



**HAL**  
open science

## Optimisation de ressources en logistique urbaine

Alexandre Huart

► **To cite this version:**

Alexandre Huart. Optimisation de ressources en logistique urbaine. Informatique [cs]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2011. Français. NNT : 2011VALE0031 . tel-03416315

**HAL Id: tel-03416315**

**<https://uphf.hal.science/tel-03416315v1>**

Submitted on 5 Nov 2021

**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.

UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU  
HAINAUT-CAMBRESIS

ÉCOLE DOCTORALE SPI  
SCIENCES POUR L'INGENIEUR

# THÈSE

pour obtenir le titre de

**Docteur en Sciences**

de l'Université de Valenciennes et du  
Hainaut-Cambrésis

**Mention : INFORMATIQUE**

Présentée et soutenue par  
Alexandre HUART

## Optimisation de ressources en logistique urbaine

dans le cadre du projet LUMD

soutenue le 9 décembre 2011

### Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Teodor Gabriel CRAINIC	-	Université du Québec à Montréal
	Pierre DEJAX	-	Ecole des Mines de Nantes
<i>Directeur :</i>	Frédéric SEMET	-	Ecole Centrale de Lille
<i>Co-encadrant :</i>	Luce BROTCORNE	-	INRIA Lille - Nord Europe
<i>Président :</i>	Arnaud FRÉVILLE	-	Université de Valenciennes
<i>Examineurs :</i>	Frédéric MEUNIER	-	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
<i>Invité :</i>	Denis SCARDONI	-	Presstalis







UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU  
HAINAUT-CAMBRESIS

ÉCOLE DOCTORALE SPI  
SCIENCES POUR L'INGENIEUR

# T H È S E

pour obtenir le titre de

**Docteur en Sciences**

de l'Université de Valenciennes et du  
Hainaut-Cambrésis

**Mention : INFORMATIQUE**

Présentée et soutenue par

Alexandre HUART

## Optimisation de ressources en logistique urbaine

dans le cadre du projet LUMD

soutenue le 9 décembre 2011

### Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Teodor Gabriel CRAINIC	-	Université du Québec à Montréal
	Pierre DEJAX	-	Ecole des Mines de Nantes
<i>Directeur :</i>	Frédéric SEMET	-	Ecole Centrale de Lille
<i>Co-encadrant :</i>	Luce BROTCORNE	-	INRIA Lille - Nord Europe
<i>Président :</i>	Arnaud FRÉVILLE	-	Université de Valenciennes
<i>Examineurs :</i>	Frédéric MEUNIER	-	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
<i>Invité :</i>	Denis SCARDONI	-	Presstalis



## Remerciements

Je souhaite adresser mes remerciements à tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à cette thèse et qui m'ont accompagné ces trois dernières années.

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de thèse, Frédéric Semet, pour la qualité de son encadrement, son partage d'expériences, et la grande liberté dont j'ai bénéficié durant cette thèse. Je le remercie également pour m'avoir sensibilisé aux problématiques de transport abordées en recherche opérationnelle et donner l'envie de m'investir dans le domaine. Mes remerciements vont ensuite à Luce Brotcorne, ma co-encadrante, pour ses conseils et ses encouragements. Je tiens aussi à les remercier pour leur disponibilité malgré la petite distance qui nous sépare. Ce fut un véritable plaisir de travailler avec vous dans ces conditions.

Je voudrai aussi remercier les membres du projet LUMD et plus particulièrement Céline Bernard, Denis Scardoni, Sami Sboui et Frédéric Meunier pour leur professionnalisme. Le projet a réuni des acteurs aux domaines de compétences très variés dont le point commun était le transport et la logistique. Je ne peux m'empêcher de sourire en repensant aux problèmes de communication que cela a engendré en début de projet. Je tiens à remercier les LUMDeurs pour la richesse et la diversité des connaissances que j'ai pu acquérir à vos côtés. Je n'oublie pas Sébastien Gubert, chef de projet chez SQLI, pour ses compétences et sa grande réactivité qui ont permis un gain de temps non négligeable lors des phases de développement.

Je remercie sincèrement Teodor Gabriel Crainic et Pierre Dejax d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci à vous pour le temps que vous avez consacré à la lecture du manuscrit ainsi que pour vos conseils. Vos points de vue à la fois extérieurs et pertinents m'ont été très bénéfique. J'adresse mes remerciements à Arnaud Fréville et à Frédéric Meunier qui m'ont fait l'honneur d'examiner ces travaux de thèse.

Enfin, je voudrai remercier les membres du LAMIH et plus particulièrement ceux de l'équipe ROAD ainsi que les doctorants ayant partagé nos célèbres pauses café. Je remercie ma famille, mes amis et ma compagne, Laure, pour m'avoir soutenu et supporté durant ces trois ans. Je ne peux terminer ces remerciements sans avoir une pensée émue pour ma grand-mère et l'envie d'apprendre qu'elle m'a transmise.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Transport de marchandises en ville . . . . .	3
1.1.1	Groupage . . . . .	4
1.1.2	Approche mutualisée . . . . .	5
1.2	Niveaux de planification d'un système de transport . . . . .	7
1.3	Problématique abordée . . . . .	8
1.4	Plan de la thèse . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>11</b>
2.1	Problème de localisation-routage . . . . .	12
2.2	Problème de tournées de véhicules . . . . .	12
2.2.1	Modélisation . . . . .	13
2.2.2	Méthode de génération de colonnes . . . . .	15
2.2.3	Métaheuristiques . . . . .	16
2.2.4	Problème de tournées de véhicules avec prise en compte de la congestion routière (PTVCR) . . . . .	16
2.2.5	Problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison (PTVCL) . . . . .	17
2.2.6	Problème de tournées de véhicules avec utilisation multiple des véhicules (PTVUM) . . . . .	19
2.3	Problème de conception de réseau . . . . .	19
2.3.1	Conception de réseau de service . . . . .	20
2.3.2	Modélisation du problème de conception de service . . . . .	23
2.3.3	Méthodes de résolution . . . . .	26
2.4	Positionnement du problème . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Modélisation du réseau logistique</b>	<b>31</b>
3.1	Offre de transport . . . . .	34
3.1.1	Caractérisation de l'offre résiduelle d'un véhicule . . . . .	35
3.2	Service . . . . .	36
3.3	Plates-formes . . . . .	37
3.4	Offre de stockage . . . . .	38
3.5	Transbordement . . . . .	38
3.6	Modélisation de la demande . . . . .	41
3.7	Représentation du réseau . . . . .	42

<b>4</b>	<b>Problème d'allocation de demandes</b>	<b>45</b>
4.1	Spécificités de notre problématique . . . . .	46
4.2	Formulation . . . . .	46
4.3	Générateur d'instances . . . . .	49
4.4	Réduction de variables . . . . .	49
4.5	Restriction géographique . . . . .	51
4.5.1	Construction de la zone de chalandise d'un véhicule . .	52
4.5.2	Impact de la réduction (R3) . . . . .	54
4.5.3	Modèle de couverture . . . . .	56
4.6	Formulation restreinte . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Extensions du problème d'allocation</b>	<b>61</b>
5.1	Extensions sur l'offre . . . . .	62
5.1.1	Transport en site propre . . . . .	62
5.1.2	Point d'enlèvement déporté . . . . .	63
5.2	Extensions sur la demande . . . . .	64
5.2.1	Point de chargement/déchargement non fixé . . . . .	64
5.2.2	Demandes groupées . . . . .	66
5.2.3	Demande de repacking . . . . .	69
5.2.4	Demande de stockage longue durée . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable</b>	<b>73</b>
6.1	Contexte . . . . .	73
6.2	Solution du projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable . .	74
6.3	Acteurs du projet . . . . .	75
6.4	Moteur d'allocation . . . . .	77
6.5	Plate-forme logicielle . . . . .	80
6.6	Evaluation de la solution de mutualisation LUMD . . . . .	80
6.7	Dimensionnement espace/temps . . . . .	83
6.8	Extensions futures en vue de l'intégration de la gestion du revenu	84
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>91</b>

# Liste des tableaux

4.1	Tableau des notations . . . . .	46
4.2	Tableau des résultats . . . . .	50
4.3	Influence de (R1) sur le nombre de variables du modèle . . . . .	51
4.4	Influence de (R2) sur le nombre de variables du modèle . . . . .	51
4.5	Influence de (R3) sur le nombre de variables de transport . . . . .	54
4.6	Influence de (R3) sur le nombre de variables . . . . .	55
4.7	Influence de (R3) sur la fonction objectif . . . . .	55
4.8	Tableau des résultats . . . . .	58
5.1	Tableau des notations . . . . .	65



# Table des figures

1.1	Une logistique mondiale . . . . .	2
1.2	Distribution urbaine : exemple de la grande distribution . . .	4
1.3	Des projets français pour une distribution urbaine durable . .	5
1.4	L'approche mutualisée . . . . .	6
1.5	Bénéfices d'une approche mutualisée . . . . .	7
2.1	Classification des PTV en rapport avec notre problématique .	13
2.2	Le graphe espace-temps . . . . .	22
2.3	Répétition du plan de transport . . . . .	23
2.4	Tournée d'approvisionnement . . . . .	28
2.5	Distribution multi-acteurs . . . . .	29
3.1	Le réseau routier . . . . .	32
3.2	Le réseau espace temps . . . . .	33
3.3	Offres de transport . . . . .	35
3.4	Caractérisation de l'offre résiduelle d'un véhicule . . . . .	36
3.5	Un service . . . . .	37
3.6	Une offre de stockage . . . . .	39
3.7	Deux transbordements . . . . .	40
3.8	Un transfert . . . . .	40
3.9	Une demande de transport . . . . .	42
3.10	Représentation du réseau logistique . . . . .	42
4.1	Suppression d'une zone à l'activité potentielle nulle . . . . .	53
4.2	Un plan de distribution . . . . .	59
5.1	Offres de transport en site propre . . . . .	62
5.2	Enlèvement déportée . . . . .	64
5.3	Exemples d'un point de chargement/déchargement non fixé . .	65
5.4	Deux exemples de demandes groupées . . . . .	67
5.5	Un exemple de demande groupées et liées par leur origine . . .	68
5.6	Une exemple de demandes groupées et liées par leur destination	69
5.7	Un exemple de demandes de repacking . . . . .	70
6.1	Les capacités résiduelles existantes . . . . .	75
6.2	La solution proposée par LUMD . . . . .	76
6.3	Le module d'allocation LUMD . . . . .	78
6.4	Le moteur d'allocation LUMD . . . . .	79

---

6.5	Référencement d'un client . . . . .	80
6.6	Dépôt d'une demande . . . . .	81
6.7	Dépôt d'une offre . . . . .	81
6.8	Le zonage initial . . . . .	82
6.9	Le zonage de LUMD . . . . .	84

## CHAPITRE 1

# Introduction

---

Il y a plusieurs dizaines d'années les industries géraient elles même l'ensemble de leur chaîne logistique, de l'acquisition de la matière première à la distribution du produit fini. La logistique consistait essentiellement en la gestion des transports et des entrepôts. Le domaine de la logistique n'a cessé d'évoluer, on parle maintenant de plus en plus de *supply chain*. La notion de *supply chain* intègre explicitement en plus la gestion des flux : les flux de marchandises qui traversent la chaîne dans le sens amont vers aval, les flux financiers qui circulent dans le sens inverse et des flux d'information permettant de suivre le flux physique mais aussi de remonter les informations du consommateur. Dans un soucis de performance et de réduction des prix, les entreprises ont externalisé certains domaines comme le transport pour se recentrer sur les domaines de création de valeur. Ce changement de schéma logistique a marqué la fin de la *supply chain* gérée par un seul acteur. La *supply chain* moderne est composée de plusieurs maillons gérés de manière indépendante par des entreprises distinctes n'ayant pas nécessairement un objectif commun. Dans ces conditions, comment optimiser la chaîne logistique ? L'optimisation de chacun des maillons suffit-elle pour obtenir le meilleur prix de revient tout en garantissant un certain niveau de qualité de service ?

L'objet du *supply chain management* ou management de la chaîne logistique est notamment de répondre à ces questions. Il peut être vu comme un ensemble d'approches visant à satisfaire la demande d'un client au vu d'une stratégie déclinée aujourd'hui sur les trois axes du développement durable (environnement, économie, société) par une intégration effective des fournisseurs, producteurs, distributeurs et prestataires [16]. En pratique, chaque maillon a tendance à optimiser sa propre *supply chain* en ne considérant que les deux maillons qui l'entourent. L'objectif et les intérêts de chaque maillon n'étant pas commun, l'optimum global du système ne peut résulter de la somme des optimums de chaque maillon. Conceptuellement, la gestion de la chaîne logistique vise à coordonner la gestion des flux sur l'ensemble de la chaîne dans un but économique, social et environnemental. Aujourd'hui peu de chaînes bénéficient d'une supervision globale, les expérimentations existantes se limitent à une intégration limitée à deux acteurs.

Une autre évolution de la chaîne logistique concerne la distance séparant chaque maillon. Depuis le début du XXI<sup>ème</sup> siècle les échanges de biens

se globalisent. Le développement des moyens de transport a permis de faire baisser les coûts de transport. Si l'on considère aussi les différences de coût de production entre les continents, il devient plus rentable de faire fabriquer un produit dans un pays émergeant puis de le transporter. Par exemple, faire venir un conteneur de Chine coûte aux alentours de 1100 euros soit le prix d'un aller-retour entre Paris et Lyon d'un poids lourd. Comme l'illustre la Figure 1.1 le transport du flux de produits entre l'ensemble des maillons de la chaîne s'allonge. Selon leur type et leur destination, on estime que le coût du transport d'un produit représente entre 5 à 10% de sa valeur [54]. L'exemple des produits issus de la grande distribution est proposé en Figure 1.2, le coût d'acheminement de marchandises entre le producteur et les points de vente n'excède pas 5% du prix de la valeur des marchandises.

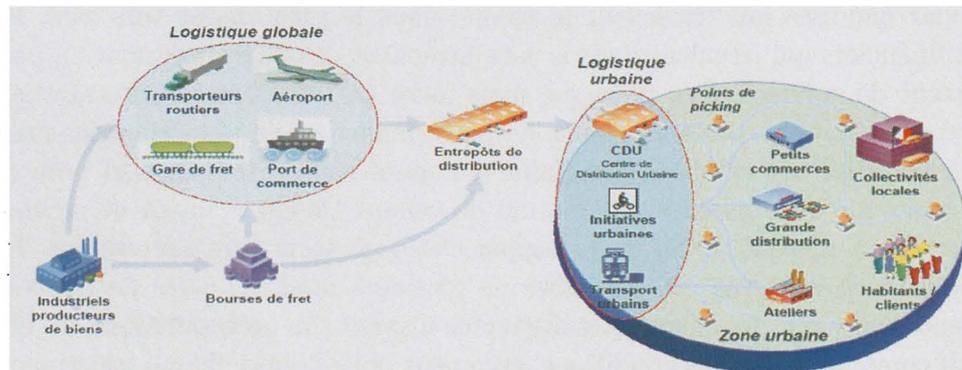


FIG. 1.1 – Une logistique mondiale

Comme le montre la Figure 1.1, la logistique urbaine est le dernier maillon d'une chaîne logistique d'approvisionnement. La problématique générale de la logistique urbaine est d'alimenter les centres-villes en marchandises initialement situées sur des plates-formes basées en périphérie. Les problèmes de gestion des systèmes de transport urbain sont traités en *city logistics* [22] [24] [25] ou logistique urbaine. Elle est définie par l' Institute of City Logistics comme étant le processus d'optimisation de la logistique et des activités de transport par des sociétés privées dans les zones urbaines tout en tenant compte de l'environnement de la circulation, la congestion du trafic et la consommation d'énergie dans le cadre d'une économie de marché. Les noms de Crainic et Taniguchi sont les plus souvent cités pour l'organisation de la City Logistics et celui de Dablanc pour les aspects sociétaux et réglementaires.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'organisation d'une chaîne

logistique collaborative située en milieu urbain. L'ensemble des acteurs est géré par une *direction supply chain globale* situé au niveau inter-entreprise. Notre attention s'est portée sur les volets transport et entreposage d'une telle approche.

## 1.1 Transport de marchandises en ville

Le transport de marchandises en ville est le déplacement, par ou pour des professionnels de produits. Il concerne différentes natures de marchandises, des produits finis, l'approvisionnement des chantiers en matériaux de construction, les livraisons à domicile, la récupération d'ordures ménagères... L'acheminement du fret représente une activité économique vitale et nécessaire au fonctionnement de la ville. L'économie et la qualité de vie des villes dépendent essentiellement d'un système de transport de marchandises efficace et respectueux de l'environnement. Alors que la gestion du trafic et son impact dans les secteurs urbains ont retenu l'attention ces dernières années [56], c'est surtout sur le transport public de voyageurs et le trafic de voitures particulières qu'ont porté les études plutôt que le transport de marchandises.

Malgré le développement des transports en commun, la plupart des centres urbains souffrent de congestion du fait des nombreux déplacements de particuliers et de livraisons de marchandises. Le fait est que, dans l'organisation actuelle, le mode de transport par route a des atouts considérables pour la distribution urbaine tel que l'accès au client final, le coût, l'absence de rupture de charge... En contre partie, le transport de marchandises en ville actuel est générateur de diverses nuisances. La principale étant la congestion des infrastructures routières. Ainsi, l'étude *transitec* a montré qu'il occupe jusqu'à 30% de la voirie et que 80% des arrêts sont illicites. Les nuisances sont aussi environnementales par l'émission de gaz d'échappement et sonores. Le système de transport de marchandises en ville actuel engendre également des problèmes de consommation d'énergie liés à la forte consommation de pétrole. Par exemple, en région Ile De France, 365 millions de tonnes de fret sont transportées chaque année et la demande de transport de marchandises progresse de 1,5% par an. Cette activité génère la moitié de la consommation de gazole et 35% des émissions de  $CO_2$  bien que le transport de marchandises ne représente que 20% de la circulation urbaine [54].

En raison de la croissance continue du transport urbain de marchandises et des problèmes qu'il engendre, on assiste à une prise de conscience de son impact négatif sur la qualité de vie. Plusieurs expériences européennes importantes visant à réduire l'impact de l'acheminement de fret sont recensées par le pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations écono-

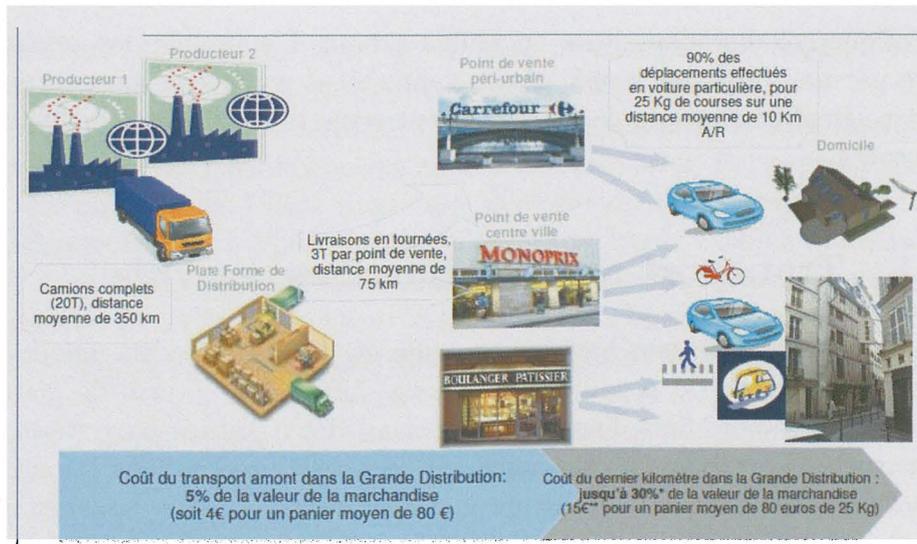


FIG. 1.2 – Distribution urbaine : exemple de la grande distribution

miques. On distingue deux types principaux de projets. Les premiers visent à la création de nouvelles zones de livraison et à modifier la législation sur l'accès et le stationnement des transporteurs. Ce type d'actions, bien que nécessaire, ne représente pas de solution durable aux problèmes rencontrés en milieu urbain. C'est pourquoi, il est indispensable de concevoir de nouveaux modèles de distribution de marchandises. Le second type de projets vise donc à proposer de nouveaux modèles de distribution. Cinq exemples de projets français de ce type impactant plusieurs maillons de la chaîne logistique sont présentés en Figure 1.3. En s'appuyant sur les expériences des 30 pays membres de son forum, l'OCDE propose une série de recommandations pour le transport de marchandises du XXI<sup>e</sup> siècle. Parmi ces recommandations, le groupage de marchandises et la mutualisation sont vus comme des clés de la réussite pour le transport durable de marchandises.

### 1.1.1 Groupage

Les transporteurs ne disposent pas toujours des quantités de marchandises et du nombre de clients suffisants pour optimiser le taux de remplissage de leurs véhicules et rationaliser leurs déplacements. Le principe du groupage est d'acheminer les marchandises de leur lieu de production vers un(des) entrepôt(s), puis dans un second temps de livrer les marchandises jusqu'aux clients finaux à l'aide de véhicules pleinement chargés. Ils'agit d'un type de transport très répandu. Une utilisation de véhicules plus propres pour la livraison

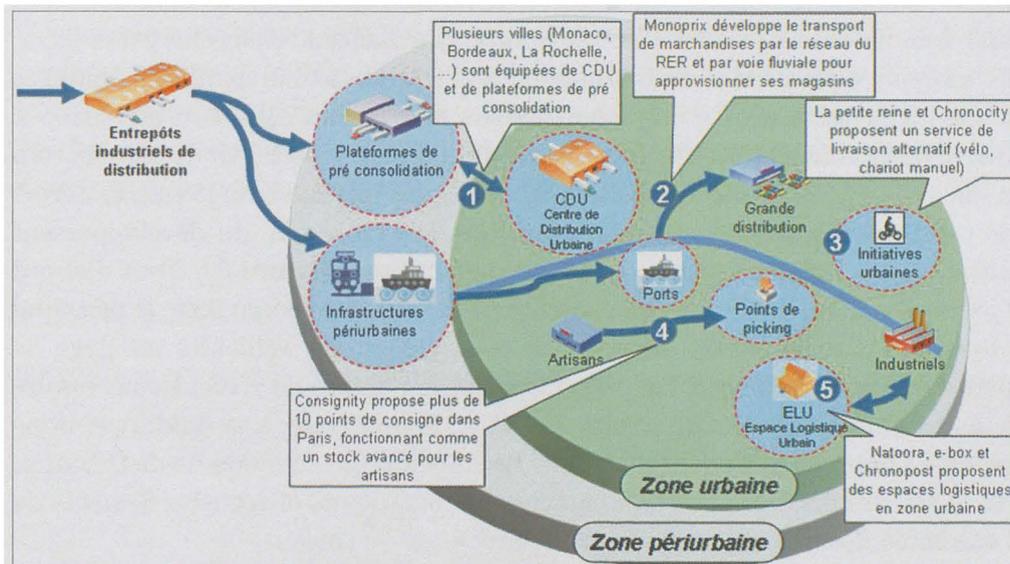


FIG. 1.3 – Des projets français pour une distribution urbaine durable

finale contribue à diminuer l'impact sur l'environnement. L'objectif économique du groupage est d'améliorer l'utilisation du système de transport pour engendrer des économies d'échelle en diminuant les distances parcourues tout en augmentant le taux de remplissage des véhicules et donc, indirectement, de diminuer le nombre de véhicules nécessaire à la distribution de fret. Les réseaux de transports urbains s'apprentent à ce mode de distribution. Ils sont constitués d'entrepôts généralement situés en périphérie des villes et disposent de capacités de stockage importantes. Les coûts actuel du foncier logistique fait que ces entrepôts se situent de plus en plus loin des villes. A l'intérieur de ces villes existent des espaces logistiques urbain (ELU) de plus faible capacité. Ces deux types de plates-formes logistiques peuvent être utilisées pour la rupture de charge imposée par la consolidation des flux de marchandises. Typiquement, les marchandises dont les destinations se situent dans le même quartier sont centralisées dans un centre de distribution urbain puis dans un second temps livrées à destination par camion complet.

### 1.1.2 Approche mutualisée

*L'union fait la force.* La célèbre devise nationale belge aurait pu être à l'origine d'une nouvelle forme de groupage ayant vu le jour il y a quelques années. Il s'agit de la mutualisation *aval*. Elle concerne les transporteurs d'une même zone géographique ayant des activités communes en terme de type de

marchandises transportées. Ces transporteurs s'associent pour charger et livrer les marchandises de leur zone urbaine. En pratique, les marchandises destinées à une même adresse ou à un même quartier sont centralisées dans un entrepôt (privé ou commun) puis livrées par camion complet. Le schéma de distribution d'une telle approche est illustré en Figure 1.4, on voit très vite le gain en terme de ressources logistiques de cette approche. Les trois axes du développement durable sont impactés par ce genre de distribution (Figure 1.5). Tout d'abord l'axe économique, qui, dans un contexte de concurrence accru reste le principal objectif. L'augmentation des taux de remplissage des véhicules est gage de performance économique. De plus, diminuer le nombre de véhicules nécessaire à la distribution permet de réduire le trafic, de contribuer à sa fluidité, et donc réduire l'impact sur l'environnement. La difficulté de ce mode de distribution est la synchronisation des chargements, déchargements et transbordements de l'ensemble des flux de marchandises parcourant le réseau.

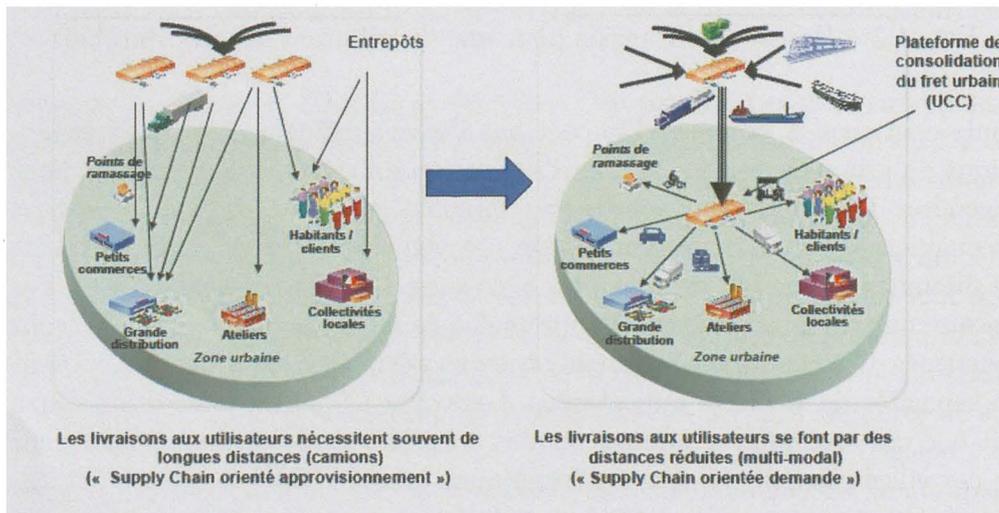


FIG. 1.4 – L'approche mutualisée

Une telle approche mutualisée multiplie les scénarios de distribution possibles. Plusieurs projets de mutualisation de la distribution ont vu le jour [51]. Deux d'entre eux ont obtenus des résultats particulièrement significatifs. Sous l'impulsion des pouvoirs public japonais, Fukuoka a bénéficié d'un tel système dès 1978 regroupant 29 transporteurs. En s'attaquant parallèlement aux problèmes de stationnement des véhicules de fret lors des chargements ou des livraisons, le nombre de véhicules de fret a chuté de 65% le nombre de véhicules-kilomètres de 87%. Plus récemment, en 2004, la société Bénédicte a lancé un programme de gestion mutualisée des approvisionnements.

Ce processus consiste à organiser des livraisons en regroupant plusieurs industriels au départ de la même plate-forme logistique et à destination d'un même point de livraison. Six mois après la mise en place de ce système, les résultats ont fait apparaître une augmentation de 12% des fréquences de livraison, une diminution des stocks de 10,5% et un maintien du taux de service à 99,8%.

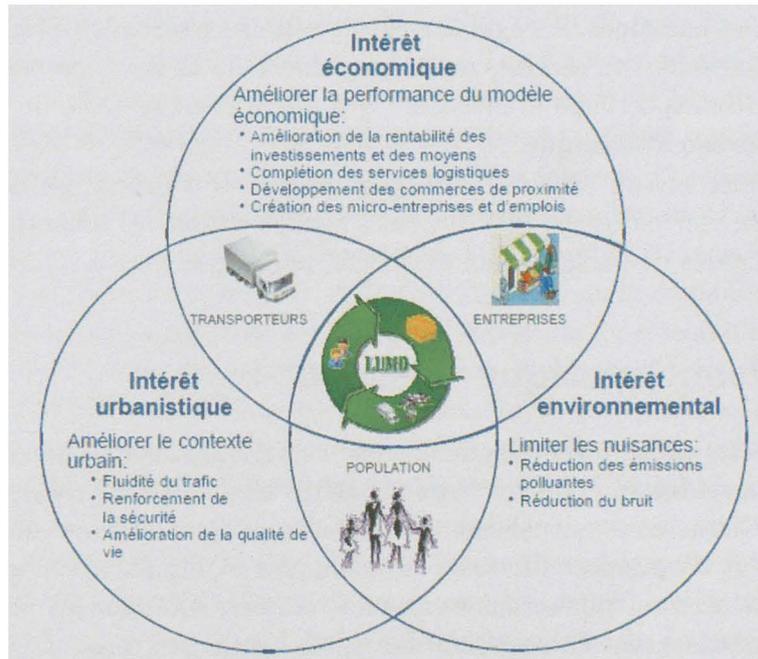


FIG. 1.5 – Bénéfices d'une approche mutualisée

## 1.2 Niveaux de planification d'un système de transport

La planification complète des systèmes de transport comporte trois niveaux de prise de décision. Le niveau stratégique porte sur la planification à long terme. Il s'agit souvent de construire ou développer l'infrastructure physique du réseau de transport. Les principales décisions portent sur

- l'emplacement de nouvelles plates-formes logistiques (entrepôt, centre de distribution urbain, élément logistique urbain ...), de leur niveau d'équipement, des modes de transport qu'elles peuvent accueillir
- la création ou la rénovation de voies ferrées

- la création de services c'est à dire ajouter de nouvelles lignes au système de transport
- l'aménagement des voies fluviales ...

Le niveau tactique concerne la planification à moyen terme. La problématique générale est d'établir un plan de transport permettant à la fois le respect des exigences des clients mais aussi la gestion optimale des ressources logistiques et humaines. Il s'agit souvent de définir les services (fréquence, ressources nécessaires au service, repositionnement de la flotte de véhicules en vu des prochains services à effectuer ...) à partir d'un système de transport défini au niveau stratégique.

Le dernier niveau est le niveau opérationnel. Il concerne les décisions à court terme voir en temps réel. Il peut s'agir de définir les tournées de véhicules, les heures de passage chez les clients, le chargement du véhicule...

### 1.3 Problématique abordée

Dans cette thèse, nous considérons une association de transporteurs et logisticiens mettant en commun leurs capacités résiduelles de transport et de stockage. Ces acteurs mutualisent à la fois leur matériel et leurs informations dans un but d'optimiser les coûts économiques et l'impact écologique. Les actions des acteurs collaborant sont synchronisées, coordonnées par un gestionnaire représentant l'association. Les offres logistiques considérées sont des prestations de transport et de stockage. A chaque offre est associée une capacité. La particularité de la problématique considérée dans cette thèse est la mutualisation de capacités logistiques résiduelles résultant d'une activité logistique existante. Ainsi, la mise en commun des capacités résiduelles, généralement de faible amplitude horaire ou de faible capacité, définit un nouveau réseau d'offres logistiques sans investissement supplémentaire.

Plus précisément, une offre de transport correspond à la mise à disposition d'un véhicule et de son conducteur sur une fenêtre de temps. A chaque véhicule est associé deux points géographiques de disponibilité et de restitution potentiellement différents. On suppose qu'un véhicule associé à une offre de transport est utilisable sur toute la fenêtre de temps sans risque de violation des règles sur l'amplitude des temps de conduite. Un véhicule peut servir à transporter plusieurs demandes simultanément. Dans l'optique d'un transport intermodal et afin d'intégrer l'ensemble des ressources disponibles sur l'espace urbain considéré dans notre application, plusieurs modes de transports aux caractéristiques bien différentes sont intégrés (véhicules lourds ou légers, métros, navettes fluviales...). Une offre de stockage permet d'immobiliser une quantité définie de marchandises mais aussi de procéder à des opérations de

transbordement sur les quais de la plate-forme. A chaque offre de stockage est associée une fenêtre de temps durant laquelle ces prestations sont réalisables. Nous imposons que le passage de marchandises d'un véhicule à un autre se fasse dans un entrepôt. Le transfert direct de marchandises d'un véhicule à un autre sans infrastructure logistique n'est pas considéré.

Dans le cas ici traité, une demande de prestation logistique consiste au transport d'une quantité de marchandises d'un point de prise en charge à un point de livraison sous contraintes horaires. Les fenêtres de temps de chargement et de livraison appartiennent au même horizon de planification. Les marchandises à transporter sont considérées comme un colis unique, les marchandises contenues dans ce colis ne peuvent être éclatées. Une demande peut consister à faire entrer, sortir ou transiter des marchandises en ville. A chaque demande est associée un revenu dépendant de la quantité à transporter, de la difficulté logistique du transport et de l'anticipation de la demande.

Le but du gestionnaire est d'optimiser l'utilisation du réseau d'offres logistiques défini à partir des capacités résiduelles. Plus précisément, à partir de l'ensembles d'offres et de l'ensemble de demandes, le gestionnaire détermine le plan de distribution ( en terme de flux de marchandises et de véhicules utilisés) engendrant le plus grand revenu. Les demandes non rentables peuvent être rejetées. La satisfaction d'une demande peut faire intervenir un ou plusieurs acteurs de l'association. L'acheminement d'une demande peut faire intervenir plusieurs acteurs logistiques. Dans ce cas, le gestionnaire a en charge la coordination des actions de l'ensemble des logisticiens afin de garantir le bon fonctionnement du système de transport et donc de respecter les exigences du client. Cette coordination temporelle est la condition sine qua none au bon fonctionnement d'une approche mutualisée.

En conclusion, le problème d'allocation de demandes sur ce réseau d'offres logistiques s'inscrit dans un cadre de planification opérationnelle. Il peut être assimilé au problème que rencontre les transporteurs lors de création d'un plan de transport à court et moyen terme.

De plus, en vue d'une application industrielle, les méthodes utilisées doivent permettre l'intégration future de diverses contraintes *métier*. Il s'agit de contraintes de compatibilité telles que :

**Compatibilité demande/véhicule** Certaines marchandises nécessitent des véhicules spécifiques pour leur transport. L'exemple le plus connu est le transport frigorifique.

**Compatibilité véhicule/plate-forme** L'accès des véhicules à une plate-forme peut être restreint. Lorsque la zone de déchargement ne possède pas de quai à la hauteur du véhicule le transbordement de marchandises vers la plate-forme nécessite un hayon sur le véhicule.

## 1.4 Plan de la thèse

Le but de cette thèse est à la fois de modéliser le problème d'allocation de demandes sur un réseau d'offres logistiques mais aussi de proposer une méthode capable de résoudre des instances de grandes tailles en vue d'une application industrielle. Notre problème peut être à la fois abordé par une approche tournée de véhicules mais aussi une approche de conception de réseau. Le chapitre 2 détaille ces deux classes de problème et propose un état de l'art des problèmes similaires au problème d'allocation présenté en section 1.3. Nous proposons une modélisation sous forme de graphe espace-temps multi-couches de l'offre logistique dans le chapitre 3. Cette modélisation permet notamment d'exprimer l'ensemble des possibilités de transport de chaque offre quelque soit le type de véhicule. Contrairement aux problèmes de transport longue distance, une offre de transport en milieu urbain n'est pas forcément restreinte à un transport direct entre deux points. Nous modélisons ensuite le problème d'allocation de demandes comme un problème de flots multi-produits et nous en proposons une formulation mathématique dans le chapitre 4. Nous montrons que cette formulation ne permet pas la résolution d'instances de grandes tailles. Nous proposons une série de techniques de réduction de variables permettant de diminuer la taille du modèle et ainsi de résoudre des instances de taille plus importante. En vue d'une utilisation industrielle, nous complétons au chapitre 5 la formulation mathématique afin de considérer certaines variantes du problème d'allocation de demandes. Le chapitre 6 présente la solution logicielle, intégrant le module d'allocation décrit dans les chapitres précédents, développé dans le cadre du projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable à l'origine de cette thèse.

## CHAPITRE 2

# Etat de l'art

---

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Problème de localisation-routage</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Problème de tournées de véhicules</b>	<b>12</b>
2.2.1	Modélisation	13
2.2.2	Méthode de génération de colonnes	15
2.2.3	Métaheuristiques	16
2.2.4	Problème de tournées de véhicules avec prise en compte de la congestion routière (PTVCR)	16
2.2.5	Problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison (PTVCL)	17
2.2.6	Problème de tournées de véhicules avec utilisation multiple des véhicules (PTVUM)	19
<b>2.3</b>	<b>Problème de conception de réseau</b>	<b>19</b>
2.3.1	Conception de réseau de service	20
2.3.2	Modélisation du problème de conception de service	23
2.3.3	Méthodes de résolution	26
<b>2.4</b>	<b>Positionnement du problème</b>	<b>26</b>

---

On recense dans la littérature deux grandes approches pour traiter la problématique de distribution urbaine de marchandises. La première consiste à la considérer comme un problème de localisation-routage. Etant donné les plates-formes de consolidation déjà implantées, il s'agit de déterminer les plates-formes de transit des marchandises et d'organiser des tournées de véhicules entre ces plates-formes et les clients. Ces deux phases sont inter-dépendantes. Le résultat de l'allocation aux plates-formes sert d'entrée au problème de tournées. Par soucis de simplification, ces deux problèmes sont le plus souvent traités séparément. Un tour d'horizon du problème de localisation-routage est proposé par Boulanger [14], Prodhon [55], Albareda-Sambola [6]. Nous traitons du problème de localisation-routage puis du problème de tournées dans les sections suivantes.

La seconde approche repose sur la conception de réseaux multi-produits. il s'agit alors de constituer un réseau de transport comprenant les lieux de

départ des marchandises, les plates-formes de consolidation et les clients. Une fois ce réseau créé, distribuer des marchandises revient à écouler un flot de son point de départ au client final. Les problèmes de conception de réseau de service seront abordés en section 2.3.1.

## 2.1 Problème de localisation-routage

Le problème de localisation-routage est un problème de logistique impliquant des décisions sur plusieurs niveaux. Un choix doit se faire sur un sous-ensemble de plates-formes à utiliser puis sur l'organisation des circuits des véhicules partant des plates-formes sélectionnées. Il existe de nombreuses applications à ce problème comme la distribution du courrier, la livraison de colis ou la collecte de déchets. Au niveau stratégique, il s'agit de décider des plate-formes à ouvrir. Les décisions du niveau tactique consistent à l'affectation d'une plate-forme aux clients. Au niveau opérationnel, niveau de décision concerné dans cette thèse, il s'agit de constituer des tournées entre chaque plate-forme et les clients qui lui sont associés. Ce problème s'apparente au problème traité en recherche opérationnelle sous le nom de problème de localisation-routage à deux niveaux (LRP-2E) que Madsen et Jacobsen [46] ont été les premiers à traiter. Plus récemment, Prodhon [50] a abordé un LRP-2E tandis que Crainic [19] se focalise sur le problème de tournées de véhicules à deux niveaux.

## 2.2 Problème de tournées de véhicules

Un des problèmes centraux en distribution de marchandises et de façon générale en logistique est le problème de tournées de véhicules (PTV), ou *vehicle routing problem* selon la terminologie anglophone. Ce problème consiste à déterminer un ensemble optimal de circuits de distribution ou de ramassage à partir d'un ou plusieurs dépôts afin de desservir un ensemble de clients ou de fournisseurs. Les différentes variantes existantes tant au niveau du réseau routier, de la flotte de véhicules employée, des contraintes sur la constitution des tournées en font sa richesse. Le livre de Toth et Vigo [62] a permis de faire un survol complet des recherches menées sur le PTV jusqu'à la fin du vingtième siècle.

Dans cette section nous définissons les principaux modèles et méthodes pour les variantes du PTV pertinentes par rapport à la problématique étudiée dans cette thèse. Nous mettons en exergue les modèles et méthodes qui nous apparaissent comme les plus pertinents pour ces différents problèmes.

- le problème de tournées de véhicules avec contraintes de capacité (PTVC)
- le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps (PTVFT)
- le problème de tournées de véhicules avec temps de transport dépendant de la congestion routière (PTVCR)
- le problème de tournées de véhicules avec flotte hétérogène (PTVFH)
- le problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison (PTVCL)

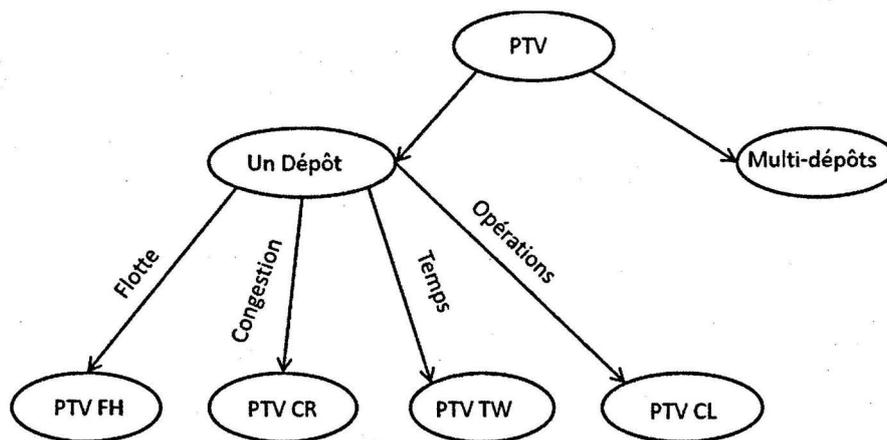


FIG. 2.1 – Classification des PTV en rapport avec notre problématique

Ces problèmes classiques de tournées de véhicules correspondent à des versions épurées de problèmes réels. Lorsque des contraintes additionnelles liées à la particularité des problèmes réels sont prises en compte, on parle de problème de tournées de véhicules riches (PTVR). Drexler [32] propose un état de l'art des PTVR tandis que Doerner [30] recense et compare des approches hybrides pour la résolution de PTVR.

### 2.2.1 Modélisation

Le PTV est défini sur un graphe  $G = (V, A)$ , où  $V$  est l'ensemble des sommets représentant les plates-formes logistiques ou clients et  $A$  l'ensemble des arcs reliant deux sommets de  $V$ . Dans sa version avec gestion des capacités, à chaque client  $V_i \in V$  est associée une quantité  $Q_i$  de marchandises à transporter. À chaque véhicule est associée une quantité maximale  $Q$  de marchandises pouvant être chargée. Dans le cas du PTVFH, la quantité maximale  $Q$  varie selon le véhicule.

### 2.2.1.1 Modèle de flot à 3 indices

Soit la variable binaire  $x_{ijk}$  égale 1 si le véhicule  $k$  parcourt l'arc  $(i, j) \in A$  et  $c_{ij}$  le coût associé.

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{(v_i, v_j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad (2.1)$$

$$sc : \sum_{k=1}^m \sum_{v_i \in V} x_{ijk} = 1 \quad v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{v_i \in V} x_{ilk} = \sum_{v_j \in V} x_{ljk} \quad v_l \in V \setminus \{v_0\}, 1 \leq k \leq m \quad (2.3)$$

$$\sum_{v_j \in V \setminus \{v_0\}} x_{Ojk} = 1 \quad 1 \leq k \leq m \quad (2.4)$$

$$\sum_{v_i \in V \setminus \{v_0\}} x_{iOk} = 1 \quad 1 \leq k \leq m \quad (2.5)$$

$$\sum_{v_j \in V \setminus \{v_0\}} \sum_{v_j \in V} q_i x_{ijk} \leq Q \quad 1 \leq k \leq m \quad (2.6)$$

$$\sum_{v_i \in S, v_j \notin S} x_{ijk} \geq \sum_{v_j \in V} x_{ljk} \quad S \subset V \setminus \{v_0\}, l \in S, 1 \leq k \leq m \quad (2.7)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (v_i, v_j) \in A, 1 \leq k \leq m \quad (2.8)$$

Les équations (2.1) assurent la visite de chaque client. Les contraintes (2.2) assurent la continuité du chemin des véhicules pendant que (2.3) et (2.4) imposent le dépôt comme point de départ et final de la tournée. Les inégalités (2.5) sont les contraintes de capacité et (2.6) les contraintes d'élimination de sous-tours. Les contraintes (2.7) imposent la binarité des variables de transport.

La variante PTVFT du PTVC consiste à imposer une fenêtre de temps  $[a_i, b_i]$  de visite au client  $i$ . Soit  $u_{ik}$  l'heure de passage du véhicule  $k$  chez le client  $i$ . On peut remplacer les contraintes (2.6) par :

$$a_i \sum_{v_j \in V} x_{ijk} \leq u_{ik} \leq b_i \sum_{v_j \in V} x_{ijk} \quad v_i \in V, 1 \leq k \leq m \quad (2.9)$$

$$u_{ik} + s_i + t_{ij} - u_{jk} \leq T(1 - x_{ijk}) \quad (v_i, v_j) \in A, 1 \leq k \leq m \quad (2.10)$$

$$u_{ik} \geq 0 \quad v_i \in V, 1 \leq k \leq m \quad (2.11)$$

### 2.2.1.2 Modèle mathématique de partitionnement d'ensemble

Dans la formulation introduite par Balinski et Quandt [10] appelée formulation chemin, les variables sont des tournées. Ce type de formulation permet par rapport à une formulation classique de diminuer nettement le nombre de variables et contraintes. Soit  $T$  l'ensemble de toutes les tournées réalisables. A chacune des tournées  $t$  de cet ensemble est associé un coût  $c_t$  ainsi que l'ensemble des clients visités par la tournée  $t$ . Le coefficient binaire  $a_{it}$  est égal à 1 si le client  $i$  est visité par la tournée  $t$ .

$$\min \sum_{t \in T} c_t x_t \quad (2.12)$$

$$sc : \sum_{t \in T} a_{it} x_t = 1 \quad v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (2.13)$$

$$\sum_{t \in T} x_t = m \quad (2.14)$$

$$x_t \in \{0, 1\} \quad t \in T \quad (2.15)$$

Comme le montre la fonction objectif (2.12), le but est de minimiser les coûts de transports. Dans ce modèle on distingue deux grandes classes de contraintes. La première (2.13) assurant la visite de chaque client. La seconde (2.14) imposant la taille de la flotte. Les contraintes de binarité (2.15) représentent la sélection ou non d'une tournée. On notera que les contraintes d'égalité (2.14) peuvent être transformées en contraintes d'inégalité ce qui ne dénature pas le problème.

## 2.2.2 Méthode de génération de colonnes

L'une des approches les plus efficaces pour résoudre les PTV de façon exacte est d'avoir recours à un algorithme de type génération de colonnes. Cette approche a notamment été mise en œuvre par Desrochers, Desrosiers et Solomon [28] et plus récemment par Baldacci, Christofides et Mingozzi [9]. Elle repose sur la formulation du PTVFT sous forme de partitionnement d'ensemble et nécessite la connaissance de l'ensemble  $T$  des tournées réalisables. Dans cette formulation, une tournée correspond à un chemin dans un graphe. Le nombre de chemins dans un graphe étant potentiellement exponentiel, il en est de même pour le nombre de tournées et donc de variables. L'utilisation d'un algorithme de résolution comme le simplexe ne peut être envisagé pour ce modèle puisque les variables de ce dernier ne peuvent être explicitées. L'idée de la génération de colonnes est d'appliquer l'algorithme avec un sous ensemble de variables  $T'$  inclus dans  $T$ . Le problème ainsi résolu est appelé

Problème Maître Restreint (PMR). Le principe de la génération de colonne est de faire entrer progressivement des variables dans  $T'$  afin d'améliorer la qualité de la solution obtenue.

Le terme génération de colonnes provient de l'association d'une variable à une colonne du tableau dans l'algorithme du simplexe. En effet, augmenter l'ensemble  $T'$  correspond pour la méthode simplexe à la création de nouvelles colonnes. En pratique, à une itération donnée, la relaxation linéaire du Problème Maître Restreint est résolue. Puis à l'aide des variables duales, une tournée ou colonne de coût réduit négatif est recherchée. L'identification d'une telle colonne s'effectue grâce à la résolution d'un sous problème de recherche de chemin de coût négatif dans un graphe repondéré. Ce sous problème est aussi appelé problème esclave. Baldacci, Toth et Vigo [8] proposent un survol des approches exactes récentes pour le VRP.

### 2.2.3 Métaheuristiques

Comme nous l'avons vu précédemment, les chercheurs ont proposé des approches exactes qui ne permettent de résoudre que des instances de taille modeste. Lorsque l'on considère des cas plus complexes faisant intervenir des contraintes multiples ou que l'on doit résoudre des problèmes de plus grandes tailles, des approches heuristiques sont nécessaires. Depuis les années soixante, de nombreuses heuristiques dites classiques, c'est à dire déterministes, ont été proposées par les chercheurs. A cet ensemble de méthodes se sont adjointes depuis la fin des années quatre-vingts des approches non déterministes basées sur les métaheuristiques. Aujourd'hui, les heuristiques classiques ne sont plus compétitives ni en termes de qualité de solution ni en termes de temps de calcul.

Parmi les métaheuristiques ayant conduit aux adaptations les efficaces pour le PTV, on peut citer, les algorithmes génétiques, la recherche tabou et la recherche par voisinage variable. Gendreau, Potvin, Bräumlaysy, Hasle et Løkketangen [39] proposent un survol des métaheuristiques utilisées pour la résolution de VRP.

### 2.2.4 Problème de tournées de véhicules avec prise en compte de la congestion routière (PTVCR)

La plupart des réseaux de transports urbains sont confrontés à des niveaux élevés d'utilisation qui par moment entraînent une congestion du trafic. Cette congestion a un impact sur la vitesse des véhicules et donc sur leur temps de parcours. D'autres facteurs comme la capacité de la route, l'état de la route, les conditions climatiques peuvent aussi influencer sur la vitesse à adopter. Le

PTVCR est un problème récemment abordé en recherche opérationnelle. L'une des premières approches Malandraki et Daskin [48] proposée en 1992, considère le temps de parcours en fonction de la distance et de la période de la journée où le transport est prévue. Les auteurs mettent en évidence la variabilité de la densité du trafic générée par des accidents ou autres événements imprévisibles. Cependant, le principe du « premier parti premier arrivé » (FIFO : « first in first out » dans sa terminologie anglophone) n'est pas toujours respecté. En 2003, Ichoua [45] propose un modèle garantissant que pour deux véhicules effectuant le même trajet, le premier parti arrivera nécessairement avant le second. Dans le même temps, Donati [31] montre l'importance du choix de l'heure de départ en plus de l'optimisation du chemin à parcourir. En contraste avec Ichoua, Haghani and Jung [44] modélise les temps de parcours en tant que fonction linéaire. En 2006, Tagmouti, Gendreau, Potvin [59] propose une approche exacte basée sur la génération de colonne permettant de résoudre des instances allant jusqu'à une trentaine de clients. Dernièrement, Van Woensel [63] propose de modéliser la congestion du trafic sous forme de file d'attente (FIFO). Il compare dans cet article, cette nouvelle modélisation avec celles déjà existantes.

### 2.2.5 Problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison (PTVCL)

Le problème de collecte et de livraison possède de nombreuses variantes. Fondamentalement, deux classes de problèmes peuvent être distinguées. La première où il s'agit de transports entre clients. De la marchandise peut être livrée ou collectée à chaque client (ou point d'arrêt). Ici, il n'y a pas la notion d'entreposage. A la fin d'une tournée, la véhicule est vide. Au départ de la tournée, le véhicule ne contient pas de marchandises. Au fur et à mesure de la tournée, des marchandises sont chargées dans le véhicule et sont livrées en un autre point de la tournée. La seconde classe traite d'un transport entre un dépôt et des clients. La notion d'entreposage est ici présente. Il s'agit de transférer (collecte ou livraison) de la marchandise entre un ou plusieurs dépôts et des clients. Cette classe comporte quatre variantes du PTV avec collecte et livraison. On y retrouve dans leur terminologie anglophone :

- le Vehicle Routing Problem with Clustered Backhauls (VRPCB) pour lequel, les livraisons ont plus d'importance que les collectes et sont donc prioritaires lors de la planification.
- le Vehicle Routing Problem with Mixed linehauls and Backhauls (VRPMB) pour lequel, les tournées comportent à la fois des clients à livrer et à collecter sans distinction de priorité. Dans ces deux premières variantes, un client ne peut à la fois demander des opérations de collecte

et de livraison.

- le Vehicle Routing Problem with Divisible Delivery and Pickup (VRPDDP). Dans ce cas, la livraison et/ou la collecte à effectuer chez le client peut être réalisée en plusieurs services.
- le Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup (VRPSDP) ou problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison simultanées dans sa terminologie francophone pour lequel, le client peut demander à la fois des opérations de collecte ou de livraison, néanmoins chaque client ne peut être visité qu'une fois. Contrairement à la variante précédente, on ne peut donc envisager un passage chez le client pour une collecte et un autre pour une livraison. Ce problème est proche du PTV avec collecte et livraison fractionnées (Vehicle Routing Problem with Divisible Delivery and Pickup dans sa terminologie anglophone). Dans les deux cas, des opérations de collecte et/ou de livraison peuvent être effectuées chez le client. Néanmoins, dans le cas du PTVCLS, chaque client ne peut être visité qu'au plus une fois.

En 1989, Min [49] a été le premier à travailler sur ce problème. En 2002, Angelelli et Mansini [7] proposent un algorithme exact de type *branch and price* pour le PTVCLS avec fenêtre de temps. Cet algorithme repose sur un modèle couverture. Le sous-problème de *pricing* est un problème de plus court chemin contraint par une fenêtre de temps et par la capacité des véhicules. L'obtention d'une solution entière se fait par un algorithme de *branch and bound*. Cet algorithme résout des instances comportant jusqu'à 20 clients. Angelelli et Mansini [7] sont actuellement les seuls à avoir travaillé sur la variante du PTVCLS avec fenêtres de temps. En 2006, Tang Montané and Galvao [60] proposent un algorithme tabou pour le PTVCLS. La construction d'une solution initiale appelle l'algorithme de Gendreau, Laporte et Vigo [38] pour la résolution du problème du voyageur de commerce avec collecte et livraison. A chaque itération, la meilleure solution réalisable non-tabou est choisie. L'opérateur 2-opt vient améliorer cette solution. En 2007, Bianchessi et Righini [13] proposent plusieurs techniques de construction et d'amélioration pour la recherche tabou. Plusieurs combinaisons d'échange d'arcs, de nœuds et d'exploration du voisinage sont intégrées. Ces deux métaheuristiques obtiennent les meilleurs résultats sur les benchmarks du PTVCLS. L'étude de Parragh, Doerner et Hartl [52] met en évidence l'heuristique de Dethloff [29] proposée en 2001, pour sa rapidité à fournir de bonnes solutions. Il propose une heuristique d'insertion la moins coûteuse. Sa notion de coût intègre la distance mais aussi la capacité restante.

### 2.2.6 Problème de tournées de véhicules avec utilisation multiple des véhicules (PTVUM)

Dans ce problème, un véhicule peut effectuer plusieurs tournées, l'objectif de ce problème est de rentabiliser au maximum l'utilisation d'un véhicule. La première possibilité est d'enchaîner plusieurs tournées avec le même véhicule, la seconde consiste à allonger une tournée en se servant des plates-formes intermédiaires pour ravitailler le véhicule en cours de tournée. Dans son manuscrit de thèse, Theypaz [61] propose une formulation du problème ainsi qu'un exemple d'application.

## 2.3 Problème de conception de réseau

Un réseau définit un ensemble d'équipements interconnectés les uns avec les autres. Il permet de faire circuler des éléments entre ces équipements selon des règles bien définies. Les plus connus sont les réseaux de transport et de télécommunication. Les problèmes de conception de réseau sont incontournables lors de la mise en place de réseaux performant en terme de qualité de service mais aussi de coût. Ce problème consiste à faire transiter du flux dans un réseau qui selon l'application, peut être à définir, en développement ou existant. Il s'agit d'écouler le flux en minimisant les coûts de transit et les coûts de développement du réseau. Dans le cas où le réseau est fixé, l'installation de nouveaux équipements et l'ajout de connexions entre équipements ne sont pas autorisés.

Le problème de conception de réseau peut se définir sur un graphe  $G = (N, A)$  orienté (ou non).  $N$  est l'ensemble des sommets, un sommet représentant un équipement.  $A$  est l'ensemble des arcs (arêtes) représentant les liaisons possibles entre les équipements. En pratique, la quantité de flux  $u_{ij}$  pouvant transiter entre deux sommets  $i \in N$  et  $j \in N$  est souvent limitée. Un ensemble  $P$  de demandes doit être satisfait. Pour chaque demande  $p \in P$ , une quantité  $w^p$  doit être transportée de son origine  $o^k$  à sa destination  $d^k$ . Le coût pour faire transiter le flux de  $p \in P$  sur l'arc  $(i, j) \in A$  est noté  $CV_{ij}^p$ . Le coût fixe d'ouverture de cet arc est noté  $CF_{ij}$ . L'objectif est de minimiser les coûts variables d'écoulement du flux et les coûts fixes de création du réseau. Notons  $x_{ij}^p$  le flot de  $p \in P$  circulant sur l'arc  $(i, j) \in A$  et  $y_{ij}$  la variable de conception égale à 1 si l'arc  $(i, j) \in A$  est ouvert, 0 sinon.

$$\min \sum_{(ij) \in A} CF_{ij} y_{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} CV_{ij}^k x_{ij}^k \quad (2.16)$$

$$sc : \sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} w^k & si & i = o^k \\ -w^k & si & i = d^k \\ 0 & sinon \end{cases} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (2.17)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (2.18)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (2.19)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (2.20)$$

Les égalités (2.17) sont des contraintes de flot assurant le transport de marchandises de son origine jusqu'à sa destination. Les inégalités (2.18) imposent l'ouverture d'un arc pour y faire transiter du flot et assurent le respect des contraintes de capacité sur les arcs.

Les applications et variantes de ce problèmes sont nombreuses. Le domaine de la télécommunication en est un exemple. En analogie avec la modélisation précédente, les arcs sont les équipements en charge transmission de signaux. La conception de réseau de télécommunication vise à répondre à deux problèmes. Le premier est le routage des connexions au travers un réseau de fibre existant. Le second est celui du coût des équipements nécessaires aux extrémités des connexions et aux nœuds intermédiaires. La capacité de chaque arc correspond à la bande passante qu'il peut transporter. Le transport de marchandises est l'application la plus souvent rencontrée dans le domaine de la conception de réseau. Les sommets représentent des entrepôts ou plates-formes. Un arc correspond à une infrastructure de transport (route, voie ferrée, voie fluviale...). La conception d'un réseau de transport est un peu plus complexe que celle d'un réseau de télécommunication. En plus de définir le parcours des marchandises sur le réseau, il faut affecter une ou plusieurs ressources pour la réalisation de ces transports. On parle dans ce cas de conception de réseau de service.

### 2.3.1 Conception de réseau de service

En reprenant la définition de Schrenk [57], un service est défini comme étant un trajet spécifique (d'un sommet de départ vers un sommet d'arrivée) à des horaires spécifiques (ou avec une certaine fréquence) avec une qualité de service.

Un état de l'art de la conception de service pour le transport de marchandises est proposé par Crainic [20] et plus récemment par Wieberneit [64].

Ces travaux considèrent des problématiques de transport longue distance de marchandises [15] [23] [65] et plus généralement des systèmes de transport avec consolidation [18] [17]. La littérature du domaine a montré que les variantes sont nombreuses. Sans vouloir être exhaustif, nous recensons ci-dessous certaines classes possibles du problème de conception de réseau portant sur :

#### **L'origine/destination de la demande**

Dans le cas général, une demande consiste à écouler une ou plusieurs marchandises à travers le réseau. La demande est notamment caractérisée par un point de départ et d'arrivée du produit. En pratique, les demandes de transport peuvent être un peu plus complexes. Considérons un producteur de fruits et légumes dont l'exploitation se situe en  $o$  devant approvisionner ses  $k$  points de ventes. L'une des solutions est de considérer cette demande à destinations multiples comme  $k$  demandes à origine et destination unique. Il peut aussi arriver qu'au moment où l'on définit la demande, le point d'origine ou de destination soit indéterminé. Ces variantes possibles sur la définition de la demande seront abordées au chapitre 5.

#### **La notion de coût**

Selon l'application la notion de coût de conception de réseau peut varier. Concernant les applications de transport de marchandises, le coût pour faire transiter le flot d'une demande sur un arc est généralement linéaire. Il dépend du type de véhicule effectuant le transport et de la quantité de marchandises. Spécifiquement dans les applications transport, l'acheminement d'un flot nécessite une ressource de transport pour déplacer les marchandises. Un coût fixe d'utilisation d'un véhicule peut être considéré notamment pour des problèmes visant à minimiser la taille de la flotte. Dépendant de la possibilité de construire de nouvelles plates-formes logistiques ou d'augmenter la capacité des plates-formes existantes, des coûts fixes peuvent venir s'ajouter au coût total.

#### **L'aspect temporel**

Lorsque la notion de temps entre en compte dans la prise de décision, on parle de conception de réseau dynamique. Pour les applications de transport multi-modal ou longue distance par exemple, la coordination temporelle des flux est un élément essentiel pour la performance du système. Une dimension temporelle est associée au réseau. L'horizon de temps est découpé en un ensemble de périodes. Le réseau est représenté sous la forme d'un graphe espace-temps. Par conséquent, la taille du réseau augmente proportionnellement au nombre de périodes considérées. La Figure 2.2 illustre un réseau pour lequel l'horizon de temps est découpé en 5 périodes et l'espace agrégé en 5 zones. Un noeud de ce graphe représente une position spatio-temporelle.

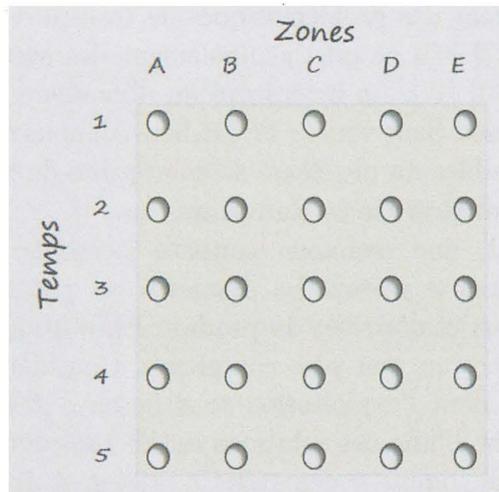


FIG. 2.2 – Le graphe espace-temps

### Le nombre de couches du réseau

La conception de réseau multi-couches nous vient des télécommunications. Dans une représentation simplifiée un réseau de télécommunication peut être représenté sur deux couches du même type (client et transport). Différents type de flots circulent sur ces couches. Des interfaces sont en charge de la communication entre les différentes couches.

Spécifiquement à la conception de réseau de service, l'acheminement d'un flot de marchandises sur un arc nécessite l'affectation d'un véhicule pour réaliser le transport. Les caractéristiques (durée, coût, qualité de service ...) peuvent varier selon le véhicule choisi. Une solution pour prendre en charge ces caractéristiques est de considérer un réseau de  $k$  couches parallèles où  $k$  est le nombre de véhicules. Ces couches sont interconnectées afin de permettre le transfert de marchandises d'un véhicule à un autre. Chacune de ces couches est construite en prenant en compte les caractéristiques du véhicule concerné.

### L'incertitude des données

La plupart des modèles de conception de réseau sont déterministes. Les paramètres tel que l'offre, la demande, les coûts sont fixés. Ils proviennent généralement d'analyse de données passées ou d'estimation de l'activité future. Beaucoup de cas réels se reposent sur des données telles que la demande, non connues exactement. En pratique plusieurs scénarios ayant une priorité d'occurrence donnée sont créés. Par exemple trois scénarios représentant le meilleur cas, le cas moyen et le pire des cas.

### La répétition du plan de transport

Certaines applications de transport ont la particularité d'avoir leur activité redondante. Par exemple, la tournée effectuée par votre facteur est répétée de jours en jours sans être modifiée. En pratique le service est défini sur un horizon de temps correspondant à la durée d'une fréquence (une journée pour cet exemple) puis répété sur les horizons suivants. Pour ce faire, de nouvelles contraintes apparaissent. Un bon enchaînement des services suppose un remplacement des véhicules en fin d'horizon. Le nombre de véhicules du même type de chaque terminal doit être égal au début et à la fin de l'horizon de temps. La Figure 2.3 illustre deux tournées dont le point de départ géographique de la première correspond au point d'arrivée de la seconde et inversement.

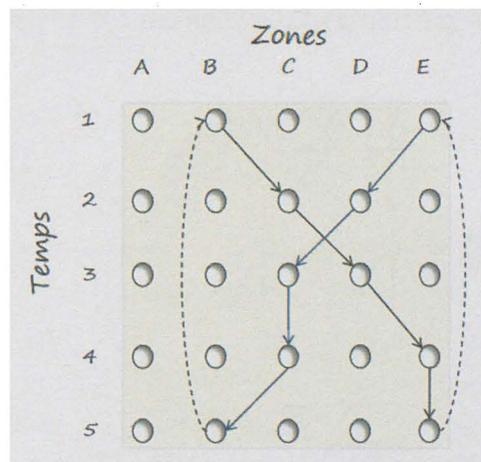


FIG. 2.3 – Répétition du plan de transport

### 2.3.2 Modélisation du problème de conception de service

Andersen [3] propose quatre formulations en programme linéaire en nombres entiers mixte (MIP) pour les problèmes de conception de service. Ces problèmes font intervenir deux types de variables de décision. Les variables de flot de véhicules et les variables de flot de marchandises. Chacune de ces variables peut se définir sur les arcs ou sur des chemins du réseau. Dans les sections suivantes, nous nous focalisons sur deux formulations pour lesquelles les variables de flots sont définies sur les arcs. Une telle définition

permet une intégration plus simple des transbordements. Schrenk, Crainic, Cung et Finke[58] proposent une comparaison de ces deux formulations pour un problème de conception de réseau de service dynamique. Teypaz [61] suggère une modélisation agrégée des modèles classiques visant à réduire la taille du problème. Concrètement, les produits ayant un sommet de départ ou d'arrivée commun sont regroupés. Ses résultats ont montré que la résolution des modèles complets restent globalement plus efficace.

### 2.3.2.1 Formulation arc

La formulation arc reprend la modélisation du problème de conception de réseau défini dans la section 2.3. Soit  $V$  l'ensemble des véhicules. Chaque véhicule  $v \in V$  possède une capacité notée  $u_v$ . Contrairement au problème de conception de réseau, un élément de transport (véhicule) est en charge de l'écoulement du flot sur un arc. La variable binaire de conception  $y_{ijv}$  est égale 1 si l'arc  $(i, j) \in A$  est parcouru par le véhicule  $v \in V$ , 0 sinon.

$$\min \sum_{v \in V} C_{F_{ijv}} y_{ijv} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{V_{ij}^k} x_{ij}^k \quad (2.21)$$

$$sc : \sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} w^k & si \quad i = o^k \\ -w^k & si \quad i = d^k \\ 0 & sinon \end{cases} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (2.22)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_v y_{ijv} \quad \forall (i, j) \in A, \forall v \in V \quad (2.23)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N} y_{ijv} - \sum_{v \in V} \sum_{j \in N} y_{jiv} = 0 \quad \forall i \in N \quad (2.24)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (2.25)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (2.26)$$

Les contraintes (2.22) et (2.23) sont identiques à celles du modèle de conception de réseau. Les contraintes (2.24) assurent un nombre de véhicules sortant de chaque terminal du réseau égal au nombre de véhicules entrant. Cette égalité induit des cycles. On retrouve notamment ces contraintes sur des problèmes de conception de réseau de service avec fréquence. Pour cette classe de problème, le repositionnement et la rotation des véhicules en fin de journée font partie des décisions importantes au bon fonctionnement du système.

Ces contraintes ont été utilisées pour la modélisation de la conception d'un réseau de services de transport express de fret par voie aérienne [11], par la route [36] et pour une application de services de transport par voie ferrée [53].

Dans la majorité des cas réels, la taille flotte de véhicules est limitée à  $V_{MAX}$ . Introduire cette restriction revient à ajouter au modèle la contrainte suivante :

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{v \in V} y_{ijv} \leq V_{MAX} \quad (2.27)$$

### 2.3.2.2 Formulation chemin

Cette formulation correspond à une définition sur les arcs des variables de flot de marchandises tandis que les variables de flot de véhicules sont définies sur des chemins. Soit  $C$  l'ensemble des chemins potentiels des véhicules, la variable de design  $g_v^c$  égale à 1 si le chemin  $c \in C$  est réalisé par le véhicule  $v \in V$ , 0 sinon. On note l'indicateur  $r_{ij}^c$  égal à 1 si l'arc  $(i, j) \in A$  est parcouru par le chemin  $c \in C$ , 0 sinon.

$$\min \sum_{v \in V} CF g_v^c + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} CV_{ij}^k x_{ij}^k \quad (2.28)$$

$$sc : \sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} w^k & si \quad i = o^k \\ -w^k & si \quad i = d^k \\ 0 & sinon \end{cases} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (2.29)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} r_{ij}^c g_v^c - \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} r_{ji}^c g_v^c = 0 \quad \forall j \in N \quad (2.30)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} u_v r_{ij}^c g_v^c \quad \forall (i, j) \in A \quad (2.31)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{v \in V} g_v^c \leq V_{MAX} \quad (2.32)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (2.33)$$

$$g_v^c \in \{0, 1\} \quad \forall c \in C, \forall v \in V \quad (2.34)$$

La fonction objectif (2.28) vise à minimiser la somme des coûts fixes de conception et des coûts variables de transport. Les égalités (2.29) assurent l'acheminement des flots de marchandises de leur point de départ à leur point d'arrivée. On retrouve les contraintes de *design balance* (2.30). Les inégalités (2.31) assurent qu'un véhicule de capacité suffisante est bien affecté à chaque mouvement de marchandises tandis que les inégalités (2.32) contrôlent la taille de la flotte.

### 2.3.3 Méthodes de résolution

La littérature du problème de conception de réseau met en évidence plusieurs approches de résolution. Endong [33] décrit plusieurs méthodes appropriées à la résolution des problèmes de conception de réseau avec capacité. On y retrouve notamment les méthodes de séparation et évaluation. Elles sont les plus utilisées lorsqu'il s'agit de résoudre ce type de problème. Un algorithme de séparation évaluation nécessite l'amélioration de la borne inférieure obtenue par relaxation. Gendron et Crainic [40] comparent les relaxations linéaires, relaxations lagrangiennes sur les formulations arc et chemin. Les approches basées une relaxation lagrangienne paraissent plus prometteuses que celles basées sur une relaxation linéaire. Gendron et Crainic [41] proposent une approche pour laquelle la borne inférieure est obtenue par une méthode de sous-gradient appliquée au dual lagrangien. Kim et Pardalos [47] proposent une approche basée sur un algorithme de Slope scaling. Cette approche permet de trouver rapidement une bonne solution. Crainic [27] améliore cette approche de base en y intégrant une perturbation de la mémoire long terme visant à échapper à l'optimum local et une recherche ellipsoïdale pour l'amélioration des solutions obtenues par le Slope scaling. Sur un problème de conception de service, les tests réalisés montrent l'importance de ces deux phases d'intensification et de diversification. Pour un problème de conception de réseau de service avec gestion de flotte, Schrenk [57] propose une formulation pour laquelle les variables de conception sont exprimées sur des chemins. Avec ce type de formulation, pour des instances de taille plus grande, la génération exhaustive de tous les chemins potentiels engendre très rapidement des modèles de très grande taille. Ces modèles ne peuvent pas être résolus directement. L'auteur propose un algorithme de génération de colonnes. Les résultats obtenus semblent montrer le potentiel d'une telle approche. Espinoza [34] propose une formulation *arc* d'un problème de transport aérien à la demande. Un ensemble de techniques de réduction de la taille du réseau est proposé dans le but de réduire taille de la formulation. Afin de résoudre des instances de plus grande taille, Espinoza [35] propose une approche de recherche locale parallèle.

## 2.4 Positionnement du problème

L'objectif de cette section est de détailler les principales caractéristiques du problème étudié dans cette thèse ainsi que les attentes spécifiques liées à l'application industrielle.

**Fenêtre de temps** A chaque demande de transport sont associées deux fenêtres de temps de chargement et de livraison de marchandises. La

considération de la dimension temporelle est indispensable à l'élaboration du plan de transport performant en terme économique et de qualité de service. Ces contraintes temporelles apparaissent régulièrement dans des problèmes de tournées de véhicules. On parle de tournées de véhicules avec fenêtre de temps. Cette classe est détaillée en section 2.2.1.1. En revanche, pour les problèmes de conception de réseau, prendre en considération ces contraintes temporelles nécessite une discrétisation du temps. On parle de conception de service dépendant du temps. Dans ces problèmes, le réseau de transport est dupliqué autant de fois que le nombre de périodes considérées. Ainsi construit, le réseau espace-temps peut très vite devenir de grande taille et complexifie la résolution du problème de planification associé.

**Origine/destination de la demande** Une demande peut consister à faire entrer, sortir ou transiter de la marchandise dans la ville. Potentiellement, chaque client ou plate-forme de la zone urbaine peut servir de point de départ ou d'arrivée d'une demande de transport. La représentation de la demande faite en conception de réseau sous forme d'une matrice origine-destination est adapté à cette caractéristique. En revanche, pour les problèmes de tournées de véhicules, il s'agit d'approvisionner un ensemble de clients à partir de dépôts ou de collecter les biens des clients pour les ramener au(x) dépôt(s). Néanmoins l'extension PTVCL développée en section 2.2.5 permet de procéder à des opérations de collecte et de livraison au sein d'une même tournée.

**Utilisation des véhicules** Dans le cadre de la création de plan de transport non périodique, et compte tenu de la variabilité de l'activité logistique, il est possible qu'une ressource logistique (véhicule) soit inutilisée. Un véhicule restant au dépôt n'engendre pas de coût variable (salaire, kilomètres ...). De plus, une des caractéristiques du problème de planification abordé dans cette thèse est la fenêtre de temps au cours de laquelle le véhicule peut être utilisé. En fin de fenêtre, chaque véhicule doit être repositionné. En dehors de cette fenêtre, le véhicule n'est pas utilisable. Un véhicule peut être disponible lors de plusieurs fenêtres de temps disjointes. Il s'agit du cas où un véhicule est utilisable en début de journée, réalise une tournée et redevient utilisable une fois le dernier client visité. La plupart des modélisations du PTV permettent l'ajout de contraintes sur la durée d'utilisation d'un véhicule. Rendre le véhicule indisponible sur certaines tranches horaires paraît plus complexe.

**Transbordement** En plus d'apporter une aide à la décision pour le problème de planification détaillé en section 1.3, le partenaire industriel a exprimé une attente concernant la façon dont une marchandise peut être acheminée.

Plusieurs types de scénarios de distributions d'une demande sont attendus.

– *La livraison directe*

La demande de transport est exclusivement affectée à un véhicule. Aucune autre prestation n'est réalisée entre le chargement et la livraison. Ce type de distribution est le plus simple à mettre en place et permet une certaine souplesse. Elles sont utilisées notamment lors d'absence de structure logistique organisée. En contre partie, le niveau de charge des véhicules n'est pas maîtrisé et les coûts de revient sont élevés.

– *La livraison groupée*

Elle a pour vocation la massification du transport. On en recense deux types. Le *multipick* consiste à charger les marchandises chez les fournisseurs d'un client puis de procéder à sa livraison. A l'opposé, lorsque qu'une tournée est organisée partant du fournisseur et allant livrer un ensemble de clients, on parle de *multidrop*. Dans ce cas, toutes les combinaisons de distribution sont possibles. Considérons trois clients ayant chacun un fournisseur différent. La figure représente deux tournées approvisionnant ces trois clients.

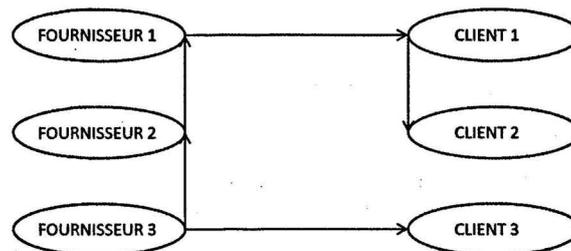


FIG. 2.4 – Tournée d'approvisionnement

– *La livraison avec acteurs multiples*

Le schéma de distribution de marchandises tel qu'il est présenté en figure 2.5 fait intervenir plusieurs acteurs et potentiellement plusieurs modes de transport. Dans un premier temps deux véhicules distincts acheminent les marchandises des fournisseurs vers la plate-forme. Dans un second temps, quatre véhicules transportent les marchandises jusqu'aux clients. Le transbordement est une étape coûteuse mais essentielle lorsqu'il y a transfert de marchandises entre acteurs. Bien que ce type de schéma soit privilégié en raison de l'amplitude horaire des offres, les livraisons directes ou groupées ne sont pas à exclure. La diversité des scénarios de distribution envisagé apparaît plus facilement

intégrable dans une approche conception de réseau qu'une approche tournée de véhicules.

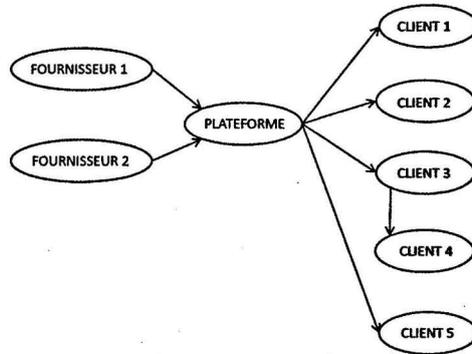


FIG. 2.5 – Distribution multi-acteurs

**Transport multimodal** Dans l'optique d'intégrer l'ensemble des ressources logistiques disponibles sur l'espace géographique, l'ensemble des modes de transports et leurs caractéristiques bien différentes sont à intégrer (véhicules lourds ou légers, métros, fluvial...). Cette intégration paraît plus aisée avec une approche conception de réseau qu'une approche tournées de véhicules [12].

**Objectif** A chaque demande est associé un revenu. Ce revenu dépend des caractéristiques du transport à réaliser. Nous n'intégrons pas les coûts variables de transport dépendant de la qualité de la planification dans la fonction objectif. Acheminer une demande permet de créditer son revenu. L'objectif du problème d'allocation est de déterminer l'ensemble des demandes à acheminer de façon à maximiser le revenu.

Etant donné les caractéristiques du problème d'allocation de demandes, nous abordons ce problème avec une approche conception de réseau. Le fait d'avoir des scénarios de distribution multiples et potentiellement intermodaux ont été des éléments importants dans notre décision. De plus, l'utilisation potentiellement fragmentée des véhicules est un point difficilement intégrable avec une approche PTV alors que plus aisée avec une approche conception de réseau. D'un point de vue applicatif, le graphe espace-temps modélisant le réseau logistique permet au gestionnaire d'avoir une connaissance plus avancée ainsi qu'une représentation visuelle du réseau logistique.



# Modélisation du réseau logistique

---

## Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Offre de transport . . . . .</b>	<b>34</b>
3.1.1	Caractérisation de l'offre résiduelle d'un véhicule . . . . .	35
<b>3.2</b>	<b>Service . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.3</b>	<b>Plates-formes . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Offre de stockage . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>3.5</b>	<b>Transbordement . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>3.6</b>	<b>Modélisation de la demande . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>3.7</b>	<b>Représentation du réseau . . . . .</b>	<b>42</b>

---

Ce chapitre présente notre cadre de modélisation du problème de transport détaillé en section 1.3. Succinctement, il s'agit d'un problème de transport mutualisé de marchandises. Contrairement à ce qui se fait aujourd'hui, la mise en commun de capacités résiduelles fait que transporter une demande peut faire intervenir plusieurs acteurs et modes de transport. Pour intégrer cet aspect novateur en logistique urbaine, nous traitons ce problème comme un problème de flot multi-produits défini sur un graphe espace-temps multi-couches. Dans un premier temps, nous proposons une modélisation de l'offre logistique. Pour chaque type d'offre, la construction du réseau est détaillée dans un deuxième temps. Finalement, nous indiquons la représentation de la demande et du réseau logistique.

Les modèles de conception de réseau [2] [3] [4] [5] détaillés en section 2.3 reposent sur un réseau physique composé de plates-formes logistiques, de lieux de livraison et de liaisons entre ces éléments. Guélat et al [43] se reposent, pour un problème de planification stratégique, sur une agrégation de l'espace urbain en un ensemble de zones. Cette modélisation est compatible avec la représentation géographique faite de la zone d'activité par le gestionnaire de l'association d'acteurs logistiques. Pour lui, l'espace urbain est agrégé en un ensemble de zones définies sur des critères socio-économiques. Chacune des zones est représentée par son centroïde. Un centroïde est une forme de représentation d'un espace par un point. La demande est représentée par une

matrice origine-destination. La construction de cette matrice et plus globalement la génération des instances sont détaillées au chapitre 4.

Le réseau routier de transport est modélisé par un graphe non orienté  $G^r = (Z^r, A^r)$  où  $Z^r$  est l'ensemble des centroïdes matérialisant les zones géographiques et  $A^r$  est l'ensemble des liaisons entre ces centroïdes. La pondération d'une arête  $(i, j) \in A^r$  correspond à la durée d'un transport entre les centroïdes de la zone  $i$  et de la zone  $j$ . Dans l'exemple présenté en 3.1, l'espace géographique est découpé en cinq zones, six liaisons sont possibles. Les temps de parcours entre deux zones liées est d'une unité de temps. Les exemples présentés dans ce chapitre reposent sur ce réseau physique.

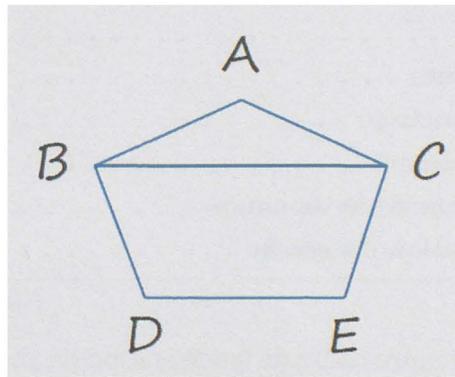


FIG. 3.1 – Le réseau routier

Respecter les exigences temporelles de chargement et/ou de livraison chez le client, synchroniser les opérations de transbordement nécessite d'introduire une dimension temporelle. L'horizon de temps considéré est discrétisé en un ensemble de périodes  $T = 1, \dots, t_{max}$ . Le réseau espace-temps est modélisé par un graphe orienté  $G^t = (N^t, A^t)$ . Un sommet  $n \in N$  est défini par un couple  $(z, t)$  où  $z \in Z^t$  et  $t \in T$ . Les sommets de  $N$  correspondent à des copies des sommets du graphe modélisant le réseau de transport. Il y a autant de copies de chaque sommet que de périodes de temps dans  $T$ . Un arc  $(i, j) \in A$  correspond à un déplacement de la zone  $z_i$  vers  $z_j$  partant en  $t_i$  et arrivant en  $t_j$ . Lorsque  $z_i = z_j$  l'arc modélise une attente d'une période en  $z_i$ . Concrètement, un arc permet d'acheminer des marchandises d'un sommet spatio-temporel du graphe à un autre.

Deux exemples de mouvements sont présentés en Figure 3.2. L'horizon de temps est découpé en cinq périodes. L'arc (1) modélise le passage de la zone A vers la zone B durant les périodes 1 et 2. L'arc (2) matérialise une attente d'une période en zone D.

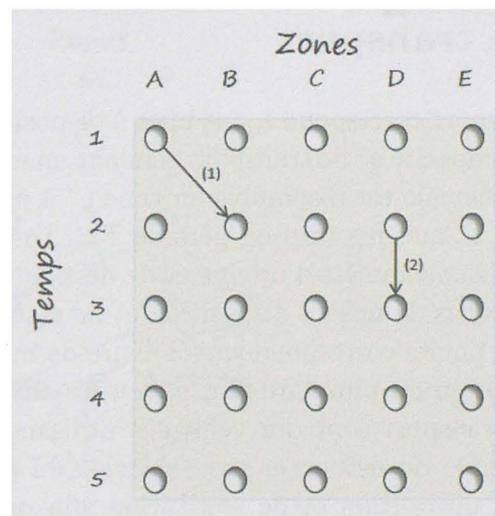


FIG. 3.2 – Le réseau espace temps

Comme pour tout problème de transport, le déplacement de marchandises nécessite une ressource logistique. Chacune des ressources possède ses propres caractéristiques (vitesse de déplacement, capacité, fenêtre de temps d'utilisation de la ressource...). Afin de considérer ses caractéristiques et de représenter les interactions possibles entre les ressources, nous modélisons l'offre logistique sur une graphe espace-temps multi-couches.

Soit le graphe orienté  $G = (N, A)$  modélisant le réseau logistique avec  $N$  l'ensemble des sommets et  $A$  l'ensemble des arcs. Un sommet  $n \in N$  est défini par un triplet  $(z, t, k)$  où  $z \in Z$  l'ensemble des zones géographiques,  $t \in T$  l'ensemble des périodes,  $k \in K = \{V \cup S \cup P\}$  où  $V$  désigne l'ensemble des véhicules,  $S$  désigne l'ensemble des lieux de stockage et  $P$  l'ensemble des demandes. Plus précisément, si  $k \in V$ , le triplet  $(z, t, k)$  modélise le véhicule  $k$  en zone  $z$  à la période  $t$ , si  $k \in S$ ,  $(z, t, k)$  modélise l'entrepôt  $k$  en zone  $z$  à la période  $t$ . Finalement, si  $k \in P$ ,  $(z, t, k)$  représente un sommet d'origine ou de destination de la demande  $k$ . Pour  $i, j \in N$ , un arc  $(i, j) \in A$  représente le mouvement de marchandises du sommet  $i$  au sommet  $j$ . La pondération d'un arc correspond à sa capacité. Ainsi modélisé le graphe modélisant le réseau logistique est constitué de  $|K|$  couches. Ces couches sont détaillées dans les sections suivantes.

### 3.1 Offre de transport

Une offre de transport correspond à une mise à disposition d'un véhicule  $v \in V$  disposant d'une capacité  $q^v$  de transport pendant un ensemble de périodes  $T_v = T1_v \dots T2_v$ . Le véhicule est disponible en zone  $o^v$  à partir de  $T1_v$  et doit être restitué en zone  $d^v$  au plus tard en période  $T2_v$ . Une offre de transport est caractérisée par deux sommets d'origine et de destination représentant les positions géo-temporelles de mise à disposition et de restitution du véhicule. Temporellement, ces points correspondent à l'heure de mise à disposition au plus tôt et de restitution au plus tard. En milieu urbain, l'essentiel des ressources dédiées au transport sont des véhicules utilisant les infrastructures routières. Il est possible de détourner ces véhicules du chemin direct entre les points de mise à disposition et de restitution afin de visiter des clients ou des entrepôts. Considérer une offre comme un transport direct entre un point origine et destination ne reflète pas les perspectives de transport qu'elle génère. Quelque soit l'offre de transport, l'exploiter pleinement revient à définir sur notre graphe espace-temps l'ensemble des possibilités de transport qu'elle génère. Plus précisément, pour chaque offre  $v \in V$ , nous construisons un sous-graphe de  $G$  représentant l'offre de capacité proposé par le véhicule  $v$ . Soit le graphe orienté  $G_v = (N^v, A^v)$  modélisant l'offre de ce véhicule avec  $N^v$  l'ensemble des sommets et  $A^v$  l'ensemble des arcs. Un sommet  $n \in N^v$  est défini par un triplet  $(z, t, v)$  où  $z \in Z$  l'ensemble des zones géographiques,  $t \in T$  l'ensemble des périodes et  $v$  le véhicule disposant de capacité. Pour  $i, j \in N^v$ , un arc  $(i, j) \in A^v$  représente le transport de marchandises du sommet  $i$  au sommet  $j$ , la pondération de l'arc correspond à la capacité disponible.

La construction d'un sous-graphe de transport est dépendante des caractéristiques du véhicule. Deux types d'offres de transport sont présentées en Figure 3.3. Lorsque l'offreur laisse au gestionnaire la possibilité d'utiliser librement son véhicule (partie gauche), la construction du graphe consiste à l'énumération de l'ensemble des chemins du point de prise en charge au point de restitution. Chaque chemin représente un service potentiel. Dans l'exemple représenté sur la partie gauche de la Figure 3.3, il n'existe aucune possibilité de rejoindre le point de restitution à partir de la zone  $D$  à la période 4. Les arcs (3) et (4) menant à ce point ne font donc pas partie du sous-graphe modélisant l'offre de transport. Dans le second cas, présenté sur la partie droite de la Figure 3.3, l'offreur met son véhicule à disposition uniquement pour un transport entre les zones  $A$  et  $D$ , partant de  $A$  en période 1 et arrivant en  $D$  en période 5. Dans ce cas, aucun déroutage n'est permis, l'ensemble des possibilités de transport est donc réduit à un chemin entre ces deux points. Dans ce cas, on parle de *transport direct*. Le *timing* du parcours est imposé par l'offreur et ne correspond pas nécessairement au temps de parcours exprimé par

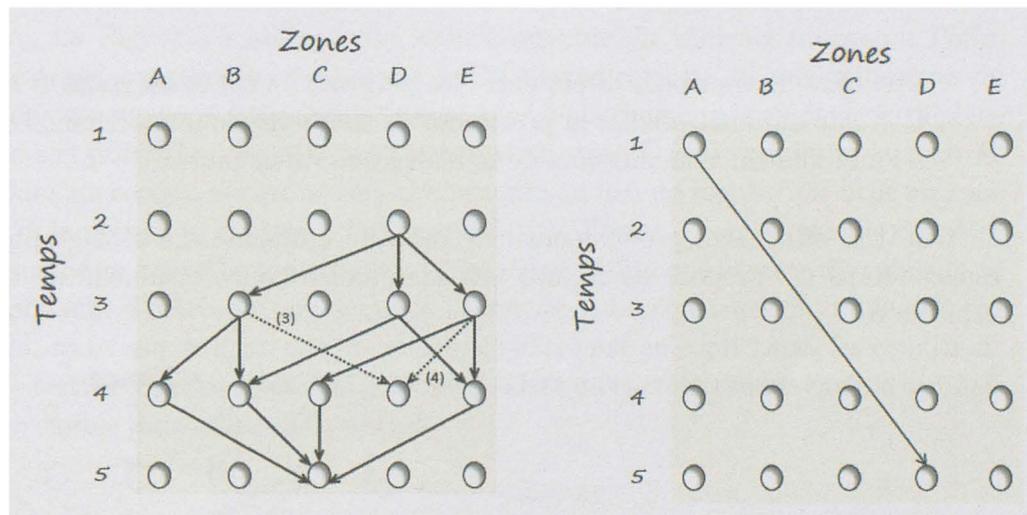


FIG. 3.3 – Offres de transport

le graphe modélisant le réseau routier. Cette représentation de l'offre de transport permet de modéliser l'offre de transport quelque soit les parcours possibles du véhicule mais aussi de prendre en compte sa vitesse de déplacement. Plus généralement une offre de transport direct modélise un déplacement d'un véhicule sans possibilité de déroutage ni flexibilité temporelle.

### 3.1.1 Caractérisation de l'offre résiduelle d'un véhicule

A partir de ces deux types d'offre de transport, comment caractériser l'offre résiduelle globale d'un véhicule ayant une activité logistique de planifiée ? Prenons l'exemple illustré en Figure 3.4. Le véhicule à une activité logistique de planifiée entre les périodes 3 et 5. Il s'agit d'une tournée consistant à visiter les clients C1, C2, C3 et C4. En supposant que le véhicule soit utilisable entre les périodes 1 et 9, caractériser l'offre résiduelle de ce véhicule revient à proposer trois offres :

- Une offre de transport entre les périodes 1 et 3 dont les points de mise à disposition et de restitution du véhicule sont situés respectivement en zone A et B. Cette offre modélise la possibilité d'utiliser le véhicule avant la visite du premier client.
- Une offre de transport entre les périodes 5 et 9 dont les points de mise à disposition et de restitution du véhicule sont situés respectivement en zone C et A. Cette offre modélise la possibilité d'utiliser le véhicule après avoir visité le dernier client.

- Une offre de transport direct entre les périodes 5 et 9 et les zones B et C. Cette offre matérialise la possibilité de conserver de la marchandise à l'intérieur du véhicules lors de la réalisation de sa tournée.

Ces trois offres sont probablement de capacité différente. Le sous-graphe espace-temps  $G^v$  proposé en Figure 3.4, matérialise l'offre résiduelle de ce véhicule  $v$ .

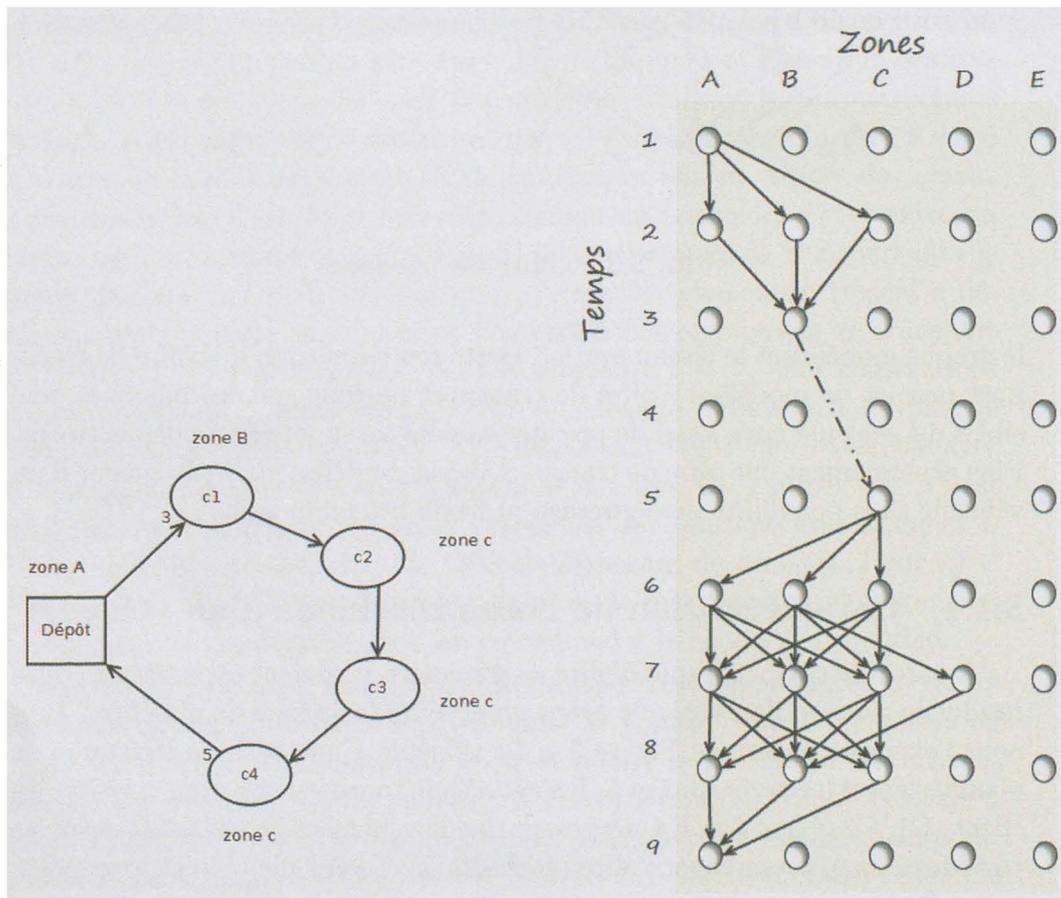


FIG. 3.4 – Caractérisation de l'offre résiduelle d'un véhicule

## 3.2 Service

Un service est vu comme un trajet d'un sommet de départ au sommet d'arrivée à des horaires spécifiques. Il correspond à la feuille de route du véhicule. Le service du véhicule  $v \in V$  est donc un chemin du sous-graphe

$G_v$ . La Figure 3.5 présente un service possible du véhicule proposant l'offre de transport décrite en Figure 3.3. Ce service consiste en une utilisation du véhicule sur deux périodes de temps. Lors de la première le véhicule se déplace de son point de mise à disposition situé en zone  $D$  pour rejoindre la zone  $E$ . Dans un second temps, le véhicule rejoint son lieu de restitution situé en zone  $C$  à la période 4. Telle que l'offre est décrite (Figure 3.3), le véhicule doit être ramené en zone  $C$  à la période 5. L'arc (5) modélise une attente du véhicule en zone afin d'atteindre son sommet destination. La construction d'une offre de transport assure le service du véhicule n'entre pas en conflit avec les conditions de restitution. Au niveau de graphe, il existe un chemin reliant chaque sommet accessible au sommet destination.

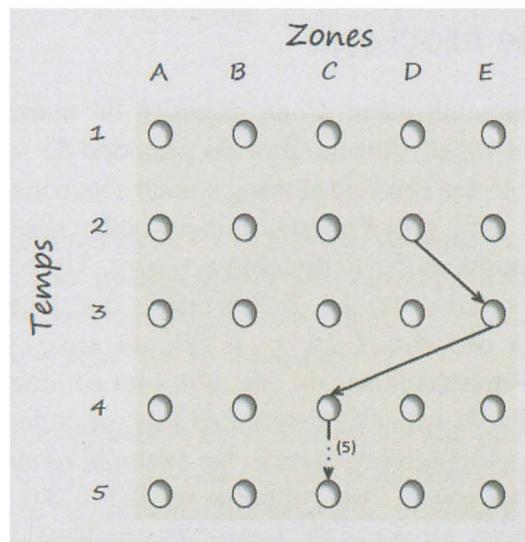


FIG. 3.5 – Un service

### 3.3 Plates-formes

Dans cette thèse, le terme *plate-forme* fait référence à l'ensemble des établissements logistiques dédiés au cross-docking et au stockage de courte durée. En milieu urbain, il s'agit de Centres de Distribution Urbain (CDU), d'Espaces Logistique Urbain (ELU) et plus généralement d'entrepôts. Ces plates-formes permettent d'optimiser la circulation des marchandises en ville par la mise en place de points de rupture de charge permettant leur massification. Elles permettent les opérations de cross dock et de stockage. Le cross-docking consiste à l'enchaînement immédiat de deux transbordements. Le premier faisant passer des marchandises d'un véhicule vers les quais d'en-

trée de la plate-forme et un second des quais de sortie vers un autre véhicule. Dans ce cas, les marchandises ne font que transiter par la plate-forme. Lorsque l'approvisionnement amont et le transport aval ne peuvent être synchronisés, la marchandise est stockée pendant une courte durée à l'intérieur de la plate-forme. N'ayant pas de contrainte sur la durée de transit de marchandises dans la plate-forme, nous parlerons par la suite de transfert plutôt que de cross-docking. Nous supposons qu'une plate-forme proposant une offre logistique est à la fois capable de transborder des marchandises mais aussi de la stocker. Nous proposons une modélisation de ces deux types d'offres logistiques dans les sections suivantes.

### 3.4 Offre de stockage

Elle permet l'immobilisation d'une quantité de marchandises dans une plate-forme pendant un certain nombre de périodes de temps. Pour chaque offre  $s \in S$ , l'ensemble des lieux de stockage, nous construisons un sous-graphe  $G^s$ . Soit  $G^s = (N^s, A^s)$ ,  $s \in S$  modélisant une offre d'entreposage avec  $N^s$  l'ensemble des sommets et  $A^s$  l'ensemble des arcs. Un sommet  $n \in N^s$  est défini par un triplet  $(z, t, s)$  où  $z \in Z$  l'ensemble des zones géographiques,  $t \in T$  l'ensemble des périodes. Pour  $i, j \in N^s$ , un arc  $(i, j) \in A^s$  représente l'immobilisation de marchandises du sommet  $i$  au sommet  $j$ , la pondération de l'arc correspond à la capacité disponible à la période  $t$ . La construction des sous-graphes de stockage est triviale. Un exemple d'offre de stockage d'un plate-forme située en zone  $C$  est proposée en figure 3.6. La capacité de la plate-forme peut varier au cours du temps, la pondération de ces trois arcs n'est pas nécessairement identique. Un arc de  $G^s$  ne relie pas forcément deux points du sous-graphe temporellement consécutifs, cette représentation permet de prendre en compte les heures d'ouvertures de la plateforme.

### 3.5 Transbordement

Dans l'optique d'un transport mutualisé et potentiellement intermodal (véhicules lourds ou légers, métros...), les transferts de marchandises sont essentiels au bon fonctionnement du système de transport. Ils permettent d'assurer la livraison de marchandises avec plusieurs véhicules lorsqu'aucune solution de livraison nécessitant un véhicule n'est possible. Typiquement la marchandise est rapprochée du client par des modes de transport de forte capacité (trains, tramways, péniches). Ces modes ne permettent généralement pas l'accès au client final, le transfert de marchandises vers des véhicules adaptés à la livraison urbaine est impératif à la desserte du client. Le

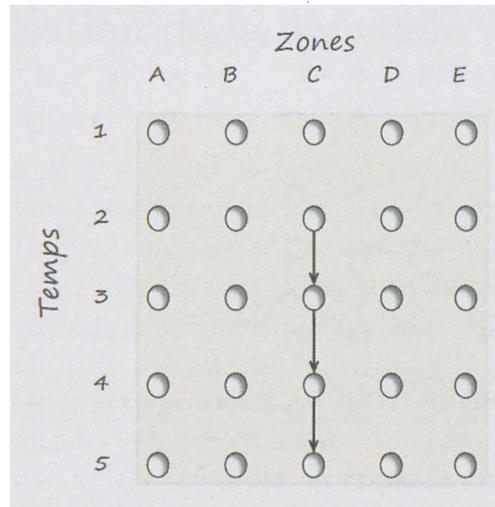


FIG. 3.6 – Une offre de stockage

transfert de marchandises entre deux moyens de transport se fait en passant par une plate-forme. Les transferts sans aire logistique ne sont pas considérés. Modéliser les transbordements possibles dans le graphe espace-temps  $G$  correspond à l'ajout d'arcs  $(i,j) \in A$  tel que :

- **cas 1** : transbordement d'un véhicule vers une plate-forme  
 $i=(z,t,v)$  ,  $v \in V, j=(z,t+1,s)$  ,  $s \in S$  si la plate-forme  $s$  située en zone  $z$  possède de la capacité de stockage à la période  $t+1$  et que la zone  $z$  soit accessible par le véhicule  $v$  à la période  $t$ .
- **cas 2** : transbordement d'une plate-forme vers un véhicule  
 $i=(z,t,s)$  ,  $s \in S, j=(z,t+1,v)$  ,  $v \in V$  si la plate-forme  $s$  située en zone  $z$  possède de la capacité de stockage à la période  $t$  et que le véhicule  $v$  puisse repartir de la zone  $z$  à la période  $t+1$ .

La Figure 3.7 représente la mise à disposition d'un véhicule capable de réaliser 4 transports directs et une offre de stockage ainsi que les transbordements possibles entre ces deux éléments logistiques. Le véhicule a la possibilité d'être en zone  $C$  à la période 3. En ce point spacio-temporel la plate-forme dispose d'une capacité de stockage. Le véhicule a donc la possibilité de transborder des marchandises vers la plate-forme. Le véhicule pouvant être utilisé jusqu'en période 5, il lui est possible de charger des marchandises en période 3 et de l'acheminer vers le client final ou une autre plate-forme. Ces deux possibilités de transbordement sont représentées par les arcs (6) et (7). La figure 3.8

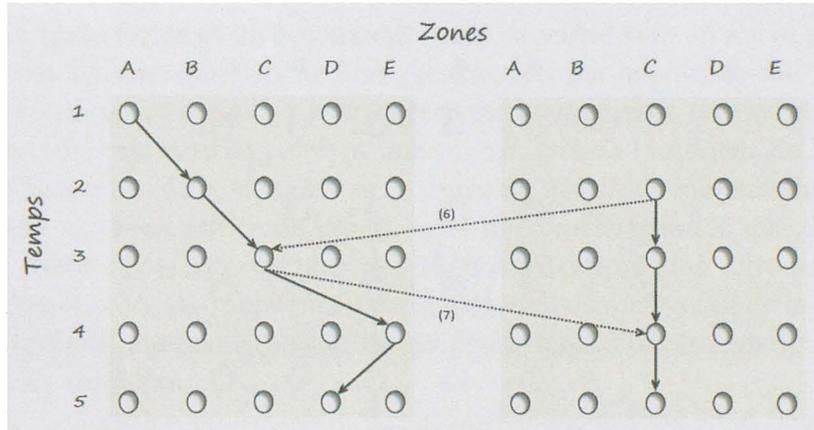


FIG. 3.7 – Deux transbordements

illustre le transfert de marchandises d'un véhicule qui propose 3 transports directs vers un second véhicule en passant par une plate-forme située en zone C proposant de la capacité entre les périodes 2 et 6. L'enchaînement des arcs (8) et (9) matérialise un transfert possible entre ces deux véhicules.

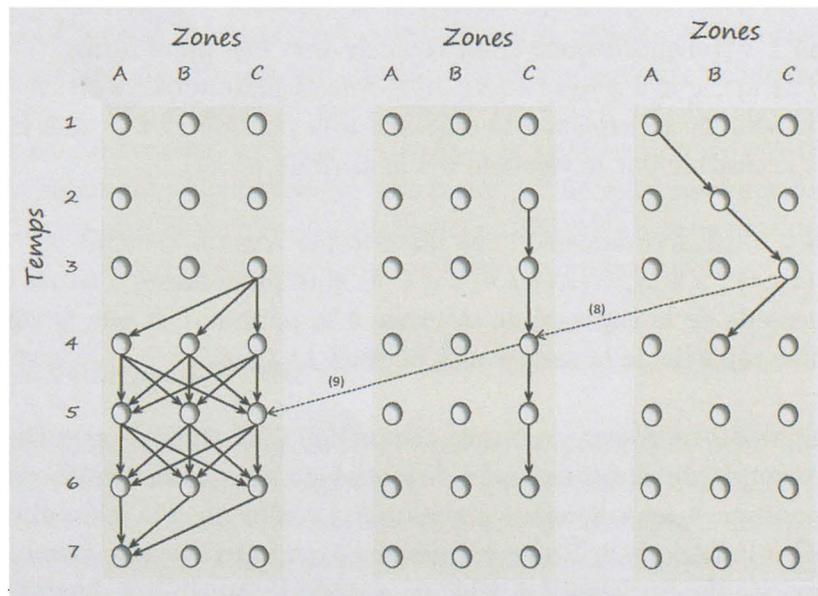


FIG. 3.8 – Un transfert

### 3.6 Modélisation de la demande

A chaque demande  $p \in P$  est associé un couple  $(o^p, d^p)$  ou  $o^p \in N$  et  $d^p \in N$  correspondant respectivement aux zones d'origine et de destination de la demande  $p$ . De plus, on note  $q^p$ , la quantité de marchandises de  $p$  à transporter de  $o^p$  à  $d^p$ .  $T_{1p}$  et  $T_{2p}$  sont les fenêtres de temps de chargement et livraison de la demande  $p$ . L'ensemble des périodes entre  $T_{1p}$  et  $T_{2p}$  est noté  $T_p$  et correspond aux périodes au cours desquelles la demande  $p$  peut être transportée. Soit le sous-graphe orienté  $G^p$   $p \in P$  de  $G$  tel que  $G^p = (N^p, A^p)$  modélisant une demande,  $N^p$  l'ensemble des sommets et  $A^p$  l'ensemble des arcs. Un sommet  $n \in N^p$  est défini par un triplet  $(z, t, p)$  où  $z \in Z$  l'ensemble des zones géographiques,  $t \in T$  l'ensemble des périodes et  $p \in P$  l'ensemble des demandes. Pour  $i, j \in N^p$ , un arc  $(i, j) \in A^p$  représente le passage de marchandises du sommet  $i$  au sommet  $j$ . Un arc correspond à l'immobilisation de marchandises chez le client pendant une période.

Dans notre problématique, une demande consiste à un transport de marchandises entre deux zones sous contraintes horaires. Matérialiser le chargement et déchargement de marchandises consiste à l'ajout d'arcs  $(i, j)$  tel que :

- **cas 1** : Chargement de marchandises  
 $i=(z, t, p)$ ,  $p \in P$ ,  $j=(z, t, v)$ ,  $v \in V$ ,  $t \in T_{1p}$  si le véhicule  $v$  peut repartir de la zone  $z$  à la période  $t$ .
- **cas 2** : Déchargement de marchandises  
 $i=(z, t, v)$ ,  $v \in V$ ,  $j=(z, t, p)$ ,  $p \in P$ ,  $t \in T_{2p}$  si le véhicule  $v$  peut accéder à la zone  $z$  à la période  $t$ .

La figure 3.9 représente une offre de transport en site propre, une demande de transport ainsi que les chargements et déchargements possibles. Cette demande consiste à un transport de marchandises entre les zones  $B$  et  $D$ . Les marchandises doivent être chargées en zone  $B$  en période 1 ou 2 et être livrées en zone  $D$  en période 4 ou 5. Les arcs (10) et (11) permettent l'immobilisation de marchandises chez le client à l'intérieur des fenêtres de temps de chargement et de déchargement. L'arc (12) représente le chargement de la demande par ce véhicule en période 2 tandis que l'arc (13) matérialise sa livraison en période 5. Dans cette exemple, les chargements et déchargements de marchandises se font en temps nul.

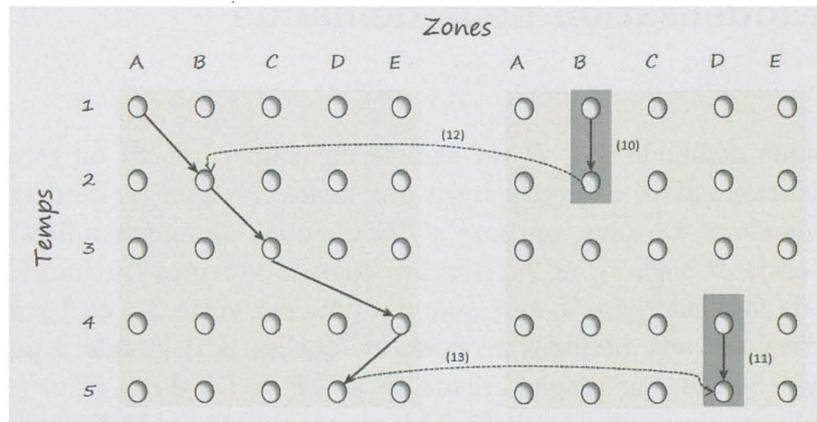


FIG. 3.9 – Une demande de transport

### 3.7 Représentation du réseau

Etant donné la modélisation des offres et demandes proposée ci dessus, le graphe  $G$  modélisant notre réseau logistique se compose de  $|V|$  couches de transport  $G_v$ ,  $|S|$  couches de stockage  $G_s$  et de  $|P|$  couches produit  $G_p$ . Les arcs modélisant les chargements et déchargements assurent la liaison entre les couches  $G_p$  et  $G_v$  tandis que ceux modélisant les transbordements connectent les couches  $G_v$  et  $G_s$ . La Figure 3.10 représente un réseau logistique comprenant 1 offre de transport modélisée par la couche violette, 2 offres de transport et 2 offres de stockage modélisées respectivement par les couches bleues et vertes.

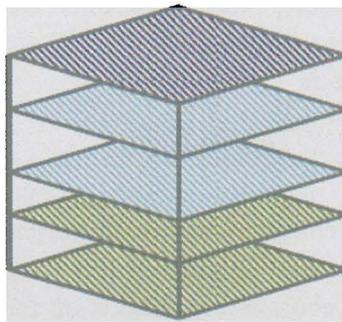


FIG. 3.10 – Représentation du réseau logistique

Cette modélisation permet au gestionnaire représentant l'association d'acteurs collaborateurs d'avoir une représentation sous forme de graphe de l'offre

logistique. D'un point de vu métier, la connaissance apportée par ce réseau d'offres est une valeur ajoutée non négligeable. Cette modélisation permet en analysant le réseau de détecter des tranches horaires ou géographiques non couvertes par l'offre logistique. Elle permet donc au gestionnaire d'aller démarcher de nouveaux acteurs logistiques susceptibles de combler ces manques.



# Problème d'allocation de demandes

---

## Sommaire

4.1	Spécificités de notre problématique . . . . .	46
4.2	Formulation . . . . .	46
4.3	Générateur d'instances . . . . .	49
4.4	Réduction de variables . . . . .	49
4.5	Restriction géographique . . . . .	51
4.5.1	Construction de la zone de chalandise d'un véhicule . .	52
4.5.2	Impact de la réduction (R3) . . . . .	54
4.5.3	Modèle de couverture . . . . .	56
4.6	Formulation restreinte . . . . .	57

---

Ce chapitre présente une approche de résolution du problème de mutualisation de ressources logistiques proposé au chapitre 1. Le but de la mutualisation d'offres logistiques est de construire un réseau d'offres capable de répondre efficacement à de nouvelles demandes logistiques. Notre problème consiste à la planification opérationnelle de l'acheminement de demandes étant donné un réseau d'offres fixé. En d'autres termes, il s'agit d'allouer des demandes sur un réseau d'offres logistiques. L'objectif est de maximiser la somme des revenus liés à l'acceptation de demandes. Nous traitons ce problème comme un problème de flots multi-produits sur un graphe espace-temps. Répondre à une demande revient à écouler son flot à travers le réseau logistique. Nous précisons les contraintes liées à notre application, puis proposons une formulation sous forme de programme mathématique de ce problème. Cette formulation *arc-arc* repose sur la modélisation proposée au chapitre 3. Shrenk [57] a montré que ce type de formulation devient très rapidement conséquente. Nous proposons donc une série de réductions de variables permettant de limiter la taille de la formulation. Nous montrons par la suite que ces réductions permettent la résolution d'instances de taille plus importante.

## 4.1 Spécificités de notre problématique

La particularité de notre problème d'allocation de la solution de mutualisation est la mise en commun de capacités logistiques résiduelles. Ces capacités réduites résultent d'une activité logistique existante. La résolution de ce problème fournit un plan de distribution détaillant les tâches des véhicules, des entrepôts ainsi que le parcours des demandes acceptées. L'objectif est de déterminer le plan de transport engendrant le plus grand revenu pour l'association. Plus généralement, il s'agit de montrer que la mise en commun de capacités peu valorisables individuellement peut être source de création de valeurs.

## 4.2 Formulation

Le Tableau 4.1 synthétise les notations utilisées pour formuler le problème. Elle reprend les notations définies lors des chapitres précédents puis introduit les notions encore inabordées.

$T$	L'ensemble des périodes de temps
$Z$	L'ensemble des zones géographiques
$V$	L'ensemble des véhicules proposant de la capacité
$S$	L'ensemble des entrepôts proposant de la capacité
$P$	L'ensemble des demandes
$q^p$	La quantité de marchandises à transporter
$o^p$	Zone de chargement de la demande $p$
$d^p$	Zone de livraison de la demande $p$
$T_p^1$	Fenêtre de temps de chargement de la demande $p$
$T_p^2$	Fenêtre de temps de livraison de la demande $p$
$ct_{ijtk}$	La capacité de transport entre les zones $i$ et $j$ du véhicule $k$ partant de $i$ à la période $t$
$cs_{itk}$	La capacité de stockage de l'entrepôt $k$ à la période $t$ en zone $i$
$T(t)$	L'ensemble des périodes de temps origine d'un transport en cours à la période $t$

TAB. 4.1 – Tableau des notations

Dans cette modélisation, l'horizon de temps est fractionné en un ensemble de périodes  $T$ , l'espace géographique est agrégé en un ensemble de zones  $Z$ . Deux groupes de variables binaires de décision sont définis dans cette formulation. Les variables de décision liées aux demandes :  $Y_p$  matérialise l'acceptation de la demande  $p$ .  $Y_p = 1$  si la demande  $p$  est acceptée, 0 sinon. Les variables de flot définissant les routes des véhicules et des demandes à transporter :  $X_{ijtk}^p = 1$  si la demande  $p \in P$  est transportée par le véhicule  $k \in V$  de  $i$  à la

période  $t$  jusqu'à  $j$ , 0 sinon.

$B_{ijtk} = 1$  si le véhicule  $k$  part de  $i$  pour aller en  $j$  à la période  $t$ , 0 sinon.

$S_{itpk}^p = 1$  si la demande  $p \in P$  est chargée par le véhicule  $k \in V$  en zone  $i$  à la période  $t$ , 0 sinon.

$S_{itkp}^p = 1$  si la demande  $p \in P$  est livrée par le véhicule  $k \in V$  en zone  $i$  à la période  $t$ , 0 sinon.

$S_{itkk'}^p = 1$  si la demande  $p \in P$  est transférée du véhicule  $k \in V$  vers la plate-forme  $k' \in S$  en zone  $i$  à la période  $t$ , 0 sinon.

$S_{itk'k}^p = 1$  si la demande  $p \in P$  est transférée de la plate-forme  $k' \in S$  vers le véhicule  $k \in V$  en zone  $i$  à la période  $t$ , 0 sinon.

$S_{itkk}^p = 1$  si la demande  $p \in P$  est entreposée sur la plate-forme  $k \in S$  de la période  $t$  à la période  $t+1$ , 0 sinon.

Ces variables de flots ne sont définies que lorsqu'elles respectent les règles de compatibilité décrites lors de la description de notre problématique en section 1.3 à savoir les compatibilités demande/véhicule et véhicule/plate-forme.

$$\max \sum_{p \in P} R_p Y_p \quad (4.1)$$

L'objectif de ce problème de mutualisation logistique est de trouver l'allocation de demandes sur le réseau d'offre permettant le plus grand profit pour l'association de logisticiens. Une demande  $p \in P$  peut être acceptée ou refusée. L'acceptation de la demande  $p$  engendre un revenu  $R_p$ . Ce revenu dépend de la quantité de marchandises à transporter, de la difficulté logistique du transport et de l'anticipation. Ce dernier critère est fréquemment utilisé en *Gestion de revenu*. Le principe est que plus la demande est soumise tardivement à l'association plus son acceptation engendre un revenu important. L'objectif (4.1) est de maximiser les revenus liés à l'acceptation de demandes.

$$\sum_{t \in T_p^1} \sum_{k' \in V} S_{itpk'}^p = Y_p \quad \forall p \in P, i = o^p \quad (4.2)$$

$$\sum_{t \in T_p^2} \sum_{k' \in V} S_{itk'p}^p = Y_p \quad \forall p \in P, i = d^p \quad (4.3)$$

Les contraintes (4.2) et (4.3) garantissent le respect des exigences de chargement et livraison de la demande si la demande est acceptée.

$$\sum_{j \in Z} X_{jtt'/k}^p - \sum_{j \in Z} X_{ijtk}^p + \sum_{k' \in S \cup P} (S_{it'k'/k}^p - S_{itkk'}^p) = 0 \quad \forall i \in Z, t \in T, k \in V, p \in P \quad (4.4)$$

$$\sum_{k' \in V} S_{it'k'/k}^p - \sum_{k' \in V} S_{itkk'}^p + S_{it'kk}^p - S_{itkk}^p = 0 \quad \forall i \in Z, t \in T, k \in S, p \in P \quad (4.5)$$

Les relations (4.4) et (4.5) correspondent aux contraintes de conservation des flots dans le réseau. Plus précisément, les égalités (4.4) assurent la conservation des flots sur les couches de transport. On y retrouve les flots de transport, de transbordement lorsque  $k' \in S$  et les flots de chargement et déchargement lorsque  $k' \in P$ . La conservation des flots sur les couches de stockage est assurée par les égalités (4.5). Les opérations possibles pour une plate-forme sont le stockage et le transbordement de marchandises entrant ou sortant de la plate-forme. On retrouve l'ensemble des flots correspondants à ces opérations sur les égalités (4.5). La donnée  $t'$  fait référence à la période de départ d'un flot arrivant en  $t$ . Plus précisément les variables  $X_{jit'k}^p$  de l'équation (4.4) modélisent un transport entre les zones  $j$  et  $i$  partant en  $t'$  et arrivant en  $t$ . Dans ce cas,  $t'$  est égal à  $t$  moins le temps de parcours entre ces deux zones. Dans le cas d'une variable de stockage,  $t' = t - 1$ .

$$\sum_{p \in P} X_{ijt'k}^p q^p \leq ct_{ijt'k} B_{ijt'k} \quad \forall i \in Z, j \in Z, t \in T, k \in V \quad (4.6)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k' \in K} S_{it'kk'}^p q^p \leq cs_{it'k} \quad \forall i \in Z, t \in T, k \in S \quad (4.7)$$

Le respect des contraintes de capacité de transport et de stockage est assuré par les contraintes (4.6) et (4.7). Le lien entre les variables de flot des véhicules et les variables de transport de marchandises est assuré par les inégalités (4.6).

$$\sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} (B_{ijt'k} + \sum_{t' \in T(t)} B_{ijt'k}) \leq 1 \quad \forall t \in T, k \in V \quad (4.8)$$

$$\sum_{j \in Z} B_{jit'k} - \sum_{j \in Z} B_{ijt'k} = 0 \quad \forall i \in Z, t \in T, k \in V \quad (4.9)$$

Les contraintes (4.8) et (4.9) assurent la faisabilité du plan de transport du véhicule. Les égalités (4.9) assurent la continuité de leur chemin. Cependant ces inégalités ne sont pas suffisantes pour garantir la réalisabilité des chemin des véhicules. Nous définissons  $T(t) = \{t' | t' \leq t, \exists (i, j) \in A, t' + t(i, j) \geq t \text{ où } t(i, j)\}$  est le nombre de périodes de temps séparant  $i$  et  $j$ .  $T(t)$  correspond l'ensemble des périodes de temps origine d'un transport en cours à la période  $t$ . Les inégalités (4.8) assurent qu'à chaque instant, un véhicule n'est engagé dans plus d'une opération de transport.

$$S_{it'kk'}^p \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z, t \in T, k \in K, k' \in K, p \in P \quad (4.10)$$

$$X_{ijt'k}^p \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z, j \in Z, t \in T, k \in V, p \in P \quad (4.11)$$

$$B_{ijt'k} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z, j \in Z, t \in T, k \in V \quad (4.12)$$

Les contraintes de définition du domaine des variables (4.10), (4.11) et (4.12) assurent la binarité des variables.

### 4.3 Générateur d'instances

La littérature ne proposant pas d'instance spécifique pour notre problème, nous avons développé un générateur d'instances basé sur des données réelles. La génération des instances est basée sur des données provenant de FRETURB. Il s'agit du premier logiciel de diagnostic des transports de marchandises en ville mis à disposition des collectivités locales françaises. Il s'appuie sur les résultats d'enquêtes lourdes réalisées selon une méthode spécifique qui décrit les opérations de livraisons et enlèvements des établissements d'une agglomération. Il fournit notamment, sur un zonage, selon les activités desservies, le type de véhicule et le mode de gestion et d'organisation du transport, une estimation du nombre de livraisons et d'enlèvements réalisés un jour standard ainsi que la répartition horaire des livraisons. Dans cette section, l'espace géographique est découpé en 10 zones et l'horizon de temps agrégé en 16 périodes. Pour chaque demande, les fenêtres de temps de chargement et de livraison s'étendent sur 2 périodes. Partant du nombre d'enlèvements et de livraisons par zone, des instances ont été générées suivant trois types de scénarios. Dans le premier, noté (*A*), le nombre de demandes (50,80,100) et d'offres (70,160,100) sont du même ordre de grandeur. Pour le deuxième, noté (*B*), le nombre de demandes (100,150,170) est supérieur au nombre d'offres (20,70,70) et inversement pour le scénario (*C*). Dans ce dernier scénario, le nombre de demandes varie entre 20 et 50 tandis que le nombre d'offres est compris entre 100 et 250. Les modèles ont été développés avec ILOG Concert Technology 2.9 et résolu avec ILOG Cplex 11.2 sur un ordinateur doté d'un processeur de 3.4 GHz et de 16Go de RAM. Pour ces instances, nous présentons dans le tableau 4.2 l'espace mémoire nécessaire à leur résolution ainsi que le pourcentage de demandes acceptées. Pour chaque instance, le modèle est résolu exactement. Le nombre de demandes acceptées n'est pas un indicateur de performance mais permet de montrer une certaine adéquation géographique et temporelle entre l'offre et la demande générées.

### 4.4 Réduction de variables

Les résultats montrent que sur un environnement restreint (10 zones, 16 périodes) l'espace mémoire nécessaire au chargement de la formulation problème peut devenir de très grande taille. Les tests sur des environnements contenant significativement plus de périodes ou de zones ont abouti sur des échecs. Cependant, en tenant compte de certaines caractéristiques du problème il est possible de réduire la taille du modèle. Dans cette formulation, les variables de transport, de stockage et de transbordement matérialisent la

Scénario	Nb Demandes	Nb Véhicules	Nb entrepôts	RAM (Go)	Nb accept
A	50	50	20	2.1	48
	80	80	80	11	75
	100	50	50	10	80
B	100	10	10	4	24
	150	50	20	16	144
	170	50	20	23	163
C	20	50	50	0.8	20
	50	100	20	4	45
	50	200	50	11	49

TAB. 4.2 – Tableau des résultats

possibilité de mouvements de marchandises. L'analyse du problème permet de mettre en évidence une série de mouvements de marchandises a priori irréalisables. Nous présentons trois observations permettant de réduire le nombre de variables du problème et donc la taille de la formulation :

**(R1) Compatibilité physique entre une demande et une offre.**

A chaque demande  $p \in P$  est associée une quantité de marchandises  $q^p$  à transporter. Si la capacité d'une offre de transport  $k \in V$  est inférieure à la quantité de produit, la demande n'est pas compatible avec l'offre de transport. L'ensemble des variables de transport  $X_{ijtk}^p$  reliant le produit  $p$  à l'offre  $k$  est supprimé. Suivant le même raisonnement, lorsque la capacité d'une offre d'entreposage  $k \in S$  est inférieure à  $q^p$  l'ensemble des variables  $S_{itkk'}^p$  reliant le produit  $p$  à l'offre  $k$  n'est pas défini.

Nous nommons les instances en utilisant un format permettant de déduire leurs caractéristiques. Les noms d'instances sont du type :  $I\_p\_v\_s$  où  $p$  est égal au nombre de demandes,  $v$  et  $s$  correspondent respectivement au nombre d'offres de transport et de stockage.

**(R2) Compatibilité temporelle d'une demande et d'une offre.** On introduit  $T_p$  l'ensemble des périodes entre  $T_{1p}$  et  $T_{2p}$  correspondant à la durée d'existence de la demande. Pour chaque élément logistique, la fenêtre de temps de mise à disposition est notée  $T_k$ . On note  $T_{kp} = T_k \cap T_p$ . A un moment  $t$  une opération sur la demande  $p$  par l'élément logistique  $k$  n'est possible que si  $t \in T_{kp}$ . Pour chaque moyen de transport  $k \in V$  et pour chaque entrepôt  $k' \in$

Instance	Zones	Périodes	Nb Variables	
			Sans (R1)	Avec (R1)
I_50_20_10	10	16	1470400	559167
I_100_20_10	10	16	3517428	1101632
I_150_20_10	10	16	5286750	1875638
I_200_20_10	10	16	7030840	2312557
I_200_40_10	10	16	14151200	5448802
I_200_60_10	10	16	21313000	8648281

TAB. 4.3 – Influence de (R1) sur le nombre de variables du modèle

$S$ , les ensembles des variables de transbordement  $S_{itkk'}^p$ , de transport  $X_{ijtk}^p$  et de stockage  $S_{itk'k'}^p$  ne sont définis que lorsque  $t \in T_{kp}$ . Le Tableau 4.4 compare le nombre de variables selon que l'on applique ou non la réduction (R2), dans les deux cas la réduction (R1) est appliquée.

Instance	Zones	Périodes	Nb Variables	
			Sans (R2)	Avec (R2)
I_50_20_10	10	16	559167	263106
I_100_20_10	10	16	1101632	489618
I_150_20_10	10	16	1875638	864449
I_200_20_10	10	16	2312557	1194785
I_200_40_10	10	16	5448802	2418499
I_200_60_10	10	16	8648281	4184020

TAB. 4.4 – Influence de (R2) sur le nombre de variables du modèle

Les résultats proposés par les Tableaux 4.3 et 4.4 montrent que ces réductions de variables permettent de réduire significativement la taille du problème. Ces deux réductions visent à éliminer des variables ne pouvant apparaître dans une solution du problème. Elles simplifient la formulation sans modifier l'espace des solutions réalisables.

## 4.5 Restriction géographique

Contrairement à ce qui peut se faire en transport longue distance ou en transport en site propre, l'ensemble des possibilités de transport engendrées par nos offres de transport n'est pas connu. La première étape de notre approche détaillée en section 3.1 est d'exprimer les possibilités de chaque offre de transport. Dans la formulation proposée en section 4.2, chaque véhicule peut se déplacer, charger ou livrer des marchandises sur l'ensemble

des zones géographiques considérées. Le nombre de variables associées à l'offre de transport  $k \in V$  est de l'ordre de  $\theta(|Z_k|^2|T_k|)$ . Une façon de réduire la taille de la formulation est de réduire la zone de chalandise des véhicules. Cette réduction concerne uniquement les offres de transport utilisant le réseau routier. Dans le cas de transport en site propre, c'est l'infrastructure qui détermine les zones traversées par le véhicule (voir section 5.1.1).

#### 4.5.1 Construction de la zone de chalandise d'un véhicule

**(R3) Réduction de la zone de chalandise d'un véhicule.** Pour chaque offre de transport  $k \in V$ , un sous-graphe  $G_k$  représentant les possibilités de transport est construit. Afin de réduire la taille des sous-graphes, nous définissons un périmètre géographique d'activité  $Z_k \subset Z$ . Nous dirons que la zone  $z$  est couverte par le véhicule  $k$  si  $z \in Z_k$ . Concrètement, un véhicule ne peut accéder, charger ou livrer des marchandises en zone  $z \in Z$  uniquement si ce véhicule couvre  $z$ . Contrairement aux réductions (R1) et (R2), ce type de réduction peut supprimer certaines possibilités de transport. Dans la majorité des cas, les réductions (R3) restreignent l'ensemble des solutions réalisables. L'enjeu est de déterminer l'ensemble des zones couvertes par chaque offre de transport dans le but de réduire la taille de la formulation tout en laissant un nombre de possibilités de transport satisfaisant. Par la suite, nous appellerons *zone de chalandise* d'un véhicule l'ensemble de zones qu'il couvre.

En chacune des zones, les chargements, livraisons et transferts de marchandises sont les trois types d'opérations logistiques possibles. La modélisation de la demande détaillée en section 3.6 associe à chaque demande de transport deux zones de chargement et de livraison. Les offres de stockage permettent d'identifier les zones pour lesquelles des transferts de marchandises sont possibles. Dans notre environnement déterministe, la demande et l'offre logistique sont connues. A partir de ses données, nous déduisons l'activité potentielle de chaque zone. L'activité potentielle d'une zone  $z \in Z$  est obtenue en sommant trois éléments :

- le nombre d'occurrence de la zone  $z$  comme zone de chargement de demande
- le nombre d'occurrence de la zone  $z$  comme zone de livraison de demande
- le nombre d'offres de stockage proposé en zone  $z$

Ainsi, supprimer une zone  $z$  dont l'activité potentielle est nulle de la zone de chalandise d'un véhicule ne modifie pas l'ensemble des possibilités logistiques pertinentes qu'il génère. En poussant cette réflexion, il est intéressant

de supprimer une zone  $z$  de la zone de chalandise d'un véhicule dont l'activité potentielle est nulle pendant la fenêtre de temps d'utilisation de ce véhicule. Prenons l'exemple de l'offre de transport représentée sur la partie gauche de la Figure 4.1. Supposons qu'aucune demande n'ait pour zone de départ ou n'ait pour zone d'arrivée la zone  $E$  et qu'aucune offre de stockage ne soit proposée sur cette zone. L'activité potentielle de cette zone est nulle. La zone  $E$  peut être retirée de la zone de chalandise associée à cette offre sans diminuer le potentiel de l'offre de transport. Le graphe modélisant cette offre de transport est représenté sur la partie droite de la figure 4.1. De ce fait, les arcs (14) (15) (16) (17) matérialisant quatre possibilités de transport ont été supprimés. Après ces suppressions l'arc (18) n'apparaît plus dans aucun chemin, il est lui aussi supprimé. L'ensemble des variables de transport associées à ces capacités de transport ne sont plus générées. L'impact de ce type de réduction de variables sur la taille de la formulation dépend des caractéristiques de l'instance. Afin d'assurer une maîtrise plus avancée de la taille de la formulation, nous proposons deux stratégies de construction de la zone de chalandise associée à chaque véhicule.

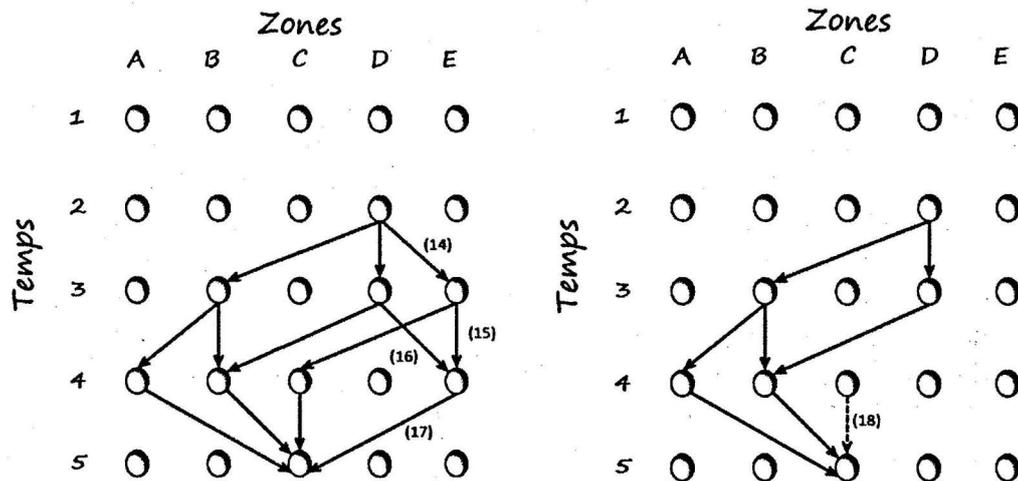


FIG. 4.1 – Suppression d'une zone à l'activité potentielle nulle

La première stratégie, appelée R3-S1, vise à construire la zone de chalandise d'un véhicule proposant de la capacité en fonction des propriétés géographiques de l'offre qu'il propose. Le véhicule  $k \in V$  est disponible en zone  $o^k$  et doit être restitué en zone  $d^k$ . Initialement  $Z_k = \emptyset$ . Nous notons  $M$  le paramètre définissant le nombre de zones à intégrer à  $Z_k$ . La première étape pour construire  $Z_k$  est d'y intégrer chacune de ces deux zones dans la mesure où leur activité potentielle est non nulle. Dans un second temps, on inclut dans

$Z_k$  des zones visitées ou voisines de zones visitées par le plus court chemin entre  $o^k$  et  $d^k$  calculé sur le graphe représentant le réseau routier.

La seconde stratégie, appelée R3-S2, vise à construire la zone de chalandise d'un véhicule en considérant uniquement l'activité potentielle de chaque zone. Initialement  $Z_k = \emptyset$ . Le véhicule  $k$  passant forcément par  $o^k$  et  $d^k$ , ces deux zones sont ajoutées à  $Z_k$ . Puis, tant que  $|Z_k| < M$  on ajoute à  $Z_k$  la zone ayant l'activité potentielle la plus importante dans la mesure où il existe un chemin admissible sur le graphe espace-temps du point de départ au point destination passant par cette zone.

#### 4.5.2 Impact de la réduction (R3)

Nous avons évalué l'influence de l'utilisation de la restriction des zones de chalandise sur la taille de la formulation mais aussi sur la qualité des résultats. Les tableaux 4.5, 4.6 et 4.7 synthétisent les résultats obtenus sur chacun des scénarios de simulation décrit précédemment. Pour chaque scénario, nous avons créé deux jeux d'instances en faisant varier le paramètre  $M = 3$  et 5 pour chacune des deux stratégies. Les réductions (R1) et (R2) sont appliquées pour la résolution de chaque instance.

Le Tableau 4.5 montre l'influence de (R3) sur le nombre de variables de transport du modèle. Un jeu d'instance regroupe trois instances. Pour chaque jeu, le nombre de variables de transport en appliquant (R3-S1) est comparé à celui obtenu sans restriction géographique en colonne 3. Le résultat est exprimé en pour-cent. De la même façon, le nombre de variables de transport en appliquant (R3-S2) est comparé à celui obtenu sans restriction géographique en colonne 4. Sur le même principe les tableaux 4.6 et 4.7 comparent respectivement l'influence de (R3) sur le nombre de variables du modèle ainsi que sur la qualité de la solution obtenue.

Scénario	M	Variables %	Variables %
		Avec R3-S1	Avec R3-S2
A	3	16	18
B	3	10	11
C	3	11	11
A	5	29	28
B	5	24	24
C	5	25	25

TAB. 4.5 – Influence de (R3) sur le nombre de variables de transport

Scénario	M	Variables %	Variables %
		Avec R3-S1	Avec R3-S2
A	3	17	18
B	3	13	13
C	3	16	16
A	5	33	34
B	5	28	26
C	5	31	32

TAB. 4.6 – Influence de (R3) sur le nombre de variables

Scénario	M %	Revenu %	Revenu %
		Avec R3-S1	Avec R3-S2
A	3	94	90
B	3	79	67
C	3	100	75
A	5	100	98
B	5	84	81
C	5	100	91

TAB. 4.7 – Influence de (R3) sur la fonction objectif

L'analyse de ces résultats permet de tirer plusieurs enseignements. De façon très prévisible, la restriction de la zone de chalandise de chaque véhicule permet de réduire la taille de la formulation. Quelque soit le type de scénario, plus la restriction géographique est forte plus la taille de la formulation diminue. On obtient ainsi des réductions moyennes du nombre de variables de l'ordre de 84,5% pour  $M=3$  et de 69% pour  $M=5$ . L'impact de (R3) sur le revenu est lui fortement dépendant du type de scénario. Pour les scénarios A et C le nombre de d'offres est au moins équivalent au nombre de demandes. Dans cette configuration, réduire la zone de chalandise de chaque véhicule n'a que peu d'impact sur le revenu engendré par l'acceptation de demandes. Par exemple, lorsque  $M = 5$  dans le scénario C, en ne conservant en moyenne que 31% des variables, le revenu engendré en utilisant (R3-S1) est optimal. Dans le cas du scénario B, la demande est supérieure à l'offre, la réduction des zones de chalandise entraîne une moins bonne couverture de la demande par l'offre. Cependant nous pouvons observer que la diminution du nombre de variables est bien plus forte que la dégradation de la qualité de la solution. Par exemple, lorsque  $M = 5$ , en ne conservant en moyenne que 28% des variables,

le revenu engendré en utilisant (R3-S1) équivaut à 84% du revenu optimal. Sur la plupart des instances testées, (R3-S1) obtient de meilleur résultat que (R3-S2). Un effet de la stratégie (R3-S2) est de surcouvrir les zones à activité potentielle forte et de ne pas couvrir les zones à l'activité potentielle plus faible.

### 4.5.3 Modèle de couverture

Les résultats précédents ont montré la faculté de la réduction (R3) à diminuer la taille du modèle. Ils montrent aussi l'importance de la résolution du problème de couverture sur la qualité de la solution obtenue. Les stratégies présentées précédemment construisent indépendamment chaque zone de chalandise. L'une des caractéristiques de notre solution de mutualisation est d'avoir un gestionnaire ayant la connaissance de l'ensemble de l'offre logistique. En utilisant cette connaissance, le problème de couverture peut être modélisé sur un graphe biparti  $G = (N, A)$  où  $N = \{Z \cup V\}$  l'ensemble des sommets et  $A \subset Z \times V$  l'ensemble des arêtes. Une arête  $a = (z, v) \in A$  matérialise la couverture de la zone  $z$  par le véhicule  $v$ . Notons  $W_{zv}$  la variable binaire associée à cette arête,  $AP_z$  l'activité potentielle de la zone  $z$  et  $M$  le paramètre définissant le nombre de zones couvertes par un véhicule. Notre problème de couverture peut donc se modéliser comme un problème de b-couplage de poids maximum. Le problème de b-couplage se résout en temps polynomial comme un problème de flot compatible à profit maximum. Notre problème se formule par :

$$\max \sum_{z \in Z} \sum_{v \in V} AP_z W_{zv} \quad (4.13)$$

$$\text{st} : \sum_{z \in Z} W_{zv} \leq M \quad \forall v \in V \quad (4.14)$$

$$\sum_{v \in V} W_{zv} \geq \left\lfloor \frac{AP_z M |V|}{\sum_{z' \in Z} AP_{z'}} \right\rfloor \quad \forall z \in Z \quad (4.15)$$

$$W_{zv} \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, z \in Z \quad (4.16)$$

La fonction objectif (4.13) vise à maximiser l'activité potentielle de la couverture. Les inégalités (4.14) assurent que chaque véhicule couvre au maximum  $M$  zones tandis que les contraintes (4.15) assurent que le nombre de fois où une zone est couverte soit proportionnel à son activité potentielle. Les contraintes (4.16) assurent la binarité des variables de couverture.

## 4.6 Formulation restreinte

En tenant compte des réductions (R1), (R2) et (R3), le modèle proposé en section 4.2 est formulé de nouveau.

$$\max \sum_{p \in P} R_p Y_p \quad (4.17)$$

$$\text{st : } \sum_{t \in T_p^1} \sum_{k' \in V} S_{itpk'}^p = Y_p \quad \forall p \in P, i = o^p \quad (4.18)$$

$$\sum_{t \in T_p^2} \sum_{k' \in V} S_{itk'p}^p = Y_p \quad \forall p \in P, i = d^p \quad (4.19)$$

$$\sum_{j \in Z_k} X_{jit'k}^p - \sum_{j \in Z_k} X_{ijtk}^p + \sum_{k' \in S \cup P} (S_{it'k'k}^p - S_{itkk'}^p) = 0 \quad \forall i \in Z_k, t \in T_{kp}, k \in V, p \in P \quad (4.20)$$

$$\sum_{k' \in V} S_{it'k'k}^p - \sum_{k' \in V} S_{itkk'}^p + S_{it'kk}^p - S_{itkk}^p = 0 \quad \forall i \in Z_k, t \in T_{kp}, k \in S, p \in P \quad (4.21)$$

$$\sum_{p \in P} X_{ijtk}^p q^p \leq ct_{ijtk} B_{ijtk} \quad \forall i \in Z_k, j \in Z_k, t \in T_k, k \in V \quad (4.22)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k' \in K} S_{itkk'}^p q^p \leq cs_{itkk} \quad \forall i \in Z_k, t \in T_k, k \in S \quad (4.23)$$

$$\sum_{i \in Z_k} \sum_{j \in Z_k} (B_{ijtk} + \sum_{t^* \in T_k} B_{ijtt^*k}) \leq 1 \quad \forall t \in T_k, k \in V \quad (4.24)$$

$$\sum_{j \in Z_k} B_{jit'k} - \sum_{j \in Z_k} B_{ijtk} = 0 \quad \forall i \in Z_k, t \in T_k, k \in V \quad (4.25)$$

$$S_{itkk'}^p \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z_{kk'}, t \in T_{kp}, k \in K, k' \in K, p \in P \quad (4.26)$$

$$X_{ijtk}^p \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z_k, j \in Z_k, t \in T_{kp}, k \in V, p \in P \quad (4.27)$$

$$B_{ijtk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z_k, j \in Z_k, t \in T_k, k \in V \quad (4.28)$$

En considérant comme précédemment une décomposition de l'espace géographique en dix zones et une discrétisation de l'horizon de temps en seize périodes, de nouvelles instances ont été résolues. Ces instances contiennent un nombre d'offres et de demandes supérieur aux instances résolues dans les sections précédentes. Pour chaque scénario, nous créons entre quatre et cinq jeux d'instances. Chaque jeu est composé de trois instances. Pour le scénario A, le nombre de demandes varie entre 50 et 400, tandis que le nombre d'offres est compris entre 70 et 450. Pour le scénario B, le nombre de demandes est compris entre 40 et 250 tandis que le nombre d'offres est compris entre 35 et 70. Concernant le scénario C, le nombre de demandes est compris entre 50 et 100 et le nombre d'offres entre 120 et 250. Pour chacun des jeux d'instances, le temps de résolution est exprimé en minutes par la colonne 5 tandis que la colonne 6 indique le nombre de demandes acceptées. Les instances ont été résolues en appliquant les réductions (R1), (R2) et (R3-1).

Le Tableau de résultat 4.8 montre que ces trois réductions permettent de résoudre des instances comprenant un nombre de demandes et d'offres plus importants que la formulation initiale. L'utilisation des réductions permet de

Scénario	Nb Demandes	Nb Véhicules	Nb entrepôts	Temps	Demandes acceptées
A	50	50	20	7	48
A	80	80	80	19	75
A	150	150	60	32	138
A	250	150	50	93	157
A	400	400	50	357	351
B	40	15	20	1.5	26
B	100	10	10	1	24
B	170	50	20	13	118
B	250	50	20	42	124
C	50	100	20	37	45
C	50	200	50	45	49
C	100	150	60	71	96
C	100	200	50	93	96

TAB. 4.8 – Tableau des résultats

résoudre des instances comprenant jusqu'à 400 demandes et offres dans un temps de calcul inférieur à 6 heures. Concernant le scénario B, le cas le plus difficile à résoudre, 124 demandes sur les 250 sont acheminées par une flotte de 50 véhicules. Une des attentes concerne les caractéristiques du plan de distribution. Aucune contrainte n'est imposée sur le nombre de transferts nécessaires à l'acheminement d'une demande. Néanmoins, étant donné les faibles amplitudes horaires des offres, l'analyse des plans de distribution devait mettre en évidence la consolidation de demandes. La figure 4.2 propose un plan de distribution d'une instance contenant 8 demandes de transport ayant chacune une zone de chargement différente, 1 offre de stockage en zone D sur l'ensemble des périodes de l'horizon de temps et 6 offres de transport. Chaque demande doit être chargée entre les périodes 1 et 3 et livrée entre les périodes 5 et 7. Un véhicule propose de la capacité sur la totalité de l'horizon de temps. Le service qui lui a été affecté est représenté de couleur noire. Deux véhicules proposent de la capacité entre les périodes 1 et 4 (services bleus) et 3 véhicules proposent de la capacité entre les périodes 4 et 9 (services verts). Six des huit demandes ont été acceptées. Le plan de distribution illustre les services de chaque élément logistique. Le service de chaque élément est représenté par un ensemble d'arcs de couleur identique. L'étiquette associée à chaque arc correspond au

chargement du véhicule ou de la plateforme à ce moment précis du service. Le plan de distribution met en évidence l'utilisation de la plate-forme de stockage comme point de consolidation de demandes. Les demandes D2, D3 et D5 sont elles acheminées sous forme d'une tournée.

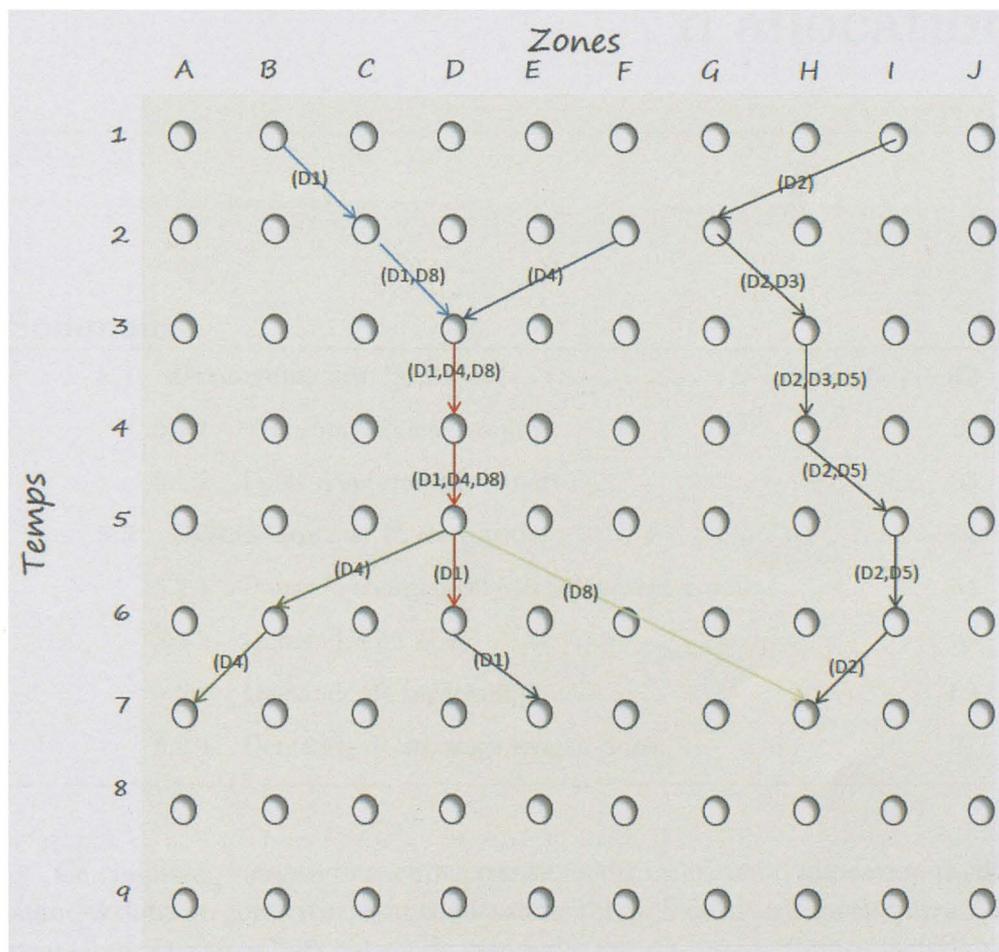


FIG. 4.2 – Un plan de distribution



# Extensions du problème d'allocation

---

## Sommaire

<b>5.1</b>	<b>Extensions sur l'offre</b>	<b>62</b>
5.1.1	Transport en site propre	62
5.1.2	Point d'enlèvement déporté	63
<b>5.2</b>	<b>Extensions sur la demande</b>	<b>64</b>
5.2.1	Point de chargement/déchargement non fixé	64
5.2.2	Demandes groupées	66
5.2.3	Demande de repacking	69
5.2.4	Demande de stockage longue durée	71

---

Ce chapitre présente plusieurs extensions du problème d'allocation de demandes dans un contexte de mutualisation. Tel qu'il est décrit au chapitre 1, le problème consiste à l'allocation de demandes sur un réseau d'offres logistiques fixé. Les offres logistiques sont des prestations de transport et de stockage. Une offre de transport correspond à la mise à disposition d'un véhicule sur une fenêtre de temps. A chaque véhicule est associé deux points géographiques de mise à disposition et de restitution. Nous traitons ci-après de la caractérisation de l'offre résiduelle d'un véhicule situé sur la zone urbaine. Une demande de prestation logistique consiste au transport d'une quantité de marchandises d'un point de prise en charge à un point de livraison sous contraintes horaires. L'expression d'un besoin de distribution urbaine ne peut, dans certains cas, se formuler sous cette forme. Nous introduisons à notre problème des demandes de prestations logistiques plus complexes en section 5.2. Nous allons montrer dans ce chapitre comment le problème décrit précédemment à la section 4.6 peut être étendu pour les prendre en compte aisément.

## 5.1 Extensions sur l'offre

### 5.1.1 Transport en site propre

Notre problématique intègre également les ressources de transport en *site propre*. Il s'agit d'un mode de transport empruntant une voie ou un espace qui lui est réservé. Les tramways, métros, péniches en sont des exemples urbains. Une offre de transport d'un véhicule en site propre ne peut être exploitée de la même façon qu'une offre d'un véhicule utilisant le réseau routier. En effet, dans le cas d'une offre en site propre, c'est l'infrastructure qui détermine les chemins admissibles.

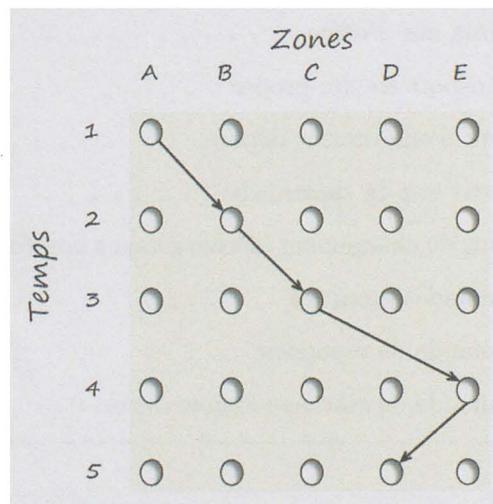


FIG. 5.1 – Offres de transport en site propre

La figure 5.1 présente une offre de transport d'un métro. Le chemin est imposé par la voie ferrée. Ce chemin est composé de deux points de début de ligne et de fin de ligne du métro, ainsi que de trois points intermédiaires. Chacun de ces points correspond à un arrêt du métro en station. En ces points, la configuration des stations et de leurs équipements permettent les opérations de chargement et de déchargement vers le réseau routier. Les heures de passage en chacun de ses points sont imposées. L'offre de ce métro est modélisée par 4 transports directs tel qu'ils sont définis en section 3.1. Les questions liées à l'utilisation de métros pour le transport de marchandises de façon simultanée ou séparée du transport de passagers dépassent le cadre de cette thèse.

### 5.1.2 Point d'enlèvement déporté

La particularité de notre solution de mutualisation est la mise en commun de capacités résiduelles. Les offres sont des relicats d'une activité logistique existante. L'une des difficultés est de caractériser l'offre d'un véhicule en tenant compte de cette activité. Nous posons le cas suivant, qui est le cas général d'une approche par tournées : un transporteur part de son entrepôt pour livrer ses points habituels, il dispose d'une capacité résiduelle donnée qu'il peut transformer en offre, sa contrainte toutefois est qu'il réalisera d'abord ses propres livraisons. Sa disponibilité commence donc après l'heure à laquelle il livre le dernier point, et entre ce dernier point et l'entrepôt de départ. Exprimé comme cela, l'utilisation de son offre suppose que l'on va lui faire faire une livraison après avoir visité son dernier client, mais aussi que l'enlèvement sera également à faire après sa tournée. Or dans ce cas de figure, il existe la possibilité de faire un transbordement dans l'entrepôt d'où part la tournée (certes avec une capacité moindre que si l'on enlevait en fin de tournée). Comment peut-on caractériser l'offre résiduelle globale de ce véhicule ?

A partir de la modélisation proposée au chapitre 3 et dans le but d'intégrer cette possibilité d'enlèvement déporté, deux offres de transport au potentiel de déroutage différent sont associées à ce véhicule. Sur l'exemple présenté en Figure 5.2, le transporteur commence sa tournée au dépôt en période 1 et livre son dernier client en zone *C* en période 3. Il propose, tout d'abord, une offre traditionnelle de transport entre son dernier point de livraison en période 3 et le dépôt où il doit cesser toute activité en période 7. Puis, pour matérialiser la possibilité de charger des marchandises au dépôt en période 1 puis de les transporter durant la tournée qu'il réalise jusqu'en période 3, il propose une offre de transport direct sans fenêtre de temps entre le dépôt et son dernier point de livraison.

On retrouve sur la Figure 5.2 le graphe espace-temps modélisant les possibilités de transport de ce véhicule. On y distingue les arcs matérialisant les possibilités de transport liés à l'offre de transport traditionnelle mais aussi l'arc (19) matérialisant la possibilité de transport direct. Ces arcs appartiennent au même sous-graphe espace-temps associé au véhicule proposant ces deux offres. Dans cet exemple, les deux offres sont temporellement successives, il est donc possible d'enchaîner sans transbordement ces deux offres de transport. Intégrer la possibilité d'enlèvement déporté d'un véhicule proposant de la capacité revient à construire le graphe espace-temps associé en deux étapes. Il n'y a pas de conséquence sur le modèle mathématique.

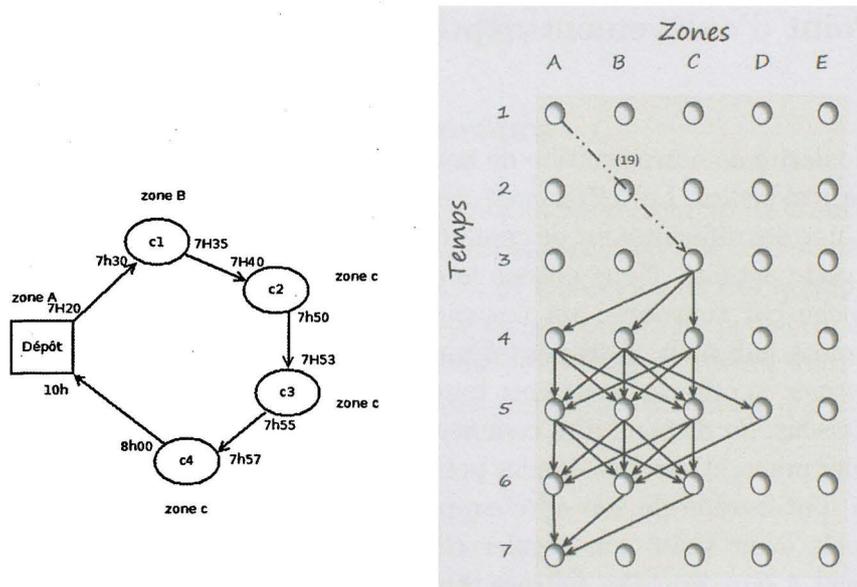


FIG. 5.2 – Enlèvement déportée

## 5.2 Extensions sur la demande

Dans sa version de base, une demande est définie comme un transport d'un point de chargement vers un point de livraison sous contraintes horaires. Afin de considérer des besoins de distribution plus large nous proposons une série d'extensions portant sur les caractéristiques de la demande. Le tableau 4.1 intègre de nouvelles notations utilisées dans ce chapitre :  $Z_p^1$ ,  $Z_p^2$ ,  $C_o$ ,  $C_d$ ,  $Z_c^1$ ,  $Z_c^2$ .

### 5.2.1 Point de chargement/déchargement non fixé

Il est important de resituer la distribution urbaine comme étant un maillon d'une chaîne logistique plus globale. Prenons l'exemple d'un producteur situé en périphérie de la zone urbaine considérée voulant alimenter en marchandises un point de vente situé en centre ville. Ce producteur exprime son besoin de distribution par : *j'ai une demande et je veux qu'on me détermine une plateforme sur laquelle, venant de l'extérieur, je viendrai déposer des marchandises pour qu'on organise la distribution en centre-ville*. Dans ce cas, pour accepter une demande, il est nécessaire de déterminer le point de chargement des marchandises en plus de déterminer la façon dont elles vont être transportées. La Figure 5.3 illustre les deux cas de figure selon que la plateforme d'enlèvement ou de livraison est non fixée. Dans le premier, sur la partie gauche, la demande consiste à un transport d'une plateforme à déterminer située en zone A, B

$T$	L'ensemble des périodes de temps
$Z$	L'ensemble des zones géographiques
$V$	L'ensemble des véhicules proposant de la capacité
$S$	L'ensemble des entrepôts proposant de la capacité
$P$	L'ensemble des demandes
$q^p$	La quantité de marchandises à transporter
$T_p^1$	Fenêtre de temps de chargement de la demande $p$
$T_p^2$	Fenêtre de temps de livraison de la demande $p$
$ct_{ijtk}$	la capacité de transport entre les zones $i$ et $j$ du véhicule $k$ partant de $i$ à la période $t$
$cs_{itk}$	la capacité de stockage de l'entrepôt $k$ à la période $t$ en zone $i$
$Z_p^1$	Zones possibles pour le chargement de la demande $p$
$Z_p^2$	Zones possibles pour la livraison de la demande $p$
$C_o$	L'ensemble des demandes liées par leur origine
$C_d$	L'ensemble des demandes liées par leur destination
$Z_c^1$	Zones possibles pour le chargement de l'ensemble de demandes $c$
$Z_c^2$	Zones possibles pour la livraison de l'ensemble de demandes $c$

TAB. 5.1 – Tableau des notations

ou  $C$  en période 1 vers la zone  $D$  en période 5. Le second est le cas analogue. Il correspond à un transport de la zone  $D$  vers une plate-forme située en zone  $A$ ,  $B$  ou  $C$ .

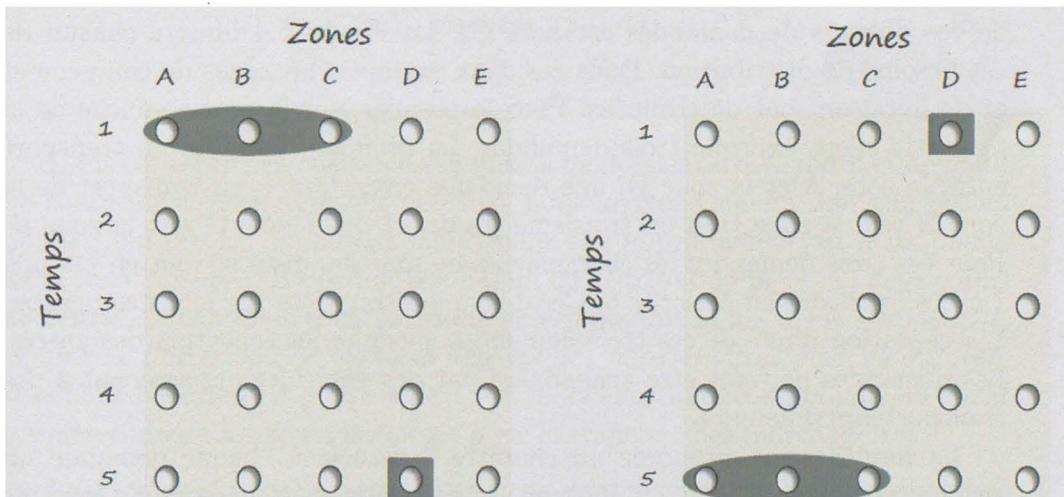


FIG. 5.3 – Exemples d'un point de chargement/déchargement non fixé

Soit la demande  $p \in P$ , nous notons  $Z_p^1$  et  $Z_p^2$  les ensembles respectifs de zones de chargement et livraison de la demande  $p$ . Intégrer cette extension au

problème d'allocation revient à remplacer les équations (4.18) et (4.19) de la formulation mathématique proposée au chapitre 4 dans la section 4.6 par les égalités suivantes :

$$\sum_{i \in Z_p^1} \sum_{t \in T_p^1} \sum_{k' \in V} S_{itpk'}^p = Y_p \quad p \in P \quad (5.1)$$

$$\sum_{i \in Z_p^2} \sum_{t \in T_p^2} \sum_{k' \in V} S_{itk'p}^p = Y_p \quad p \in P \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Demandes groupées

Une seconde extension consiste à ajouter une contrainte liant les décisions d'acceptation d'un ensemble de demandes. En reprenant l'exemple précédent et en considérant que le producteur a des marchandises à livrer dans plusieurs points de vente situés en centre ville. Il exprime autant de demandes de transport que de points de vente à desservir. Afin d'assurer le ravitaillement de l'ensemble de ses points de vente, il contraint le gestionnaire à accepter l'ensemble de ses demandes ou à n'en accepter aucune. On parle alors de dossier de demandes. Nous considérons deux besoins de distribution. Dans le premier les demandes sont liées par leur origine, c'est le cas du producteur dans notre exemple. Nous notons  $C_o$  l'ensemble des dossiers de demandes de ce type. Dans le second, les demandes sont liées par leur destination. L'ensemble de ces dossiers de demandes est noté  $C_d$ . La Figure 5.4 illustre chacun de ces besoins de distribution. Dans ces deux exemples les zones de chargement et de livraison sont déterminées. Pour le premier, sur la partie gauche de la figure, le client exprime trois demandes. La première visant à un transport entre la zone A et la zone D, une deuxième consistant à un transport de la zone B vers la zone D et un troisième transport de la zone C vers la zone D. Pour ces trois demandes les chargements de marchandises se font en période 1 et les livraisons en périodes 5. Ces demandes sont liées par leur destination. L'acceptation d'une de ces trois demandes entraîne l'acceptation des autres. Les demandes peuvent être acheminées par des véhicules appartenant à des transporteurs différents.

La modélisation proposée au chapitre 3 associe à chaque demande un graphe-espace temps. Afin d'illustrer nos exemples et de garder une certaine qualité de visualisation nous avons représenté les demandes d'un même dossier de demandes sur un unique graphe espace-temps.

Pour chaque dossier de demandes  $c \in C_o \cup C_d$  nous introduisons sa variable binaire d'acceptation  $Y_c$ . Accepter l'ensemble des demandes  $p \in c$  permet d'accepter le dossier de demandes  $c$ . Intégrer cette extension au problème

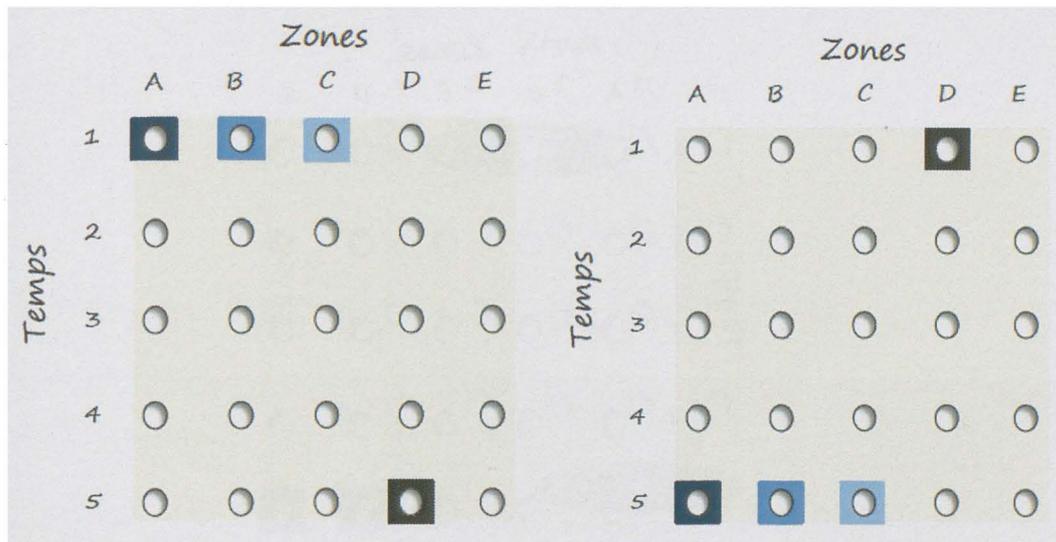


FIG. 5.4 – Deux exemples de demandes groupées

d'allocation revient à ajouter à la formulation mathématique les équations suivantes :

$$Y_c = Y_p \quad \forall c \in C_o, \forall p \in c \quad (5.3)$$

$$Y_c = Y_p \quad \forall c \in C_d, \forall p \in c \quad (5.4)$$

Dans cet esprit, en combinant la notion de dossier de demandes et de point de chargement/déchargement non fixé, nous arrivons sur un nouveau besoin de distribution. En supposant maintenant que le producteur ait deux points de vente à desservir. Il exprime son besoin de distribution par : *j'ai deux points de ventes à livrer et je veux qu'on me détermine une plate-forme sur laquelle, venant de l'extérieur, je viendrai déposer des marchandises pour qu'on organise la distribution en centre-ville.* C'est la localisation géographique du client qui déterminera les zones possibles pour le transfert des marchandises.

La Figure 5.5 représente un dossier de deux demandes. Les marchandises associées à ces demandes doivent être livrées respectivement en zone D et E. Le point de chargement est situé sur une plate-forme à déterminer située en zone A, B ou C. Intégrer la gestion d'un dossier de demandes liées par leur origine revient à remplacer les équations(4.18) par les contraintes (5.5),(5.6) et (5.7) dans modèle proposé en section 4.6.

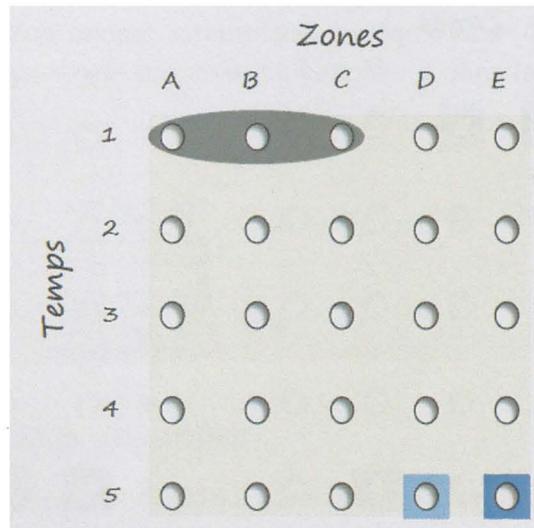


FIG. 5.5 – Un exemple de demande groupées et liées par leur origine

$$\sum_{t \in T_p^1} \sum_{k' \in V} S_{itpk'}^p = Y_{ic} \quad \forall p \in c, \forall i \in Z_c^1, \quad \forall c \in C_o, \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in Z_c^1} Y_{ic} = Y_c \quad \forall c \in C_o \quad (5.6)$$

$$Y_p = Y_c \quad \forall p \in c, \forall c \in C_o \quad (5.7)$$

La contrainte (5.5) assure que la zone de chargement d'une demande  $p$  soit parmi les zones possibles de chargement  $Z_c^1$ . L'équation (5.6) garantit que les demandes liées soient chargées dans la même zone tandis que les contraintes (5.7) lient la décision d'acceptation des demandes d'un même dossier. Notons que l'équation (5.7) n'a de sens que dans la mesure où nous n'avons pas reformulé la fonction objectif.

La Figure 5.6 représente un dossier de deux demandes. Les marchandises associées à ces demandes doivent être chargées respectivement en zone  $A$  et  $B$ . Le point de livraison est situé sur une plate-forme à déterminer située en zone  $C$ ,  $D$  ou  $E$ . Intégrer la gestion d'un dossier de demandes liées par leur destination revient à remplacer les équations (4.19) par les contraintes (5.8), (5.9) et (5.10) dans le modèle proposé en section 4.6. La remarque faite pour l'équation (5.7) vaut aussi pour l'équation (5.10).

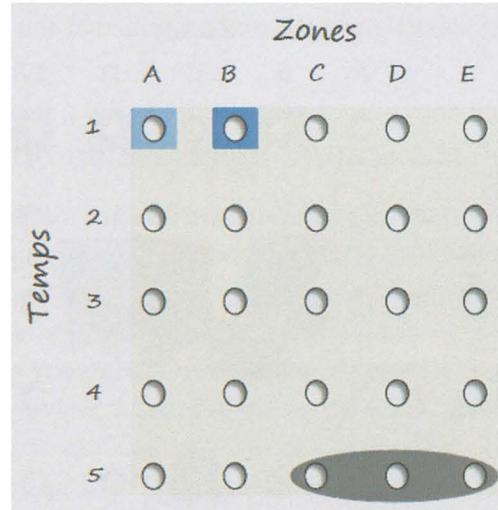


FIG. 5.6 – Une exemple de demandes groupées et liées par leur destination

$$\sum_{t \in T_p^2} \sum_{k' \in V} S_{ik'p}^p = Y_{ic} \quad \forall p \in c, \forall i \in Z_c^2, \quad \forall c \in C_d, \quad (5.8)$$

$$\sum_{i \in Z_c^2} Y_{ic} = Y_c \quad \forall c \in C_d \quad (5.9)$$

$$Y_p = Y_c \quad \forall p \in c, \forall c \in C_d \quad (5.10)$$

### 5.2.3 Demande de repacking

Une dernière extension sur la demande consiste à intégrer le besoin de manutention de marchandises pendant leur distribution. On parle de repacking ou encore de reconditionnement de marchandises. Ce reconditionnement se fait au sein d'une plate-forme. Contrairement à un transfert de type cross-docking tel qu'il est défini dans le chapitre 3, les unités d'expédition sont déballées ou reconditionnées entre l'entrée et la sortie de marchandises de la plate-forme.

La Figure 5.7 présente l'exemple d'une demande de repacking. Le client exprime donc son besoin par : *j'ai une demande de transport de marchandises situées en zone B, D et E, je veux qu'on me détermine une plate-forme sur laquelle elles seront reconditionnées pour être livrées dans mes points de vente situés en zone A et C*. La demande de ce client se modélise par cinq demandes groupées. Trois demandes liées par leur destination visant au transport de marchandises des zones B, D et E vers une plate-forme à déterminer.

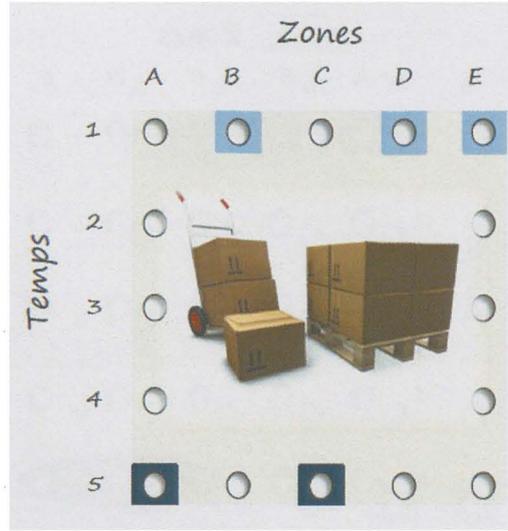


FIG. 5.7 – Un exemple de demandes de repacking

Puis deux demandes de transport liées par leur origine entre cette plate-forme vers les zones A et C. On note  $C1$  et  $C2$  les ensembles des demandes d'un dossier de repacking liées respectivement par leur origine et leur destination. L'extension de demande de repacking est une combinaison des deux extensions de demandes liées par leur origine et leur destination. Intégrer les contraintes suivantes à la formulation mathématique permet de gérer ces demandes de repacking.

$$\sum_{t \in T_p^1} \sum_{k' \in V} S_{itpk'}^p = Y_{ic1} \quad \forall p \in c1, \forall i \in Z_{c1}^1 \cap Z_{c2}^2 \quad (5.11)$$

$$\sum_{i \in Z_{c1}^1} Y_{ic1} = Y_{c1} \quad (5.12)$$

$$Y_p = Y_{c1} \quad \forall p \in c1 \quad (5.13)$$

$$\sum_{t \in T_p^2} \sum_{k' \in V} S_{itk'p}^p = Y_{ic2} \quad \forall p \in c2, \forall i \in Z_{c2}^2 \cap Z_{c1}^1 \quad (5.14)$$

$$\sum_{i \in Z_{c2}^2} Y_{ic2} = Y_{c2} \quad (5.15)$$

$$Y_p = Y_{c2} \quad \forall p \in c2 \quad (5.16)$$

$$Y_{ic1} = Y_{ic2} \quad \forall i \in Z_{c2}^2 \cap Z_{c1}^1 \quad (5.17)$$

On retrouve les contraintes (5.11), (5.12) et (5.13) de gestion des demandes liées par leur origines ainsi que les contraintes (5.14), (5.15) et (5.16) associées

aux demandes liées par leur destination. Les équations (5.17) assurent l'unicité du lieu de repacking.

#### 5.2.4 Demande de stockage longue durée

Les demandes de stockage de marchandises sur une longue durée font partie des besoins logistiques. Nous considérons dans notre problématique uniquement les offres logistiques dédiées au cross-docking et au stockage de courte durée. Le cross-docking et le stockage longue durée sont deux activités à part entière utilisant des ressources différentes. Répondre à une demande de stockage longue durée revient à lui affecter un entrepôt capable de l'accueillir sur une durée plus longue que celle gérée dans le modèle d'allocation décrit précédemment. Nous proposons la formulation suivante du problème de stockage longue durée.

$$\max \sum_{p \in P} R_p Y_p \quad (5.18)$$

$$st : \sum_{t \in T_{1p}} \sum_{k' \in S} S_{itpk'}^p = Y_p \quad \forall i \in Z_p, p \in P \quad (5.19)$$

$$\sum_{t \in T_{2p}} \sum_{k' \in S} S_{itk'p}^p = Y_p \quad \forall i \in Z_p, p \in P \quad (5.20)$$

$$S_{it'pk}^p - S_{itkp}^p + S_{it'kk}^p - S_{itkk}^p = 0 \quad \forall i \in Z_k, t \in T_{kp}, k \in S, p \in P \quad (5.21)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k' \in K} S_{itkk'}^p q^p \leq cs_{itk} \quad \forall i \in Z_k, t \in T_k, k \in S \quad (5.22)$$

$$S_{itkk'}^p \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Z_{kk'}, t \in T_{kp}, k \in K, k' \in K, p \in P \quad (5.23)$$

La fonction objectif (5.18) vise à maximiser le revenu lié à l'entreposage de demandes. Les égalités (5.19) et (5.20) assurent l'entrée et la sortie des marchandises des demandes acceptées tandis que les contraintes (5.21) assurent la continuité de l'entreposage. Le respect des contraintes de capacité est assuré par les équations (5.22).



# Projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable

## Sommaire

6.1	Contexte . . . . .	73
6.2	Solution du projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable . . . . .	74
6.3	Acteurs du projet . . . . .	75
6.4	Moteur d'allocation . . . . .	77
6.5	Plate-forme logicielle . . . . .	80
6.6	Evaluation de la solution de mutualisation LUMD . . . . .	80
6.7	Dimensionnement espace/temps . . . . .	83
6.8	Extensions futures en vue de l'intégration de la ges- tion du revenu . . . . .	84

## 6.1 Contexte

D'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, le taux de remplissage moyen des camions en circulation sur le territoire national ne dépasse pas 67%. D'autres spécialistes confirment que les camions roulent en moyenne à vide sur 20 à 30% de leurs parcours. Par ailleurs, lors du Salon International du Transport et de la Logistique de 2007, des témoignages ont révélé que les entreprises d'entreposage ont de plus en plus d'espaces logistiques vacants : le taux de vacance (rapport entre la surface vacante et la surface totale) représenterait en moyenne jusqu'à 33%, selon les périodes de l'année, des espaces d'entreposage. Ces espaces vacants, tant dans les camions que dans les entrepôts, deviennent un défi pour les entreprises logistiques, majoritairement des PME déjà fragilisées par l'augmentation du prix du pétrole et de la pression concurrentielle. Déjà important, le taux de ces espaces vacants ne peut que s'accroître dans le contexte économique actuel marqué par les évolutions du tissu industriel, des comportements de consommation, des politiques d'approvisionnement. Dans ce contexte logistique, le développement

de nouvelles solutions organisationnelles dédiées à l'optimisation des espaces vacants se présente comme un levier d'action et une source de valeur ajoutée indéniable pour les entreprises. Outre les effets immédiats sur l'environnement et la congestion routière, de telles stratégies renforceront particulièrement la compétitivité des PME.

L'équilibre global du marché des services logistiques en zone urbaine masque des pénuries ponctuelles. Non seulement certains axes sont délaissés mais les besoins d'approvisionnement ou de retrait ne sont pas entièrement satisfaits. Les artisans, commerçants et PME sont contraints aux aléas des capacités des transporteurs. La répartition des flux routiers sur une journée souligne des zones de déséquilibre. Les pics d'affluence des flux logistiques accentuent les pics d'affluence des flux passagers générant congestion, pollution, insécurité... Confrontées aux contraintes physiques et environnementales urbaines, les offres de services logistiques ne peuvent pas toujours être développées de façon classique, c'est-à-dire en ajoutant des moyens. Il est donc nécessaire d'optimiser les offres de services logistiques existantes.

## 6.2 Solution du projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable

Face à ces enjeux, bien que complexe à mettre en œuvre, la mutualisation des moyens logistiques est une des réponses admises par l'ensemble des acteurs. La logistique et la mobilité des marchandises représentent des enjeux importants en terme d'activité économique, compétitivité, emploi, qualité de vie dans un contexte urbain marqué par des contraintes physiques et environnementales fortes et croissantes. La mutualisation des services logistiques doit permettre d'utiliser les espaces vacants (Figure 6.1) comme des sources de création de valeur et de réduction des émissions de gaz carbonique.

Le projet Logistique Urbaine Mutualisée Durable (LUMD) labellisé par le pôle de compétitivité Advancity apporte des solutions concrètes de mutualisation grâce à la réalisation d'une plate-forme logicielle à base de technologies innovantes et la mise en place d'un *intégrateur logistique urbain* assurant le pilotage de la performance globale (économique, écologique et énergétique). Cette plate-forme permet à la fois la mise en relation des acteurs en demande ou en offre de capacité de stockage ou de transport en milieu urbain, et l'optimisation des modes, des trajets et des points intermédiaires pour une demande donnée. Les solutions proposées permettent aux entreprises logistiques d'anticiper les législations environnementales, de créer de la valeur et d'accroître leur rentabilité. La mutualisation des services logistiques est également une source de valeur significative pour d'autres acteurs économiques (artisans,

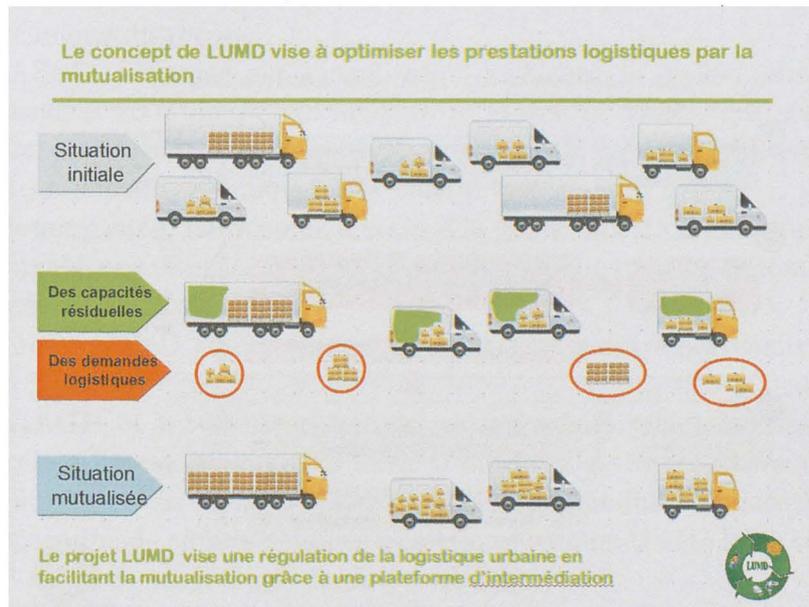


FIG. 6.1 – Les capacités résiduelles existantes

commerçants, PME, ...) et contribue notamment à redynamiser le commerce de proximité.

Comme le montre la figure 6.2 la mutualisation des offres de services logistiques urbains nécessite de collecter les demandes et les qualifier, de recueillir les offres issues d'acteurs logistiques possédant des surcapacités de livraison ou d'entreposage ponctuelles, de consolider l'offre de service logistique résultante dans le but de mettre en relation les offres et les demandes.

### 6.3 Acteurs du projet

Le projet LUMD a rassemblé neuf partenaires à la fois industriels et académiques. Au niveau industriel, on retrouve l'opérateur de logistique Presstalis.

**Presstalis** est une société commerciale de messagerie de presse. Elle distribue tous les quotidiens nationaux ainsi que plus de 82% des magazines. Le volume des flux logistiques est proche de 2.4 milliards d'exemplaires distribués pour un poids global de plus de 525 000 tonnes auprès de 30 000 diffuseurs en France dont 1200 sur Paris. Etant très familier des problématiques urbaines, Presstalis est en mesure d'assurer la bonne insertion de la plateforme et de ses services dans la chaîne logistique, de valider le modèle économique et donc endosser le rôle de coordinateur du projet. Presstalis vient notamment de mutualiser leurs flux avec ceux d'un tour opérateur. Cette démarche a permis à

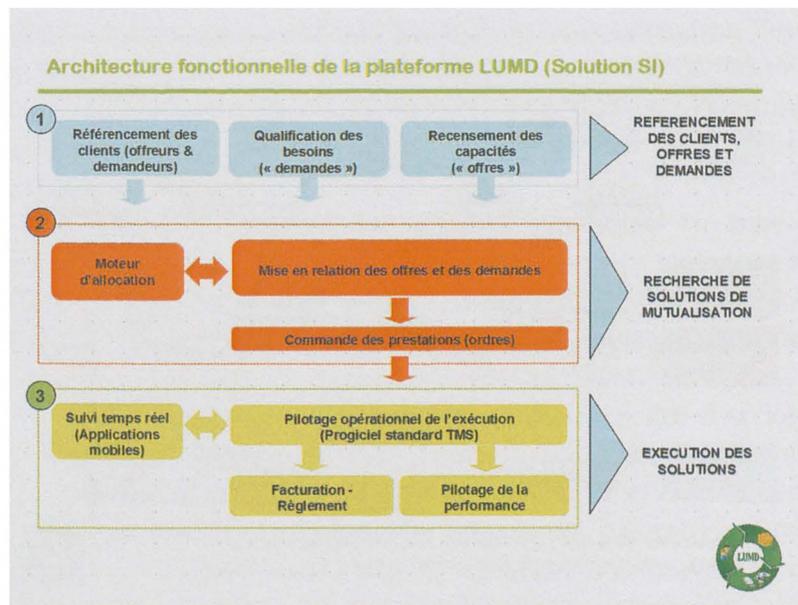


FIG. 6.2 – La solution proposée par LUMD

la société de voyages d'optimiser ses coûts de distribution en tirant parti des moyens déjà existants. Elle a offert à Presstalis la possibilité d'optimiser le remplissage de ses moyens de transport et de développer son chiffre d'affaire en diversifiant son activité. La société souhaite poursuivre cette stratégie et se positionner en tant que coordinateur des flux logistiques urbains de la région Ile-de-France. Son expérience et son expertise métier géographique, ajouté à sa stratégie d'optimisation de la logistique urbaine et de mutualisation des flux, font de presstalis un intégrateur parfaitement approprié. Cette diversification au niveau de la cible leur permet de se concentrer sur leur cœur de métier : être une véritable coopérative de distribution et de diffusion sur la région parisienne.

Au niveau des industriels fournisseurs des solutions technologiques ou organisationnelles on retrouve :

- **Headlink Partners**, société de conseil experte dans la gestion de programme complexe et dans l'amélioration de la performance en Supply Chain, a porté assistance au coordinateur du projet tout au long de sa réalisation et a étudié tout particulièrement les conditions de modèle économique permettant l'éclosion du service.
- **SQLI**, société spécialisée dans la conception et la mise en œuvre de systèmes d'informations reposant sur les nouvelles technologies et forte d'expériences dans la réalisation de bourses de fret, a coordonné la partie

technique du projet.

- **JASSP**, hébergée sur l'incubateur de Marne la Vallée, lauréate du concours 2007 du Polytechnicum de Marne la Vallée, qui est à l'origine des idées technologiques relatives aux fonctions d'optimisation, est le gestionnaire technique de la plateforme.
- **Deveryware**, fournisseur d'accès à la géo-localisation en temps réel, a apporté une dimension nécessaire et stratégique dans la gestion des flux logistiques urbains.

Le projet LUMD a aussi permis la collaboration entre partenaires académiques :

- **LAMIH**, a apporté la vision globale sur le pilotage de la chaîne logistique et une réflexion sur l'intégration de la gestion du revenu en son sein. Il a été en charge du développement des modules d'allocation et de réparation de pannes détaillés en section suivante. Il a été le coordinateur de la partie scientifique du projet LUMD.
- **INRETS**, Institut National de Recherche sur le Transport et leur Sécurité, a apporté la vision urbaine et écologique de LUMD.
- **LET**, Laboratoire d'Economie des Transports, a apporté la vision globale des effets socio-économiques de LUMD sur la chaîne logistique.
- **LVMT**, l'UMR Ville Mobilité Transport, apportera la vision globale du transport des marchandises en ville. Il a développé le module d'optimisation du chargement détaillé en section suivante.

## 6.4 Moteur d'allocation

A partir du référencement des offres de capacité résiduelle et des demandes, le moteur d'allocation est en charge de la mise en relation des offres et des demandes. Chaque demande acheminée génère un revenu. Concrètement, à partir d'un ensemble d'offres et de demandes, il s'agit de générer un plan de distribution engendrant le revenu maximum. Ce moteur d'allocation est composé de trois modules :

- **Le module d'allocation.** Ce module a deux fonctionnalités principales. Tout d'abord à partir de l'ensemble d'offres, d'une représentation agrégée de la zone urbaine, d'une discrétisation temporelle et de l'analyse des caractéristiques des demandes, le module construit le réseau d'offres. Il s'agit d'énumérer les possibilités logistiques qu'engendre l'ensemble des offres. Puis, à partir de ce réseau d'offres, le module est chargé de l'affectation de demandes sur ce réseau d'offres. Il résulte de ce module un plan de distribution.

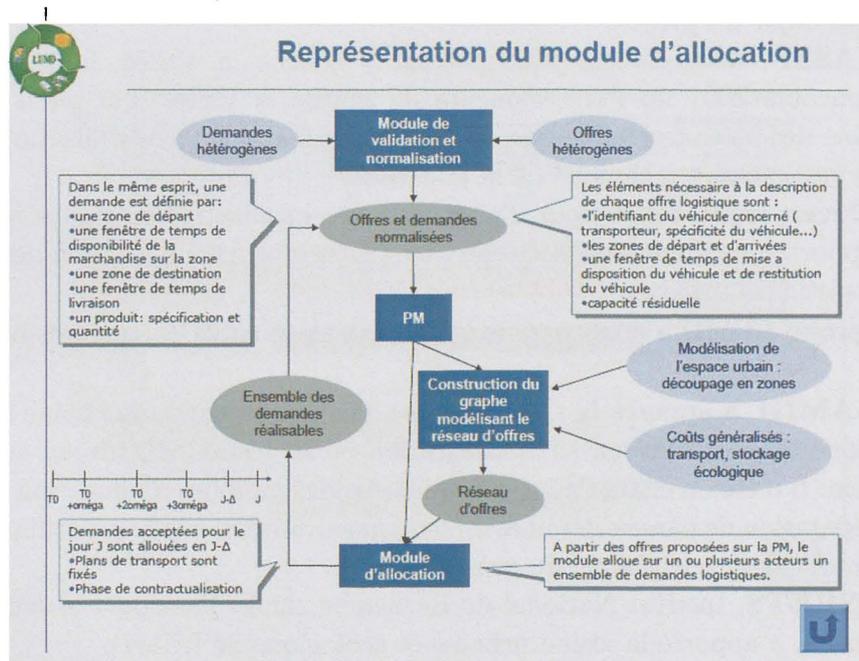


FIG. 6.3 – Le module d'allocation LUMD

En pratique, lorsqu'un acteur logistique dépose une demande de transport, le gestionnaire de la plate-forme notifie dans un court délai, après exécution du moteur d'allocation, l'acceptation ou le rejet de la demande. Pour intégrer cette contrainte, nous découpons l'espace de temps entre l'arrivée première demande en  $T_0$  jusqu'à la *date limite de validation du plan de distribution* en périodes de durée  $\beta$ . A la fin de chacune de ses périodes, on exécute le module d'allocation. Ce module cherche à satisfaire les demandes arrivées pendant cette période en imposant la réalisation des demandes acceptées aux périodes précédentes. Concrètement, on impose au module d'acheminer les demandes acceptées en ajoutant au modèle des contraintes portant sur les variables binaires d'acceptation de ces demandes. Nous laissons libre la manière dont les demandes acceptées sont acheminées afin de ne pas réduire l'ensemble des solutions de l'exécution suivante. Le plan de distribution peut changer considérablement d'une exécution sur l'autre. Le demandeur est notifié de l'acceptation ou du rejet de sa demande. De périodes en périodes, l'ensemble des demandes s'accroît. C'est à la *date limite de validation du plan de distribution* que ces demandes sont allouées et que le plan de distribution est fixé.

- **Le module d'optimisation du chargement.** Le module d'allocation fait appel au module de chargement pour vérifier la faisabilité d'un

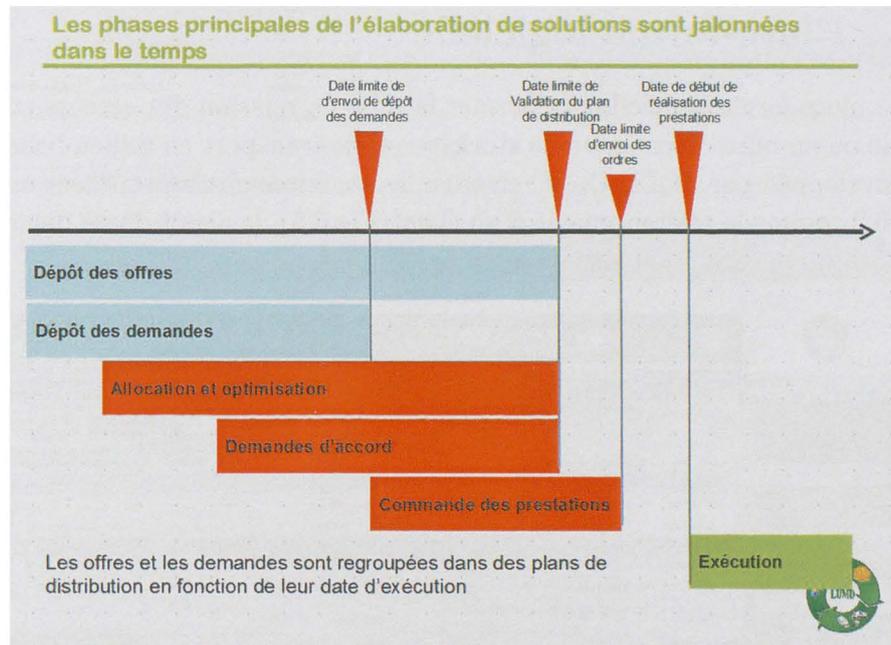


FIG. 6.4 – Le moteur d'allocation LUMD

plan de distribution. En d'autres termes, le module d'allocation calcule le plan de distribution ; il vérifie par la suite la faisabilité en terme de chargement du véhicule en faisant appel au module d'optimisation du chargement. Dans le cas où le module de chargement donne une réponse négative, il renvoie le sous-ensemble minimum de colis à retirer pour que l'instance soit réalisable.

- **Le module de résolution de pannes.** Ce module intervient, en cas d'incident entre la validation du plan et son exécution. Il vise à trouver une solution en temps réel grâce à une négociation avec les transporteurs situés à proximité au moment de l'incident. Une approche Système Multi-Agents a été développée. Le module a besoin de la localisation des moyens de transport. Cette localisation peut être temps réel (géolocalisation), elle peut être aussi prévisionnelle par exploitation des ordres de transports ou potentielle par exploitation du réseau d'offre. La résolution de panne n'est pas forcément « temps réelle » (l'aléa vient de se produire), elle peut être aussi dans un futur proche lorsque l'on apprend qu'un ordre devant se réaliser dans le futur ne pourra pas être réalisé.

## 6.5 Plate-forme logicielle

La plate-forme logicielle qui permet la mise en relation des acteurs en demande ou en offre de capacité de stockage ou de transport en milieu urbain a été développée par SQLI. On y retrouve les fonctionnalités proposées en Figure 6.2 comme le référencement d'un client (Fig.6.5), le dépôt d'une demande (Fig.6.6) ou encore d'une offre logistique (Fig.6.7).

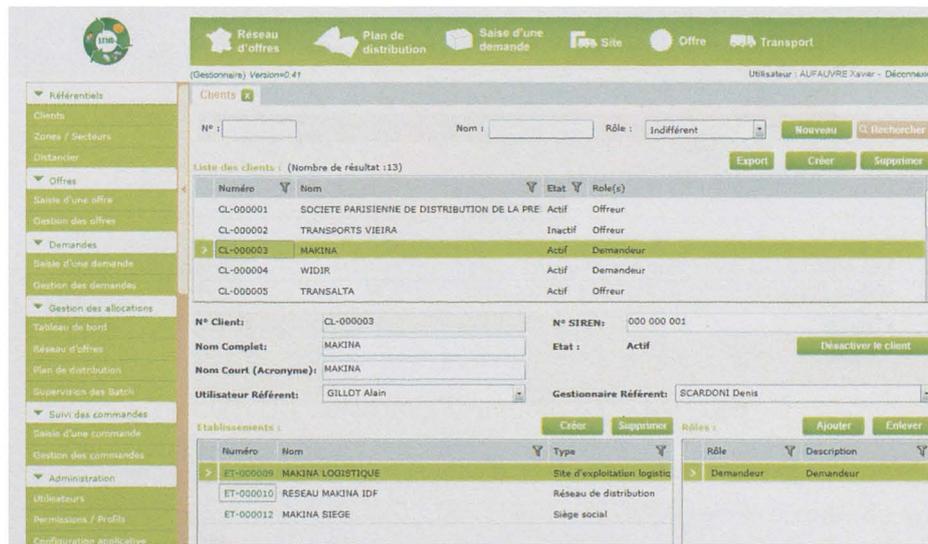


FIG. 6.5 – Référencement d'un client

## 6.6 Evaluation de la solution de mutualisation LUMD

L'espace géographique de la région Ile De France est agrégé en 208 zones et le nombre de périodes de temps est de 192. La Figure 6.8 représente le découpage géographique de la région Ile De France pour laquelle Paris intra-muros est agrégé en 80 zones. Les 192 périodes correspondent à un horizon de deux jours fractionné en quart d'heure. L'ordre de grandeur minimal du nombre de demandes et d'offres à gérer est de l'ordre de la centaine. A ce jour, l'évaluation de la solution sur des données réelles issue des enquêtes nationales « Marchandises en Ville » est effectuée par le Laboratoire d'Economie des Transport. Des bases de données de ces enquêtes, 400 tournées complètes ont été sélectionnées. Ces tournées sont déconstruites pour être transformées en demandes et offres LUMD. L'évaluation vise à comparer, en terme économique, sociétal et

Gestion des demandes x Demande DE-000060 x

N° Dossier : DE-000060 Client : MAKINA Saisi par : SCARDONI Denis  
Déposé le : 02/09/2011 Intitulé : MAKINA BOBIGNY Modifié par : SCARDONI Denis le 02/09/2011 16:00  
Statut : A allouer  Demande récurrente

UM Lot Prestation Notes Journal Allocation

Liste des prestations :

N°	Type	Statut	Lot(s)	Instructions
> 1	Transport	Brouillon	LOT 1	...

N° prestation : 1 Type : Transport Status : Brouillon Poids (Kg) : 750  
Zone départ : 93048 - Montreuil Zone arrivée : 93029 - Drancy  
Lot(s) : Lot 1 - LOT 1

Contraintes opérationnelles et services :

Catégorie	Objet	Description
+	Contrainte	Horaire d'enlèvement Du 20/09/2011 au 20/09/2011 de 09:00 à 12:00, -
+	Contrainte	Horaire de livraison Du 20/09/2011 au 20/09/2011 de 10:00 à 12:30, -
+	Contrainte	Adresse d'enlèvement France, 93100, MONTREUIL, 93048, -
+	Contrainte	Adresse livraison France, 93000, Bobigny, 93029, -
+	Contrainte	Equipement car Oui

FIG. 6.6 – Dépôt d'une demande

Gestion des offres x Offre OF-000056 x

N° Dossier : OF-000056 Client : NEXUS Saisi par : Administrateur LUMD  
Déposé le : 02/09/2011 Intitulé : NXS RUE DU BAC/BERCY Modifié par : SCARDONI Denis le 05/09/2011 18:44  
Statut : Valide  Récurrent

Prestation Notes Journal Allocation

Liste des prestations :

N°	Type	Statut	Jour	Moyen	Zone départ	Zone arrivée
> 1	Transport	A allouer	20/09/2011	MT-000016 - Camion por	2025 - SAINT-THOMAS-D	2047 - BERCY 12ART

N° prestation : 1 Type : Transport Status : A allouer Poids : 9000  
Moyen transport : MT-000016 - Camion porteur  Trajet direct  
Zone départ : 2025 - SAINT-THOMAS-D'AQUIN 7ART Zone arrivée : 2047 - BERCY 12ART

Contraintes opérationnelles et services :

Catégorie	Objet	Description
+	Contrainte	Horaire de livraison Du 20/09/2011 au 20/09/2011 de 08:00 à 10:30, -
+	Contrainte	Horaire d'enlèvement Du 20/09/2011 au 20/09/2011 de 08:00 à 10:30, -
+	Contrainte	Adresse livraison France, 75012, PARIS, 2047, -
+	Contrainte	Adresse d'enlèvement France, 75007, Paris, 2025, -

FIG. 6.7 – Dépôt d'une offre

écologique, la distribution faite par LUMD à une distribution traditionnelle par tournée.

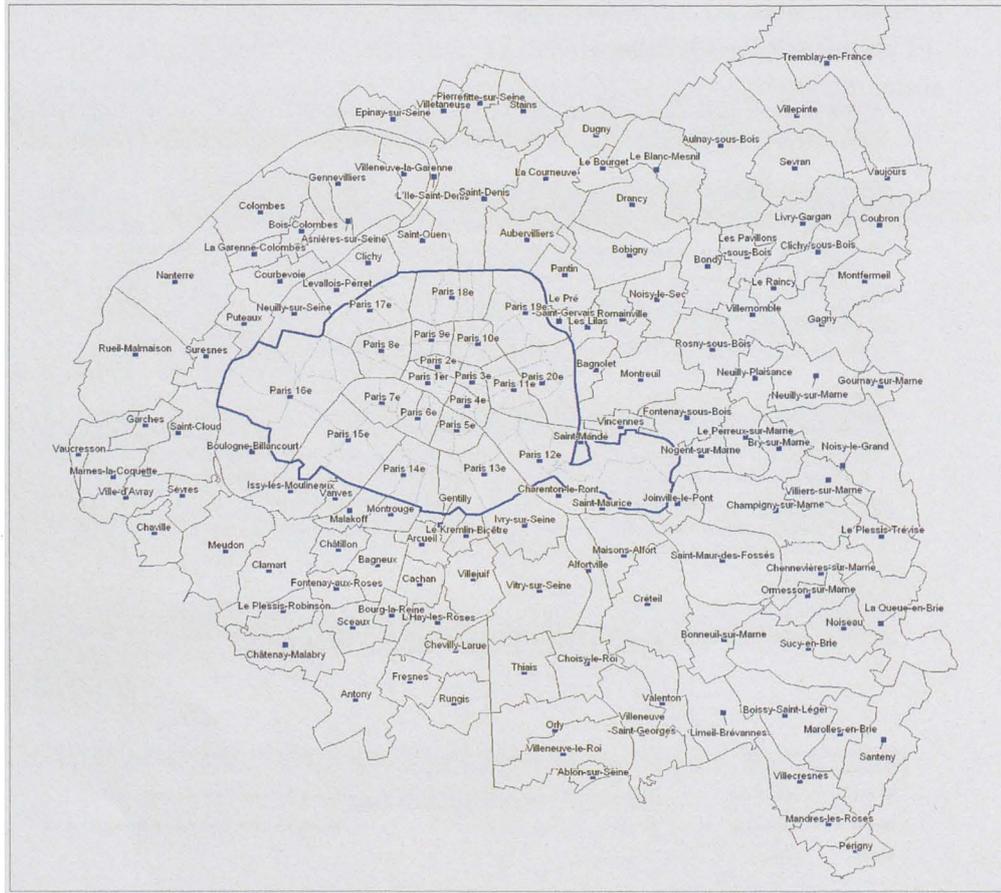


FIG. 6.8 – Le zonage initial

Afin de proposer un ensemble d'indicateurs de performance durable, un état de l'art des travaux scientifiques en évaluation de la performance durable pour la distribution de marchandises a été écrit par Feliu [42]. A partir de ces travaux, le LET a choisi une démarche d'évaluation qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. A partir d'une première liste d'indicateurs, a été défini un tableau de bord pour la performance durable de LUMD. Il contient trois indicateurs économiques (indicateurs financiers, taux de remplissage d'un entrepôt, taux de parcours en charge d'un véhicule), un indicateur qualitatif (Taux de service) et trois indicateurs environnementaux et sociétaux (émissions de gaz à effet de serre, gain en terme de nombre véhicules utilisés, emploi).

Sur le plan économique, le but est de montrer que le système est soutenable sans subvention publique. L'indicateur proposé est un bilan coûts-bénéfices de la plate-forme, pour montrer que les bénéfices sont supérieurs aux coûts et donc qu'il n'est pas nécessaire de faire recours à des aides publiques pour assurer la continuité économique de la plate-forme.

## 6.7 Dimensionnement espace/temps

Les premières évaluations grandeur nature du module d'allocation ont mis en évidence le besoin d'une certaine adéquation entre l'agrégation temporelle et le découpage géographique. Dans le cadre d'une application urbaine, un pas de temps de 15 minutes paraît approprié. Le premier découpage de la région Ile De France en 208 zones est celui fait dans FRETURB sur des critères socio-économiques. L'avantage de ce découpage est d'associer à chaque zone un niveau d'activité logistique potentielle utile à la génération de nos instances. Etant donné la modélisation du système logistique sous forme de graphe espace-temps multi-couches proposée au chapitre 3, la discrétisation géographique impact fortement la taille de la formulation proposée pour le problème d'allocation de demandes. Plus le nombre de zones est important plus la taille du modèle augmente. Réduire le nombre de zones de l'espace géographique engendre des zones plus vastes. Avoir des zones très vastes en rapport au pas de temps considéré peut créer des situations où le temps de parcours entre deux points de zones distinctes soit éloigné du temps de parcours entre les centroïdes de ces deux zones. Dans ce cas, il est difficile de garantir la faisabilité du plan de distribution résultant du problème d'allocation. Afin d'éviter ce genre de situation, nous préconisons un zonage défini sur des critères purement géométriques où le temps de parcours entre deux points extrêmes d'une même zone soit proche du pas de temps considéré. La Figure 6.9 propose un zonage de Paris et de sa proche banlieue en utilisant cette technique de découpe. Les vitesses moyennes de déplacement à Paris étant plus faible qu'en périphérie, les zones "parisiennes" sont de plus faible superficie.

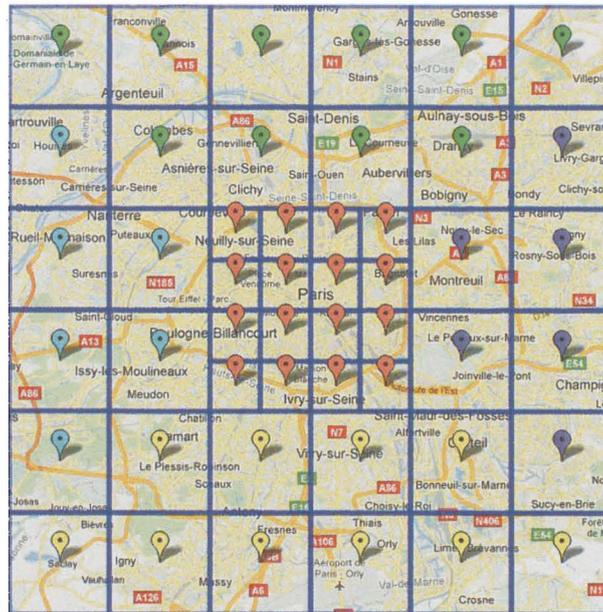


FIG. 6.9 – Le zonage de LUMD

## 6.8 Extensions futures en vue de l'intégration de la gestion du revenu

A l'heure actuelle, la politique d'acceptation ou de refus d'une demande est basée uniquement sur des critères d'admissibilité et sur la règle du premier arrivé premier servi. Afin d'accroître l'efficacité de l'outil de mutualisation développé dans le projet LUMD, une approche inspirée de la Gestion du Revenu pourrait être utilisée. Plus précisément, à partir d'une segmentation de la clientèle, une offre de service différenciée (par rapport à des délais de livraison ou l'anticipation des demandes) pourrait être proposée au client. En d'autres termes, différentes classes tarifaires peuvent être proposées aux clients, favorables aux clients anticipant leur demande ou ayant des délais de livraisons larges. La politique d'acceptation ou de refus d'une demande sera donc basée sur des critères d'admissibilité mais aussi sur des critères de revenu en tenant compte des demandes futures.

La Gestion du Revenu ou Revenue Management (RM), connue sous la dénomination anglophone de « Yield Management » est définie comme un ensemble d'outils destinés à favoriser la rentabilité d'une entreprise à travers l'optimisation et la ré-optimisation de la chaîne offre-demande dans sa globalité. Elle peut être résumée par la phrase suivante : « Le RM est la stratégie qui consiste à vendre le bon produit, au bon client, au bon prix, au bon mo-

ment. » [1]. La problématique du RM est le contrôle d'une demande aléatoire qu'il faut associer à une offre fixe et périssable grâce à un système de tarification différenciée. Le développement de la GR fut fortement stimulé vers la fin des années 1970 par la déréglementation du transport aérien aux États-Unis. Le RM permet de s'approcher au plus près et durablement de cet équilibre en assurant un suivi rigoureux de la vente des unités disponibles par l'action simultanée sur l'offre et la demande [37]. La seconde raison justifiant la réussite des techniques du RM est l'action par une tarification flexible. Rappelons qu'une action sur le prix présente, pour un coût faible, l'avantage d'avoir un effet immédiat sur la demande, notamment lorsqu'elle est sensible au prix. La tarification flexible permet l'ajustement de la capacité disponible aux variations de la demande et par conséquent une meilleure rentabilité de l'offre. Cette rentabilité découle de tarifs différenciés en fonction de la date de vente, de la qualité de service vendu et de la catégorie du client, ce qui permet d'optimiser le rendement de chaque unité de la capacité. Le RM, système de management des capacités disponibles, tient compte des risques de capacités vacantes / invendus et des prévisions d'activités par segment de marché. La tarification entre dans le cadre d'une collaboration *win-win* entre le demandeur et l'offreur de capacité logistique. Ce type de système n'a, pour le moment, jamais été utilisé pour des problèmes de transport urbain.

Une des difficultés d'application des techniques classiques de Gestion du Revenu à notre problématique est que l'on ne réserve pas une unité de capacité sur une section du réseau (un siège d'avion, un wagon de train ...) mais plutôt de la capacité d'un véhicule qui devra être dérouté. Une façon de faire serait pour chaque demande de résoudre le modèle de réservation en tenant compte des estimations des demandes futures et en imposant l'acceptation de la demande (si bien sur elle est admissible) puis de résoudre le modèle sans la demande courante. La demande est acceptée si le scénario l'incluant engendre un revenu supérieur à celui l'excluant.

A ce jour, en raison de l'absence de données permettant d'estimer raisonnablement les demandes futures, nous n'avons pas appliqué ce genre de politique, nous ne refusons pas une demande pouvant être acheminée. Suite à l'exploitation de la plate-forme, des données seront acquises qui permettront à l'avenir d'intégrer cette politique dans la gestion du système.



# Conclusion

---

Dans cette thèse nous avons considéré une association d'acteurs logistiques d'une même zone urbaine mettant en commun les capacités résultantes de leur activité respective. Cette mise en commun permet, sans investissement, de transformer des espaces vacants et des moyens de transport sous-utilisés en un nouveau réseau d'offres source de création de valeur. A partir d'un ensemble de données décrivant les caractéristiques du système, de l'offre logistique, de l'ensemble des demandes, il s'agit de déterminer la façon dont les demandes acceptées vont être acheminées de manière à optimiser le revenu engendré par l'acceptation de demandes. Notre problème consiste à déterminer une allocation de demandes sur un réseau d'offres logistique fixé. Une première contribution de cette thèse est la modélisation sous forme de graphe espace-temps multi-couches de l'offre logistique permettant notamment d'exprimer l'ensemble des possibilités de transport de chaque offre quelque soit le mode de transport. Elle possède l'avantage de matérialiser facilement les possibilités de transbordement de marchandises entre les différents acteurs mais aussi de prendre en compte aisément des contraintes de compatibilité entre deux éléments logistiques. Contrairement aux problèmes de transport longue distance, une offre de transport en milieu urbain n'est pas forcément restreinte à un transport direct entre deux points. A partir du point de mise à disposition d'un véhicule et de son point de restitution nous proposons une technique d'énumération des possibilités de transport proposé par ce véhicule. A partir de cette modélisation du réseau logistique, nous traitons le problème d'allocation de demandes comme un problème de flots multi-produits et en proposons une formulation mathématique suffisamment générique pour laisser la possibilité d'introduire, par la suite, de nouvelles contraintes métier. Nous montrons les limites de cette formulation pour la résolution d'instances de grande taille.

Une seconde contribution réside en la proposition de techniques de réduction de variables dans l'optique de diminuer la taille du modèle et résoudre des instances de grande taille. La première technique se repose sur la compatibilité physique entre une demande et une offre. Connaissant à priori la quantité de marchandises à transporter et la capacité proposée par chaque

offre, il est aisé d'en déduire la faisabilité d'un couple offre/demande. L'ensemble des variables associé aux couples non compatibles n'est pas défini. Sur le même principe, la deuxième technique se base sur l'étude de la compatibilité entre une offre et une demande en terme de compatibilité horaire. Ces deux techniques permettent la réduction de la taille du modèle sans modifier l'espace des solutions réalisables. La troisième technique de réduction vise à limiter les possibilités de transport associées à un véhicule. Il s'agit de réduire la zone de chalandise de ce véhicule. Nous proposons deux stratégies de construction de la zone de chalandise de chaque véhicule. Nous avons montré en faisant varier le nombre de zones accessibles à chaque véhicule qu'il était possible de réduire significativement la taille du modèle tout en conservant une qualité de solution acceptable. Les résultats montrent aussi l'importance de la construction des zones de chalandise de chaque véhicule sur la qualité de la solution du problème d'allocation. Les deux stratégies proposées construisent indépendamment chaque zone de chalandise sans tenir compte des zones déjà constituées. Sur certaines instances, on se retrouve dans des situations où certaines zones sont *sur-couvertes* et d'autres *sous-couvertes*. Nous proposons de traiter le sous-problème de construction des zones de chalandise comme un problème b-couplage. Cette perspective permettrait d'utiliser la connaissance complète du réseau logistique pour définir une meilleure couverture de la demande par l'offre spécifique.

En vue d'une utilisation industrielle, nous complétons la formulation mathématique afin de considérer certaines variantes du problème d'allocation de demandes. Certains types de demande de transport, correspondant à des besoins de distribution fréquemment exprimé par des acteurs logistiques, ne peuvent se formuler comme un transport entre deux points géographiques d'une quantité de marchandises sous contraintes horaires. Nous intégrons au modèle des demandes plus complexes pour lesquelles, par exemple, le point de chargement/livraison n'est pas spécifiquement imposé. Nous intégrons à la formulation des contraintes liant les décisions d'acceptation de certaines demandes. Finalement, nous complétons la formulation pour y intégrer les demandes de *repacking*. La particularité des demandes de *repacking* est de devoir faire transiter les marchandises sur une plate-forme pour les reconditionner afin d'assurer leurs distributions jusqu'au client final.

Les deux objectifs principaux de cette thèse étaient de modéliser le problème d'allocation de demandes dans un contexte de mutualisation et de proposer une méthode capable de résoudre des instances compatibles avec une utilisation industrielle tout en laissant la possibilité de venir greffer au problème des contraintes métiers. Bien que développé dans pour une application urbaine, il pourrait être intéressant d'utiliser ces travaux sur des problèmes de transport longue distance. Une autre perspective, évoquée au chapitre 6, est

l'introduction de techniques de gestion de revenu dans l'optique de renforcer l'objectif de rentabilisation de l'offre logistique.

La disponibilité des capacités et les caractéristiques des flux sont d'une grande variabilité surtout en centre-ville, une perspective intéressante pour compléter l'offre de service de LUMD est de proposer un niveau de réactivité quasi temps réel. Tout comme le module de résolution de pannes décrit dans la section 6.4, il s'agit, à partir d'une information du trafic en temps réel d'intégrer au plan de distribution des flux non planifiés et urgents.

D'un point de vue applicatif, le projet a montré qu'une offre de service à base de capacités résiduelles, soutenue par un moteur d'allocation performant peut être mise sur le marché. Il débouche sur nouveau projet de mise en œuvre commerciale. La première étape est le lancement d'un démonstrateur opérationnel sur une agglomération française.



# Bibliographie

- [1] AMR Annual Report, 1987. (Cité en page 85.)
- [2] J. Andersen, T.G. Crainic, M. Christiansen. *Service network design with asset management.*, CIRRELT-2007-40. (Cité en page 31.)
- [3] J. Andersen, T.G. Crainic, M. Christiansen. *Service network design with asset management : Formulations and comparative analyses*, Transportation Research Part C, Volume 17, Issue 2, (2009) 105-224. (Cité en pages 23 et 31.)
- [4] J. Andersen, T.G. Crainic, M. Christiansen. *Service network design with management and coordination of multiple fleets*, European Journal of Operational Research 193 (2009) 377-389 (Cité en page 31.)
- [5] J. Andersen, T.G. Crainic, M. Christiansen, R. Gronhaug. *Branch-and-Price for Service Network Design with Asset Management Constraints*, CIRRELT-2009-58. (Cité en page 31.)
- [6] M. Albareda-Sambola *Models and Algorithms for Location-Routing and Related Problems* Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. (Cité en page 11.)
- [7] E. Angelelli, R. Mansini *The vehicle routing problem with time windows and simultaneous pickup and delivery.*, Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management. Springer, Berlin Heidelberg, 249-267, 2002 . (Cité en page 18.)
- [8] R. Baldacci, P. Toth, D. Vigo *Recent advances in vehicle routing exact algorithms* 4OR : A Quarterly Journal of Operations Research Volume 5, Number 4, 269-298 (Cité en page 16.)
- [9] R. Baldacci, N. Christofides, A. Mingozzi, 2007 : *An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts*. Mathematical Programming Ser. A. (Cité en page 15.)
- [10] M. Balinski, R. Quandt, *On an integer program for a delivery problem*. Operations Research, 12, 1964. (Cité en page 15.)
- [11] C. Barnhart, N. Krishan, D. Kim, K. Ware. *Network design for express shipment delivery*. Computational Optimization and Applications, 21(3) :239-262, 2002. (Cité en page 24.)
- [12] T. Bektas, T.G. Crainic *A Brief Overview of Intermodal Transportation* CIRRELT-2007-03. (Cité en page 29.)
- [13] N. Bianchessi, G. Righini *Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery*. Comput Oper Res 34 578-594, 2007. (Cité en page 18.)

- [14] C. Boulanger *Heuristiques basées sur la programmation mathématique pour des problèmes de localisation et de routage*. Manuscrit de thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes. (Cité en page 11.)
- [15] T.G. Crainic, M. Florian, J.E. Leal *A Model for the Strategic Planning of National Freight Transportation by Rail* *Transportation Science*, 24(1) 1:24, 1990. (Cité en page 21.)
- [16] A. Chapdaniel *Supply chain management et dynamique d'évolution* *Management et informatique* (Cité en page 1.)
- [17] T.G. Crainic, M. Gendreau, J.Y. Potvin *Intelligent freight-transportation systems : Assessment and the contribution of operations research* *Transportation Research Part C* 17 (2009) 541-557. (Cité en page 21.)
- [18] T.G. Crainic *Service Network Design for Consolidation Freight Carriers* <http://www.chairecrsnglogistique.uqam.ca/pdf/service06.pdf> (Cité en page 21.)
- [19] T.G. Crainic, G. Perboli, S. Mancini, R. Tadei *Two-echelon vehicle routing problem : A satellite location analysis* *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5944-5955, 2010 (Cité en page 12.)
- [20] T.G. Crainic, F. Semet, *Recherche opérationnelle et transport de marchandises*, *Optimisation Combinatoire* 3, V. Paschos, éditeur, Hermès (2005). (Cité en page 20.)
- [21] T.G. Crainic *Service network design in freight transportation*, *European Journal of Operational Research* 122 (2000) 272-288. (Non cité.)
- [22] T.G. Crainic *City Logistics*, 2008 INFORMS | isbn 978-1-877640-23-0. (Cité en page 2.)
- [23] T.G. Crainic *A Survey of Optimization Models for Long-Haul Freight Transportation*, *Handbook of Transportation Science* R.W. Hall (Ed.), 2nd Edition, 451-516, Kluwer, 2003 November 3, 2005 1. (Cité en page 21.)
- [24] T. Crainic, N. Ricciardi, G. Storchi *Advanced freight transportation systems for congested urban areas* *Transportation Research Part C* 12 (2004) 119-137. (Cité en page 2.)
- [25] T. Crainic, N. Ricciardi, G. Storchi *Models for Evaluating and Planning City Logistics Transportation Systems* CIRRELT-2007-65. (Cité en page 2.)
- [26] T.G. Crainic, A. Sforza, C. Sterle *Location-Routing Models for Two-Echelon Freight Distribution System Design* CIRRELT-2011-40. (Non cité.)
- [27] T. G. Crainic, B. Gendron, G. Hernu. *A slope scaling/Lagrangean perturbation heuristic with long-term memory for multicommodity capacitated*

- fixed charge network design*. J. of Heuristics, 10(5) :525-545, 2004. (Cité en page 26.)
- [28] M. Desrochers, J. Desrosiers, M.M Solomon. *A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows* Operations Research, 40 342 :354, 1992. (Cité en page 15.)
- [29] J. Dethloff *Vehicle routing and reverse logistics : The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up*. OR Spektrum 23 79-96, 2001. (Cité en page 18.)
- [30] K.F. Doerner, V. Schmid *Survey : Matheuristics for Rich Vehicle Routing Problems* Lecture Notes in Computer Science, 2010, Volume 6373, 206-221 (Cité en page 13.)
- [31] A.V. Donati, R. Montemanni, N. Casagrande, A.E. Rizzoli, L.M. Gambardella. *Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system*. Technical Report IDSIA -02-03, International IDSIA, 2003. (Cité en page 17.)
- [32] M. Drexler *Rich Vehicle Routing in Theory and Practice* Technical Report LM-2011-04 (Cité en page 13.)
- [33] Z. Endong *Scheduled Service Network Design for Integrated Planning of Rail Freight Transportation* Manuscrit de thèse de doctorat de l'Université de Montréal (Cité en page 26.)
- [34] D. Espinoza, R. Garcia, M. Goycoolea, G. L. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh *On-Demand Air Transportation Part I : Problem Description and an Integer Multicommodity Flow Model*. Transportation Science Vol. 42, No. 3, August 2008, pp. 263-278 (Cité en page 26.)
- [35] D. Espinoza, R. Garcia, M. Goycoolea, G. L. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh *On-Demand Air Transportation Part II : Parallel Local Search*. Transportation Science Vol. 42, No. 3, August 2008, pp. 279-291 (Cité en page 26.)
- [36] J. M. Farvolden, W. B. Powell. *Subgradient methods for the service network design problem*. Transportation Science, 28(3) :256 (1994). (Cité en page 24.)
- [37] J.A. Fitzsimmons, M.J. Fitzsimmons *Service Management, Operations, Strategy, and Information Technology* McGraw-Hill, deuxième édition, 1999. (Cité en page 85.)
- [38] M. Gendreau, G. Laporte, D. Vigo *Heuristics for the traveling salesman problem with pickup and delivery*. Comput Oper Res 26 699-714, 1999. (Cité en page 18.)

- [39] M. Gendreau, J-Y. Potvin, O. Bräumlaysy, G. Hasle, A. Løkketangen *Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions : A Categorized Bibliography* The Vehicle Routing Problem : Latest Advances and New Challenges Operations Research Computer Science Interfaces Series, 2008, Volume 43, Part I, 143-169 (Cité en page 16.)
- [40] B. Gendron, T. G. Crainic. *Relaxations for multicommodity network design problems*. Research Report CRT-965, Centre de recherche sur les transports, Montréal, Canada, 1994. (Cité en page 26.)
- [41] B. Gendron, T. G. Crainic. *Bounding procedures for multicommodity capacitated fixed charge network design problems*. Research Report CRT-96-06, Centre de recherche sur les transports, Montréal, Canada, 1996. (Cité en page 26.)
- [42] J. Gonzalez-Feliu, J. Morana, (2010), *La mutualisation des livraisons en milieu urbain : une réflexion sur les marges de manœuvre du groupe NMPP*. Revue Française de Gestion Industrielle, N  spécial sur la logistique urbaine, Vol. 29, n  2, pp. 71-91. (Cité en page 82.)
- [43] J. Guelat, M. Florian, T.G. Crainic, *A multiproduct multimode network assignment model for strategic planning of freight flows*. Transportation Science, 24 (1990), pp. 25-39. (Cité en page 31.)
- [44] A. Haghani, S. Jung *A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times* Computers and Operations Research, 32 2959 :2986, 2005. (Cité en page 17.)
- [45] S. Ichoua, M. Gendreau, J-Y. Potvin *Vehicle dispatching with time-dependent travel times*. European Journal of Operational Research, 144 :379 396, 2003. (Cité en page 17.)
- [46] S.K. Jacobsen, O.B.G. Madsen *A comparative study of heuristics for a two-level routing location problem*. European Journal of Operational Research, 5, p. 378-387 1980. (Cité en page 12.)
- [47] D. Kim, P. M. Pardalos. *A solution approach to the fixed charge network flow problem using a dynamic slope scaling procedure*. Oper. Res. Letters, 24 : 195-203, 1999. (Cité en page 26.)
- [48] C. Malandraki, M.S. Daskin. *Time dependent vehicle routing problems : Formulations, properties and heuristic algorithms* Transportation science, 26 185 :200, 1992. (Cité en page 17.)
- [49] H. Min *The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points*. Transport Res A Pol 23 377-386,1989. (Cité en page 18.)

- [50] V.P. Nguyen, C. Prins, C. Prodhon *Approches heuristiques pour le Problème de Localisation - Routage à deux niveaux* ROADEF 2010 - Toulouse (Cité en page 12.)
- [51] Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) *Transport urbain de marchandises les défis du XXIème siècle* Éditions OCDE, ISBN : 9789264024113, (2004) (Cité en page 6.)
- [52] S. N. Parragh, K.F. Doerner, R.F. Hartl *A survey on pickup and delivery problems* (Cité en page 18.)
- [53] M.B. Pedersen, T.G. Crainic, O.B.G. Madsen *Models and Tabu Search Meta-Heuristics for Service Network Design with Asset-Balance Requirements* CIRRELT-2007-49. (Cité en page 24.)
- [54] *Logistique et distribution urbaine*. Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques. (Cité en pages 2 et 3.)
- [55] C. Prodhon *Le problème de localisation-routage* Manuscrit de thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes. (Cité en page 11.)
- [56] R. Ries *Transports urbains : quelles politiques pour demain ?* Commissariat général du plan (2003). (Cité en page 3.)
- [57] S. Schrenk *Contributions à la conception de réseau de service en transport*, Manuscrit de thèse. (Cité en pages 20, 26 et 45.)
- [58] S. Schrenk, T.G. Crainic, V.D. Cung, G. Finke *Comparaison de différentes formulations de conception de réseaux pour un problème de transport de fret avec gestion de véhicules*. CIRRELT-2010-27. (Cité en page 24.)
- [59] M. Tagmouti, M. Gendreau, J.Y. Potvin *Arc routing problems with time-dependent service costs* European Journal of Operational Research 181 (2007) 30-39. (Cité en page 17.)
- [60] FA. Tang Montané, RD. Galvao *A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service* Comput Oper Res 33 595-619, 2006. (Cité en page 18.)
- [61] N. Teypez *Contribution à la résolution de problèmes de transport en commun et de fret : modélisations et algorithmes* Manuscrit de thèse. (Cité en pages 19 et 24.)
- [62] P. Toth, D. Vigo, editors. *The Vehicle Routing Problem*, volume 9 of SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM, 2002. (Cité en page 12.)
- [63] T. Van Woensel, L. Kerbache, H. Peremans and N. Vandaele *Vehicle routing with dynamic travel times, a queueing approach* European Journal of Operational Research 186 (2008) 990-1007. (Cité en page 17.)

- [64] N. Wieberneit *Service network design for freight transportation : a review* OR Spectrum Volume 30, Number 1, 77-112. (Cité en page 20.)
- [65] E. Zhu, T.G. Crainic, M. Gendreau *Scheduled Service Network Design for Freight Rail Transportation* CIRRELT-2011-38. (Cité en page 21.)

---

**Résumé :** La croissance de la congestion des infrastructures routières, en particulier dans les zones urbaines, est préoccupante et impose de trouver des solutions à la productivité générale de la filière logistique. Au niveau des pratiques actuelles du secteur de la logistique, on observe que : de nombreux trajets routiers se font à vide ; de nombreux entrepôts ont des capacités de stockage non utilisées ; les échanges intermodaux sont faibles ; les capacités de transport ferroviaire ou voies navigables sont sous-utilisées. Partant d'un tel constat il est clair que de nouvelles organisations en matière de logistique urbaine sont nécessaires. Nos travaux se reposent sur une solution de mutualisation de capacités logistiques résiduelles. Nous considérons une association d'acteurs logistiques d'une même zone urbaine mettant en commun les capacités résultantes de leur activité respective. Cette mise en commun permet, sans investissement, de transformer des espaces vacants et des moyens de transport sous-utilisés en un nouveau réseau d'offres source de création de valeur. Le but de cette thèse est de développer un ensemble de modèles permettant l'optimisation de l'utilisation de ce réseau d'offres. A partir d'un ensemble de données décrivant les caractéristiques du système, de l'offre logistique, de l'ensemble des demandes, il s'agit de déterminer la façon dont les demandes acceptées vont être acheminées de manière à optimiser le revenu engendré par l'acceptation de demandes. Notre problème consiste à déterminer une allocation de demandes sur un réseau d'offres logistique fixé. Une première contribution de cette thèse est la modélisation sous forme de graphe espace-temps de l'offre logistique permettant notamment d'exprimer l'ensemble des possibilités de transport de chaque offre quelque soit le mode de transport. Contrairement aux problèmes de transport longue distance, une offre de transport en milieu urbain n'est pas forcément restreinte à un transport direct entre deux points. Nous modélisons ensuite le problème d'allocation de demandes comme un problème de flots multi-produits et en proposons une formulation mathématique. Une seconde contribution réside en la proposition d'une série de techniques de réduction de variables permettant de diminuer la taille du modèle et ainsi de résoudre des instances de grandes tailles. En vue d'une utilisation industrielle, nous complétons la formulation mathématique afin de considérer certaines variantes du problème d'allocation de demandes. Dans la dernière partie de ce mémoire, nous décrivons l'intégration du module d'allocation des demandes dans une solution logicielle développée pour traiter un cas réel.

**Mots clés :** Modèle en nombres entiers, Graphe espace-temps, Logistique urbaine.

---





---

**Abstract :**

The growing congestion of road infrastructure, particularly in urban areas, is alarming and requires solutions to increase the logistics productivity. In terms of current practices of the logistics sector, we observe that : vehicle capacity is underutilized, many warehouses have storage capacity unused, rail transportation, metro or waterways are underutilized. Based on this observation and to improve profitability, service companies managing a fixed capacity aim to increase their occupancy rates. To achieve this goal, we propose an innovative strategy among all actors of the logistic chain which relies on the mutualization of unused logistic capacities. The purpose of this sharing policy is to create a new network of logistic services able to increase the overall ability of the system to satisfy efficiently new demands. Starting from a set of data describing the logistic system and from the set of demands, we determine the transportation route of the demands in order to maximise the revenue generated by demand acceptance. Our problem consists of the allocation of demands on the network of logistic services. A first contribution of this dissertation is our model of the logistic services based on a time-space network, which allows us to express the set of movement possibilities for each service, whatever the transportation mode might be. As opposed to long haul transportation problems, urban transportation services are not necessarily restraint to direct transportation. Next, we handle the demand allocation problem as a multi-commodity flow problem and propose a mathematical formulation. A second contribution consists of proposing a series of techniques for reducing the size of the formulation such that bigger instances can be solved in a reasonable time. For industrial use, we complete the mathematical formulation in order to consider variants of the demand allocation problem. In the last part of this dissertation we describe the integration of the demand allocation module in a software solution for industrial use.

**Keywords :** Operations research, logistics in the city, mathematical programming

---