminue.

Une étude similaire sur l'impact du prix d'achat et de la distance et qui considère le cas de trois fournisseurs est détaillée dans Aguezzoul et Ladet (2005a).

- **Localisation du terminal :** En considérant les données du 1<sup>er</sup> scénario, nous avons observé les effets des différentes distances intervenantes dans le transport combiné entre le fournisseur et le DO et qui sont :
  - D11 : Distance entre le fournisseur et le terminal T. En fixant les autres distances à leurs valeurs indiquées dans la figure 4.4, une augmentation de la valeur de D11 implique une croissance légère du coût total. Nous avons limité la valeur maximale de D11 à 500 Km. Quant au coût du transport, il reste presque invariable ;
  - D10 : Distance entre le terminal T' et le DO. Nous avons obtenu le même résultat que dans le cas précédent ;
  - D11' : Distance entre les terminaux. Le coût total et le coût du transport augmentent légèrement par rapport à l'augmentation de cette distance, comme indiqué dans le tableau 4.8 suivant :

<i>DII' (Km)</i>	<i>C<sub>total</sub> (€)</i>	<i>C<sub>transport</sub> (€)</i>	<i>C<sub>stock_transit</sub> (€)</i>
5000	31499	2196	99
6000	31510	2197	108
7000	31521	2199	118
8000	31532	2200	127
9000	31543	2202	136
10000	31554	2204	146
11000	31565	2205	155

**Tableau 4.8.** Effets de la distance entre terminaux sur les coûts logistiques

Enfin, notons qu'une augmentation de la valeur de chacune de ces trois distances prise séparément, implique une croissance, de manière linéaire du coût du stock en transit.

#### 4.8. Prise en compte du coût externe du transport

Dans cette section, nous allons étudier l'impact du coût externe du transport sur la décision de l'approvisionnement. Nous traitons le cas d'un seul fournisseur (scénario 1) qui aura le choix entre l'utilisation des modes de transport par voie routière, ferroviaire, fluviale ou maritime.

Nous retenons les valeurs du coût externe par mode de transport citées dans le paragraphe 5 du 2<sup>ème</sup> chapitre et que nous rappelons dans le tableau 4.9 suivant :

<i>Mode de transport</i>	<i>Coût externe (€ par 1000 t Km)</i>
Camion	24.1
Train	12.4
Barge	5
Bateau	4

**Tableau 4.9.** Coût externe par mode de transport

De plus, les données correspondantes au transport par fleuve et par mer considérées dans cette étude sont les suivantes :

*Pour le transport par barge :*

$C_f = 1.17 \text{ €/Km}$ ,  $C_v = 0.025 \text{ €/unité}$ , vitesse moyenne = 20 Km/h et capacité large.

*Pour le transport par bateau :*

$C_f = 1.37 \text{ €/Km}$ ,  $C_v = 0.045 \text{ €/unité}$ , vitesse moyenne = 40 Km/h et capacité large.

L'exécution de notre modèle après insertion du coût externe, donne les résultats indiqués dans le tableau 4.10 suivant :

	<i>Camion</i>	<i>Combiné camion train</i>	<i>Combiné camion barge</i>	<i>Combiné camion bateau</i>
$Q^*$	59	80	116	125
$C_{achat} (\text{€})$	27000	27000	27000	27000
$C_{commande} (\text{€})$	13694	10096	6997	6456
$C_{stock\_transit} (\text{€})$	113	136	474	263
$C_{stock\_fournisseur} (\text{€})$	44	60	87	94
$C_{stock\_DO} (\text{€})$	44	60	87	94
$C_{transport} (\text{€})$	930	2326	1895	2008
$C_{externe} (\text{€})$	13685	10114	6883	6331
$C_{total} (\text{€})$	55510	49793	43423	42246

**Tableau 4.10.** Résultats du modèle dans le cas de mono sourcing, intégrant le coût externe

D'après le scénario 1 étudié auparavant et dans lequel on n'a pas tenu compte du coût externe, la politique de transport à adopter est la livraison directe par train (ou camion) entre le DO et le fournisseur.

Dans le cas où le coût externe est pris en considération, le tableau 4.9 montre que l'utilisation du transport direct par camion n'est plus avantageuse car elle implique un coût total maximum et il est plus préférable d'utiliser le transport combiné et en particulier camion-bateau qui génère un coût total minimum. L'utilisation du transport combiné camion-barge est également économique sauf que les stocks en transit qu'il encourt sont plus importants.

## 4.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière explicite, la formulation mathématique de notre modèle et qui permet de sélectionner les fournisseurs en tenant compte du transport. Le modèle considère deux critères de sélection des fournisseurs : coût total et délai de livraison. Le coût représente l'objectif du modèle à minimiser et il est composé des coûts d'achat, de commande, de stock et de transport. Quant au critère délai, il est formulé comme une contrainte du modèle.

Pour montrer l'impact du transport sur la décision du choix des fournisseurs, nous avons analysé les deux politiques du transport les plus utilisées : le transport direct par camion et le transport combiné. Les différents scénarios étudiés montrent que le choix de l'une ou de l'autre politique influe sur le choix des fournisseurs et les quantités à commander aux fournisseurs choisis.

Notre analyse de sensibilité montre que les paramètres clés qui ont le plus d'influence sur le résultat du modèle sont : la demande du DO, le prix d'achat et la localisation des fournisseurs. La localisation des terminaux a plus d'impact sur le coût du stock en transit quant à la distance entre les terminaux, son effet sur le coût total et le coût du transport est faible.

Finalement, la prise en compte du coût externe montre que le transport combiné est plus avantageux que le transport direct par camion.

Contrairement au modèle présenté dans ce chapitre qui ne considère que le critère coût dans la fonction objectif du modèle, nous présentons dans le chapitre suivant un modèle multiobjectif qui tient compte simultanément des deux critères coût et délai dans la sélection des fournisseurs.

## Chapitre 5 : Modélisation multiobjectif

### 5.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons considéré deux objectifs (coût et délai) dans notre modèle pour étudier l'impact du transport sur la décision du choix des fournisseurs. Nous avons ainsi développé un modèle monoobjectif qui minimise le coût total du produit et qui tient compte du délai dans ses contraintes.

Or dans le contexte organisationnel, la prise de décision se fait rarement à partir d'un seul objectif ou critère. Elle implique généralement la prise en compte de plusieurs objectifs, souvent conflictuels. Pour optimiser simultanément ces objectifs, on utilise la programmation multiobjectif.

Le principe de l'optimisation multiobjectif est de optimiser au mieux les différents objectifs. Ces objectifs sont souvent contradictoires vu que la diminution d'un objectif entraîne l'augmentation de l'autre objectif. De plus, cette contradiction des objectifs implique une multitude de solutions et qui ne sont pas optimales au sens qu'elles ne minimisent pas tous les objectifs du problème. Par conséquent, les solutions obtenues sont des *solutions de compromis* qui minimisent un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances d'autres objectifs. Seulement un nombre restreint de ces solutions est intéressant et il correspond aux solutions pour lesquelles il existe une relation de *dominance* sur les autres solutions. Les solutions qui dominent les autres mais ne se dominent pas entre elles sont appelées les *solutions optimales au sens de Pareto* (ou *solutions non dominées*).

Ainsi, dans les problèmes multiobjectif, la notion d'optimalité est remplacée par *la non dominance* ou aussi *la non infériorité*. Plusieurs techniques existent dans la littérature pour la résolution de ces problèmes.

Afin de présenter les principaux concepts de l'optimisation multiobjectif ainsi que la formulation du modèle retenu dans notre étude, ce chapitre sera organisé comme suit : La section suivante expose les quelques notions dédiées aux problèmes multiobjectif ainsi que les différentes approches de résolution de ces problèmes. Dans la section 3, nous passerons en revue les études qui ont pris en compte l'aspect multiobjectif dans la décision du choix des fournisseurs. La section 4 explicite la méthode retenue pour la résolution du modèle multiobjectif proposé dans notre cas d'étude. Dans la section 5, nous comparons les résultats de notre approche avec ceux d'autres méthodes. Enfin, une conclusion récapitule les points essentiels traités dans ce chapitre.

### 5.2. Optimisation multiobjectif

#### 5.2.1. Description

Un programme multiobjectif (Multiobjective Optimization Problem - MOP) se présente sous la forme suivante :

$$(MOP) = \begin{cases} \text{Min } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) & n \geq 2 \\ S. C \\ C_i(x) & i = 1, m \end{cases}$$

Avec :

- $F(x)$  : Fonction multiobjectif à minimiser et qui est composée de  $n$  objectifs  $f_1, f_2, \dots, f_n$  ;
- $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$  : Vecteur des variables de décision ;
- $C_i(x)$  : Ensemble des  $m$  contraintes du modèle,  $i = 1, m$ .

Le but de l'optimisation d'un MOP est de trouver des solutions offrant un bon compromis entre les différentes fonctions objectifs à optimiser. Un décideur choisira alors parmi les solutions proposées la solution compromis qui lui convient le mieux.

La notion d'optimalité est généralisée par Pareto en 1996 et le terme le plus employé pour s'y référer est celui d'optimum Pareto. Donc, il convient de manipuler des populations de solutions dites *Pareto optimales* (ou *solutions efficaces*).

### 5.2.2. Définitions

Pour identifier les meilleures solutions de compromis, il est vital de définir une relation d'ordre entre ces solutions. Ces relations d'ordre sont appelées relations de dominance et la plus utilisée est la dominance au sens de Pareto, définie par Collette et Siarry (2002) de la manière suivante :

#### Définition 1 : La dominance au sens de Pareto

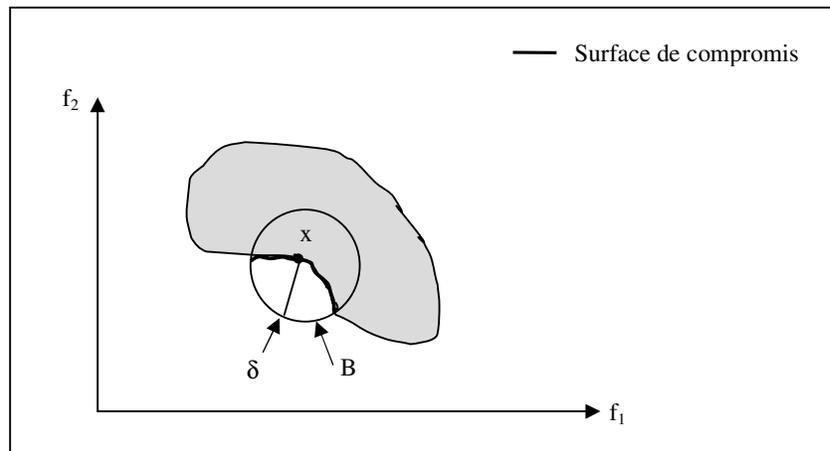
Le vecteur  $x$  domine le vecteur  $x'$  si :

- $x$  est au moins aussi bon que  $x'$  dans tous les objectifs et ;
- $x$  est strictement meilleur que  $x'$  dans au moins un objectif.

Les solutions qui dominent les autres mais ne se dominent pas entre elles sont appelées solutions optimales au sens de Pareto (ou solutions non dominées). On définit comme suit l'optimalité locale et l'optimalité globale au sens de Pareto.

#### Définition 2 : L'optimalité locale au sens de Pareto

Un vecteur  $x \in \mathbb{R}^n$  est optimal localement au sens de Pareto s'il existe un réel  $\delta > 0$  tel qu'il n'y ait pas de vecteur  $x'$  qui domine le vecteur  $x$  avec  $x' \in \mathbb{R}^n \cap B(x, \delta)$ , où  $B$  représente une boucle de centre  $x$  et de rayon  $\delta$  (fig.5.1).



**Figure 5.1.** *Optimalité locale au sens de Pareto*

La surface de compromis correspond à l'ensemble de solutions de compromis d'un MOP. On parle aussi de *front de Pareto*.

### Définition 3 : L'optimalité globale au sens de Pareto

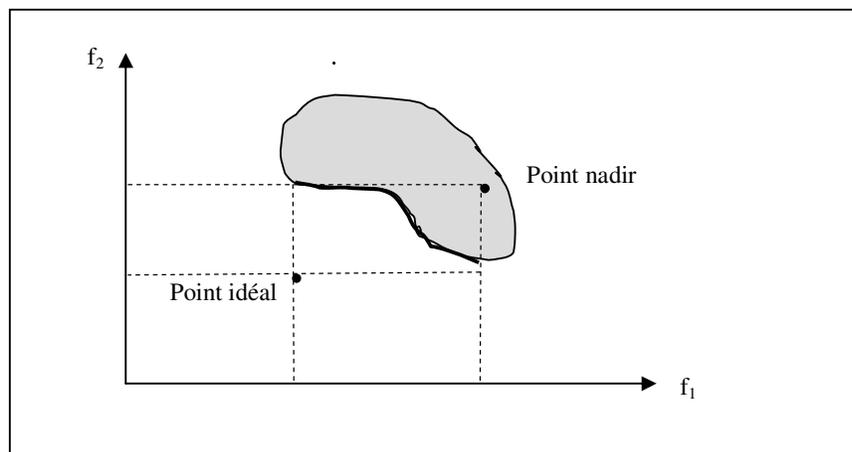
Un vecteur  $x$  est optimal globalement au sens de Pareto s'il n'existe pas de vecteur  $x'$  tel que  $x'$  domine le vecteur  $x$ . Dans ce cas,  $F(x)$  est appelée solution efficace.

Dans un MOP, deux points essentiels sont associés à la surface de compromis qui sont le point idéal et le point nadir définis comme suit :

### Définition 4 : Les points idéal et "nadir"

- Le point idéal est le point dont les coordonnées sont obtenues en optimisant chaque fonction objectif séparément. Il est utilisé dans beaucoup de méthodes d'optimisation comme point de référence ;
- Le point nadir est le point dont les coordonnées correspondent aux pires valeurs obtenues par chaque fonction objectif lorsque l'on restreint l'espace des solutions à la surface du compromis. Il sert à restreindre l'espace de recherche.

Ces deux points sont illustrés dans la figure 5.2 ci-dessous :



**Figure 5.2.** *Point idéal et point nadir*

### 5.2.3. Approches de résolution des MOP

De nombreuses approches de résolution existent dans la littérature pour résoudre les MOP. Ces approches correspondent à des situations et des problématiques différentes et peuvent être classées dans les trois grandes catégories suivantes (Basseur, 2004) :

- *Les approches scalaires*, qui transforment les MOP en un problème monoobjectif. L'avantage de ces approches est qu'elles permettent de réutiliser tous les algorithmes classiques dédiés aux problèmes d'optimisation à un seul objectif ;
- *Les approches non scalaires et non Pareto*, qui gardent l'approche multiobjectif, mais en traitant séparément chacun des objectifs ;
- *Les approches Pareto*, qui utilisent les notions de dominance Pareto.

#### 5.2.3.1. Approches scalaires

Nous classons dans cette catégorie les principales méthodes suivantes :

##### - *Méthode d'agrégation :*

C'est la méthode la plus évidente et la plus employée pour résoudre un MOP. Elle a pour but de revenir à un problème d'optimisation monoobjectif en considérant comme fonction objectif la somme pondérée des différentes fonctions objectifs du problème initial :

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \delta_i f_i(x), \delta_i \text{ étant le poids associé à l'objectif } f_i \text{ avec } \sum_{i=1}^n \delta_i = 1$$

On peut déterminer l'ensemble des solutions efficaces (surface de compromis) en faisant varier les coefficients de pondération  $\delta_i$  entre 0 et 1 et si le domaine réalisable est convexe.

##### - *Méthode de la distance à un objectif de référence*

Cette approche consiste à transformer le problème multiobjectif en un problème à un seul objectif où l'on cherche à minimiser l'écart relatif par rapport à un point de référence appelé but, qui est fixé par la méthode ou par le décideur. Il existe plusieurs manières de caractériser la distance entre un point de référence (le but) et un autre, notamment à l'aide de normes. Une norme est définie de la manière suivante :

$$L_r(f(x)) = \left[ \sum_{i=1}^n |B_i - f_i(x)|^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad 1 \leq r \leq \infty$$

B étant le vecteur de référence

Les principales normes utilisées sont les suivantes :

$$r = 1: L_1(f(x)) = \sum_{i=1}^n |B_i - f_i(x)|$$

Cette expression correspond à la distance classique ;

$$r = \infty: L_\infty(f(x)) = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} (B_i - f_i(x))$$

Cette dernière forme est utilisée dans l'approche min-max, appelée aussi approche de Tchebychev (Miettinen 1999).

On peut aussi utiliser la distance relative et qui a la forme suivante :

$$L_r(f(x)) = \left[ \sum_{i=1}^n \left| \frac{B_i - f_i(x)}{B_i} \right|^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad 1 \leq r \leq \infty$$

Enfin, on peut également associer des coefficients de pondération à ces différentes normes.

L'inconvénient majeur de cette méthode est de construire un bon point de référence.

**- Méthode du compromis ou de "ε-constraint"**

Le principe de cette technique est le suivant :

- On choisit un objectif  $f_k$  à optimiser prioritairement ;
- On choisit un vecteur de contraintes initial  $\epsilon_j$  ( $\epsilon_j \geq 0, j=1, \dots, n, j \neq k$ ) ;
- On transforme les autres objectifs en contraintes d'inégalité ( $f_j \leq \epsilon_j$ ).

Le problème associé s'écrit :

$$(MOP_{\epsilon}) = \begin{cases} \text{Min } f_k(x) \\ S.C \\ f_j(x) \leq \epsilon_j \quad j = 1, n \quad j \neq k \\ C_i(x) \quad i = 1, m \end{cases}$$

L'inconvénient de cette méthode est que l'algorithme correspondant peut être extrêmement difficile s'il y a trop de fonctions contraintes.

**- Méthode de "but à atteindre"**

Désignée en terminologie anglaise par *goal attainment method*, cette approche, comme celle de min-max, utilise un point de référence pour guider la recherche. Cependant, elle introduit aussi une direction de recherche, si bien que le processus de résolution devra suivre cette direction. A la différence de l'approche min-max, qui utilise des normes pour formaliser la distance au point de référence, l'approche du but à atteindre utilise des contraintes, à l'instar de l'approche ε-constraint, pour déterminer la position du point de référence (appelé aussi le but). L'écart par rapport à ce but est contrôlé grâce à la variable  $\lambda$  introduite à cet effet :

$$\begin{aligned} & \text{minimiser } \lambda \\ & S.C \begin{cases} f_1(x) - \omega_1 \cdot \lambda \leq B_1 \\ \vdots \\ f_n(x) - \omega_n \cdot \lambda \leq B_n \\ C_i(x) \quad i = 1, m \end{cases} \end{aligned}$$

Ainsi en minimisant  $\lambda$  et en vérifiant toutes les contraintes, la recherche va s'orienter vers le but B et s'arrêter sur le point faisant partie de la surface de compromis.

**- Méthode de "but programmé"**

Très connue sous sa terminologie anglaise de *goal programming*, cette méthode se rapproche de la méthode de but à atteindre. La principale différence est qu'après avoir transformé la forme du problème d'optimisation, on se retrouve avec des contraintes d'égalité au lieu des contraintes d'inégalité comme dans le cas précédent.

La fonction objectif de cette méthode consiste à minimiser les écarts (les déviations) entre les finalités (les buts) et les réalisations tout en traitant en priorité les écarts relatifs aux objectifs les plus importants. La recherche de l'optimum revient à minimiser ces écarts selon l'ordre de priorité de chacun. Ainsi, le problème associé s'écrit :

$$\text{minimiser } (d_1^+ \text{ ou } d_1^-, \dots, d_n^+ \text{ ou } d_n^-)$$

$$S.C \left\{ \begin{array}{l} f_1(x) = B_1 + d_1^+ - d_1^- \\ \vdots \\ f_n(x) = B_n + d_n^+ - d_n^- \\ C_i(x) \quad i = 1, m \end{array} \right.$$

$d_i^+$  et  $d_i^-$  sont les variables de déviation associés à chaque objectif  $f_i$  et qui doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$d_i^+ \text{ et } d_i^- \geq 0;$$

$$d_i^+ \cdot d_i^- = 0 \quad i = 1, n$$

Le choix de l'un ou de l'autre variable dépend du type de dépassement que l'on veut (au-dessus ou au-dessous de l'objectif que l'on s'est fixé).

Ainsi, par exemple, si on veut approcher tous les objectifs par valeurs supérieures, on obtient le problème suivant :

$$\text{minimiser } (d_1^+, \dots, d_n^+)$$

$$S.C \left\{ \begin{array}{l} f_1(x) = B_1 + d_1^+ \\ \vdots \\ f_n(x) = B_n + d_n^+ \\ C_i(x) \quad i = 1, m \end{array} \right.$$

On voit que cette méthode permet de réduire le problème d'optimisation multiobjectif à la minimisation d'un vecteur.

### 5.2.3.2. Approches non scalaires et non Pareto

Ces méthodes ne transforment pas le MOP en un problème monoobjectif et n'utilisent pas non plus la notion de dominance de Pareto.

Les principales méthodes classées dans cette catégorie sont les suivantes :

### - Méthode lexicographique

Cette méthode consiste à considérer un ordre de priorité (dit lexicographique) entre chacun des objectifs. La résolution pourra s'effectuer en résolvant le problème successivement sur chacun des objectifs pris par ordre de priorité décroissante. Les valeurs obtenues sur un objectif sont ensuite intégrées comme contraintes pour la résolution sur des objectifs moins prioritaires. Ainsi, le problème associé à chaque objectif s'écrit :

$$\begin{array}{l} \text{minimiser } f_k(x) \\ \text{S.C} \left\{ \begin{array}{l} f_j(x) = f_j^* \quad j = 1, n \text{ avec } j \neq k \\ C_i(x) \quad i = 1, m \end{array} \right. \end{array}$$

$f_j^*$  désigne la solution du problème monoobjectif qui minimise  $f_j$

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle requiert un choix de la séquence des objectifs à minimiser. Deux ordonnancements différents de fonctions objectifs n'aboutissent généralement pas à la même solution. L'étude de cas traité dans la section 5.4 de ce chapitre illustre ce problème.

### - Méthode de sélection parallèle

C'est la première méthode ayant proposé un algorithme génétique pour résoudre un MOP. Cet algorithme, appelé VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) sélectionne les individus selon chaque objectif de manière indépendante (sélection parallèle).

### - Méthode avec genres

Proposée par Allenson (1992) pour traiter un problème bi-objectif, cette méthode utilise la notion de genre (masculin ou féminin) et d'attracteur. En affectant un objectif à chaque genre, on espère minimiser les deux objectifs simultanément car un genre sera toujours jugé d'après l'objectif qui lui a été associé. Dans cette méthode, l'algorithme génétique est utilisé, mais lors de la sélection, le principe d'attracteur est introduit pour éviter que les individus trop éloignés du point de vue de leur fitness puissent être croisés et que les individus de mauvais fitness puissent se reproduire. Ainsi, et puisque les deux genres sont mâle et femelle, la reproduction n'est alors permise que uniquement entre un individu mâle et un individu femelle. Le genre étant affecté aléatoirement à la création de l'individu.

L'inconvénient majeur de ces trois méthodes non scalaires et non Pareto est qu'elles tendent à générer des solutions qui sont largement optimisées pour certains objectifs et très peu pour les autres objectifs. Les solutions compromises sont négligées.

### 5.2.3.3. Approches Pareto

Ces approches utilisent directement la notion de dominance de Pareto, concept introduit en premier lieu dans les algorithmes génétiques.

D'une manière générale, les approches Pareto permettent de ne pas favoriser un objectif plutôt qu'un autre, mais les traitent de manière équitable, et sans négliger aucune solution potentiellement intéressante pour le décideur (solution faisant partie de l'ensemble Pareto optimal).

Pour plus de détail sur certaines méthodes que nous venons de citer et sur d'autres méthodes, le lecteur pourra consulter le livre de Collette et Siarry (2002) qui traite de l'optimisation multiobjectif.

### 5.3. Modélisation multiobjectif et problème du choix des fournisseurs

#### 5.3.1. MOP et choix des fournisseurs : état de l'art

Le tableau 5.1 ci-dessous indique les méthodes de résolution utilisées dans quelques travaux de recherche à notre connaissance qui ont pris en compte l'aspect multiobjectif dans le problème du choix des fournisseurs :

<i>Auteurs</i>	<i>Méthode de résolution</i>
Dahel (2003)	Méthode d'agrégation
Talluri & Narasimhan (2003)	Approche "Min-Max"
Ghodsypour & O'brien (2001)	Méthode d'agrégation
Weber et al. (2000)	Méthode d'agrégation
Weber et al. (1993)	Méthode d'agrégation

**Tableau 5.1.** MOP et problème du choix des fournisseurs

Dans ces différents travaux, c'est la méthode d'agrégation qui est la plus utilisée et qui considère souvent les objectifs de prix, délai et qualité. Les critères de délai et de la qualité sont exprimés en pourcentage par rapport aux valeurs souhaitées par le DO. Ghodsypour et O'brien (2001) ont utilisé ces deux critères mais sans présenter une validation de leur modèle. Quant au critère coût, il est évalué en comparaison avec le budget nécessaire au DO pour utiliser les fournisseurs ou par rapport au montant d'affaire attribué aux fournisseurs.

#### 5.3.2. Approche multiobjectif proposée

##### 5.3.2.1. Objectifs retenus

Dans le chapitre précédent, nous avons considéré deux critères pour évaluer les fournisseurs : le coût total du produit et le délai de livraison. Nous avons choisi ces deux critères car d'une part, ils sont les plus utilisés dans la littérature sur la sélection des fournisseurs et d'autre part, parce que le transport a une grande influence sur ces deux critères. Nous avons ainsi présenté un modèle mathématique dont l'objectif est la minimisation du coût total du produit, quant au délai de livraison, il est formulé comme une des contraintes du modèle.

Dans cette section, on propose de présenter un MOP qui minimise simultanément ces deux critères.

##### 5.3.2.2. Fonction multiobjectif

Les deux critères coût et délai sont d'ordre de grandeurs et de dimensions différentes, par conséquent, on propose d'utiliser la méthode de la distance relative à un objectif de référence. Cette approche permet alors de ramener les objectifs à la même échelle.

La fonction objectif finale à minimiser aura la forme suivante :

$$\text{Min } Z = \left( \left| \frac{f(X) - f^*}{f^*} \right|, \left| \frac{g(X) - g^*}{g^*} \right| \right)$$

$f(X)$  : Le critère coût total du produit ;

$g(X)$  : Le critère délai de livraison ;

$f^*$  et  $g^*$  désignent respectivement les buts à atteindre par chacun des deux objectifs ;

$X$  est la variable de décision.

Dans notre cas, nous retenons pour valeurs de  $f^*$  et  $g^*$ , les optimums trouvés en résolvant successivement les modèles monoobjectif qui minimisent le coût total dans un premier temps et le délai de livraison dans un deuxième temps. Pour ces deux modèles, les expressions du coût total, du délai de livraison et des contraintes sont celles explicitées dans le chapitre précédent.

La fonction objectif est composée de deux objectifs à minimiser simultanément. Pour résoudre notre MOP, nous proposons dans un premier temps d'utiliser la méthode d'agrégation. Dans un deuxième temps, nous comparons le résultat trouvé avec celui obtenu dans le cas de l'utilisation de la méthode de  $\epsilon$ -constraint ou de la méthode lexicographique.

### 5.3.2.3. Expression du MOP

Soient  $\delta$  et  $(1-\delta)$  les poids associés aux deux objectifs du MOP.

Notre MOP aura l'expression finale suivante :

$$\text{Min } Z = \delta \left| \frac{f(X) - f^*}{f^*} \right| + (1 - \delta) \left| \frac{g(X) - g^*}{g^*} \right|$$

S. C

$$\left\{ \begin{array}{ll} X_i D \leq C_i & i = 1, N \\ X_i D \leq S_i & i = 1, N \\ \sum_{i=1}^N X_i \frac{l_i}{L} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^N X_i = 1 \\ \epsilon Y_i \leq X_i \leq Y_i & i = 1, N \\ W_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} = 1 & i = 1, N \\ \sum_{k=1}^K Z_{jk} = 1 & j = 1, J \\ Y_i, W_{i0}, W_{ij}, Z_{jk} = 0, 1 & i = 1, N \quad j = 1, J \quad k = 1, K \end{array} \right.$$

$f(X)$  et  $g(X)$  ont respectivement les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
f(X) = & \sqrt{2D \left( \sum_{i=1}^N P_i X_i^2 (r + r_i) \right) \left( \sum_{i=1}^N \left( A_i + W_{i0} C_{f_{i0}}^m D_{i0} + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{f_{ij}}^m D_{ij} \right) Y_i + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} (C_{f_{jk}}^{m'} D_{jk} + C_{f_{k0}}^m D_{k0}) \right)} \\
& + \sum_{i=1}^N DX_i \left[ P_i + W_{i0} P_i (rt_{i0}^m D_{i0} / v_{i0}^m) + W_{i0} C_{v_{i0}}^m \right] \\
& + \sum_{i=1}^N DX_i \left[ \sum_{j=1}^J W_{ij} P_i \left( rt_{ij}^m D_{ij} / v_{ij}^m + rt_j \tau_j + \sum_{k=1}^K Z_{jk} (rt_{jk}^{m'} D_{jk} / v_{jk}^{m'} + rt'_k \tau'_k + rt_{k0}^m D_{k0} / v_{k0}^m) \right) + \sum_{j=1}^J W_{ij} C_{v_{ij}}^m \right] \\
& + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Z_{jk} D \left[ (C_{v_{jk}}^{m'} + C_{v_{k0}}^m) \left( \sum_{i=1}^N X_i W_{ij} \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\text{et } g(X) = \sum_{i=1}^N l_i X_i$$

### 5.3.2.4. Validation du MOP

Comme pour le premier modèle monoobjectif proposé dans le chapitre précédent, notre modèle multiobjectif a été implémenté sous le logiciel Matlab. Plusieurs de nos publications illustrent et sous diverses formes les résultats obtenus de MOP (Aguzzoul et al. 2005b, Aguezzoul et Ladet 2004b, Aguezzoul et Ladet 2004d, Aguezzoul et Ladet 2004e). Dans cette section, nous exposons les résultats de notre travail publié dans la conférence sur la modélisation multiobjectif (Aguzzoul et Ladet 2004e). Dans cette étude, nous avons considéré le cas de trois fournisseurs qui ont le choix d'utiliser les modes de transport de type LTL (chargement partiel) ou TL (chargement complet).

Les modes TL et LTL sont respectivement caractérisés par un taux de stock en transit de 12 % et 10 %, un coût variable de transport de 0 € et 0.05 € et un coût fixe de transport de 1.32 € et 0.15 €. La demande du DO est de 1000 par semaine,  $r=20\%$ , le délai imposé du DO est de 2 jours, les coûts de commande, d'achat et le taux de stock chez chacun des fournisseurs sont respectivement de 5 €, 10 € et 20 %. Le taux de stock dans le terminal est de 13 % et  $\epsilon$  est fixé à 0.01.

Table 5.2 ci-dessous contient d'autres informations sur les fournisseurs selon qu'ils utilisent la livraison directe ou via le terminal :

	<i>Fournisseur 1</i>	<i>Fournisseur 2</i>	<i>Fournisseur 3</i>
<i>Capacité</i>	800	700	600
<i>Distance au DO (Km)</i>	100	150	200
<i>Distance au terminal (Km)</i>	50	70	100
<i>Délai offert (jours)</i>	1.25	1.5	1.75
<i>Temps moyen de transit vers le DO (semaine)</i>	0.06	0.09	0.11
<i>Temps moyen de transit vers le terminal (semaine)</i>	0.03	0.04	0.06
<i>Temps moyen de transit du terminal au DO (semaine)</i>	0.14		
<i>Distance du terminal au DO (Km)</i>	100		

**Table 5.2.** *Autres données du MOP*

Dans cette étude de cas, nous considérons les scénarios suivants :

- Scénario 1 : Tous les fournisseurs sont utilisés ;
- Scénario 2 : Les fournisseurs 1 et 2 sont utilisés ;
- Scénario 3 : Les fournisseurs 1 et 3 sont utilisés ;
- Scénario 4 : Les fournisseurs 2 et 3 sont utilisés.

Le tableau 5.3 suivant explicite des 8 options correspondantes à l'utilisation ou non du transport intermodal ainsi que les valeurs de  $f^*$  et  $g^*$  pour chacun des scénarios :

	<i>Option 1</i>	<i>Option 2</i>	<i>Option 3</i>	<i>Option 4</i>	<i>Option 5</i>	<i>Option 6</i>	<i>Option 7</i>	<i>Option 8</i>
<i>W11</i>	0	1	0	0	1	1	0	1
<i>W21</i>	0	0	1	0	1	0	1	1
<i>W31</i>	0	0	0	1	0	1	1	1
<i>Scénario 1</i>	$f^* = 1349, g^* = 1.30$							
<i>Scénario 2</i>	$f^* = 1256, g^* = 1.30$							
<i>Scénario 3</i>	$f^* = 1371, g^* = 1.35$							
<i>Scénario 4</i>	$f^* = 1431, g^* = 1.58$							

**Table 5.3.** *Valeurs des buts pour les différentes options et scénarios du modèle*

Finalement, le tableau 5.4 ci-dessous regroupe les résultats du notre modèle MOP :

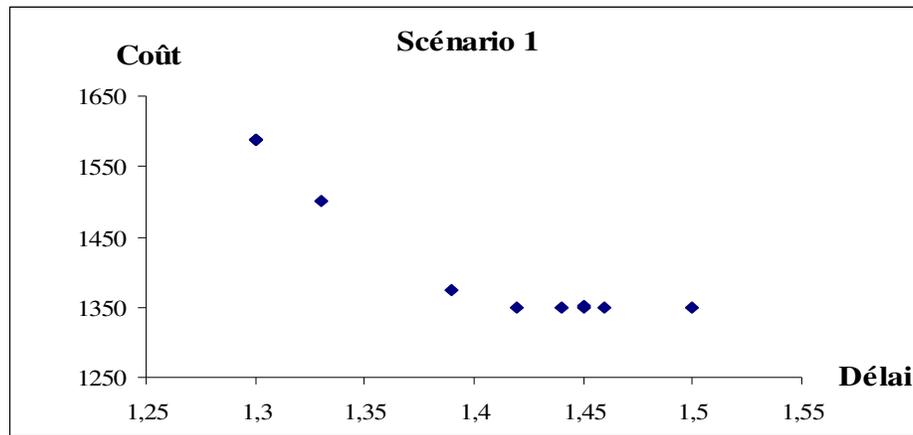
$\delta$	X1	X2	X3	Q	C <sub>transport</sub> (€)	C <sub>stock_transit</sub> (€)	C <sub>stock_DO</sub> (€)	C <sub>total</sub> (€)	Délai (jours)	Z*	Option
<b>Scénario 1</b>											
1	0.327	0.335	0.338	693	491	374	231	1349	1.50	0	8
0.9	0.425	0.321	0.255	841	580	166	293	1349	1.46	0.012	4
0.8	0.426	0.352	0.222	833	584	156	295	1349	1.45	0.023	4
0.7	0.425	0.355	0.220	833	584	156	296	1349	1.45	0.034	4
0.6	0.426	0.363	0.210	829	586	153	297	1351	1.45	0.046	4
0.5	0.495	0.344	0.161	705	553	226	274	1349	1.42	0.045	7
0.4	0.567	0.293	0.140	673	574	204	287	1375	1.39	0.051	7
0.3	0.695	0.287	0.018	585	651	163	331	1501	1.33	0.050	7
0.2	0.800	0.190	0.010	535	705	132	362	1588	1.30	0.037	7
0.1	0.800	0.190	0.010	535	705	132	362	1588	1.30	0.019	7
0	0.800	0.190	0.010	535	705	132	362	1588	1.30	0	7
<b>Scénario 2</b>											
1	0.508	0.492	0	583	566	90	292	1256	1.37	0	1
0.9	0.513	0.487	0	583	566	90	292	1256	1.37	0.006	1
0.8	0.521	0.479	0	583	566	89	292	1256	1.37	0.011	1
0.7	0.530	0.470	0	582	567	89	292	1257	1.37	0.016	1
0.6	0.542	0.458	0	581	568	88	293	1259	1.36	0.021	1
0.5	0.560	0.440	0	579	570	88	294	1262	1.36	0.026	1
0.4	0.708	0.292	0	461	534	159	271	1256	1.32	0.011	3
0.3	0.756	0.244	0	445	551	145	281	1280	1.31	0.012	3
0.2	0.800	0.200	0	428	569	132	291	1307	1.30	0.008	3
0.1	0.800	0.200	0	428	569	132	291	1307	1.30	0.004	3
0	0.800	0.200	0	428	569	132	291	1307	1.30	0	3
<b>Scénario 3</b>											
1	0.510	0	0.490	472	501	376	236	1371	1.50	0	6
0.9	0.524	0	0.476	472	502	375	237	1371	1.49	0.010	6
0.8	0.543	0	0.457	471	503	374	273	1373	1.48	0.020	6
0.7	0.568	0	0.432	468	505	374	238	1377	1.47	0.029	6
0.6	0.601	0	0.399	463	510	372	241	1387	1.45	0.036	6
0.5	0.756	0	0.244	479	595	151	302	1371	1.37	0.008	4
0.4	0.800	0	0.200	461	616	136	314	1401	1.35	0.009	4
0.3	0.800	0	0.200	461	616	136	314	1401	1.35	0.007	4
0.2	0.800	0	0.200	461	616	136	314	1401	1.35	0.004	4
0.1	0.800	0	0.200	461	616	136	314	1401	1.35	0.002	4
0	0.800	0	0.200	461	616	136	314	1401	1.35	0	4

Scénario 4											
1	0	0.506	0.494	500	530	382	250	1431	1.62	0	7
0.9	0	0.512	0.488	500	530	382	250	1431	1.62	0.003	7
0.8	0	0.520	0.480	499	530	382	250	1432	1.62	0.005	7
0.7	0	0.530	0.470	499	531	381	250	1432	1.62	0.008	7
0.6	0	0.544	0.456	498	532	381	251	1434	1.61	0.010	7
0.5	0	0.563	0.437	496	533	380	252	1438	1.61	0.012	7
0.4	0	0.593	0.407	491	538	380	254	1446	1.60	0.013	7
0.3	0	0.680	0.320	561	632	200	317	1483	1.58	0.011	4
0.2	0	0.680	0.320	561	632	200	317	1483	1.58	0.007	4
0.1	0	0.680	0.320	561	632	200	317	1483	1.58	0.004	4
0	0	0.700	0.300	553	639	194	321	1483	1.58	0	4

**Tableau 5.4.** Résultats du MOP

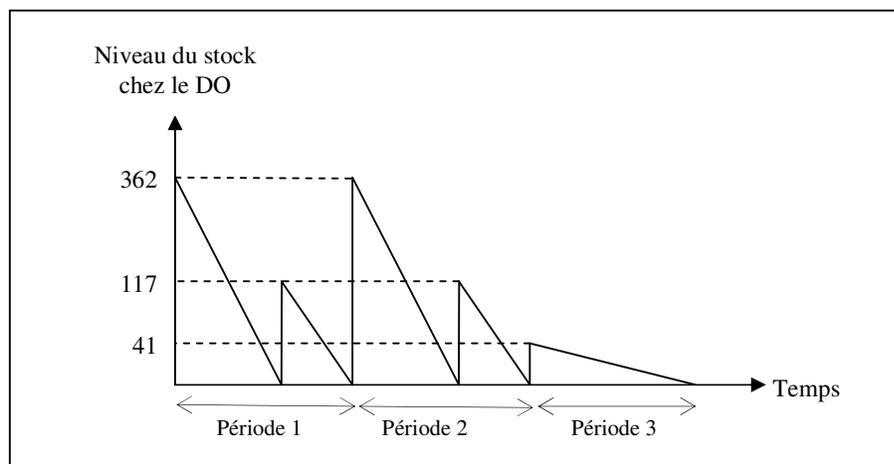
De ce tableau, nous pouvons déduire les remarques suivantes :

- Pour chaque option, ces résultats montrent qu'en variant les poids des objectifs, les fournisseurs à choisir ainsi que les quantités à leur commander varient. En effet,
  - Pour l'option 1, le DO choisira les fournisseurs 1 et 2 si  $\delta$  varie de 0.5 à 1 ;
  - Pour l'option 2, aucune sélection des fournisseurs n'est considérée ;
  - Pour l'option 3, le DO choisira les fournisseurs 1 et 2 si  $\delta$  varie de 0 à 0.4 ;
  - Pour l'option 4, le choix portera sur tous les fournisseurs si  $\delta$  varie de 0.6 à 0.9, les fournisseurs 1 et 3 si  $\delta$  varie de 0 à 0.5 et les fournisseurs 2 et 3 si  $\delta$  varie de 0 à 0.3 ;
  - Pour l'option 5, aucune sélection des fournisseurs n'est considérée ;
  - Pour l'option 6, les fournisseurs 1 et 3 seront choisis si  $\delta$  varie de 0.6 à 1 ;
  - Pour l'option 7, le DO sélectionnera tous les fournisseurs si  $\delta$  varie de 0 à 0.5 et les fournisseurs 2 et 3 si  $\delta$  varie de 0.4 à 1 ;
  - Enfin, pour l'option 8, la sélection portera sur tous les fournisseurs si  $\delta=1$ .
- Pour chaque scénario et pour chaque option correspondante, la croissance de l'objectif coût total implique la décroissance de l'objectif délai et vice-versa. La figure 5.3 ci-dessous montre l'ensemble des solutions du problème dans le cas de scénario 1 :



**Figure 5.3.** Solutions du MOP dans le cas du scénario 1

- En considérant tous les scénarios, le coût du transport est minimum pour l’option 8 du scénario 1. Dans ce cas, tous les fournisseurs utiliseront les livraisons via le terminal. De même, le coût de stock chez le DO est minimum. Cependant, le coût de stockage en transit est maximum à cause de la rupture de charge dans le terminal ;
- Pour une valeur donnée de  $\delta$ , exemple  $\delta=0.5$ , le minimum des valeurs de  $Z$  (sauf pour  $\delta=1$  ou  $\delta=0$ ) correspond à l’option 4 du scénario 3 (0.008). Le DO choisira alors les fournisseurs 1 et 3. Dans ce cas, la livraison est directe entre le DO et le fournisseur 1 tandis qu’elle est indirecte entre le DO et le fournisseur 3. Le coût du transport est important (595) et les proportions de la commande à attribuer à chacun de ces fournisseurs sont respectivement de 0.756 et 0.244. La quantité optimale est de 479 et les quantités à commander aux fournisseurs durant les deux premières périodes sont respectivement de 362 et 117. A la 3<sup>ème</sup> période, le DO doit commander la quantité restante, soit 42 du fournisseur 1 pour satisfaire sa demande. La figure 5.4 ci-dessous illustre le niveau de stock chez le DO.



**Figure 5.4.** Niveau du stock du DO pour  $\delta=0.5$

## 5. 4. Comparaison avec d'autres méthodes

Dans cette section, nous proposons de comparer les résultats trouvés par notre modèle MOP avec deux méthodes : la méthode lexicographique, qui est une approche non scalaire, et la méthode de  $\epsilon$ -constraint.

Pour la méthode lexicographique, nous l'avons utilisé deux fois :

- La 1<sup>ère</sup> considère le délai comme objectif prioritaire par rapport au coût total : dans ce cas, les étapes de résolution sont :
  - L'objectif du modèle à minimiser en premier est le coût total ;
  - On note  $f^*$  la solution à ce problème ;
  - On transforme la 1<sup>ère</sup> fonction objectif en contrainte d'égalité dans le nouveau modèle qui minimise le délai ;
  - La dernière valeur de  $X$  est celle qui minimise les deux objectifs.
- La 2<sup>ème</sup> considère le coût total comme objectif prioritaire par rapport au délai. Les mêmes étapes que précédemment sont utilisées en remplaçant le coût par le délai.

En considérant le cas du scénario 1 par exemple, les résultats trouvés pour ces différentes approches sont donnés dans le tableau 5.5 ci-dessous :

	Lexicographique 1	Lexicographique 2	$\epsilon$ -constraint
$X1$	0.48	0.33	0.34
$X2$	0.36	0.33	0.33
$X3$	0.16	0.33	0.33
$Q$	708	693	693
$C_{transport} (\text{€})$	551	491	491
$C_{stock\_transit} (\text{€})$	230	374	374
$C_{stock\_DO} (\text{€})$	273	231	231
$C_{total} (\text{€})$	1349	1349	1349
<i>Délai (jours)</i>	1.42	1.50	1.50
<i>Option</i>	7	8	8

**Table 5.5.** Comparaison avec d'autres approches

Selon la priorité donnée au coût ou au délai, on obtient le même résultat que l'approche lexicographique en terme de politique du transport. En effet, si le délai est prioritaire par rapport au coût (cas 1), c'est l'option 7 qui est choisie, ce qui correspond au cas de notre approche en considérant les valeurs de  $\delta$  variant de 0 à 0.5. Inversement, si le coût est prioritaire par rapport au délai (cas 2), c'est l'option 8 qui est choisie et qui correspond aussi au cas de notre approche en considérant la valeur de  $\delta=1$ . Ce même résultat est obtenu avec l'approche de  $\epsilon$ -constraint.

L'avantage de notre approche est qu'elle offre plusieurs choix au décideur en terme de l'option de transport à utiliser et le nombre de fournisseurs à sélectionner. Ce choix dépend des valeurs des poids associés aux objectifs du modèle.

## 5. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et démontré l'utilisation de l'approche multiobjectif pour étudier l'impact du transport sur la sélection des fournisseurs.

Nous avons choisi la combinaison de deux méthodes : la méthode de la distance à un objectif de référence et en particulier, de la distance relative vu que les critères coût et délai retenus dans notre modélisation sont différents en termes de grandeur et d'unité, et la méthode d'agrégation. Les références que nous avons utilisées dans notre modèle sont déduites de la résolution de deux modèles monoobjectif : le premier minimise le coût total et le deuxième le délai de livraison. Ces deux modèles tiennent compte des mêmes contraintes. Notons que ces références aux objectifs peuvent être choisis par le décideur.

Une comparaison de notre approche avec deux approches : l'approche de  $\epsilon$ -constraint et l'approche lexicographique nous a permis d'obtenir les mêmes résultats en terme de politiques de transport et pour certaines valeurs des poids associés aux objectifs du modèle.

Cependant, notre approche a l'avantage de proposer d'autres solutions en fonction de ces poids ; ce qui permet au DO de choisir les fournisseurs à employer ainsi que la politique du transport à adopter. Ce facteur peut également être fixé par le décideur.

## Conclusion générale et perspectives

Face à un marché fortement compétitif, caractérisé par une demande de produits personnalisés, de bonne qualité, livrés dans des délais minimaux et à moindre coût, les entreprises d'aujourd'hui s'orientent de plus en plus vers l'externalisation (outsourcing) des activités jugées non stratégiques pour se recentrer sur leur métier principal et leurs compétences-clefs. Cette externalisation implique le recours aux fournisseurs de matières premières et des produits semi-finis. Dans cette optique, la décision de la sélection des fournisseurs potentiels et fiables devient stratégique, car d'une part les coûts d'achat sont très importants (40 % à 80 %) et d'autre part, car cette décision a une influence directe sur la performance globale de l'entreprise.

De plus, cette même compétition ainsi que la mondialisation des marchés ont conduit à porter une attention particulière à la distribution physique des marchandises qui engendre d'importants coûts de transport et de stockage.

Dans ce projet de thèse, on s'est particulièrement intéressé à l'étude de l'impact des politiques du transport sur le problème du choix des fournisseurs. Plusieurs questions d'ordre stratégique se posent : Quel nombre de fournisseurs considérer ? Quels critères de sélection établir ? Quelles méthodes d'évaluation utiliser ? Combien de fournisseurs choisir ? Quelles quantités commander aux fournisseurs choisis ? Quelle organisation de transport adopter ? Quels modes de transport utiliser ? Et à quelle fréquence de livraison ? Quelle gestion des stocks dans le réseau du transport reliant les fournisseurs, les terminaux et le DO ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, nous avons commencé notre recherche par une revue de la littérature sur le problème du choix et de l'évaluation des fournisseurs, ce qui a fait l'objet du 1<sup>er</sup> chapitre. Cette étude nous a permis de déduire que ce problème est très complexe car il requiert plusieurs critères de sélection tels que le prix, le délai de livraison, la qualité, etc. De plus, plusieurs méthodes d'évaluation des fournisseurs sont utilisées et qu'on a classé en six catégories : les modèles linéaires de pondération, la programmation mathématique, les modèles statistiques/probabilistes, les modèles basés sur le coût, la catégorisation et l'intelligence artificielle.

Cette analyse bibliographique nous a permis de conclure que rares sont les études qui ont pris en compte, de manière explicite, l'influence du transport sur la décision du choix des fournisseurs. Ce qui représente une limitation importante car le transport a un impact direct sur le coût total du produit, sur les délais de livraisons et sur le système de stockage dans tout le réseau logistique, c'est-à-dire les stocks chez les fournisseurs, les stocks en transit et les stocks chez le DO.

Par conséquent, pour étudier l'impact du transport sur la sélection des fournisseurs, nous avons dans un premier temps montré l'importance du transport à travers ses différentes caractéristiques en termes de planification de ses niveaux de décision stratégique, tactique et opérationnelle, de ses types de gestion (transport pour compte propre ou transport pour compte d'autrui), de son mode (routier, ferroviaire, aérien, maritime, fluvial et intermodal), de son impact sur l'environnement et enfin de la modélisation de son coût, ce qui a fait l'objet du 2<sup>ème</sup> chapitre. Dans un deuxième temps, nous avons étudié le rôle du transport dans les relations DO/Fournisseurs à travers les différents types de réseaux logistiques, l'intégration de

ces réseaux dans la chaîne logistique globale et enfin, l'impact du transport sur les facteurs intervenant dans la gestion de cette chaîne, facteurs qui influent également la décision du choix des fournisseurs tels que le temps de cycle des produits, la localisation des fournisseurs, la gestion des stocks et les coûts, ce qui a fait l'objet du 3<sup>ème</sup> chapitre. Nous avons également présenté dans ce même chapitre une revue de littérature sur les principaux travaux de recherche qui ont pris en compte le transport dans la décision de l'approvisionnement auprès de plusieurs fournisseurs. Ces travaux se sont limités au cas de deux fournisseurs et la plupart d'entre eux n'ont pas tenu compte des stocks dans tout le réseau du transport reliant les fournisseurs et le DO.

Afin de prendre en compte les différents éléments liés au transport et qui ne sont pas étudiés dans la littérature sur le problème du choix des fournisseurs, nous avons présenté, au 4<sup>ème</sup> chapitre, une première modélisation de notre problématique qui prend en compte les deux politiques de transport les plus utilisées, à savoir : le transport direct par camion et le transport combiné. Le modèle ainsi établi et sous certaines hypothèses, a la forme d'un programme mathématique non linéaire à variables mixtes et qui minimise le coût total du produit composé des coûts d'achat, de commande, de transport et des stocks. Des contraintes liées aux fournisseurs, au DO et au transport sont également prises en compte dans ce modèle. Pour le résoudre, nous avons d'abord passé en revue les différentes études faites sur le transport intermodal, ce qui nous a permis par la suite de déduire l'algorithme de résolution de notre modèle. Les différents scénarios étudiés montrent que le choix de l'une ou de l'autre politique de transport influe le choix des fournisseurs et les quantités à commander aux fournisseurs choisis. De plus, l'analyse de sensibilité permet de dégager les paramètres clés qui influent sur le résultat du modèle et qui sont : la demande du DO, le prix d'achat, la localisation des fournisseurs et la localisation des terminaux. Finalement, l'intégration du coût externe dans le modèle montre que le transport combiné est plus avantageux que le transport direct par camion.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons présenté un modèle multiobjectif qui tient compte simultanément des deux critères coût et délai dans la sélection des fournisseurs. Pour résoudre ce modèle, on a utilisé la combinaison de la méthode d'agrégation et de la méthode de la distance relative à un objectif de référence. Cette dernière est utilisée car les objectifs retenus sont différents en termes de l'ordre de grandeur et d'unité. La résolution de notre modèle multiobjectif permet de trouver une multitude de solutions, chacune correspond aux différentes valeurs des poids associés aux objectifs ; ce qui permet au DO de choisir les fournisseurs à employer, les quantités à leur commander et la politique du transport à adopter. Une comparaison de l'approche proposée avec deux autres approches de résolution des problèmes multiobjectif et qui sont : l'approche lexicographique et l'approche de  $\epsilon$ -constraint est présentée à la fin de ce chapitre.

Et comme tout travail de recherche est en perpétuelle mise en cause des résultats et des approches utilisées, nous proposons comme perspectives de ce travail les points suivants :

- Prise en considération de l'achat de plusieurs produits dans le modèle ;
- Etude de l'utilisation de tournées de véhicules : Dans le cas de l'achat des produits différents auprès des fournisseurs par exemple, il sera plus rentable de les collecter par un seul véhicule, ce qui permet de minimiser les kilomètres parcourus et maximiser le remplissage du véhicule ;
- Etude du cas du transport intermodal où plus de deux modes interviennent : Dans le modèle proposé dans ce travail de thèse, on s'est restreint au cas du transport combiné.

- Or dans des cas réels, les entreprises peuvent s'affronter à l'utilisation de plus de deux modes de transport différents comme le cas de l'approvisionnement international.
- Prise en compte de l'aspect incertain de certains paramètres du modèle, notamment :
    - La demande du DO : Dans le cas général, la demande est influencée par le marché externe et son caractère saisonnier ;
    - Les délais de livraisons : Ils sont très liés aux temps de transit des véhicules et donc au mode du transport utilisé et à la route empruntée. Le temps de transit est plus difficile à prévoir dans le cas du transport intermodal car il est influencé par plusieurs paramètres tels que les différents modes du transport utilisés, le temps d'attente dans les terminaux, etc. ;
    - Le calcul du coût externe : Les impacts des transports sur l'environnement ont un coût difficile à évaluer en raison de l'absence de valeur marchande accordée aux biens environnementaux ;
  - Enfin, il sera aussi intéressant d'explorer les autres approches de résolution des problèmes multiobjectif et les comparer avec l'approche que nous avons proposée.

## Bibliographie

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2005a). Supplier selection under purchasing and transportation conditions. 16<sup>th</sup> IFAC World Congress, 4 - 8 Juillet 2005, Prague - Tchéquie.

Aguezzoul, A., Benchakroune, B., & Ladet, P. (2005b). Effets of direct and intermodal transport on supplier selection: a multiobjective approach. IESM'05 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, 16-19 Mai 2005, Marrakech - Maroc.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2004a). Multiple sourcing and transportation: an optimization approach. 2<sup>nd</sup> International Industrial Engineering Conference (IIEC), 19-21 Décembre 2004, Riyadh - Arabie Saoudite.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2004b). A multiobjective approach for Supplier selection, integrating shipment types. IEEE Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), 22-24 Novembre 2004, Douz - Tunisie.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2004c). A cost minimizing model for supplier selection, integrating transportation policies. 5<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM), 1- 3 Septembre 2004, Nantes – France.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2004d). A multiobjective approach to vendor selection taking into account transportation. 2<sup>nd</sup> World on Production and Operations Management Society (POMS) Conference, 30 Avril au 3 Mai 2004, Cancun - Mexique.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2004e). A nonlinear multi-objective approach for the supplier selection taking into account transportation. International conference on MultiObjective Programming and Goal Programming "New Trends and Applications" (MOPGP'04), 14-16 Avril 2004, Hammamet - Tunisie.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2004f). Multiple sourcing: which transport for which supplier ? . 33<sup>rd</sup> International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE), 25- 27 Mars 2004, Jeju Island - Corée.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2003a). Supplier selection: impact of transportation. 5<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, 26-29 octobre 2003, Québec - Canada.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2003b). Transportation' role in the suppliers selection decision. IEEE International Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA), 9-11 Juillet 2003, Lille – France.

Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2003c). Prise en compte du transport dans le choix des fournisseurs. 5<sup>ème</sup> congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF), 26-28 février 2003, Avignon – France.

Akbari Jokar, M. R. (2001). Sur la conception d'une chaîne logistique : une approche globale d'aide à la décision. Thèse de doctorat en génie industriel, GILCO- INPG.

- Allenson, R. (1992). Genetic algorithms with gender for multifunction optimisation. Technical Report EPCC-SS92601, Edimburg Parallel Computing Center, Edimburg, Scotland.
- Anupindi, R., & R. Akella (1993). Diversification under supply uncertainty. *Management Science*, 39 (8), 944-963.
- Arcelus, F. J., & J. E. Rowcroft (1991). Small order transportation costs in inventory control. *Logistics and Transportation Review*, 27 (1), 3-13.
- Arfaoui, F., Bahbot, G., & N'gazo, B (2004). Les risques de la stratégie d'externalisation. *Les Echos*.
- Arnold, P., Peeters, D., & I. Thomas (2004). Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation research Part E*, 40, 255-270.
- Aurifeille, J. M., Colin, J., Fabbe-Costes, N., Jaffeux, C., & G. Paché (1997). *Management logistique : une approche transversale*, Editions Litec.
- Barthélemy, J. (2000). Le métier au coeur de l'externalisation. *L'expansion Management review*, 91-98.
- Basseur, M. (2004). Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multiobjectif : Application aux problèmes d'ordonnancement de type flow-shop. Thèse de doctorat en Informatique, Université des sciences et technologies de Lille.
- Bontekoning, Y. M., Machris, C., & J. J. Trip (2004). Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature. *Transportation Research A*, 38, 1-34.
- Bozarth, C., Handfield, R., & A. Das (1998). Stages of global sourcing strategy evolution: an exploratory study. *Journal of Operations Management*, 16, 241-255.
- Blumenfeld, D. E., Burns, L. D., Daganzo, C. F., Frick, M., & R. W. Hall (1987). Reducing logistics costs at General Motors. *Interfaces*. 17 (1), 26-47.
- Burns, L. D., Hall, R. W., Blumenfeld, D. E., & C. F. Daganzo (1985). Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs. *Operations Research*, 33(3), 469-489.
- Çebi, F., & D. Bayraktar (2003). An integrated approach for supplier selection. *Logistics Information Management*, 16 (6), 395-400.
- Chiang, C., & W. C. Chiang (1996). Reducing inventory costs by order splitting in the sole sourcing environment. *Journal of Operational Research Society*, 47, 446 -456.
- Chaudhry, S. S., Forst, F. G., & J. L. Zydiak (1993). Vendor selection with price breaks. *European Journal of Operational Research*, 70, 52-66.
- Collette, Y., & P. Siarry (2002). *Optimisation multiobjectif*. Edition Eyrolles.
- Crainic, T. G., & G. Laporte (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97, 409-438.
- D'amours, S., Jabiri, A., & M. Levasseur (2001). Les processus de catégorisation des fournisseurs au sein des entreprises de classe mondiale. 4ème congrès de génie industriel, France.
- Dahel, N. E. (2003). Vendor selection and order quantity allocation in volume discount environments. *Supply Chain Management : An International Journal*, 8 (4), 335-342.

- De Boer, L., Labro, E., & P. Morlacchi (2001). A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7, 75-89.
- Degraeve, Z., & F. Roodhooft (1999). Improving the efficiency of purchasing process using total cost of ownership information: the case of heading electrodes at cockerill sambre. *European Journal of Operational Research*, 112, 42-53.
- Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of Purchasing*, 2 (1), 28-41.
- Dornier, Ph-P., & M. Fender (2001). *La logistique globale, enjeux – principes – exemples*. Editions Organisations.
- Ellram, L. M. (1990). The supplier selection decision in strategic partnerships. *Journal of Purchasing & Material Management*, 26 (4), 8-14.
- Ellram, L. M. (1995). Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25 (8), 4-23.
- Estampe, D., & V. Tsapi (1999). Européanisation de la logistique : les grandes tendances. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 18 (3), 35-50.
- Ganeshan, R., Tyworth, J. E., & Y. Guo (1999). Dual sourced supply chains the discount supplier option. *Transportation Research Part E*, 35, 11-23.
- Gargeya, V. B., & J. Su (2004). Strategic sourcing and supplier selection: a review of survey-based empirical research. *Proceeding of the second world conference on POM, Cancun-Mexico*.
- Giard, V. (2003). *Gestion de la production et des flux*. Ed Economica.
- Ghodsypour, S. H., & C. O'Brien (2001). The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. *International Journal of Production Economics*, 73, 15-27.
- Goffin, K., Szwejcowski, M., & C. New (1997). Managing suppliers: when fewer can mean more. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 27 (7), 422-436.
- Groothedde, B., & L. A. Tavasszy (1999). Optimisation of terminal locations in a multimode network with simulated annealing. *Proceedings of the transport-logistical working days, dig Connekt*.
- Hall, R. W. (1985). Dependence between shipment size and mode in freight transportation. *Transportation Science*, 19 (4), 436-444.
- Hinkle, C. L., Robinson, P. J., & P. E. Green (1969). Vendor evaluation using cluster analysis. *Journal of Purchasing*, 5 (3), 49-58.
- Hong, J. D., & J. C. Hayya (1992). Just-In-Time purchasing: Single or multiple sourcing? *International Journal of Production Economics*, 27, 175-181.
- Janssen, F., & T. De Kok (1999). A two-supplier inventory model. *International Journal of Production Economics*, 59, 395-403.
- Jayaraman, V. (1998). Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design. *International Journal of Operations & Production Management*, 18 (5), 471-494.

- Kannan, V. R., & K. C. Tan (2002). Supplier selection and assessment: their impact on business performance. *The Journal of Supply Chain Management*, 11-21.
- Katsikeas, C. S., Pappas, N. G., & E. Katsikea (2004). Supply source selection criteria: the impact of supplier performance on distributor performance. *Industrial Marketing Management*.
- Kreutzberger, E., Macharis, C., Vereecken, L., & J. Woxenius (2003). Is intermodal freight transport more environmentally friendly than all road freight transport? A review. NECTAR Conference N°7, Umea, Sweden, June 13-15.
- Kumar, M., Vrat, P., & R. Shankar (2004). A fuzzy goal programming approach for vendor selection problem in a supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 24, 69-85.
- Liu, J., Ding, F. Y., & V. Lall (2000). Using data envelopment analysis to compare suppliers for supplier selection and performance improvement. *Supply Chain Management : An International Journal*, 5 (3), 143-150.
- Larson, P. D. (1993). Buyer-Supplier co-operation, product quality and total cost. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24 (6), 4-10.
- Lucquin, C. (2002). Les évolutions actuelles de la logistique de distribution. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 21 (2), 49-65.
- Macharis, C., & Y. M. Bontekoning (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research : a review. *European Journal of Operational Research*, 153, 400-416.
- Mandal, A., & S. G. Deshmukh (1994). Vendor selection using Interpretive Structural Modeling (ISM). *International Journal of Operations & Production Management*, 14 (6), 52-59.
- Masella, C., & A. Rangone (2000). A contingent approach to the design of vendor selection systems for different types of co-operative customer/supplier relationships. *International Journal of Operations & Production Management*. 20 (1), 70-84.
- Martel, A. (2001). Le choix de moyens de transport. Cours MBA, Gestion Manufacturière et Logistique : Conception et Gestion de chaînes logistiques," Faculté des Sciences et d'Administration, Université Laval, Québec, Canada.
- Meinert, T. S., Youngblood, A. D., Taylor, G. D., & H. A. Taha (1998). Simulation of the railway component of intermodal transportation. Report. Arkansas University, Fayetteville, AK.
- Miettinen, K. (1999). Nonlinear multiobjective optimization. Kluwer Academic Publishers.
- Min, H. (1994). International supplier selection : a multi-attributes utility approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24 (5), 24-33.
- Murthy, N. N., Soni, S., & S. Ghosh (2004). A framework for facilitating sourcing and allocation decisions for make-to-order items. *Decision Sciences*, 35 (4), 609-636.
- Narasimhan, R. (1983). An analytical approach to supplier selection. *Journal of Purchasing & Materials Management*, 19 (1), 27-32.
- Ng, S. T., & R. M. Skitmore (1995). CP-DSS: decision support system for contractor prequalification. *Civil Engineering Systems: Decision Making Problem Solving*, 12 (2), 133-160.

- Ng, B., Ferrin, B. G., & Pearson, J. N. (1997). The role of purchasing/transportation in cycle time reduction. *International journal of Operations & Production Management*, 17 (6), 574-591.
- Nydick, R. L., & R. P.Hill (1992). Using the analytic hierarchy process to structure the supplier selection procedure. *International Journal of Purchasing & Materials Management*, 28 (2), 31-36.
- Rayaraman, V., Srivastava, R., & Benton, W. C. (1999). Supplier selection and order quantity allocation : a comprehensive model. *The Journal of Supply Chain Management*, 50-58.
- Roodhooft, J., & J. Konings (1997). Vendor selection and evaluation: an activity based costing approach. *European Journal of Operational Research*, 96, 97-102.
- Sedarage, D., Fujiwara, O., & H. T. Luong (1999). Determining optimal splitting and reorder level for N-supplier inventory systems. *European Journal of Operational Research*, 116, 389-404.
- Smytka, D. L., & M. W. Clemens (1993). Total cost supplier selection model : a case study. *International Journal of Purchasing & Materials Management*, 29 (1), 42-49.
- Soucoup, W. R. (1987). Supplier selection strategies. *Journal of Purchasing & Materials Management*, 23 (3), 7-12.
- Stank, T. P., & T. J. Goldsby (2000). A framework for transportation decision making in an integrated supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5 (2), 71-77.
- Svensson, G. (2004). Supplier segmentation in the automotive industry. A dyadic approach of a managerial model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34 (1), 12-34.
- Swaminathan, J., & J. G. Shanthikumar (1999). Supplier diversification: effects of discrete demand. *Operations research Letters*, 24, 213-221.
- Talluri, S., & R. Narasimhan (2003). Vendor evaluation with performance variability: A max-min approach. *European Journal of Operational Research*, 146, 543-552.
- Thomas, D. J., & P. M. Griffin (1996). Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94, 1-15.
- Timmerman, E. (1986). An approach to vendor performance evaluation. *Journal of Purchasing & Supply Management*, 1, 27-32.
- Tixier, D., Mathe, H., & J. Colin (1996). *La logistique d'entreprise, vers un management plus compétitif*. Dunod.
- Tracey, M., & C. L. Tan (2001). Empirical analysis of supplier selection and involvement, customer satisfaction and firm performance. *Supply Chain Management*, 6 (4), 178-188.
- Tyworth, J. (1991). The inventory theoretic approach in transportation selection models: a critical review. *Logistics and transportation review*, 27 (4), 299-318.
- Tyworth, J. E., & A. Ruiz-Torres (2000). Transportation' role in the sole-versus dual sourcing decision. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 30 (2), 128-144.
- Verma, R., & M. E. Pullma (1998). An analysis of the supplier selection process. *International Journal of Management Science*, 26 (6), 739-750.

- Vidal, C. J. & M. Goetschalckx (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98, 1-18.
- Vokurka, R. J., Choobineh, J., & L. Vadi (1996). A prototype expert system for evaluation and selection of potential suppliers, *International Journal of Operation & Production Management*, 16 (12), 106-127.
- Vonderembse, M., Tracey, M., Tan, C. L., & E. J. Bardi (1995). Current purchasing practices and JIT: some of effects on inbound logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25 (3), 33-48.
- Weber, C. A., Current, J. R., & W. C. Benton (1991). Vendor selection criteria and methods. *European Journal of Operational Research*, 50, 2-18.
- Weber, C. A., & L. M. Ellram (1993). Supplier selection using multiobjective programming: a decision support system approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 23 (2), 3-14.
- Weber, C. A., & J. Current (1993). A multiobjective approach to vendor selection. *European Journal of Operational Research*, 68 (2), 173-184.
- Weber, C. A. (1996). A data envelopment analysis approach to measuring vendor performance. *Supply Chain Management*, 1 (1), 28-39.
- Weber, C. A., Current, J., & A. Desai (2000). An optimization approach to determining the number of vendors to employ. *Supply Chain Management : An International Journal*, 5 (2), 90-98.
- Youssef, M. A., Zairi, M., & B. Mohanty (1996). Supplier selection in an advanced manufacturing technology environment: an optimization model. *Benchmarking of Quality Management & Technology*, 3 (4), 60-72.

## **RESUMÉ**

La décision du choix des fournisseurs est stratégique car elle influe sur la performance globale de l'entreprise et sur le coût d'achat qui représente de 40 à 80 % du coût total du produit. Une revue de la littérature dans ce domaine montre que rares sont les travaux qui ont considéré explicitement l'impact du transport sur cette décision. Ceci représente une limitation importante car le partage de la demande entre plusieurs fournisseurs implique des coûts de transport importants. De plus, le transport et les stocks sont fortement liés et engendrent des coûts encourus chez les fournisseurs pendant que les produits attendent d'être transportés, des coûts relatifs aux produits en transit et des coûts encourus chez le donneur d'ordres (DO) pendant que les produits attendent d'être utilisés. Par ailleurs, le transport a un impact sur les délais de livraison. Enfin, le transport prend une grande place dans le contexte actuel de développement durable. Pour étudier l'impact des politiques de transport sur le choix des fournisseurs, notre recherche commence par une analyse bibliographique sur le problème du choix des fournisseurs, sur les différentes caractéristiques du transport de fret et enfin sur le transport et les relations DO/Fournisseurs. Nous avons proposé une modélisation du problème par un programme mathématique de minimisation du coût total du produit, qui intègre les coûts de stockage, d'achat, de commande et de transport et tient compte des contraintes sur fournisseurs, le transport et le DO. Plusieurs scénarios ont été présentés pour la validation du modèle. A la fin, une approche multiobjectif qui minimise simultanément le coût total et le délai est proposée.

---

## **TAKING THE TRANSPORT POLICIES INTO ACCOUNT IN SUPPLIER SELECTION**

### **ABSTRACT**

The decision of supplier selection is strategic because it impacts the total performance of the company and the purchasing cost represents 40 to 80 % of the total cost of the product. A literature review in this field shows that studies which considered, in an explicit way, the impact of transport on this decision are scarce. This represents an important limitation because splitting orders among multiple suppliers implies important transport costs. Moreover, transport and inventory are highly interrelated and generate costs incurred in the suppliers while the products wait to be shipped, costs incurred by the products in transit and those incurred in the buyer while the products wait to be used. In addition, transport has an impact on the leadtime. Finally, transport takes a great place in the current context of durable development. To study the transport policies impact on the supplier selection, we begin our research with a bibliographical analysis on the supplier selection problem, on the various freight transport characteristics and finally on transport and the buyer/supplier relations. We then propose modeling the problem by a mathematical program which minimizes the product total cost, resulting from transport, ordering, purchasing and inventory costs, under supplier, transport and buyer constraints. Several scenarios are presented for the model validation. At the end, we propose a multiobjective approach which minimizes simultaneously the cost and the leadtime criteria.

---

### **MOTS CLÉS**

Choix des fournisseurs, réseau logistique, gestion des stocks, transport de fret, intermodalité, programmation non linéaire, approche multiobjectif.

---

### **KEY-WORDS**

Supplier selection, logistic network, inventory control, freight transport, intermodality, nonlinear programming, multiobjective approach.

---

### **INTITULÉ ET ADRESSE DU LABORATOIRE**

Laboratoire d'Automatique de Grenoble  
ENSIEG, BP 46, Domaine universitaire, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex France.