

Une méthodologie pour modéliser et optimiser la mutualisation du transport ferroviaire urbain de marchandises et de passagers

Walid Behiri

▶ **To cite this version:**

Walid Behiri. Une méthodologie pour modéliser et optimiser la mutualisation du transport ferroviaire urbain de marchandises et de passagers. Modélisation et simulation. Université Paris-Est, 2017. Français. NNT : 2017PESC1050 . tel-01786922

HAL Id: tel-01786922
https://pastel.hal.science/tel-01786922

Submitted on 7 May 2018

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 PARIS-EST

ECOLE DOCTORALE MSTIC

THÈSE

Présentée par

Walid BEHIRI

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'université Paris-Est
Spécialité : Informatique

Une méthodologie pour modéliser et optimiser la mutualisation du transport ferroviaire urbain de marchandises et de passagers

Soutenue à ESIEE Paris le 13/12/2017

Composition du jury :

Président du jury :	Alexandre DOLGUI	Professeur, IMT Atlantique
Rapporteurs :	Hamid ALLAOUI	Professeur, Université d'Artois
	Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS	Professeur, Ecole des Mines, St Etienne
Examinateurs :	Eric BALLOT	Professeur, Mines ParisTech
	Chengbin CHU	Professeur, ESIEE Paris
	Joaquin RODRIGUEZ	Directeur de recherche, IFSTTAR, Lille
Directeur :	Mohamed AKIL	Professeur, ESIEE Paris
Co-Directeur :	Sana BERRAF-BELMOKHTAR	Maître de Conférences, ESIEE Paris

A la mémoire de ma mère

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m’ont porté aide, assistance et encouragements dans l'élaboration de cette recherche.

Mes remerciements s’adressent à Monsieur Mohamed Akil, pour son engagement en tant que directeur de ma thèse, pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien. Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Mme Sana Berraf-Belmokhtar, qui en encadrant cette thèse a été au plus près de mes questionnements, mais également de mes difficultés. Sa compétence, sa rigueur intellectuelle et son esprit critique m’ont motivé et guidé tout au long de mon parcours de recherche. Merci aussi pour les nombreuses relectures, les corrections, les encouragements et l’intégration progressive dans ce monde qui m’était inconnu.

Je tiens à adresser un remerciement particulier à Monsieur Joël Danard, chargé du projet Tramfret à l’institut de recherche Efficacity, chacun de nos échanges a généré une nouvelle impulsion à cette recherche.

Ma reconnaissance se porte vers Messieurs Stéphane Dauzère-Pérès, Professeur à l’École des Mines de Saint-Etienne et Hamid Allaoui, Professeur à l'Université d'Artois, pour l’honneur qu’ils me font en ayant accepté d’être les rapporteurs de cette thèse.

Que Messieurs Alexandre Dolgui, Professeur à l’IMT Atlantique, Chengbin Chu, Professeur à l’ESIEE Paris, Eric Ballot, Professeur à Mines ParisTech et Joaquin Rodriguez, Directeur de recherche à l’IFSTTAR de Lille, me permettent de leur exprimer ma gratitude pour avoir accepté d’examiner ce manuscrit et pour leur participation au jury.

J’adresse ma gratitude aux membres de l’école doctorale "MSTIC", du laboratoire de recherche "LIGM" et de l’ESIEE Paris. Aux enseignants qui ont contribué à ma formation, ainsi qu’à mes collègues et à tous ceux et celles avec qui j’ai eu le plaisir de travailler pendant le déroulement de tout mon parcours de recherche.

Je remercie également tous les doctorants et post-doctorants de l’ESIEE Paris, même si je les ai trop peu croisés pendant la thèse, pour les échanges amicaux que nous avons pu avoir ensemble. Je souhaite courage et réussite dans les plus brefs délais pour ceux qui n’ont pas encore terminé.

Un remerciement particulier à toute ma famille. Mon père, mon frère et ma sœur ; mes premiers *reviewers* et *relecteurs*. Merci de m’avoir toujours soutenu et encouragé, et surtout d’avoir cru en moi et supporté tout au long de mon parcours.

Table des matières

Introduction Générale 9

I. Chapitre I : Logistique et transport de marchandises en ville 14

1. Introduction 15

2. Logistique et transport de marchandises : définitions et concepts 15

3. Transport de marchandises en ville 19

3.1. Enjeux du TMV 20

3.2. Etat des lieux et pratiques actuelles 21

3.3. Cadre légal et règlementaire 24

3.4. Complexité du transport de marchandises en ville 25

3.5. Evolution et perspectives futures du TMV 27

4. Exemple du TMV en Ile-de-France (Paris intra-muros et sa périphérie) 31

4.1. Infrastructures logistiques en Ile-de-France 32

4.2. La gestion du transport de marchandises en région parisienne 34

5. Conclusion 36

II. Chapitre II : Transport de marchandises en ville par rail – mixité fret / voyageurs 39

1. Introduction 40

2. Pratiques et état des lieux : fret urbain par rail et mixité fret / voyageurs 40

2.1. L'espace souterrain pour le transport de marchandises 41

2.2. Mixité fret / voyageurs et utilisation du rail urbain : alternatives durables dans la littérature 43

2.3. Mixité fret / voyageurs : expérimentations et solutions en cours d'exploitation 52

3. Conception d'un modèle de transport mixte fret / voyageurs dans le réseau ferroviaire urbain 54

3.1. Composantes du réseau ferroviaire urbain de transport de voyageurs 56

3.2. Identification des cas de mixité possibles 59

4. Problématiques décisionnelles liées à la mixité fret / voyageurs dans le réseau ferroviaire urbain 65

4.1. Conception de la solution de transport étudiée 65

4.2. Identification et description des problématiques décisionnelles 68

5. Conclusion 74

III. Chapitre III : Etat de l'art des méthodes de modélisation des problèmes de transport 77

1. Introduction 78

2. Problèmes classiques de la littérature liés à la logistique urbaine 78
2.1. Problèmes classiques liés au transport 78
2.2. Problème d'affectation généralisée 80
3. Méthodes de résolution de la RO 81
3.1. Méthodes exactes 82
3.2. Méthodes approchées 87
4. Problèmes de replanification 90
4.1. Le principe d'horizon glissant et résolution d'un problème de replanification 91
4.2. La replanification dans la gestion de la chaine logistique 92
4.3. La replanification dans le transport ferroviaire 94
5. Simulation à évènements discrets – ARENA 96
5.1. Généralités sur la simulation 96
5.2. Démarche de réalisation d'un modèle de simulation 97
5.3. Simulation avec ARENA 99
6. Couplage simulation / optimisation 102
7. Conclusion 105
IV. Chapitre IV : Modélisation et simulation du FRTSP 107
1. Introduction 108
2. Hypothèses et description du FRTSP 108
2.1. Hypothèses du FRTSP 109
2.2. Formalisation du FRTSP 111
3. Une modélisation par simulation du FRTSP 114
3.1. Génération des commandes 114
3.2. Génération des trains 116
3.3. La ligne ferroviaire 118
3.4. Implémentation des processus décisionnels sur ARENA 119
3.5. Modèle conceptuel du modèle de simulation 123
4. Conclusion 126
V. Chapitre V : Modélisation mathématique et optimisation du FRTSP – cas prédictif et replanification 127
1. Introduction 128
2. Un exemple numérique 128
3. Complexité du problème FRTSP 131
4. Formulation d'un PLVM du FRTSP dans le cas prédictif 132

5. L’adaptation des colonies de fourmis pour le FRTSP 136
5.1. La variante AS des ACO 136
5.2. Différentes variantes d’ACO 139
6. Une approche par horizon glissant pour optimiser la replanification du FRTSP 144
6.1. Un PLVM pour la minimisation des changements lors de la replanification du FRTSP 147
6.2. L’approche de replanification par horizon glissant 148
7. Couplage simulation / optimisation 149
7.1. Cas prédictif 149
7.2. Cas de replanification 150
8. Conclusion 151
VI. Chapitre VI : Expérimentations et analyse des résultats 153
1. Introduction 154
2. Génération des instances 154
2.1. Paramétrage du modèle de simulation 154
2.2. Le cas prédictif 155
2.3. Le cas de la replanification 155
3. Analyse des résultats du couplage simulation / optimisation 156
3.1. PLVM dans le cas prédictif 156
3.2. Les heuristiques 160
3.3. Comparaison et évaluation du gap des heuristiques VS PLVM 161
3.4. La replanification 165
4. Les colonies de fourmis 168
4.1. Introduction à la méthode Taguchi 168
4.2. Paramétrage des variantes de colonies de fourmis 171
4.3. Résultats des différentes variantes de colonies de fourmis 178
5. Conclusion 181
Conclusion générale et perspectives 183
Bibliographie 187
Liste des publications 201
Résumé / Abstract 203

Liste des Figures

Figure I.1 : Schématisation de la chaine logistique 16
Figure I.2 : schématisation de la relation entre les acteurs principaux de la chaine logistique à travers des dépôts et plateforme de correspondance (Islam, et al., 2013) 16
Figure I.3 : Segmentation du transport de marchandises en France (Pimor & Fender, 2008) . 17
Figure I.4 : Evolution des parts modales de transport en France 17
Figure I.5 : Les acteurs du TMV et leurs intérêts (Courivault, 2004) 22
Figure I.6 : Répartition des livraisons / enlèvement au cours d'une journée ordinaire 23
Figure I.7 : Répartition des activités commerciales en ville et mouvements générés (Courivault, 2004) 23
Figure I.8 : Les différentes formes de transport de marchandises en ville 26
Figure I.9 : Mode de livraison directe 27
Figure I.10 : Mode de livraison par tournée - optimisée par transporteur (Interface Transport, 2006) 27
Figure I.11 : Mode de livraison par tournée - optimisée par destinataire (Interface Transport, 2006) 28
Figure I.12 : Typologie des ELU en fonction de la couverture spatiale de la ville (Boudouin, 2006) 28
Figure I.13 : Evolution du trafic des véhicules de TMV à Paris et sa périphérie – moyenne journalière 32
Figure I.14 : Infrastructures et sites logistiques dans la région Ile-de-France (Paris Region, 2017) 33
Figure II.1 : Modèles 3D de la solution CargoCap : a- mise à l'echelle de la solution par rapport à un metro, b- système de chargement / déchargement automatique, c- insertion de la solution dans l'espace souterrain (CargoCap, 2002) 42
Figure II.2 : Modélisations de Cargo Sous Terrain : a- principe de fonctionnement, b- coupes latérale et horizontale, c- modèle 3D des véhicules en développement (CST, 2016) 43
Figure II.3 : Train de passagers modifié pour le transport de marchandises (Nuzzolo, et al., 2008) 45
Figure II.4 : Photos de différentes expérimentations de fret urbain par rail 54
Figure II.5 : Réseau ferroviaire en Ile-de-France 55
Figure II.6 : Les trois formes de stations ferroviaires en milieu urbain 56
Figure II.7 : Illustration des implantations possibles de voies ferrées 57
Figure II.8 : Exemple de matériels roulant de chacun des modes de transport en région Ile-de-France 58
Figure II.9 : Les niveaux de mutualisation des différentes ressources du système de transport ferroviaire pour une mixité fret / voyageurs 60
Figure II.10 : Illustration du cas de mixité totale 62
Figure II.11 : Schématisation d'un réseau de transport ferroviaire en milieu urbain 67
Figure II.12 : Illustration du processus de transport de marchandises à travers le réseau ferroviaire de la région Ile-de-France 68

Figure II.13 : Identification et décomposition des problématiques décisionnelles pour la mixité des flux fret / voyageurs 69
Figure II.14 : Exemple d'une zone de stockage temporaire 72
Figure II.15 : Exemple de rangement de colis à l'intérieur du train (cas de la 2D) 73
Figure III.1 : Schématisation du problème d'affectation généralisée dans le cas de marchandises à livrer 81
Figure III.2 : Méthodes de résolution pour l'optimisation combinatoire 82
Figure III.3 : Exemple d'une résolution graphique d'un PL à 5 contraintes 83
Figure III.4 : Illustration du principe d'optimalité de Bellman 85
Figure III.5 : Illustration d'un graphe pour la recherche du chemin le plus court entre x et y . 86
Figure III.6 : Illustration de l'approche par horizon glissant 92
Figure III.7 : Schématisation du processus de simulation (Pritsker, 1986) 97
Figure III.8 : Réalisation d'un modèle de simulation 98
Figure III.9 : Détail de la démarche pour la réalisation d'un modèle de simulation 99
Figure III.10 : Evènements VBA lors de l'exécution de la simulation 102
Figure III.11 : Illustration de la démarche de couplage – optimisation pour simulation (Borodin, et al., 2017) 103
Figure III.12 : Illustration de la démarche de couplage – simulation pour optimisation (Borodin, et al., 2017) 103
Figure III.13 : Illustration de la démarche de couplage – simulation et optimisation (Borodin, et al., 2017) 105
Figure IV.1 : Illustration des files d'attente dans le FRTSP 112
Figure IV.2 : Exemple de conteneurs pour le transport de marchandises 113
Figure IV.3 : Schéma du modèle de simulation du FRTSP en utilisant ARENA 115
Figure IV.4 : Modélisation de la création du plan de commandes périodique 115
Figure IV.5 : Modélisation de la génération de commandes en temps réel 116
Figure IV.6 : Modélisation du processus de génération des trains 117
Figure IV.7 : Modélisation de la création des trains 117
Figure IV.8 : Modélisation des stations et des voies ferrées 118
Figure IV.9 : Illustration de la construction d'une solution avec la 4ème heuristique 121
Figure IV.10 : Modèle conceptuel du modèle de simulation 125
Figure V.1 : Une illustration d'une instance numérique du FRTSP 129
Figure V.2 : Réduction du problème FRTSP à un problème d'affectation généralisée 132
Figure V.3 : Une étape durant le processus de construction d'une solution par une fourmi . 137
Figure V.4 : La replanification du FRTSP par horizon glissant 149
Figure V.5 : Le schéma de couplage dans le cas prédictif 150
Figure V.6 : Le schéma de couplage dans le cas de la replanification 151
Figure VI.1 : Influence du nombre de trains sur les temps de résolution du PLVM 159
Figure VI.2 : Influence du nombre de trains sur les temps d'attente 159
Figure VI.3 : Comparaison des temps d'attente des heuristiques avec ceux du PLVM 160
Figure VI.4 : Calculs des temps d'attente moyens 162
Figure VI.5 : Boites à moustaches des temps d'attente des commandes dans les stations – (gauche) comparaison entre les différentes approches, (droite) heuristique 4 163
Figure VI.6 : illustration du calcul de « *UB* » 164

Figure VI.7 : Moyennes des temps d'attente des commandes – Colonies de fourmis VS PLVM 179
Figure VI.8 : Etude bi-critère des performances des colonies de fourmis 180
Figure VI.9 : Comparaison de convergence des différentes variantes 181

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Répartition des transporteurs selon le PTAC des véhicules utilisés (Patier, 2004) 22
Tableau II.1 : Comparaison entre les caractéristiques de transport de voyageurs / marchandises (Delaitre, 2014)..... 41
Tableau V.1 : Plan de transport des commandes – 1ère solution 130
Tableau V.2 : Plan de transport des commandes – 2ème solution 131
Tableau V.3 : Notations utilisées dans le PLVM 133
Tableau V.4 : Notations additionnelles pour le cas de replanification..... 147
Tableau VI.1 : Synthèse des résultats du PLVM dans le cas prédictif..... 157
Tableau VI.2 : Résultats de la résolution d'instances (150 commandes, 30 trains, 10 stations) 157
Tableau VI.3 : Nombre d'instances infaisables 158
Tableau VI.4 : Résultats des heuristiques VS solutions optimales 161
Tableau VI.5 : Résultats de la simulation sur les temps d'attente des commandes 161
Tableau VI.6 : Synthèse des cas d'infaisabilité..... 163
Tableau VI.7 : comparaison des taux d'utilisation des stations 165
Tableau VI.8 : Synthèse des résultats de la seconde itération de la replanification..... 166
Tableau VI.9 : Résultats de la 1ère itération – plan initial..... 166
Tableau VI.10 : Liste des nouvelles commandes..... 167
Tableau VI.11 : Résultats de 2ème itération – 1ère replanification..... 167
Tableau VI.12 : Illustration d'une table de Taguchi $\boldsymbol{L8(27)}$..... 170
Tableau VI.13 : Niveaux des paramètres pour les variantes AS et MMAS..... 171
Tableau VI.14 : Niveaux des paramètres pour la variante ACS 172
Tableau VI.15 : Table de Taguchi $\boldsymbol{L16(45)}$..... 173
Tableau VI.16 : Table de Taguchi $\boldsymbol{L25(56)}$..... 173
Tableau VI.17 : Résultats des essais pour la variante AS 174
Tableau VI.18 : Ratio S/N pour la variante AS..... 174
Tableau VI.19 : Résultats des essais pour la variante MMAS 175
Tableau VI.20 : Ratio S/N pour la variante MMAS 175
Tableau VI.21 : Résultats des essais pour la variante ACS 175
Tableau VI.22 : Ratio S/N pour la variante ACS..... 176
Tableau VI.23 : Résultats des essais pour la variante MMACS 176
Tableau VI.24 : Ratio S/N pour la variante MMACS..... 177
Tableau VI.25 : Résultats des variantes colonies de fourmis VS solutions optimales..... 179

Introduction générale

Le transport de marchandises en ville et leur acheminement jusqu'au client final, représente le maillon le plus important de la chaine logistique, avec un coût représentant jusqu'à 28% du coût global (Wang, et al., 2016). En France, un programme national concernant les « marchandises en ville », initié en 1993, a donné lieu à plusieurs études sur le terrain qui mettent en évidence le poids économique et social de cette activité. Dans ce contexte, une enquête dans la région Ile-de-France, réalisée entre 2011 et 2012, a permis les conclusions suivantes (Toilier, et al., 2016) :

- La délocalisation des espaces de stockage vers la périphérie des centres villes, en raison du coût foncier.
- Plus de 4 millions de livraisons / enlèvements hebdomadaires, dont le tiers lié au commerce.
- Une fragmentation des livraisons induisant des taux de remplissage très faibles des transporteurs en bout de chaîne.
- Difficulté de désynchroniser les pics de déplacements des gens et des marchandises.
- La densification du flux de marchandises avec une demande en croissance de 1,5% annuellement au moins jusqu'en 2025.

Cette situation n'est pas propre à une région particulière, mais est largement répandue en milieu urbain. En Europe, on attend le triplement des véhicules-kilomètres en milieu urbain à l'horizon 2050, en particulier, pour le transport de marchandises (Van Audenhove, De Jongh, & Durance, 2015). Ceci s'explique d'une part, par la densité de la population urbaine qui représente 73% avec une tendance croissante (Nations United, 2015). D'autre part, les changements du mode de consommation favorisent le e-commerce (Comi & Nuzzolo, 2016).

Le transport de marchandises en milieu urbain est quasi-exclusivement effectué par mode routier (camions et camionnettes) (Lindholm & Behrends, 2012). En France, il représente 85% à 90% (Insee, 2015). Cependant, les limites de ce mode sont nombreuses puisqu'il occupe 20% à 30% du trafic routier et cause entre 16% et 50% des polluants atmosphériques (Dablanc, 2007). A Paris, 90% du fret urbain est effectué par des camions, représentant 20% du trafic urbain et 1/3 des émissions de polluants dans la ville (Mairie de Paris, 2009).

L'Union Européenne « UE » a réagi face à ce constat en fixant un objectif de réduction des émissions de dioxyde de carbone de 20% à l'horizon 2020, par rapport à son niveau en 1990 (OECD, 2014). En outre, la commission de transport de l'UE a fixé des objectifs très ambitieux pour réduire à zéro, l'émission des polluants liés au transport de marchandises en ville (European Commission, 2011). Cet enjeu est mondial, comme le prouve les accords climatiques dont celui de décembre 2015, lors de la Conférence de Paris sur le climat « COP21 ».

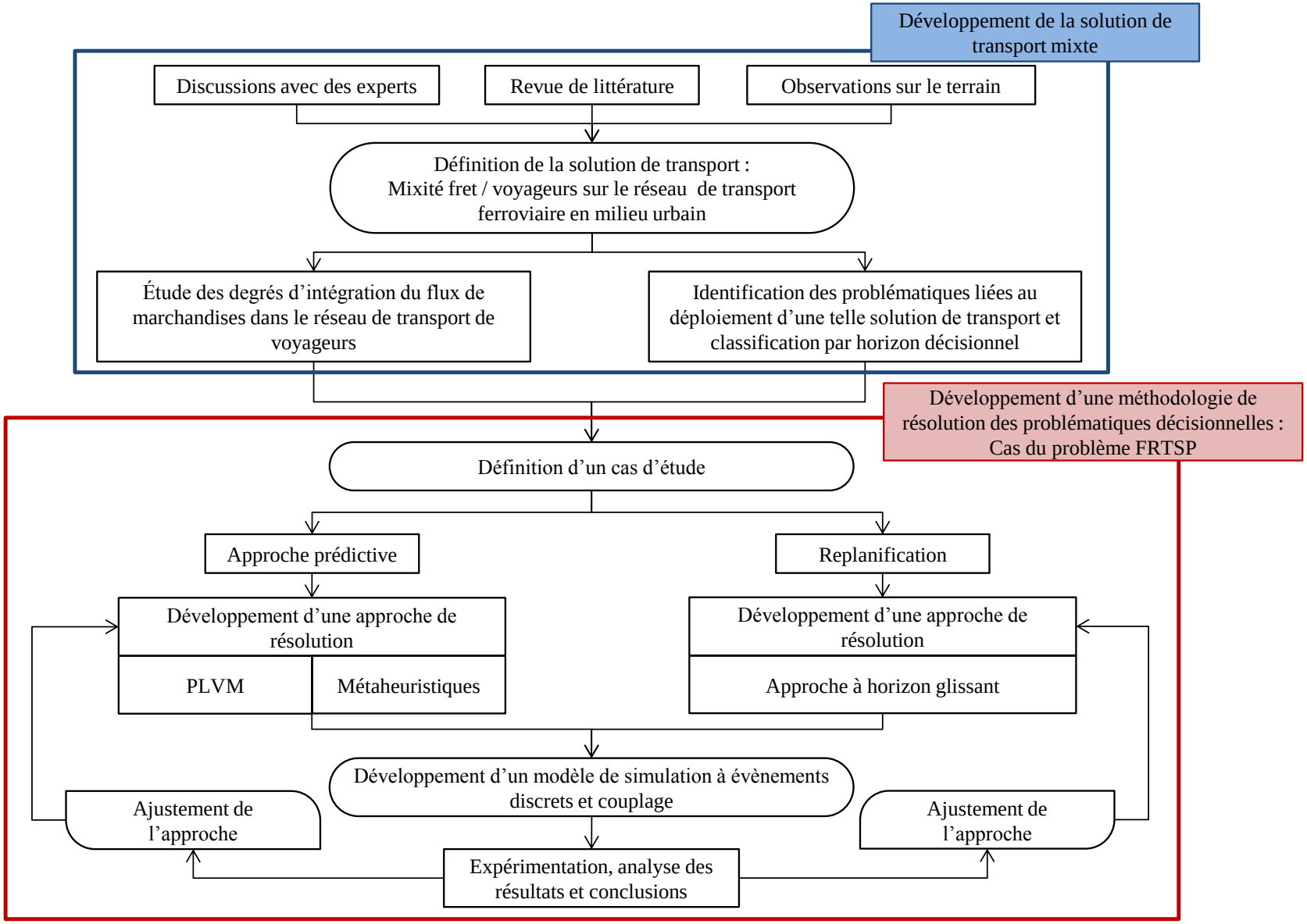
Ce contexte conduit à la nécessité de changer les pratiques actuelles, notamment concernant le transport de marchandises pour un développement durable de nos espaces urbains. Ainsi, plusieurs chercheurs ont proposé des solutions alternatives en combinant des modes de transport durables, tels que l'électromobilité "E-Mobility" (MacHaris, et al., 2007), (Köhler, et al., 2009), (Offer, et al., 2010), (Van Wee, et al., 2012) et (Van Duin, et al., 2013). Une autre perspective est relative à l'usage du système ferroviaire, jusqu'à présent exclusivement

dédié au transport de voyageurs. L'introduction de la composante « marchandises » dans ce réseau conduirait à l'émergence d'une solution de transport mixte fret / voyageurs. Cette projection a été suggérée par l'opérateur francilien qui envisage d'intégrer ce service, notamment à l'occasion du projet du Grand Paris Express. Ce projet qui est le plus grand projet urbain en Europe, a pour ambition d'étendre le réseau actuel avec 200 nouveaux kilomètres et 68 gares à bâtir. La perspective de mixité a déjà connue quelques expérimentations, mais le niveau de partage des ressources est souvent faible. Dans cette thèse, nous proposons une méthodologie pour accroitre et considérer le niveau maximal de mutualisation possible, des ressources du système de transport ferroviaire. En particulier, une méthodologie de modélisation et d'optimisation, pour permettre d'intégrer le flux de fret avec celui des passagers. La méthodologie de recherche est schématisée ci-après.

Nos travaux sont structurés en 6 chapitres, que nous décrivons comme suit :

- Chapitre 1 : Ce chapitre décrit le contexte général du transport de marchandises. Il permet de comprendre la situation actuelle, la règlementation en vigueur et les enjeux d'une évolution certaine, en raison des limites du mode routier actuellement prédominant. Enfin, nous présentons la situation en Ile-de-France, car nos travaux sont basés sur une projection en utilisant son réseau ferroviaire de passagers.
- Chapitre 2 : D'abord on présente un état des lieux recensant les expérimentations et projets relatifs au fret urbain, dont certains sont des cas de mixité. Nous présentons ensuite la solution de mixité fret/voyageurs, en proposant une démarche méthodologique pour l'intégration du fret, à un mode de transport ferroviaire en milieu urbain. Pour ce faire, une première contribution est relative à une classification des différents cas de mixité, en se basant sur le degré (niveau) de mutualisation (partage) des ressources du système de transport ferroviaire. Cette classification permet entre autres, d'évaluer la complexité de mise en œuvre de la solution de mixité. Une seconde contribution consiste à identifier et décomposer la problématique globale, en sous-problèmes ayant différents horizons décisionnels.
- Chapitre 3 : Le problème de détermination du plan de transport des marchandises (*Freight Rail Transport Schedule Problem* « FRTSP ») est identifiée comme étant central et critique. Avant de le formaliser et le résoudre, nous présentons les différentes méthodes et outils qui sont utilisés dans le cadre de ces travaux de thèse. L'approche par horizon glissant est également présentée, car elle est adaptée pour replanifier le plan prédictif, afin de prendre en compte des perturbations liées aux changements de la demande. Enfin, nous présenterons la simulation à évènements discrets, comme outil d'évaluation de performances de notre système de transport et les différents schémas de couplage, avec des méthodes d'optimisation.
- Chapitre 4 : Les hypothèses retenues pour le FRTSP sont d'abord précisées. Ce problème permet de trouver le plan optimal de transport des marchandises, minimisant le cumul de leurs temps d'attente, en utilisant une seule ligne ferroviaire pour voyageurs. Afin d'appréhender le comportement de ce système et en l'absence d'une expérimentation à l'échelle réelle, une approche par simulation est d'abord proposée pour modéliser et simuler ce problème, en utilisant le logiciel ARENA.

- Chapitre 5 : L'optimisation du FRTSP pour obtenir un plan prédictif est d'abord étudiée, en considérant la demande comme étant connue et fixée à l'avance. Dans un premier temps, nous proposons une modélisation mathématique basée sur un PLVM, pour formaliser le FRTSP. Ensuite, une approche par horizon glissant est adaptée, pour la prise en compte de perturbations de la demande, qui permettra de recalculer le plan de transport en minimisant les changements engendrés. Plusieurs variantes de colonies de fourmis sont également proposées, pour les instances que le PLVM peine à résoudre.
- Chapitre 6 : Ce chapitre est dédié aux expérimentations. La génération des instances y est d'abord abordée. Ensuite, nous expliquons la démarche des plans d'expériences en utilisant la méthode Taguchi qui est utilisée pour paramétrer chacune des variantes des colonies de fourmis. Enfin, les résultats de la phase expérimentale sont rapportés et une analyse des différents indicateurs de performance est réalisée.



Méthodologie de la recherche

Chapitre I

Logistique et transport de marchandises en ville

1. Introduction

Au moment où la circulation de l'information et le transfert des données se sont affranchies des distances physiques grâce à l'évolution des technologies de télécommunications, la circulation des biens physiques se voit à son tour confrontée au même challenge. En effet, aujourd'hui les produits ne sont plus consommés localement, mais traversent parfois des milliers de kilomètres avant d'arriver chez le consommateur final. Pour répondre à cette nouvelle réalité, le transport de marchandises a dû s'adapter et se développer, ce qui l'a fait évoluer et a fait émerger de nouvelles problématiques. Le transport de marchandises fait partie d'une discipline beaucoup plus complète qui est la logistique. Ainsi, la section 2 de ce chapitre est dédiée à la définition des concepts principaux de la logistique, ainsi qu'à l'exploration des spécificités du transport de marchandises et de ses enjeux de manière générale.

Avec l'augmentation des populations dans les villes et la densification de l'activité commerciale en milieu urbain, la logistique a dû s'adapter aux spécificités de cet environnement particulier. Ceci a conduit durant les années 1990, à l'émergence d'une nouvelle problématique liée au transport de marchandises en ville. Dans la section 3 de ce chapitre, nous allons étudier l'évolution du transport de marchandises pour se conformer aux besoins de la logistique urbaine, ainsi que les spécificités de ce dernier.

L'idée qui a fait naitre ce travail de recherche, est la mutualisation du réseau de transport ferroviaire de voyageurs en Ile-de-France, pour absorber une partie du transport urbain de marchandises. Pour comprendre les motivations d'une telle proposition et le contexte d'une possible mise en œuvre, dans la section 4 de ce chapitre, nous allons nous focaliser sur l'état des lieux en matière de transport de marchandises dans cette région. Mais avant d'aborder ces différents points, nous allons définir et rappeler quelques concepts clés.

2. Logistique et transport de marchandises : définitions et concepts

Dans le cadre de ce travail, nous n'allons pas faire la distinction entre logistique et chaine logistique, conformément à l'approche adoptée par les européens (à la différence des anglo-saxons qui y font la distinction).

Le Supply Chain Council définit la logistique comme étant : *« la suite des étapes de production et distribution d'un produit depuis les fournisseurs des fournisseurs du producteur jusqu'aux clients de ses clients »*. Aussi, la logistique peut se résumer en une équation (Islam, et al., 2013) :

Logistique = approvisionnement de matières premières + gestion des matières premières et des produits dans l'usine + distribution aux clients

Une schématisation de la logistique est donnée par la Figure I.1. La logistique est composée de 5 éléments clés (Islam, et al., 2013) : transport, entreposage, inventaire, emballage et traitement de l'information. En général, le transport est la principale composante de la plupart des services logistiques. Les aspects clés de la gestion des transports comprennent les modes

de transport (tels que les voies par la route, ferroviaires, fluviales, aériennes, par pipelines, multimodales ou intermodales), les infrastructures de transport, les conditions géographiques, le type de livraison (par ex. express, normal, longue distance, dernier kilomètre…), la planification du chargement, ainsi que l'itinéraire et la planification du transport.

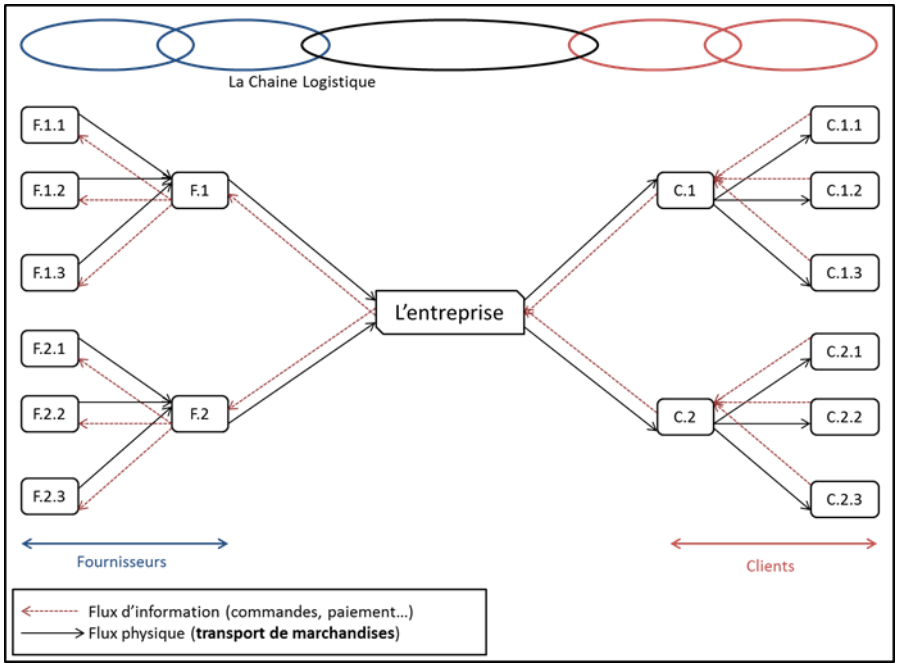


Figure I.1 : Schématisation de la chaine logistique

Entre chaque deux acteurs de la chaine logistique, le processus de transport de marchandises peut être plus complexe, en particulier, vers la fin de la chaine (côté « clients »). En effet, il peut arriver que le transfert de produits entre deux acteurs passe par plusieurs étapes intermédiaires, dont l'objectif est d'optimiser le processus de transport. La Figure I.2 illustre cette décomposition supplémentaire et schématise la relation entre les expéditeurs, dépôts, plateformes de correspondance et destinataires. Cette relation est assurée par des processus de transport indépendants.

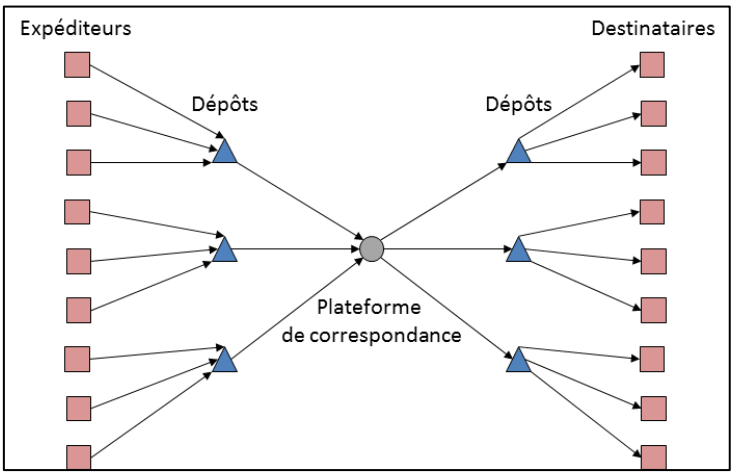


Figure I.2 : schématisation de la relation entre les acteurs principaux de la chaine logistique à travers des dépôts et plateforme de correspondance (Islam, et al., 2013)

Concernant les modes utilisés pour le transport de marchandises, en France, quatre modes se partagent cette activité : la route, le ferroviaire, le fluviale, et par pipeline. La segmentation du

marché du transport suivant la granularité des marchandises à transporter est donnée par la Figure I.3. On remarque que le mode de transport ferroviaire assure, principalement, le transport de marchandises de masse conditionnées et les marchandises en lots complets. L'évolution de la part de chacun des modes de transport cités précédemment, sur les 30 dernières années est donnée par la Figure I.4 (données de (Insee, 2016)). On remarque que la part du mode routier a augmenté tout au long de la période jusqu'en 2011 au détriment des trois autres modes. Depuis 2010, on remarque le retour vers la croissance du mode de transport ferroviaire, avec une moyenne annuelle de croissance de 3%.

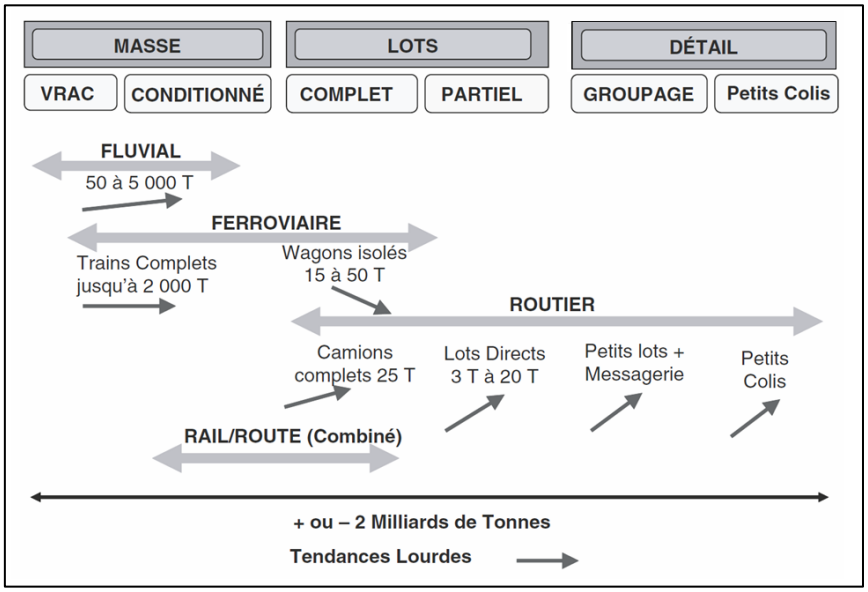


Figure I.3 : Segmentation du transport de marchandises en France (Pimor & Fender, 2008)

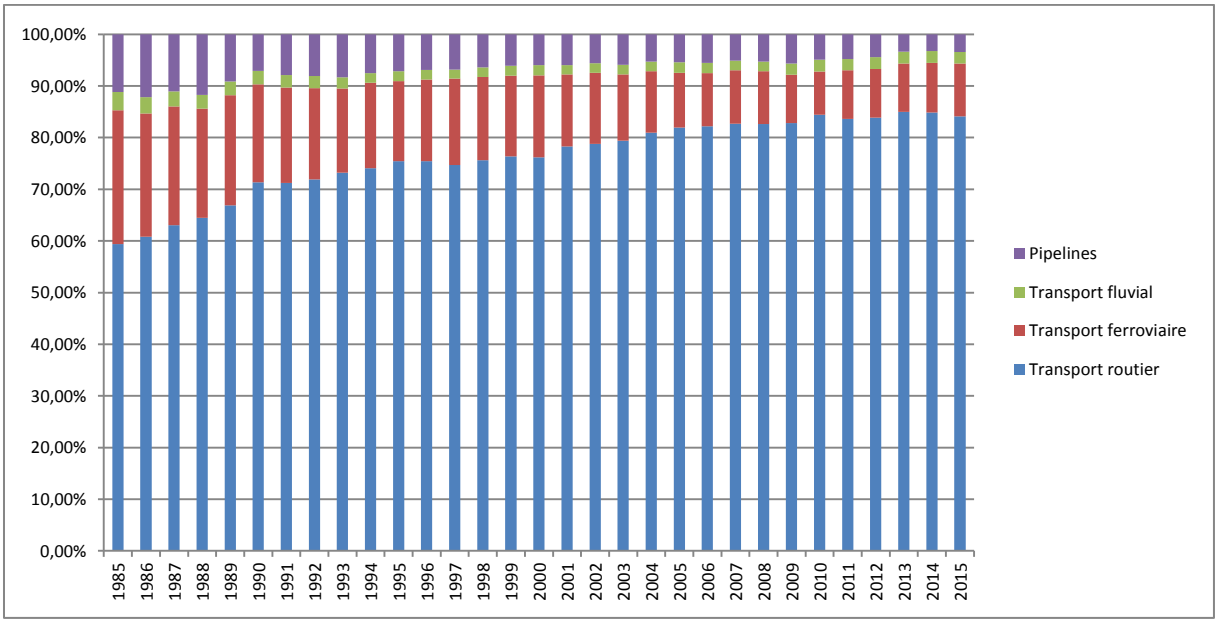


Figure I.4 : Evolution des parts modales de transport en France

L'une des raisons qui explique l'évolution du marché du transport de marchandises et la croissance de la part du mode routier, réside dans l'évolution de l'industrie et, plus globalement, l'économie dans les pays développés. En effet, la part des industries lourdes a fortement baissée en Europe ces dernières décennies (ex : industrie minière, aciérie…), alors

que les modes de consommation ont évolué (ex : produits personnalisés et juste à temps, e-commerce…). Ainsi, le mode de transport routier est le plus adapté pour le transport de produits en petite quantité (i.e. petits lots ou colis). En contrepartie, le mode de transport ferroviaire qui est plus adapté au transport des produits de masse ou de lots importants, a subi un recul de sa part dans le transport de marchandises.

Le transport routier domine les autres modes pour diverses raisons. L'association européenne des véhicules de logistique mentionne quelques-uns de ses avantages comme suit :

- Il présente une grande flexibilité (temporelle et spatiale).
- C'est un moyen de transport direct « *door-to-door* ».
- Il requiert moins de manutention.
- Les délais de transit sont généralement plus courts.

Cependant, ce mode présente plusieurs inconvénients qui ont stoppé sa croissance depuis 2011, dont les principales :

- Saturation du réseau routier et des différentes infrastructures liées à ce mode.
- Impact environnemental important, à travers différentes formes de pollution (CO_2, particules fines, sonore…).

On peut citer d'autres inconvénients, tels que :

- Les restrictions légales (au niveau Européen) et législatives (au niveau de chaque pays) sur les temps de conduite, les tonnages et dimensions, les horaires d'accès aux villes, etc.
- La fluctuation des coûts de transport en fonction des marchandises à transporter et de la quantité. En effet, il n'est pas très adapté pour le transport de grandes quantités sur de longues distances, où les prix deviennent moins compétitifs.

Quant au mode de transport ferroviaire, plusieurs de ses inconvénients ont fait obstacle à son développement, selon l'association européenne des véhicules de logistique on peut citer :

- La dépendance vis-à-vis de la route, en particulier pour la partie finale du transport.
- Le peu de flexibilité qui est liée à la dépendance de ce mode à une infrastructure lourde à mettre en place (les voies ferroviaires). D'où, l'impossibilité d'effectuer du « *door-to-door* », ainsi que la nécessité d'avoir une planification rigoureuse pour l'utilisation des infrastructures.
- Les ruptures de charge qui requièrent des opérations de manutention supplémentaires.
- Les temps de transit sont longs.
- Le taux d'avaries est considéré comme élevé (en se basant sur les données de l'historique).

Toutefois, ce mode de transport présente plusieurs avantages, qui font qu'il renoue avec la croissance depuis 2010. Parmi ces avantages, on peut citer :

- Une capacité de transport plus grande.

- Un coût compétitif sur les grandes distances.
- Les équipements de transport sont peu polluants, ce qui améliore l'empreinte carbone des produits transportés.
- Les mesures incitatives à l'utilisation de ce mode, aussi bien au niveau politique que légal.

La complexité du processus de transport de marchandises est principalement liée au :

- Type de produit à transporter.
- La quantité (en volume et en poids).
- La distance à parcourir.
- Le changement du mode de consommation.
- La localisation de l'expéditeur et du destinataire.
- Le passage des marchandises par des dépôts / plateformes intermédiaires.

Pour faire face à cette complexité, l'évolution du transport de marchandises est incontournable. En effet, il est nécessaire de proposer un processus de transport plus durable, qui répond aux challenges de l'évolution du marché économique de manière éco-responsable, comme en témoigne les accords de Paris lors de la COP21. Plusieurs chercheurs remettent en question la compétition entre les différents modes de transport. Ils proposent de mettre en œuvre des solutions de transport intermodal, combinant plusieurs modes et bénéficiant à chaque étape des avantages du mode utilisé tout en évitant les inconvénients des autres (Bhattacharya, et al., 2014), (Flodén & Williamsson, 2016), (Southworth & Peterson, 2000), (Macharis, et al., 2011) et (Flodén, 2007).

Le transport intermodal nécessite d'avoir une vision globale du processus de transport, dans le but d'identifier le moment et le lieu idéal pour procéder à une rupture de charge. La question relative à la sélection du meilleur mode de transport, apporte une réponse plus complète, avec des possibilités de faire du *door-to-door*, notamment avec l'utilisation de véhicules électriques, pour assurer le dernier kilomètre par exemple. Le transport intermodal est défini par (Macharis & Bontekoning, 2004) comme la combinaison d'au moins deux modes de transport dans une seule chaîne de transport, sans changement de conteneur pour les marchandises, avec la plupart des itinéraires parcourus par voies ferroviaires, par voies navigables ou océaniques et avec les parcours initiaux et finaux les plus courts possibles par la route.

Ces notions restent valables à l'échelle de la ville. Cependant, les spécificités des zones urbaines nécessitent d'apporter quelques adaptations et de définir certaines notions complémentaires.

3. Transport de marchandises en ville

Le transport de marchandises en ville « TMV » se compose de deux types d'opérations : livraisons et enlèvements. Les chercheurs se sont intéressés concrètement aux problématiques qui y sont liées, à partir des années 1990. Cependant et à ce jour, il n'y a que peu de visibilité sur sa pratique en général. En effet, on compte un nombre très important d'intervenants

hétérogènes, qui sont impliqués dans le TMV de manière assez peu efficace, en raison d'objectifs divergents ou bien d'un manque de coordination. Aujourd'hui, le TMV gagne de l'importance aux deux niveaux :

- Economique : il doit absorber une activité économique qui connait une importante croissance en milieu urbain.
- Social : il représente une part qui va continuer à croitre, de l'activité professionnelle des citadins.

Le TMV est considéré comme étant nécessaire pour la ville, malgré les désagréments engendrés en termes de réduction de la qualité de vie pour les citadins (ex : divers types de pollutions, densification du trafic routier, etc.). Un autre effet néfaste est lié à la charge de travail générée pour les collectivités (ex : gestion des flux supplémentaires de véhicules en ville et des incidents qui y sont liés, adaptation des infrastructures de la ville aux spécificités des véhicules lourds, gestion de l'impact environnemental, etc.).

Plus généralement, l'étude des flux de marchandises en ville reste très difficile et peu d'études de terrain existent. En particulier, en raison des spécificités du mode routier (principal mode de TMV) qui ne laisse entrevoir que peu de visibilité sur ses pratiques (particulièrement en ce qui concerne : les types de marchandises transportées, la quantité par véhicules, le nombre de livraisons pour compte propres, etc.), ainsi, les données disponibles sont peu précises (Augereau, 2009).

Dans cette section, nous allons nous intéresser aux enjeux du TMV, aux pratiques actuelles et cadre légal et juridique qui le régissent, ainsi qu'aux propositions d'évolution de ce dernier, pour prendre en charge sa complexité et réduire ses nuisances.

3.1. Enjeux du TMV

Le TMV est indispensable pour le bon fonctionnement et la pérennisation des activités humaines en ville. Dans (Boudouin & Morel, 2002), les enjeux du TMV sont déclinés en cinq grandes catégories :

- Enjeux fonctionnels : les perspectives de croissance et de développement d'une ville sont fortement corrélées à la croissance de circulation de produits. Ainsi, l'objectif n'est pas de réduire le TMV ou de le remettre en question dans sa globalité, mais plutôt, dans sa mise en pratique actuelle. Pour un bon fonctionnement de la ville, il est nécessaire de rendre compatible les flux de marchandises en ville et les spécificités et autres besoins de cette dernière. Cette catégorie d'enjeux et d'autant plus importante que les responsables et décideurs locaux n'ont pas intégré cette dimension dans leurs réflexions. Donc, il s'agira aussi de les sensibiliser à cette dernière.
- Enjeux économiques : le transport de marchandises est ce qui lie les producteurs aux clients, autrement dit, c'est le maillon indispensable du modèle économique global. De plus, ces dernières années, une mutation du modèle de consommation des citadins a été constatée. En effet, de plus en plus les clients passent leurs commandes directement de chez eux, pour les réceptionner le plus rapidement possible et le plus proche de chez eux. L'impact de cette évolution est la démultiplication du nombre de

transporteurs et du nombre de livraisons en milieu urbain. Ainsi, pour rester compétitifs et préserver la vitalité économique de la ville, ces transporteurs doivent améliorer leur productivité dans un environnement plus contraint.

- Enjeux environnementaux : ces enjeux sont les plus critiques à ce jour. En effet, la dégradation de la qualité environnementale dans plusieurs grandes villes à travers le monde, représente l'argument le plus fort, en faveur du besoin de changement dans les pratiques actuelles qui contribuent à cette dégradation. Le TMV doit évoluer pour répondre à ces nouveaux enjeux, car il est à noter que les opérations de transport dans les villes, qui représentent entre 20% et 30% du trafic routier, produisent entre 16% et 50% des polluants atmosphériques selon le polluant considéré (Dablanc, 2007). Parmi ces polluants, on peut citer : les particules fines, les composés organiques volatiles, le CO, le CO_2, les NO_x, les hydrocarbures imbrûlés, etc.
- Enjeux sociaux : l'activité de transport de marchandises a un poids très important au niveau du marché du travail. A titre d'exemple, en France ce secteur représente 5,1% de l'emploi total (pôle-emploi, 2012). Au-delà du nombre d'emplois générés, un autre enjeu du TMV est de proposer en milieu urbain des emplois qui ne requièrent pas, ou peu de qualification, voire qui se greffent à d'autres emplois (ex : point relais).
- Enjeux urbanistiques : ces enjeux représentent un réel défi pour les villes, car il s'agit de faire évoluer leur urbanisme, dans le but d'inclure les infrastructures nécessaires à l'accomplissement de l'activité de TMV. Cette évolution passe par : des rues plus adaptées, un plan de circulation pensé pour les deux flux « personnes » et « marchandises » simultanément, ainsi que des espaces logistiques indispensables pour le TMV.

3.2. Etat des lieux et pratiques actuelles

Durant les années 1990, l'enquête nationale « Transport de Marchandises en Ville », qui a été réalisée dans trois ville (Bordeaux, Marseille et Dijon), a démontré que les différentes données relatives au TMV étaient indépendantes de la ville ou du type de ville. D'ailleurs, cette conclusion a permis de proposer un outil de modélisation générique, qui permet d'évaluer l'impact des flux de marchandises sur les infrastructures de la ville, ainsi que de simuler les évolutions futures en fonction de différents scénarios (Routhier, et al., 2001). La situation actuelle des pratiques de TMV, peut être résumée à travers les points suivants :

- Une première caractéristique du TMV est l'hétérogénéité des acteurs et de leurs objectifs. La Figure I.5 montre les trois acteurs majeurs et les intérêts qu'ils défendent. L'encadrement de ces différents acteurs est assuré par les responsables locaux, qui doivent intégrer l'importance et les préoccupations de chaque acteur dans leurs prises de décisions. Ce qui doit s'effectuer en essayant de converger vers le meilleur équilibre possible entre les divergences qui peuvent s'exprimer.
- Une seconde caractéristique réside dans la multiplicité des transporteurs, entre « pour compte propre (i.e. soit le destinataire se livre avec ses propres véhicules, soit c'est l'expéditeur qui livre ses clients avec ses propres moyens de transport) » et « pour autrui (i.e. la sous-traitance de l'activité de transport) », sachant que la majeure partie « 60% » se fait pour compte propre (Patier, 2004). Le Tableau I.1 montre la répartition

des transporteurs selon le PTAC (Poids Total Autorisé en Charge) des véhicules utilisés, ainsi que les usagers. Nous remarquons que la portion majoritaire du TMV « 53% » est assurée par des véhicules légers (PTAC < 3,5 t), dont 78% pour compte propre. Ceci s'explique par l'adéquation de ce type de véhicule avec les spécificités de la ville.

- Une troisième caractéristique concerne un phénomène très répandu du TMV, à savoir le stationnement illicite pour procéder aux livraisons / enlèvements (ex : en double file ou sur les trottoirs). Certes, les temps d'arrêt sont faibles (60% des livraisons durent moins de 5 minutes), cependant, en centre-ville la part des stationnements illicite est d'en moyenne 60% et peut dépasser, dans certain cas, les 80%. Cette pratique engendre des situations dangereuses, aussi bien pour les citadins, que pour les transporteurs.

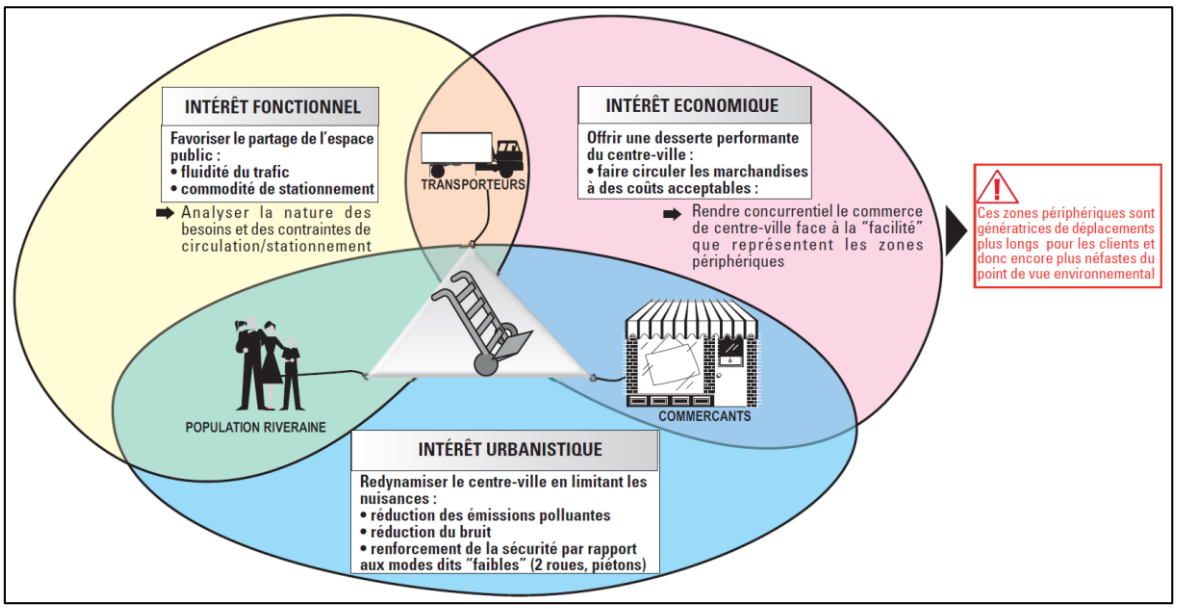


Figure I.5 : Les acteurs du TMV et leurs intérêts (Courivault, 2004)

Tableau I.1 : Répartition des transporteurs selon le PTAC des véhicules utilisés (Patier, 2004)

PTAC	< 3.5 t	< 7 t	< 12 t	< 19 t	>19 t	Articulés
Répartition %	53%	6%	10%	13%	2%	16%
Répartition selon les usagers						
Compte propre	78%	40%	40%	48%	45%	24%
Compte d'autrui	22%	60%	60%	52%	55%	76%

- Une autre observation intéressante concerne la répartition des livraisons / enlèvement au cours d'une journée ordinaire (Figure I.6), nous pouvons noter que les pics des livraisons / enlèvements sont décalés de 2 heures environ, par rapport à ceux des personnes. Une seconde remarque pertinente est cette concentration des livraisons / enlèvements en milieu de matinée et en milieu d'après-midi avec une quasi-absence durant la nuit (de 20h à 4h).
- Les activités commerciales qui se situent en ville sont très variées, cependant, elles ne sont pas toutes égales en matière de génération de mouvements. La Figure I.7 montre la répartition des activités commerciales dans une agglomération type, ainsi que la

génération moyenne de mouvements par chaque type d'activités. Nous remarquons que les activités de commerce de gros / détail + les activités à caractère industriel (principalement des activités liées aux entrepôts), représentent plus de la moitié des mouvements générés.

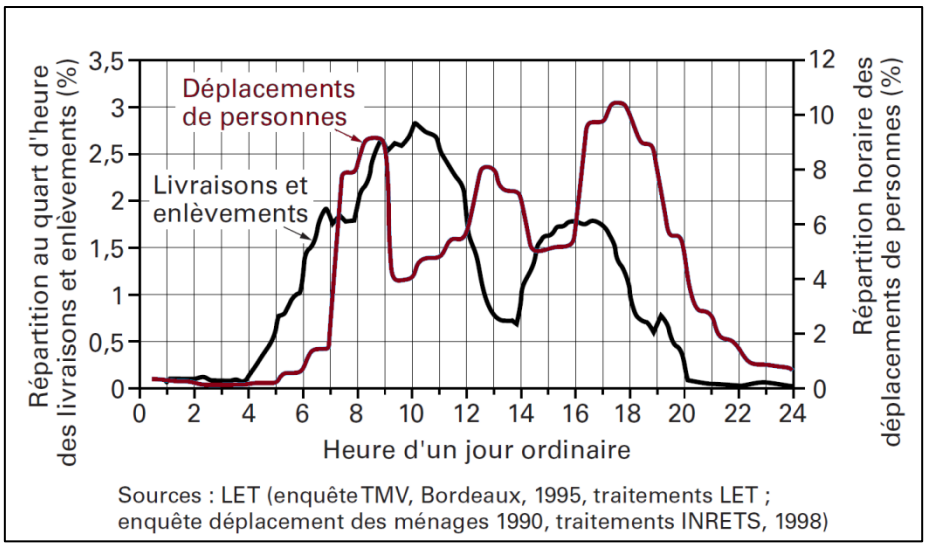


Figure I.6 : Répartition des livraisons / enlèvement au cours d'une journée ordinaire

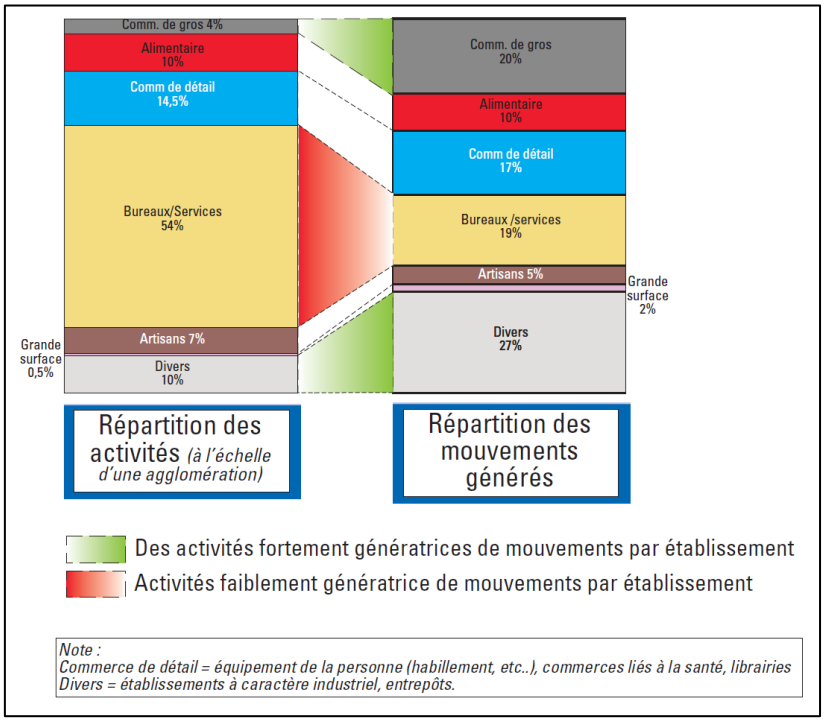


Figure I.7 : Répartition des activités commerciales en ville et mouvements générés (Courivault, 2004)

- Dernier élément de la situation actuelle (et non des moindres), c'est la génération des nuisances sous ses différentes formes. Comme nous l'avons évoqué au point précèdent, l'impact environnemental du TMV est très important, cependant, d'autres types de nuisances sont à déplorer :

  - Les nuisances sonores : à faible vitesse, les moteurs diesels des véhicules de transport de marchandises génèrent beaucoup de bruit. De la même manière, à

grande vitesse, c'est les roulements sur la chaussée qui en sont la cause. D'autres bruits sont à constater, tel que le groupe frigorifique (des camions qui en sont équipés), ouverture et fermeture des portes, l'utilisation du hayon élévateur, etc.

- Les mauvaises odeurs des gaz d'échappement.
- L'accentuation de la congestion des rues.
- La dégradation de la chaussée et des trottoirs lors du stationnement des véhicules lourds.
- Impact négatif sur le paysage urbain.

3.3. Cadre légal et règlementaire

Un premier cadre règlementaire, est celui établi par l'union européenne et qui s'applique à tous les pays de l'union. Cependant, il ne concerne qu'un volet très réduit de l'activité de transport de marchandises, qui considère principalement : les émissions de polluants (dernière norme en vigueur « Euro 6 »), les émissions sonores, ainsi que certaines normes de sécurité, auxquelles doivent se soumettre les véhicules de transport de marchandises. En adéquation avec ce cadre global, chaque pays établit son propre cadre réglementaire. En France, que cela soit au niveau national ou bien local, plusieurs lois et règlementations encadrent le transport de marchandises en milieu urbain. Ces dernières sont rapportées dans (Dufour, et al., 2007). Dans ce qui suit, on en fait une synthèse :

- Au niveau national, la règlementation en matière de transport de marchandises en milieu urbain, se décline à travers trois rubriques comme suit :

  - En matière de transport : à l'échelle des agglomérations, les différents principes de l'organisation des transports de personnes et des marchandises sont fixés par la loi « LOTI » (Loi d'Orientation des Transports Intérieurs). Dans le cadre de cette dernière, le transport et la livraison des marchandises sont mentionnés de façon à en réduire les impacts sur la circulation et l'environnement. De plus, depuis 1998 et afin de réguler l'activité de TMV, un décret oblige tout transporteur pour autrui avec des véhicules de 3,5 tonnes ou moins, à s'inscrire au registre des transporteurs.
  - En matière d'urbanisme : comme mentionné précédemment, l'activité commerciale a un impact direct sur les trafics de véhicules des personnes et de marchandises. Ainsi, différentes lois ont été promulguées successivement (1973 : loi Royer, 1990 : loi Doubin, 1991 : loi d'orientation pour la ville, 1993 : loi Sapin, 1995 : loi Barnier, 1996 : loi Raffarin), pour essayer d'encadrer l'implantation et le développement des équipements commerciaux et des grandes surfaces en ville. D'autre part, en 2000, la loi LOTI a été réformée sur le volet planification, en intégrant la problématique « marchandises ». Ceci devrait permettre d'avoir une plus grande mixité des activités par zone urbaine et, ainsi, favoriser l'implantation d'équipements logistiques et commerciaux.
  - En matière d'activité de livraison : l'activité de transport urbain de marchandises n'existe pas dans les nomenclatures d'activité. Cependant,

comme cette activité fait intervenir trois composantes (les transporteurs, les véhicules de transport et les espaces de livraisons), focalisons-nous sur ce que mentionne la loi à leur sujet. D'abord, en ce qui concerne les professionnels qui exercent dans cette activité, à travers l'utilisation de véhicules légers (<3,5 t), ce n'est que depuis 2004 que le statut de chauffeur-livreur de véhicules utilitaires légers existe. Ensuite, les véhicules utilitaires légers, qui sont principalement utilisés pour les livraisons en ville, n'ont aucune définition fonctionnelle. A la différence des poids lourds, leurs utilisations ne sont pas encadrées par la loi ainsi, leur usage réel n'est pas officiellement connu. Enfin, les espaces réservés à l'arrêt des véhicules effectuant un chargement ou un déchargement de marchandises, n'ont été définis par la loi qu'en 2000. Cependant, il manque de la précision en ce qui concerne la définition des temps d'arrêt pour procéder aux livraisons.

- Au niveau local, la règlementation consiste en des textes adoptés par les instances locales, à mettre en œuvre dans la localité correspondante. La circulation et le stationnement en ville relèvent des prérogatives de la Mairie. Ainsi, c'est à cette dernière de définir les différentes règlementations à appliquer à ce niveau. Que cela soit pour les gabarits des véhicules, les horaires de livraison et les véhicules autorisés pour chaque horaire, ou la durée de stationnement, chaque localité fixe ses propres règles. Ce qui conduit sur le terrain, à des situations peu pratiques pour les agglomérations. A titre d'exemple, en Ile-de-France, en 2004 il y avait 120 réglementations différentes (heures possibles d'entrée dans les différents quartiers et gabarit de véhicules autorisés, itinéraires possibles en fonction des sens de circulation, durée et lieux de stationnement pour livrer). Depuis, des guides d'harmonisation de la règlementation ont été mis en place, mais un flou persiste au niveau des transporteurs et logisticiens. Aussi, il faut noter que les réglementations locales diffèrent énormément d'une agglomération à une autre, ce qui engendre pour des transporteurs qui interviennent dans des agglomérations différentes, un surplus de complexité technique, organisationnel et administrative.

3.4. Complexité du transport de marchandises en ville

Comme mentionné dans la section 3.2, le TMV fait intervenir plusieurs acteurs différents, avec des objectifs pas toujours compatibles. A cela, s'ajoute la complexité de l'organisation de l'activité de TMV comme le montre la Figure I.8. En effet, le TMV est la source de l'une de ces trois activités :

- L'approvisionnement des ménages : il représente 50% des mouvements liés au transport de marchandises. Il concerne :
  - Les livraisons directes aux habitations ou en points relais, principalement liées au e-commerce.
  - Les achats dans la grande distribution, qui se situe en général, à la périphérie des villes.

- Les achats dans les commerces de détail, qui se situent dans les centres villes (magasins de proximité).

- Les échanges inter-établissements : ils représentent 40% des mouvements liés au transport de marchandises. Il s'agit principalement de :

  - Livraisons entre les unités de production situées à proximité des agglomérations.
  - Approvisionnement des entrepôts de stockage aux bords des villes.
  - Approvisionnement des centres de distribution pour les livraisons en ville.
  - Approvisionnement des magasins (grande distribution et magasins de proximité).
  - Livraisons pour le compte des services publiques.

- Les flux de gestion urbaine : ils représentent 10% des mouvements liés au transport de marchandises. Ils correspondent à deux types de flux :

  - Le transport de tous les types de déchets : ménagers, issues de l'activité commerciale, issues du fonctionnement des infrastructures publiques, ainsi que les déchets produits par l'activité du BTP.
  - Le transport des matériaux de construction.

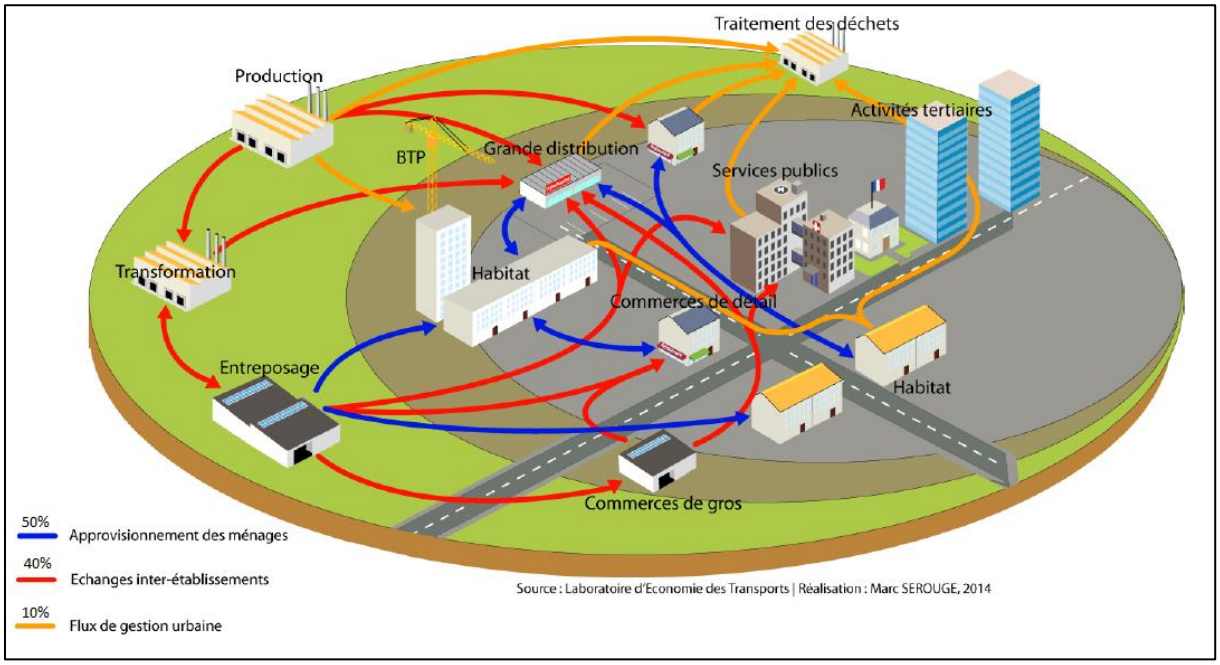


Figure I.8 : Les différentes formes de transport de marchandises en ville

Deux modes organisationnels principaux en matière de livraison en ville sont à relever :

- Mode de livraison directe (Figure I.9) : il s'agit de transporter les marchandises d'une commande, à partir d'un seul lieu d'expédition, à destination d'un seul lieu de livraison.

- Mode de livraison par tournée : il s'agit d'effectuer un certain parcours en ville, pour livrer plusieurs établissements. Ce mode de livraison présente deux variantes, en fonction de l'organisation du transporteur et des infrastructures logistiques de la ville.

  - Tournées optimisées par transporteur (Figure I.10) : dans ce cas, le véhicule du transporteur est chargé avec des marchandises à livrer dans plusieurs lieux de la ville. Ainsi, il s'agira pour lui d'optimiser sa tournée en fonction de ses propres objectifs. Ce mode de tournées est caractérisé par des entrepôts situés assez loin de la ville et de longues tournées, durant lesquelles les véhicules sont peu chargés.

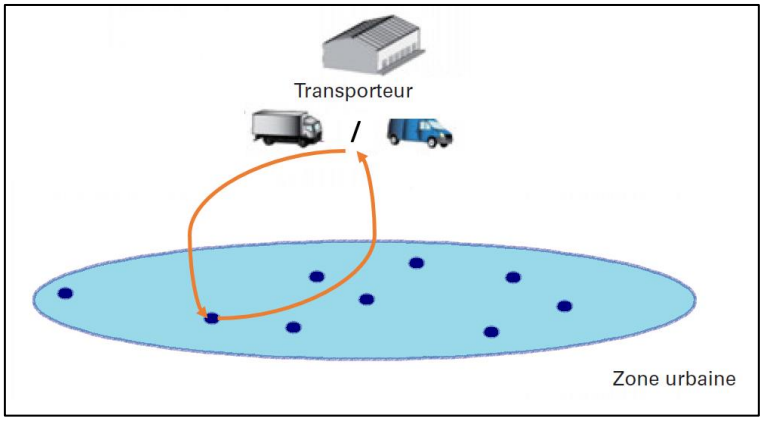


Figure I.9 : Mode de livraison directe

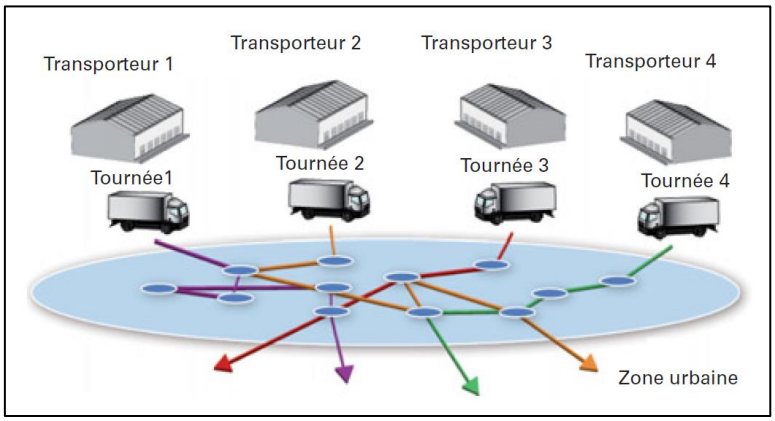


Figure I.10 : Mode de livraison par tournée - optimisée par transporteur (Interface Transport, 2006)

  - Tournées optimisées par destinataire (Figure I.11) : ce cas de figure requiert la présence d'espaces logistiques en ville, dans le but de regrouper les marchandises de plusieurs expéditeurs. Par la suite, ces marchandises sont regroupées par destination (quartiers, rues ou arrondissements), et transportées par des véhicules adaptés aux spécificités des zones desservies.

3.5. Evolution et perspectives futures du TMV

Pour faire face aux défis actuels, ainsi qu'aux évolutions prochaines de la logistique urbaine et du TMV, plusieurs pistes d'amélioration sont explorées et expérimentées sur le terrain. La conclusion commune est celle de la nécessité de mutualiser les composants techniques, technologiques et organisationnels de la logistique (Montreuil, et al., 2012). D'autre part,

(Dufour, et al., 2007) présente une synthèse de certaines perspectives intéressantes, qu'on présente à travers les points suivants.

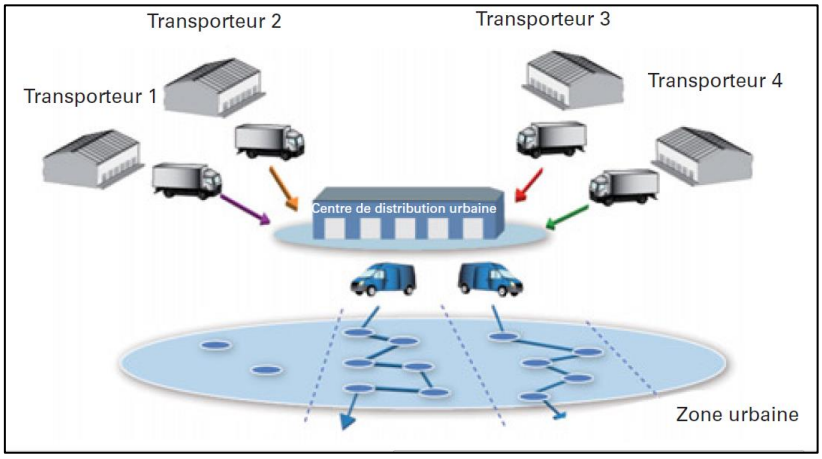


Figure I.11 : Mode de livraison par tournée - optimisée par destinataire (Interface Transport, 2006)

3.5.1. *Centres de Distribution Urbains « CDU »*

L'une des pistes les plus avancées est celle du développement d'Espaces Logistiques Urbains « ELU ». Actuellement, la majeure partie des transporteurs opère suivant le mode de tournée optimisée par transporteur, avec des plateformes d'expédition situées assez loin des agglomérations. Les ELU permettent le déploiement du mode de tournée optimisée par destinataire, qui est générateur de moins de véhicules-kilomètres pour livrer la même quantité de marchandises. La typologie de l'ELU à implémenter, dépend de l'échelle urbaine cible, comme le montre la Figure I.12.

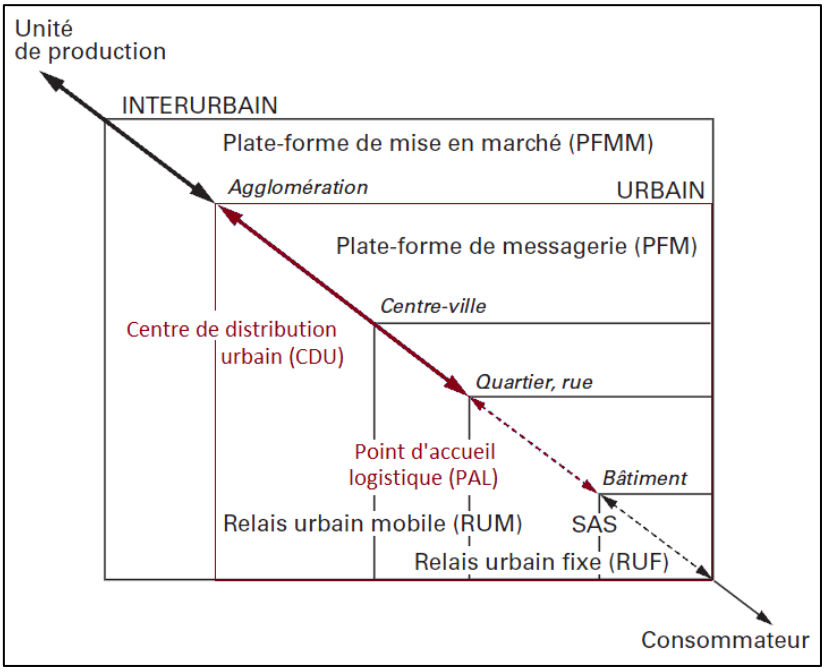


Figure I.12 : Typologie des ELU en fonction de la couverture spatiale de la ville (Boudouin, 2006)

A l'échelle de la ville (ou partie de la ville, dans le cas des agglomérations très étendues), c'est les CDU qui sont proposés. En effet, ils représentent l'interface logistique entre la ville et l'extérieur et permettent une gestion des flux entrant et sortant homogènes, en groupant et

dégroupant les marchandises de manière à optimiser leur transport. Selon (Browne, et al., 2005), trois types de CDU sont à considérer :

- CDU privés / semi-privés : ils sont mis en place par des opérateurs ou chargeurs pour leur propre compte, dans le but d'optimiser économiquement leurs activités.
- CDU mutualisés : ils sont mis en place par les autorités publiques, dans le but d'améliorer la qualité de service de TMV et de minimiser ses impacts négatifs sur la ville.
- CDU spécifiques : ils sont déployés de manière temporaire, pour assurer l'approvisionnement d'activités temporaires en ville, tels que les chantiers de construction. Il peut y avoir aussi des CDU de ce type mis en place de manière permanente, dans le but de servir de plateforme de transbordement pour les aéroports et ports fluviaux ou maritimes.

A l'échelle Européenne, plusieurs expériences de CDU ont été menées. On compte plus d'une dizaine de CDU en cours d'exploitation en France, ainsi qu'en Italie, un autre à San Sebastian en Espagne, etc. Cependant, plusieurs autres CDU ont été suspendus / arrêtés en raison de la non rentabilité de ces derniers. Une étude de ces espaces logistiques a été réalisée dans (Gonzalez-Feliu, et al., 2013), où trois facteurs de succès ont été identifiés :

- La concertation avec les principaux acteurs (transporteurs, la collectivité et les acteurs économiques de la ville).
- L'accompagnement par des politiques locales favorables, telles que la restriction de l'accès au centre-ville.
- La recherche de l'équilibre financier, à travers une gestion opérationnelle adaptée du CDU. Dans le cas où cela est insuffisant, la nécessité de mettre en œuvre des subventions publiques, dans le but de prendre en charge une partie de la prestation.

Ces expériences ont permis l'observation de plusieurs avantages, au déploiement d'un tel schéma organisationnel, tels que : la réduction de l'impact environnemental, la réduction de la congestion et des accidents, ainsi que le développement de nouveaux emplois. Cependant, ces bénéfices n'ont pas encore été quantifiés et aucune méthodologie n'a encore été proposée, pour relier la mise en place de CDU et l'impact que cela aurait sur la ville.

3.5.2. *Les règlementations du stationnement*

Comme présenté précédemment, l'une des problématiques du TMV est l'arrêt pour la livraison (chargement / déchargement) qui, actuellement, est effectué en général de manière illicite. Pour remédier à ce problème, des réglementations innovantes sont expérimentées dans plusieurs pays européens, on peut citer :

- Lyon : limitation du temps de stationnement à 10 mn pour tous les usagers, ce qui crée éventuellement, plus de places de stationnement pour les livraisons.
- Saint-Denis de la réunion : contrôle des zones dédiées aux livraisons par des agents, dans le but d'assurer le respect de la règlementation.
- Amsterdam : utilisation d'un bateau par DHL comme arrière base pour les livraisons, et livraison du dernier kilomètre par vélo, qui ne requiert pas de zone de stationnement.

- Barcelone : les voies latérales des rues avec une forte activité commerciale et une forte circulation, sont réservées aux livraisons.
- Copenhague, Aalborg et Aarhus : mise en place d'une réglementation qui permet des arrêts étendus pour les entreprises qui respectent certaines conditions, qui contribuent à l'amélioration de la qualité de vie en ville.

Toutes ces expériences et plusieurs autres, dont certaines ont réussi et d'autres ont échoué, montrent que les solutions à déployer dans les différentes villes seront forcément hétérogènes, puisqu'ils devront s'adapter aux spécificités des lieux de leur mise en œuvre. Aussi, elles montrent qu'il n'y a pas encore de consensus sur des solutions qui satisfont les besoins et les contraintes des transporteurs, tout en réduisant l'impact sur la qualité de vie en ville.

3.5.3. *Repenser l'activité commerciale en centre-ville*

La part majoritaire des déplacements de véhicules pour le transport de marchandises est effectuée par les particuliers, qui font leurs achats dans les magasins de la grande distribution, généralement situés dans la périphérie des villes. Pour réduire ces déplacement, plusieurs expériences sont développées par les villes, à travers la mise en place de politiques pour encourager la réimplantation des « petits » commerces de proximité et inciter les acheteurs à s'approvisionner chez ces derniers. A titre d'exemple, à Versailles, une expérience permet aux acheteurs de se faire livrer gratuitement leurs courses à partir des magasins de la ville sur simple appel téléphonique.

3.5.4. *Introduction des managers des centres villes*

Le manque de coordination entre les différents acteurs présentés précédemment, réduit grandement la performance du TMV. Pour pallier ce problème, en Grande-Bretagne, une nouvelle fonction dans la ville a été créée. Il s'agit du manager de la ville dont le rôle principal est d'assurer la coordination entre les différents acteurs de la ville (entre autre les transporteurs), dans le but d'améliorer la performance globale. Pour cela, il arbitre et trouve des compromis entre les objectifs de ces différents acteurs. En France, certaines villes expérimentent cette nouvelle fonction. Ainsi, 50 managers de centre-ville se sont regroupés en un club, qui a pour objectif de définir leurs rôles dans la refonte des centres villes.

3.5.5. *Apport des TIC*

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication permettent de développer de nouvelles solutions innovantes, en matière de TMV. Parmi les applications rendues possibles, on peut citer : le suivi en temps réel des véhicules, le *tracking* des colis et des marchandises, l'ajustement en temps réel des parcours de véhicules pour l'optimisation des tournées, etc. Ces applications ont connu un développement important avec l'explosion de l'activité du e-commerce. Cependant, leur diffusion reste contenue, en raison de la complexité de l'activité du TMV qui, d'après les transporteurs, ne peut être gérer par des logiciels sans intervention humaine. Ces nouvelles technologies sont aussi expérimentées par les autorités pour le contrôle du respect de la règlementation, à titre d'exemple : des caméras pour le contrôle des temps d'arrêt lors des livraisons, des bornes d'accès à certaines zones de la ville en fonction des horaires et du type de véhicule, etc.

4. Exemple du TMV en Ile-de-France (Paris intra-muros et sa périphérie)

La région d'Ile-de-France est l'une des plus densément peuplée en France (12 millions d'habitants) et des plus complexes, en particulier, dans Paris intra-muros avec ses nombreux quartiers historiques. Cette région fait face à un défi logistique de taille, puisqu'elle comptait à la fin de 2014, 1,4 millions d'établissements actifs, dont presque 80% sont des établissements de commerce, transports et services divers (Insee, 2014), avec 40% qui sont localisés à Paris. Ainsi, en 2014 plus de 200 millions de tonnes de marchandises ont été transportées à travers toute la région (SitraM-I, 2017). A noter que 90% de ces tonnages, sont représentés par quatre catégories de marchandises. Durant ces 15 dernières années, la répartition par catégorie s'est présentée comme suit :

- Matériaux de construction : plus de 35%.
- Produits manufacturés et messagerie : moins de 35%.
- Produits alimentaires : environ 10%.
- Produits agricoles : moins de 10%.

De plus, l'évolution du mode de consommation (achats plus fréquents toute l'année avec des pics saisonniers) et l'impact qu'engendre la croissance continue du e-commerce, présagent une explosion du nombre de kilomètres parcourus, pour transporter des colis de plus en plus petits.

Les statistiques de la mairie de Paris (Mairie de Paris, 2009) montrent que 90% du TMV est effectué par la route, représentant 20% de tout le trafic urbain. Ces 20% sont à l'origine d'un tiers des émissions de polluants (tout type de polluants confondus), avec jusqu'à 50% des émissions de particules, 50% des émissions de NO_x et SO_2, ainsi que 25% de CO_2.

Des enquêtes de la chambre de commerce et d'industrie de la région Paris Ile-de-France, ainsi que de la mairie de Paris – direction de la voirie et des déplacements, réalisées en 2014, dressent une photographie de la situation actuelle du TMV comme suit :

- Type de motorisation des véhicules routiers utilisés pour le TMV : 87% de diesel, 11% d'essence et seulement 1% de véhicules propres. A noter qu'à l'horizon 2020, tous les véhicules à motorisation diesel, seront interdits de circulation dans Paris intra-muros.
- Age des véhicules : seulement 40% des véhicules ont été mis en circulation après 2010.
- Nombre de zones de livraison à Paris : à la fin 2015, on comptait environs 9 000 zones de livraison, dont 7 000 zones dites partagées (i.e. qui peuvent être utilisées par tous les véhicules, sur des périodes définies de la journée et de la semaine) et 2 000 dites sanctuarisées (i.e. qui sont exclusivement réservées à la livraison). Ce nombre peut être considéré comme important, mais rapporté au nombre d'établissements (plus de 500 000 à Paris), il devient très faible (1 zone de livraison pour 55 établissements et seulement 1 zone sanctuarisée pour 250 établissements).
- Evolution du trafic des véhicules utilitaires et des poids lourds dans Paris intra-muros et sur le corridor périphérique : comme le montre la Figure I.13, sur les 15 dernières

années, la moyenne journalière du trafic de véhicules utilitaires a été plus ou moins stable dans Paris intra-muros, alors qu'elle a enregistré une augmentation d'un peu plus de 10% sur le corridor périphérique. D'autre part, le trafic des véhicules poids lourds a fortement baissé (environ 55% sur toute la période) dans les deux espaces concernés. Cette évolution traduit parfaitement l'évolution du mode de consommation et la demande de produits de plus en plus personnalisés en mode juste à temps. En effet, cette évolution fait que les besoins en transport concernent des quantités de marchandises de plus en plus faibles, mais de manière beaucoup plus fréquente. Les véhicules utilitaires sont plus adaptés à ce type de demandes, que les véhicules poids lourds.

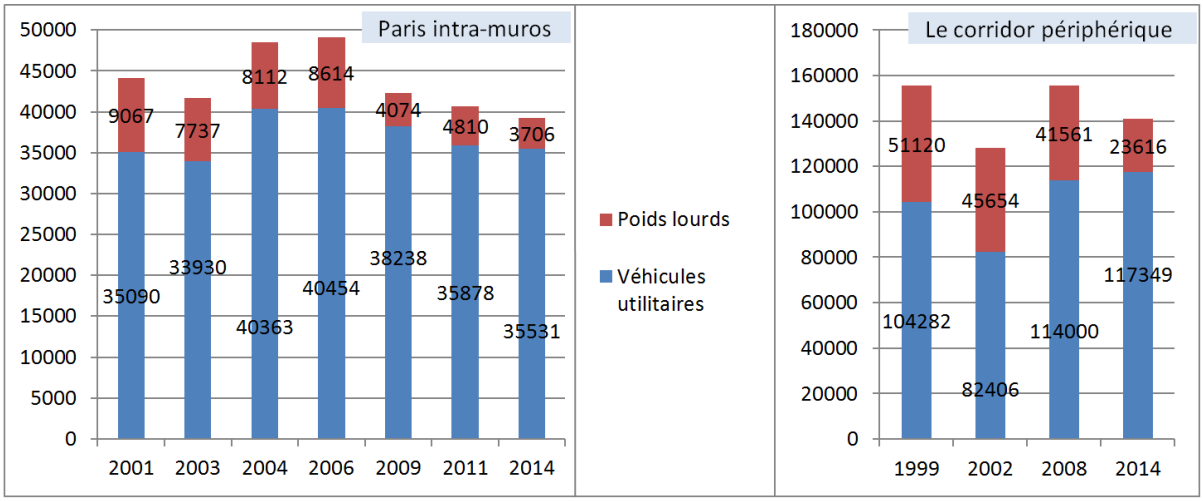


Figure I.13 : Evolution du trafic des véhicules de TMV à Paris et sa périphérie – moyenne journalière

- Evolution du trafic fret ferroviaire en Ile-de-France (réalisé par la filiale fret de la SNCF) : depuis 2010, le trafic global stagne au tour des 5 millions de train.km. Ce transport concerne quasi-exclusivement, la livraison de marchandises en grandes quantités, dont l'origine d'expédition est assez loin de la région Ile-de-France. Il s'agit principalement de l'approvisionnement des entrepôts situés dans les régions périphériques de l'Ile-de-France.
- En ce qui concerne le trafic de fret fluvial, il ne concerne quasi-exclusivement, que le transport de marchandises en vrac (ex : matériaux de construction). Sur ces 15 dernières années, il stagne autour des 15 millions de tonnes transportées annuellement, avec une progression continue du nombre de tonnes.km (de 2 000 millions tonnes.km à 3 000 millions tonnes.km), ce qui correspond à plus de livraisons par bateau, mais avec moins de marchandises transportées à chaque livraison.

4.1. Infrastructures logistiques en Ile-de-France

La région d'Ile-de-France dispose d'infrastructures logistiques très importantes, qui sont caractérisées comme suit (Paris Region, 2017) :

- 12 000 km de réseaux routiers, avec 613 km d'autoroutes. Ce réseau se classe en première position dans toute l'Europe.

- 500 km de voies navigables, avec 70 ports urbains sur une surface de 1 000 ha. Ce qui permet à cette région d'être la plus couverte en France par ce mode de transport et en 2ème position, au niveau européen.
- Réseau ferroviaire dédié au fret composé de 111 stations et connecté à 640 installations fret.
- 1 million m^2 d'entrepôts de stockage, avec 6 plateformes multimodales et 6 terminaux de containers.

La Figure I.14 montre la distribution des différentes infrastructures dédiées au fret dans toute la région. Nous remarquons que la majeure partie de ces infrastructures se situe au nord et au sud de la région parisienne, à plusieurs dizaines de kilomètres de la ville de Paris. A noter que les stations ferroviaires de fret et les ports situés dans les principaux centres logistiques sont principalement utilisés pour interconnecter la région au reste de la France (ou de l'Europe), et non pas à desservir la région elle-même.

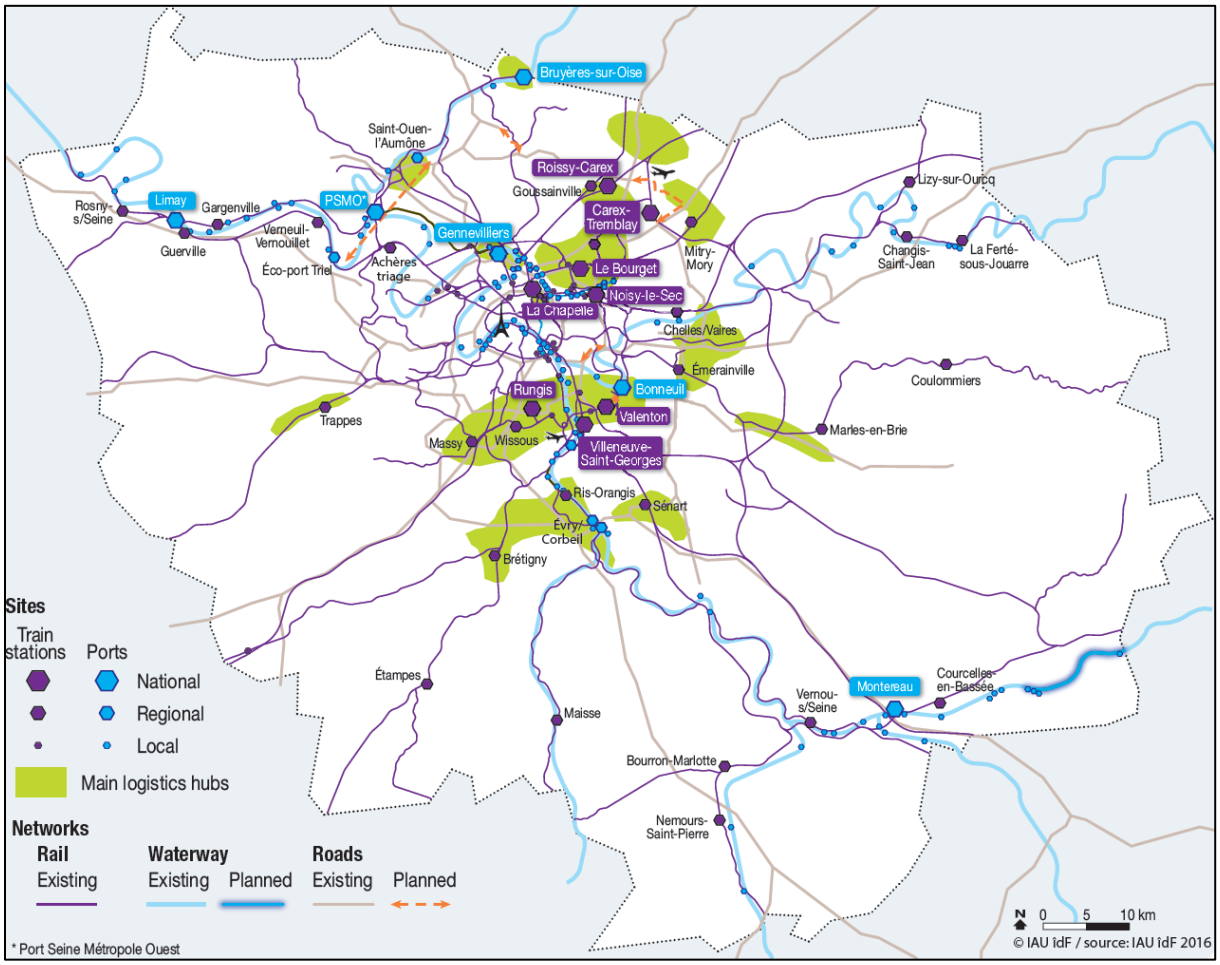


Figure I.14 : Infrastructures et sites logistiques dans la région Ile-de-France (Paris Region, 2017)

Il faut noter que la situation actuelle des sites logistiques dans cette région, est le fruit d'une tendance d'externalisation des activités logistiques de la ville de Paris vers la banlieue, qui s'est poursuivie durant plusieurs décennies (Dablanc & Andriankaja, 2011). Cette tendance a été portée par la recherche permanente des acteurs économiques, de la réduction des coûts logistiques. En effet, en banlieue il est possible d'avoir des surfaces plus importantes à des coûts bien plus bas qu'au centre de Paris. Cependant, cette optimisation économique a eu un

impact non négligeable sur les coûts environnementaux de cette activité (i.e. dégradation de la qualité environnementale), ainsi que sur la croissance du flux de véhicules utilitaires en ville et dans la périphérie.

4.2. La gestion du transport de marchandises en région parisienne

Le transport de marchandises en région parisienne n'a été intégré dans la politique des déplacements qu'en 2002. Cinq objectifs principaux ont été fixés, en vue de promouvoir et de faire émerger une activité économique respectueuse des principes du développement durable. Ces objectifs sont :

- La réduction des impacts environnementaux.
- La maitrise de l'espace public occupé par le TMV.
- L'installation d'outils logistiques spécifiques (infrastructures).
- Le développement de l'efficacité sociale et économique du TMV.
- L'amélioration de l'attractivité économique de la région.

Les leviers pour atteindre ces objectifs sont :

- La promotion du transfert modal du mode routier vers le mode ferroviaire et le fluvial.
- L'amélioration de la règlementation relative au TMV et l'utilisation des zones de livraison.

La procédure d'intégration de l'activité de TMV à la politique générale de la ville, s'est articulée autour de deux étapes principales, à savoir, l'adoption de mesures en fonction des concertations, ainsi que l'apprentissage par les expérimentations. Dans (Chiron-Augereau, 2009), une décomposition détaillée de ces étapes a été réalisée (la première étape ayant été décomposée en deux sous-étapes) :

4.2.1. *La concertation*

Il s'agit de réunir tous les acteurs du TMV au sein du même groupe de travail, dans le but d'identifier les attentes et besoins de chaque acteur et de trouver les meilleurs compromis entre ces derniers. Les acteurs principaux concernés par les concertations étaient : les conseils généraux d'Ile-de-France, la ville de Paris, la préfecture de police, les représentants professionnels du transport et les associations professionnelles. Les habitants de la ville ont eux aussi été consultés.

Les résultats des concertations ont été regroupés sous forme de 7 orientations, dont la ville de Paris devait tenir compte lors de l'établissement du règlement parisien des marchandises. Ces orientations concernent :

1) L'amélioration du positionnement des zones de livraison sur la voierie parisienne.
2) La limitation à 30 minutes de l'utilisation de toutes les zones de livraison positionnées sur la voirie de Paris.
3) La réservation aux professionnels du transport, l'utilisation des zones de livraison situées sur le réseau de couloirs de bus de Paris et dans les quartiers à forte densité commerciale.
4) La simplification du règlement marchandises en vigueur.
5) L'amélioration du dispositif de contrôle marchandises à Paris.

6) La mise en place d'une charte de bonnes pratiques entre la ville de Paris et les acteurs du secteur des marchandises.
7) L'introduction du principe environnemental dans le règlement marchandises en vigueur.

4.2.2. *Les mesures pour améliorer le TMV*

Sur la base des orientations formulées suite aux concertations, un ensemble de mesures a été décidé pour améliorer le TMV. On distingue des mesures relatives, d'une part, à l'entrée des marchandises à Paris et d'autre part, celles relatives à leur diffusion dans la ville.

1) Les mesures relatives à l'entrée des marchandises à Paris concernent principalement la promotion du report modal vers le ferroviaire et le fluvial. Des équipes constituées des acteurs de ces deux modes et des autorités ont été constituées. Ces derniers ont réalisé des études de terrain pour proposer diverses pistes de promotion et de mise en œuvre d'expérimentation dans ce sens.
2) Les mesures relatives à la diffusion des marchandises dans la ville concernent la simplification de la réglementation relative au TMV, l'amélioration des dispositifs de contrôle, l'adaptation des zones de livraison aux contraintes opérationnelles des transporteurs. Enfin, ces mesures ont été regroupées dans une charte des bonnes pratiques de TMV.

Ces différentes étapes ont donné lieu en 2007, à une nouvelle règlementation sur le TMV dans la ville de Paris. Cependant, il y a toujours un certain nombre de divergence et un manque d'harmonisation dans les règlementations des différentes localités de la région Ile-de-France, malgré les efforts récents. De plus, bien que l'implantation et la gestion des zones de livraison aient représenté un chapitre important, lors de l'établissement de la réglementation « marchandises », le manque de contrôle sur le terrain de l'utilisation de ces zones, génère toujours un nombre important de perturbations (tels que le stationnement illicite et le dépassement du temps d'arrêt règlementaire).

4.2.3. *L'apprentissage par l'expérimentation*

Dès l'émergence de la problématique de TMV à Paris au début des années 2000, le principe de l'apprentissage par l'expérimentation a été mis en œuvre (Ripert, 2004). Il s'agit d'expérimenter des modes de transport innovants (tels que les véhicules propres), des modes alternatifs (tel que le fret ferroviaire), de nouvelles organisations (telle que l'utilisation des espaces logistiques), etc. Ces expérimentations sont déployées sur une zone restreinte de la ville, elles peuvent concerner un type particulier de marchandises, ou bien impliquer un nombre réduit de professionnels. Parmi ces expérimentations, on peut citer :

- L'utilisation de véhicules propres (électriques ou roulant au GNV) : quelques grandes enseignes installées dans la ville de Paris, participent à cette expérimentation, tel que Carrefour, Monoprix, L'Oréal, Chronopost, etc. Elles utilisent des véhicules allant de moins de 3,5 t jusqu'à des 26 t utilisant des carburants propres. La ville de Paris les accompagne de diverses manières, telles qu'en installant des bornes électriques et aires de livraison spécifiques.

- L'utilisation de petits véhicules adaptés aux spécificités de la ville (triporteurs, scooters) : ces véhicules sont expérimentés pour le transport de certains types de marchandises (des colis de taille et poids contenus) et pour un certain type de livraison (livraisons aux particuliers, les petits magasins).
- L'installation d'espaces logistiques urbains : il s'agit principalement d'expérimentation avec des micro-plateformes logistiques situées en centre-ville, qui servent à massifier les flux au plus près des points de livraison et de collecte et, être ainsi, des arrières bases pour les livraisons avec de petits véhicules tels que les triporteurs. Plusieurs petites entreprises ont participé à ces expériences, à travers des services de livraison de proximité, ainsi que Chronopost.

Plusieurs expérimentations ont abouti à des solutions innovantes à l'échelle de la région Ile-de-France, mais aussi, ont permis l'implantation de ces mêmes solutions dans d'autres villes. A titre d'exemple :

- Monoprix utilise exclusivement des véhicules roulant au GNV pour approvisionner tous les magasins dans la région et dans d'autres régions de la France.
- Chronopost utilise une flotte très importante de véhicules électriques et roulants au GNV. Elle a installé 5 espaces logistiques urbains (2 à Paris, 1 à Toulouse, Marseille et Lille). D'autres solutions innovantes sont en cours de déploiement, telles que les stations *PickUp* qui permettent aux usagers d'aller récupérer leurs colis par eux-mêmes, dans des endroits pratiques (telles que les gares et stations ferroviaires en ville).
- A la fin 2017, une importante plateforme logistique sera opérationnelle à Paris « Chapelle Internationale ». Il s'agit d'un hôtel logistique multimodal de grande envergure de 40 000 m^2. Disposant, entre autres, d'un terminal urbain ferroviaire, pour le transport de marchandises à destination des surfaces alimentaires, et d'un espace logistique urbain destiné à la messagerie urbaine.
- Plusieurs startups ont été créées pour proposer des services de livraison en ville avec des tripoteurs, vélos ou scooters électriques. Chaque startup s'étant spécialisée dans un type particulier de marchandises à livrer (ex : plats cuisinés, achats par correspondance à partir des magasins situés en ville, collecte / livraison de pressing, etc.).

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les différents concepts liés au transport de marchandises, tout en situant cette activité dans la chaîne logistique. Nous avons étudié la situation actuelle et les pratiques en vigueur, en matière de transport de marchandises en général, ce qui nous permet d'en tirer les conclusions suivantes :

- La part de transport de marchandises par route a toujours été la plus importante. Ce mode doit cette domination à ses divers avantages, dont la plus importante étant sa flexibilité.
- Le mode de transport routier présente plusieurs inconvénients, qui engendrent de nombreux désagréments, aussi bien aux autorités qu'aux usagers de la route. Ceci est à

l'origine de plusieurs politiques de promotion d'autres modes de transport plus durable.

- Le mode de transport ferroviaire permet de bénéficier d'économie d'échelle et de réduire l'impact environnemental de transport de marchandises. Cependant, dans sa configuration actuelle, son manque de flexibilité est le principal frein à son développement.
- Le transport intermodal présente une alternative de compromis intéressante, dans le but de bénéficier des avantages de divers modes de transport, tout en réduisant leurs inconvénients.

Aussi, nous avons montré que la problématique de TMV est plus complexe que celle du transport de marchandises en général. Cette complexité est principalement liée aux :

- Le coût et le peu de place dans les villes (particulièrement en centre-ville).
- La densification des villes.
- La croissance démographique.
- Les contraintes législatives (bruits, volumes transportés, énergie utilisée, etc.)

L'étude des pratiques actuelles en matière de TMV, quasi-dominé par la route, nous a permis de mettre en évidence les multiples carences de ce mode de transport et ses limites, au vu des modèles de développement durables, souhaités pour les villes. En effet, l'explosion de la demande a eu des répercussions très négatives pour la ville, qu'on peut résumer comme suit :

- Saturation du réseau routier de la ville et interférence avec les déplacements des personnes.
- Pics de pollution records en Ile-de-France.
- Augmentation des accidents et dégradation de la voirie.
- Augmentation des pratiques illégales (ex : stationnement en double file et sur les trottoirs, transfert non sécurisé des marchandises du véhicule vers le magasin, etc.).
- Ce mode s'est rendu indispensable, malgré ses différents inconvénients, et s'impose comme le seul moyen suffisamment réactif et souple, pour absorber une demande en croissance continue. En effet, par sa prise en charge de plus de 90% de l'activité de TMV, aucun autre mode exclusif, n'est en mesure de le remplacer.

D'où, la nécessité de faire évoluer le TMV. En premier, au niveau des modes de transport utilisés, à travers la promotion des modes de transport alternatifs (ferroviaire, fluviale, triporteurs et deux roues). Deuxièmement, au niveau organisationnel, pour réduire le nombre de kilomètres assurés par le mode routier. L'une des idées étant le développement de l'intermodalité.

Plusieurs propositions d'amélioration au niveau organisationnel et des infrastructures sont proposées ou en cours d'expérimentation. Les premiers enseignements qu'on peut en tirer concernent l'intérêt de la mise en place de centres de distribution urbains, l'amélioration de la règlementation pour mieux l'adapter aux besoins réels sur le terrain, ainsi que l'utilisation des nouvelles technologies, pour améliorer la réactivité et la performance du TMV.

L'étude de la région Ile-de-France, nous a permis de montrer que les phénomènes observés en général, dans les pratiques de TMV, sont accentués dans cette région. Cette accentuation est due à l'importance de la densité de population dans cette région, ainsi qu'à la densité de l'activité économique.

Chapitre II

Transport de marchandises en ville par rail – mixité fret / voyageurs

1. Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons montré que la pratique actuelle du TMV, quasi-exclusivement assurée par le mode de transport routier, n'est pas à la hauteur des challenges actuels pour accompagner le développement des villes. Plus encore, la saturation du réseau routier urbain (en particulier, aux heures de pointes) et les différentes nuisances de ce mode, poussent les autorités à durcir la règlementation et à encourager le report vers d'autres modes de transport, plus durables. Ainsi et pour remédier à ce problème, plusieurs alternatives modales et organisationnelles sont proposées.

Parmi les alternatives proposées, nous nous intéressons dans ce travail, à l'utilisation du réseau ferroviaire urbain (initialement dédié au transport de voyageurs), pour le transport des marchandises d'un point à un autre, en ville et ses environs. L'objectif de cette alternative, n'est pas de se substituer au mode de transport routier, mais de transférer une partie des flux de marchandises en ville, vers le mode ferroviaire. Ceci, permettra de réduire la pression sur la route, ainsi que de rentabiliser la capacité non utilisée des trains de passagers et les infrastructures y afférentes (en particulier, durant les heures creuses).

La première partie de ce chapitre, sera dédiée à une revue de littérature sur le transport mixte fret / voyageurs, ainsi qu'à l'étude de différentes expérimentations et solutions déployées sur le terrain (passées ou en cours d'exploitation). Dans la seconde partie, nous allons définir l'activité de transport mixte fret / voyageurs, puis, nous allons identifier et étudier les différents cas de mixité fret / voyageurs possibles, sur le réseau de transport ferroviaire urbain. Enfin, dans la dernière partie, nous allons identifier et définir les problématiques décisionnelles principales, liées à la mise en œuvre d'une telle solution de transport.

2. Pratiques et état des lieux : fret urbain par rail et mixité fret / voyageurs

Le transport de marchandises par rail en ville existe déjà, mais sous une forme différente de celle étudiée dans ce présent travail, et à une échelle assez réduite. En effet, il est mis en œuvre sporadiquement et dans certaines circonstances exceptionnelles, mais aussi, à travers certaines expériences, dont le but est d'évaluer son potentiel. D'un autre côté, le déploiement d'une telle solution de transport en milieu urbain et périurbain, figure parmi les alternatives suggérées par certains chercheurs.

Bien que les caractéristiques du transport de marchandises, diffèrent de celles du transport de voyageurs (comme le montre le Tableau II.1), certains opérateurs de transport de voyageurs se sont intéressés à la mixité fret / voyageurs, à travers des études de faisabilité. En effet, ces études mettent en évidence les gains d'une telle mutualisation. En ce qui concerne les chercheurs, on trouve certaines études et articles, qui s'intéressent à la question de la mutualisation dans des cas particuliers.

Dans cette section, nous allons commencer par présenter les premières alternatives pour le fret urbain, conçues sur la base du modèle de transport de voyageurs par rail, principalement, en utilisant l'espace souterrain de la ville et ses environs. Puis, nous étudierons les quelques

travaux dans la littérature, mentionnant l'utilisation du rail en ville pour le transport de marchandises. Enfin, le dernier point abordera les expérimentations passées, ou en cours d'exploitation, d'une telle solution de transport.

Tableau II.1 : Comparaison entre les caractéristiques de transport de voyageurs / marchandises (Delaitre, 2014)

Voyageurs	Marchandises
Voyagent de manière active	Transportées de manière passive
Embarquent, débarquent et effectuent les correspondances sans assistance	Doivent être chargées, déchargées et transférées
Traitent l'information et l'utilisent sans assistance	L'information doit être traitée par des gestionnaires logistiques
Choisissent entre les différents moyens de transport sans assistance (parfois de manière irrationnelle)	Les gestionnaires logistiques doivent choisir un mode de transport de manière rationnelle

2.1. L'espace souterrain pour le transport de marchandises

L'utilisation de l'espace souterrain en ville pour le transport de marchandises, est une solution d'actualité. La solution de transport étudiée dans ce cas, consiste en un moyen de transport autonome, soit des véhicules sur roues ou rails, soit des modules devant contenir des marchandises, circulant à travers des pipelines souterrains. Dans (Visser, 2017), une revue des différentes études et expérimentations dans ce domaine a été faite.

L'idée d'utiliser l'espace souterrain urbain, pour un transport exclusivement dédié aux marchandises (inspirée du modèle de transport de voyageurs), n'est pas récente. En 1991, une équipe de chercheurs Japonais a proposé de développer un tel système, pour remédier à plusieurs problèmes environnementaux, liés à la croissance continue de la fréquentation en ville des véhicules de marchandises (Kashima, et al., 1993). Au Pays-Bas, des études de faisabilité pour une telle solution de transport, ont été menées à partir de 1995, à travers le projet « OLS-ASH ». Ces études ont été suivies par le déploiement d'expérimentations en laboratoire, avec le développement de solutions technologiques avec des véhicules autonomes « UFT » (Pielage, 2001). Les conclusions auxquelles ont abouti ces études et expérimentations au sujet de cette solution de transport, peuvent être énoncées comme suit :

- Elle présente un potentiel important dans les zones densément peuplées.
- Elle fournit un moyen de transport automatisé non soumis aux perturbations, offrant une fiabilité accrue.
- Elle permet la réduction simultanée du trafic et de la pollution dans la ville, contribuant à la création d'un meilleur environnement.
- Elle pourrait gérer une part importante du transport domestique de marchandises, en combinant les flux et en se connectant à un réseau de transport multimodal.
- Une option d'utilisation d'espace au niveau du sol a été étudiée. Comme les coûts de construction sont beaucoup plus bas dans ce cas, la faisabilité des systèmes UFT augmente.

Une autre étude expérimentale « CargoCap » (CargoCap, 2002), propose d'utiliser l'espace souterrain en ville et ses environs (jusqu'à 150 km de distance), pour déployer un système de transport automatisé par pipeline. Le système développé doit fonctionner 24 heures par jour, toute la semaine (i.e. sans aucune interruption). Le caractère exclusif au transport de marchandises, associé à l'utilisation d'une solution technologique automatisée, confère à cette solution de transport, une grande fiabilité et la rend insensible aux influences des autres modes de transport (tel que : routes saturées et circulation). Le véhicule de transport autonome est dimensionné de sorte à pouvoir charger deux europalettes avec des dimensions : 800*1200*1050 mm (à savoir, l'europalette est très utilisé dans le transport de marchandises et a des dimensions standardisées). Ainsi, chaque commande doit être contenue dans des emballages respectant les dimensions de l'europalette, et est affecté à autant de véhicules autonomes que nécessaire, transportant chacun deux palettes. La Figure II.1 montre les éléments composant ce système et son implantation.

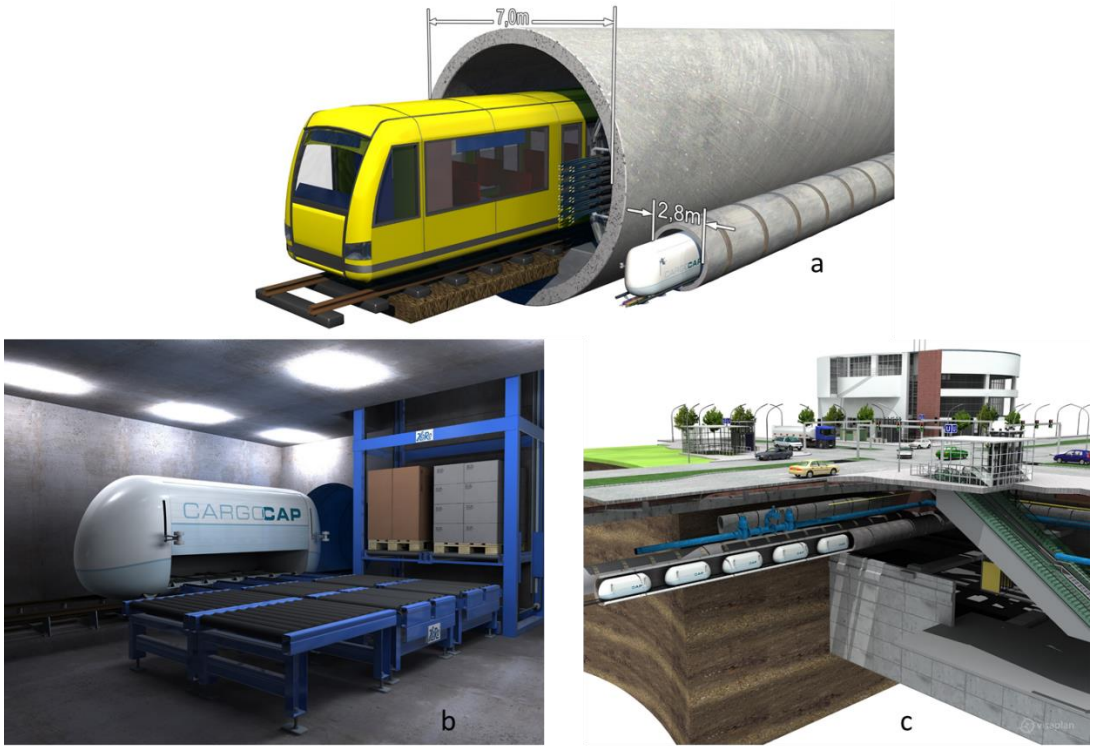


Figure II.1 : Modèles 3D de la solution CargoCap : a- mise à l'echelle de la solution par rapport à un metro, b- système de chargement / déchargement automatique, c- insertion de la solution dans l'espace souterrain (CargoCap, 2002)

Selon (Delmastro, et al., 2016), bien que les études précédentes montrent un fort potentiel, à l'utilisation d'une solution de transport souterrain dédiée uniquement aux marchandises, les auteurs estiment qu'elle reste irréaliste, en raison du coût élevé de l'investissement nécessaire et de la non compatibilité d'une partie des marchandises (particulièrement les marchandises en vrac), avec le transport souterrain.

Cependant, un pas vers la mise en œuvre d'une telle solution a été franchi en Suisse. En effet, une solution de transport souterrain « Cargo Sous Terrain » (CST) est en cours de développement pour une mise en exploitation à l'horizon 2030 (CST, 2016). En effet, l'étude de faisabilité finalisée en 2015, a montré que cette solution de transport est faisable, aussi bien

techniquement, qu'économiquement. Plus qu'une solution de transport, CST représente une solution logistique complète, qui permet d'effectuer la réception des marchandises (en palettes, caisses ou en vrac), leur transport entre différents hubs logistiques, ainsi que leur stockage temporaire. Le transport s'effectuera principalement entre les villes suisses, en utilisant des véhicules électriques autonomes et d'autres systèmes automatisés. Le dernier kilomètre étant assuré par des véhicules électriques. Il est indiqué que le système développé, permettra le transport de plusieurs types de marchandises, y compris les denrées fraîches, ainsi que la collecte des déchets et des matériaux recyclables. Cette solution présente les mêmes avantages que ceux des deux solutions précédentes. La Figure II.2 montre le principe de fonctionnement de ce système, les éléments le composant et son implantation dans l'espace souterrain.

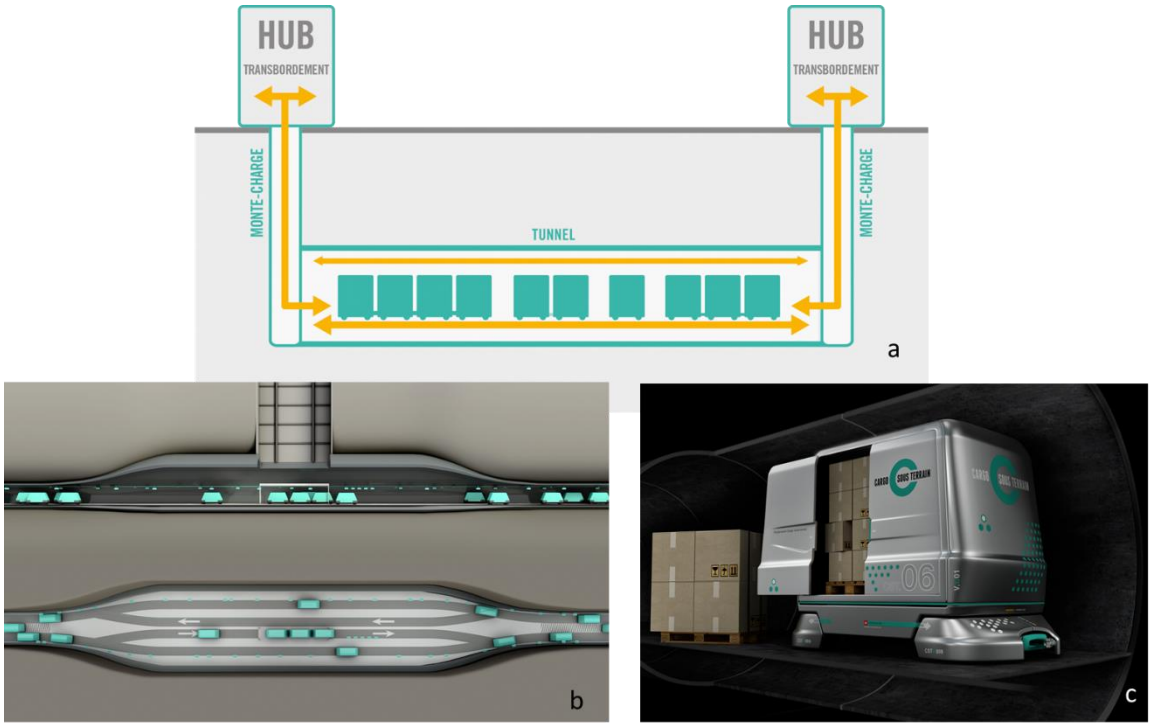


Figure II.2 : Modélisations de Cargo Sous Terrain : a- principe de fonctionnement, b- coupes latérale et horizontale, c- modèle 3D des véhicules en développement (CST, 2016)

2.2. Mixité fret / voyageurs et utilisation du rail urbain : alternatives durables dans la littérature

La mutualisation du réseau urbain de transport de voyageurs, pour le transport de marchandises, est une idée qui a été explorée par certains chercheurs, suite à l'intérêt porté par des compagnies de transport de voyageurs. La motivation principale de ces compagnies de transport, c'est l'amélioration du rendement économique de leurs équipements et infrastructures.

2.2.1. *Transport urbain mixte fret / voyageurs*

En ce qui concerne la mutualisation des moyens de transport de voyageurs en commun, pour le transport de marchandises en milieu urbain, une étude a été réalisée dans (Trentini, 2012). Cette étude porte sur la modélisation d'un système de distribution de marchandises en ville, à partir d'un CDU, en utilisant une ligne de transport en commun par bus. L'idée est d'utiliser

la capacité résiduelle dans les bus pour voyageurs, pour transporter les marchandises. Quant au déchargement, il est effectué dans les arrêts de bus habituels de la ligne, à partir desquelles, un système de distribution capillaire est déployé, pour l'acheminement des livraisons vers leur destination finale. Les principales conclusions auxquelles est parvenue cette étude sont :

- Le modèle de transport étudié est faisable techniquement. En effet, les aspects matériels sont peu complexes à mettre en œuvre dans le cadre des bus (juste quelques adaptations sur les véhicules sont nécessaires).
- La nécessité de poser plusieurs hypothèses pour mener à bien ce type d'étude. En particulier, à cause de l'originalité de la solution de transport proposée et l'inexistence d'expériences similaires en pratique. Ainsi, les limites apparentes de l'étude qui en découlent, peuvent être levées facilement, dans le cas de la spécification des technologies et organisations à mettre en œuvre, ainsi que la quantification de la demande potentielle.
- En ce qui concerne l'aspect gestion du système, cette étude propose d'utiliser les principes de la planification de production, en utilisant les principes de MRP, pour prendre en compte les spécificités de la problématique. La conclusion sur cet aspect est qu'il est faisable d'un point de vue gestionnaire.
- La nécessité de définir un scénario particulier (dans ce cas, c'est la ville moyenne de La Rochelle), pour étudier concrètement ce type de solution de transport.
- Comme la solution étudiée n'est pas encore déployée, il n'y a donc pas de données réelles, pour évaluer et valider le modèle proposé.

2.2.2. ***Transport de marchandises en ville par rail***

Dans (Nuzzolo, et al., 2008), les auteurs ont étudié la possibilité d'utiliser l'infrastructure ferroviaire entre Naples et Sorrente en Italie, pour le transport de marchandises sur un tronçon d'une cinquantaine de kilomètres. Pour cela, ils proposent d'utiliser la voie ferroviaire existante, les gares dédiées aux passagers, ainsi que d'anciens trains de passagers qui ne sont plus utilisés. Ces derniers ont été aménagés en enlevant les sièges, pour laisser un maximum d'espace pour le chargement du fret. Les marchandises à transporter sont mises sur des palettes et chargées à l'intérieur des trains avec des transpalettes (comme le montre la Figure II.3). Aussi, ils proposent d'effectuer le transport de marchandises, durant les heures creuses de la journée. La réalisation d'une étude de faisabilité technico-économique a abouti aux conclusions suivantes :

- Les temps de livraison, en utilisant le mode routier classique, ou le mode ferroviaire (solution proposée) seront sensiblement équivalents (autour de 90mn, en incluant les opérations de manutention).
- Les coûts directs du transport par la route sont de 60€/t, contre 120€/t pour le ferroviaire (incluant les coûts de modifications des trains et des infrastructures, le déploiement d'outils informatiques spécifiques, ainsi que les coûts de gestion).
- La réduction du fret routier serait de 5%.
- La réduction des émissions de polluants serait de 15%.
- La réduction de la congestion serait de 20%.

- Les gains relatifs aux trois conclusions précédentes ont été évalués à 70€/t (i.e. le surcoût indirect de l'utilisation du mode routier par rapport au mode ferroviaire).
- L'alternative ferroviaire présente un bénéfice global, relativement au mode routier, équivalent à 10€/t.

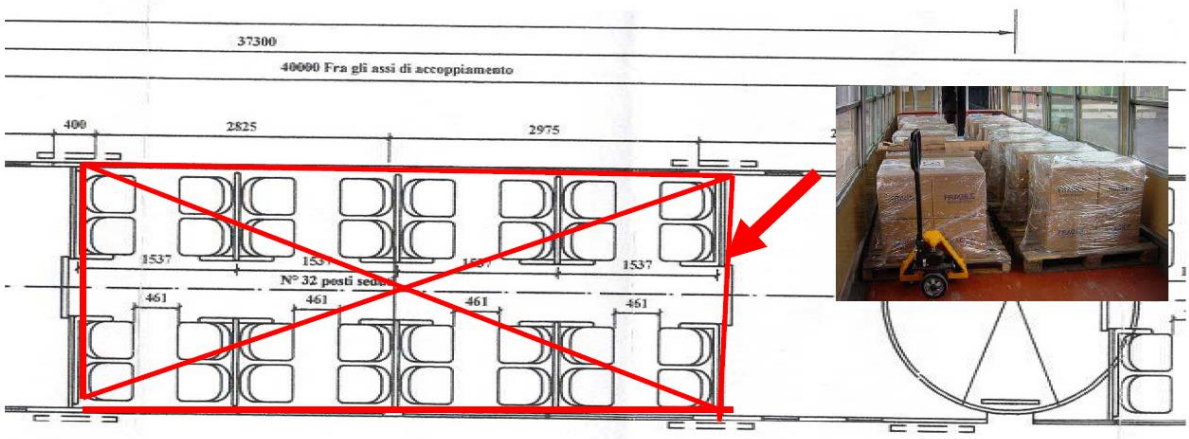


Figure II.3 : Train de passagers modifié pour le transport de marchandises (Nuzzolo, et al., 2008)

Dans (Browne, et al., 2014), partant du constat de la prédominance du fret routier, en milieu urbain, et de la nécessité de développer des alternatives plus durables, tel que le ferroviaire, les auteurs ont adopté une démarche en deux phases :

- L'analyse des pratiques dans plusieurs villes, en termes d'utilisation du mode ferroviaire, pour le fret urbain. Cette analyse a été agrémentée d'interviews avec les parties prenantes de cette activité.
- L'évaluation de certains projets pilotes et expérimentations d'utilisation du mode ferroviaire, pour les livraisons en ville.

D'une part, ce travail a permis la mise en évidence du potentiel d'utilisation du mode ferroviaire, dans le fret urbain, ainsi que ses atouts clés, sur lesquels il devrait s'appuyer, et qu'on peut résumer comme suit :

- Maximiser son utilisation pour les marchandises en vrac, tel que : les matériaux de construction, qui se déplacent vers les villes, et les déchets domestiques et industriels, qui se déplacent vers l'extérieur des villes.
- Développer des solutions logistiques « vertes », pour le transport des biens de consommation dans les zones urbaines, ceci en combinant l'utilisation du rail pour le transport à partir des centres de distribution, vers des emplacements dans la zone urbaine, et de là, l'utilisation de véhicules routiers « propres » (ex : véhicules électriques), pour l'acheminement des marchandises jusqu'à leur destination finale.
- Dans les cas où le rail ne peut être utilisé directement, utiliser les infrastructures ferroviaires existantes, ou de nouvelles (telles que les gares), comme des centres pour la distribution des marchandises en ville.

D'autre part, ce travail a permis l'identification de certaines barrières au développement du fret ferroviaire en milieu urbain, tel que :

- Transfert modal vers le fret ferroviaire limité. Ceci revient à des coûts excessifs nécessaires à l'extension du réseau.
- Espace et infrastructures limités en ville pour le déploiement d'une telle solution (dans le cas de nouvelles installations).
- Coûts élevés de l'infrastructure ferroviaire et des systèmes connexes.
- Flexibilité physique limitée.
- Croissance du besoin de transport de voyageurs par rail en ville, ce qui limite la croissance de la part dédiée au fret.

Pour autant, ces barrières ne sont pas insurmontables, mais requiert des études supplémentaires et surtout, une volonté des transporteurs et des autorités, pour investir dans le développement du fret ferroviaire.

Dans (De Langhe, 2014), l'auteur réalise un travail d'investigation similaire au précèdent, en identifiant aussi bien les facteurs de réussite d'un fret urbain par rail, que les obstacles à son développement. Il ajoute quelques analyses pertinentes, telles que :

- Les caractéristiques de la ville pour une implantation d'une solution de fret ferroviaire, sont un paramètre crucial, qui requiert une étude approfondie. En particulier, il faut adapter le projet à la taille de la ville, la densité de population, la structure économique de la ville, les infrastructures de transport existantes, etc.
- Lorsqu'on parle de transport de marchandises par rail en milieu urbain, le type de marchandises à transporter peut varier d'une ville à l'autre et d'un projet à l'autre : marchandises en vrac, livraison pour particuliers, livraison pour la grande distribution, déchets, etc.

Dans (Diziain, et al., 2014), les auteurs ont étudié le transport urbain multimodal de marchandises, en France et au Japon. Ils ont évalué le potentiel du report modal du mode routier vers le ferroviaire et le fluvial. Ils ont conclu qu'aussi bien le mode ferroviaire, que le fluvial, sont trop coûteux à mettre en œuvre, et qu'ils ne peuvent être rentables, que si plusieurs conditions sont satisfaites (ex : réseau routier congestionné, existence d'infrastructures multimodales, disponibilité d'un terminal ferroviaire en milieu urbain, etc.).

Les études qu'on vient de présenter concernent l'utilisation des trains de fret (au sens large), pour le transport de marchandises en milieu urbain. Principalement, ce transport concerne l'introduction des marchandises à partir de l'extérieur de la ville, ainsi que le transport des produits et déchets de la ville vers l'extérieur (et non pas les livraisons en ville, d'un point à un autre). Les études suivantes concernent, quant à elles, les livraisons de marchandises en ville, moyennant un moyen de transport ferroviaire urbain (ex : métro ou tramway).

Dans (Motraghi & Marinov, 2012) et (Dampier & Marinov, 2015), les auteurs ont étudié la faisabilité d'effectuer le transport de marchandises, en utilisant le métro à Newcastle upon Tyne. Les deux études ont utilisé la modélisation pour évaluer le potentiel d'intégration du flux de marchandises. La première, à travers un modèle à évènements discret, où l'intégration de métros supplémentaires sur la ligne de l'aéroport a été évaluée, suivant plusieurs scénarios. La seconde, à travers un logiciel de transport spécifique, qui permet d'évaluer l'impact

monétaire des accidents de la route et, ainsi, évaluer les bénéfices du report modal vers le métro. Ces deux études ont conclu à la viabilité d'un tel système de transport de marchandises. En effet, au-delà des avantages environnementaux et réduction des accidents et perturbations sur la voirie urbaine, ce système permet :

- L'amélioration des profits de l'entreprise de transport.
- L'optimisation de l'utilisation des ressources (métros et infrastructures).
- La génération de nouvelles opportunités d'affaires.

Cependant, il est suggéré d'effectuer des études supplémentaires avec plus de données avant de passer à une éventuelle implémentation.

Ces études ont été complétées par deux autres, (Brice, et al., 2015) et (Reece & Marinov, 2015), à travers un cas d'étude. Ce cas d'étude traite l'éventuelle utilisation du système précèdent, pour le transfert de bagages à destination de l'aéroport de Newcastle, à partir du centre-ville. Ces deux études ont montré la faisabilité technique de cette solution. Cependant, elles ont mis en évidence l'important surcoût généré, comparativement au service actuel de transfert de bagages par la route.

Dans (Gonzalez-Feliu, 2014), l'auteur développe une démarche sur la base de la méthode d'analyse coût-bénéfice, pour évaluer la pertinence du déploiement d'une solution de transport de marchandises, en utilisant le réseau ferroviaire urbain. Il a appliqué cette démarche sur un cas d'étude, relatif à une ligne de tramway dans la ville de Paris. Les conclusions de cette étude, présentent le bénéfice potentiel d'une telle solution de transport, et pose les conditions nécessaires pour réaliser ce bénéfice. Ces conditions étant une forte demande et l'accompagnement des autorités.

2.2.3. *Études du PREDIT : utilisation du réseau de transport de voyageurs à Paris pour le transport de marchandises*

Le PREDIT est un programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres. Il a été porté par : les Ministères chargés des Transports, de la Recherche et de l'Industrie, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et OSEO (Bpifrance Financement). C'est dans le cadre de sa 4ème version (2008-2012), que trois études très pertinentes, ont défraichi le terrain de la problématique de mixité fret / voyageurs, sur le réseau de transport de voyageurs (principalement, en région d'Ile-de-France). En partenariat avec plusieurs bureaux d'étude spécialisés dans le transport et la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens – entreprise de transport public), ces trois études ont répondu à la question de la faisabilité d'une solution de transport mixte à trois niveaux : évaluation des possibilités (techniques et juridiques), faisabilité (économique) et évaluation des coûts (ou surcoûts) d'intégration de la composante logistique au transport de voyageurs.

- **Etude 1 :** Intégration de la mixité opérationnelle en transports : états et possibles (PREDIT GO n°4, 2012)
  L'objectif de cette étude est d'identifier le champ des possibles, en matière de mixité fret / voyageurs sur un réseau de transport urbain et les conditions nécessaires à la

mise en œuvre d'un cas de mixité. Les modes de transport considérés étant : métro, tramway et bus.
Les possibilités de mutualisation sont multiples. Elles ont été classées en trois niveaux de mise en œuvre (ces niveaux permettent de mesurer l'étendu financier et temporel quant à l'éventuelle mise en œuvre d'une telle solution) :

- En utilisant l'existant tel qu'il est : mise en œuvre rapide, avec un coût minimum. Cependant, cela réduit le champ des possibilités, étant donné que l'activité de transport des marchandises, doit se conformer aux contraintes déjà présentes, dans un système conçu exclusivement pour le flux passagers.
- En utilisant l'existant moyennant quelques modifications : mise en œuvre plus ou moins rapide, le temps d'effectuer un certain nombre de travaux et d'aménagement, pour s'adapter aux contraintes du flux de marchandises. Ce cas intermédiaire présente un équilibre intéressant en termes de : temps de mise en œuvre, coûts d'implémentation et contraintes liées aux voyageurs.
- En innovant : mise en œuvre lente et coûts élevés. Cependant, la solution développée, considérant le flux des marchandises dès la phase de conception, permettra de générer un maximum de profit, grâce à l'étendue des possibilités, qui sera laissé au transport de marchandises.

Toutefois, une mise en œuvre d'une telle mixité, sur le réseau de transport de voyageurs, doit faire face à plusieurs contraintes, qui ont été classées en quatre catégories comme suit :

- Contraintes techniques et fonctionnelles : pour chaque mode de transport considéré, des contraintes spécifiques ont été identifiés. Une première contrainte commune, assez facile à prendre en charge, est la nécessité d'adapter le matériel roulant au transport de marchandises. Une seconde contrainte consiste en la nécessité d'adapter les infrastructures, pour la réception et le chargement / déchargement des marchandises. Une troisième contrainte concerne les capacités de transport du matériel roulant en poids et volume, ainsi que l'usure supplémentaire causée par la nouvelle activité. Certaines autres contraintes, sont spécifiques à chaque mode, tel que l'accessibilité au réseau souterrain pour le métro.
- Contraintes juridiques et sécuritaires : dans le statut actuel de la RATP, cette entreprise n'a pas le droit de transporter des marchandises. Mais comme elle est gestionnaire des infrastructures et du réseau ferré, à ce titre, elle pourrait éventuellement faire appel à une autre entreprise, pour assurer un service de fret. Cependant, cela constituera une action illégale aussi, parce qu'elle n'a pas le droit d'établir un tel contrat. En définitive et au vu des statuts de l'entreprise et de la règlementation actuelle, ce service ne peut être déployé.
- Contraintes institutionnelles : dans le but d'assurer la cohérence sur tout le territoire d'Ile-de-France, une seule autorité est en charge de l'organisation et la mise en œuvre de la politique de transport, c'est le Syndicat des Transports d'Ile-de-France « STIF ». La RATP n'a que la responsabilité de gestion des

infrastructures du réseau ferré, et non pas de l'organisation du transport public dans l'agglomération. Plus précisément, la RATP doit se conformer aux demandes du « STIF ».

- Contraintes sociales : les métiers dans la RATP sont très codifiés et chaque métier a des responsabilités et des plans de carrières spécifiques. L'intégration d'un nouveau service lié au fret, nécessitera forcement des mutations et des évolutions dans ces métiers. De plus, l'organisation de l'entreprise est basée sur une démarche participative et, à ce titre, il est nécessaire de faire adhérer les différentes parties au plan d'évolution, nécessaire à l'intégration de l'activité de fret.

Bien que contrastées, les conclusions de cette étude sont prometteuses, et peuvent être résumées comme suit :

- La mixité a franchi le pas du concept, puisque plusieurs expérimentations existent. Entre autre chez la RATP, à travers des expérimentations de Tramfret.
- Toutes les difficultés techniques et juridiques sont surmontables, à condition qu'il y ait des politiques volontaristes, pour une mobilité intégrée.
- La solution de transport proposée doit être compétitive. Elle doit répondre aux besoins des logisticiens, avec un coût comparable à celui des solutions actuelles et avec un même degré de fiabilité.
- Une classification des trois modes de transport étudiés, a été faite à deux niveaux : en termes de mise en œuvre, le bus présente le plus de facilité avec un coût minimum, suivi du tramway, puis le métro. En termes de potentiel, c'est la classification inverse qui est obtenue. En effet, le réseau de métro à Paris est très bien établi et couvre assez bien toutes les parties de la ville (213 km de ligne et 300 stations). De plus, il a la plus grande capacité de transport et ne subit pas les perturbations de la route. Le tramway présente un compromis intéressant.

- **Etude 2 :** Faisabilité de l'intégration logistique des espaces de transport (PREDIT GO n°3, 2012)

  Cette seconde étude a analysé le potentiel d'intégration de l'activité logistique, lié au transport de marchandises, à travers le réseau de transport de voyageurs par rail et ses infrastructures.

  D'abord, la RATP ne dispose pas de l'expérience opérationnelle nécessaire à la mise en œuvre du transport de marchandises, sur son réseau de transport de voyageurs. Néanmoins, elle présente plusieurs atouts :

  - Ses espaces (gares et stations).
  - Ses flux de voyageurs (plusieurs millions par jour).
  - L'exploitation d'un réseau ferroviaire constitué de plusieurs centaines de kilomètres (tous les modes confondus).

  Cette étude s'est basée sur l'analyse : 1- du réseau de la RATP, 2- des types de produits pouvant prétendre au transport sur ce réseau, 3- leur conditionnement, 4- les

clients potentiels de ce service, 5- les flux voyageurs et marchandises, 6- les modes de transport aval et amont, ainsi que 7- les moments (horaires) propices de la journée.
Cette analyse s'est déroulée dans le cadre d'une démarche structurée en trois étapes successives :

- La définition des critères pertinents, pour savoir si un espace RATP est apte à accueillir des marchandises. Ceci à travers la définition d'une grille d'analyse multicritère applicable à tous les espaces RATP (ce qui est appelé « Offre »). La grille multicritère est composée de :

  1- Généralités sur les espaces (stations et gares), telles que la localisation, les numéros des lignes les desservant, la complexité de l'espace, etc.
  2- Accessibilité de l'espace, telle que les dénivelés, le nombre de parcours, la présence d'escaliers, etc.
  3- La surface des espaces et leurs dimensions, telle que pour les quais, couloirs, entrées / sorties, salles diverses, etc.
  4- Les équipements de l'opérateur, tels que les guichets, les comptoirs d'information, etc.
  5- Les paramètres relatifs aux flux de voyageurs, tels que le nombre total annuel d'entrants, le nombre journalier en hiver, l'heure la plus chargée du matin, le nombre de voyageurs correspondants à l'heure la plus chargée du matin, l'heure la plus chargée du soir, le nombre de voyageurs correspondant à l'heure la plus chargée du soir, etc.

- Ensuite, l'analyse a porté sur l'étude des caractéristiques de l'environnement commercial de chaque station (ce qui est appelé « Demande »). Pour cela, une évaluation de la densité de commerces à proximité des différentes stations / gares (à 100 m, 200 m et 400 m) a été réalisé. Il en est sorti l'identification des stations / gares, avec le plus de commerces à proximité.
- La dernière étape a consisté en l'agrégation des caractéristiques intrinsèques des stations et les caractéristiques de leur environnement (ce qui est appelé « Confrontation Offre et Demande »). Ceci a permis l'identification des stations / gares, avec une demande commerciale importante et une offre logistique satisfaisante.

Cette étude a montré qu'il y avait un potentiel d'offre logistique de la part de la RATP, en exploitant ses différentes ressources, pour répondre à une demande de service logistique concrète. Toutefois, un ensemble de conditions doivent être préalablement satisfaites (telles que celles énoncées par l'étude 1). Plusieurs services logistiques ont été étudiés et à l'heure des conclusions de cette étude, seul le service de déploiement de consignes des colis pour les particuliers, a été retenu. Il est spécifié que les autres services requièrent des études complémentaires.

- **Etude 3 :** Transport collectif urbain : surcoûts consécutifs à l'ajout logistique dans un projet (PREDIT GO n°6, 2012)

En raison des données stratégiques traitées par cette étude, il n'y a pas de version publique de cette dernière. Cependant, sa fiche récapitulative, nous permet de saisir ses grandes orientations.
D'abord, cette étude s'est articulée autour de quatre points majeurs, à savoir :

- La définition fonctionnelle du système, dans le but de vérifier sa faisabilité technique.
- Le développement d'une approche urbanistique, dans le but d'appréhender le système dans le territoire concerné (Ile-de-France).
- L'évaluation des potentiels commerciaux à l'horizon du projet.
- Une application de la solution de transport définie, sur la ligne verte du projet « Grand Paris Express ».

Pour les besoins de l'étude, il a été considéré la mixité fret / voyageurs dans un métro automatique (type ligne 1 ou 14 du métro parisien). Aussi, les marchandises sont conteneurisées dans des unités logistiques standardisées. Ainsi, trois modes d'exploitation ont été proposées et étudiées (3 scénarios) :

- Insertion intercalaire, à gare en débranchement : dans ce cas, la ligne est commune, mais le chargement et le déchargement se font dans des stations dédiées, en marge de la ligne.
- Circulation en remorque d'une rame, au métro de voyageurs : dans ce cas, il s'agit d'ajouter des wagons pour le transport de marchandises, au train de transport de voyageurs.
- Insertion intercalaire, à gare en ligne : dans ce cas, il s'agit d'intercaler entre les trains de transport de voyageurs, des trains de transport de marchandises. Les marchandises sont chargées et déchargées dans des stations sans débranchement.

Une évaluation du potentiel commercial, à l'image de celui réalisé par l'étude 2, mais pour des zones urbaines plus étendues, a été réalisée. Elle a permis d'identifier les secteurs de la grande distribution et de la messagerie, comme porteurs d'un grand potentiel, en termes d'utilisation de la solution logistique étudiée. En effet, ces secteurs répondent positivement à trois groupes de conditions, identifiées préalablement comme nécessaires à toute mise en œuvre, d'une solution logistique basée sur la mixité fret / voyageurs :

- Conditions fonctionnelles : l'utilisation d'infrastructures ferroviaires impose qu'un plan de transport soit établi à l'avance. Contrairement au mode routier, il n'est pas envisageable de déclencher le transport, dès que le besoin est exprimé. La demande doit être quantifiée avec une traduction dans le temps et l'espace.
- Conditions commerciales : il est nécessaire d'assurer la compétitivité de la solution proposée. Ainsi, ses coûts doivent être du même ordre que l'existant (report modal toléré à coût identique). La régularité des acheminements doit être garantie, ce qui suppose une fiabilité du système proposé proche de 100%.

- Conditions logistiques : l'organisation proposée doit s'intégrer dans la chaine logistique globale. Le passage par une plateforme amont est indispensable pour assurer la continuité fonctionnelle et administrative.

Enfin, l'étude a été conclue par une application des concepts développés, à une partie d'une ligne du futur « Grand Paris Express ». Une étude de la demande potentielle sur le tracé de la ligne a été réalisée, puis, un placement des stations de marchandises a été proposé, ainsi que des aménagements spécifiques sur la ligne. Cependant, l'évaluation économique du surcoût d'intégration de la composante « marchandises », à un projet de transport de voyageurs, n'a pas abouti. En effet, il est conclu que plusieurs outils doivent être développés (tels que des outils mathématiques), dans le but d'effectuer correctement l'évaluation des coûts de déplacement des marchandises et les surcoûts d'intégration du nouveau service. Ceci requiert plus de ressources techniques et temporelles, dont cette étude ne disposait pas.
Nous retenons de cette étude, la faisabilité technique dans différentes situations, ainsi que le potentiel commercial et les secteurs cibles les plus prometteurs.

Ces trois études, ont permis de répondre à la question de la faisabilité de la mutualisation du réseau urbain de transport de voyageurs, pour le transport de marchandises. Leur conclusion est que cela est faisable et que cela a dépassé le stade du concept, au vu des expérimentations déjà réalisées, ou en cours d'exploitation. Nous pouvons considérer que le présent travail de recherche, s'inscrit dans la continuité des conclusions portées par les trois études du PREDIT. Ainsi, après avoir conclu à la faisabilité, notre présente problématique tentera de répondre à comment déployer et intégrer, une telle solution de transport ? et comment gérer au niveau opérationnel le nouveau flux de marchandises, sur le réseau de transport de voyageurs ?

2.3. Mixité fret / voyageurs : expérimentations et solutions en cours d'exploitation

Avant de répondre aux questions précédentes, nous allons voir dans ce point quelques expérimentations sur le terrain, passées ou en cours d'exploitation. Ces expérimentations nous confirment que la faisabilité a dépassé le cadre du concept. Parmi ces expérimentations :

- **CarGoTram à Dresde** (Quak, 2008)
  Il s'agit de la mutualisation d'une portion de presque 4 km, de la ligne de tramway à Dresde. Cette dernière est utilisée pour acheminer des pièces et des modules automobiles, du dépôt de « Volkswagen » situé à proximité du terminal ferroviaire de la ville, jusqu'à l'usine qui se situe en centre-ville. Cette usine historique du constructeur ne dispose pas d'une zone de stockage assez importante, pour assurer la production journalière, et ne peut être étendue par manque de surface foncière en centre-ville.
  Cette ligne est desservie par des tramways dédiés au fret (comme l'exemple montré dans la Figure II.4), qui assurent 10 livraisons par jour. Ainsi, depuis 2001, cette solution de transport assure la livraison de 300 000 tonnes par an de produits, ce qui permet de réduire grandement le nombre de camions en circulation dans la ville et, par conséquent, les émissions de polluants.

- **Cargo-Tram à Zurich** (Runge & Becker, 2008) **et** (Moglestue, 2011)
  Un premier Cargo-Tram a été exploité à Zurich jusqu'à 1966, pour le transport des courriers et colis, lait et autres boissons, ainsi que d'autres types de marchandises. Puis en 2003, une nouvelle expérience a été initiée et qui est toujours en cours d'exploitation. Cette dernière consiste en le transport des déchets volumineux (type : meubles, électroménagers…), dans le but de lutter contre les dépôts sauvages de déchets de ce genre, qui représentaient 300 tonnes / an.
  Cette solution de transport des déchets coûte 20 000€ de moins, que la solution équivalente par la route. Ceci est lié à la réutilisation de vielles rames de tramway (comme le montre la Figure II.4). Les passages du Cargo-Tram se font quotidiennement, ce qui permet de couvrir la quasi-totalité du réseau de tramway de la ville de Zurich. Un embranchement avec un terminal de recyclage a été réalisé. Cette alternative a permis la réduction du nombre de camions en ville, plusieurs milliers de kilomètres par la route en moins, avec les conséquences de réduction des émissions de polluants.
- **Approvisionnement chez MONOPRIX à Paris** (Dablanc, 2009) **et** (MONOPRIX, 2007)
  Il s'agit de l'utilisation de la voie ferroviaire de la ligne D du RER à Paris, pour le transport d'un certain nombre de marchandises (boissons sans alcool, textile, produits de beauté et produits pour la maison et le loisir). Une gare dédiée à MONOPRIX située à Bercy, est approvisionnée à partir de dépôts situés à Combs-la-Ville et Lieusaint, en périphérie de Paris. Par la suite, l'acheminement des produits jusqu'aux magasins, s'effectue par des camions roulant au GNV, pour respecter le principe de réduction des émissions sur cette ligne logistique. La Figure II.4 montre le train de fret qui entre dans le terminal de Bercy.
  La ligne fait 30 km, elle permet de transporter 210 000 palettes par an (équivalent à 120 000 tonnes), avec 5 trains de 20 wagons par semaine.
  Ce report modal a permis des gains environnementaux substantiels, à savoir, 12 000 camions n'entrent plus à Paris, économisant ainsi 337 tonnes de CO_2 par an. En plus de la circulation qu'ils auraient contribué à amplifier, ainsi que tous les désagréments qu'engendre la circulation de poids lourds en ville.
  Cette solution de transport a été exploitée de fin 2007 jusqu'à fin 2016. Elle a été substituée par des camions GNV, dans le but de réduire les émissions de polluants, car le train utilisé précédemment roulait au carburant diesel (les voies ferroviaires allant de la ligne D du RER jusqu'aux entrepôts de MONOPRIX n'étant pas dépourvues d'alimentation électrique). Cependant, cette nouvelle alternative, va remettre sur la route plusieurs milliers de camions par an, ce qui ne manquera pas d'accroitre la congestion de la voirie urbaine.
- **Collecte des déchets dans le métro de New York** (MTA, 2014)
  Il s'agit de la collecte des déchets récoltés dans toutes les stations de métro de New York, par des métros dédiés. La collecte s'effectue la nuit, et comme le métro de New York circule 24h/24h, il s'agit de mixité, entre le transport de fret (déchets dans ce cas) et le transport de voyageurs.

Cette solution permet la collecte de 14 000 tonnes de déchets par an, avec 11 métros dédiés, couvrant 359 stations et totalisant 567 arrêts.



CarGoTram à Dresde



Cargo-Tram à Zurich



Collecte des ordures - métro de New York



Train et entrepôt de MONOPRIX

Figure II.4 : Photos de différentes expérimentations de fret urbain par rail

3. Conception d'un modèle de transport mixte fret / voyageurs dans le réseau ferroviaire urbain

Nous avons développé un modèle de transport mixte fret / voyageurs, en prenant comme support technique, le réseau ferroviaire urbain de la région Ile-de-France et en nous basant sur :

- La revue de littérature précédente.
- Les trois études du PREDIT.
- Des discussions avec des experts du ferroviaire.
- Des observations sur le terrain du réseau parisien.

Dans un premier temps, cela nous permet de proposer une définition du transport mixte fret / voyageurs, sur le réseau ferroviaire de transport de voyageurs en milieu urbain, comme suit :

- Quand on parle de milieu urbain, on entend la ville à l'intérieur de ses limites, ainsi que sa banlieue et les agglomérations limitrophes. A titre d'exemple, la région Ile-de-France, constituée de la commune de Paris au centre et de plusieurs agglomérations limitrophes.
- Quand on parle de réseau ferroviaire en milieu urbain, on entend les différents modes de transport sur rail. En effet, dans une ville, on peut trouver le métro, le tramway, ainsi que le train de banlieue qui traverse la ville et dessert les agglomérations limitrophes.

- Le réseau ferroviaire de transport de voyageurs est constitué de plusieurs composantes. Quand on parle de mixité fret / voyageurs, on entend le partage d'au moins une composante, pour le transport de marchandises.

L'intérêt porté au réseau ferroviaire de la région Ile-de-France, se justifie par l'importance de ce dernier. En effet, il est composé de trois modes ferroviaires différents et complémentaires, de plus, il s'étend sur près de 1 000 km de voies ferroviaires. La Figure II.5 montre l'étendue du réseau ferroviaire dans toute la région d'Ile-de-France. Nous remarquons que le réseau de métro se concentre au centre de la région, principalement à Paris intramuros, avec quelques extensions au-delà. Le tramway est interconnecté à certaines de ces extensions et est déployé à la périphérie de Paris. Quant au réseau de RER (train de banlieue), il couvre toute la région, avec des interconnexions aux deux autres modes précédents. A noter que certaines lignes de RER disposent de connections au réseau ferroviaire national (i.e. au réseau de trains de passagers et de fret).

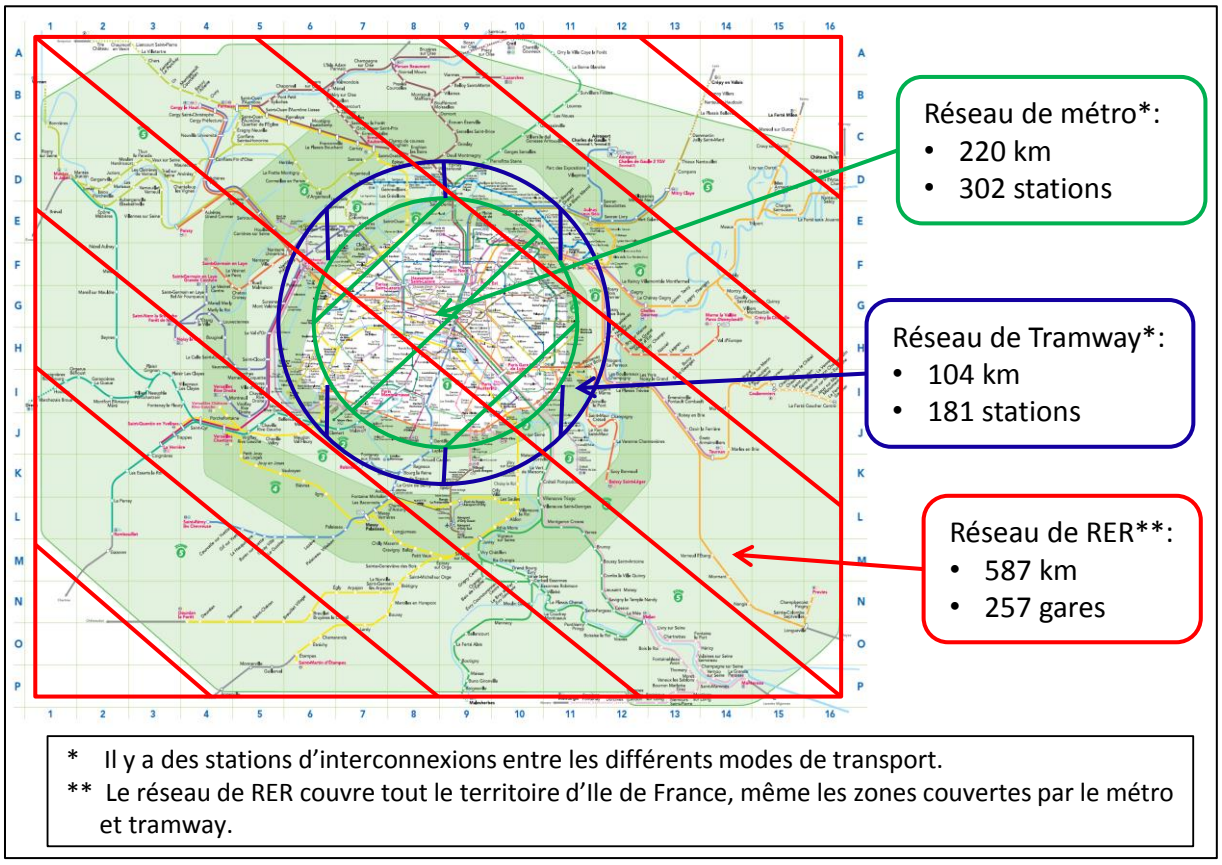


Figure II.5 : Réseau ferroviaire en Ile-de-France

Ce réseau est appelé à s'étendre dans les prochaines années, dans le cadre du projet « Grand Paris Express ». Il s'agit de 4 nouvelles lignes de métro automatisées, sur une distance de 200 km et comportant 68 nouvelles stations. Ces lignes formeront une boucle reliant les différentes régions d'Ile-de-France autour de la ville de Paris, avec des interconnexions aux anciennes lignes. Ce projet présente une opportunité supplémentaire, d'intégration de nouveaux services dès la réalisation, telle que la mixité fret / voyageurs.

Dans le point suivant, nous allons identifier les différentes composantes d'un réseau ferroviaire en milieu urbain.

3.1. Composantes du réseau ferroviaire urbain de transport de voyageurs

Comme présenté précédemment, il peut y avoir jusqu'à trois modes ferroviaires pour le transport de voyageurs, en milieu urbain. Ces différents modes s'appuient sur trois composantes, dont les rôles et fonctionnement sont analogues, seule l'échelle de la composante et son utilisation diffèrent d'un mode à un autre. En effet, on compte trois composantes principales comme suit :

- Les stations (ou gares) : la taille des stations varie selon le mode utilisé. Ainsi, les stations de tramway sont les plus petites, puis celles dédiées au métro, enfin, celles pour le train de banlieue. Trois formes de stations sont à recenser, comme le montre la Figure II.6, à savoir :

  - les stations aériennes : on les trouve particulièrement dans les réseaux de métro, en ce qui concerne le train de banlieue, dans certaines zones seulement. Pour le tramway, très rarement lorsqu'il n'y a pas assez d'espace au niveau de la chaussée.
  - Les stations au niveau de la chaussée : on les trouve particulièrement dans les réseaux de tramway. En ce qui concerne le train de banlieue, elles sont plus présentes dans les agglomérations peu denses, avec assez d'espace. Pour le métro, très rarement.



Figure II.6 : Les trois formes de stations ferroviaires en milieu urbain

  - Les stations souterraines : comme le métro est généralement déployé dans des villes existantes très denses, ce type de stations est le plus fréquent, puisqu'il n'interfère pas avec l'existant. Cependant, c'est le type de station dont le coût de réalisation est le plus élevé. En ce qui concerne le train de banlieue, lorsqu'il

traverse les centres urbains (telle que la ville de Paris), les stations sont de ce type. Enfin, on trouve très rarement des stations de ce type, tout au long des réseaux de tramway (en raison de l'incompatibilité du coût de ce genre d'infrastructure avec le moyen de transport qu'est le tramway).

- Les voies ferrées : ce qui donne son nom à ces trois modes de transport, c'est leur spécificité à rouler sur une voie ferrée dédiée (dites en site propre, parce que exclusivement dédiée au mode de transport en question). Même schéma que pour les stations, on compte trois situations possibles (illustrées par la Figure II.7) :

  - Voies aériennes : ce type de voies est principalement utilisé pour les lignes de métro (tel que la ligne 6 à Paris, une partie du réseau de New York et de Chicago…). Plus rarement, on le trouve ponctuellement dans les deux autres modes, pour passer un obstacle (tel qu'un fleuve ou une grande rue).
  - Voies au niveau de la chaussée : le réseau de tramway est quasi-exclusivement constitué de ce type de voies. Les moins coûteuses à mettre en œuvre, elles ne nécessitent aucune infrastructure supplémentaire (hormis les voies elles-mêmes). Dans plusieurs villes, où la voierie n'est pas assez large dans certaines parties de la ville, le tramway partage son chemin avec les voitures. Pour le métro, ce type de voies est très peu utilisé. Quant au train de banlieue, en général les voies entres les agglomérations voisines, se trouvent au niveau de la chaussée. Cependant, ces dernières se trouvent derrière une clôture.



Figure II.7 : Illustration des implantations possibles de voies ferrées

  - Voies souterraines : c'est le type de voies qui coûte le plus cher, en raison de la nécessité de creuser un tunnel. Ces voies sont principalement déployées dans les centres urbains (très) denses pour les réseaux de métro, ainsi que, pour permettre aux trains de banlieue de traverser la ville. Pour le tramway, on

compte très peu de voies de ce type (exceptionnellement dans des cas d'évitements, où il n'est pas possible de procéder autrement, et sur de courtes distances).

- Le matériel roulant ferroviaire (trains) : il s'agit de tous les véhicules qui roulent sur une voie ferrée. Dans le cas des trois modes de transport précédents, on compte trois types de matériels roulants (d'ailleurs, qui partagent le nom du mode en question). Tous ces véhicules roulent à l'énergie électrique. La Figure II.8 montre un exemple de chacun de ces trois modes comme suit :

  - Tramway : les véhicules du tramway sont les plus petits parmi les trois modes et ceux qui ont la plus faible vitesse de circulation. Les différentes caractéristiques techniques de ces véhicules, varient d'une ville à une autre et selon la génération du véhicule. Toutefois, pour apprécier ces caractéristiques, un exemple à partir d'une ligne de tramway en région Ile-de-France, comme suit : longueur : 30 m, largeur : 2,3 m, hauteur : 3,36 m, capacité maximum : 180 passagers et vitesse variant de 18 à 25 km/h.
  - Métro : les véhicules de métro sont assez variables, d'une ville à l'autre, voire d'une ligne à l'autre. On peut trouver des véhicules automatisés, semi-automatisés ou avec conducteur. Leur longueur varie en nombre de wagons. Puis, on trouve des métros sur pneumatiques ou bien, plus classiques, avec des roues en aciers. A titre d'exemple, l'un des métros parisiens est caractérisé par : longueur : 90 m, largeur : 2,5 m, hauteur : 3,5 m, hauteur intérieur : 2,14 m, hauteur porte : 1,9 m, largeur porte : 1,65 m, capacité maximum : 976 passagers et vitesse maximum : 80 km/h.

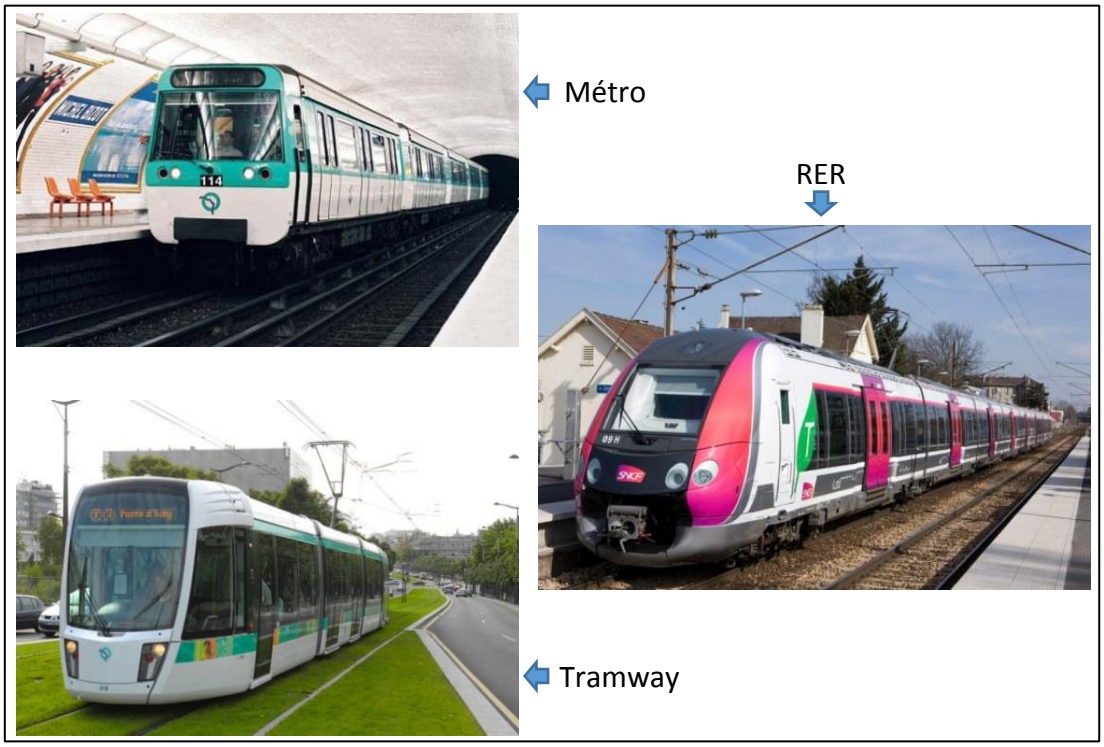


Figure II.8 : Exemple de matériels roulant de chacun des modes de transport en région Ile-de-France

- Train de banlieue : les trains de banlieue sont assez grands, avec de grandes capacités de charge. Ils varient suivant les destinations desservies. Ainsi, on trouve des trains à double étage, des trains courts et des trains longs. Aussi, suivant les lignes empruntées, la vitesse peut varier énormément. A titre d'exemple, l'un des trains utilisé pour la ligne A du RER (en Ile-de-France) : longueur : 112 m, largeur : 2,9 m, hauteur : 4,32 m, largeur porte : 2 m, capacité maximum : 2 600 passagers et vitesse maximum : 120 km/h.

3.2. Identification des cas de mixité possibles

Dans les points précédents, nous avons montré que les modes de transport ferroviaire de voyageurs en milieu urbain, partagent une plateforme technique identique, basée sur trois composantes principales. Aussi, nous avons relevé que chacun de ces trois modes de transport, s'implémente à une échelle différente et a des particularités qui auront forcément un impact, dans le cadre de l'intégration du nouveau service de transport de marchandises. Parmi ces particularités :

- La taille et la capacité de l'infrastructure.
- La capacité de chargement du matériel roulant.
- L'accessibilité aux stations et au matériel roulant.
- La couverture de la ville par le mode de transport concerné.

Pour un même mode de transport, ces éléments peuvent varier d'une ligne à une autre et d'une ville à une autre. Ceci implique leur considération dans le cadre d'études techniques de faisabilité, contextualisée au cas spécifique étudié. Dans le cadre de ce travail, l'objectif est de proposer une démarche méthodologique, pour l'intégration du flux de marchandises, à un mode de transport ferroviaire en milieu urbain, dans la perspective de proposer un nouveau service de transport de marchandises. Ceci implique de se limiter aux éléments communs de tels modes de transport.

Comme mentionné précédemment, la mixité fret / voyageurs signifie le partage d'au moins l'une des trois composantes précédentes. Une quatrième composante est à prendre en considération lors de l'étude de la mixité, il s'agit du moment auquel les marchandises sont transportées (i.e. les heures d'exploitation du service de fret). Nous avons étudié les différentes possibilités et avons identifié plusieurs cas de mixité possibles (en comptant les différentes combinaisons, il y a 19 cas de mixité possibles). La Figure II.9 montre ces différents cas.

3.2.1. *Mixité totale*

Cette possibilité est encadrée en rouge sur la Figure II.9. Elle considère le partage de toutes les composantes identifiées précédemment, à savoir : le matériel roulant, les voies ferrées et les stations. Par conséquent, les horaires d'exploitation doivent impérativement être partagées. En effet, comme on retrouvera dans le même train, les marchandises et les voyageurs simultanément, le service de transport de marchandises doit s'effectuer durant les heures de service du transport de voyageurs.

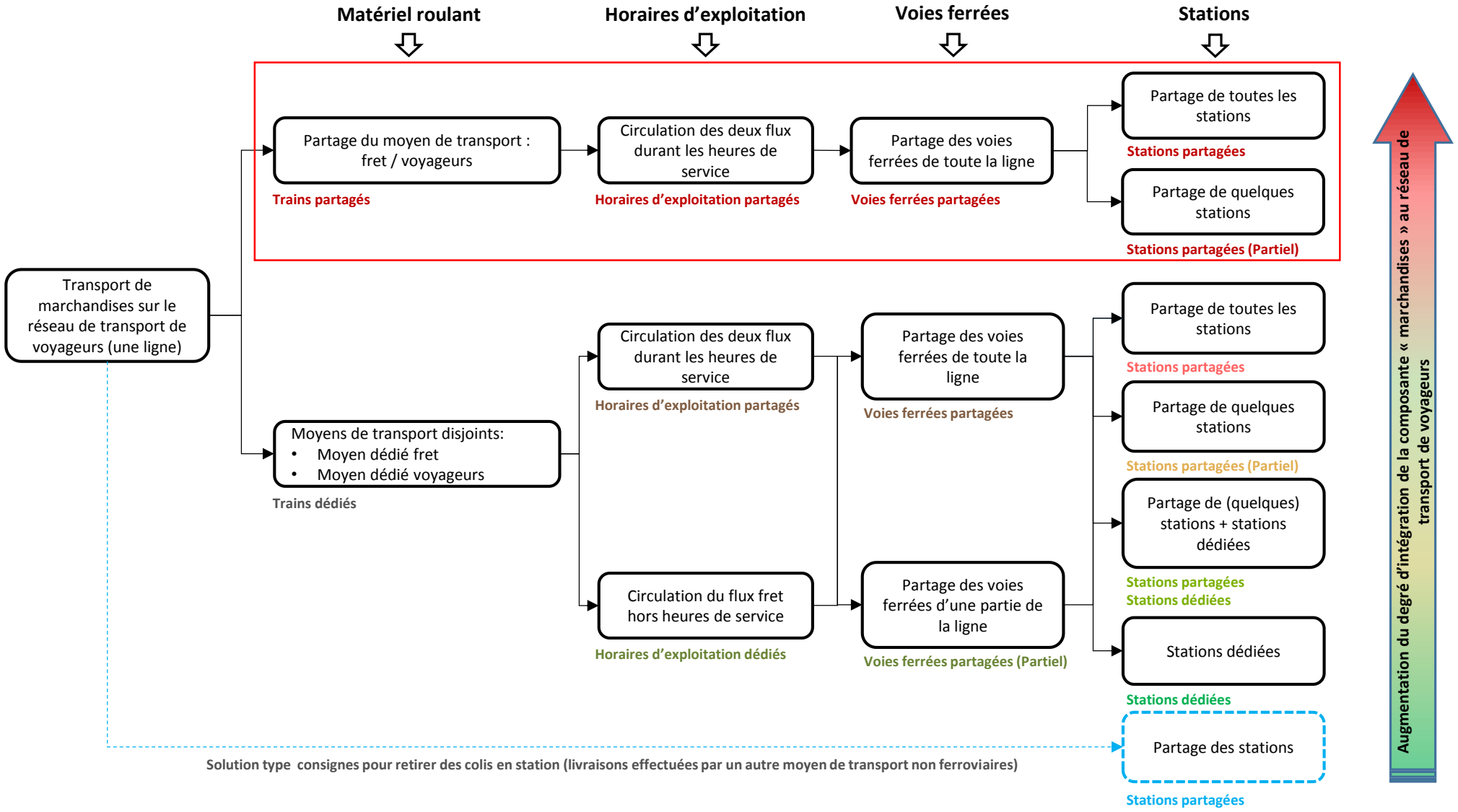


Figure II.9 : Les niveaux de mutualisation des différentes ressources du système de transport ferroviaire pour une mixité fret / voyageurs

Ce cas de mixité est le plus complexe ayant été identifié, en raison du nombre de contraintes liées au service de transport de voyageurs que le service de transport de marchandises doit respecter. On retrouve aussi bien des contraintes techniques, qu'organisationnelles et juridiques, telles que :

- La limitation de l'espace réservé aux marchandises dans le train de voyageurs. Au maximum, cet espace ne doit pas impacter le confort lié à l'espace occupé par les voyageurs, en se basant sur l'estimation de l'occupation maximum du train par les voyageurs, durant les horaires d'exploitation du train avec la configuration adoptée.
- La limitation des temps d'attente des trains dans les stations, avec un temps d'arrêt minimum, pour permettre aux voyageurs de monter et descendre, ainsi qu'un temps d'arrêt maximum, pour ne pas dégrader la qualité de service du transport de voyageurs (i.e. exaspération des voyageurs par des temps d'arrêt incompatibles, avec le service de transport de voyageurs en milieu urbain).
- La limitation de l'espace occupé par les marchandises sur les quais de la station, pour ne pas impacter le service de transport de voyageurs. Aussi, pour ne pas mettre en danger les voyageurs, par les opérations de manutention.
- La nécessité de se synchroniser avec les horaires des trains et leur capacité actuelle, sans pouvoir les adapter pour s'ajuster à la demande de transport de marchandises.
- Faire collaborer un personnel dédié aux voyageurs et un autre, dédié aux marchandises, sur les mêmes équipements et infrastructures (i.e. nécessité de coordination accrue).

A savoir, une limitation juridique très forte existe actuellement (comme cité précédemment), qui concerne l'impossibilité pour le transporteur public de voyageurs d'effectuer le service de transport de marchandises et de faire circuler les deux flux, fret et voyageurs simultanément. Cependant, la première étude du PREDIT avait conclu que bien que cette limitation soit très forte, il est possible de l'abroger, si toutefois, d'autres conditions sont réunies.

Pour ce cas de mixité, nous proposons d'avoir des trains avec des wagons dédiés aux marchandises, séparés des wagons dédiés aux voyageurs (i.e. une séparation physique entre les deux). Le(s) wagon(s) dédiés aux marchandises est (seront) placé(s) à l'arrière du train). Aussi, une petite zone de stockage clôturée sur le quai de la station, pour y mettre les marchandises à transporter temporairement. La Figure II.10 montre une modélisation du système proposé, avec un wagon dédié aux marchandises (où les sièges et équipements pour les voyageurs sont supprimés) et les autres wagons standard dédiés aux voyageurs. La Figure II.10 montre aussi un petit espace pour 6 colis sur le quai.

A noter qu'on peut avoir deux possibilités de mixité dans ce cas :

- Toutes les stations de voyageurs seront équipées et utilisées pour assurer le service de transport de marchandises.
- Quelques stations seulement, choisies de manière stratégique (ce dernier cas est le plus probable).

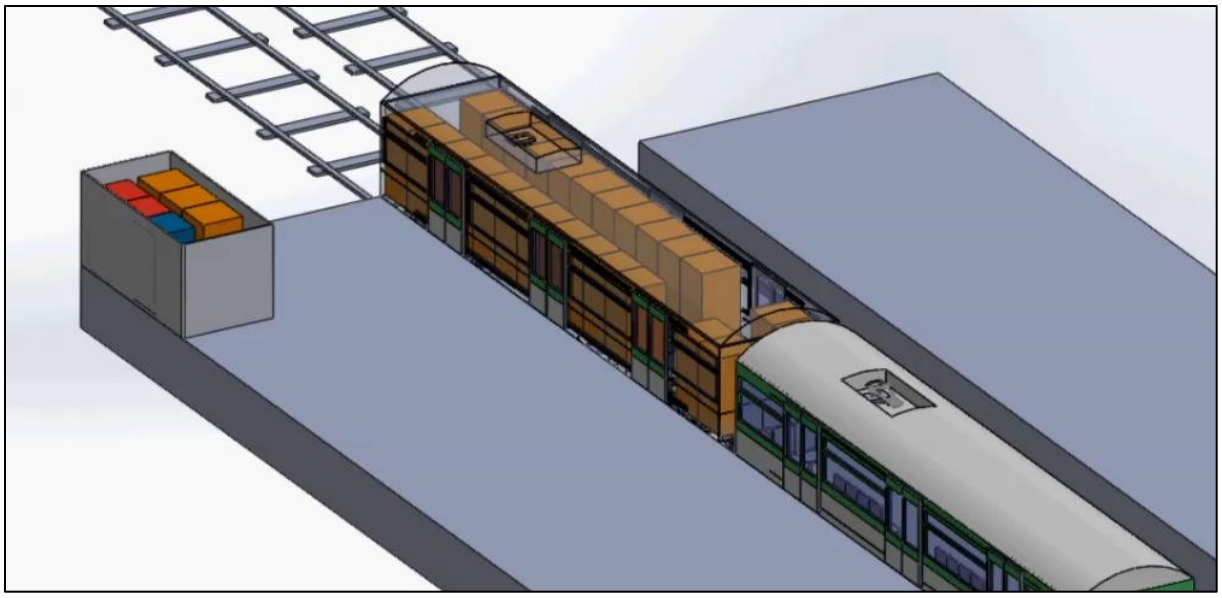


Figure II.10 : Illustration du cas de mixité totale

3.2.2. *Mixité partielle*

La mixité partielle concerne les 16 possibilités de mixité, où les trains de marchandises sont séparés physiquement des trains de voyageurs (i.e. trains dédiés pour chaque type de flux). Dans ce cas, l'activité de transport de marchandises est effectuée, soit durant les horaires d'exploitation du service de transport de voyageurs, soit hors de ces horaires. Si toutefois, le service de transport de voyageurs s'arrête durant un moment de la journée (la nuit par exemple).

Une 17ème possibilité de mixité est donnée par le cas où des espaces liés à l'activité de transport de marchandises, sont implantées dans les stations ferroviaires.

Partage des horaires d'exploitation : il s'agit de la circulation des trains dédiés aux voyageurs et des trains dédiés aux marchandises, au même moment. Nous avons identifié 4 cas de partage des stations, pour chacun 2 possibilités de partage des voies ferrées :

- **Partage de toutes les stations de voyageurs / partage des voies ferrée de toute (ou partie de) la ligne**

  Dans ce cas, les trains de marchandises s'arrêtent dans toutes les stations de voyageurs, par lesquelles ils passent (sur toute ou partie de la ligne). Ils ont la possibilité d'effectuer le chargement / déchargement de marchandises, dans chacune des stations. Le problème principal dans ce cas est l'introduction des trains de marchandises, dans le planning de circulation des trains de voyageurs, pour effectuer le transport de marchandises sans perturber le service de transport de voyageurs. Une attention particulière dans ce cas, doit être portée sur :

  1- La réduction des temps de chargement / déchargement des marchandises.
  2- La synchronisation de la vitesse de circulation des trains dédiés aux marchandises et ceux dédiés aux voyageurs.

3- La sécurisation de l'espace sur le quai dédié au chargement / déchargement des marchandises, pour éviter les risques d'accidents avec les voyageurs.

Ce cas traduit l'exploitation en cours de la collecte des déchets à travers le métro de New York (présentée dans la section 2.3.).

- **Partage de quelques stations de voyageurs / partage des voies ferrées de toute (ou partie de) la ligne**

  Dans ce cas, les trains de marchandises ne s'arrêtent pas à toutes les stations de voyageurs. Ainsi, il n'y a que les stations stratégiques qui sont concernées par l'activité de fret (i.e. celles où il y a une demande de transport potentielle conséquente, mais aussi, assez d'espace pour réceptionner et effectuer la manutention des marchandises). Cependant, comme les trains de marchandises circulent sur les mêmes voies que les trains de voyageurs, qui marquent un arrêt à toutes les stations, la problématique majeure (en plus de tout ce qui a été identifié dans le cas précèdent) est l'ajustement de la vitesse des trains de marchandises, pour ne pas perturber la circulation des trains de voyageurs.

- **Partage de (quelques) stations de voyageurs + stations dédiées de marchandises / partage des voies ferrées de toute (ou partie de) la ligne**

  Ce cas introduit une composante supplémentaire par rapport au cas précédent. Il s'agit de stations exclusivement dédiées aux marchandises. Ces stations peuvent être d'anciennes stations de voyageurs désaffectées (appelées stations fantômes), d'anciennes plateformes techniques. Elles peuvent aussi être de nouvelles stations construites spécifiquement pour la nouvelle activité, et ayant été localisées stratégiquement, pour répondre à une demande conséquente et pérenne. Dans tous ces cas, les stations dédiées peuvent se trouver, soit sur la ligne (i.e. le long de la voie ferrée empruntée par les trains de voyageurs), soit en débranchement (i.e. au bout d'une voie interconnectée à la voie ferrée utilisée par les trains de voyageurs, mais qui n'est utilisée que par les trains de marchandises, dans le but de rejoindre la station dédiée).

  Dans ce cas, les stations dédiées au transport de marchandises comportent moins de contraintes que les stations de voyageurs (particulièrement, les mesures de sécurité). Aussi, la notion de station en débranchement relaxe une problématique liée au temps de chargement / déchargement. D'autre part, elle introduit une nouvelle problématique quant à l'introduction et la sortie des trains de marchandises, sur la ligne de voyageurs sans perturber le service de transport de voyageurs.

  En ce qui concerne les stations de voyageurs utilisées pour l'activité de transport de marchandises, la situation reste inchangée en comparaison du cas précédent.

- **Stations dédiées de marchandises / partage des voies ferrées de toute (ou d'une partie de) la ligne**

  Ce cas se limite aux spécificités du cas précédent, en excluant l'utilisation des stations de voyageurs. Les stations dédiées pouvant se trouver le long de la voie ferrée empruntée par les trains de voyageurs, ou bien en débranchement.

Ce cas traduit l'exploitation durant 10 ans par MONOPRIX d'une portion de la ligne D du RER à Paris, pour approvisionner ses magasins. Aussi, le cas du Cargo-Tram de Zurich, ainsi que celui de Dresde. Ces trois cas sont présentés dans la section 2.3.

- **Horaires d'exploitation dédiées :** il s'agit de la circulation des trains dédiés aux marchandises, au moment où le service de transport de voyageurs est à l'arrêt. Cette situation n'est possible que si le service de transport de voyageurs, sur la ligne en question, s'arrête durant une période de la journée (en général, quelques heures durant la nuit).

  Cette solution requiert des conditions économiques spécifiques, pour être rentable. En effet, il s'agira d'exploiter les équipements et les infrastructures, ainsi que mobiliser du personnel, exclusivement pour assurer le service de transport de marchandises. Par conséquent, il faut que la demande de transport soit assez importante, pour couvrir les coûts d'exploitation et générer du profit. Dans ce cas, il y a une perte importante des avantages de la mixité, liée à la mutualisation des différentes composantes, dans le but de bénéficier des avantages de l'économie d'échelle. De plus, il faut noter que comme le service de transport aura lieu, durant des horaires non travaillés initialement (probablement la nuit), les coûts du personnel seront probablement majorés.

  Par ailleurs, cette situation présente un avantage d'exploitation indéniable, relatif à la relaxation de toutes les contraintes liées aux voyageurs et leur circulation sur le réseau.

  Pareil que pour les horaires d'exploitation communs, nous avons identifié 4 cas de partage des stations, pour chacun 2 possibilités de partage des voies ferrées :

  - **Partage de toutes les stations de voyageurs / partage des voies ferrées de toute (une partie de) la ligne**

    Dans ce cas, les trains dédiés au transport de marchandises utilise toutes les stations de voyageurs, comme plateformes de chargement / déchargements de marchandises. L'avantage relativement au même cas dans la situation de partage des horaires d'exploitation, est :

    1- Pas de limite de temps lors des arrêts dans les stations, lié aux trains de voyageurs.
    2- Pas de limite dans la vitesse de circulation, lié à la synchronisation avec les trains de voyageurs.
    3- Pas de sécurité supplémentaire, pour considérer les risques d'accidents avec les voyageurs sur les quais.

  - **Partage de quelques stations de voyageurs / partage des voies ferrées de toute (une partie de) la ligne**

    Ce cas est similaire au précédent, sauf que juste quelques stations de passagers sont utilisées pour le transport de marchandises (cas plus probable que le précèdent, puisque pour des raisons économiques, il ne sera pas utile d'équiper toutes les stations de passagers pour le transport de marchandises).
  - **Partage de (quelques) stations de voyageurs + stations dédiées de marchandises / partage des voies ferrées de toute (une partie de) la ligne**

Relativement à la situation de partage des horaires d'exploitation, ce même cas n'a pas de contraintes relatives à l'introduction et la sortie des trains de marchandises sur la ligne utilisée par les trains de voyageurs. Sinon ce cas présente des similitudes avec les cas précédents, bénéficiant de l'avantage de l'absence de voyageurs et de trains de voyageurs sur la ligne.

- **Stations dédiées de marchandises / partage des voies ferrées de toute (une partie de) la ligne**

  Ce cas est le plus simple parmi les 18 cas possibles, puisque aucune modification ne doit être apportée aux infrastructures dédiées aux voyageurs. Aussi, il n'y a aucune contrainte liée au service de transport de voyageurs étant donné qu'il est à l'arrêt.

- **Partage des espaces dans les stations**

  La station ou gare ferroviaire étant une composante à part entière du réseau de transport de voyageurs en milieu urbain, ce cas, en marge de tous les autres, doit être mentionné. En effet, il s'agit du partage de l'espace des stations ferroviaires, pour assurer un service, lié à l'activité de transport de marchandises en milieu urbain. Concrètement, ce service consiste à mettre en place des consignes pour livrer des colis aux utilisateurs du réseau ferroviaire, lors de leur passage par les stations. Ce service se substitue au service de points relais actuels, qui requiert pour les clients de faire des détours, parfois importants, pour récupérer leurs colis.

  L'avantage majeur de ce service, peut être perçu par l'importance du nombre de personnes qui traversent le réseau ferroviaire urbain chaque jour. En Ile-de-France, c'est plusieurs millions de voyageurs qui utilisent le réseau ferroviaire urbain (exemple : 1,5 milliards de voyages par an sur tout le réseau de métro et plus d'1 millions de voyageurs par jour, sur la ligne A du RER).

  A noter que ce service est en cours de déploiement dans plusieurs centaines de gares et stations ferroviaires en France et dans d'autres pays européens.

4. Problématiques décisionnelles liées à la mixité fret / voyageurs dans le réseau ferroviaire urbain

La réalisation et la mise en exploitation d'une solution de transport mixte fret / voyageurs, requiert d'apporter des réponses décisionnelles, de manière optimale si possible. En effet, la gestion des deux flux (i.e. marchandises et voyageurs) de manière indépendante, s'avère déjà être une tâche assez complexe. La fusion des deux flux, en mutualisant les équipements et les infrastructures augmente assurément cette complexité. De là, il est nécessaire d'identifier les problématiques décisionnelles portées par l'introduction du service de transport de marchandises, dans le réseau de transport de voyageurs, en milieu urbain.

4.1. Conception de la solution de transport étudiée

L'étude du réseau de transport de voyageurs, en considérant celui de la région Ile-de-France (Figure II.5), nous a permis de faire ressortir deux caractéristiques principales, à savoir :

- Chaque ligne du réseau est physiquement indépendante des autres lignes (i.e. chaque ligne dispose de ses propres voies ferrées, ses propres trains (métros, tramways ou trains de banlieue), ainsi que ses propres quais dans les stations.
- Les lignes des différents modes de transport (i.e. les trois cités précédemment) sont interconnectés entre eux de manière indirect, à travers des stations (ou gares) d'interconnexions, avec rupture de charge (i.e. dans la station d'interconnexion, il est nécessaire de quitter le moyen de transport de la première ligne, pour rejoindre celui de la seconde, en traversant un certain parcours entre les quais des deux lignes, à travers la station).

Ces deux caractéristiques nous permettent de schématiser un réseau ferroviaire en milieu urbain, comme le montre la Figure II.11 (on s'est restreint à deux modes de transport ferroviaire, chacun composé de deux lignes, pour ne pas alourdir le schéma). En effet, un réseau aussi complexe que celui de la région Ile-de-France, n'est rien d'autre qu'une reproduction des caractéristiques schématisées sur la Figure II.11, à l'échelle de trois modes de transport ferroviaire et plusieurs dizaines de lignes, tous les modes confondus. Le transport de marchandises à travers ce réseau, entre une « station de départ » et une « station d'arrivée », s'effectue suivant trois schémas possibles :

- En utilisant une seule ligne du réseau : les marchandises sont chargées dans un train de la ligne, transportées entre les deux stations (départ-arrivée) et déchargées dans leur station d'arrivée.
- En utilisant deux lignes (ou plus) du réseau, même mode de transport : les marchandises sont chargées dans un train de la ligne, transportées entre la station départ et la station de correspondance, déchargées et transférées à l'aide d'un moyen de manutention vers le quai du train de la seconde ligne de correspondance, puis chargées dans un train de cette seconde ligne, sachant que ce train, est du même mode que le premier : métro, tramway ou train de banlieue. Enfin, elles sont transportées entre les deux stations (correspondance-destination finale) et déchargées dans leur « station arrivée ».
- En utilisant deux lignes (ou plus) du réseau, plusieurs modes de transport : les marchandises sont chargées dans un train de la ligne, transportées entre la station de départ et la station de correspondance, déchargées et transférées à l'aide d'un moyen de manutention vers le quai du train de la seconde ligne de correspondance, puis chargées dans un train de cette seconde ligne (sachant que, ce train est d'un autre mode que le premier). Enfin, elles sont transportées entre les deux stations (correspondance-destination finale) et déchargées dans leur station d'arrivée.

Nous remarquons que les deux derniers schémas, suivent un même processus dans le cadre du transport de marchandises, à partir de la station de départ, jusqu'à sa livraison vers sa destination finale.

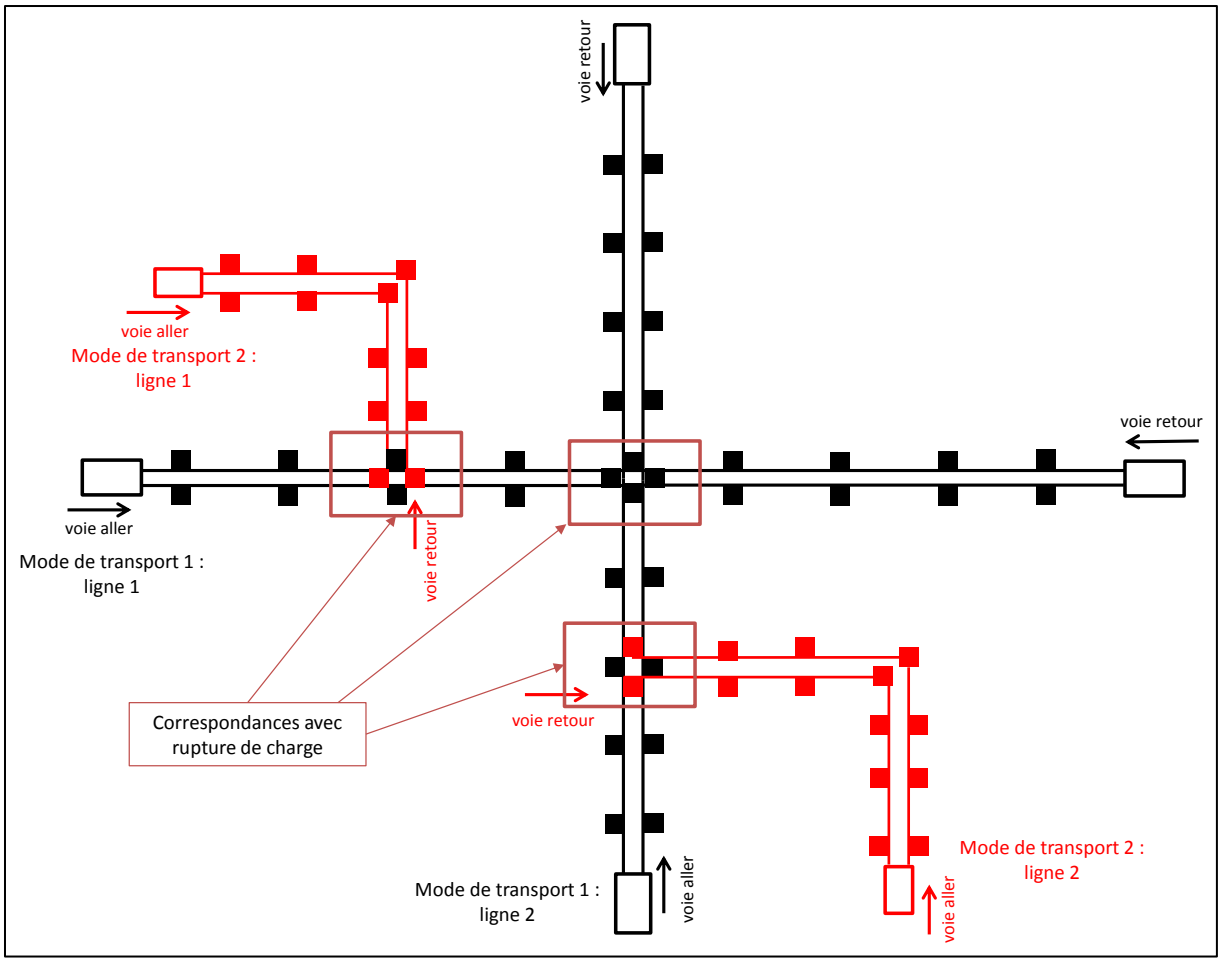


Figure II.11 : Schématisation d'un réseau de transport ferroviaire en milieu urbain

Un exemple hypothétique, de l'utilisation du réseau ferroviaire urbain pour livrer des marchandises entre deux points est donné par la Figure II.12. Cet exemple nous permet de constater que le transport à travers plusieurs lignes du réseau, se réduit à un processus répétitif, à chaque changement de ligne. Certes, un impact lié au transfert des marchandises, d'une ligne à une autre existe et pose une problématique décisionnelle. Cette dernière consistera à déterminer le moment idoine de ce transfert, pour ne pas déséquilibrer la charge de chaque ligne utilisée, tout en respectant au mieux les contraintes commerciales de livraison dans les temps, des différentes commandes en cours de livraison. Cependant, dans ce travail, on se focalisera sur le transport de marchandises sur une seule ligne. La motivation principale est liée au fait que c'est le problème à adresser en premier, si on souhaite montrer la faisabilité de cette mixité. Une seconde justification est liée au fait que le démarrage d'une telle perspective, a plus de chance de voir le jour dans cette version, pour éviter les ruptures de charge dans le système ferroviaire. Enfin, l'extension sera plus simple après l'étude du cas mono-ligne.

Ainsi, dans ce travail, nous allons nous limiter au cas composé d'une voie ferrée, tout au long de laquelle se trouvent plusieurs stations, où il est possible de procéder au chargement / déchargement des marchandises. Cette ligne est desservie par plusieurs trains de manière régulière.

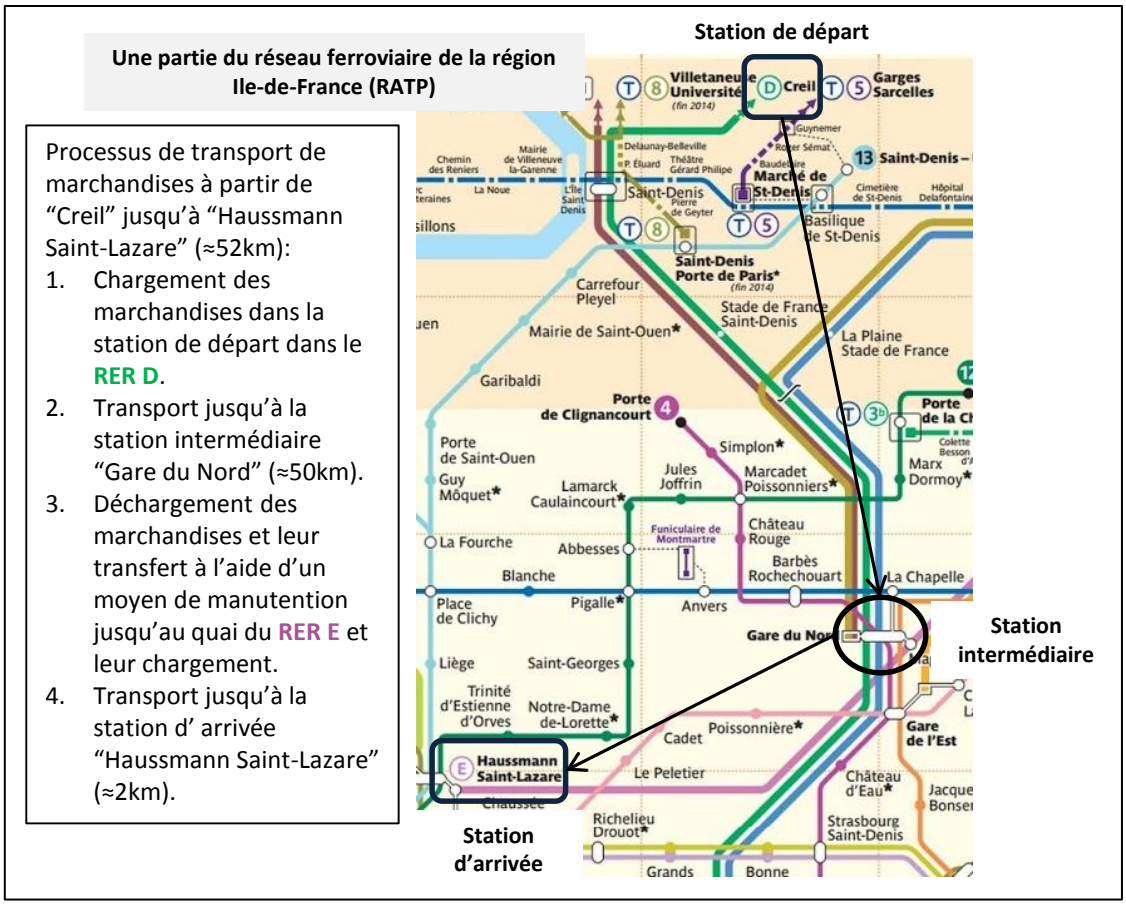


Figure II.12 : Illustration du processus de transport de marchandises à travers le réseau ferroviaire de la région Ile-de-France

4.2. Identification et description des problématiques décisionnelles

L'étude de la dynamique du transport de marchandises, à travers cette ligne, s'effectue en considérant le cas de mixité le plus complexe (encadré en rouge dans la Figure II.9). La schématisation de cette dynamique, à travers un zoom sur deux stations (départ-arrivée), est donnée par la Figure II.13.

Ce schéma nous montre les différentes problématiques posées par la mise en exploitation d'une telle solution de transport. En effet, nous avons identifié 9 problématiques aux trois niveaux décisionnels (i.e. stratégique, tactique et opérationnel). A savoir, cette liste n'est pas exhaustive, il peut être nécessaire de résoudre des problématiques supplémentaires, lors de l'étude de cas particuliers, voire, pour certains autres cas de mixité identifiés dans la Figure II.9.

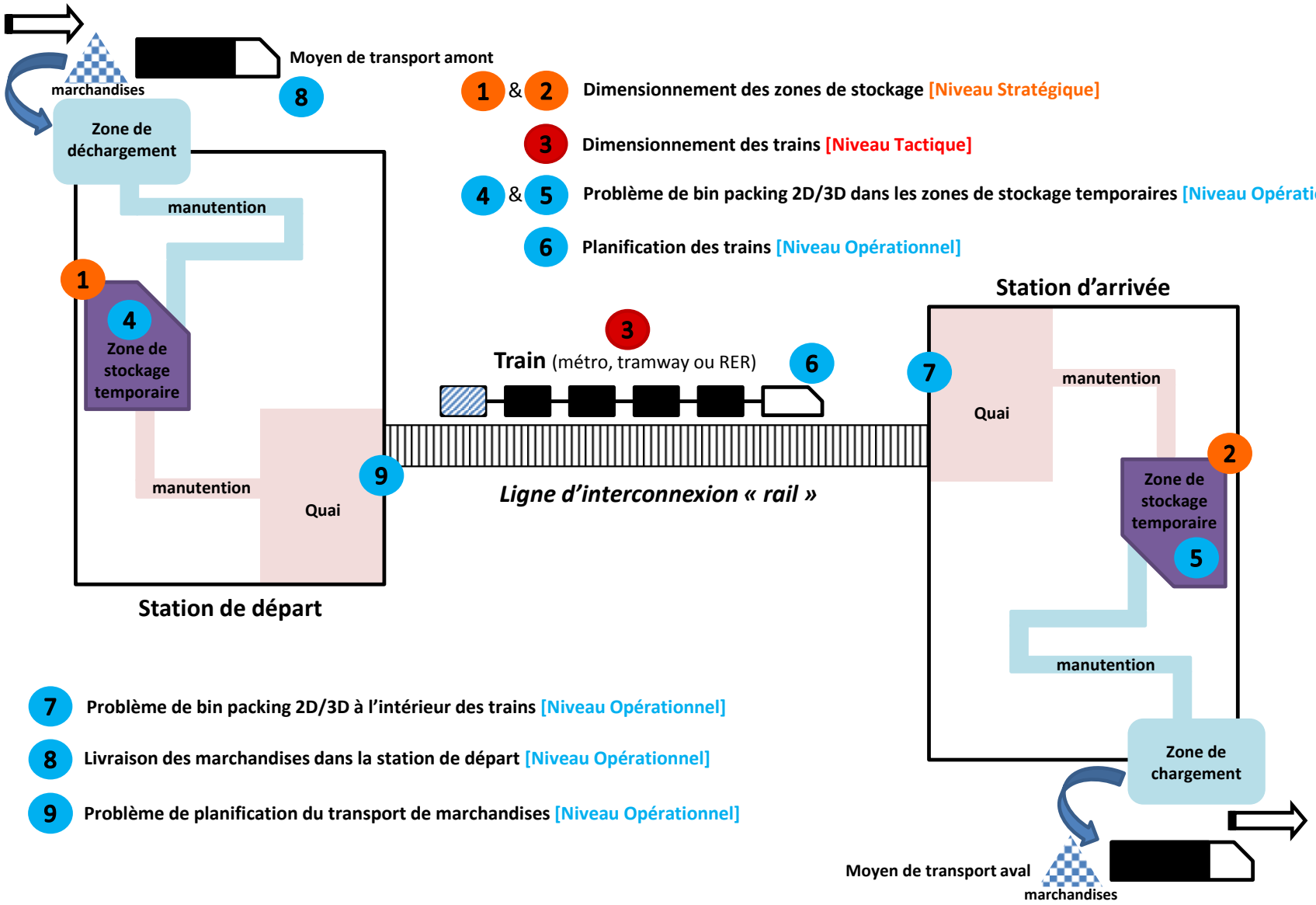


Figure II.13 : Identification et décomposition des problématiques décisionnelles pour la mixité des flux fret / voyageurs

4.2.1. *Au niveau stratégique*

Il s'agit principalement d'activités de construction et de réaménagement des infrastructures et / ou équipements, nécessaires à l'intégration de l'activité de transport de marchandises.

Suite à l'étude du processus de transport de marchandises sur le réseau de transport de voyageurs, une problématique liée au dimensionnement des zones de stockage temporaire (ou zones tampons) a été identifiée (numéros 1 et 2 sur la Figure II.13). Cet espace est indispensable dans l'exploitation du service de transport de marchandises, en raison de la nécessité d'avoir recours à un moyen de transport tierce, en amont et en aval de l'activité de transport par les trains. A leur réception, les marchandises sont entreposées dans cet espace, le temps de pouvoir les affecter à un train, pour leur transport. Puis, lors de leur déchargement dans leur station d'arrivée, elles sont entreposées dans cet espace, le temps que le moyen de transport vers leur destination finale arrive (le moyen de transport aval peut être l'une des solutions durables, citées dans le premier chapitre).

Que cela soit lors de la réalisation d'une nouvelle station (comme dans le cadre du projet « Grand Paris Express »), ou dans le cadre du réaménagement d'une station existante (encore plus intéressant, au vu de l'intérêt fondamental de l'idée de mixité, qui est de pouvoir utiliser l'existant, dans le but d'intégrer le nouveau service et de générer un bénéfice supplémentaire), cette problématique est cruciale. La solution optimale est à privilégier, en raison de l'impact sur le long terme et du manque à gagner correspondant à un éventuel mauvais dimensionnement. Deux cas se présentent :

- La nécessité de redimensionner cette zone après la mise en exploitation, requiert des dépenses trop importantes. Aussi bien en espace souterrain qu'aérien, il est quasi impossible de procéder à une extension. Au niveau de la chaussée, il y a rarement assez d'espace en ville pour le faire.
- Un surdimensionnement lors de la réalisation coûtera plus cher, et au vu du coût du foncier dans le centre-ville, la rentabilisation prendra plus de temps.

Le dimensionnement des zones de stockage, nécessite la disponibilité de plusieurs données, dont les suivantes :

- Les prévisions de la demande potentielle de transport, autour de la station en question.
- La prévision de l'offre potentielle, à travers le nombre de trains traversant la ligne, ainsi que l'espace pouvant être dédié aux marchandises dans ces trains.
- Les dimensions de l'espace pouvant être alloué à la réalisation de la zone de stockage.
- La définition des limites du service proposé (ex : avec ou sans correspondance, possibilités de nivellement de la charge sur plusieurs stations voisines, etc.).
- La prévision des limites de temps d'attente des marchandises dans les stations, avant et après leur transport par un train.
- Les temps d'attente des commandes dans leur station de départ, avant leur transport par un train.

4.2.2. *Au niveau tactique*

Au niveau tactique, on retrouve les problèmes dont l'horizon est le moyen terme. Il s'agit principalement d'activités à renouveler périodiquement, nécessaires à l'ajustement des équipements utilisés, sur une certaine période, pour correspondre à la demande prévisionnelle.

L'étude du processus de transport de marchandises, nous a permis d'identifier une problématique à ce niveau. Cette dernière, correspond au dimensionnement des trains (numéro 3 sur la Figure II.13). Concrètement, la résolution de cette problématique doit répondre à la question du nombre de wagons dédiés aux marchandises, dans un train de voyageurs. Si la solution technique adoptée est composée de trains modulables avec des wagons dédiés, il s'agira d'interchanger les wagons, pour avoir des trains avec la configuration recherchée. Si les wagons eux-mêmes sont modulables, alors il suffira d'enlever les équipements dédiés aux voyageurs (ex : banquettes, sièges, strapontins, barres de maintien, etc.). Une troisième solution technique est envisageable, si des trains avec des configurations fixes existent.

La modification de la configuration des trains, est une tâche qui nécessite un certain temps de mise en œuvre, ainsi que la mobilisation de ressources humaines et matérielles. D'autre part, elle est indispensable, pour maximiser la rentabilité dégagée par l'exploitation du service de transport de marchandises. A ce titre, les trains peuvent être dimensionnés sur la base d'une demande moyenne sur une période, ou bien, avoir des configurations différentes selon le jour (jours de semaine ou weekend), ou selon les moments de la journée (matin, après-midi, soir). A noter que le service de transport de marchandises est proposé durant les heures creuses de la journée.

Le dimensionnement des trains nécessite aussi, la disponibilité de plusieurs données, dont les principales étant les prévisions des deux flux fret / voyageurs et les temps d'attente.

4.2.3. *Au niveau opérationnel*

Au niveau opérationnel, l'horizon de décision est le plus court et le temps de réponse est critique. Ainsi, ces problèmes sont traités, une fois que les précédents ont été considérés et résolus (i.e. les questions relatives aux dimensionnements des espaces dans les stations et les trains, ont été tranchées). Nous avons étudié la dynamique de circulation des flux de marchandises, sur la ligne de transport de voyageurs, et avons identifié six problèmes interdépendants entre eux. Plus précisément, les données de sortie de la résolution de l'un, étant les données d'entrée de l'autre, ou ayant un impact indirect sur ces derniers.

- **Problème de bin packing 2D/3D dans les zones de stockage temporaire (numéros 4 et 5 sur la Figure II.13)**

  Ce problème sera fixé (entre 2D et 3D) une fois la solution technique déterminée. En effet, il s'agit d'abord de déterminer si les contenants des marchandises s'empilent, puis, s'ils ont la même taille. Quelle que soit la solution adoptée, la problématique est d'optimiser le rangement des marchandises dans la zone de stockage temporaire, avec pour objectifs :

- Optimiser l'utilisation de l'espace (i.e. maximiser la quantité de marchandises entreposées).
- Optimiser les temps de manutentions (i.e. minimiser le temps de manutention de l'ensemble des marchandises transportées).

Un exemple peut être illustré par la Figure II.14. Supposons que les prochaines marchandises devant être transportées sont celles en rouge. Dans ce cas, pour y avoir accès, il est nécessaire de sortir le coli en bleu puis les deux colis rouge, enfin remettre le coli bleu à l'intérieur de la zone. Si les colis rouges étaient placés à l'avant, on aurait gagné deux opérations de manutention.

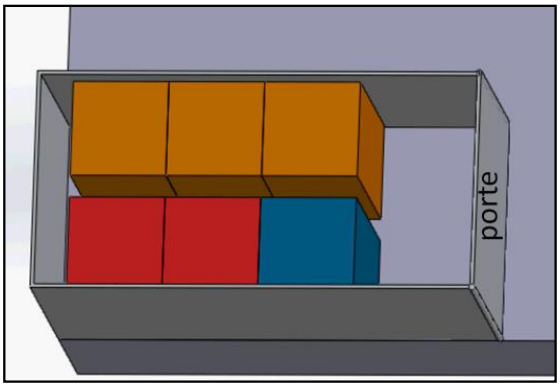


Figure II.14 : Exemple d'une zone de stockage temporaire

- **Planification des trains (numéro 6 sur la Figure II.13)**
  Il s'agit de déterminer le planning optimal de circulation des trains, durant une période d'exploitation. Ce planning doit, d'une part, être le plus proche du planning initial, relatif au transport de voyageurs (étant donné que le service de transport de marchandises ne doit pas le perturber). D'autre part, il faut inclure les données relatives à la demande de transport de marchandises. Dans un second temps, cette problématique devrait permettre, en prenant en compte les perturbations du système, telles que : changements de la demande ou changement de capacité, d'ajuster l'offre à la demande. En effet, si de nouvelles demandes de transport imprévues se présentent, il faut adapter la nouvelle charge à la capacité, par exemple, en mettant en circulation des trains supplémentaires.
- **Problème de bin packing 2D/3D à l'intérieur des trains (numéro 7 sur la Figure II.13)**
  Même situation que pour les zones de stockage temporaire, le choix de la 2D ou 3D ne pourra se faire, qu'une fois la solution technique adoptée. Dans ce cas, la problématique est d'optimiser le rangement des marchandises à l'intérieur des trains. L'objectif est de :

  - Maximiser l'utilisation de l'espace, en adéquation avec les spécificités du service de transport de marchandises proposé (i.e. il faut que l'accès à chaque colis puisse se faire en un temps limite, qui ne conduit pas à la perturbation du service de transport de voyageurs).
  - Minimiser le temps d'accès total aux colis, dans leur station de départ et leur station d'arrivée.

- Minimiser le nombre total de manipulations des colis de marchandises pour leur chargement et leur déchargement.

Nous avons évalué les différentes possibilités, dans le cas d'un seul niveau de chargement des colis (i.e. pas d'empilement, soit le cas de la 2D). Ainsi, nous avons identifié trois possibilités, comme le montre la Figure II.15.

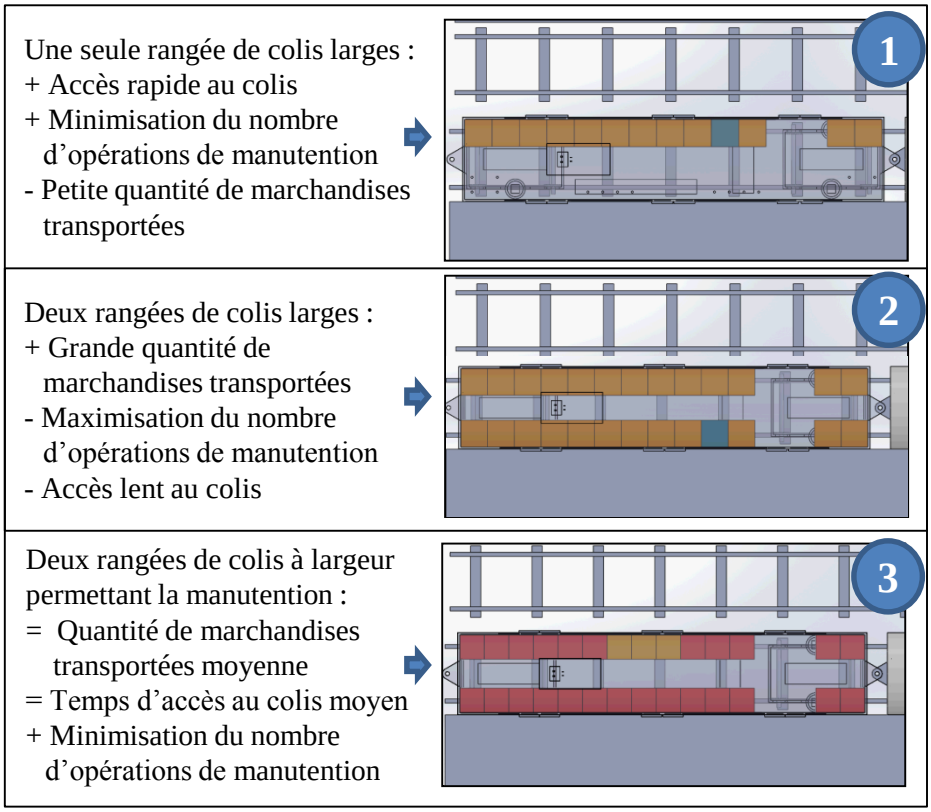


Figure II.15 : Exemple de rangement de colis à l'intérieur du train (cas de la 2D)

- Pour la première possibilité, le colis bleu est déchargé sans avoir à manipuler les autres colis.
- Pour la seconde possibilité, le déchargement du colis bleu requiert la manipulation du colis qui le bloque.
- Pour la troisième possibilité, les trois colis en orange peuvent être déchargés sans manipuler les autres colis. Cependant, l'espace pour la manutention étant réduit, l'opération doit se faire avec précaution.

- **Livraison des marchandises dans la station de départ (numéro 8 sur la Figure II.13)**

Cette problématique a pour but de maximiser le nombre de commandes à transporter et d'optimiser l'utilisation des ressources du système, en régulant les flux d'arrivée aux stations de départ. Un système dérégulé aura plusieurs conséquences négatives, telles que : la saturation de certaines stations au détriment des autres, une sous-utilisation des trains, des retards de livraison, etc. Pour cela, un système de tarification basé sur le yield management (ou revenue management), peut être utilisé.

Pour mettre en place un système de tarification spécifique, il est nécessaire de déterminer l'offre de transport potentielle dans chaque station et suivant les horaires

de la journée. Pour cela, il est indispensable d'étudier la dynamique du système et de la circulation des flux de marchandises. La vitesse à laquelle les commandes sont transportées à partir de chaque station est déterminante.

- **Problème de planification du transport de marchandises par rail « FRTSP » (numéro 9 sur la Figure II.13)**

  Cette problématique détermine le moment de chargement de chaque commande, ainsi que le train qui doit la transporter. L'objectif est de transporter l'ensemble des commandes, le plus rapidement possible (i.e. il s'agit de minimiser le temps d'attente des marchandises dans leur station de départ). Plus précisément, il s'agit de minimiser la différence cumulée entre les moments de chargement des commandes dans les trains, et les moments de leur disponibilité dans leur station de départ pour être transportées. Indirectement, cet objectif permet la maximisation du nombre de commandes transportées à partir des stations.

  Plusieurs contraintes techniques et organisationnelles sont considérées, telles que : la limite des temps d'arrêt dans les stations pour le chargement / déchargement des marchandises, l'espace disponible dans les trains et les temps d'arrivée des marchandises.

  Dans la suite de ce travail, nous allons nous focaliser sur ce problème. La première raison est de montrer la capacité du système global à absorber un flux supplémentaire de nature différente. Une deuxième raison concerne la quantification de cette capacité de transport de marchandises, qui permettra d'estimer les recettes supplémentaires correspondantes, pour l'entreprise de transport. De plus, le trafic de passagers restant la priorité, ce nouveau service ne pourrait être viable, que s'il ne le perturbe pas. Ainsi, la troisième raison est de montrer l'adéquation de ce nouveau service, avec les contraintes très fortes, liées au service de transport de voyageurs. D'autre part, le projet actuel du « Grand Paris Express » avec de nouvelles lignes et stations ferroviaires, à concevoir et à construire, offre une opportunité d'intégrer le nouveau service dès la conception. Ceci permettra de réduire les contraintes fortes, liées à l'existant.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la mixité fret / voyageurs, sur le réseau ferroviaire de transport de voyageurs en milieu urbain, en considérant le cas de la région Ile-de-France. Pour cela, nous nous sommes basé sur les quelques références dans la littérature, qui ont traité des problématiques du type fret ferroviaire en milieu urbain. Nous citons quelques expérimentations et exploitations (passées ou en cours) de ce type de solutions de fret urbain, que nous jugeons proche de notre cas de mixité.

Sous certaines conditions, la faisabilité technico-économique d'une solution de fret urbain par voie ferroviaire, a été démontrée par plusieurs chercheurs. Cette faisabilité a été expérimentée sur le terrain, et on compte aujourd'hui quelques exemples en cours d'exploitation. Les motivations ayant encouragé le développement d'une telle solution, peuvent être décrites à travers les points suivants :

- La très bonne adéquation de ce mode de transport aux zones densément peuplées et leurs caractéristiques (tel que : réseau routier saturé et réseau ferroviaire bien développé).
- La réduction simultanée du trafic et de la pollution dans la ville.
- La possibilité d'absorber une part importante du transport domestique de marchandises, en combinant les flux et en se connectant à un réseau de transport multimodal.
- L'amélioration du rendement économique des équipements et infrastructures ferroviaires de voyageurs.

Partant de ce constat, dans ce travail, nous proposons une démarche méthodologique, pour l'intégration du flux de marchandises, à un mode de transport ferroviaire en milieu urbain, dans la perspective de proposer un nouveau service de transport de marchandises. Le point de départ étant l'identification de tous les cas possibles de mixité. Ainsi, nous avons identifié 19 cas de mixité, dont deux cas de mixité totale (i.e. toutes les composantes du moyen de transport ferroviaire sont communes aux deux services, transport de voyageurs et de marchandises).

On retiendra le cas de mixité le plus complexe, puis nous proposons une approche de décomposition des problématiques décisionnelles, qui s'y posent. Ainsi, nous avons identifié 9 problématiques interdépendantes aux 3 niveaux décisionnels : 2 au niveau stratégique, 1 au niveau tactique et 6 au niveau opérationnel. Nous avons montré que la résolution des problématiques aux niveaux stratégique et tactique, nécessite la disponibilité d'un certain nombre de données, issues de la future exploitation de cette solution de transport. En effet, l'étude de la dynamique du système et de la circulation des flux est indispensable, à l'évaluation de l'offre de transport potentielle. La vitesse à laquelle les marchandises sont transportées à partir des stations, confrontée à la demande de transport (prévisionnelle), permet d'évaluer les besoins en espace dans les zones de stockage temporaire. Aussi, elle est indispensable au dimensionnement de la capacité des trains, en termes de transport de marchandises.

La problématique décisionnelle nommée « FRTSP », permet d'avoir une partie de ces données nécessaires. Aussi, elle permet de fournir les données nécessaires à la résolution de la problématique décisionnelle numéro 8, relative à la gestion des temps de réception des marchandises en amont du service de transport. La planification des trains pour faire face aux variations de la demande (problématique numéro 6), requiert aussi la connaissance d'un planning, aussi précis que possible, du transport des marchandises (i.e. pour ne pas mettre en circulation des trains, dont il était possible de s'en passer). Nous avons relevé que le problème « FRTSP », donne une première idée sur les capacités de la solution de transport étudiée, tout en mettant à disposition des données indispensables à la résolution d'autres problématiques décisionnelles.

Quant aux problématiques de bin packing, elles jouent un rôle important dans l'évaluation de la faisabilité économique de la solution de transport étudiée. En effet, elles permettent d'évaluer au plus juste les capacités du système, à travers la meilleure utilisation possible des

espaces alloués à la partie marchandises, et en réduisant les temps nécessaires à la manutention des colis (à noter que ce dernier élément est très critique, dans un environnement de transport urbain de voyageurs).

Chapitre III

Etat de l'art des méthodes de modélisation des problèmes de transport

1. Introduction

Les activités de transport de personnes et de marchandises posent plusieurs problématiques à tous les niveaux décisionnels (i.e. stratégique, tactique et opérationnel). Que cela soit pour la construction de réseaux logistiques, leur gestion et leur organisation, l'optimisation de la circulation des flux (personnes et marchandises), l'optimisation de la circulation des véhicules (planification des tournées et optimisation des parcours), etc. La majeure partie des problématiques relatives à la chaîne logistique et au transport, sont des problèmes d'optimisation combinatoire et sont classées dans la catégorie des problèmes NP-difficile (Gupta & Könemann, 2011).

Une grande variété de méthodes de résolution exactes et approchées ont été proposées pour résoudre de tels problèmes. Les solveurs sont souvent en mesure de résoudre les petites et moyennes instances de manière optimale. Cependant, des modèles riches ou des instances de grande taille, ne peuvent être résolus de manière optimale, même par les solveurs les plus performants, dans des délais acceptables. Ainsi, il est nécessaire de développer des algorithmes pour une résolution approchée (Alumur , et al., 2015).

Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à la conception et à la modélisation d'une nouvelle solution de transport ferroviaire de marchandises en milieu urbain. Dans ce cadre, plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire sont identifiés. La simulation à évènements discrets, en utilisant le logiciel ARENA, est proposée dans le but de comprendre le comportement de cette solution de transport et d'étudier sa dynamique dans le temps. Le modèle de simulation nous permet aussi, de reproduire les perturbations liées à la mise en exploitation d'une telle solution de transport.

Un couplage simulation / optimisation est proposée. Il permet de considérer l'évolution du système en prenant en compte la dynamique temporelle et de fournir des données actualisées au modèle d'optimisation, à intervalle régulier. L'utilisation d'une approche de replanification complète cette approche, avec l'objectif de minimiser les variations, engendrées par les recalculs, suite aux perturbations de la demande.

Ce chapitre est structuré en quatre sections. Il dresse l'état de l'art des méthodes de modélisation et de résolution, des problèmes proches du FRTSP.

2. Problèmes classiques de la littérature liés à la logistique urbaine

2.1. Problèmes classiques liés au transport

Beaucoup de travaux de recherche se sont intéressés au transport et ont utilisés différentes méthodologies et différents outils pour atteindre leurs objectifs. Ces problèmes de transport (et plus globalement, de logistique) peuvent être regroupés en plusieurs grandes familles de problèmes, tels que :

- Le problème de transport « sources-destinations » (Fortz, 2012) : ce problème concerne la détermination des quantités à livrer de produits à partir de plusieurs sources différentes à destination de plusieurs clients, sachant que : 1- chaque source

dispose d'une quantité limitée, 2- chaque client a une demande maximum et 3- chaque paire « source-destination » a un coût propre, proportionnel à la quantité transportée. L'objectif dans ce type de problème est de minimiser les coûts de transport/livraison. Aussi, des plateformes de transbordement peuvent être introduites, pour réduire les coûts de livraison, à travers la mutualisation du transport sur une certaine portion commune des parcours.

- Le problème de localisation (Melo, et al., 2009) : ce problème se pose suite aux problèmes issus de la classe précédente et dans le cas où les installations de production (sources) n'existent pas encore (donc il s'agit de les réaliser). Le problème décisionnel en question, est de définir les localisations de leur implantation, dans le but de minimiser les futurs coûts de transport ou les futures distances à parcourir pour procéder aux livraisons.
- Le problème de tournée de véhicules (Dantzig & Ramser, 1959) : cette classe de problèmes classiques en optimisation combinatoire, consiste à déterminer les tournées optimales de plusieurs véhicules, dans le but de livrer plusieurs clients (à noter que lorsqu'il n'y a qu'un seul véhicule, ce problème se réduit au problème du voyageur de commerce). Plusieurs variantes de problèmes de tournées de véhicules existent. A titre d'exemple : 1- avec fenêtre de temps, où il s'agit de livrer chaque client, sur un intervalle de temps réduit, 2- avec collecte et livraison, où il s'agit pour les véhicules de transport, de procéder à des collectes de marchandises, en plus des livraisons, 3- contraintes de capacité, où les véhicules ont une capacité limité en termes de poids / volume…
- Le problème d'affectation (Schrijver, 2005) : c'est l'un des premiers problèmes d'optimisation combinatoire. Il a été étudié par Gaspard Monge dès 1784. Ce problème est le plus souvent assimilé au problème de transport décrit précédemment. La description classique de ce problème consiste à déterminer l'affectation de tâches à des agents, sachant que chaque affectation tâche-agent a un coût, l'objectif étant de minimiser le coût total des affectations. Appliqué au transport, il s'agira de déterminer pour chaque commande (produits ou marchandises), le véhicule qui va la transporter. Une variante plus complexe de ce type de problème existe, il s'agit du problème d'affectation généralisée, qui introduit des contraintes supplémentaires. Ce problème sera décrit plus en détail dans la suite de ce chapitre.
- Le problème de bin packing (Johnson & Garey, 1985) : ce problème consiste à déterminer le meilleur placement d'objets, à l'intérieur de plusieurs contenants, dont l'objectif est la minimisation du nombre de contenants pour tous les objets. Appliqué au transport, ce problème se traduit par l'optimisation du chargement de véhicules de transport (ex : camions) ou containers (à transporter dans des bateaux ou trains), dans le but de minimiser le nombre de véhicules à utiliser pour transporter tous le produits. Des contraintes sur le volume du contenant et le poids maximum supporté par les véhicules sont à considérer.

Au-delà des autres problèmes d'optimisation combinatoire, qui peuvent être rencontrés en transport, on peut relever dans certains cas, l'interaction de plusieurs de ces problèmes, pour traduire un problème réel. Par exemple : un problème de tournées de véhicules avec contraintes de capacité, associé à un problème de bin packing pour optimiser le chargement

des véhicules. Un problème d'affectation, associé à un problème de bin packing pour optimiser l'utilisation de l'espace, etc.

Le problème principal étudié dans ce travail de recherche, sera réduit à un problème d'affectation généralisée. Ainsi, pour mieux appréhender les spécificités de ce problème, nous allons le présenter, ainsi que ses caractéristiques dans le point suivant.

2.2. Problème d'affectation généralisée

Le problème d'affectation généralisée a été décrit et étudié en détail, par plusieurs auteurs : (Martello & Toth, 1990), (Cattrysse & Van Wassenhove, 1992), (Chu & Beasley, 1997) et (Ramalhinho Lourenço & Serra, 2000). Ce problème considère la minimisation du coût d'affectation de N tâches à M machines (agents), tel que chaque tâche est affectée à une seule machine, sous la contrainte de capacité de cette dernière. Ce problème trouve des applications dans plusieurs domaines, tels que : les problèmes de localisation, les réseaux de transport, les réseaux de communication, les problèmes de planification des machines, les problèmes de tournées de véhicules, etc. La Figure III.1 montre une schématisation du problème appliqué à l'affectation de plusieurs commandes (lots) de produits de tailles différentes, à des véhicules différents, qui ont des coûts de transport et des capacités différentes. L'objectif étant la minimisation du coût de livraison de toutes les commandes.

Ce problème peut être formulé par un modèle mathématique de type PLNE. Les notations utilisées se présentent comme suit :

- On considère un atelier de production composé de M machines ($m \in [1, M]$), qui doivent réaliser N tâches ($n \in [1, N]$).
- L'exécution d'une tâche n par la machine m consomme les ressources de cette machine (le temps d'exécution par exemple). On note b_{nm} la quantité de ressource nécessaire à la réalisation de la tâche n par la machine m.
- Chaque machine à une capacité de ressources limitée notée a_m.
- L'affectation d'une tâche n à une machine m engendre un coût noté c_{nm}.

Aussi, on définit la variable de décision :

$$x_{nm} = \begin{cases} 1 \; si \; la \; tâche \; n \; est \; affectée \; à \; la \; machine \; m \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

Le PLNE s'écrit comme suit :

$$\min f(x) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} c_{nm} x_{nm} \tag{3.1}$$

s.c.

$$\sum_{n=1}^{N} b_{nm} x_{nm} \leq a_m \qquad \forall m \in [1, M] \tag{3.2}$$

$$\sum_{m=1}^{M} x_{nm} = 1 \qquad \forall n \in [1, N] \tag{3.3}$$

$$x_{nm} \in \{0,1\} \qquad \forall n \in [1, N], \forall m \in [1, M] \tag{3.4}$$

L'objectif (3.1) étant la minimisation du coût total de l'affectation des tâches aux machines, sous l'ensemble des contraintes (3.2) de capacité des machines et l'ensemble des contraintes (3.3), qui permettent d'assurer l'affectation de chaque tâche à une seule machine. L'ensemble des contraintes (3.4) représente les contraintes d'intégrité des variables de décision.

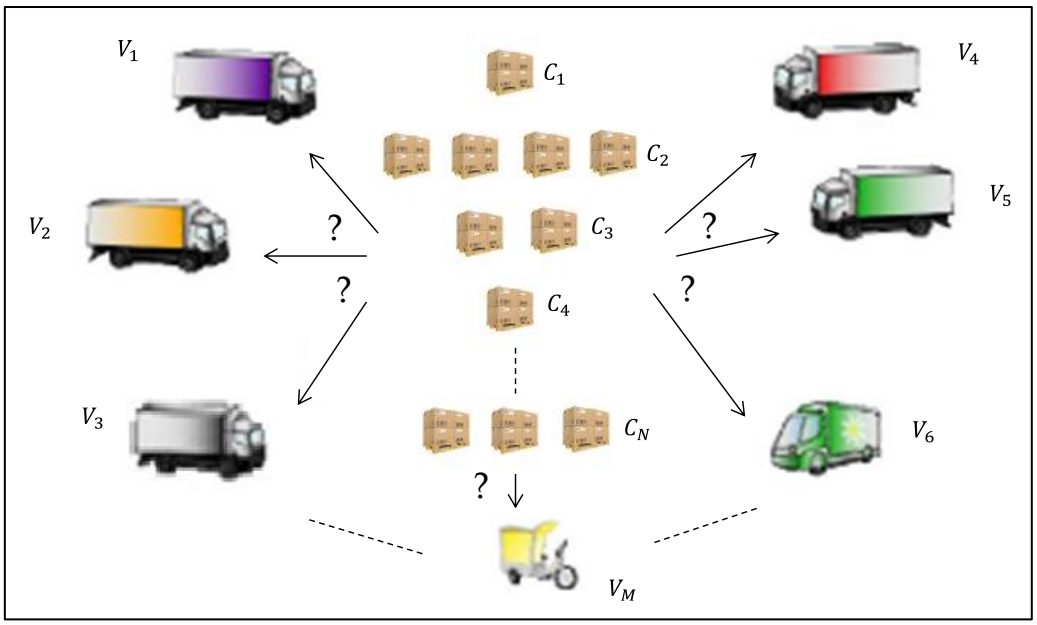


Figure III.1 : Schématisation du problème d'affectation généralisée dans le cas de marchandises à livrer

Il a été démontré que ce problème est NP-difficile dans (Fisher, et al., 1986). Toutefois, plusieurs algorithmes de résolution exacte de ce problème, pour des instances de petite et moyenne taille, ont été proposés par plusieurs auteurs dans : (Ross & Soland, 1975), (Fisher, et al., 1986), (Guignard & Rosenwein, 1989), (Martello & Toth, 1990), etc. Dans (Savelsbergh, 1997), l'auteur a proposé un algorithme qui fournit la solution optimale à un problème composé de 20 machines et 200 tâches en moins de 1 160 secondes dans le pire des cas. D'autre part, plusieurs heuristiques et métaheuristiques ont été proposées pour résoudre des instances de taille plus importante. Dans (Amini & Racer, 1994), les auteurs ont proposé une heuristique à recherche en profondeur variable, inspiré des travaux développés dans (Lin & Kernighan, 1973) pour le problème du voyageur de commerce. Dans (Cattrysse & Van Wassenhove, 1992), les auteurs ont formulé le problème sous forme d'un problème de partitionnement et ont proposé une heuristique basée sur les techniques de génération de colonnes. Dans (Chu & Beasley, 1997), un algorithme génétique est proposé pour améliorer la qualité et la faisabilité des solutions explorées. Dans (Laguna, et al., 1995) et (Dıaz & Fernández, 2001) des algorithmes de recherche tabous ont été proposé, pour la résolution du problème de base et de certaines de ses extensions. Enfin, une autre classe de métaheuristique a été utilisée par plusieurs auteurs, il s'agit des colonies de fourmis proposées, entre autres, dans (Stützel, 1998), (Stützel & Hoos, 2000) et (Ramalhinho Lourenço & Serra, 2000).

3. Méthodes de résolution de la RO

En majorité, les outils utilisés par les chercheurs dans le cadre des études relatives aux problématiques de transport, correspondent à des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation combinatoire. Ces méthodes de résolution sont classées en deux grandes

catégories, comme le montre la Figure III.2. D'un côté, nous avons les méthodes exactes qui permettent de trouver et prouver l'optimalité. Cependant, pour la plupart des problèmes, les temps de calcul augmentent exponentiellement en fonction de leur taille. Ainsi, d'autre part, nous avons les méthodes approchées qui permettent de trouver des solutions faisables, généralement de bonne qualité, avec des temps de calculs raisonnables.

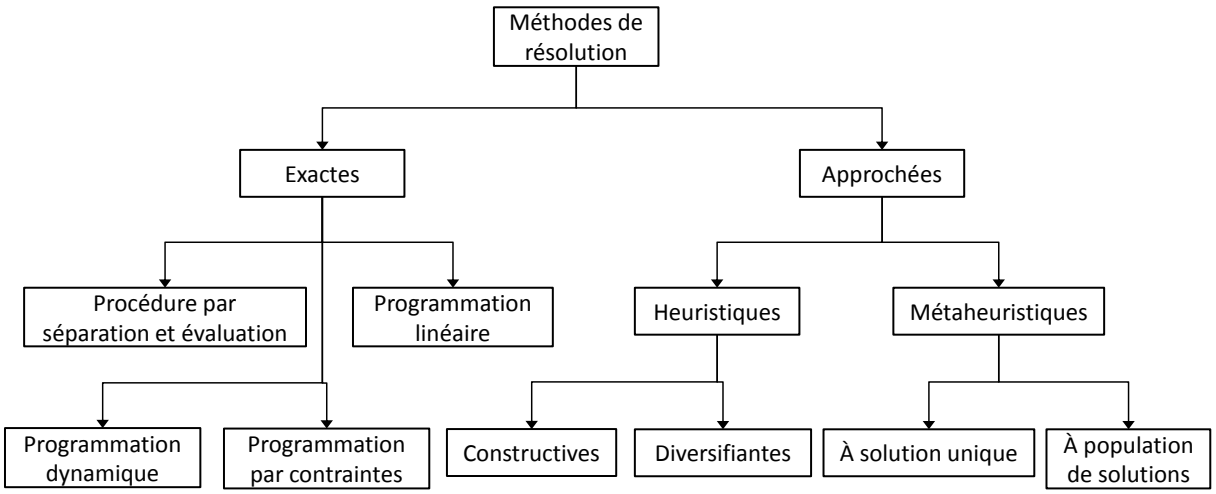


Figure III.2 : Méthodes de résolution pour l'optimisation combinatoire

3.1. Méthodes exactes

La majorité des problèmes de transport peuvent être modélisés sous la forme d'un Programme Linéaire en Nombre Entier « PLNE ». Un PLNE est un cas particulier des programmes linéaires « PL », où les variables de décision sont dans l'ensemble des entiers. En moyenne, un PL est résolu de manière assez rapide, en utilisant l'algorithme du simplexe. Cependant, même si la relaxation des contraintes d'intégrité d'un PLNE facilite sa résolution, car elle le ramène à un PL, la relaxation obtenue peut être très éloignée de l'optimum. Dans ce cas, plusieurs autres approches de résolution sont utilisées, telles que la procédure de séparation et évaluation, ou la programmation dynamique. Les points suivants permettent de détailler ces différentes notions et méthodes de résolution :

- **Programmation linéaire**

  Dans (Chvatal, 1983), une étude détaillée de la programmation linéaire, à partir de ces origines, et à travers la présentation de différentes méthodes de résolution. Ainsi, la programmation linéaire est une discipline mathématique relativement récente, qui doit son émergence à la conception de la « méthode du simplexe » par G.B. Dantzig, en 1947, pour la résolution d'un problème de planification de l'US Air Force (qui a été formulé sous la forme d'un programme linéaire).

  Un problème de programmation linéaire est un problème de maximisation (ou minimisation) d'une fonction linéaire, sujet à un nombre fini de contraintes linéaires. En général, on utilise l'indice *j* pour les *n* variables « de décisions » et l'indice *i* pour les *m* contraintes, ce qui nous permet d'écrire un PL sous la forme suivante :

$$\max \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \qquad (3.5)$$

s.c.

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \leq b_i \qquad i = (1,2,\dots,m) \tag{3.6}$$

$$x_j \geq 0 \qquad j = (1,2,\dots,n) \tag{3.7}$$

Cette écriture du PL est appelée la forme standard, avec (3.5) la fonction « objectif » et (3.6) l'ensemble des *m* contraintes.

Une première méthode de résolution intuitive d'un PL, est la résolution graphique (Nemhauser & Wolsey, 1988). Cette méthode ne peut être appliquée que si le problème ne dépasse pas les 3 variables de décision. Chaque problème a un certain nombre de solutions qui vont satisfaire toutes ces contraintes. On les appelle l'ensemble des solutions réalisables *S*, cet ensemble peut être vide. Les autres solutions, qui satisfont une partie des contraintes ou aucune d'elle, sont appelées des solutions irréalisables. Ainsi, la représentation graphique des différentes contraintes, permet de définir l'ensemble *S* (comme le montre la Figure III.3). La représentation de l'objectif sous la forme d'une droite qu'on fait translater dans le sens de l'optimisation (maximisation ou minimisation), nous permet l'obtention de la solution optimale (cette solution peut être unique ou multiple). L'espace *S* est aussi appelé enveloppe convexe. Aussi, la solution optimale se trouve forcément sur l'un de ses points extrêmes.

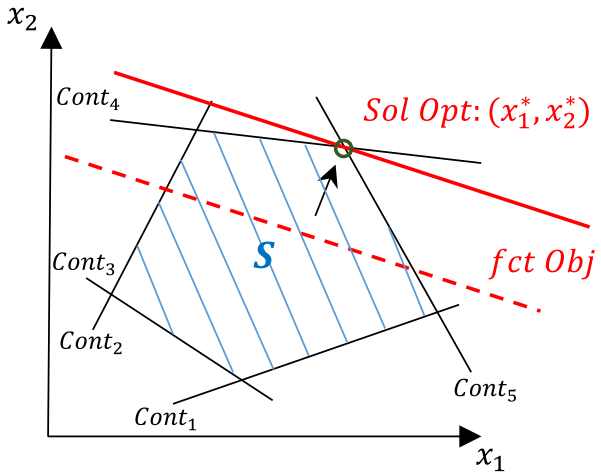


Figure III.3 : Exemple d'une résolution graphique d'un PL à 5 contraintes

L'exploration des différents points extrêmes, constitués par l'intersection des différentes contraintes du PL, a été formalisée dans le cas général (peu importe le nombre de variables), par l'algorithme du simplexe, qui a été développé par G.B. Dantzig (Dantzig, 1951). Le principe de l'algorithme du simplexe est d'explorer les points extrêmes, à travers un processus itératif, en améliorant la solution d'une itération à l'autre.

Dans certains cas, la structure du problème fait qu'il est plus intéressant de passer par la forme duale du PL, sachant que ce dernier a la même solution optimale que le problème original.

- **Programmation linéaire en nombres entiers**

Un PLNE est un PL où toutes les variables sont entières, la formulation précédente reste valable avec cette contrainte supplémentaire. Une forme intermédiaire entre PL

et PLNE existe. Il s'agit de la programmation linéaire en variables mixtes « PLVM » (Nemhauser & Wolsey, 1988). La forme standard des PLVM se présente comme suit :

$$\max \sum_{j=1}^{n} c_j x_j + \sum_{k=1}^{p} d_k y_k \qquad (3.8)$$

s.c.

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j + \sum_{k=1}^{p} e_{ik} y_k \leq b_i \qquad i = (1,2,\dots,m) \qquad (3.9)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}_+ \quad j = (1,2,\dots,n), \quad y_k \in \mathbb{R}_+ \quad k = (1,2,\dots,p) \qquad (3.10)$$

Comme mentionné dans le préambule de cette sous-section, la résolution du PL obtenu par relâchement de la contrainte d'intégrité, ne coïncide que très rarement avec la solution optimale du PLNE. En effet, à la différence du PL, en général la solution optimale du PLNE se trouve à l'intérieur de l'enveloppe convexe (Figure III.3) et non pas sur sa frontière. De là, la résolution d'un PLNE requiert l'application d'approches d'énumération et / ou de décomposition (Sun & Quilliot, 1993). Parmi ces approches de résolutions : la procédure par séparation et évaluation (Lawler & Wood, 1966) et (Narendra & Fukunaga, 1977), la programmation dynamique (Bellman, 1956), les méthodes de coupes (Padberg & Rinaldi, 1991), les méthodes de génération de colonnes (Vanderbeck & Wolsey, 1996), etc. Aussi, le problème formulé par un PLNE, peut être formulé par la programmation par contraintes « PPC » (Mackworth, 1977).

- **Procédure par séparation et évaluation « B&B »**

Cette approche de résolution trouve ses racines dans (Land & Doig, 1960). Par la suite, ses principes ont été développés par plusieurs auteurs tels que dans : (Bertier & Roy, 1964), (Dakin, 1965) et (Roy, et al., 1965). Les algorithmes de type B&B consistent à énumérer de manière implicite les solutions du PLNE, pour en trouver la meilleure. Cependant, cette démarche implique des temps de calcul trop importants. A titre d'exemple, l'exploration de toutes les solutions d'un PLNE avec 60 variables de décision en (0,1), en utilisant un ordinateur qui met 10^{-9} secondes pour explorer chaque solution, il faudrait 30 ans pour évaluer toutes les solutions possibles (Minoux, 1983). Ainsi, les schémas se basant sur l'énumération, procèdent de manière non exhaustive.

La procédure de B&B a été décrite en détail par plusieurs auteurs tels que dans : (Minoux, 1983), (Sakarovitch, 1984), (Nemhauser & Wolsey, 1988) et (Dell'Amico, et al., 1997). Cette procédure se compose de deux étapes :

- La séparation : cette étape consiste à diviser le problème en plusieurs sous-problèmes. Chaque sous-problème a un ensemble de solutions réalisables, dont l'union recompose l'ensemble des solutions du problème. Cette décomposition se fait à travers la représentation de l'ensemble des solutions *S* sous la forme d'une arborescence. Les nœuds de cet arbre correspondent aux sous-problèmes (le nœud de niveau 0 est appelé la racine et correspond à l'ensemble *S*). Pour construire un niveau de l'arborescence, il faut choisir une variable de manière arbitraire et lui fixer une valeur. La suite est effectuée à travers la deuxième étape de la procédure.

- L'évaluation : pour parcourir l'arbre, un mécanisme d'évaluation est mis en place. Ce mécanisme permet l'exclusion des sous-arborescences qui ne peuvent contenir une solution optimale. De là, la performance de chaque algorithme de type B&B dépend directement de cette fonction d'évaluation, dont la performance est liée à l'écart entre la valeur qu'elle fournit et la valeur exacte de l'optimum entier. Plus cet écart est faible, plus la qualité de l'évaluation est bonne, ce qui permet de réduire le nombre de nœuds à examiner. Ainsi, le mécanisme d'évaluation permet de réduire la taille de l'arbre à explorer, en arrêtant l'expansion des branches qui ne contiennent pas une solution optimale.
  L'arborescence est parcourue soit en largeur, en profondeur ou, en priorisant les meilleurs nœuds à l'itération actuelle. A chaque séparation, la borne supérieure pour un problème de maximisation (inférieure pour un problème de minimisation) est calculée. En général, elle est obtenue à partir de la résolution du sous-problème relaxé correspondant au nœud actuel (une relaxation linéaire, par exemple).

- **Programmation dynamique**

La programmation dynamique a été proposée au début des années 1950 par R.E. Bellman (Bellman, 1957), dans le but de résoudre des problèmes de chemins optimaux (plus court ou plus long chemin). Depuis, cette méthode a été développée et est très utilisée dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire (Bellman & Dreyfuce, 1962), (Denardo & Mitten, 1967), (Christofides, et al., 1981) et (Nemhauser & Wolsey, 1988).

De la même manière que le B&B, cette méthode est basée sur le principe d'énumération implicite, où les sous-ensembles de solutions sont retenus ou rejetés, sans construire toutes les solutions possibles (les sous-ensembles rejetés sont ceux qui ne présentent pas d'intérêt dans la recherche de la solution optimale).

La décomposition suivant le principe d'optimalité de Bellman est définie comme suit : si (C) est un chemin optimal reliant le point A au point B (comme le montre la Figure III.4) et si C appartient à (C) alors les sous-chemins de (C) reliant le point A au point C et le point C au point B sont aussi optimaux.

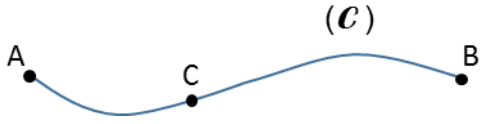


Figure III.4 : Illustration du principe d'optimalité de Bellman

La mise en œuvre de cette méthode requiert le développement d'une formulation récursive du problème. Le découpage étape par étape permet de définir la formule de récurrence. A titre d'exemple, la recherche du chemin le plus court entre deux points d'un graphe pondéré (illustré par la Figure III.5) par cette méthode se présente comme suit :

- $F(y)$: la longueur minimale de tous les chemins reliant x à y.
- $L(z, y)$: la longueur minimale de tous les chemins relient z à y.

ainsi, la formule récursive s'écrit :

$$F(y) = \min_{z \neq y}\big(F(z) + L(z,y)\big) \qquad (3.11)$$

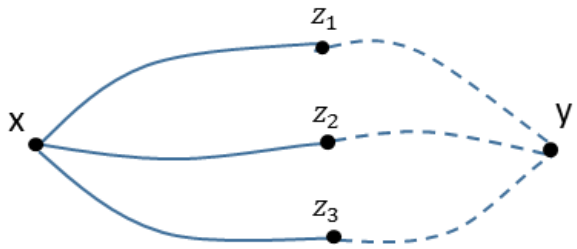


Figure III.5 : Illustration d'un graphe pour la recherche du chemin le plus court entre x et y

- **Programmation par contraintes**

La PPC a été développée vers la fin des années 1970, pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire de grande taille, principalement, en planification et ordonnancement (Mackworth, 1977) et (Haralick & Elliott, 1980). La démarche de la PPC se fait en deux étapes : 1- la modélisation du problème sous la forme d'un problème de satisfaction de contraintes « CSP », puis 2- l'utilisation active des contraintes, dans la résolution de ce dernier.

Le CSP est un problème qu'on modélise sous la forme d'un ensemble de contraintes relatifs aux variables, chaque variable prend ses valeurs dans un domaine. Ainsi, un CSP est défini par trois composantes :

- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$: l'ensemble des variables du problème.
- D : la fonction qui associe à chaque variable x_i son domaine $D(x_i)$ (i.e. l'ensemble des valeurs que peut prendre x_i).
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$: l'ensemble des contraintes. Chaque contrainte C_J est une relation entre certaines variables de X, qui restreint les valeurs que peuvent prendre simultanément ces variables.

La résolution d'un CSP consiste en l'affectation de valeurs aux variables, de façon à ce que toutes les contraintes soient satisfaites. Les notions associées à la résolution d'un CSP peuvent être synthétisées comme suit :

- L'affectation est le fait d'instancier certaines variables par des valeurs prises dans les domaines des variables.
- Une affectation est totale si elle instancie toutes les variables du problème. Dans le cas où elle n'en instancie qu'une partie, elle est partielle.
- Une affectation est consistante si elle ne viole aucune contrainte. Dans le cas où elle viole une ou plusieurs contraintes, elle est inconsistante.
- Une affectation totale consistante est une solution du problème.

L'utilisation des contraintes pour la résolution des problèmes, s'effectue à travers une technique appelée « propagation des contraintes » (Baptiste, et al., 2003). Cette technique procède par un mécanisme de déductions à partir des contraintes, afin de réduire les domaines des variables. Cependant, la propagation des contraintes à elle seule, n'est pas suffisante pour détecter toutes les inconsistances de l'espace de recherche, en particulier dans le cadre des problèmes NP-difficile. Cette démarche doit être complétée par un algorithme d'exploration de l'espace de recherche. Un schéma global de la démarche est présenté dans (Baptiste, et al., 2003).

3.2. Méthodes approchées

L'objectif des méthodes approchées est de produire des solutions réalisables de la meilleure qualité (voire optimale), sans se préoccuper de la preuve de l'optimalité. A la différence des méthodes exactes et l'un des avantages majeurs de ces approches, c'est la rapidité avec laquelle elles fournissent des solutions. En effet, elles sont en mesure de considérer la complexité des problèmes réels, posés dans l'industrie (principalement liée à la taille des données à traiter) et de fournir des solutions assez rapidement. Ces méthodes peuvent être classifiées comme suit :

- **Heuristiques**

  Une heuristique est une règle spécifique à un problème donné, qui permet de trouver une, voire des solutions réalisables, souvent loin de l'optimalité, mais le temps de réponse est très court, en contrepartie. Elles sont principalement utilisées dans les cas où il n'y a pas d'autres alternatives, pour la résolution de problèmes avec des contraintes de temps et d'espace.

- **Méthodes de recherche locale**

  La recherche est initiée à partir d'une solution existante, suivie d'une recherche de voisinage, pour améliorer la solution. Il y a trois types de recherche locale : 1- à voisinage proche « LS », 2- à large voisinage « LNS » et 3- à voisinage variable « VNS ». Ces méthodes sont décrites en détail dans (Siarry, 2014).

  Ce qui est appelé voisinage, c'est l'ensemble des solutions pouvant être obtenues par application d'une transformation (permutations ou mouvements) de la solution courante. Parmi les procédures de transformation : 1- la recherche du meilleur d'abord : qui consiste en la construction d'un arbre de recherche, où à chaque itération, le voisin sélectionné est celui qui permet l'amélioration de la solution (le premier à être trouvé). 2- la recherche du meilleur voisin : même chose que la première procédure, sauf que le meilleur voisin choisi est sélectionné à partir de tous les voisins de même niveau de l'arbre de recherche (i.e. tous les voisins sont testés et celui qui améliore le plus la solution est sélectionné).

  La solution obtenue à l'issue de l'application d'une méthode de recherche locale, est appelée optimum local.

- **Métaheuristiques**

  Les métaheuristiques permettent de trouver des solutions réalisables, de la meilleure qualité possible, en un temps raisonnable. De plus, elles sont génériques, puisqu'elles peuvent être adaptées à n'importe quel problème.

  Créées au début des années 1980, elles ont connu un développement très important ces dernières années. Elles sont conçues pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire difficiles, qui ne peuvent être résolus à travers des méthodes exactes ou des heuristiques. Formellement, selon (Osman & Laporte, 1996), une métaheuristique est un processus itératif qui pilote une heuristique subordonnée, combinée à diverses techniques, dans le but d'exploiter et d'explorer au mieux l'espace de recherche. Des stratégies d'apprentissage sont utilisées pour structurer l'information afin de trouver des solutions proches de l'optimum (voire optimales dans certains cas).

Deux familles de métaheuristiques sont à distinguer, à savoir, celles qui ne manipulent qu'une seule solution à la fois et celles qui manipulent une multitude de solutions.

- **Métaheuristiques à solution unique**

  Plusieurs métaheuristiques de ce type ont été développées. Parmi les plus utilisées et rapportées dans la littérature (Siarry, 2014), on retrouve :

  1- La procédure de recherche gloutonne randomisée « GRASP » : elle a été développée par (Feo, et al., 1994), son principe est de créer à chaque itération, une nouvelle solution, en faisant appel à un algorithme glouton aléatoire. Cette solution est améliorée avec une procédure de recherche locale. Le processus est renouvelé un nombre d'itération fois, à l'issue duquel la meilleure solution trouvée est retenue.

  2- La recherche locale itérative « ILS » : très utilisée par plusieurs auteurs, tels que dans (Johnson, 1990), elle applique le même principe que GRASP. Cependant, la solution de départ pour chaque itération est obtenue suite à l'application d'une perturbation aléatoire au niveau de la meilleure solution courante.

  3- Le recuit simulé « SA » : développé dans (Kirkpatrick, et al., 1983), il s'inspire d'un processus métallurgique qui consiste en le recuit thermique. Le principe adopté permet de sortir des optimums locaux et d'augmenter les chances de converger vers l'optimum global.

  4- La recherche tabou « TS » : développée dans (Glover , 1986), se base sur un processus itératif d'exploration de l'espace de recherche, en utilisant une liste « tabou » qui enregistre les dernières solutions explorées. Cette liste lui permet de sortir d'éventuels optimums locaux, ce qui peut induire le passage par des solutions de moins bonne qualité, mais dans le but de converger vers l'optimum global.

- **Métaheuristiques à population de solutions**

  Principalement inspirées par des phénomènes observés dans la nature, ces métaheuristiques présentent de très bonnes performances dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire difficiles. Dans ce qui suit, quelques rappels sur les métaheuristiques les plus connues de ce type :

  1- Algorithme génétique « GA » : introduite dans (Holland, 1975), cette métaheuristique démarre à partir d'une population de solutions initiale, qu'elle améliore au fur et à mesure des itérations. C'est ce qu'on appelle des algorithmes évolutionnistes. L'inspiration des GA vient de l'évolution naturelle des espèces, grâce aux croisements, sélections et mutations, pour faire évoluer la population de solutions, qu'on représente sous la forme de chromosomes, vers l'optimum. Le mécanisme de base étant le croisement à chaque itération, de deux chromosomes parents de la population (en favorisant les plus prometteurs), pour l'obtention d'un ou deux chromosomes enfants. Aussi, des mutations à ces chromosomes enfants peuvent être appliquées, afin de diversifier l'espace de recherche et éviter les convergences prématurées.

2- Recherche dispersée « SS » : décrite dans (Martí, et al., 2006), cette métaheuristique fait partie des algorithmes évolutionnistes (de la même manière que les GA), sauf qu'elle y intègre un mécanisme de recherche locale. En effet, à chaque itération, elle génère un sous-ensemble de solutions composé d'éléments répondant à des critères de qualité et de diversité, appelé ensemble de référence. Les solutions de plusieurs ensembles de références sont combinées pour produire de nouvelles solutions. Par la suite, une recherche locale est exécutée pour améliorer la solution, en remplaçant les éléments les moins bons, tout en satisfaisant l'ensemble des critères de qualité et de diversité. L'algorithme s'arrête après un nombre donné d'itérations, en retenant la meilleure des solutions trouvées.
3- Optimisation par essaims de particules « PSO » : introduite dans (Eberhart & Kennedy, 1995), cette métaheuristique s'inspire des mouvements coordonnés qu'on retrouve dans le monde des animaux et des insectes. Tel que les déplacements en groupe des oiseaux, dans le but de chercher de la nourriture ou d'éviter des prédateurs. Les algorithmes de type PSO font collaborer les individus de l'essaim (appelés particules), dans le but de converger progressivement vers l'optimum global, à partir de plusieurs optimum locaux. La démarche adoptée pour cela, s'appuie sur une équation de mouvement pour les particules, dont les éléments sont : 1- à l'initialisation, chaque particule est positionnée aléatoirement, 2- la vitesse actuelle de la particule (pondérée par un facteur appelé inertie), 3- sa meilleure solution (pondérée par un facteur tiré aléatoirement) et 4- la meilleure solution obtenue dans son voisinage (aussi pondérée par un autre facteur tiré aléatoirement). A savoir que le PSO est plus performant pour les problèmes en variables continues.
4- Optimisation par les colonies de fourmis « ACO » : introduite dans (Dorigo, et al., 1991), cette métaheuristique a connu beaucoup de développement, du fait des résultats intéressants obtenus lors de la résolution de plusieurs problèmes d'optimisation difficiles. Comme le PSO, l'ACO s'inspire aussi du comportement du monde des insectes, à travers les colonies de fourmis et les phénomènes d'auto-organisation et d'émergence qui les caractérisent. Le principe emprunté par l'ACO aux fourmis est celui qu'elles déploient lors de la recherche de sources de nourriture et son acheminement jusqu'à leur nid. Une fois la source trouvée, les fourmis laissent derrière elles, des traces de phéromones pour guider les autres fourmis. La particularité liée à l'évaporation des phéromones, conjuguée à l'exploration de plusieurs chemins, explique l'attrait des fourmis vers le chemin le plus court. En effet, celui-ci se trouve avec la plus grande concentration de phéromones, puisqu'il sera le plus emprunté le plus rapidement, au détriment des autres chemins qui sont délaissés progressivement, en raison du phénomène d'évaporation des

phéromones. Tout cela, sans que les fourmis n'aient une vision globale du trajet.

Appliqué à un problème d'optimisation, ce principe se présente comme un mécanisme de construction d'une population de solutions à chaque itération. En effet, chaque fourmi construit une solution complète et laisse une trace de phéromone sur le chemin de construction de la solution, qui est proportionnelle à la valeur de la fonction objectif (dans le cas d'un problème de maximisation et inversement dans le cas d'une minimisation). Lors de la construction de la solution, chaque fourmi sélectionne la prochaine composante de la solution qu'elle construit, en fonction des traces de phéromones précédentes (exploitation de l'expérience acquise), ainsi qu'en fonction d'une heuristique (orientée ou aléatoire) qui permet d'explorer d'autres solutions (diversification) et ne pas converger et rester bloqué dans des optimums locaux.

Pour le problème d'affectation généralisée, on compte plusieurs tentatives de résolution avec des algorithmes de type ACO, qui ont présenté de très bonnes performances (comme cité dans la section 2.1 de ce chapitre).

Dans ce travail de recherche, nous allons adapter l'ACO pour résoudre le FRTSP.

4. Problèmes de replanification

L'absorption des perturbations qui sont assez fréquentes, durant les périodes d'exploitation, est l'un des challenges les plus importants pour les entreprises. Elle a un impact direct sur la compétitivité et la performance de l'entreprise. Ainsi et pour faire face aux perturbations, plusieurs outils d'aide à la décision existent, dont des solutions de replanification qui améliorent sensiblement la gestion des perturbations (Cauvin, et al., 2009). Assez répondu en gestion de production, la replanification trouve beaucoup d'applications, dans les différents niveaux de la chaine logistique.

Dans ce travail de recherche, nous allons considérer les changements en cours d'exploitation, en particulier celles concernant la demande, en utilisant une approche classique d'horizon glissant, pour re-planifier le FRTSP. Cette approche est basée sur une formulation mathématique de type programmation linéaire, avec des caractéristiques d'exécution spécifiques et dont l'objectif est de minimiser les changements, par rapport aux décisions prises lors de la prise de décision originale.

Le modèle mathématique sujet de la replanification est soit un PL, PLNE ou PLVM, reprenant les caractéristiques présentées dans la section 2.2.1. Cependant, sa mise à jour requiert l'utilisation de l'horizon glissant (Hétreux, 1996), pour la prise en charge des changements de la demande.

4.1. Le principe d'horizon glissant et résolution d'un problème de replanification

Le principe d'horizon glissant a été décrit et utilisé par plusieurs auteurs, pour prendre en charge plusieurs problématiques réelles. Dans (Chand, et al., 2002), une revue bibliographique des travaux majeurs, ayant contribué à l'essor de cette approche.

Dans toutes les activités liées à la production et à la logistique, les données concernant les commandes des clients ne sont que rarement connues avec certitude. Lorsque c'est le cas, la demande est connue sur un horizon de temps restreint (l'étendue de l'horizon varie en fonction de l'activité et de l'industrie concernées). D'où, le premier paramètre à définir, c'est l'horizon de planification « H_P ». Pour comprendre le principe de cette approche dans le cas général, on suppose que cet horizon est composé de « P » périodes.

De plus, même sur une période de temps donnée, aussi bien en production qu'en logistique (plus globalement), les aléas et perturbations (telles que des défaillances humaines ou matérielles, voire évènements exceptionnels externes) sont des éléments avec lesquels les entreprises doivent composer. La préservation de leur performance est fortement liée à leur capacité de prise en considération de ces derniers. C'est pourquoi chaque nombre donné de périodes « ΔP », un réajustement des décisions prises au plan précédent, doit être effectué. Pour cela, un nouveau paramètre est défini, c'est le pas de planification « r ». En théorie, la valeur maximale que peut prendre r est H_P, cependant et selon (Thierry, 2003), il est préférable d'avoir une fréquence de planification plus importante, dans le but de prendre en compte les aléas au plus tôt. Même si dans (Galasso, 2007), l'auteur est d'accord avec ce raisonnement, il note toutefois que choisir un pas de planification long, entrainant un gel des décisions lointaines, permet d'assurer la stabilité des plans précédents.

Enfin, même si une entreprise doit intégrer les conséquences de l'occurrence d'aléas de tous les types, dans ses plans d'activités, il ne reste pas moins nécessaire d'assurer la stabilité des systèmes sur un certain horizon, où les décisions prises lors du dernier plan, ne peuvent être modifiées. D'où, la dernière notion à définir est l'horizon gelé « H_G ». L'intérêt majeur de H_G est la limitation de la nervosité du système, à travers la non considération d'éventuelles modifications tardives (Fontan, et al., 2001). A savoir que le complément de H_G dans H_P est appelé l'horizon libre « H_L » (i.e. les décisions prises pour une application dans H_L peuvent être remises en question par la nouvelle planification).

Les différentes notions définies, sont illustrées sur une échelle temporelle, par la Figure III.6. Trois itérations sont schématisées, telles que :

- L'itération 1 représente le plan initial, qui est établi à travers la résolution d'un modèle mathématique, dont l'objectif est d'obtenir le meilleur plan initial, au vu des données disponibles.
- Les itérations 2 et 3 (et le suivantes) représentent les plans réajustés, en considérant les changements durant la période r écoulée et ayant un impact sur les périodes futures. Ces plans sont obtenus à travers la résolution d'un modèle mathématique de

replanification, dont l'objectif est de minimiser les changements engendrés par la prise en compte des perturbations.

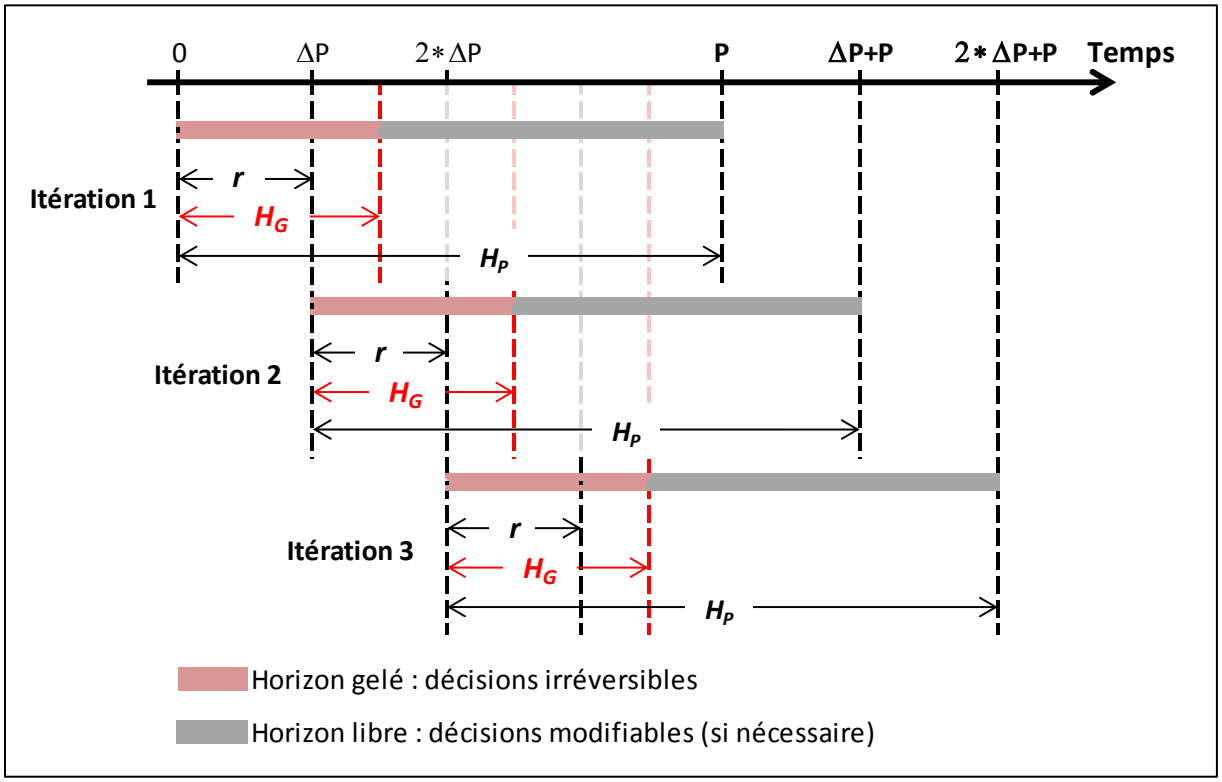


Figure III.6 : Illustration de l'approche par horizon glissant

4.2. La replanification dans la gestion de la chaine logistique

Aux différents niveaux de la chaine logistique, plusieurs travaux ont traités les aspects dynamiques, ainsi que l'intégration des aléas, par des approches de replanification implémentées en utilisant plusieurs outils. En effet, l'environnement tout au long de la chaine logistique est incertains et souvent affecté par des évènements aléatoires tels que : les commandes de dernière minute, annulation de commande, retard dans la production, machines en panne, rupture de stock des matières premières, etc. Tous ces évènements peuvent rendre les plans d'approvisionnement et de production initiaux obsolètes. Pour les rétablir et les rendre à nouveau opérationnels, la replanification offre un outil assez performant. Parmi les premiers travaux menés sur cette approche en production, ceux de (Wu, et al., 1992), où il s'agit de procéder à la replanification des activités d'un atelier de production, soumis à des perturbations.

Dans un contexte de production, plusieurs travaux ont décliné des approches de replanification dans le cadre d'ateliers de production, avec diverses organisations (job shop, machines parallèles, machine unique…) tels que les articles de (Guo, et al., 2016) et (Akkan, 2015) qui traitent des problèmes de replanification, dans un contexte d'atelier à une seule machine. Dans le premier article, les pièces produites peuvent nécessiter des retouches sur la machine (pour rectifier certains défauts). Le problème étant de les insérer dans le plan de production initial, avec un objectif de minimisation des temps d'attente. Quant au second article, il s'agit d'intégrer de nouvelles commandes, avec un objectif de minimisation du retard de production maximum. Dans un autre article (Yin, et al., 2016), un atelier à machines

identiques parallèles est considéré. Dans un premier temps, un plan de production initial est établi, avec un objectif de réduction de la durée totale de production. Puis, durant la phase de production, des perturbations liées aux pannes des machines sont considérées. Un modèle de replanification est proposé, avec un objectif de réduction des changements par rapport au plan initial. Pour cela, les dates d'achèvement de chaque tâche dans le premier plan, deviennent des dates échues du modèle de replanification, ainsi, l'objectif de ce dernier devient la réduction des retards « virtuels » de production.

Dans (Sabar, et al., 2009), les auteurs ont proposé une approche multi-agents, pour traiter un problème de replanification de l'affectation du personnel dans un centre d'assemblage. L'affectation s'effectue en fonction de la compétence des employés, de leur mobilité et de leur préférence, avec un objectif de minimisation des coûts opérationnels et de l'insatisfaction des employés. Les perturbations considérées pour la replanification de l'affectation sont celles relatives à l'absentéisme des employés. Le principe adopté dans cet article est d'établir un plan d'affectation initial, avant le début de la période de production. Puis, au début de la production et après constat des personnes absentes de leur poste de travail, le modèle de replanification n'est lancé que sur les activités devant être exécutées par les absents. Ces activités doivent être affectées au personnel présent avec les mêmes contraintes et objectifs, que dans le plan initial. Cette approche a montré une bonne performance, tant sur le plan de la qualité de la solution proposée, que sur le temps de calcul nécessaire à l'élaboration du nouveau plan.

Un autre problème de planification logistique a été étudié dans (Silva, et al., 2008). Ce problème concerne la considération d'annulation de certaines commandes. L'article effectue une comparaison entre deux méthodes de résolution : GA et ACO, dans la résolution de divers problèmes d'optimisation (problème du voyageur de commerce, problème d'affectation quadratique, problème de tournée de véhicules et problème de job-shop), dans un contexte statique, puis dynamique (avec replanification dans le cas des perturbations). Cette étude a montré que les deux métaheuristiques étaient performantes (i.e. elles fournissent des solutions équivalentes), cependant, la métaheuristique GA fournit plus rapidement les solutions dans le cas des problèmes statiques, à contrario, l'ACO est beaucoup plus rapide dans le cas dynamique, puisqu'elle capitalise les calculs du cas statistique, grâce à la phéromone, pour poursuivre la recherche et fournir un réajustement de la solution.

D'autre part, et dans un contexte où le challenge environnemental est au centre de toutes les préoccupations, dans (Salido, et al., 2017), les auteurs proposent un modèle de replanification dans un atelier de type job-shop. Mêmes préoccupations que celles présentées par les autres travaux, à savoir, dans un environnement dynamique, les perturbations font partie du quotidien de l'entreprise. Suite à l'occurrence de ces perturbations, les plans initiaux ne sont plus optimaux et requiert des réajustements. Pour cela, il est proposé un modèle de replanification implémenté à travers un algorithme mimétique, dont l'objectif est double. En effet, il s'agit de préserver le temps de production total, tout en réduisant la consommation énergétique sur la période impactée par les changements dus à la replanification.

Dans (Vieira, et al., 2003) et (Herrmann, 2006), une revue de littérature de plusieurs travaux en replanification a été réalisée et une formalisation des concepts et définitions usités a été proposée.

4.3. La replanification dans le transport ferroviaire

La replanification dans la gestion des perturbations en temps réel, dans le secteur du transport ferroviaire, est un domaine très actif dans la recherche opérationnelle (Cacchiani, et al., 2014). Cela concerne principalement, le transport ferroviaire de voyageurs. Dans le cas d'occurrence des perturbations, les spécificités du système ferroviaire et de son exploitation, font qu'il est nécessaire de procéder à une replanification séquentielle, comme suit :

1- Replanification de la circulation des trains : le planning de circulation des trains contient les itinéraires des trains (i.e. stations de départ et d'arrivée, et les stations intermédiaires), ainsi que les heures de départ et d'arrivée. Les problématiques soulevées à ce niveau sont très complexes et peu d'algorithmes sont en mesure de considérer cette complexité (Sato, et al., 2013). Ceci oblige les transporteurs à faire appel à des experts, pour procéder aux replanifications, en fonction des perturbations et des différents paramètres. Pour répondre à ce challenge, plusieurs travaux de recherche sont menés à ce niveau, considérant plusieurs types de perturbations et appliqués à diverses configurations de réseaux ferroviaires (lignes uniques, multi-lignes, transport urbain, ou encore à grande vitesse).

   Dans un contexte d'un système ferroviaire performant et durable (i.e. caractérisé par une haute sécurité et accessibilité, une haute performance énergétique et offrant des services fiables et ponctuels), dont l'amortissement des coûts importants qu'il génère, doivent être couverts par une fréquence élevée des trains. Le challenge de la prise en charge des conséquences des perturbations éventuelles est d'autant plus important. Au-delà de la nécessité de fournir une bonne solution lors de la replanification du planning des trains, dans (Törnquist Krasemann, 2012) une heuristique qui fournit des solutions rapidement a été développée, pour répondre aux exigences liées à ce contexte. Dans (Altazin, et al., 2017), la replanification est proposée pour la réduction de la propagation des retards en présence de perturbations. Un PLNE est développé pour réajuster le plan de circulation des trains, en supprimant certains arrêts. L'objectif étant la minimisation du temps de retour au plan de transport théorique, suite à l'occurrence d'une perturbation, tout en réduisant le temps d'attente des passagers. D'autres auteurs ont proposé des heuristiques dans ce même contexte, tels que (Dollevoet & Huisman, 2014) avec un objectif de minimisation du temps de voyage des passagers. Dans (Corman, et al., 2012), les auteurs considèrent un double objectif de minimisation des retards des trains et correspondances ratées des voyageurs.

   Etant difficile d'évaluer l'optimalité des solutions fournies par les heuristiques et les métaheuristiques, certains auteurs ont proposé, dans des contextes spécifiques, des PL en variables mixtes ou des PLNE. L'objectif est de minimiser les retards des trains ou l'insatisfaction des voyageurs, tel que dans (Xie & Li, 2012), où les auteurs ont considéré les données récoltées par les trains précédents à travers un PLNE, pour ajuster au mieux le planning de circulation des trains à venir. Dans (Pellegrini, et al.,

2012), les auteurs ont proposé un PL en variables mixtes pour minimiser les retards des trains. Même chose dans (Rodriguez, 2007), où l'auteur a proposé deux modèles PPC, pour planifier le passage des trains par des nœuds ferroviaires. L'objectif étant de minimiser les retards liés aux conflits.

2- Replanification du matériel roulant (trains, wagons et locomotives) : la recherche au niveau de la replanification des ressources utilisées par le transport ferroviaire, aussi bien matérielles (infrastructure et matériel roulant) qu'humaines, n'est pas aussi dense que dans le cas précédent (Nielsen, et al., 2012). Dans (Huisman, et al., 2005), les auteurs ont fait une revue de littérature des travaux dans ce domaine.

   Un premier modèle commercial a été élaboré pour le compte de la Société Nationale des Chemins de Fer Français « SNCF », par SABRE Technology Solutions (Ben-Khedher, et al., 1998), pour la planification aux niveaux stratégique et tactique, de l'activité de transport ferroviaire à grande vitesse. Dans un premier temps, ce modèle propose des plannings basés sur les prévisions de la compagnie. Dans un second temps, un réajustement des plannings et du matériel roulant utilisé, est effectué en fonction de la variation de la demande effective et des dernières prévisions.

   Dans (Nielsen, et al., 2012), une approche par horizon glissant est proposée, pour la replanification du matériel roulant, dans le cas d'une perturbation majeure, au niveau du système ferroviaire. L'objectif du modèle de replanification développé, étant la minimisation de la déviation dans l'inventaire de tous les types de matériels roulants et dans toutes les stations de la ligne, par rapport à l'inventaire du plan d'activité initial.

3- Replanification du personnel : la replanification du personnel est un axe de recherche assez récent, qui intervient plus, dans les cas de perturbations de type majeur (ou interruption de service). Un premier travail de recherche (Walker, et al., 2005), s'est intéressé à l'établissement des plannings de circulation des trains, en planifiant le matériel roulant et les équipages des trains (organisés par équipe) simultanément, avec un objectif de minimisation des temps morts des trains, durant les heures d'activité de chaque équipage. Un modèle mathématique de type PLNE a été développé pour cela. Puis, lors de l'occurrence de perturbations majeures, un second PLNE, construit sur la base du premier, a été établi avec un objectif de minimisation des changements par rapport au plan initial. Le problème est résolu par une approche de type génération de colonnes.

   Dans un autre article (Veelenturf, et al., 2012), la replanification du personnel se réduit à celle des conducteurs de trains. La replanification à ce niveau, peut nécessiter une replanification au niveau du matériel roulant, voire, au niveau du planning de circulation des trains. En effet, s'il n'y a pas de conducteur pour conduire un train planifié, il sera nécessaire de procéder à un réajustement. Cette étude se focalise sur l'occurrence de perturbations majeures. Pour cela, le modèle de replanification se présente sous la forme d'un PLNE, dont la fonction « objectif » à minimiser, se compose de trois membres : la déviation par rapport au plan des conducteurs initial, les pénalités liées à l'annulation de certaines tâches des conducteurs, ainsi que les pénalités liées aux retards. Le problème est résolu par une approche de type génération de colonnes, couplée à une heuristique lagrangienne. Pour réduire les temps de calcul, seul un nombre limité de trains est considéré lors de chaque replanification.

Dans un autre contexte, considérant des perturbations mineures, durant la période d'exploitation, dans (Carosi, et al., 2015), les auteurs proposent l'utilisation de la recherche tabou, dans la planification des trains en temps réel, dont l'objectif est l'optimisation de la régularité du service. Dans un second temps et pour faire correspondre le planning des trains avec celui du personnel, il est proposé un modèle de replanification du personnel, avec un objectif de minimisation des heures de travail supplémentaire. Ce modèle est résolu par une approche de type génération de colonnes.

Dans le cadre du présent travail, nous allons nous focaliser sur la replanification du service de transport de marchandises par les trains, en milieu urbain. Cependant, nous ne considérons pas la replanification des trains eux-mêmes. Les changements dans le planning des trains (qui dépend du service original de transport de voyageurs) sont des données d'entrées pour notre modèle.

5. Simulation à évènements discrets – ARENA

L'une des interfaces les plus réussies entre la recherche opérationnelle et l'informatique, est la simulation à évènements discrets (Fu, 2002). Comme outil d'aide à la décision, la simulation joue un rôle très important. En effet, cette technique aide à mieux cerner les conséquences des choix potentiels d'actions, afin de mieux les maîtriser et d'améliorer ainsi, le pilotage de la chaine logistique. Dans ce travail, les avantages de l'utilisation de la simulation interviennent à plusieurs niveaux, tels que :

- L'étude de l'intégration d'un nouveau service, dans un système existant, dont une expérimentation sur le terrain serait trop coûteuse.
- Formaliser la dynamique du nouveau service et étudier les flux y afférents.
- L'étude de différents scénarii, traduisant plusieurs stratégies de gestion du nouveau service.
- Le couplage avec des modèles d'optimisation, pour évaluer les performances de la solution optimale au vu de la dynamique du système, en considérant d'autres aspects.
- Utiliser le modèle de simulation pour valider les modèles d'optimisation.
- Les résultats visuels sont un moyen de compréhension et de confiance, qui permettent de faire évoluer le modèle et, par conséquent, le nouveau service proposé.
- Le modèle de simulation est un démonstrateur pour les décideurs des parties prenantes.

5.1. Généralités sur la simulation

On trouve dans la littérature plusieurs définitions de la simulation. Ces définitions sont parfois proches, équivalentes ou complémentaires. Une synthèse de différentes définitions de la simulation est proposée dans (Bakalem, 1996) : *« la simulation est une méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène ou un système à étudier par un modèle informatique plus simple mais ayant un comportement analogue »*. Ce modèle permet de réaliser des tests, afin de comprendre le comportement dynamique du système étudié. Il est implémenté sur ordinateur, et évolue d'un état vers un autre en fonction de certaines règles de changement d'état bien définies. La simulation est une technique expérimentale appropriée à

l'étude des systèmes de grande taille composés de plusieurs éléments en interaction. Elle permet ainsi, de répondre à certains problèmes, à chaque fois que l'expérimentation en grandeur nature, se révèle impossible et/ou trop coûteuse (Carrie, 1988).

Simuler revient à créer un modèle informatique fidèle au système étudié de par son comportement. A l'aide du modèle défini, on peut mettre au point de véritables plans d'expériences pour faire des tests sur certaines décisions à prendre, certains paramétrages modifiés (Zeigler, 1976). Selon l'article (Pritsker, et al., 1989), l'objectif de la simulation sur ordinateur est de reproduire et anticiper, prédire le comportement dynamique d'un système existant (ou futur), modélisé de façon virtuelle, donc sans aucun risque.

Le processus de simulation détaillé a été décrit dans (Pritsker, 1986), il se compose de dix étapes, suivant un processus incrémental. Ce dernier peut être schématisé à travers la Figure III.7.

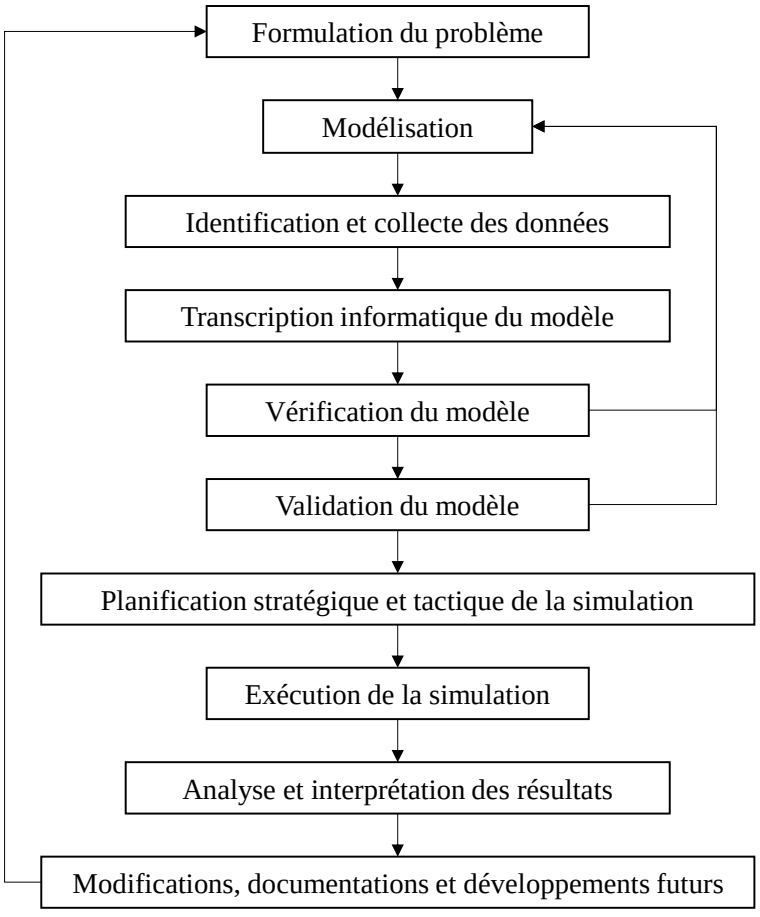


Figure III.7 : Schématisation du processus de simulation (Pritsker, 1986)

5.2. Démarche de réalisation d'un modèle de simulation

La réalisation d'un modèle de simulation requiert au préalable, la définition des objectifs de l'étude, ainsi que des simplifications de la réalité qu'il est raisonnable de faire (Le Moigne, 1990). Réalisé en fonction des objectifs de l'étude, le modèle de simulation permet d'obtenir des résultats numériques (éventuellement statistiques) qui sont ensuite analysés pour permettre la prise de décisions concernant le système réel comme le montre la Figure III.8.

La démarche de réalisation d'un modèle de simulation est structurée en plusieurs étapes, dont le nombre varie d'un auteur à un autre (Le Moigne, 1990), (Anu, 1997), (Vernadat, 1999), etc. Nous proposons de regrouper les différentes étapes, en trois étapes principales :

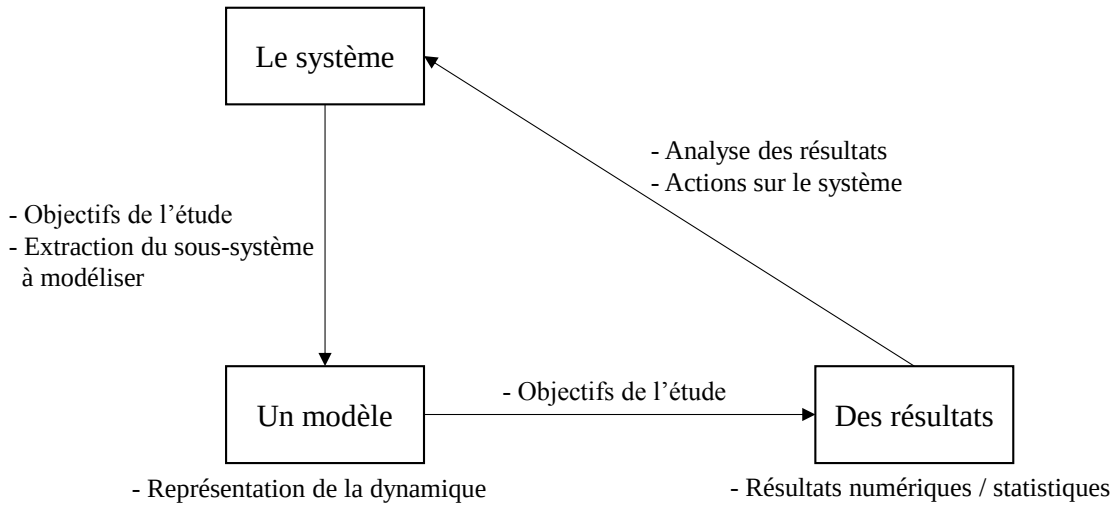


Figure III.8 : Réalisation d'un modèle de simulation

1- La première étape consiste à décrire précisément les entités du modèle et ses règles de gestion. On décrit ensuite la dynamique du système. Dans le cas d'un système simple avec un faible nombre d'entités, une représentation graphique peut s'avérer suffisante. Dans le cas de systèmes plus complexes, on peut être amené à utiliser des outils de formalisation comme les réseaux de Petri. Cette étape de formalisation est très importante car elle évite de remettre en cause le modèle de simulation ultérieurement.
2- La deuxième étape concerne le codage. Elle s'appuie sur la description du système réalisée précédemment.
3- La troisième étape concerne la vérification du programme afin de s'assurer qu'il fait ce que l'on veut qu'il fasse. Il s'agit de vérifier le code et sa logique. La validation du modèle est une étape très importante et délicate car, dans le cas d'un système complexe, il n'existe pas de méthode permettant de s'assurer que le modèle représente correctement le système de départ. On s'appuie alors sur :
    - Des techniques d'animation du modèle montrant les entités en déplacement conformément aux règles de fonctionnement.
    - Des comparaisons avec des résultats mathématiques théoriques lorsque ces derniers sont disponibles.
    - Des comparaisons avec les résultats fournis par des modèles conçus indépendamment.
    - Enfin, dans le cas d'un modèle de système existant, il faut souvent recourir à des spécialistes du domaine pour interpréter les résultats obtenus par simulation, et vérifier qu'ils sont en conformité avec le comportement du système réel.

Cette démarche peut être formalisée par la Figure III.9.

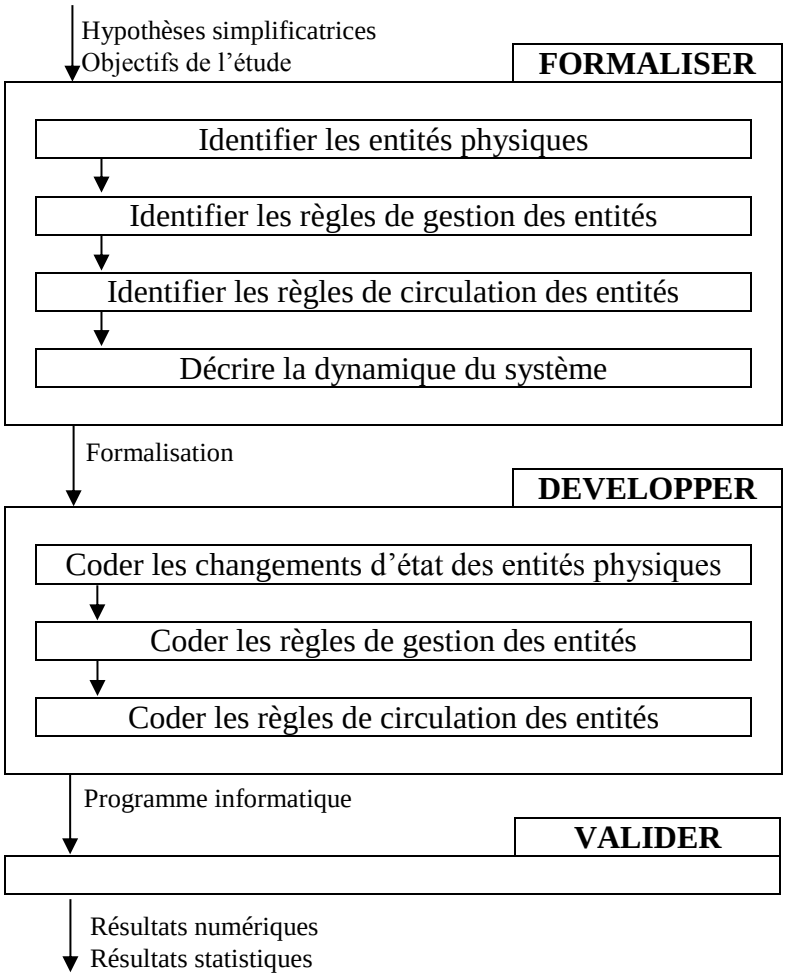


Figure III.9 : Détail de la démarche pour la réalisation d'un modèle de simulation

5.3. Simulation avec ARENA

ARENA est un logiciel dédié de modélisation des flux, en considérant des files d'attente et des ressources, et de simulation des systèmes de production, des procédés, des chaines logistiques, de la distribution, des stocks, etc. Il présente une interface graphique simplifiant son usage, en étant un simulateur de haut niveau, et offre de grandes possibilités de modélisation, en utilisant le langage de simulation SIMAN et le script Microsoft Visual Basic. Les composants d'ARENA sont programmés en SIMAN, ce qui permet de créer des blocs spécifiques si nécessaire et octroie, ainsi, plus de flexibilité au simulateur. Le simulateur comprend des animations graphiques et différents composants de suivi de la simulation et d'analyse des résultats, tels que des tableaux et des courbes. Le logiciel ARENA ainsi que ses différentes fonctionnalités, sont décrites en détail dans (Altiok & Melamed, 2007) et (Rossetti, 2015).

5.3.1. *Eléments d'un modèle de simulation avec ARENA*

Dans un modèle de simulation, nous trouvons :

- **Les entités :** ce sont les premiers éléments à identifier dans un système, pour pouvoir les modéliser. Les entités sont les objets dynamiques de la simulation. Elles sont créées et peuvent être dupliquées, regroupées ou disposées du système. Selon le

système à modéliser, les entités représentent des éléments réels ou fictifs. Elles peuvent modéliser les pannes d'une machine donnée. Comme elles peuvent être assimilées à des pièces mécaniques, des personnes, des encours de production, etc.

- **Les attributs :** ils servent à personnaliser les entités. Un attribut est généralement commun entre toutes les entités, mais sa valeur change d'une entité à une autre. De ce fait, les attributs sont considérés comme des variables locales pour chaque entité.
- **Les variables (globales) :** les variables contiennent des informations sur le système. Nous distinguons deux types de variables globales :
  - Les variables prédéfinies (états des files d'attente, états des machines, etc.).
  - Les variables définies par l'utilisateur (variables spécifiques au modèle).

  Contrairement aux attributs, les variables n'appartiennent pas à une entité spécifique, mais à tout le système.
- **Les ressources :** une ressource est affectée à une entité, afin de la transformer, de lui rajouter de la valeur ou juste pour la faire attendre. Une ressource peut être une personne, une machine, etc. Elle peut contenir un ensemble de serveurs identiques en parallèle.
- **Les files d'attente :** lorsqu'une entité doit attendre la libération d'une unité appartenant à une ressource, elle est placée dans une file d'attente. Cette dernière se caractérise par une capacité et une règle de priorité.
- **Les accumulateurs des statistiques :** ils servent à mesurer les différentes grandeurs et indices de performance. Parmi eux, nous distinguons :
  - Le temps moyen de séjour des entités dans le système.
  - Le temps de séjour des entités dans une file d'attente.
  - Le nombre moyen d'entités dans une file d'attente.
  - Le taux d'occupation d'une ressource.

  Les accumulateurs se basent sur le temps actualisé (TNOW), pour leur calcul.
- **Les évènements :** un évènement est une action de durée nulle, suite à laquelle, les valeurs des attributs, des variables ou des accumulateurs sont changées. Nous citons comme exemples d'évènements :
  - L'entrée de nouvelles entités dans le système.
  - La fin de traitement d'une tâche.

  Dans ARENA, les évènements programmés pour une simulation sont stockés dans un calendrier d'évènements. Pour chaque futur évènement, on enregistre dans le calendrier des évènements :
  - Une identification de l'entité concernée.
  - Le temps d'exécution de l'évènement.
  - Le type d'évènement.

  Les évènements dans le calendrier sont triés selon leurs dates d'occurrence, de manière à ce que les prochains évènements soient les premiers dans la liste. Lorsque la date d'un évènement arrive, son enregistrement est effacé de la liste du calendrier des évènements, et les informations que contient son enregistrement sont utilisées pour produire l'évènement voulu.
- **L'horloge de la simulation :** le temps actualisé de la simulation est contenu dans la variable « horloge de la simulation ». Cette variable ne balaie pas toutes les valeurs du

temps. Elle interagit avec le calendrier des évènements et elle actualise sa valeur uniquement lorsqu'un évènement se produit. Ceci pour éviter un comptage intégral en vain, puisque généralement nous n'avons pas besoin des valeurs du temps entre évènements. Cependant, cette manière de faire présente l'inconvénient de « sauter » les conditions temporelles.

- **Le générateur de nombres aléatoires « GNA » :** l'efficacité du simulateur à donner des résultats valides et proche de la réalité, est directement liée à sa capacité à générer l'aléa. La génération de l'aléa par un programme informatique, permet d'obtenir des nombres pseudo-aléatoires. Le principe consiste à générer des nombres, d'une distribution continue et uniforme entre 0 et 1. Les nombres générés sont des observations. Par la suite, et selon la loi choisie par l'utilisateur, les valeurs correspondantes des variables aléatoires seront calculées par la fonction inverse de la loi dans le cas continu, et par une décomposition en intervalles, des probabilités d'occurrence de chaque valeur que peut prendre la variable aléatoire, dans le cas discret.

  Les dernières versions d'ARENA utilisent un nouveau code de génération de nombres aléatoires, dit CMRG (combined multiple recursive generator). Il utilise un système de flots et sous-flots, pour subdiviser un cycle de génération d'une longueur de $3.1 * 10^{57}$. Lorsque nous aurons à effectuer plusieurs réplications, ARENA bascule automatiquement d'un sous-flot à l'autre, lors de chaque nouvelle réplication.

5.3.2. *L'application Microsoft Visual Basic « VBA » dans ARENA*

La flexibilité d'ARENA est consolidée par l'utilisation du langage de programmation Microsoft Visual Basic. Ce dernier est intégré dans ARENA et peut automatiser certaines de ses fonctionnalités, tout en intégrant la possibilité de faire appel aux fonctions de logiciels tierces.

La programmation en VBA peut être utilisée dans ARENA de deux manières différentes :

- En insérant un bloc VBA dans le modèle logique. Ainsi, à chaque fois qu'une entité passe par ce bloc, le code correspondant s'exécute.
- En l'ouvrant avec l'éditeur de VBA directement à partir d'ARENA, et en implémentant le code au moment opportun (la Figure III.10 montre les moments opportuns d'implémentation d'un code).

Les primitives de VBA sont reliées aux différents évènements apparaissant lors d'une simulation, voire, avant le début de la simulation. Les évènements sont classés en trois grandes familles :

- Les évènements d'avant exécution de la simulation : DocumentOpen, DocumentSave…
- Les évènements d'initialisation de la simulation : RunBegin, RunBeginSimulation…
- Les évènements lors de la simulation : VBA_Block_Fire, OnKeyStroke…

Dans le cadre de ce travail, nous allons principalement utiliser des blocs VBA, associés à la fonction ModelLogic_VBA_Block_Fire. Cette dernière, s'exécute à chaque fois qu'une entité passe par le bloc VBA concerné.

1. RunBegin
   2. ARENA teste et initialise le modèle
   3. RunBeginSimulation
      4. RunBeginReplication
         5. ARENA exécute la réplication
            OnKeyStroke
            UserFunction
      6. RunEndReplication
   7. RunEndSimulation
   8. ARENA termine la simulation
9. RunEnd

Figure III.10 : Evènements VBA lors de l'exécution de la simulation

6. Couplage simulation / optimisation

Le couplage simulation / optimisation est un outil très puissant d'analyse et d'optimisation des systèmes réels complexes (Wang & Shi, 2013). La majeure partie des logiciels de simulation actuels, intègrent des modules d'optimisation, sous formes d'algorithmes heuristiques ou métaheuristiques, tels que : les algorithmes génétiques, la recherche tabou, algorithmes de recherche locale, etc. En ce qui concerne ARENA, il intègre le module d'optimisation OptQuest, qui combine trois métaheuristiques (recherche tabou, réseau de neurones et recherche dispersée), en une seule heuristique de recherche. Ceci a ouvert un champ de recherche très large, présentant un éventail riche de possibilités de couplage entre les deux approches. Le couplage simulation / optimisation a un large champ d'application, dans différents domaines, tels que : la production, la gestion des stocks, le transport, la logistique, les services, la finance, etc. Dans la littérature, on retrouve un nombre important de définitions et de descriptions des processus de couplage (direct / indirect), tel que dans : (Meketon, 1987), (Jacobson & Schruben, 1989), (Fu, 1994), (Carson & Maria, 1997), (Kleijnen & Wan, 2007), (Bierlaire, 2015), (Amaran, et al., 2016). Généralement, le couplage développé dépend grandement des caractéristiques du problème étudié. Dans (Figueira & Almada-Lobo, 2014), les auteurs ont réalisé un vaste travail de synthèse, des différentes démarches qui ont été développées dans ce domaine et ont présenté des classifications à plusieurs échelles. Ces différentes classifications ont été consolidées dans (Borodin, et al., 2017) et structurées en trois types de couplage possibles, comme suit :

- L'optimisation pour la simulation : ce premier type de couplage, consiste à optimiser le système étudié, à travers l'optimisation de son modèle de simulation. Pour cela, la simulation évalue la performance de plusieurs configurations, que propose le modèle d'optimisation, dans le but de trouver celle qui produit la meilleure solution. La démarche est itérative, et teste les propositions du modèle d'optimisation, jusqu'à l'obtention de celle qui fournit des solutions satisfaisantes. Généralement, le processus d'optimisation est interne au logiciel de simulation.

  La Figure III.11 présente la démarche de ce type de couplage.

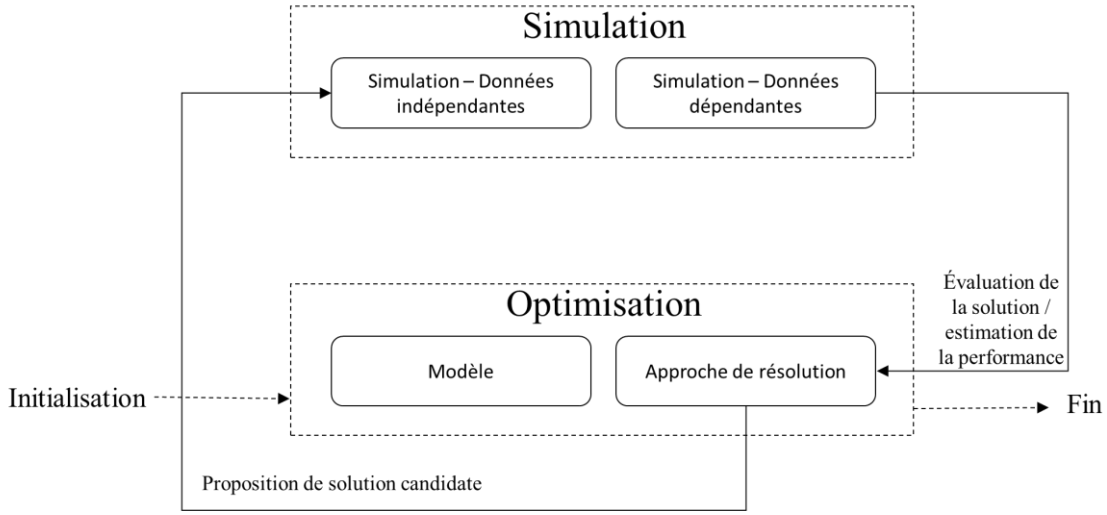


Figure III.11 : Illustration de la démarche de couplage – optimisation pour simulation (Borodin, et al., 2017)

- La simulation pour l'optimisation : ce type de couplage est mis en œuvre, principalement, dans le cadre de la programmation stochastique. L'utilisation de la simulation permet soit :
  - La génération de données suivant des scénarios aléatoires.
  - La reproduction de différentes configurations d'un système sujet à des perturbations. Dans ce cas, la simulation permet la validation des solutions fournies par l'optimisation stochastique, ou bien le réajustement des modèles d'optimisation. Ceci est rendu possible, par la possibilité d'effectuer un nombre important de réplications, sur le modèle de simulation.

  La Figure III.12 présente la démarche de ce type de couplage.

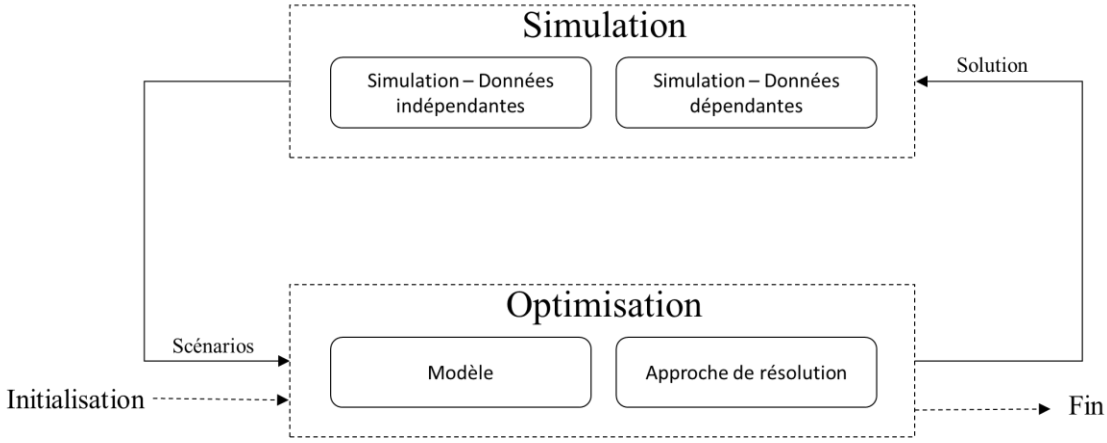


Figure III.12 : Illustration de la démarche de couplage – simulation pour optimisation (Borodin, et al., 2017)

- La simulation et l'optimisation : la simulation permet d'évaluer les performances de plusieurs règles décisionnelles, sans pouvoir construire des solutions, et encore moins de les améliorer. A la différence des deux types de couplage précédents (le premier : l'optimisation fournit les paramètres du modèle de simulation et le second : la simulation fournit les données pour le modèle d'optimisation), ce type de couplage, intègre les deux approches, de manière à optimiser les prises de décision du système

étudié, en cours de simulation. Peu de travaux se sont intéressés à ce type de couplage. Parmi ces travaux, nous citons celui développé dans (Vamanan, et al., 2004), où les auteurs se sont intéressés à la gestion d'une chaine d'approvisionnement, modélisée et simulée avec ARENA. La prise de décision s'effectue grâce à un couplage avec un modèle d'optimisation, implémenté sur CPLEX. Ainsi, la démarche complémentaire en temps réel, issue du couplage des deux logiciels, se présente comme suit :

- ARENA permet la simulation du fonctionnement de la chaine d'approvisionnement.
- CPLEX permet l'optimisation d'un problème logistique et de stockage.

Un autre travail intéressant dans ce domaine, a été réalisé dans (Almeder, et al., 2009). Partant du constat que la majorité des problèmes de gestion de la chaine logistique sont pris en charge : soit à travers la simulation à évènements discrets, soit à travers la programmation linéaire (principalement, en variables mixtes), les auteurs proposent un couplage de ces deux approches, suivant un processus itératif. En effet, alors que la PL représente de manière simplifiée les problèmes étudiés, la simulation prend en charge, aussi bien les éléments non linéaires, que les éléments stochastiques. Ainsi, il est proposé de générer les données initiales du système complexe étudié à travers la simulation, et de les traiter par le modèle d'optimisation. Les résultats de l'optimisation sont traduits en règles décisionnelles pour faire tourner le modèle de simulation. Les auteurs ont utilisé le simulateur « AnyLogic » couplé au solveur « Xpress ». Les conclusions de cette étude montrent que cette démarche, présente certains avantages relativement aux démarches classiques. A titre d'exemple :

- Des résultats compétitifs sont générés beaucoup plus rapidement, que si un PL en variables mixtes, dans un environnement stochastiques, avait été utilisé.
- Aussi, cette démarche permet la modélisation et la résolution de problèmes plus réalistes.

Cependant, quelques limites sont aussi mentionnées, telles que le manque de références théoriques sur cette démarche concernant :

- Les éléments à inclure dans le modèle d'optimisation et celles prises en charge par le modèle de simulation.
- La traduction des solutions du modèle d'optimisation en règles décisionnelles.
- Les avantages de l'utilisation de cette démarche, comparativement à des heuristiques ou métaheuristiques, qui peuvent produire de bonnes solutions rapidement.

La Figure III.13 présente la démarche de ce type de couplage.

Dans ce travail de recherche, le problème étudié met en interaction plusieurs types d'entités et de files d'attentes (relatifs aux marchandises et aux trains). De plus, les flux relatifs aux deux entités sont indépendants et, à travers des règles décisionnelles, ils sont associés sur des portions différentes du parcours. Le problème étudié est assez complexe et les éventuelles perturbations auxquelles il est soumis, accroissent cette complexité. Pour prendre en charge ses particularités et sa complexité, nous allons utiliser le dernier type de couplage.

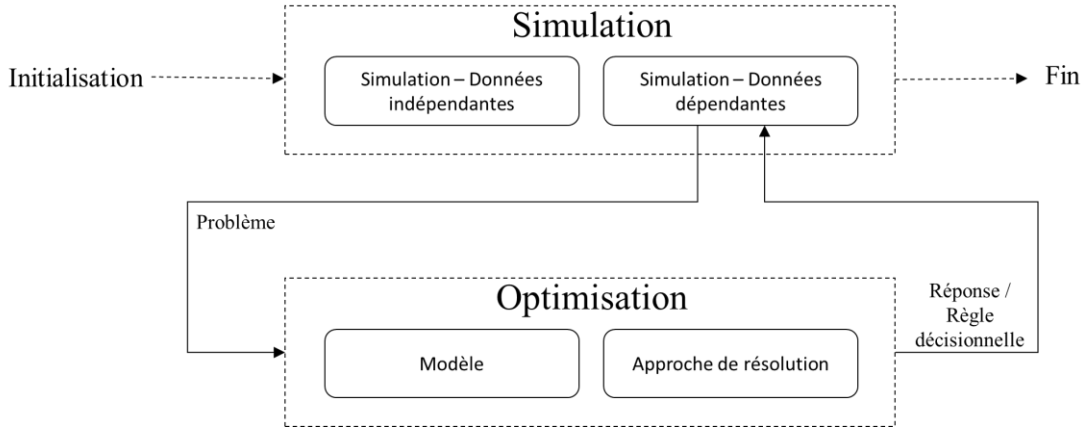


Figure III.13 : Illustration de la démarche de couplage – simulation et optimisation (Borodin, et al., 2017)

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents outils d'aide à la décision, qui seront utilisés dans le cadre de ce travail de recherche. Nous avons commencé par relever à travers la littérature, la complexité des problèmes liés à la logistique en général, et au transport en particulier. L'optimisation combinatoire tient une place importante dans la prise en charge de ces problématiques. Ainsi, nous avons présenté un panorama des méthodes de résolution exactes et souligné certains de leurs inconvénients, tels que :

- Des temps de calcul trop importants, dans le cas des grandes instances.
- Une incapacité à prendre en compte certains aspects des problèmes réels.

Pour compléter les méthodes exactes, nous avons présenté les approches de résolutions approchées, telles que les heuristiques et les métaheuristiques. En effet, ces dernières permettent de fournir des solutions rapidement, avec pour inconvénient, l'incapacité d'évaluer ou garantir, un seuil de qualité ou de performance des solutions obtenues.

L'activité de transport en général, et celle des marchandises en particulier, est caractérisée par de fortes perturbations, sous différentes formes (défaillance d'un transporteur, commandes de dernière minute, circulation importante, pannes techniques, etc.). Ceci requiert des outils d'aide à la décision adaptés à cet environnement, dans le but de maintenir la performance des décisions prises en cours d'exploitation. Dans ce chapitre, nous avons présenté l'approche par horizon glissant pour la replanification en prenant compte des perturbations. Cette approche a été utilisée dans le cadre de plusieurs problèmes en logistique, mais aussi dans le transport ferroviaire. Nous avons montré que cette approche dispose de plusieurs paramètres, pour ajuster sa performance et lui permettre de proposer une solution satisfaisante avec les nouvelles données. Cependant, elle compte quelques inconvénients parmi lesquels :

- La prise en charge des perturbations ne s'effectue pas en temps réel.
- Les conséquences néfastes de la remise en question des décisions des premières périodes, qui peuvent engendrer des coûts non négligeables, liés aux engagements pris.
- Le recalcul se fait après une durée fixe.

Enfin, le couplage simulation / optimisation permet de bénéficier des avantages des deux approches. La simulation permet de :

- Prendre en charge des éléments non linéaires du problème étudié.
- Reproduit les perturbations auxquelles est sujet le système réel.

Et les prises de décision étant déduites de la résolution du modèle d'optimisation, avec les données du modèle de simulation.

Ainsi, dans la suite de ce travail, les outils décrits dans ce chapitre seront utilisés comme suit :

- La nouvelle solution de transport étudiée sera modélisée sur ARENA, dans le but de comprendre son comportement et d'étudier sa dynamique.
- Les problèmes décisionnels étudiés seront modélisés par des PLVM. Ces derniers, dans les cas prédictifs, seront résolus par des méthodes exactes (pour les instances de taille modérée) et des méthodes approchées (pour les instances de grande taille).
- Les perturbations seront prises en charge par l'approche de replanification à horizon glissant.
- Un couplage simulation / optimisation sera développé. Dans un premier temps, il permettra de valider les PLVM, en faisant tourner la simulation avec les solutions issues de leur résolution exacte. Dans un second temps, il permettra la prise en charge des perturbations enregistrées en cours de simulation.

Chapitre IV

Modélisation et simulation du FRTSP

1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous nous concentrerons sur la problématique qui est au cœur du système de transport ferroviaire intégrant le flux de marchandises avec le flux voyageurs. Nous nous plaçons dans le cas de mixité maximal des ressources du système, car si ce niveau de mixité est évalué, comme une perspective techniquement et économiquement plausible, alors tous les autres le seront également. Comme cela a été mis en évidence dans le second chapitre dans la figure II.13, le FRTSP est central et critique par rapport aux autres problèmes décisionnels qui se posent. Ainsi, la faisabilité de la solution de mixité est conditionnée par les performances réalisées à ce niveau. Plus précisément, si les trains de passagers démontrent leur capacité à absorber une quantité de marchandises suffisamment significative, alors la rentabilité de cette solution sera prouvée. Par conséquent, il nous a semblé plus pertinent d'aborder en premier le FRTSP, pour ensuite s'intéresser aux autres problématiques identifiées et directement liées à celui-ci.

Cette solution de mixité n'existe pas encore, hormis quelques expérimentations à échelle réduite, dans certaines villes. Pour comprendre l'impact de l'intégration du flux de marchandises, sur le réseau ferroviaire de transport de voyageurs, il est nécessaire de passer à une échelle supérieure. Cependant, une expérimentation à grande échelle, serait trop coûteuse et nécessiterait la mobilisation d'importantes ressources. De plus, comme mentionné dans le chapitre 2, l'opérateur de transport de voyageurs n'a pas encore le droit d'assurer ce service, d'où, l'impossibilité de procéder à une telle expérimentation. Dans ce cas, la démarche usuelle suggère l'utilisation de la simulation. Quelques arguments supplémentaires soutiennent cette proposition :

- Le déploiement de l'expérimentation sur le terrain requiert un investissement élevé, le modèle de simulation permet d'évaluer les performances avant l'engagement des fonds.
- Dans les deux articles suivants (Dessouky & Leachman, 1995) et (Motraghi & Marinov, 2012), il est mis en évidence la complexité des réseaux ferroviaires en raison de plusieurs facteurs, ce qui rend difficile le développement de modèles analytiques. A contrario, les modèles de simulation permettent une expérimentation à faible coût, ainsi qu'une modélisation réaliste avec une meilleure représentation de la dynamique et de la complexité du système ferroviaire, ce qui peut conduire à des résultats et des conclusions précis.
- Enfin, la simulation peut être couplée avec des modèles d'optimisation, dans le but de fournir un outil d'aide à la décision performant (Borodin, et al., 2017)

Ce chapitre sera structuré en deux parties principales. La première partie concerne la définition du FRTSP et de ses différentes hypothèses. La seconde partie sera dédiée au développement du modèle de simulation avec ARENA.

2. Hypothèses et description du FRTSP

Le schéma de décomposition proposé dans le second chapitre, permet de définir des sous problèmes, ayant des complexités moindres et pouvant être adressés les uns après les autres.

Néanmoins l'interdépendance des sous problèmes impose des contraintes supplémentaires. A ce stade de l'étude, et en l'absence d'un modèle économique d'une part, et en ignorant les technologies devant être utilisées, nous faisons le choix de privilégier l'étude de l'intégration du flux de marchandises avec le flux de voyageurs. Dans ce chapitre, nous proposons de définir un cadre précis pour ce problème, pour ensuite le modéliser et le résoudre.

Concernant le choix du niveau de mixité totale, comme dit précédemment, il correspond au cas le plus difficile à mettre en œuvre, au vu de son niveau de contraintes, aussi bien organisationnelles, que techniques. Les avantages de ce niveau de mixité peuvent être résumés comme suit :

- Montrer la faisabilité de tous les autres niveaux, à travers la séparation de chacune des ressources partagées initialement, pour aller vers une ressource dédiée à chacun des flux.
- L'implémentation de ce cas de mixité, ne requiert pas la mobilisation de trains supplémentaires, exclusive pour le transport de marchandises.
- Le transport de marchandises ne requiert pas la mobilisation de conducteurs supplémentaires.
- Sachant que les trains doivent circuler pour assurer l'activité de transport de voyageurs, le transport de marchandises ne requiert pas une consommation supplémentaire de ressources (à noter que le transport d'un poids supplémentaire, implique une surconsommation énergétique. Toutefois, cette dernière reste négligeable, comparativement à la mise en circulation d'un nouveau train).

2.1. Hypothèses du FRTSP

En raison de l'interdépendance des 9 sous-problèmes (voir figure II.13), il est nécessaire de faire quelques hypothèses sur les paramètres liés au FRTSP. Ainsi, pour chacune de ces dernières, nous avons :

- **Hypothèse 1 : 1ère et 2ème problématiques - zones de stockage temporaire**
  Cette problématique concerne le dimensionnement des zones de stockage temporaire. Deux cas se présentent, soit les stations sont à construire et cet espace devrait être dimensionné, d'après l'étude de la circulation du flux de marchandises. Soit les stations existent déjà et auquel cas, cet espace sera une contrainte forte qu'il faudra intégrer lors de la modélisation du FRTSP.
  Comme nos travaux ont été initiés avec la projection de ce nouveau service, dans le cadre du projet du « Grand Paris Express », nous nous sommes placés dans le premier cas en considérant que l'espace n'est pas contraint encore, ce qui permet de :

  - Ne pas contraindre davantage le système, en raison d'un manque d'espace en amont et en aval du processus de transport.
  - Se focaliser sur la capacité du système de transport de passagers, à absorber un flux supplémentaire, pour mieux utiliser cet espace vide inoccupé.

  Toutefois, la relaxation de la contrainte spatiale pour le stockage devrait permettre d'évaluer le manque à gagner, dans le cas où cet espace serait insuffisant dans

certaines stations. Malgré le peu de place disponible en milieu urbain, il peut être réalisable d'augmenter les capacités des stations dans le cas de certaines stations.

- **Hypothèse 2 : 3ème problématique - dimensionnement des trains**
  L'attribution d'un espace dédié au transport de marchandises, à l'intérieur d'un train de voyageurs, dépend de deux éléments :

  - La capacité résiduelle initialement prévue pour le transport de voyageurs, pouvant être exploitée pour le transport de marchandises.
  - La demande de transport potentielle sur la période considérée (i.e. avec les horaires d'arrivée des marchandises à transporter, à leur station de départ).

  Comme dans un système de transport, une des difficultés majeures est de minimiser l'écart entre la capacité disponible (quasi constante) et la demande correspondant au flux de fret, qui est intrinsèquement variable, la capacité dédiée au transport de marchandises sera fixée pour tous les trains. Pour cela, nous allons nous baser sur les estimations préliminaires, de l'opérateur de transport en région Ile-de-France (études du PREDIT présentées au chapitre 2).
- **Hypothèse 3 : 4ème et 5ème problématiques - problèmes de bin packing dans les zones de stockage temporaire**
  Dans le chapitre 2, nous avons soulevé l'importance du rangement des marchandises, dans les zones de stockage temporaire. Cette problématique a un impact direct sur le temps de disponibilité des colis pour être chargés, en raison des temps de transfert et d'accès à ces colis. Ces temps dépendent directement des moyens de manutention et de la politique de placement des colis dans les zones de stockage. Une modélisation plus fine pourrait nous amener à définir un temps de disponibilité par colis et non plus par commande (qui peut être composée de plusieurs colis), afin de se rapprocher plus de la réalité. Dans un premier temps, nous considérons que la commande est disponible entièrement au même moment pour être chargée et que la définition du temps de disponibilité est déterminé en amont du FRTSP.
- **Hypothèse 4 : 6ème problématique - planification des trains**
  La planification des trains, peut être un levier d'ajustement de l'offre de transport à la demande. Cependant, à ce stade, l'objectif est de montrer le potentiel d'absorption d'un flux additionnel, avec le planning actuel de circulation des trains de passagers, durant les heures creuses de la journée.
- **Hypothèse 5 : 7ème problématique - problèmes de bin packing à l'intérieur des trains**
  Il est indéniable que les temps de chargement et de déchargement des commandes, sont variables et qu'ils dépendent du nombre de colis constituant les commandes et de leur placement dans le train. Dans le présent travail, nous allons faire une estimation d'un temps moyen de chargement / déchargement de chaque colis.
  La détermination de ce temps pourra être plus précise une fois que les technologies à adopter seront connues.
- **Hypothèse 6 : 8ème problématique - livraison des marchandises dans la station de départ**

La distribution décrivant le comportement des moments de réception des commandes à leur station de départ, a un impact direct, sur les différentes composantes du système de transport, telles que:

- Les ressources de manutention.
- L'espace de stockage temporaire.
- L'espace dédié au fret dans les trains.

La mise en place d'un système de régulation des arrivées des marchandises, est indispensable à une rationalisation de l'utilisation des différentes ressources mobilisées.
A ce stade préliminaire, nous admettons qu'aucune action n'est entreprise, pour influer sur les moments d'arrivée des commandes, aux stations de départ.

A noter que toutes ces hypothèses, ne remettent pas en question la possibilité de mettre en œuvre une telle solution de transport. Toutefois, elles conduiront à une exploitation sous-optimale de cette dernière. D'autre part, elles peuvent être retenues comme première étape d'une mise en œuvre progressive. Tout en sachant, qu'une fois la dynamique de circulation des flux de marchandises étudiée, à travers l'étude du FRTSP, ces problématiques pourront être étudiées, au vu des dépendances citées précédemment.

2.2. Formalisation du FRTSP

Les décisions inhérentes au séjour d'une marchandise, peuvent être décrites comme suit :

- Réception et insertion dans la file d'attente des marchandises → la définition d'un emplacement dans l'espace de stockage temporaire de la station.
- Décision de les transporter par un train précis → ceci implique la détermination du moment auquel elles seront transportées.
- Chargement des marchandises dans le train → ceci nécessite le respect de plusieurs contraintes telles que le temps d'arrêt du train et l'espace restant.
- Le train transporte chaque marchandise sur le tronçon de la ligne défini par sa station de départ et sa station d'arrivée → ceci implique un certain temps de parcours, dépendant de tous les chargements et déchargements sur le tronçon en question.
- Déchargement des marchandises dans leur station d'arrivée → ceci nécessite un certain temps d'arrêt du train et l'espace pour accueillir la marchandise.

Même si la relaxation de la limite physique est plausible à ce stade préliminaire de l'étude, il n'en est pas moins que durant la phase d'exploitation, cette préoccupation sera majeure en milieu urbain. De plus, la question du cash-flow généré étant prédominante, cela nous a conduit à considérer la maximisation du taux de rotation en minimisant le temps d'attente des marchandises avant leur chargement dans le train. Cet objectif a pour conséquence directe, l'accélération de libération de l'espace occupé pour tirer le flux de marchandises en attente dans les zones intermédiaires. D'autres conséquences intéressantes sont à relever, à savoir :

- La livraison des marchandises au plus tôt (argument commercial très fort).

- Une meilleure utilisation de l'espace dédié aux marchandises dans les trains, accélérant la rentabilité de la nouvelle solution
- L'augmentation de la fluidité dans le système de transport permettra la prise en charge de nouvelles demandes de transport plus rapidement.

Pour rappel, le FRTSP correspond au cas mono-ligne, ce qui correspond au cas particulier qui doit être étudié en premier, avant de pouvoir envisager une généralisation, vers le cas multi-ligne, voire multimodes. En pratique, ce cas devrait être celui ayant le plus de chances d'être déployé, au vu des inconvénients liés au changement de ligne, voire changement de mode.

Une représentation graphique est proposée dans la Figure IV.1, pour mettre en évidence le phénomène de files d'attente qui modélise la dynamique des évènements du problème. En particulier, les trains constituent eux même une file d'attente, de même pour chaque station de chargement, pour laquelle il y a une file d'attente des colis en attente d'être transportés. Les caractéristiques de cette ligne ferroviaire et des différentes composantes du service de transport étudié, peuvent être décrites comme suit :

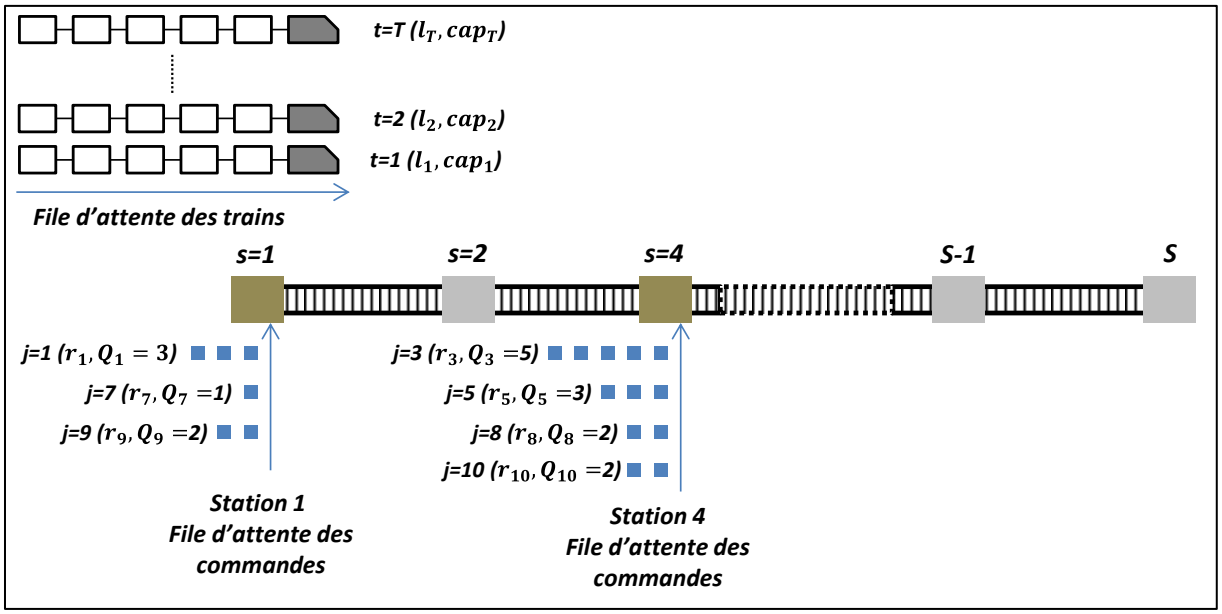


Figure IV.1 : Illustration des files d'attente dans le FRTSP

- La ligne ferroviaire est composée de S stations de voyageurs. Chaque station peut éventuellement être utilisée pour charger les marchandises dans les trains. L'ensemble qui sera retenu, regroupera uniquement les stations mutualisées. Par conséquent, cet ensemble ne coïncide pas forcément avec l'ensemble de toutes les stations de la ligne.
- L'activité de transport de marchandises est effectuée durant les heures creuses de la journée.
- Les marchandises à transporter sont mises dans des conteneurs de taille standard, qu'on appellera « colis ». Ces conteneurs peuvent se présenter avec des roues, tels que dans l'exemple montré dans la Figure IV.2. Ce type de conteneur présente deux avantages :

  - Facilité de manutention, aussi bien dans les stations, qu'à l'intérieur des trains.

- Il est déjà utilisé dans l'approvisionnement des magasins en ville, ainsi que par les services postaux (transport groupé de colis).

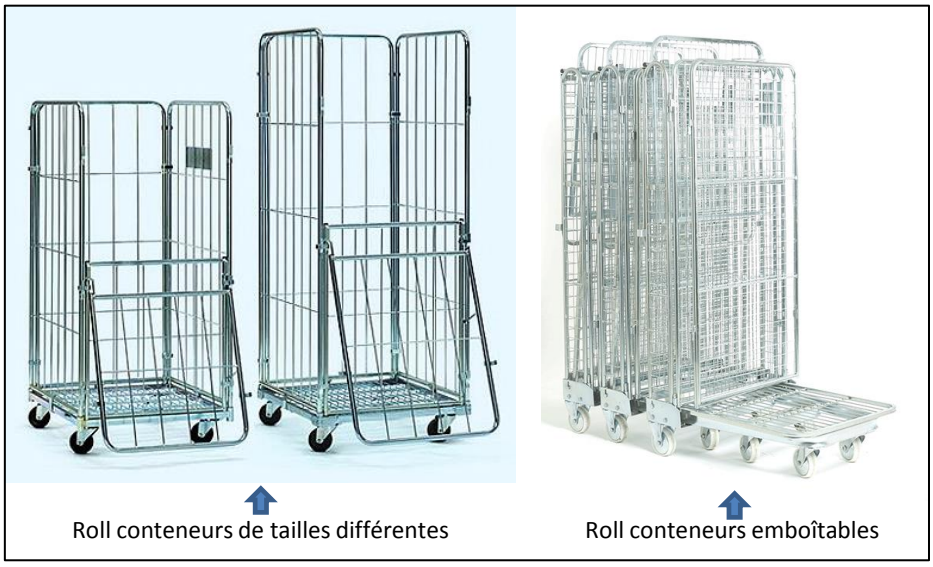


Figure IV.2 : Exemple de conteneurs pour le transport de marchandises

- Les demandes de transport transmises par les clients seront appelées « commandes » dans la suite. Durant chaque période d'exploitation considérée, nous aurons J commandes à transporter. Chaque commande sera caractérisée par :

  - Une taille exprimée en nombre (entier) de colis standards, notée Q_j.
  - Une date de disponibilité, représentant la date de prise en charge au plus tôt par un train, à partir de la station de départ. Elle est notée r_j.
  - Un parcours unique sur la ligne. Ainsi, chaque commande aura une station de départ (notée dep_j) et une station d'arrivée (notée arr_j), indépendantes des autres commandes.
  - Chaque colis standard requiert le même temps de chargement et de déchargement, notée $time$ (i.e. une commande constituée de 2 colis nécessitera deux fois plus de temps, qu'une commande n'ayant qu'un seul colis).
  - Chaque commande doit être transportée entièrement par le même train, entre dep_j et arr_j. En d'autres termes, il n'est pas permis de fractionner une commande composée de plusieurs colis.

  L'ensemble des commandes est supposé fixé et connu à l'avance, pour l'établissement du plan de transport prédictif. Lors de l'extension en considérant la replanification de ce plan de transport, nous autoriserons la prise en compte d'une liste de commandes pouvant subir des changements.
- L'ensemble des trains est connu également à l'avance, il y a T trains. On considère uniquement les trains de voyageurs, disposant d'un espace dédié aux marchandises. Ainsi, les trains exclusivement dédiés au transport de voyageurs, qui pourront continuer à circuler, sont exclus de cet ensemble de T trains). Les caractéristiques des trains et de leur parcours se présentent comme suit :

- Chaque train dispose d'une capacité maximale de transport de marchandises, exprimée en nombre de colis standards. Elle est notée cap_t.
- Chaque train a une date de départ connue, à partir de la première station de la ligne. Elle est notée l_t.
- Le parcours du trajet entre deux stations consécutives $(s, s+1)$, requiert un certain temps, noté $tt_{s,s+1}$.
- Le temps d'arrêt minimum des trains dans chaque station est identique. Il est nécessaire pour la montée et la descente des voyageurs. Il est noté $wait_{min}$.
- Le temps d'arrêt maximum des trains dans chaque station est également identique. Il s'agit d'un levier pour permettre le chargement de commandes supplémentaires, sans faire attendre longtemps les voyageurs à l'intérieur du train. Il est noté $wait_{max}$.

Le temps d'attente effectif dans chaque station pour chaque train, dépendra des temps de chargement et de déchargement des colis dans la station en question. Néanmoins, ce temps est contraint par une borne inférieure qui est $\mathrm{wait}_{\mathrm{min}}$ et une borne supérieure qui est $\mathrm{wait}_{\mathrm{max}}$.

3. Une modélisation par simulation du FRTSP

Nous avons utilisé la simulation à évènements discrets, dans le but de comprendre le comportement de cette solution de mixité totale, qui n'a pas encore été déployée à l'échelle réelle, du moins, pas dans les conditions que nous proposons de considérer. Au-delà de cette raison, se greffent d'autres avantages de cette approche qui peuvent être résumés comme suit :

- La présence des processus d'arrivé des trains, ainsi que des marchandises, impose d'elle-même leur modélisation par un logiciel de simulation de flux, qui est prévu à cet effet.
- Le couplage avec un modèle d'optimisation permet d'une part, la validation du modèle mathématique et d'autre part, l'évaluation des performances de la solution optimale dans un milieu incertain.

Dans la Figure IV.3, qui schématise le modèle de simulation de cette solution, on peut distinguer les deux sous-systèmes correspondant aux composantes dynamiques qui sont les trains et les commandes. De plus, le modèle est constitué des différentes stations composant la ligne simulée, ces dernières sont reliées par des blocs temporels simulant les temps nécessaires à la traversée des stations. Dans ce qui suit, nous détaillons chacune des parties du modèle comme suit :

3.1. Génération des commandes

Cette partie modélise le processus de génération du plan de commandes, pour une période d'exploitation. Deux scénarios seront évalués :

- Le premier scénario concerne la disponibilité préalable, des informations relatives aux commandes à transporter pour la prochaine période d'exploitation. Pour le modéliser, nous avons combiné deux blocs ARENA. Le premier « Create : Génération des

commandes initiales », permet la création d'autant d'entités que de commandes devant être transportées. La génération de toutes les entités est effectuée à l'instant 0. En ce qui concerne les caractéristiques de chaque commande, nous introduisons le second bloc « Assign ». Ce bloc nous permet d'affecter à chaque commande toutes ses caractéristiques (énoncées dans la section 3), à travers des attributs, auxquels sont attribuées des valeurs aléatoires régies par des distributions, dont les paramètres doivent être définis. La Figure IV.4 illustre ces deux blocs et leur paramétrage.

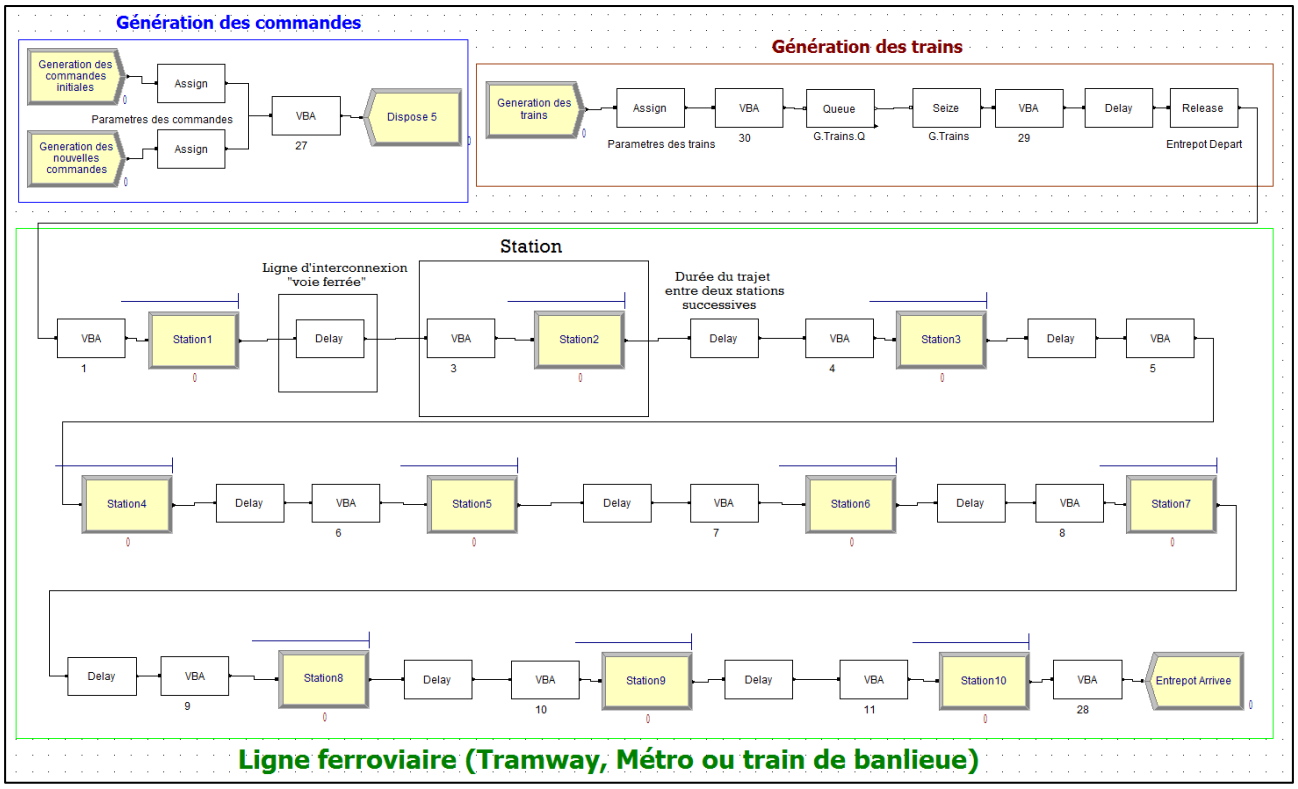


Figure IV.3 : Schéma du modèle de simulation du FRTSP en utilisant ARENA

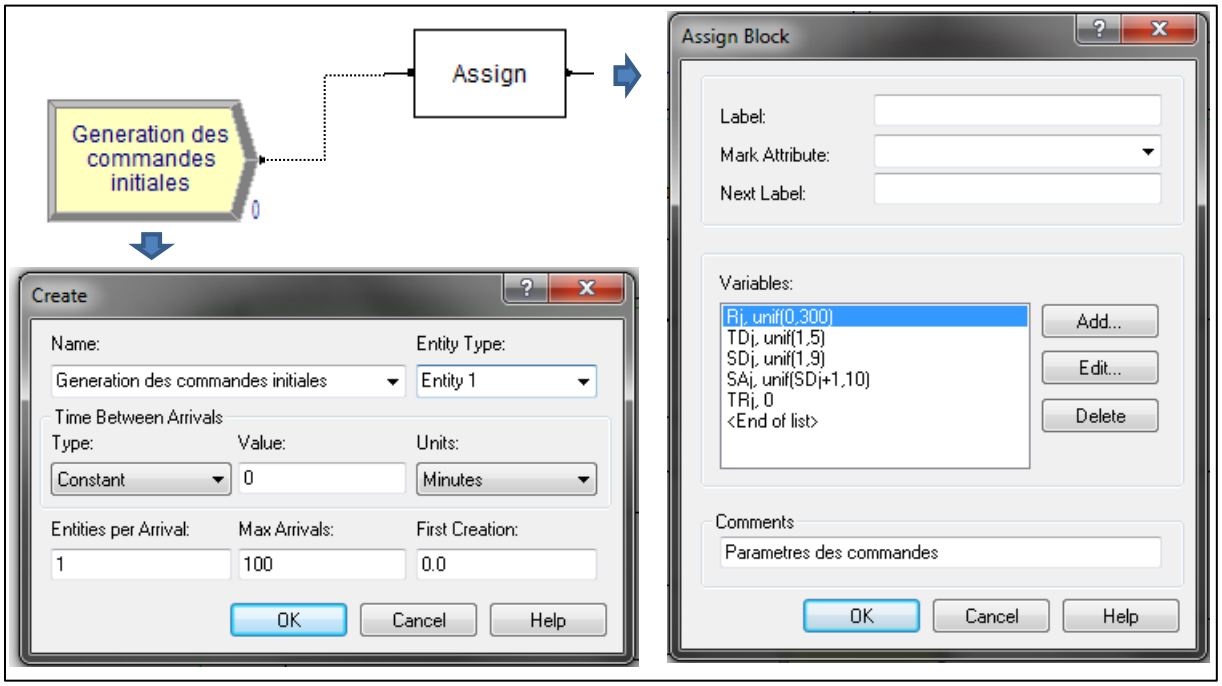


Figure IV.4 : Modélisation de la création du plan de commandes périodique

- Le second scénario est assez similaire au premier, au niveau de la modélisation. Cependant, en plus des commandes générées avant la période d'exploitation, d'autres commandes sont générées par le bloc « Create : Génération des nouvelles commandes », en temps réel de manière aléatoire. Ainsi, dans le bloc « Assign » l'attribut date de disponibilité de la commande (*Rj*) se verra affecter une valeur à partir de « TNOW », correspondant au moment courant. La Figure IV.5 illustre le paramétrage de ces deux blocs dans ce cas.

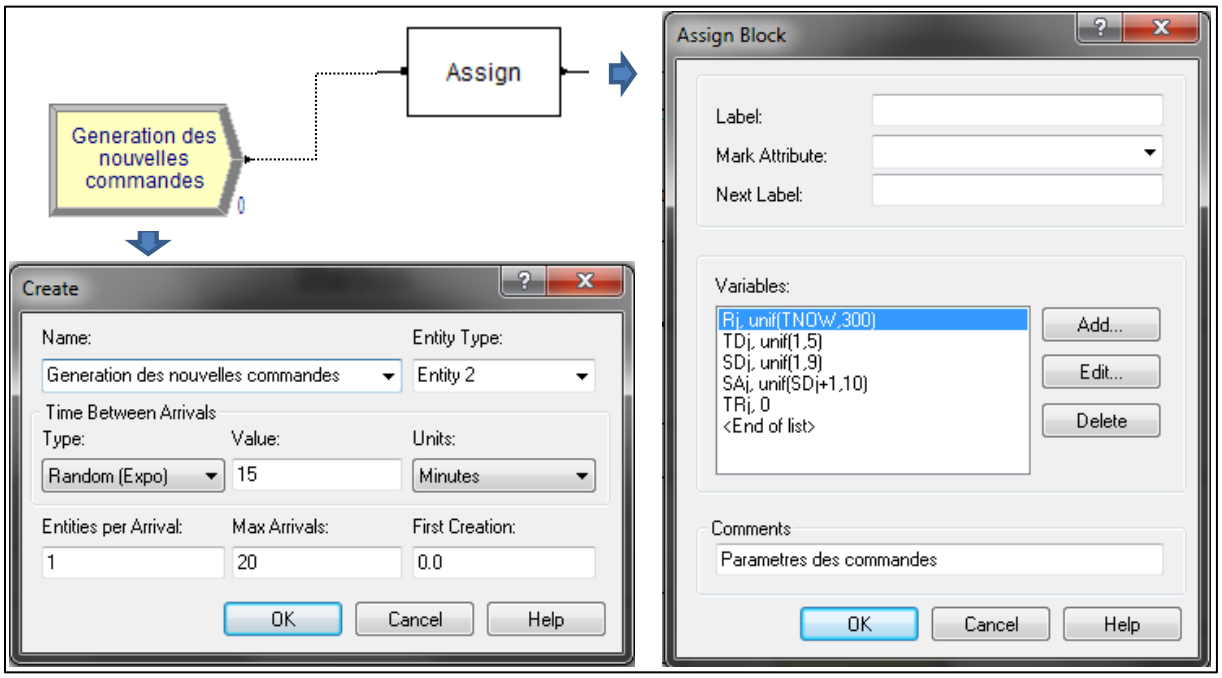


Figure IV.5 : Modélisation de la génération de commandes en temps réel

Le processus de génération des commandes se termine par deux blocs :

- Le bloc « VBA » : les données relatives à chaque commande, sont enregistrées dans un tableau dans l'environnement VBA. Ce tableau sera utilisé pour procéder aux différents calculs, nécessaires à la simulation du processus d'affectation des commandes aux trains. Cette dernière opération sera détaillée dans les points suivants.
- Le bloc « Dispose » : une fois les données du plan de commandes enregistrées, les entités modélisant ces commandes sont supprimées à travers le bloc « Dispose ».

L'affectation des commandes à leur station de départ, s'effectue directement dans l'environnement VBA. Ainsi, dès que le TNOW correspond à la date de disponibilité de la commande en question, elle sera affectée à la file d'attente de sa station de départ, en attendant son transport par un train.

3.2. Génération des trains

Le planning de circulation des trains est fixé avant chaque période d'exploitation. Hormis l'occurrence d'incidents, la date de mise en circulation de chaque train est connue à l'avance. Pour modéliser cette réalité opérationnelle, nous proposons une séquence de blocs ARENA, comme le montre la Figure IV.6.

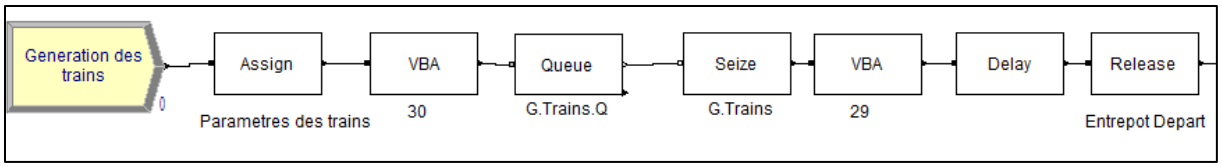


Figure IV.6 : Modélisation du processus de génération des trains

Les différents blocs utilisés dans cette séquence permettent d'effectuer les opérations suivantes :

- « Create : Génération des trains » : il s'agit de créer autant d'entités, que de trains devant parcourir la ligne, durant la période d'exploitation. Les entités sont toutes générées à l'instant 0.
- « Assign » : plusieurs attributs sont affectés pour chaque train, pour représenter ses caractéristiques. Dans la Figure IV.7, un exemple illustre les caractéristiques attribuées, telles que la date de mise en circulation du train (l'intervalle de temps avec le train qui le précède), l'initialisation du chargement et un numéro d'identification.
- La séquence « Queue », « Seize », « Delay » et « Release », modélise la mise en circulation effective des trains. Le bloc « Delay » temporise chaque train, le temps que sa date de mise en circulation arrive.
- Les blocs « VBA » : le premier enregistre dans l'environnement VBA, les données relatives à chaque train. Ces données sont utilisées dans les calculs nécessaires à la simulation du processus d'affectation des commandes aux trains. Le second bloc, permet d'ajuster les dates de mise en circulation des trains, en modifiant la valeur de la variable fixant le délai d'attente dans le bloc « Delay ».

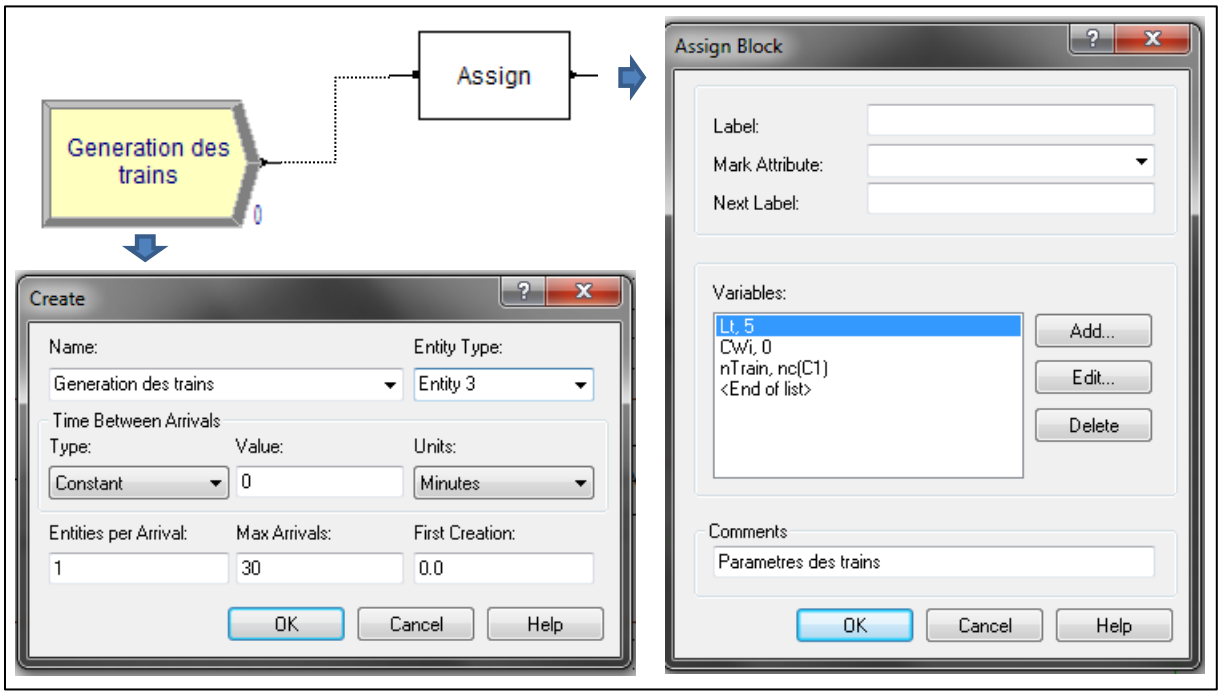


Figure IV.7 : Modélisation de la création des trains

3.3. La ligne ferroviaire

La modélisation de la ligne ferroviaire, comprend les deux composantes de cette dernière, à savoir :

- Les stations : elles sont modélisées par une séquence de blocs « VBA » et « Process », comme le montre la Figure IV.8.
    - Le bloc « VBA » : en fonction de la charge actuelle du train, du nombre de commandes devant être déchargées (en particulier, le temps nécessaire pour cela) et de la stratégie décisionnelle mise en œuvre, les commandes sont affectées à ce train ou laissées dans la station, en attente d'un autre train.
    - Le bloc « Process » : les calculs effectués dans le bloc « VBA », permettent de déterminer le temps d'arrêt de ce train (DLY2 dans la Figure IV.8), dans la station actuelle. Ce bloc est configuré en mode « Seize, Delay, Release » qui modélise l'occupation d'une ressource (la station), par un train, durant un certain délai.
- Les voies ferrées interconnectant les différentes stations : cette composante est modélisée par un bloc « Delay », qui traduit la distance à parcourir par un train entre deux stations successives, par un temps (TT_{s1s2} dans la Figure IV.8).

Bien que le bloc « Process » dispose d'une file d'attente intégrée, le modèle développé ne l'utilisera pas. En effet, dans le but de reproduire le comportement réel dans le transport ferroviaire, si un train rattrape son prédécesseur (i.e. il se trouve à une distance limite de ce dernier), un mécanisme d'ajustement de la distance est activé. Dans notre cas, il s'agit d'augmenter le temps de parcours « TTs,s+1 » de ce train, en utilisant le bloc « VBA » (les tests de distance sont réalisés dans VBA).

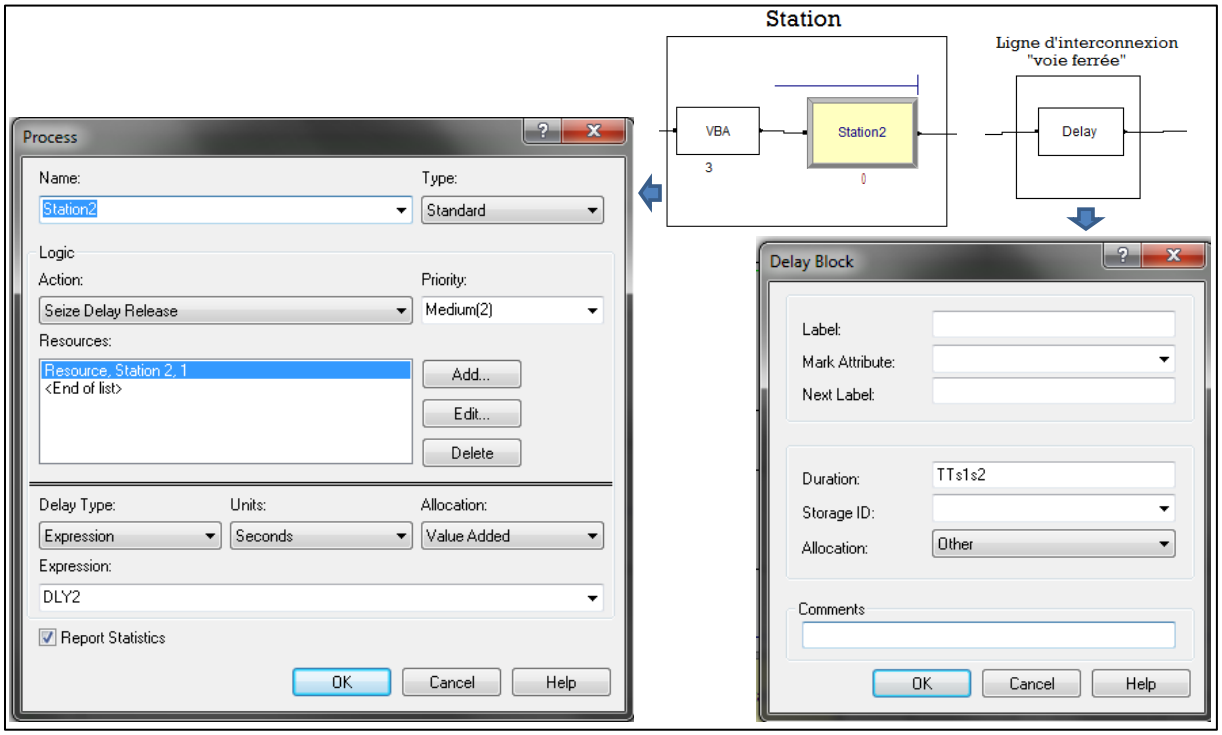


Figure IV.8 : Modélisation des stations et des voies ferrées

3.4. Implémentation des processus décisionnels sur ARENA

Il s'agit de décrire le processus qui va permettre l'affectation des commandes aux trains. Dans un premier temps, nous avons développé quatre heuristiques, dont trois qui sont basées sur des règles de priorité, puis une quatrième plus élaborée, qui est basée sur la décomposition du FRTSP en plusieurs sous problèmes mono-train. Ces quatre heuristiques ont été adaptées pour prendre en compte toutes les contraintes techniques et organisationnelles du FRTSP.

3.4.1. *Heuristiques basées sur les règles de priorité*

Les heuristiques basées sur les règles de priorité sont très pratiques et très appréciées dans l'environnement industriel, notamment pour leur facilité de compréhension. En effet, elles sont simples à mettre en œuvre et dans certains cas, fournissent de bonnes solutions. L'avantage majeur de ces dernières est leur capacité à produire des solutions très rapidement, ce qui est crucial dans un environnement soumis à de fréquents changements et perturbations.

Ces trois heuristiques, nous ont permis de valider le schéma organisationnel proposé, avec des acteurs du transport ferroviaire, ainsi que d'avoir une référence sur les conséquences d'une potentielle mise en exploitation.

Bien que simple à mettre en œuvre, il est indispensable que chaque heuristique, considère toutes les contraintes d'exploitation. Ces contraintes consistent en :

- La limitation des temps d'attente de chaque train, dans chaque station.
- Les capacités des trains.
- Les dates de disponibilité des commandes.
- Le temps de parcours entre les stations.

Ces heuristiques sont implémentées en utilisant le langage VBA. Ainsi, lors du passage de chaque train à chaque station (représentée par un bloc VBA suivi d'un bloc Process dans la Figure IV.8), et selon l'heuristique appliquée, certaines commandes sont affectées au train. Cette affectation s'effectue suivant la règle de priorité et en tenant compte des différentes contraintes. Plus précisément, les calculs pour la sélection des commandes à affecter à un train, sont effectués lors de son passage par le bloc « VBA ». L'affectation résultante, se traduit en un temps d'arrêt nécessaire au chargement des commandes et l'occupation d'un certain espace, à l'intérieur du train. Ces trois heuristiques se présentent comme suit :

- **1ère heuristique : basée sur une règle de priorité de type « FIFO »**
  Dans ce cas, le principe est de hiérarchiser l'ordre d'affectation des commandes aux trains, selon leur date de disponibilité. Toutefois, si la possibilité d'affectation d'une commande, suivant son ordre hiérarchique, est impossible (en raison de : manque d'espace, manque de temps pour son chargement en totalité, voire, de son déchargement à sa station d'arrivée), l'affectation de la commande suivante sur la liste est évaluée. Ainsi, l'évaluation des affectations possibles se poursuit jusqu'à saturation de la capacité du train, ou l'épuisement de son temps d'arrêt dans cette station.
- **2ème heuristique : priorité aux commandes de plus grande taille**
  Ayant identifié l'espace dans les stations, comme étant l'une des ressources critiques, du système de transport étudié, l'idée de transporter les commandes de plus grandes

tailles, devrait permettre la libération rapide de l'espace dans les stations, ainsi que l'amélioration du taux d'utilisation de l'espace.

Le principe de cette règle est de hiérarchiser l'ordre d'affectation des commandes aux trains, en ordre décroissant, selon le nombre de colis les composant. Toutefois, comme pour le FIFO, s'il est impossible d'affecter la commande prioritaire, l'affectation des commandes suivantes est évaluée.

- **3ème heuristique : priorité aux commandes de plus petite taille**

  Les capacités des trains et leurs temps d'attente dans les stations étant fortement contraints, l'idée étant de privilégier les commandes de petites tailles. Cette règle s'inspire de la charge la plus faible d'abord, ce qui devrait augmenter la fluidité dans le système. En effet, il y a plus de chances de pouvoir charger les petites commandes, car cela prend moins de place et moins de temps également.

  Les commandes ayant le moins de colis sont dans ce cas prioritaires. Comme pour les deux règles précédentes, un processus itératif permet de tester les candidats à l'affectation dans le cas de l'échec de l'affectation de la commande prioritaire. Le processus se termine une fois le train saturé, ou le temps d'attente du train dans la station épuisé.

A noter que pour chacune de ces trois heuristiques, une règle de priorité supplémentaire s'additionne aux spécificités de chacune d'entre elle. Il s'agit de la priorité relative à l'ordre des stations desservies par les trains. En effet, chaque heuristique est appliquée au niveau de chaque station, ce qui octroie une priorité aux commandes, selon leur station de départ.

3.4.2. *4ème heuristique : basée sur l'optimisation du problème d'un seul train*

Cette heuristique procède par décomposition et résolution exacte des sous-problèmes, tel que chaque sous problème est relatif au chargement optimal d'un seul train. Ceci, à travers un processus d'évaluation de différentes possibilités d'affectation des commandes à chaque train, pour maximiser le nombre de commandes pris en charge par le train correspondant. La résolution de chaque sous-problème est basée sur un algorithme de type séparation et évaluation. L'intérêt de cette décomposition est lié directement à la réduction de la complexité du problème initial en raison de la considération d'un sous ensemble des commandes disponibles, lors du passage du train en question. Ceci réduit sensiblement, le nombre de possibilités à explorer. En effet, comme les dates de disponibilité des commandes, ainsi que leur taille, sont disponibles à l'avance, cela permet de construite les sous-ensembles des commandes disponibles pour chaque train au niveau de chaque station. La solution optimale de chaque sous-problème permet de construire une solution approchée du problème.

Pour illustrer l'algorithme de résolution de cette 4ème heuristique, nous proposons l'exemple, dont l'arbre des possibilités est schématisé par la Figure IV.9. Nous considérons le train t_1, pour lequel trois commandes seront disponibles lors de son passage par la ligne ferroviaire (j_1, j_2 et j_3). Chaque nœud de l'arbre correspond à une instanciation de la variable binaire de décision d'affectation de la commande. Le problème mono-train revient à déterminer les commandes à transporter, en maximisant leur nombre, tel que les contraintes d'espace et de temps sont respectées. Lorsqu'il y a plusieurs solutions équivalentes, celle qui minimise le temps d'attente des commandes, avant leur chargement dans le train, est privilégiée. Dans le

cas où il y a encore, plusieurs solutions équivalentes, la première est retenue. Concernant la construction du schéma de branchement, les étapes décrites ci-dessous permettent de le synthétiser :

- L'ensemble des commandes potentiellement transportables par le train sont sélectionnées.
- L'instanciation des variables permettant d'affecter les commandes se fait par ordre croissant de leur stations de départ (ceci permet de déterminer le temps d'arrivé exact du train au niveau de chaque station).
- La construction de l'arbre est de type *deep first*, pour privilégier l'évaluation de la prise en charge de l'ensemble des commandes d'abord.
- Au niveau de chaque nœud de l'arbre il faut :
  - Les contraintes de respect de l'espace et du temps disponible, qui vont conditionner l'instanciation de la variable correspondante.
  - Des mises à jour concernant l'espace disponible dans le train et le temps d'arrêt à la station courante.

Sur la Figure IV.9, nous illustrons un exemple d'un problème mono-train en présence de trois commandes à transporter :

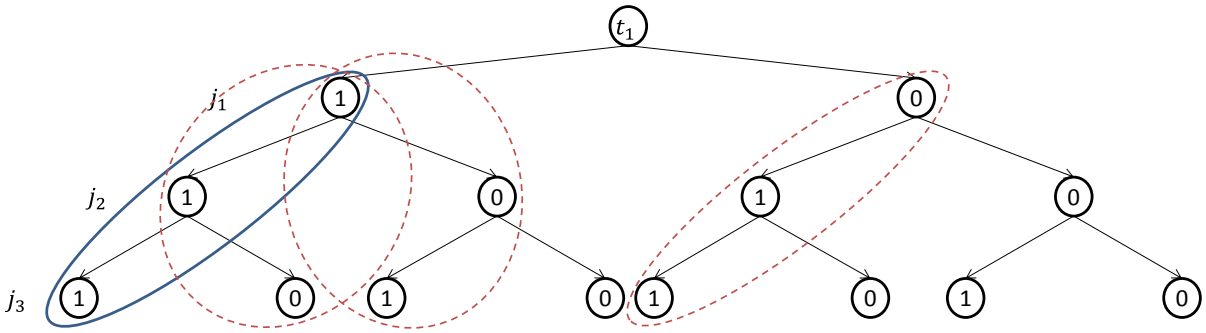


Figure IV.9 : Illustration de la construction d'une solution avec la 4ème heuristique

- Le cas encerclé en bleu (trait plein) : cela correspond à la faisabilité du chargement de toutes les commandes disponibles. Dans le cas contraire, on retrouve :
- Les cas encerclés en rouge (trait pointillé) : après l'échec de la prise en charge des trois commandes, les possibilités testées sont celles considérant uniquement deux commandes. Il y a donc trois cas possibles car il faut choisir deux éléments parmi 3.

Le principe de fonctionnement de la 4ème heuristique est donné par l'Algorithme IV.1. Nous introduisons de nouveaux paramètres comme suit :

- La liste des commandes pouvant être transportées par le train t est notée J_t.
- Date d'arrivée du train t à dep_j est notée : R_j.
- La borne supérieure de la date d'arrivée du train t à dep_j, correspond à un temps d'attente maximum du train t dans toutes les stations qui précèdent dep_j : $R_j^{max} = l_t + \sum_{s=1}^{dep_j-1} tt_{s,s+1} + (dep_j - 1) * wait_{max}$
- La borne supérieure courante de la fonction objectif est notée : F_{best}.

- La valeur de la fonction objectif en cours est notée : F_{int}.
- Chaque nœud de l'arbre correspond à l'instanciation d'une variable de décision, notée : $x_{jt} \in \{0,1\}$. L'évaluation étant effectuée par train, la valeur de l'indice t sera fixe tout au long de l'exécution de l'algorithme. C'est l'affectation des différentes commandes j -avec $j \in J_t$- qui est évaluée à travers l'arbre de recherche.

Algorithme IV.1 : 4ème heuristique basée sur l'optimisation du chargement par train

1. Initialisation des paramètres (relatifs au train $t : l_t, cap_t$)
2. Construction de J_t :
- $r_j \leq R_j^{max}$
- j n'a pas été affectée à un autre train

3. $F_{best} \leftarrow M$ (un grand nombre positif)
4. $F_{int} \leftarrow 0$
5. Pour chaque $j \in J_t$ (évaluation des nœuds de l'arbre)
6. Si j peut être transportée par t en effectuant les 3 tests **{**
- $R_j \geq r_j$
- $cap_t - \sum_{j'(\text{à } l'interieur du\ train)} Q_{j'} \geq Q_j$
- $time * Q_j + \sum_{j'(commandes\ avec\ dep_{j'}=dep_j\ et\ affectées\ \text{à}\ t)} time * Q_{j'} + \sum_{j''(commandes\ avec\ arr_{j''}=dep_j\ et\ affectées\ \text{à}\ t)} time * Q_{j''} \leq wait_{max}$

} alors

7. Affecter j à t ($x_{jt} = 1$)
8. $F_{int} \leftarrow F_{int}$ calculée au nœud précèdent + $[R_j - r_j]$
9. Sinon
10. j n'est pas affectée à t: $x_{jt} = 0$ (couper la branche correspondant à $x_{jt} = 1$)
11. Fin Si
12. Si $F_{int} > F_{best}$ alors
13. Couper la branche actuelle et aller à la branche suivante
14. Fin Si
15. Si (toutes les commandes de J_t ont été évaluées) et ($F_{int} < F_{best}$) alors
16. $F_{best} \leftarrow F_{int}$
17. Fin Si
18. Si (toutes les commandes de J_t ont été évaluées) et (il reste des branches à explorer) et (∃ une branche avec un nombre de commandes pouvant être affectée à $t \geq$ nombre de commandes affectées en considérant la meilleure solution actuelle) alors
19. Retour arrière jusqu'à la dernière commande affectée à t (dernier $x_{jt} = 1$)
20. Ne pas affecter cette commande à t (mettre $x_{jt} = 0$).
21. Fin Si
22. Prochaine commande
23. Considérer l'affectation correspondant à F_{best}

3.5. Modèle conceptuel du modèle de simulation

Ce modèle conceptuel est composé de deux parties comme le montre la Figure IV.10.

- La première partie représente le diagramme principal (à gauche de la Figure IV.10).
- La seconde partie représente les diagrammes alternatifs (à droite de la Figure IV.10), à substituer dans le diagramme principal, en fonction de l'algorithme décisionnel implémenté :

  - Les trois sous-processus en haut à droite de la figure, sont utilisés pour trier les commandes, en fonction de la règle de priorité choisie.
  - Quant au quatrième sous-processus, il est utilisé pour récupérer la solution de l'exécution de la 4ème heuristique.
  - Enfin, le diagramme encadré n°2 est dédié à la 4ème heuristique et, il doit remplacer dans le diagramme principal, la partie encadrée n°1, qui est dédiée au trois autres heuristiques.

Ainsi, le processus global de transport de marchandises par les trains, à travers la ligne ferroviaire, se résume comme suit :

- Le train arrive à la station 1 à partir du dépôt, à l'instant l_t.
- Le train circule tout au long de la ligne, en marquant un arrêt à chaque station. Lors de chaque arrêt, plusieurs tests sont effectués comme suit :

  - Pour chaque commande à l'intérieur du train, si la station actuelle correspond à sa station d'arrivée, alors :
    - ✓ Décharger la commande correspondante.
    - ✓ Mettre à jour le temps d'attente du train dans la station actuelle.
    - ✓ Mettre à jour la capacité actuelle du train en nombre de colis standards.
  - Pour le processus de chargement, cela dépend de l'algorithme décisionnel sélectionné.
  - Pour les trois heuristiques basées sur les règles de priorité, dans chaque station, les commandes disponibles sont ordonnées selon la règle en question. Ainsi, l'évaluation de l'affectation des commandes au train, est effectuée suivant l'ordre de priorité. L'évaluation porte sur :
    - ✓ La capacité disponible à l'intérieur du train en nombre de colis standards.
    - ✓ Le temps d'attente disponible dans la station. Pour rappel, dans chaque station, le train commence par décharger les commandes dont c'est la station d'arrivée (ce qui va nécessiter un certain temps d'attente). Puis, si le temps est suffisant, d'autres commandes seront chargées. A chaque commande chargée, le temps d'attente disponible se réduit.
  - Si la commande peut être transportée par ce train, alors :
    - ✓ Charger la commande.
    - ✓ Mettre à jour le temps d'attente du train dans la station actuelle.
    - ✓ Mettre à jour la capacité actuelle du train.
  - Pour la 4ème heuristique, la détermination des commandes à transporter par le train dans chaque station, est effectuée lors de la mise en circulation de ce

dernier à partir du dépôt de départ. Ainsi, lors de son passage par chaque station, il s'agira de :

- ✓ Vérifier pour chaque commande disponible dans la station, si elle doit être transportée par le train actuel. Si c'est le cas, la charger.
- ✓ Mettre à jour le temps d'attente du train dans la station actuelle.
- ✓ Mettre à jour la capacité actuelle du train.

- Quand le train quitte la dernière station, il retourne au dépôt d'arrivée.

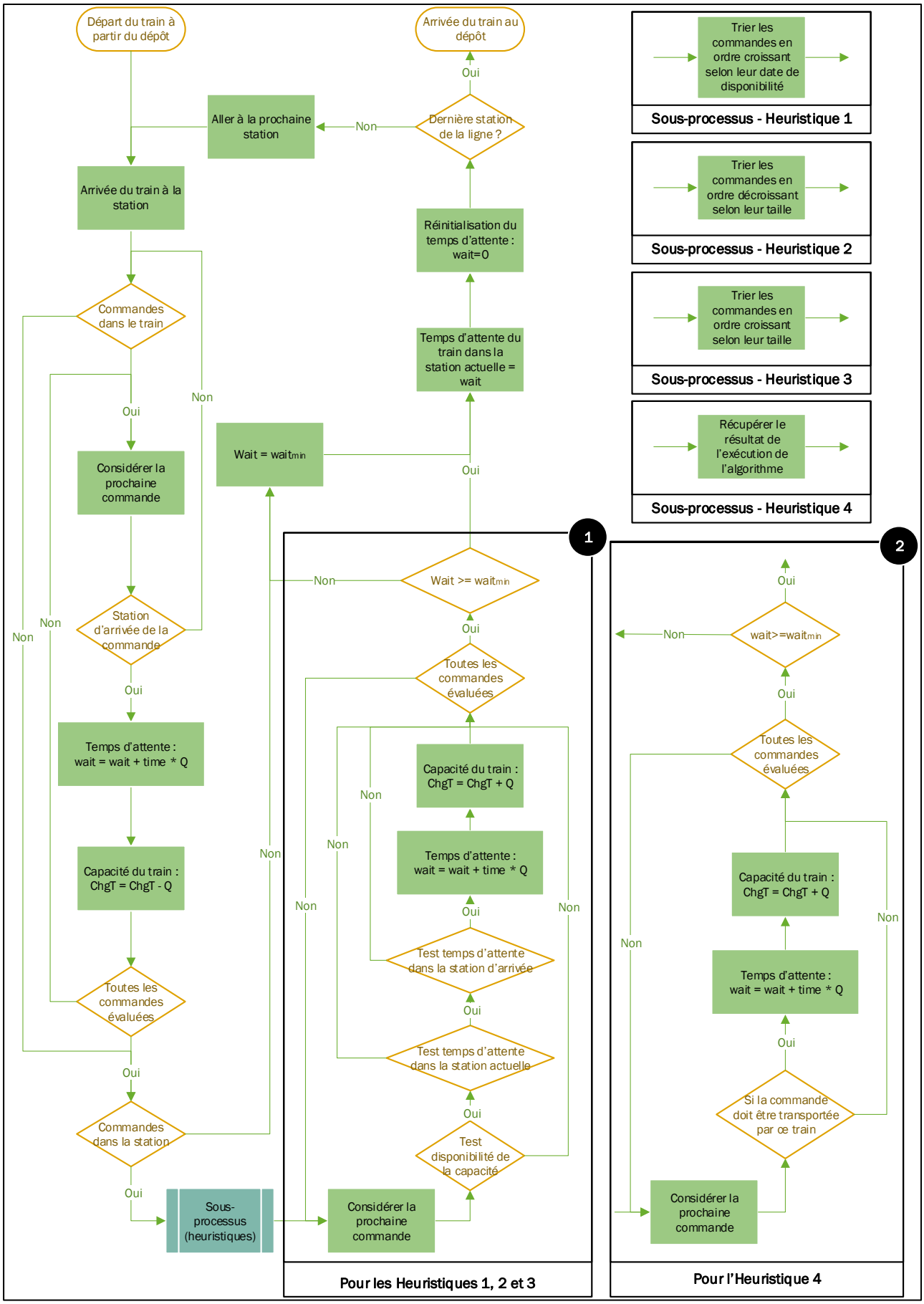


Figure IV.10 : Modèle conceptuel du modèle de simulation

4. Conclusion

L'intérêt porté à ce problème, découle de sa capacité à évaluer le potentiel de la solution de transport proposée, en évaluant les volumes qui peuvent être transportés. Par ailleurs, l'étude du FRTSP permet également de fournir, les données nécessaires à la résolution de plusieurs autres problématiques décisionnelles, identifiées dans le second chapitre. Pour de nombreuses raisons cités dans le présent chapitre, le FRTSP est jugé comme critique et prioritaire notamment au vu de la considération du niveau de mixité totale. Dans ce chapitre, nous avons proposé une formalisation et une première approche de modélisation et de résolution du FRTSP, au vu des hypothèses considérées.

Le problème FRTSP est inspiré du projet du Grand Paris Express. Le problème revient à définir un plan de transport des marchandises en utilisant une seule ligne ferroviaire pour passagers. Il s'agit de déterminer le train et le moment de chargement de chaque marchandise, en attente dans sa station de départ. Plusieurs contraintes sont considérées, telles que le respect de l'espace disponible dans les trains, le temps d'arrêt des trains dans les stations et les temps de disponibilité des marchandises aux stations. La fonction objectif permet de minimiser les temps d'attente des marchandises aux stations.

Dans un second temps, nous avons présenté le modèle de simulation à évènements discrets développé sur ARENA. Ce dernier est composé de trois parties interdépendantes, à savoir, la génération des commandes, la génération des trains et la ligne ferroviaire. Les avantages de développer un modèle de simulation sont multiples. Entre autres, il nous permet de comprendre la dynamique de ce système de transport ferroviaire, en représentant les différents processus de files d'attente présents. Par ailleurs, les règles décisionnelles pour l'affectation des commandes aux trains, sont implémentées dans l'environnement VBA. Par la suite, nous allons montrer comment coupler ce modèle de simulation, avec le modèle de programmation linéaire en variables mixtes, qui permet de déterminer un plan optimal pour le FRTSP.

Chapitre V

Modélisation mathématique et optimisation du FRTSP – cas prédictif et replanification

1. Introduction

Après avoir défini le problème FRTSP et étudier son comportement dynamique grâce au modèle de simulation à évènements discrets, nous allons nous intéresser dans le présent chapitre à l'optimisation de son processus décisionnel. D'abord nous étudions la nature combinatoire du FRTSP en montrant que la relaxation de plusieurs de ses contraintes le ramène au problème d'affectation généralisée. Un exemple numérique est présenté afin d'illustrer l'ensemble des contraintes et données du problème, plusieurs solutions sont également proposées pour saisir les enjeux de ce problème. Ensuite, nous nous intéressons à l'établissement du plan prédictif en formulant un PLVM pour réduire les temps d'attente des marchandises. Pour compléter cette approche, nous adapterons un algorithme de colonies de fourmis pour les instances de grande taille. Par la suite, nous proposons une approche par horizon glissant pour la replanification du FRTSP afin de prendre en compte des changements relatifs à la demande. Cette mise à jour du plan initial permet d'ajuster les décisions initiales de manière à minimiser les écarts dus au recalcul. Enfin, nous décrivons les processus de couplage simulation / optimisation, aussi bien dans le cas prédictif, que dans le cas de la replanification.

2. Un exemple numérique

Avant de procéder à la formalisation mathématique du problème FRTSP, dans cette section, nous proposons un exemple numérique sur une instance réduite afin d'appréhender sa complexité.

Cet exemple permet d'illustrer toutes les contraintes techniques et organisationnelles, présentées au chapitre 2. Nous allons proposer deux solutions pour cette instance afin de ressortir l'impact des différentes contraintes sur le processus d'exploitation, ainsi que les enjeux et l'intérêt d'une approche d'optimisation.

Nous considérons une ligne ferroviaire composée de 4 stations de voyageurs, où il est possible de procéder aux chargements / déchargements des marchandises. Cette ligne est parcourue par 3 trains mixtes, à intervalle de 10 minutes. Enfin, 10 commandes doivent être transportées sur cette ligne, suivant des parcours différents (i.e. les stations de départs et d'arrivées varient d'une commande à une autre). L'exemple est illustré par la Figure V.1.

Les autres caractéristiques du problème sont :

- Nous considérons l'instant 0, comme le moment de début de l'exploitation.
- Les l_t et r_j sont exprimées en minutes.
- Les cap_t et Q_j sont exprimés en nombre de colis standards.
- La distance entre deux stations successives est exprimée en durée de parcours (comme indiqué dans la Figure V.1, elle est égale à *5 min*).
- Comme conséquences directes de la conception de ce système de transport, aucune commande ne peut être déchargée dans la station 1 (les trains sont vides au départ). Aussi, aucune commande ne peut être chargée dans la station 4 (c'est le terminus pour les trains).

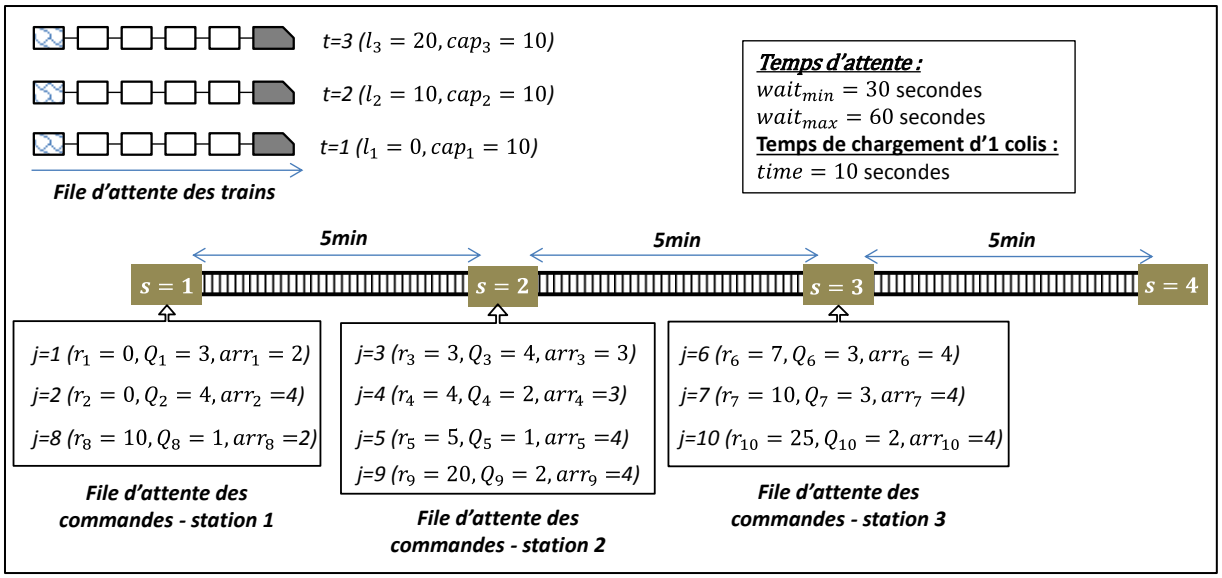


Figure V.1 : Une illustration d'une instance numérique du FRTSP

Nous proposons deux plans différents de transport des commandes, élaborés en appliquant des règles décisionnelles aléatoires. Ceci nous permettra de constater l'impact de toutes les contraintes sur l'activité de transport de marchandises, ainsi que l'importance du schéma décisionnel adopté. Le Tableau V.1 et le Tableau V.2 présentent ces deux plans. Les notations et formules suivantes sont utilisées :

- Commandes disponibles pour le transport dans la station, lors du passage du train : $CDisp$
- Commandes déchargées du train : $CDchg$
- Commandes chargées dans le train : $Cchg$
- Date d'arrivée à la station (min, secondes) : $Arr_s = \begin{cases} l_t \quad si \quad s = 1 \\ Dep_{s-1} + 5 \; sinon \end{cases}$
- Temps d'attente dans la station (secondes) :
  $Tchg = max(\sum temps\ de\ déchargement + \sum temps\ de\ chargement\ , wait_{min})$
- Nombre de colis à l'intérieur du train :
  $NbrC_s = \begin{cases} colis\ chargés \qquad si \quad s = 1 \\ NbrC_{s-1} - colis\ déchargés + colis\ chargés \quad sinon \end{cases}$
- Date de départ de la station (min, secondes) : $Dep_s = Arr_s + Tchg$

Le premier plan de transport se résume comme suit :

- Train 1 : commandes transportées {2 ; 3 ; 4}.
- Train 2 : commandes transportées {1 ; 8 ; 7 ; 6}.
- Train 3 : commandes transportées {5 ; 9 ; 10}.

Le temps d'attente moyen de chaque commande dans sa station de départ, avant son transport par un train, est égal à : 7 min.

Les différentes contraintes ayant impacté l'élaboration de ce plan de transport, se présentent comme suit :

- La commande 1 n'a pas été chargée dans le train 1 à la station 1, parce que son chargement aurait nécessité une durée d'arrêt totale égale à 70 secondes ($> wait_{max}$).
- La commande 5 n'a pas été chargée dans le train 1 à la station 2, parce que son chargement aurait nécessité une durée d'arrêt totale égale à 70 secondes ($> wait_{max}$). Aussi, la capacité du train a été atteinte ($cap_1 = 10$).
- Les commandes 6 et 7 n'ont pas été chargée dans le train 1, parce que le déchargement des commandes 3 et 4 a nécessité 60 secondes ($= wait_{max}$).
- La commande 5 n'a pas été chargée dans le train 2, bien que le temps d'attente fût suffisant dans la station 2. Cette décision, a permis le transport des commandes 6 et 7 par le train 2. En effet, le chargement de la commande 5 aurait requis 10 secondes d'attente supplémentaires dans la station 4, nécessaires à son déchargement.

Tableau V.1 : Plan de transport des commandes – 1ère solution

	Station 1			Station 2			Station 3			Station 4		
	CDisp	CDchg	Cchg	CDisp	CDchg	Cchg	CDisp	CDchg	Cchg	CDisp	CDchg	Cchg
Train 1	1 ; 2	-	2	3 ; 4 ; 5	-	3 ; 4	6 ; 7	3 ; 4	-	-	2	-
Arr(s)	0			5 min 40 secondes			11 min 40 secondes			17 min 40 secondes		
Tchg	40 secondes			60 secondes			60 secondes			40 secondes		
NbrC(s)	4			10			4			-		
Dep(s)	40 secondes			6 min 40 secondes			12 min 40 secondes			-		
Train 2	1 ; 8	-	1 ; 8	5	1 ; 8	-	7 ; 6	-	7 ; 6	-	7 ; 6	-
Arr(s)	10 min			15 min 40 secondes			21 min 20 secondes			27 min 20 secondes		
Tchg	40 secondes			40 secondes			60 secondes			60 secondes		
NbrC(s)	4			0			6			-		
Dep(s)	10 min 40 secondes			16 min 20 secondes			22 min 20 secondes			-		
Train 3	-	-	-	5 ; 9	-	5 ; 9	10	-	10	-	5 ; 9 ; 10	-
Arr(s)	20 min			25 min 30 secondes			31 min			36 min 30 secondes		
Tchg	30 secondes			30 secondes			30 secondes			50 secondes		
NbrC(s)	0			3			5			-		
Dep(s)	20 min 30 secondes			26 min			31 min 30 secondes			-		

Le deuxième plan de transport se résume comme suit :

- Train 1 : commandes transportées {1 ; 4 ; 5 ; 6}.
- Train 2 : commandes transportées {2 ; 8 ; 3}.
- Train 3 : commandes transportées {7 ; 9}.
- Commande 10 : non transportée.

Bien que le temps d'attente moyen des commandes transportées soit égal à : 5 min, la commande 10 (non transportée), le ramène à l'infini. En effet, l'incapacité à prendre en charge l'ensemble des commandes conduit à une infaisabilité. En pratique, sous condition d'une demande plus importante que la capacité disponible, la formulation du FRTSP peut évoluer pour déterminer le plan pouvant transporter le maximum de commandes possibles (pour générer le maximum de bénéfice).

Soumis aux mêmes contraintes considérées lors de l'élaboration du 1er plan de transport, l'élaboration de ce 2ème plan a été moins concluante, au vu de la prise en charge de

l'interaction entre les différentes contraintes et la multitude de possibilités, même pour une instance de taille réduite. Ceci met en lumière la difficulté de résolution du FRTSP.

Tableau V.2 : Plan de transport des commandes – 2ème solution

	Station 1			Station 2			Station 3			Station 4		
	CDisp	CDchg	Cchg	CDisp	CDchg	Cchg	CDisp	CDchg	Cchg	CDisp	CDchg	Cchg
Train 1	1 ; 2	-	1	3 ; 4 ; 5	1	4 ; 5	6 ; 7	4	6	-	5 ; 6	-
Arr(s)	0			5 min 30 secondes			11 min 30 secondes			17 min 20 secondes		
Tchg	30 secondes			60 secondes			50 secondes			40 secondes		
NbrC(s)	3			3			4			-		
Dep(s)	30 secondes			6 min 30 secondes			12 min 20 secondes			-		
Train 2	2 ; 8	-	2 ; 8	3	8	3	7	3	-	-	2	-
Arr(s)	10 min			15 min 50 secondes			21 min 40 secondes			27 min 20 secondes		
Tchg	50 secondes			50 secondes			40 secondes			40 secondes		
NbrC(s)	5			8			4			-		
Dep(s)	10 min 50 secondes			16 min 40 secondes			22 min 20 secondes			-		
Train 3	-	-	-	9	-	9	7 ; 10	-	7	-	7 ; 9	-
Arr(s)	20 min			25 min 30 secondes			31 min			36 min 30 secondes		
Tchg	30 secondes			30 secondes			30 secondes			50 secondes		
NbrC(s)	0			2			5			-		
Dep(s)	20 min 30 secondes			26 min			31 min 30 secondes			-		

3. Complexité du problème FRTSP

Nous avons présenté dans le chapitre 3, le problème d'affectation généralisée et mentionné sa complexité. En ce qui concerne le FRTSP, il est possible de le réduire à un problème d'affectation généralisée, en considérant un cas particulier que l'on représente dans la Figure V.2). La réduction du FRTSP peut être décrite comme suit :

- La ligne est réduite à 2 stations seulement.
- Toutes les commandes sont disponibles à l'instant 0, dans la première station, qui sera la seule station de départ. Ces commandes sont transportées vers l'autre station, qui sera l'unique station d'arrivée : $\forall j \in J \begin{cases} r_j = 0 \\ dep_j = 1 \\ arr_j = 2 \end{cases}$
- Chaque commande *j* doit être transportée par un seul train.
- Le planning de circulation des trains est connu à l'avance. Les trains sont mis en circulation à partir de la station 1 à intervalle régulier.
- Les trains peuvent charger et transporter plusieurs commandes simultanément. Cependant, ils sont limités par une capacité maximum en nombre de colis standard.
- Le temps de chargement d'un colis est négligeable. Ainsi, le temps d'attente des trains dans la station 1 est indépendant du nombre de colis chargés.
- Le moment auquel un train *t* charge la commande *j* à la station 1, est égal dans ce cas au temps d'attente de cette commande dans sa station de départ (étant donné que $r_j = 0$). Ainsi, le temps d'attente de la commande *j* sera directement égal à : $x_{jt} * l_t$ (avec $x_{jt} = 1$ si la commande *j* est affectée au train *t*, 0 sinon).

La considération de ces différentes hypothèses, nous permet de formaliser le FRTSP, sous la forme d'un PLNE, comme suit :

$$Minimize \sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}(x_{jt} * l_t) \quad (5.1)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{jt} = 1 \quad \forall j \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^{J} x_{jt} * Q_j \leq Cap_t \quad \forall t \quad (5.3)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j,t \quad (5.4)$$

Nous retrouvons l'écriture du PLNE relatif au problème d'affectation généralisée, présentée dans le chapitre 3. En effet, l'objectif (5.1) de minimisation du coût total d'affectation des commandes aux trains (traduisant le temps d'attente total des commandes dans la station de départ), est équivalent à la minimisation du coût total d'affectation des tâches aux machines.

En ce qui concerne les contraintes, nous retrouvons à travers (5.2) l'ensemble de contraintes relatives à l'obligation d'affecter chaque commande à un seul train (i.e. chaque tâche à une seule machine). Aussi, à travers (5.3) l'ensemble des contraintes relatives à la capacité des trains (i.e. capacité des machines).

Comme mentionné dans le chapitre 3, le problème d'affectation est considéré comme étant NP-difficile (Fisher, et al., 1986), ainsi, notre problème l'est aussi.

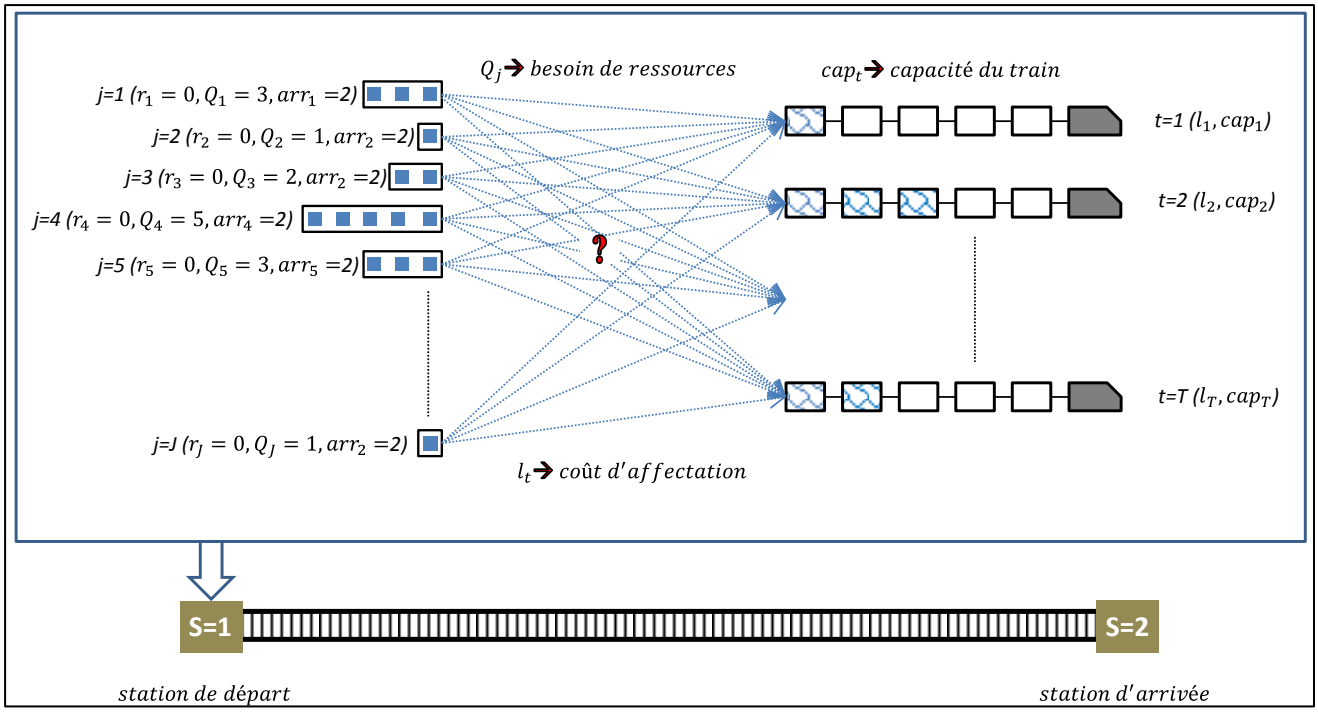


Figure V.2 : Réduction du problème FRTSP à un problème d'affectation généralisée

4. Formulation d'un PLVM du FRTSP dans le cas prédictif

Lors de la première planification qui permet d'obtenir un plan prédictif, toutes les données relatives au système de transport sont connues et définies en amont de la période

d'exploitation. Ainsi, le carnet des commandes sera connu à l'avance et aucun changement ne sera considéré en cours d'exploitation. Aussi, le planning de circulation des trains est fixé et respecté durant toute la période d'exploitation.

Les notations utilisées pour la définition des données considérées dans ce problème sont résumées dans le Tableau V.3.

Tableau V.3 : Notations utilisées dans le PLVM

Indices	j : 1, …, J	Pour les commandes
	t : 1, …, T	Pour les trains
	s : 1, …, S	Pour les stations
Paramètres	r_j	Date de disponibilité de la commande *j*
	dep_j	Station de départ de la commande *j*
	arr_j	Station d'arrivée de la commande *j*
	l_t	Date de disponibilité du train *t* dans la station 1
	J	Nombre de commandes
	T	Nombre de trains
	S	Nombre de stations
	$tt_{s,s+1}$	Temps de trajet entre deux stations successives
	Q_j	Nombre de colis standard composant la commande *j*
	Cap_t	Capacité de chargement du train *t* en nombre de colis standard
	$Wait_{max}$	Temps d'attente maximum des trains dans chaque station
	$Wait_{min}$	Temps d'attente minimum des trains dans chaque station
	$time$	Temps de chargement / déchargement d'un colis standard
	M	Un grand nombre positif
Variables de décision	x_{jts}	1 si la commande *j* est présente à l'intérieur du train *t* dans la station *s*, 0 sinon
	C_{ts}	Temps d'attente du train *t* à la station *s*
	R_{jts}	Moment auquel le train *t* charge la commande *j* à la station *s*

La formalisation des différentes contraintes identifiées se présente comme suit :

- **Affectation des commandes aux trains et leur transport**
  Chaque commande *j* doit être affectée à un seul train *t* dans sa station de départ dep_j. Cette exigence est formalisée comme suit :

$$\sum_{t=1}^{T} x_{jts} = 1 \quad \forall j \; avec \; s = dep_j \tag{5.5}$$

  De plus, x_{jts} est égale à 1 si la commande *j* est présente à l'intérieur du train *t* dans la station *s*. Pour cela, nous définissons :

$$x_{jts} - x_{jts+1} = 0 \quad \forall j, t \; avec \; s \in \left[dep_j, \; arr_j - 1\right] \tag{5.6}$$

Cet ensemble de contraintes (5.6), nous permet d'assurer la présence des colis de la commande *j*, à l'intérieur du train *t*, entre sa station de départ et sa station d'arrivée. Pour compléter le processus d'affectation des commandes aux trains, nous définissons :

$$x_{jts} = 0 \quad \forall j, t \; avec \begin{cases} s \in \left[1, \; dep_j\right[\cup \left]arr_j, S\right] \; si \; dep_j \neq 1 \; et \; arr_j \neq S \\ s \in \left]arr_j, S\right] \; si \; dep_j = 1 \; et \; arr_j \neq S \\ s \in \left[1, \; dep_j\right[\; si \; dep_j \neq 1 \; et \; arr_j = S \end{cases} \tag{5.7}$$

L'ensemble des contraintes (5.7), permet de limiter le transport des colis de la commande *j* dans un train *t*, strictement au tronçon défini entre leur station de départ et d'arrivée.

- **Respect de la capacité des trains**

Chaque train est limité par un nombre maximum de colis pouvant être transportés simultanément. De plus, nous avons supposé que chaque commande doit être transportée en une seule fois et par un seul train. La formalisation de ces contraintes d'exploitation s'effectue comme suit :

$$\sum_{\forall j \in J_s} x_{jts} * Q_j \leq Cap_t \quad \forall t, s \tag{5.8}$$

Cet ensemble de contraintes (5.8), traduit la limitation du nombre de colis dans les trains dans chaque station. Dans ce cas, *j* appartient à l'ensemble J_s, qui représente l'ensemble des commandes, dont la station d'arrivée n'est pas *s*. La définition de cet ensemble, nous permet la prise en considération du déchargement des commandes, dans leur station d'arrivée (ce qui libère forcément, l'espace qu'elles occupaient dans le train).

- **Temps d'attente des trains dans les stations**

Nous avons défini précédemment, les exigences d'exploitation, en matière de temps d'attente des trains dans les stations. Nous formalisons ces exigences sous la forme de trois ensembles de contraintes comme suit :

$$C_{ts} \geq Wait_{min} \quad \forall t, s \tag{5.9}$$

$$C_{ts} \geq \sum_{\forall j \in J'_s} x_{jts} * Q_j * time \quad \forall t, s \tag{5.10}$$

$$C_{ts} \leq Wait_{max} \quad \forall t, s \tag{5.11}$$

Les ensembles de contraintes (5.9) et (5.11), traduisent les limites des temps d'attente des trains dans chaque station. D'autre part, nous avons défini $wait_{max}$ comme étant une limite de temps d'attente des trains, exclusivement liée à la possibilité de prolonger l'arrêt d'un train, pour le chargement de commandes. En d'autres termes, s'il n'y avait pas d'activité de transport de marchandises, les trains ne s'arrêteraient dans les stations que durant $wait_{min}$. Ainsi, l'ensemble de contraintes (5.10), nous permet de calculer au plus juste, le temps nécessaire au chargement de toutes les commandes devant être transportées par le train *t*, à partir de la station *s*. Pour cela, *j*

est considéré dans J'_s qui est l'ensemble des commandes, dont les stations de départ et d'arrivée sont la station s.

- **Respect de la date de disponibilité des commandes**

  Les commandes ne sont pas toutes disponibles à l'instant 0. De ce fait, elles ne peuvent être transportées par un train, qu'après qu'elles soient disponibles dans leur station de départ. Ceci donne lieu à :

$$x_{jts} * r_j \leq \begin{cases} l_t + \sum_{s'=1}^{s-1}(C_{ts'} + tt_{s',s'+1}) \quad \forall j,t \; et \; s = dep_j \;\; si \; dep_j > 1 \\ l_t \quad \forall j,t \; et \; s = dep_j \;\; si \; dep_j = 1 \end{cases} \tag{5.12}$$

  Dans cet ensemble de contraintes (5.12), la date d'arrivée du train t à la station de départ dep_j de la commande j, est calculée sur la base de :

  - La date de mise en circulation de ce train à partir de la station 1.
  - Les temps d'attente de ce train dans toutes les stations précédentes de la station dep_j.
  - La somme des temps de parcours entre toutes les stations précédentes de la station dep_j.

  Dans le cas où $dep_j = 1$, cette date est égale à l_t.

- **Calcul du moment auquel la commande est chargée dans un train**

  Le calcul du temps d'attente de chaque commande avant son transport requiert la connaissance d'une part, de sa date de disponibilité et d'autre part, de son moment de chargement (ce qui dépend de l'affectation décidée). Ainsi, le moment de chargement est obtenu comme suit :

$$R_{jts} \geq \begin{cases} l_t + \sum_{s'=1}^{s-1}(C_{ts'} + tt_{s',s'+1}) - M(1 - x_{jts}) \quad \forall j,t \; and \; s = dep_j \;\; si \; dep_j > 1 \\ l_t - M(1 - x_{jts}) \quad \forall j,t \; and \; s = dep_j \;\; si \; dep_j = 1 \end{cases} \tag{5.13}$$

  L'introduction de M dans l'ensemble des contraintes (5.13) est nécessaire à la linéarisation de la forme initiale de cet ensemble de contraintes. En effet, la forme de base de (5.9) est quadratique et s'écrit comme suit : $R_{jts} \geq x_{jts} * (l_t + \sum_{s'=1}^{s-1}(C_{ts'} + tt_{s',s'+1}))$.

- **Domaines de définition des variables**

$$x_{jts} \in \{0,1\}, C_{ts} \geq 0, R_{jts} \geq 0 \quad \forall j,t,s \tag{5.14}$$

A ce stade de l'étude, nous avons défini l'objectif le plus important comme celui relatif à la maximation du taux de rotation des marchandises, ce qui revient à la minimisation de leur temps d'attente au niveau des stations de départ. La formalisation mathématique de cet objectif se présente comme suit :

$$Minimize \sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}(R_{jts} - x_{jts} * r_j) \quad avec \;\; s = dep_j \tag{5.15}$$

Dans (5.15), la somme des temps d'attente de toutes les commandes dans leur station de départ est considérée.

5. L'adaptation des colonies de fourmis pour le FRTSP

Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient généralement faciles à décrire, leur résolution nécessite des techniques qui sont moins évidentes. Tel que nous l'avions déjà évoqué, le processus de résolution standard pour les grandes instances, fait appel soit à des règles spécifiques à chaque problème, en utilisant des heuristiques, soit par des métaheuristiques qui sont génériques. Nous proposons d'adapter les colonies de fourmis « ACO » en raison des bonnes performances obtenues pour la résolution du problème d'affectation généralisée, dont on a montré le lien avec le FRTSP. Un second argument est lié à la nature constructive des ACO, qui n'a pas besoin d'une solution de départ pour initier sa recherche.

Nous allons développer plusieurs variantes de colonies de fourmis, ce qui nous permettra d'identifier la variante qui serait en mesure de considérer au mieux, les spécificités du problème étudié.

5.1. La variante AS des ACO

Cette première étape, nous permet d'adapter l'algorithme de base, aux spécificités du FRTSP. En effet, l'ACO a été développé initialement, pour la résolution du problème du voyageur de commerce. Cette première application d'ACO porte le nom d'Ant System « AS ».

L'algorithme de base, développé pour le problème du voyageur de commerce, reproduit assez fidèlement les principes du phénomène biologique ayant servi à son développement.

Ce problème s'intéresse à la recherche du plus court chemin, reliant n villes. Chaque ville devant être visitée exactement une seule fois. Ce problème est formalisé par un graphe complet, tel que les sommets représentent les villes et les arrêtes modélisent les chemins les reliant. L'algorithme AS va procéder de manière à ce qu'à chaque itération, chaque fourmi va construire une solution complète (i.e. un chemin parcourant toutes les villes). Plusieurs mécanismes sont mis en place pour reproduire la recherche du meilleur chemin par chaque fourmi, en s'inspirant du phénomène biologique. Dans notre adaptation des AS au FRTSP, nous nous sommes également inspirés de cette modélisation, en apportant les ajustements nécessaires, pour prendre en compte les spécificités de notre problème.

Cette adaptation peut être décrite comme suit :

- Nous définissons un nombre maximum d'itérations « it_{max} » et un nombre de fourmis « m » constituant la colonie.
- Nous construisons un graphe pour chaque fourmi lors de son processus de résolution, telle que chaque sommet correspond à une décision potentielle (l'affectation d'une commande à un train donné).
- Chaque sommet est défini par un couple *(commande, train transportant cette commande)* ou (j, t). Les sommets sont liés entre eux par des arrêtes. Chaque lien relie la dernière décision prise (j, t) avec la nouvelle décision potentielle (j', t').
- Initialement, les m fourmis sont positionnées aléatoirement sur m sommets.

- Puis, à chaque étape de la construction de la solution, chaque fourmi se déplace d'un sommet (j,t) vers un autre sommet (j',t') correspondant à une commande non encore affectée à un train. La prise de décision se fait au regard d'un calcul de probabilités, pour évaluer l'ensemble des possibilités. Une schématisation de ce processus est donnée par la Figure V.3. La probabilité utilisée lors de chaque décision par chacune des fourmis se base sur deux éléments, pour équilibrer la balance diversification / intensification :

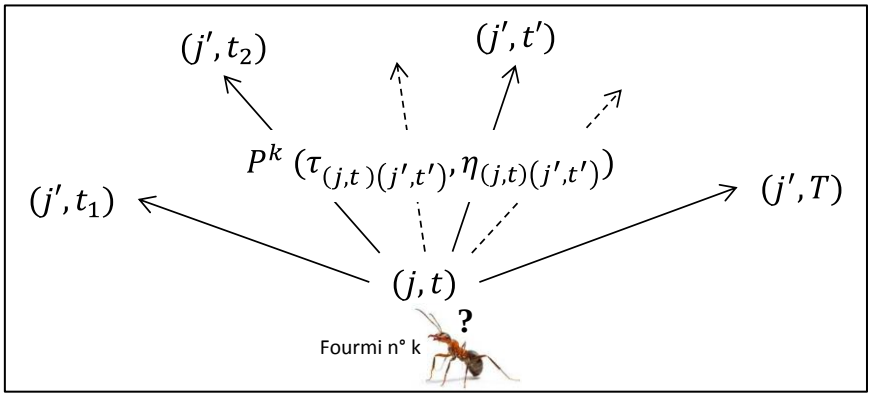


Figure V.3 : Une étape durant le processus de construction d'une solution par une fourmi

  - L'intensification : elle s'effectue grâce à la phéromone, qui représente la mémoire collective des fourmis transmise entre les générations successives. Elle permet de capitaliser l'information concernant la qualité des décisions prises auparavant. Les traces de phéromones laissées lors de l'itération précédente sont notées : $\tau_{(j,t)(j',t')}(it)$.
  - La diversification : une heuristique basée sur une information disponible localement lors de la décision à prendre et qu'on note $\eta_{(j,t)(j',t')}$. Comme l'objectif du FRTSP est de réduire le temps d'attente total des commandes, l'idée est de privilégier les faibles temps d'attente. Si le temps d'attente est noté $d_{(j,t)(j',t')}$ lorsque la commande j' est transportée par le train t' et que la probabilité utilisée lors de la prise de décision, doit traduire une préférence pour les faibles temps d'attente, l'heuristique peut être définie comme étant inversement proportionnelle à ce temps, comme suit :

$$\eta_{(j,t)(j',t')} = {}^{1}/_{d_{(j,t)(j',t')}} \tag{5.16}$$

Concernant la phéromone, elle devrait informer sur la qualité de la décision correspondante, au vu des performances des solutions dans laquelle elle a participé. Ainsi, la probabilité pour chaque fourmi « k » de choisir le couple (j',t'), sachant que c'est le couple (j,t) qui a été choisi à l'étape précédente est donnée par la formule suivante :

$$p^k_{(j,t)(j',t')}(it) = \frac{\left[\tau_{(j,t)(j',t')}(it)\right]^{\alpha}\left[\eta_{(j,t)(j',t')}\right]^{\beta}}{\sum_{l\in T_d}\left[\tau_{(j,t)(j',t_l)}(it)\right]^{\alpha}\left[\eta_{(j,t)(j',t_l)}\right]^{\beta}} \tag{5.17}$$

T_d: l'ensemble des trains pouvant transporter j'. La définition de cet ensemble nous permet d'éliminer dès la construction des solutions, celles qui sont non faisables (telles

que celles qui concernent l'affectation de commandes à des trains, dont la date de passage est avant la date de disponibilité de ces mêmes commandes).

k : l'identifiant d'une fourmi.

α : paramètre qui détermine l'importance relative des traces de phéromones, c'est-à-dire l'intensification ou l'exploitation.

β : paramètre qui détermine l'importance relative de la règle heuristique, représentant la diversification ou l'exploration.

Les deux paramètres α et β permettent d'équilibrer la balance intensification / diversification, en définissant la part relative de chacun de ces deux mécanisme.

- A la fin de la construction d'une solution complète, par chaque fourmi à chaque itération, chacune dépose une quantité de phéromones $\Delta\tau^{k}_{(j,t)(j',t')}(it)$, qui est calculée comme suit :

$$\Delta\tau^{k}_{(j,t)(j',t')}(it) = \begin{cases} {Q}/{L^{k}(it)} & si\ l'arrête\ reliant\ (j,t)\ et\ (j',t')\ est\ utilisée\ par\ k \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (5.18)$$

$L^{k}(it)$: c'est le temps d'attente total de toutes les commandes dans leur station de départ (i.e. la valeur de la fonction objectif, en considérant la solution construite par la fourmi k). Comme c'est un problème de minimisation, nous considérons l'inverse de cette valeur. Ainsi, plus le temps d'attente sera grand, moindre sera la quantité de phéromone déposée.

Q : un paramètre à fixer

- La mise à jour de la quantité de phéromones, présente sur chaque arrête du graphe des possibilités, s'effectue en considérant deux éléments :

  - Toutes les quantités de phéromones déposées lors de l'itération actuelle, par toutes les fourmis :
    $\Delta\tau_{(j,t)(j',t')}(it) = \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau^{k}_{(j,t)(j',t')}(it)$ (5.19)
  - L'évaporation de phéromone, présente sur toutes les arrêtes du graphe, traduit l'oubli. Pour cela, nous introduisons le facteur d'évaporation $(1-\rho)$ (i.e. ρ représente le facteur de persistance). ρ est déterminé dans l'intervalle $[0,1]$.

  Ceci donne lieu à la formule de calcul des quantités de phéromones sur chaque arrête, comme suit :

  $\tau_{(j,t)(j',t')}(it+1) = \rho.\tau_{(j,t)(j',t')}(it) + \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau^{k}_{(j,t)(j',t')}(it)$ (5.20)

  A noter que la trace de phéromones est initialisée de la même manière sur toutes les arrêtes du graphe, avec $\tau_0 \geq 0$.

L'algorithme de la variante de base AS, appliqué au problème FRTSP est présenté par l'Algorithme V.1.

Algorithme V.1 : L'adaptation de l'algorithme AS au FRTSP

1. Définition des paramètres $(\alpha, \beta, \rho, m, Q, it_{max})$
2. Initialisation de la trace de phéromones τ_0
3. Meilleure solution ← ∅
4. Tant que (itération <= it_{max})
5. Pour chaque fourmi de la colonie
6. Pour chaque commande (considérer n'importe quelle commande aléatoirement)
7. Identifier les trains qui sont en mesure de transporter la commande actuelle (c'est une heuristique qui permet d'améliorer la performance de l'algorithme de base):
- Le moment auquel le train *t* arrive à dep_j doit être $\geq r_j$
- L'espace disponible à l'intérieur du train doit être $\geq Q_j$
- Le temps nécessaire au chargement de Q_j + [le temps nécessaire au chargement des autres $Q_{j'}$ qui ont le même dep_j et qui doivent être transportées par le même train + Le temps nécessaire au déchargement des $Q_{j''}$ qui sont à l'intérieur de ce même train et ont $arr_{j''} = dep_j$] $\leq wait_{max}$

8. Sélection du train qui va transporter la commande actuelle, en se basant sur les probabilités calculées avec la formule (5.17)
9. Prochaine commande
10. Prochaine fourmi de la colonie
11. Mise à jour de la meilleure solution (si amélioration il y a)
12. Mettre à jour la trace de phéromones en utilisant la formule (5.20), pour toutes les arrêtes du graphe
13. Prochaine itération

5.2. Différentes variantes d'ACO

Il existe plusieurs variantes d'ACO, qu'on peut retrouver en détail dans (Dorigo & Stützle, 2004). Dans nos travaux, nous avons retenu deux variantes, ayant donné lieu à une troisième variante « hybride », assez performante pour la résolution du problème d'affectation généralisée (Ramalhinho Lourenço & Serra, 2000).

5.2.1. *Variante Max-Min Ant System : « MMAS »*

Nous proposons une première évolution de la variante de base, à travers la variante MMAS, qui a été introduite par (Stützel & Hoos, 2000). Cette variante introduit plusieurs modifications, dans le but d'améliorer le processus d'exploration de l'ensemble des solutions et en faisant un meilleur usage de l'expérience acquise, lors des itérations antérieures. Ceci, à travers la mise en œuvre de mécanismes de sortie des optimums locaux, ainsi qu'en proposant un meilleur équilibrage de la balance diversification / intensification.

Les modifications principales qu'apporte la variante MMAS à la variante AS, peuvent être résumées à travers les points suivants :

- Seule une fourmi est autorisée à déposer une quantité de phéromones sur le parcours de la solution qu'elle a construit. Bien que deux possibilités sont suggérées par la littérature, à savoir :

  - La fourmi qui a produit la meilleure solution en cours de l'itération actuelle.
  - La fourmi qui a produit la meilleure solution sur toutes les itérations antérieures.

  Dans notre cas, nous proposons la considération de la première possibilité. Notre choix est justifié par la convergence trop rapide, à laquelle conduit la seconde possibilité (avec le risque de se retrouver bloqué dans un optimum local).
- Toutefois, même avec la première possibilité, il persiste un risque d'exclure de manière assez prématurée du champ d'exploration, des solutions potentiellement plus performantes (en raison du mécanisme d'évaporation des phéromones). Ainsi, la seconde modification introduite, est la limitation de la variation des quantités de phéromones, sur l'ensemble des arrêtes du graphe, à l'intérieur d'un intervalle $[\tau_{min}, \tau_{max}]$.
- Une dernière modification notable concerne la possibilité de réinitialiser la trace de phéromones, sur l'ensemble des arrêtes du graphe. En effet, dans le cas où aucune amélioration de la solution n'a été proposée, après un certain nombre d'itérations (à définir comme paramètre), la quantité de phéromones est remise à τ_0.

Ces modifications sont accompagnées par de nouvelles formules, pour calculer les nouveaux paramètres et réajuster d'autres, comme suit :

- Le calcul des bornes de l'intervalle des quantités de phéromones, s'effectue suivant les formules suivantes (il s'agit d'une adaptation des formules proposées dans (Stützel & Hoos, 2000), aux spécificités du problème FRTSP) :

$$\tau_{max} = \left(1/1-\rho\right)\left(1/L^{best}(it)\right) \tag{5.21}$$

$$\tau_{min} = \tau_{max}\left(\left(1-\sqrt[T]{p_{best}}\right)\Big/\left(T/2-1\right)\sqrt[T]{P_{best}}\right) \tag{5.22}$$

  $L^{best}(it)$: la meilleure valeur de la fonction objectif à l'itération it, en considérant la solution construite par la meilleure fourmi « $best$ ».

  P_{best} : il s'agit de la probabilité qu'une fourmi ait fait le meilleur choix d'affectation des commandes, pour chaque train. Dans (Stützel & Hoos, 2000), les auteurs proposent de la fixer à 0,05.

  Le calcul de ces bornes s'effectue à chaque fois qu'une meilleure solution est trouvée.
- La mise à jour de la trace de phéromones, à la fin de chaque itération (qui était donnée par (5.20)), devient :

$$\tau_{(j,t)(j',t')}(it+1) = \begin{cases} \rho.\tau_{(j,t)(j',t')}(it) + \Delta\tau^{k}_{(j,t)(j',t')}(it) \; si \; k = best \\ \rho.\tau_{(j,t)(j',t')}(it) \quad sinon \end{cases} \tag{5.23}$$

$\Delta\tau^{\text{best}}_{(j,t)(j',t')}(it)$: représente la quantité de phéromones calculée, pour la fourmi ayant construit la meilleure solution à l'itération it. A savoir, $\Delta\tau^{\text{k}}_{(j,t)(j',t')}(it) = 0, \forall k \neq best$ (i.e. pour toutes les arrêtes qui ne correspondent pas au chemin parcouru par la fourmi « *best* », il n'y a que le processus d'évaporation qui est considéré).
Si la quantité de phéromones mise à jour sur une arrête est supérieure à τ_{max}, elle est initialisée à τ_{max}. D'autre part, si elle est inférieure à τ_{min}, elle est initialisée à τ_{min}.

Les modifications au niveau de l'algorithme de la variante AS, pour la considération des spécificités de la variante MMAS, sont présentées dans l'Algorithme V.2.

Appliquée au problème du voyageur de commerce et au problème d'affectation quadratique, dans (Stützel & Hoos, 2000), il est montré que la variante MMAS est en mesure d'obtenir de très bonnes performances, à travers l'exploitation de la meilleure solution trouvée, ainsi qu'en évitant la stagnation prématurée dans le processus de recherche. De plus, la convergence de cette variante a été prouvée théoriquement dans (Stützle & Dorigo, 2002).

Algorithme V.2 : L'adaptation de l'algorithme MMAS pour le FRTSP à partir de AS

	De **1** jusqu'à **10** les étapes de l'algorithme AS restent inchangées
11.	Si meilleure solution > meilleure solution à l'itération courante (ou $= \emptyset$)
12.	Calcul de τ_{max} avec la formule (5.21)
13.	Calcul de τ_{min} avec la formule (5.22)
14.	Mettre à jour la meilleure solution (avec celle de l'itération courante)
15.	Fin Si
16.	Mettre à jour la phéromone en utilisant la formule (5.23) pour toutes les arrêtes
17.	Pour chaque arrête $\big((j,t),(j',t')\big)$
18.	Si $\tau_{(j,t)(j',t')} < \tau_{\min}$
19.	$\tau_{(j,t)(j',t')} = \tau_{\min}$
20.	Sinon Si $\tau_{(j,t)(j',t')} > \tau_{\max}$
21.	$\tau_{(j,t)(j',t')} = \tau_{\max}$
22.	Fin Si
23.	Prochaine arrête
24.	Si meilleure solution non améliorée depuis un certain nombre d'itérations
25.	Réinitialisation de la quantité de phéromones à τ_0 sur l'ensemble des arrêtes
26.	Fin Si
27.	Prochaine itération

5.2.2. *Variante Ant Colony System : « ACS »*

Cette seconde alternative d'évolution de la variante de base AS que nous proposons, a été introduite par (Dorigo & Gambardella, 1997). Elle est très appropriée pour les problèmes de grandes tailles. Cette variante présente la particularité de capitaliser l'expérience des fourmis de la colonie, au cours d'une même itération. De plus, des mécanismes sont mis en place, pour une meilleure exploration de l'espace de recherche.

Les modifications principales qu'apporte la variante ACS à la variante AS, peuvent être résumées à travers les points suivants :

- Lors de la construction d'une solution, les fourmis utilisent un mécanisme de sélection des possibilités plus agressif, que dans le cas de la variante AS. Il s'agit d'une règle proportionnelle pseudo-aléatoire qui, selon la valeur prise par une variable aléatoire, utilise : 1- le mécanisme de la variante AS (à travers la décision probabiliste), ou 2- sélectionne directement la prochaine possibilité, qui a la probabilité la plus élevée d'être choisie (i.e. la possibilité la plus désirable).
- Un processus de mise à jour locale de la trace de phéromones est lancé, à chaque étape de la construction de la solution par chaque fourmi.
- A la fin de chaque itération, le processus de mise à jour globale de la trace de phéromones, est similaire à celui décrit pour la variante MMAS (i.e. seule la fourmi ayant produit la meilleure solution, dépose une quantité de phéromones).

Ces modifications requièrent la définition de nouvelles formules, dans le but de calculer les nouveaux paramètres. Une description de ces formules pour le problème du voyageur de commerce, est donnée dans (Dorigo & Gambardella, 1997) et (Dorigo, et al., 2006). Nous proposons une adaptation aux spécificités du problème FRTSP, comme suit :

- Nous avons décrit pour AS, le processus qui pilote à chaque étape de la construction de la solution, le déplacement d'une fourmi dans le graphe, d'un sommet (j,t) à un autre (j',t'). Dans le cas de la variante ACS, ce processus est enrichi avec une règle aléatoire. Ainsi, la sélection du prochain sommet (j',t') s'effectue selon la formulation suivante :

$$(j',t') = \begin{cases} \arg max_{(j_m,t_m)} \left\{ \tau_{(j,t)(j_m,t_m)} \left[\eta_{(j,t)(j_m,t_m)} \right]^{\beta} \right\} & si\ q \leq q_0 \\ suivant\ la\ formule\ (5.17) & sinon \end{cases} \quad (5.24)$$

  q : variable aléatoire choisi à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$.

  q_0 : paramètre de la variante ACS, à fixer lors de l'initialisation. A noter : $0 \leq q_0 \leq 1$. La valeur prise par le paramètre q_0 permet de faire pencher la balance intensification / diversification, soit d'un côté soit de l'autre.
- La mise à jour locale de la trace de phéromones, s'effectue durant la construction de la solution par une fourmi. Une fois une arrête sélectionnée, la quantité de phéromones qui y est associée est mise à jour, suivant la formule suivante :

  $\tau_{(j,t)(j',t')}(it) = \varphi . \tau_{(j,t)(j',t')}(it) + (1-\varphi).\tau_0 \quad (5.25)$

  φ : le facteur de persistance local (i.e. $(1-\varphi)$ représente le facteur d'évaporation). Il est compris dans l'intervalle $[0,1]$.

  Cette mise à jour locale favorise la diversification, à travers la diminution de la désirabilité de l'arrête choisie, pour les prochaines fourmis de la colonie, durant la même itération.
- La mise à jour globale de la trace de phéromones, présente deux légères variations dans la formule, par rapport à la variante MMAS. Ces variations se présentent comme suit :

- La quantité de phéromones déposée par la fourmi, ayant produit la meilleure solution de la génération courante, est multipliée par le facteur d'évaporation $(1-\rho)$. Ceci est dans le but de ralentir la convergence vers un ensemble de solutions, qui risque de bloquer la recherche dans un optimum local.
- Pour toutes les autres arrêtes, la quantité de phéromones reste inchangée (i.e. il n'y a pas de processus d'évaporation).

La formule se présente comme suit :

$$\tau_{(j,t)(j',t')}(it+1) = \begin{cases} \rho.\tau_{(j,t)(j',t')}(it) + (1-\rho).\Delta\tau^{k}_{(j,t)(j',t')}(it) \; si \; k = best \\ \tau_{(j,t)(j',t')}(it) \quad sinon \end{cases} \quad (5.26)$$

Les modifications au niveau de l'algorithme de la variante AS, pour la considération des spécificités de la variante ACS, sont présentées dans l'Algorithme V.3.

A noter que la convergence de la variante ACS a été prouvée théoriquement dans (Stützle & Dorigo, 2002).

Algorithme V.3 : L'adaptation de l'algorithme ACS pour le FRTSP à partir de AS

	De **1** jusqu'à **7** les étapes de l'algorithme AS restent inchangées
8.	Sélection du train qui va transporter la commande actuelle en se basant sur la formule (5.24)
9.	Mise à jour locale de la trace de phéromones sur l'arrête $\big((j,t),(j',t')\big)$, en utilisant la formule (5.25)
10.	Prochaine commande
11.	Prochaine fourmi de la colonie
12.	Mise à jour de la meilleure solution (si amélioration il y a)
13.	Mettre à jour la trace de phéromones, en se basant sur le résultat des calculs effectués avec la formule (5.26), pour toutes les arrêtes
14.	Prochaine itération

5.2.3. *Variante hybride : « MMACS »*

D'abord, il faut noter que les deux variantes MMAS et ACS présentent plusieurs similitudes. En effet, nous relevons deux caractéristiques communes comme suit :

- Seule une fourmi est autorisée à déposer une nouvelle quantité de phéromones, à la fin de chaque itération. Ce qui implique pour les itérations suivantes, des solutions potentiellement voisines de la meilleure solution précédente.
- Pour éviter la stagnation du processus de recherche, les deux variantes mettent en œuvre un mécanisme régulant la variation de la quantité de phéromones, sur chaque arrête. En effet, pour la variante MMAS, les limites sont explicites à travers l'intervalle $[\tau_{min}, \tau_{max}]$. Alors que pour la variante ACS, elles sont implicites et découlent de la forme des deux formules (5.25) et (5.26). En ce qui concerne la limite inférieure, aussi bien la mise à jour locale, que globale, n'autorisent une quantité de phéromones inferieure à τ_0. En ce qui concerne la limite supérieure, la formule de

mise à jour globale nous permet de déduire sa borne supérieure, qui est égale à $Q/L^k(it)$ avec k correspondant à la fourmi ayant trouvé la meilleure solution globale ($L^k(it)$ étant la valeur de la fonction objectif).

Cependant, une différence majeure existe entre ces deux variantes. Il s'agit de la règle décisionnelle qui dirige le processus de recherche. En particulier, pour la variante MMAS, c'est la décision probabiliste de la variante de base qui est utilisée. Cette dernière présente un équilibre entre exploration de nouvelles solutions (diversification) et exploitation de l'expérience acquise par les fourmis (intensification). En ce qui concerne la variante ACS, la règle proportionnelle pseudo-aléatoire utilisée, accentue le processus d'intensification, ce qui conduit principalement, à l'exploration de solutions voisines.

La variante hybride que nous proposons, est dérivée d'une variante proposée dans (Ramalhinho Lourenço & Serra, 2000), et développée pour le problème d'affectation généralisée. Nous y avons apporté quelques ajustements, pour prendre en compte les spécificités du problème FRTSP.

Cette variante propose de combiner une partie des caractéristiques de la variante MMAS et une autre partie de la variante ACS, comme suit :

- La règle décisionnelle adoptée est celle de la variante ACS (5.24).
- Il n'y a pas de mise à jour locale de la trace de phéromones.
- La mise à jour globale de la trace de phéromones, est similaire à celle de la variante MMAS (5.23).

Les modifications au niveau de l'algorithme de la variante AS, pour la considération des spécificités de la variante MMACS, sont présentées dans l'Algorithme V.4.

6. Une approche par horizon glissant pour optimiser la replanification du FRTSP

Le transport de marchandises en ville est soumis à de fortes perturbations (principalement liées aux commandes de dernière minute). Aussi, des retards de livraison, voire des annulations de commandes, font partie du quotidien de cette activité. D'autre part, le service de transport ferroviaire de voyageurs en milieu urbain durant les heures creuses est assez fiable. En effet, les légers retards qui peuvent se produire, sont rapidement absorbés. De plus, étant donné que les trains circulent en série, les uns après les autres sur la même ligne, l'impact des éventuels retards sera global et impactera toutes les commandes non transportées et cela, de manière équivalente. Dans ce cas, il n'y a pas de nécessité de procéder à une replanification. Il suffit de procéder à un décalage dans le temps des décisions prises initialement. Toutefois, les rares cas d'annulation de trains, auront pour impact, la nécessité de réaffecter les commandes qui devaient être transportées par le train annulé. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous proposons une démarche de replanification, qui se focalisera sur l'ajustement du plan initial de transport des marchandises, en ne considérant que les

perturbations liées aux commandes. En ce qui concerne les perturbations liées aux trains, elles seront traitées dans d'autres travaux.

Algorithme V.4 : L'adaptation de l'algorithme MMACS pour le FRTSP à partir de AS

	De **1** jusqu'à **7** les étapes de l'algorithme AS restent inchangées
8.	Sélection du train qui va transporter la commande actuelle en se basant sur la formule (5.24)
9.	Prochaine commande
10.	Prochaine fourmi de la colonie
11.	Si meilleure solution $>$ meilleure solution à l'itération courante (ou $= \emptyset$)
12.	Calcul de τ_{max} avec la formule (5.21)
13.	Calcul de τ_{min} avec la formule (5.22)
14.	Mettre à jour la meilleure solution (avec celle de l'itération courante)
15.	Fin Si
16.	Mettre à jour la phéromone en utilisant la formule (5.23) pour toutes les arrêtes
17.	Pour chaque arrête $\big((j,t),(j',t')\big)$
18.	Si $\tau_{(j,t)(j',t')} < \tau_{\min}$
19.	$\tau_{(j,t)(j',t')} = \tau_{\min}$
20.	Sinon Si $\tau_{(j,t)(j',t')} > \tau_{\max}$
21.	$\tau_{(j,t)(j',t')} = \tau_{\max}$
22.	Fin Si
23.	Prochaine arrête
24.	Si meilleure solution non améliorée depuis un certain nombre d'itérations
25.	Réinitialisation de la quantité de phéromones à τ_0 sur l'ensemble des arrêtes du graphe
26.	Fin Si
27.	Prochaine itération

La replanification est une démarche indispensable, pour adapter les décisions de la planification initiale, au fur et à mesure que les changements surviennent, lors de la phase d'exploitation. Dans ce travail, nous proposons une approche par horizon glissant pour réduire les effets négatifs des modifications, en intégrant ces écarts dans l'objectif du FRTSP.

Les perturbations relatives aux commandes peuvent être classées comme suit :

- Les commandes de « dernière minute » : il s'agit de commandes reçues durant la période d'exploitation. Leur prise en charge présente plusieurs avantages, tels que :
  - Utiliser l'espace résiduel pour le transport de marchandises dans les trains. Ce qui permet d'accroitre le rendement de cette activité.
  - La capacité d'absorber des commandes de dernières minutes est un bon indicateur de réactivité du service de transport.

- Augmenter les bénéfices de l'activité de transport de marchandises (la prise en charge tardive peut être facturée plus cher, ce qui rend cette perspective encore plus intéressante pour l'opérateur).

- Les commandes annulées : il s'agit des commandes planifiées pour être transportées, mais qui devront être retirés des plans de transport. En fonction du modèle économique choisi, la nécessité d'utiliser au mieux l'espace libéré sera plus ou moins critique, pour la rentabilité de la solution.
- Les commandes réceptionnées en retard : il s'agit des commandes qui arrivent à leur station de départ, à une date ultérieure à leur date de disponibilité prévisionnelle.

Le modèle mathématique développé dans le cas prédictif, fourni un plan initial de transport des marchandises. Ce dernier reste optimal, si aucune perturbation n'est enregistrée. Ainsi, il détermine le train t qui va transporter chaque commande j à partir de sa station de départ $s = dep_j$, avec la valeur de la variable de décision x_{jts}. Aussi, il détermine le moment auquel cette commande sera transportée, avec la valeur de R_{jts}. En pratique, il est très rare, de ne pas avoir de changements entre le moment ou le plan initial est calculé et le moment ou les décisions doivent être exécutées. L'objectif du modèle de replanification, est de réadapter le plan de transport des commandes précédemment établi, au vu des changements opérés, comme suit :

- Toute commande déjà transportée, n'est plus considérée, lors de l'établissement du nouveau plan de transport. De plus, pour assurer un minimum de stabilité au système, nous avons indiqué que les décisions prises sur un certain horizon temporel H_G, ne peuvent être modifiées. Ainsi, nous définissons J^t comme étant l'ensemble des commandes, dont la planification du transport est déterminée à l'intérieur de H_G. Ce qui implique aussi, les commandes déjà transportées (i.e. $\forall j \in J^t, x_{jts}$ sera fixe).
- L'ensemble des commandes annulées, qu'on note J^c.
- L'ensemble des commandes retardées, qu'on note J^r.
- L'ensemble des nouvelles commandes, qu'on note J^n.
- Le plan de transport initial, avec la valeur des moments auxquelles les commandes du plan initial devaient être transportées (i.e. les R_{jts} sont des données d'entrée pour le modèle de replanification).
- Le plan de transport initial implique un engagement commercial vis-à-vis des clients. Pour rappel, une fois la commande transportée, elle doit être prise en charge par un transport aval. Ainsi, dans le cas d'une replanification, il faut veiller à ne pas décaler la date de transport de chaque commande impliquée par la replanification, au-delà d'une limite à définir, qu'on note Var_{max}. D'autre part, cette limite de variation permettra de garder indirectement, un contrôle sur l'utilisation de l'espace dans les stations (i.e. ne pas avoir des commandes, dont le temps d'attente s'allonge de manière incontrôlée).

6.1. Un PLVM pour la minimisation des changements lors de la replanification du FRTSP

Une formulation est proposée pour recalculer le plan de transport des marchandises, en minimisant non seulement les temps d'attente des marchandises, mais en prenant en compte également les changements décisionnels entre la replanification et la planification initiale. Dans le Tableau V.4, des notations supplémentaires sont utilisées pour le PLVM pour la replanification.

Tableau V.4 : Notations additionnelles pour le cas de replanification

Paramètres	
nr_j	Date de disponibilité de la commande *j* (il peut s'agir d'une nouvelle commande, ou une commande retardée. Dans le cas où il n'y a aucun changement $nr_j = r_j$)
Var_{max}	Variation maximale entre le premier plan de transport et le nouveau
Variable de décision	
NR_{jts}	Nouveau moment auquel le train *t* charge la commande *j* à la station *s* (après replanification)

L'objectif de la replanification est la minimisation des variations avec le plan initial. Ainsi, la fonction objectif se présente comme suit :

$$Minimize \sum_{j \in J'} \sum_{t \in T'} (NR_{jts} - R_{jts}) \quad avec \;\; s = dep_j \tag{5.27}$$

Dans (5.27), il s'agit de minimiser la somme des variations, entre le plan précédent et celui résultant de la replanification. L'indice j est utilisé pour l'ensemble J', correspondant à l'ensemble des commandes non transportées et pouvant faire l'objet d'une replanification ($J' = (J \setminus J^t \setminus J^c) \cup J^n$). L'indice t est relatif aux trains de l'ensemble T', ne considérant que ceux qui seront mis en circulation après l'horizon gelé ($\forall t, l_t \geq H_G$). A noter que pour les nouvelles commandes ($j \in J^n$), R_{jts} n'existe pas encore. Pour préserver la performance du système global, à travers la réduction du temps d'attente des commandes dans leur station de départ avant leur transport, nous considérons : $\sum_{t \in T'} R_{jts} = nr_j \,, \forall j \in J^n \; avec \; s = dep_j$.

L'ensemble des contraintes du PLVM dans le cas prédictif (de (5.5) jusqu'à (5.14)), sont considérées pour le modèle de replanification. Les modifications à y apporter se présentent comme suit :

- j est considéré dans l'ensemble J'.
- t est considéré dans l'ensemble T'.
- r_j est remplacé par nr_j dans l'ensemble des contraintes (5.8).
- R_{jts} est remplacé par NR_{jts} dans l'ensemble des contraintes (5.9).

Dans le but de limiter les variations lors de la replanification, nous définissons les deux ensembles de contraintes supplémentaires comme suit :

$$\sum_{t\in T'}\left(NR_{jts} - R_{jts}\right) \leq Var_{max} \qquad \forall j \in J'' \; avec \; s = dep_j \tag{5.28}$$

$$\sum_{t\in T'}\left(R_{jts} - NR_{jts}\right) \leq Var_{max} \qquad \forall j \in J'' \; avec \; s = dep_j \tag{5.29}$$

avec $J'' = J \setminus J^t \setminus J^c \setminus J^r$

6.2. L'approche de replanification par horizon glissant

Dans l'adaptation de l'approche par horizon glissant au FRTSP, nous avons utilisé plusieurs paramètres qui sont définis comme suit :

- L'horizon de planification H_P : il s'agit de la période considérée pour la planification du transport de marchandises, à chaque itération. Il peut s'agir d'une partie d'une journée d'exploitation, voire de plusieurs.
- L'intervalle de planification r : cet intervalle doit résulter d'un compromis, afin de trouver un équilibre entre la réactivité voulue et la stabilité souhaitée. Plus précisément, la réactivité est obtenue avec un intervalle court afin de replanifier aussi fréquemment que possible, ce qui permet d'absorber un maximum de perturbations, mais qui génère de nombreux calculs intermédiaires et donc un plus grand risque d'instabilité. La stabilité est atteinte avec un intervalle de recalcul assez long avec le risque de dégrader la réactivité du système.
- L'horizon gelé H_G : ce mécanisme permet d'assurer un minimum de stabilité au système, en fixant un intervalle de temps durant lequel les décisions précédentes ne sont pas remises en cause. En effet, aussi bien les ressources matérielles, qu'humaines, impliquées dans l'activité de transport de marchandises, doivent avoir une certaine visibilité sur la charge de travail à venir.
- L'horizon libre H_L : hors horizon gelé, les décisions précédentes peuvent être remises en cause si nécessaire. Toutefois, ces dernières sont indispensables pour avoir une visibilité sur la charge de transport prédictive, durant tout l'horizon de planification. De plus, le transport de marchandises aval, devant être pris en charge par un moyen de transport tierce, il est indispensable d'établir une date de livraison prévisionnelle.

A ces différents paramètres, s'ajoute le nombre d'itérations à considérer, durant une période d'exploitation (qui peut être une journée, ou une semaine par exemple).

Lors de la première itération, c'est le modèle du cas prédictif qui est utilisé. La solution proposée est ce qu'on qualifie de plan de transport initial. Toutes les itérations suivantes, utilisent le modèle de replanification. A noter que le plan initial reste la référence pour les commandes du plan prédictif. Pour les nouvelles commandes, leur première planification devient la référence. Enfin, si aucune perturbation n'a été enregistrée durant le pas de planification actuelle, le recalcul est inutile.

Pour résumer le processus de replanification à horizon glissant, dans le cas de la solution de transport étudiée, nous proposons la Figure V.4.

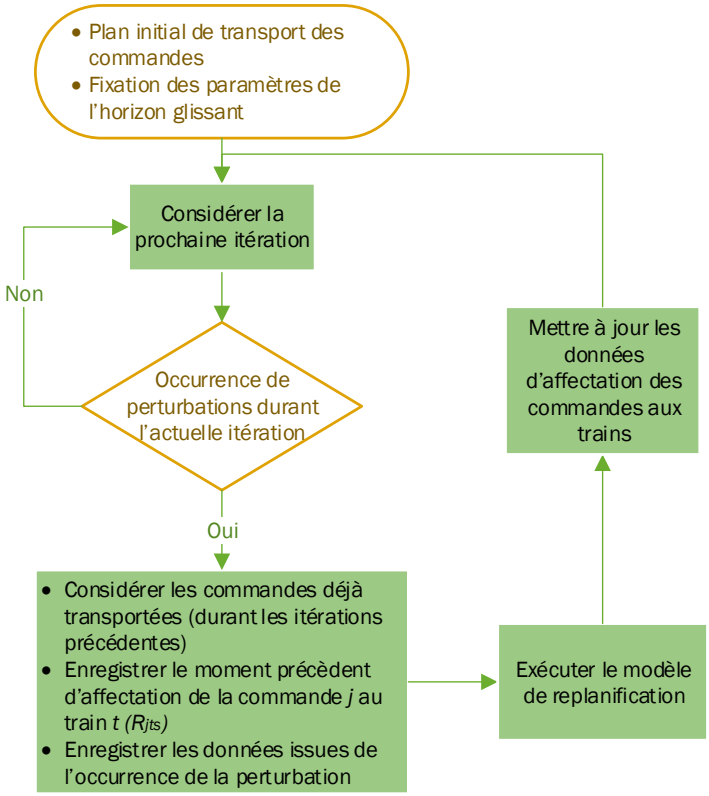


Figure V.4 : La replanification du FRTSP par horizon glissant

7. Couplage simulation / optimisation

Dans le but de reproduire le caractère dynamique de la solution de transport étudiée, nous proposons un couplage avec la simulation. Ce couplage donne lieu à une répartition des rôles comme suit :

- Le modèle de simulation à évènements discrets permet la simulation du fonctionnement de la solution de transport étudiée.
- Les modèles d'optimisation mathématique, implémentée dans CPLEX, permettent d'optimiser l'élaboration du plan de transport des marchandises, de manière à réduire leur temps d'attente dans leur station de départ.
- Le modèle de simulation ARENA met en évidence les bénéfices de cette optimisation, sur les différentes composantes de la solution de transport étudiée. De plus, il permet d'observer dans le temps, l'évolution de l'utilisation des différentes ressources mobilisées, à travers la considération des résultats de l'optimisation.

7.1. Cas prédictif

Dans ce cas, c'est la génération des commandes, suivant le premier scénario modélisé sur ARENA, qui est considéré (présenté dans la section 3.1 du chapitre 4).

Un premier apport du modèle de simulation, concerne la validation du modèle d'optimisation. En effet, la simulation de la solution de transport, en considérant les résultats du modèle d'optimisation, a mis en évidence quelques incohérences telles que la nécessité de définir de nouvelles contraintes, notamment pour la continuité du voyage de toute marchandise, ou l'ajustement des bornes de certains intervalles.

Le couplage mis en œuvre est schématisé par la Figure V.5. On peut le résumer comme suit :

- Génération des données relatives aux commandes et aux trains.
- L'enregistrement de ces différentes données, ainsi que celles relatives au paramétrage des stations.
- A l'instant 0 de la simulation, nous procédons à la résolution du PLVM avec CPLEX, ou les algorithmes de colonies de fourmis, en considérant les données générées avec le modèle de simulation.
- L'interface entre le modèle de simulation et ceux de l'optimisation a été possible grâce à Excel / VBA.
- Lors de la circulation des trains à travers la ligne ferroviaire, le plan de transport optimal, fourni par le modèle d'optimisation, est considéré.

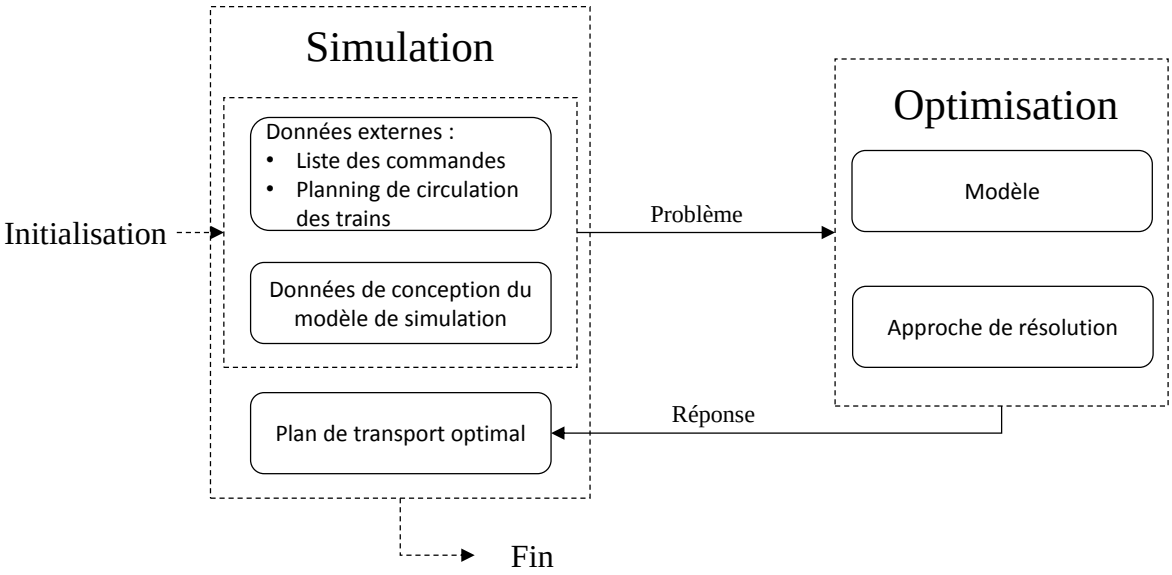


Figure V.5 : Le schéma de couplage dans le cas prédictif

Bien que le modèle d'optimisation, considère les différentes contraintes de dates de disponibilité des commandes, de capacités des trains et de temps d'attente limites dans les stations, ces dernières sont aussi modélisées sur ARENA. C'est cette démarche, qui nous a permis de valider le modèle d'optimisation.

7.2. Cas de replanification

Dans ce cas, c'est la génération des commandes, suivant le second scénario modélisé sur ARENA qui est considéré (présenté dans la section 3.1 du chapitre 4).

Dans un premier temps, le couplage a permis la validation du modèle de replanification par horizon glissant. Ceci à travers la vérification de la cohérence des réajustements du plan de transport, que fourni le modèle de replanification, à intervalle régulier. Aussi, cette procédure a permis l'ajustement des valeurs de l'horizon gelé et du pas de planification.

Le couplage mis en œuvre est schématisé par la Figure V.6. En plus de toutes les étapes du couplage dans le cas prédictif, nous introduisons les étapes supplémentaires suivantes :

- Génération aléatoire de nouvelles commandes, en cours de simulation. Ces commandes sont paramétrées de la même manière que les commandes générées initialement.
- Génération de perturbations sur les commandes non encore transportées (retard de disponibilité ou annulation). Ces perturbations sont générées directement dans l'environnement VBA.
- L'enregistrement des données relatives aux nouvelles commandes et celles ayant subi une perturbation.
- Après chaque intervalle de planification, vérifier la présence de nouvelles commandes, ou l'occurrence de perturbations.
- Dans le cas où des perturbations ont été enregistrées, nous procédons à la résolution du PLVM de replanification, de la même manière que pour le PLVM du cas prédictif. A noter que pour les besoins de la replanification, les résultats du modèle initial, ainsi que certaines données initiales, sont requis.
- L'interface entre le modèle de simulation et ceux de l'optimisation a été possible grâce à Excel / VBA.

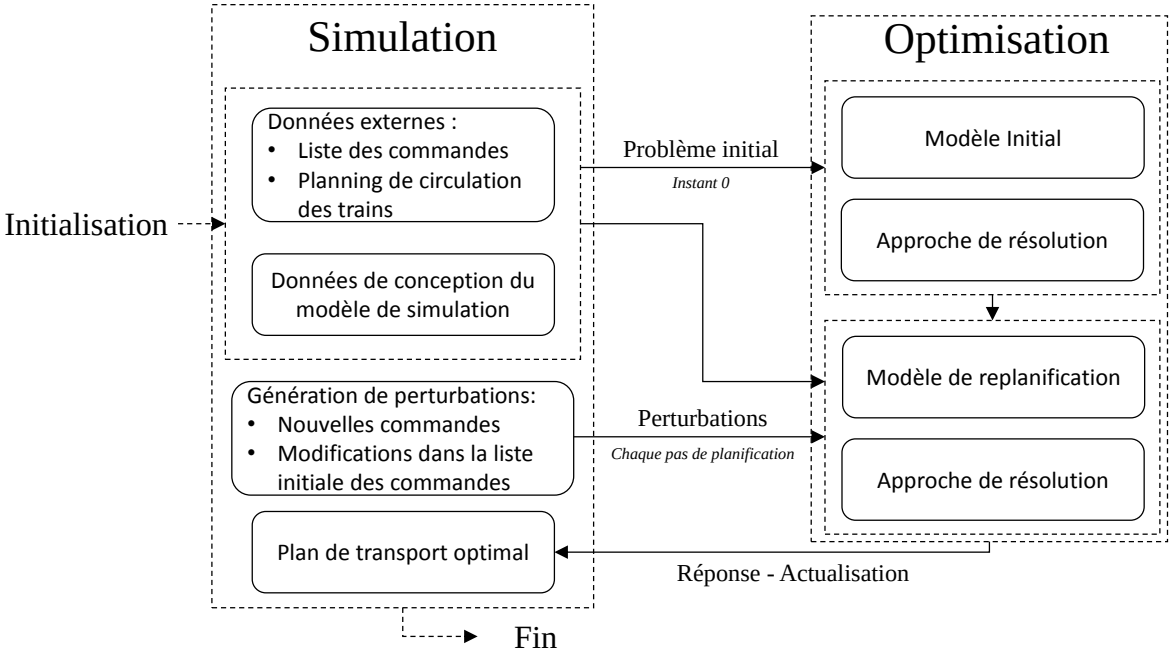


Figure V.6 : Le schéma de couplage dans le cas de la replanification

Lors de la circulation des trains à travers la ligne ferroviaire, c'est le plan de transport optimal actuel, fourni par la dernière itération de résolution du modèle de replanification, qui est considéré.

8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé la méthodologie de résolution du problème FRTSP, dans les deux cas : prédictif et replanification. Nous avons commencé ce chapitre par l'étude d'un exemple illustrant les données et contraintes du FRTSP afin d'appréhender sa complexité. En particulier, à travers cet exemple, nous avons constaté :

- L'impact direct des contraintes de temps d'attente dans les stations, à travers le temps nécessaire au déchargement des commandes, puis, celui nécessaire au chargement d'autres commandes.
- L'impact de la limitation de l'espace à l'intérieur des trains, sur les possibilités de transport de chaque train, en fonction des commandes chargées.
- La difficulté d'appréhender les conséquences des différentes possibilités combinatoires, sur la performance des décisions de transport prises. Ce qui résulte de la combinaison entre les deux contraintes : temps d'attente et capacité des trains, associée à la combinaison entre les deux caractéristiques des commandes : parcours spécifique pour chaque commande et tailles différentes.

Nous avons étudié la complexité du FRTSP en montrant que c'est une extension du problème d'affectation généralisé. Ensuite, nous avons formalisé ce problème en utilisant un modèle mathématique de type PLVM, considérant toutes les contraintes techniques et organisationnelles. L'objectif de cette étude préliminaire est de montrer le bénéfice potentiel, en quantifiant les volumes qu'il est possible de transporter. Ainsi, nous avons proposé de minimiser le temps d'attente des commandes avant leur transport. Nous avons adapté les colonies de fourmis au FRTSP, en raison des bonnes performances de cette métaheuristique, pour la résolution du problème d'affectation généralisée.

De plus, le transport de marchandises étant sujet à divers types de perturbations, nous avons proposé une approche par horizon glissant pour replanifier le FRTSP. Cette démarche permet de considérer périodiquement, toutes les perturbations enregistrées en cours de la période écoulée, pour générer un nouveau plan de transport optimal. Le modèle d'optimisation mathématique de replanification, ayant pour objectif, la minimisation des variations relatives, par rapport au plan de transport initial.

Enfin, nous avons décrit le protocole de couplage simulation / optimisation, dans le but :

- D'évaluer l'impact de la solution fourni par les modèles d'optimisation, sur la dynamique du système de transport étudié.
- De considérer les perturbations enregistrées en cours d'exploitation, pour préserver la performance du système.

Chapitre VI

Expérimentations et analyse des résultats

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la phase expérimentale afin de présenter les résultats obtenus des différents modèles et approches proposées pour le FRTSP. Dans un premier temps, nous abordons la génération aléatoire des instances du FRTSP, qui est justifiée par l'absence de données réelles, notamment concernant la demande prévisionnelle pour le transport de marchandises. Dans la section suivante, nous rapportons les résultats du PLVM, des quatre heuristiques, ainsi que ceux de l'approche de replanification, qui sont couplés au modèle de simulation dans le but d'évaluer les taux d'occupation des stations et des trains. Ces résultats sont cruciaux pour le dimensionnement des espaces et de la capacité nécessaire à la mise en place de ce nouveau service de transport.

Une section est complètement dédiée aux colonies de fourmis. D'abord, on y présente l'utilisation de la méthode Taguchi pour définir les paramètres des différentes variantes étudiées. Ensuite, on présente les résultats obtenus en comparant les performances des différentes variantes en termes de gap, de temps de calcul et de vitesse de convergence.

2. Génération des instances

L'une des principales difficultés, lors de l'étude d'une nouvelle problématique, est l'absence de données, telles que la prévision de la demande de transport de marchandises (vu que ce service n'existe pas encore). Cependant, pour développer un modèle de simulation, des instances numériques sont nécessaires avec idéalement des données proches des projections de ce nouveau service. Dans un premier temps, nous proposons de générer des instances aléatoirement, en se basant sur les données actuelles qui caractérisent le réseau ferroviaire de transport pour passagers. Entre autres, la fréquence de circulation des trains et leur capacité, correspondent aux données des lignes franciliennes. Pour les autres paramètres, les valeurs aléatoires sont générées sur la base des projections obtenues suite aux études du PREDIT.

Dans un premier temps, le modèle de simulation vise à évaluer la performance du système de transport, lorsque le plan de transport optimisé est injecté dans une dynamique temporelle. Toutefois, comme le problème étudié est NP-difficile et pour pouvoir comparer les performances des métaheuristiques et heuristiques, avec la solution optimale, la taille des instances doit être ajustée (durée de la simulation, nombre de commandes, nombre de trains et nombre de stations).

2.1. Paramétrage du modèle de simulation

Les paramètres du modèle de simulation illustré par la figure IV.3, sont définis comme suit :

- Une ligne de transport ferroviaire est composée de 10 stations ($S = 10$). Les stations sont indexées de 1 à 10, en ordre croissant. Ainsi, les trains parcourent la ligne en traversant les stations de l'index 1, jusqu'à celle avec l'index 10.
- La distance entre deux stations consécutives, requiert un temps de parcours égal à 5 minutes ($\forall s, tt_{s,s+1} = 5$).
- Les temps d'attente limites des trains dans chaque station sont données par : $wait_{min} = 30\ secondes$ et $wait_{max} = 60\ secondes$.

- La durée de la simulation est de 350 minutes. Nous considérons la période d'exploitation du service de transport de marchandises, entre 10h et 15h50. Nous supposons que c'est la période d'heures creuses pour le transport de voyageurs, durant une journée de la semaine.
- 30 trains ($T = 30$) équipés pour le transport de marchandises, sont mis en circulation durant chaque période simulée, à intervalles réguliers. Un train est mis en circulation toutes les 10 minutes à partir de l'instant 0 ($\forall t, l_{t+1} = l_t + 10$). Ainsi, le dernier train est mis en circulation à l'instant 290 et arrivera à la station 10, au pire des cas (si on considère un temps d'arrêt dans chaque station égal à $wait_{max}$), à l'instant 344.
- La capacité des trains en nombre de colis standards, pouvant être transportés simultanément, est similaire pour tous les trains. Nous la fixons à 15 colis standard ($\forall t, cap_t = 15$). Nous supposons que cela représente la capacité d'un wagon du train. Ainsi, si on considère qu'un train est composé au total de 5 wagons, la capacité dédiée au transport de marchandises représente 20% de sa capacité totale.
- Le temps de chargement d'un colis standard est égal à 10 secondes ($time = 10$).

2.2. Le cas prédictif

Les différents paramètres de chaque commande, sont générés aléatoirement, comme suit :

- Les dates de disponibilité des commandes sont générées suivant une loi uniforme, ainsi : $\forall j, r_j$ est issue de la distribution $U(0{,}240)$, avec 0 correspondant au début de la période (soit 10h) et 240 (soit 14h), le dernier moment auquel il est possible de réceptionner une commande pour son transport. Nous arrêtons la réception des commandes, à 50 minutes de la mise en circulation du dernier train, pour leur permettre d'être transportées.
- Les commandes sont composées d'un nombre de colis variant entre 1 et 5 colis standard, générées suivant une loi uniforme, ainsi : $\forall j, Q_j$ est issue avec la loi $U(1{,}5)$.
- Les stations de départ et d'arrivée de chaque commande, sont générées aléatoirement entre la 1ère et la 10ème station. Sachant que la station 1 ne peut pas être une station d'arrivée et la station 10 ne peut pas être une station de départ.

10 familles d'instances sont considérées, telles que chacune des familles correspond à un nombre de commandes à transporter, allant de 10 à 100 (avec un pas de 10). Chaque famille contient 25 instances.

2.3. Le cas de la replanification

Pour simuler le cas de replanification, nous définissons les différents paramètres, relatifs aux perturbations possibles et à l'horizon glissant, comme suit :

- Commandes annulées : après chaque intervalle de recalcul, chaque commande non transportée a 10% de probabilité d'être annulée.
- Commandes retardées : après chaque intervalle de recalcul, chaque commande non transportée a 10% de probabilité d'être retardée.
- Nouvelles commandes : après chaque intervalle de recalcul, nous pouvons avoir jusqu'à 20% de commandes additionnelles. Les dates de disponibilité de ces commandes sont après l'horizon gelé.

- Intervalle de recalcul : $r = 60\ minutes$.
- Horizon gelé : $H_G = 90\ minutes$.
- Horizon de planification : $H_P = 345\ minutes$.
- Pour ne pas limiter les possibilités lors de la replanification, nous considérons $Var_{max} = 30\ minutes$. Cependant, en fonction de la stratégie de l'entreprise de transport et des contraintes d'espace dans les stations, ce paramètre peut être ajusté.

En ce qui concerne le nombre d'itérations simulées, nous allons considérer deux seulement. L'objectif est d'expliciter la démarche de replanification et d'évaluer la performance du PLVM de replanification.

3. Analyse des résultats du couplage simulation / optimisation

Nous avons utilisé un ordinateur équipé du processeur Intel Xeon CPU E3-1245 v3 @ 3.40GHz, avec 8Go RAM. Le logiciel de simulation utilisé est ARENA version 14.7. En ce qui concerne la résolution des PLVM, nous avons utilisé CPLEX. Enfin, le couplage entre la simulation et les méthodes de résolution, s'effectue à travers l'échange de données via Excel 2010 (un code VBA implémenté sur ARENA assure ce couplage).

Dans un premier temps, nous allons évaluer le modèle d'optimisation dans le cas prédictif. Puis, nous comparons les résultats des règles décisionnelles implémentées sur ARENA.

Dans un second temps, nous analysons l'impact des différentes stratégies décisionnelles, sur les différentes composantes du système de transport étudié. Enfin, nous présentons les résultats de l'approche de replanification.

3.1. PLVM dans le cas prédictif

Nous avons résolu avec CPLEX, les 250 instances générées par le modèle de simulation, suivants les paramètres précédemment définis. Les résultats sont présentés dans le Tableau VI.1. Pour chaque nombre de commandes, nous calculons le nombre de contraintes et de variables, ainsi que le temps de résolution moyen, pour les 25 instances. En ce qui concerne la performance du PLVM, il trouve la solution optimale très rapidement pour les instances avec jusqu'à 50 commandes (temps de résolution inférieur à 1 seconde). Pour les autres instances, le temps de résolution moyen est inférieur à 18 secondes. Toutefois, pour une instance avec 100 commandes, nous avons observé un temps de résolution de 104 secondes.

Pour évaluer les limites du PLVM, en ce qui concerne la considération d'un nombre de commandes plus important, nous avons testé des instances avec 150 commandes (les autres paramètres étant fixes). Le PLVM (composé de 49 800 variables et 50 850 contraintes) n'a pas été en mesure de fournir la solution optimale après 30 minutes de calcul. La décision d'arrêter le processus de résolution après 30 minutes, découle des spécificités de la solution de transport étudié. En effet, l'établissement du plan de transport est une tâche qui doit être renouvelée assez fréquemment (le plus probable, chaque début de journée). Ainsi, il n'est pas possible d'avoir des temps de calcul très importants.

Tableau VI.1 : Synthèse des résultats du PLVM dans le cas prédictif

Nombre de commandes	Nombre de variables	Nombre de contraintes	Temps de résolution moyen
10	3 600	4 510	0,1
20	6 900	7 820	0,3
30	10 200	11 130	0,4
40	13 500	14 400	0,6
50	16 800	17 750	0,8
60	20 100	21 060	1,2
70	23 400	24 370	1,8
80	26 700	27 680	3,2
90	30 000	30 990	4,2
100	33 300	34 300	17,9

Dans le Tableau VI.2, nous présentons les résultats de la résolution de 25 instances, constituées de 150 commandes. La seconde ligne du tableau donne le gap d'optimalité que fournit CPLEX pour chaque instance (i.e. l'écart avec la borne inférieure pour notre problème de minimisation).

Tableau VI.2 : Résultats de la résolution d'instances (150 commandes, 30 trains, 10 stations)

Inst.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Gap%	x	3,86	4,79	8,89	4,74	2,89	8,01	9,58	2,25	5,73	x	9,11
13	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**
11,01	13,37	2,91	12,19	5,11	3,17	6,09	2,93	11,18	x	4,32	2,74	8,55

A noter que sur les 25 instances, 3 sont infaisables (instances : 1, 11 et 22). L'étude en détail de ces instances, montre que la configuration de transport adoptée, ne permet pas la prise en charge de toutes les commandes. En effet, la date de disponibilité tardive de certaines commandes, ne leur permet pas d'être transportées par les trains qui restent encore en circulation, pour deux raisons :

- Il n'y a pas assez d'espace pour les transporter.
- Le temps d'attente maximum dans les stations ne permet pas de les charger.

L'un des avantages du PLVM est de vérifier la faisabilité de l'instance très rapidement (quelques millisecondes). En pratique, cette information peut permettre aux managers, de prendre des dispositions rapidement, pour ajuster les paramètres du système de transport, dans le but de satisfaire la demande de transport. Les décisions à prendre peuvent consister à augmenter le nombre de trains en circulation, ou bien augmenter l'espace dédié aux marchandises, à l'intérieur des trains planifiés initialement.

Pour évaluer l'influence du nombre de trains, sur la performance du PLVM, nous avons fait varier leur nombre entre 10 et 100, avec un pas de 10. D'abord, nous avons enregistré un

certain nombre d'instances infaisables (Tableau VI.3). Cette infaisabilité s'explique par les mêmes raisons citées précédemment.

Tableau VI.3 : Nombre d'instances infaisables

	Nombre de trains									
Nombre de commandes	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	25	2	0	0	0	0	0	0	0	0
90	25	2	0	0	0	0	0	0	0	0
100	25	11	0	0	0	0	0	0	0	0

En ce qui concerne l'évolution des temps de résolution, la Figure VI.1 montre leur évolution en fonction du nombre de trains et du nombre de commandes. Nous relevons que les temps de résolution augmentent avec l'augmentation du nombre de commandes. Toutefois, pour un même nombre de commandes, lorsque le nombre de trains est moindre, les temps de résolution augmentent. En effet, pour les instances faisables, le temps de résolution décroit sensiblement avec l'augmentation du nombre de trains jusqu'à 40 trains. Ce phénomène est lié à la réduction du nombre de solutions faisables et à la difficulté de trouver la combinaison optimale. Puis, à partir de 40 jusqu'à 100 trains, nous observons l'effet inverse, mais avec une intensité moindre. A noter que le point d'inversion de la tendance se décale vers la droite, avec l'augmentation du nombre de commandes à transporter.

D'autre part, nous avons enregistré la valeur moyenne de la fonction objectif pour chaque famille. La Figure VI.2 montre son évolution, en fonction du nombre de trains en circulation. Nous relevons qu'avec l'augmentation du nombre de trains, le temps d'attente des commandes se réduit rapidement entre 10 et 50 trains. Ce comportement s'explique par le fait que l'augmentation du nombre de trains, a un impact positif conséquent sur la performance du système de transport, jusqu'à l'atteinte d'un point d'équilibre, où la mise en circulation de trains supplémentaires, n'a qu'un impact réduit. Dans le cas avec 100 commandes à transporter, ce point d'équilibre se trouve entre 50 et 60 trains. En effet, l'étude en détail des résultats pour chaque instance avec 100 commandes, montre qu'à partir de 50 trains, quasiment toutes les commandes sont transportées par le premier train qui les croise. Avec 60 trains, c'est toutes les commandes qui sont prises en charge par le premier train. Au-delà (i.e. avec un nombre de trains supérieur à 60), la réduction du temps d'attente des commandes résulte de la réduction de l'intervalle, entre chaque deux trains consécutifs. En effet, cela a pour conséquence directe, la réduction pour certaines commandes, de leur temps d'attente de quelques secondes.

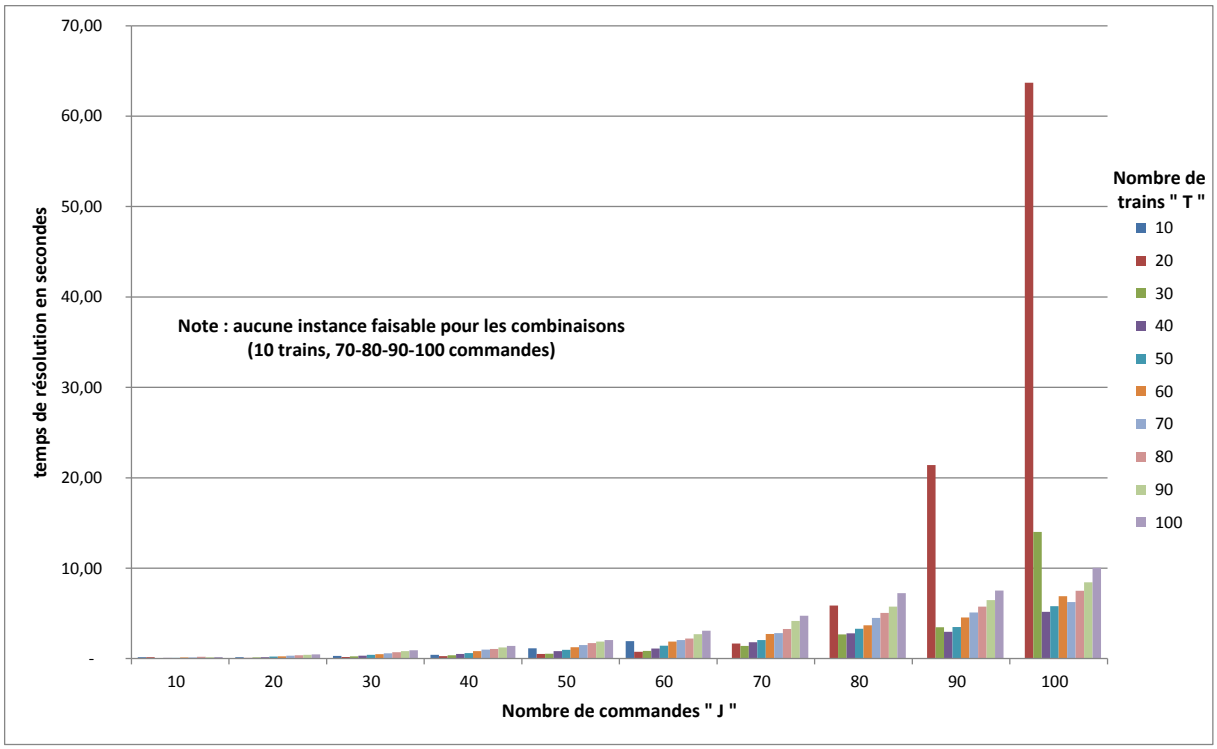


Figure VI.1 : Influence du nombre de trains sur les temps de résolution du PLVM

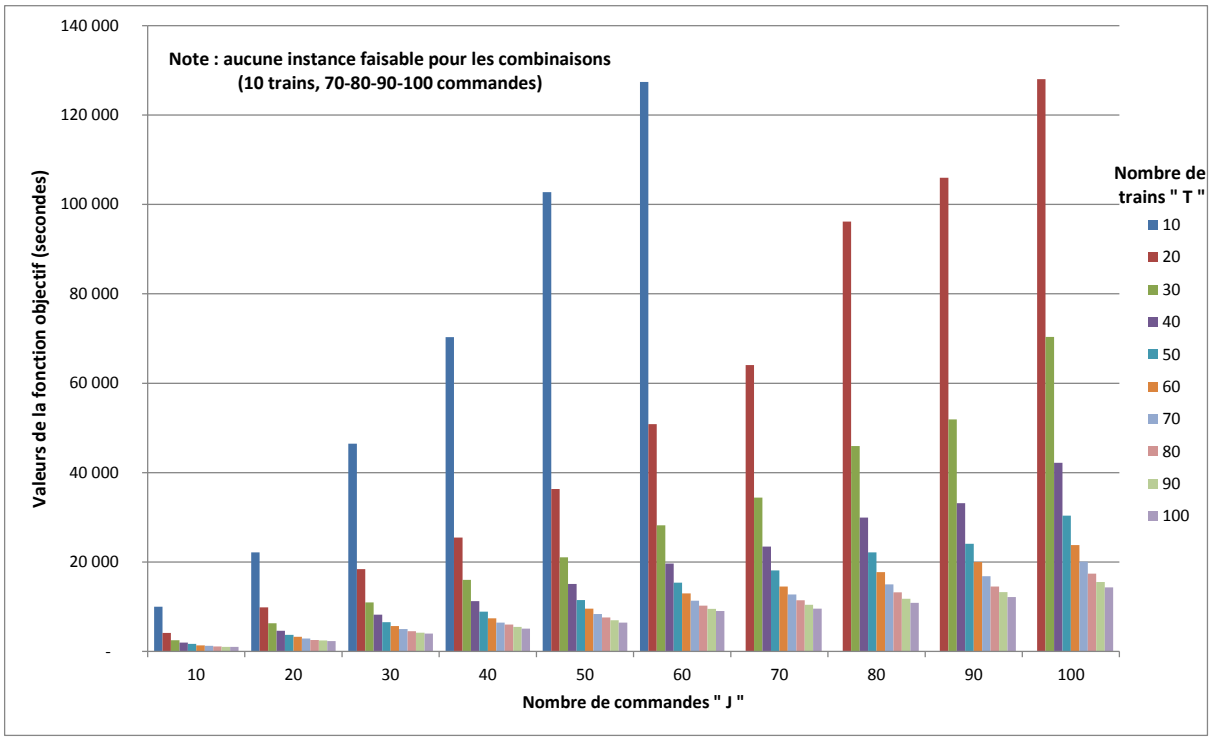


Figure VI.2 : Influence du nombre de trains sur les temps d'attente

Ce résultat apporte une information cruciale, pour la résolution du problème n°6, qui consiste à déterminer la fréquence optimale des trains en circulation (ou planning de circulation des trains).

3.2. Les heuristiques

Les trois heuristiques basées sur les règles de priorité, ont l'avantage de nécessiter un temps de calcul négligeable (~0). Quant à la 4ème heuristique, basée sur un algorithme de type B&B, même si elle est plus coûteuse que les trois premières, elle reste néanmoins à un temps réduit. Ceci s'explique par le fait de traiter des sous problèmes, avec un nombre restreint de commandes, c'est-à-dire celles qui peuvent être affectées au train correspondant. Nous avons observé dans le pire des cas, 5 secondes de temps de calcul (à noter que cette heuristique est implémentée directement dans l'environnement VBA du logiciel de simulation ARENA, ce qui est moins performant que l'utilisation d'un langage dédié aux calculs. Toutefois, ceci nous permet d'avoir un modèle de simulation intégrant un processus décisionnel).

Les histogrammes présentés par la Figure VI.3, montrent la corrélation entre le nombre de commandes et le temps d'attente total des commandes. Aussi, nous observons la performance de chaque heuristique, comparativement à la solution optimale. Le Tableau VI.4 donne le gap entre les solutions fournies par chaque heuristique et les solutions optimales, pour chaque famille d'instances.

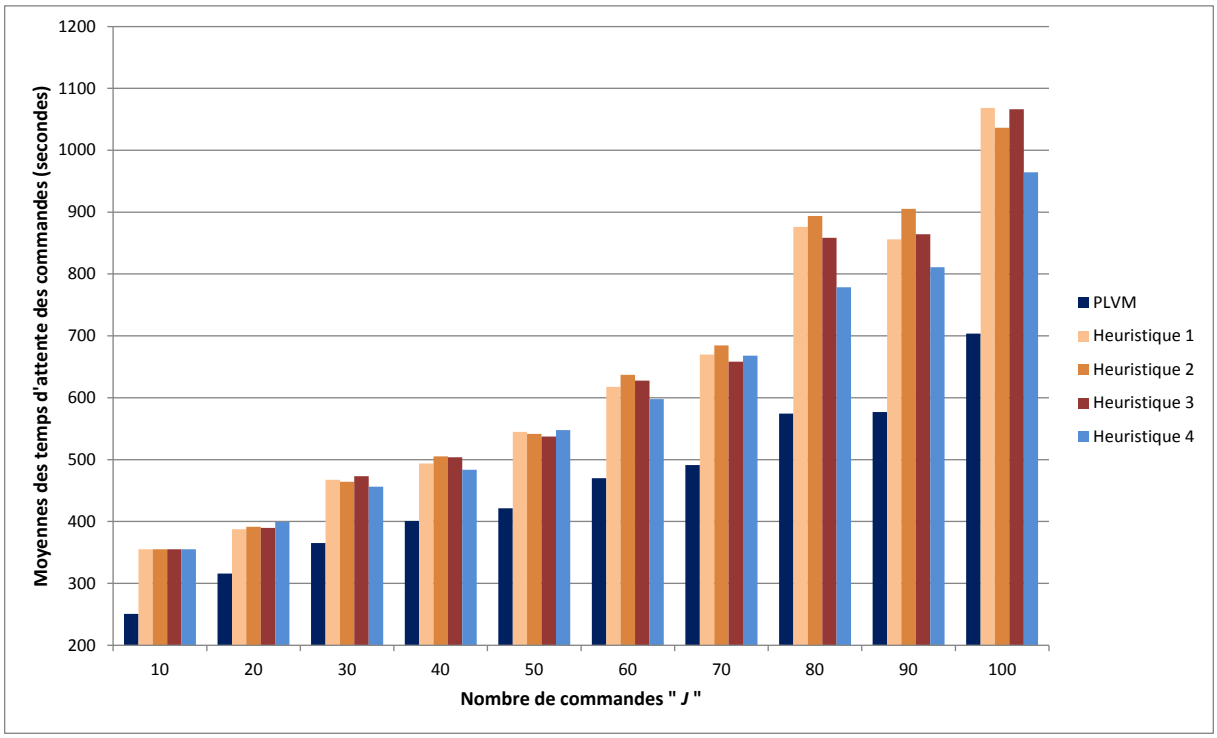


Figure VI.3 : Comparaison des temps d'attente des heuristiques avec ceux du PLVM

Les résultats des différentes heuristiques sont assez éloignés de ceux obtenus grâce au PLVM. De plus, la qualité de leurs solutions se dégrade, d'autant plus que le nombre de commandes à transporter augmente. Si on définit des classes d'instances telle que le 1er groupe est celui des 20-40 commandes, le 2ème des 50 à 70 et le 3ème celui des 80 à 100, alors la courbe des écarts est strictement croissante pour chaque heuristique. A noter que l'effort de décomposition permet à la 4ème heuristique d'obtenir de meilleures solutions comparativement aux 3 premières. Aussi, nous avons relevé que l'écart avec la solution optimale atteint, dans le pire des cas, 40% sur l'ensemble des instances comprenant celles avec 150 commandes

(comparativement à la meilleure solution fournie par CPLEX après 30 minutes de temps de résolution).

Des analyses approfondies seront réalisées dans la prochaine section, pour étudier l'impact respectif de chaque heuristique, sur le système de transport.

Tableau VI.4 : Résultats des heuristiques VS solutions optimales

Nombre de commandes	Heur. 1	Heur. 2	Heur. 3	Heur. 4
20-40	27%	28%	28%	27%
50-70	31%	33%	30%	31%
80-100	49%	53%	46%	34%

3.3. Comparaison et évaluation du gap des heuristiques VS PLVM

L'étude de la solution de transport nécessite la considération des mouvements des marchandises. Dans ce qui suit, nous allons étudier ces mouvements dans les stations, ainsi que la dispersion du temps d'attente des commandes selon la position de leur station de départ sur la ligne. En effet, nous allons définir trois segments pour la ligne pour distinguer le début, le centre et la fin de la ligne. Puis, nous évaluons le taux d'utilisation respectivement des trains et des stations.

3.3.1. Commandes

Pour caractériser le temps d'attentes des commandes dans le Tableau VI.5, nous rapportons :

- Le temps d'attente moyen des commandes (colonne « Moy. »).
- Le temps d'attente moyen des commandes dont la station de départ est l'une des 3 premières stations de la ligne (colonne « MS »).
- Le temps d'attente moyen des commandes dont la station de départ est l'une des 3 stations au milieu de la ligne (colonne « MM »).
- Le temps d'attente moyen des commandes dont la station de départ est l'une des 3 dernières stations de la ligne - hors dernière station - (colonne « ME »).

Tableau VI.5 : Résultats de la simulation sur les temps d'attente des commandes

Nbr. Com.	PLVM				Heuristique 1				Heuristique 2				Heuristique 3				Heuristique 4			
	Moy.	MS	MM	ME	**Moy.**	MS	MM	ME	**Moy.**	MS	MM	ME	**Moy.**	MS	MM	ME	**Moy.**	MS	MM	ME
10	**172**	186	139	191	**253**	204	247	308	**253**	204	247	308	**253**	204	247	308	**247**	212	242	286
20	**303**	302	264	343	**369**	314	306	486	**372**	314	310	490	**370**	314	306	491	**381**	335	340	468
30	**352**	318	310	430	**457**	307	413	651	**453**	307	419	633	**462**	307	410	668	**445**	345	422	569
40	**402**	353	333	522	**490**	338	383	748	**504**	337	382	791	**500**	336	382	782	**476**	375	430	623
50	**409**	327	334	565	**537**	338	425	849	**536**	338	422	848	**534**	337	414	852	**536**	376	493	739
60	**466**	363	391	644	**611**	347	470	1015	**633**	349	473	1078	**625**	347	466	1062	**603**	397	545	867
70	**495**	390	409	685	**661**	363	488	1132	**675**	370	498	1156	**654**	364	486	1110	**666**	476	644	878
80	**564**	447	481	763	**871**	397	544	1673	**883**	400	555	1694	**853**	396	532	1632	**768**	530	659	1116
90	**571**	452	529	733	**865**	393	587	1614	**904**	397	604	1712	**851**	392	583	1578	**795**	576	759	1049
100	**678**	474	631	928	**1012**	377	633	2028	**1008**	378	647	1999	**999**	374	633	1989	**914**	534	863	1344

La Figure VI.4 montre le mode de calcul des différentes moyennes de temps d'attente.

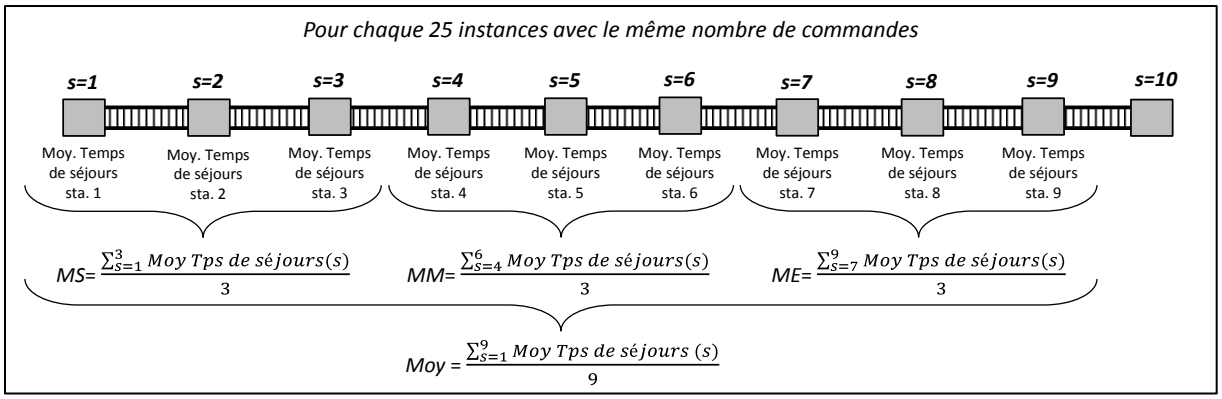


Figure VI.4 : Calculs des temps d'attente moyens

Nous remarquons que l'optimisation du temps d'attente total des commandes, produit des temps d'attente non équilibrés entre les différentes stations. En effet, le temps d'attente dans les stations augmente à mesure que la ligne est parcourue. Ce phénomène pourrait s'expliquer, en partie, par le fait que les trains sont vides au début et se remplissent au fur et à mesure qu'ils parcourent la ligne. De plus, dans les premières stations, généralement, il n'y a pas de déchargement, tandis qu'au milieu de la ligne, les deux processus de chargement et de déchargement, peuvent s'accumuler. Une conséquence directe de cette superposition est la réduction du temps résiduel pouvant potentiellement permettre des opérations de chargement. Enfin, dans les dernières stations de la ligne, il y a plus de déchargement que de chargement, ce qui implique que les commandes qui sont en attente de transport, à partir de ces stations, mettent plus de temps à être prises en charge.

Une tentative d'équilibrage des temps d'attente des commandes dans les stations, implique la dégradation du temps d'attente total. A noter qu'en pratique, la majeure partie des commandes, aurait comme station de départ, les premières stations de la ligne. Ce qui aura pour conséquence, le rééquilibrage de ces temps d'attente.

D'autre part, il est intéressant de noter la capacité de la 4ème heuristique à reproduire le même comportement que le PLVM. Les boîtes à moustaches de gauche de la Figure VI.5 montrent que la variabilité du temps d'attente des commandes, entre les différentes stations de la ligne, donnée par l'heuristique 4, est la plus maitrisée. En outre, elles montrent, pour les autres heuristiques, que cette variabilité est répartie sur un plus large intervalle. Ce constat permet de souligner l'intérêt de l'heuristique 4, basée sur la décomposition pour les instances difficiles (voir le max des heuristiques 1, 2 et 3 dans les boîtes à moustaches à gauche de la Figure VI.5). L'analyse des résultats détaillés dans le Tableau VI.5, montre que pour les trois premières heuristiques, les temps d'attente des commandes augmentent fortement, lorsque l'indice de la station augmente. Les boîtes à moustaches à droite de la Figure VI.5 présentent la variation des temps d'attente des commandes, en fonction du nombre de commandes à transporter, lorsque la 4ème heuristique est appliquée. Elles montrent que les temps d'attentes des commandes et leur variabilité entre les stations, augmentent proportionnellement avec l'augmentation du nombre de commandes à transporter.

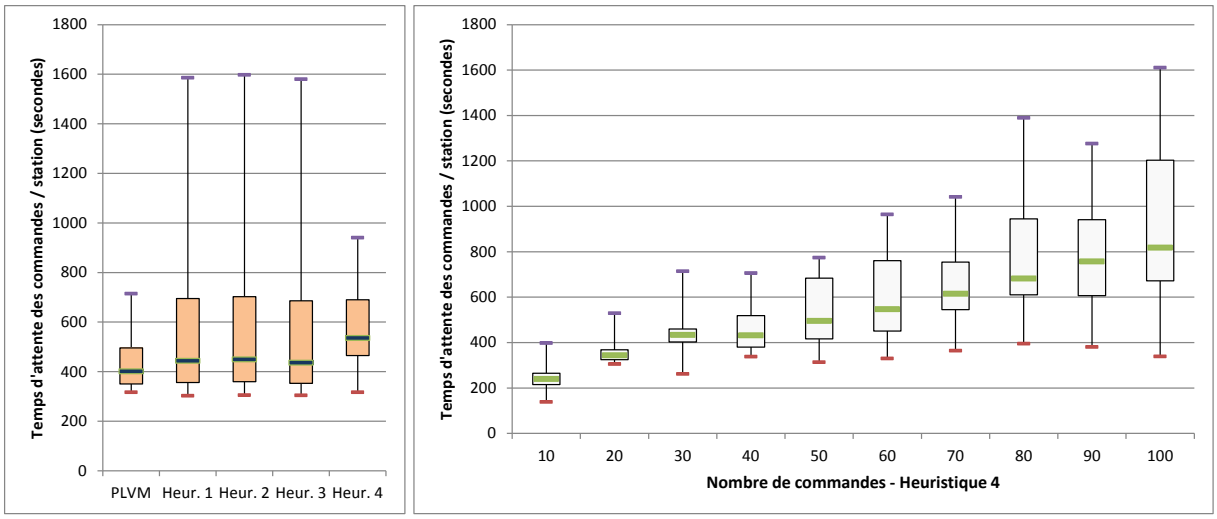


Figure VI.5 : Boites à moustaches des temps d'attente des commandes dans les stations – (gauche) comparaison entre les différentes approches, (droite) heuristique 4

Pour rappel, nous avons mentionné la capacité du PLVM, à évaluer rapidement la faisabilité des instances. Ainsi, le PLVM a fourni la solution optimale, pour les 250 instances résolues, ce qui signifie que toutes ces instances sont faisables. Toutefois et en ce qui concerne les 4 heuristiques, nous avons enregistré quelques cas, où ces dernières fournissent une solution incomplète. Plus exactement, à la fin du processus de simulation, certaines commandes n'ont pas pu être transportées, en raison des règles décisionnelles adoptées et leur impact sur l'impossibilité technique de les charger en raison d'un manque d'espace ou de temps. Le Tableau VI.6 fourni le nombre d'instances infaisables et le nombre de commandes non transportées pour les 250 instances testées.

Là aussi, la 4ème heuristique est la plus intéressante, étant donné qu'un seul cas d'infaisabilité a été enregistré. A noter que la 3ème heuristique qui permet le transport des commandes de petite taille en priorité, se classe juste après. Cette dernière, en privilégiant les commandes de petite taille, permet d'exploiter l'espace à l'intérieur des trains, de manière plus performante que les 2 premières heuristiques.

Tableau VI.6 : Synthèse des cas d'infaisabilité

	PLVM	Heur. 1	Heur. 2	Heur. 3	Heur. 4
Inst. infaisables	0	3	5	2	1
Nb de commandes non transportées	0	5	11	2	1

3.3.2. Trains

L'évaluation de la performance d'utilisation des trains, pour l'activité de transport de marchandises, est effectuée à travers le calcul des taux d'utilisation de la capacité dédiée aux marchandises. Ce taux est relatif à chaque train et, est obtenu par le rapport entre le nombre total de colis effectivement transportés, et le nombre maximum de colis (noté UB) pouvant être transportés par ce dernier. Pour évaluer UB, nous considérons le pire cas, où un nombre maximum de colis, doivent être transportées entre chaque deux stations consécutives. A noter que chaque colis chargé dans un train, doit être déchargé avant que le train ne quitte la ligne,

sachant que les temps de chargement et de déchargement sont égaux. Le pire des cas en termes de nombre maximum de colis transportés, va correspondre au cas dans lequel chaque colis a pour station d'arrivée, la station qui suit celle de sa station de départ. En commençant par un chargement au maximum de la capacité d'accueil et en supposant que tous les colis sont tous disponibles, cela se ramène au cas illustré dans la Figure VI.6 (i.e. le processus de chargement / déchargement se répète $S/2$ fois tout au long de la ligne). Ainsi, la formule (6.1) nous permet de calculer sa valeur, comme suit :

$$UB = min\left(cap,\ wait_{max}/time\right) * S/2 \qquad (6.1)$$

La Figure VI.6 illustre le mode de calcul de UB suivant (6.1), et donne sa valeur, en considérant l'instance définie précédemment.

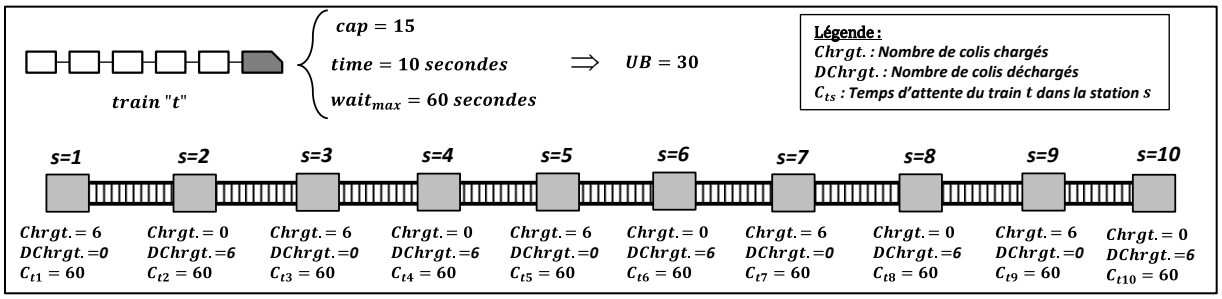


Figure VI.6 : illustration du calcul de « *UB* »

Pour les 25 instances de la famille de 100 commandes à transporter, le nombre de colis total moyen à transporter est égal à 300. Sachant qu'il y a 30 trains en circulation, chacun disposant d'une capacité maximum UB = 30, nous obtenons un taux d'utilisation moyen de la capacité des trains égal à 33%. Ceci signifie qu'on aurait pu transporter trois fois plus de colis. Toutefois et comme indiqué précédemment, selon l'algorithme adopté, plusieurs cas avec des commandes non transportées, ont été relevés. Sans être en contradiction avec la valeur du taux d'utilisation des trains, les dates de disponibilité des commandes, combinées à leur taille et leur parcours (station de départ – station d'arrivée), justifient l'occurrence d'infaisabilités. En particulier, dans certains cas, les commandes ne sont disponibles que vers la fin du service de transport de marchandises. Ceci a pour conséquence, la réduction du nombre de possibilités de transport de ces dernières, voire l'impossibilité de les transporter, alors que des trains en début de service, ont circulé avec des taux de remplissage très faibles. La résolution de la problématique décisionnelle n°8, que nous avons identifiée au chapitre 2 (figure II.13), devrait permettre de réduire l'intensité de ce phénomène, en améliorant la synchronisation des commandes avec celles des espaces libres dans les trains.

Le temps d'arrêt minimum des trains dans les stations, pour permettre aux voyageurs de monter et descendre, est fixé à 30 secondes. Pour les instances avec 100 commandes, le temps d'arrêt moyen des trains dans chaque station est égal à 37 secondes. Ceci implique une augmentation du temps d'attente de 23%. De plus et pour la même famille, le temps de parcours moyen des trains, de la première station jusqu'à la dernière, dans le cas où des marchandises ont été transportées, s'établi à 50,5 minutes. A noter que s'il n'y avait pas d'activité de transport de marchandises, ce temps s'établira à 49,5 minutes (en considérant un

temps d'arrêt des trains égal à $\mathrm{wait}_{\min}$). Ainsi, la simulation a montré que l'augmentation du temps de parcours moyen des trains, en raison de l'activité de transport de marchandises, était de 2% seulement.

3.3.3. Stations

Le Tableau VI.7 présente les nombres moyens / maximums des commandes / colis, présents simultanément dans les stations, en attente de transport par un train.

Tableau VI.7 : comparaison des taux d'utilisation des stations

Nbr. Com.	PLVM		Heuristique 1		Heuristique 2		Heuristique 3		Heuristique 4	
	Moy/Max Com.	Moy/Max colis	Moy/Max Com.	Moy/Max colis	Moy/Max Com.	Moy/Max colis	Moy/Max Com.	Moy/Max colis	Moy/Max Com.	Moy/Max colis
10	1 / 2	2 / 6	1 / 2	2 / 6	1 / 2	2 / 6	1 / 2	2 / 6	1 / 2	2 / 6
20	1 / 3	3 / 9	1 / 3	3 / 9	1 / 3	2 / 9	1 / 3	4 / 9	1 / 3	3 / 9
30	1 / 3	4 / 10	1 / 3	4 / 10	1 / 3	3 / 10	1 / 3	5 / 10	1 / 3	4 / 10
40	1 / 4	4 / 14	1 / 4	4 / 14	1 / 4	4 / 14	1 / 4	5 / 14	1 / 4	4 / 14
50	2 / 4	5 / 14	2 / 4	5 / 16	2 / 4	4 / 16	2 / 4	6 / 16	2 / 4	5 / 15
60	2 / 4	5 / 15	2 / 5	6 / 15	2 / 5	5 / 15	2 / 5	6 / 19	2 / 5	6 / 15
70	2 / 4	6 / 16	2 / 6	6 / 25	2 / 6	6 / 25	2 / 6	7 / 25	2 / 5	6 / 22
80	2 / 5	7 / 18	2 / 8	8 / 29	2 / 7	7 / 29	2 / 8	8 / 29	2 / 5	8 / 21
90	2 / 5	7 / 19	3 / 6	8 / 23	3 / 8	8 / 33	3 / 8	9 / 28	3 / 6	8 / 23
100	3 / 7	8 / 27	3 / 11	9 / 41	3 / 9	9 / 38	3 / 10	10 / 33	3 / 9	9 / 38

L'analyse des résultats présentés dans le Tableau VI.7, nous permet de constater que le nombre de commandes simultanément présents dans une station, augmente proportionnellement avec le nombre de commandes total à transporter. Le même constat est fait pour les colis. Toutefois, en relevant ces résultats en cours du processus de simulation, nous avons observé que les pics ne durent pas très longtemps, en général quelques secondes seulement, jusqu'à 5 minutes dans quelques rares cas.

A noter que les trois premières heuristiques sont équivalentes, alors que la quatrième, présente des résultats légèrement meilleurs.

Cette évaluation de l'espace, notamment des pics atteints dans le temps, devrait apporter des informations très pertinentes pour le dimensionnement des zones de stockage temporaire. Ainsi, l'étude de la dynamique de circulation des flux de marchandises, nous permet d'évaluer les besoins en espace de stockage dans chacune des stations de la ligne, en fonction de la demande de transport.

3.4. La replanification

Dans le cas de la replanification, la première itération correspond au plan prédictif de transport. Ainsi, les résultats sont similaires à ceux présentés dans la section 3.1. Le modèle de replanification est exécuté, après l'écoulement de l'intervalle de recalcul (le pas de replanification : $\mathrm{r} = 60$ minutes).

Pour chaque famille d'instances, le Tableau VI.8 présente les moyennes des résultats enregistrés, pour chaque famille d'instances. Nous relevons que le modèle de replanification

présente les mêmes caractéristiques que le modèle du cas prédictif. Ainsi, avec un nombre de commandes inférieur à planifier, pour chaque famille d'instances, les temps de résolution sont moins importants.

Tableau VI.8 : Synthèse des résultats de la seconde itération de la replanification

Nombre de commandes moyen				Nombre de variables moyen	Nombre de contraintes moyen	Temps de résolution moyen
J	$J^t \cup J^c$	J^n	J'			
10	5	2	7	2 465	3 371	~0
20	9	2	13	4 762	5 675	0,2
30	14	3	19	7 270	8 190	0,2
40	18	5	27	10 455	9 528	0,3
50	21	5	34	11 745	12 679	0,4
60	23	6	43	13 738	14 678	0,5
70	31	8	47	17 180	16 233	0,6
80	28	7	59	18 517	19 471	1,0
90	32	9	67	21 223	22 185	1,2
100	38	11	73	23 995	24 965	3,4

Pour mieux comprendre le processus de replanification et ses conséquences, nous considérons l'exemple d'une instance particulière, composée de 30 commandes initiales.

- **Itération 1**

  Le plan de transport initial est présenté par le Tableau VI.9. Pour chaque commande, nous avons l'identifiant du train qui doit la transporter, ses dates de disponibilité et de transport (exprimées en secondes), ainsi que son temps d'attente dans la station avant son transport.

Tableau VI.9 : Résultats de la 1ère itération – plan initial

N° commande	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
N° train	6	9	18	13	20	12	5	23	9	20
Date dispo.	5359	7040	11625	8427	12014	8549	2320	12635	5604	13466
Date transp.	5359	7110	12510	8520	12746	8910	2730	13200	5790	13466
Temps séjour	0	70	885	93	732	361	410	565	186	0
N° commande	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
N° train	8	10	13	17	16	1	4	8	3	11
Date dispo.	4609	7761	8766	10899	8888	530	3145	7077	2129	7554
Date transp.	4917	7761	9180	11250	9330	1320	3145	7077	2190	7650
Temps séjour	308	0	414	351	442	790	0	0	61	96
N° commande	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
N° train	2	21	3	4	19	21	1	4	17	2
Date dispo.	497	12228	2443	3365	12227	13700	0	2017	12203	604
Date transp.	600	12330	2870	3805	12227	13700	1670	2130	12240	1260
Temps séjour	103	102	427	440	0	0	1670	113	37	656

Les différents évènements que nous avons enregistrés, en cours de la première heure d'exploitation (correspondant au pas de replanification, $r = 60$ minutes), se présentent comme suit :

- Les commandes transportées sont : 7 ; 16 ; 17 ; 19 ; 21 ; 23 ; 27 ; 28 ; 30.
- Les commandes dont la date de transport prévue est comprise dans l'intervalle gelé sont : 1 ; 11 ; 24.
- Les commandes retardées sont : 5 (date de disponibilité initiale : 12 014, retardée à : 13 657) ; 9 (date de disponibilité initiale : 5 604, retardée à : 9 719).
- Une seule commande annulée, à savoir, la n°12.
- 5 nouvelles commandes ont été enregistrées, leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau VI.10.

Tableau VI.10 : Liste des nouvelles commandes

N° commande	Date dispo.	Station de départ	Station d'arrivée	Nombre de colis
31	13 261	5	6	5
32	9 912	3	5	1
33	10 188	1	7	2
34	8 206	1	6	4
35	12 940	6	9	5

- **Itération 2**

Les résultats de la replanification sont présentés dans le Tableau VI.11. Les cellules des commandes en fond rouge sont les commandes dont la date de disponibilité est retardée, celles en fond bleu, sont les nouvelles commandes. Les données écrites en rouge, sont celles qui ont subi un changement suite au processus de replanification.

Tableau VI.11 : Résultats de 2ème itération – 1ère replanification

N° commande	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**9**	**10**	**13**	**14**
N° train (initial)	9	18	13	20	12	23	9	20	13	17
N° train (Repl.)	9	**17**	13	**22**	12	23	**16**	**21**	13	17
Date transp. initial	7110	12510	8520	12746	8910	13200	5790	13466	9180	11250
Date transp. Repl.	7110	**11910**	8520	**13920**	8910	13200	**9990**	**14040**	9180	11250
Variations	-	**-600**	-	**1174**	-	-	**4200**	**574**	-	-

15	**18**	**20**	**22**	**25**	**26**	**29**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**
16	8	11	21	19	21	17	-	-	-	-	-
16	8	11	21	19	**22**	**18**	21	17	18	15	20
9330	7077	7650	12330	12227	13700	12240	-	-	-	-	-
9330	7077	7650	12330	12227	**14260**	**12840**	13340	10260	10200	8400	13050
-	-	-	-	-	**560**	**600**	-	-	-	-	-

Pour les commandes initiales, l'objectif de la replanification étant de réduire les variations par rapport au plan initial. Pour les nouvelles commandes, la fonction « objectif » du modèle de replanification, se réduit à l'objectif du modèle du cas

prédictif, à savoir, la réduction du temps d'attente des commandes. De ce fait, pour considérer l'impact des retards enregistrés pour les commandes 5 et 9, ainsi que la prise en charge des nouvelles commandes, en accord avec l'objectif défini, nous remarquons que 4 commandes initiales ont été réaffectées à des trains différents, bien qu'à priori, elles n'ont pas subi de perturbations directes.

En considérant les nouvelles données du système (commandes retardées et annulées), nous avons évalué l'impact de la replanification, sur la valeur de la fonction objectif pour les commandes initiales. Le résultat indique un temps d'attente total des commandes de 10 062 secondes. Comparativement à sa valeur lors de l'établissement du plan de transport initial, à savoir, 9 312 secondes, nous constatons une augmentation de 8,1%. Toutefois, cette augmentation est le prix à payer pour absorber les nouvelles commandes, dont la hausse est égale à 13,3% (34 commandes dans le plan perturbé, contre 30, dans le plan initial). A noter que le temps d'attente moyen des nouvelles commandes est égal à 149 secondes / commande.

Les différentes simulations réalisées, nous ont permis de constater la capacité du modèle de replanification, à insérer, annuler et retarder les commandes, tout en réduisant leur impact par rapport au plan initial. Aussi, nous avons relevé la réactivité du modèle de replanification (implémenté sous la forme d'une application Java, faisant intervenir CPLEX pour la résolution du PLVM, et à laquelle fait appel le modèle ARENA, en cours de simulation). En effet, il suffit de quelques secondes au plus, pour fournir le nouveau plan de transport, qui est mis en œuvre 30 minutes après son calcul (en raison de l'horizon gelé).

4. Les colonies de fourmis

La métaheuristique colonies de fourmis dispose de plusieurs paramètres à fixer au préalable. Pour chacune des quatre variantes que nous avons développées, plusieurs propositions différentes sont suggérées dans la littérature. Ces propositions réduisent le champ des possibilités pour chaque paramètre. Toutefois, il persiste un certain nombre de combinaisons entre les valeurs de plusieurs paramètres, dont le choix a un impact direct sur la performance de la métaheuristique.

Les paramètres des colonies de fourmis permettent de moduler le comportement à adopter lors de la construction des solutions. Suivant la variante utilisée et ses spécificités, il peut être plus performant d'accentuer son comportement d'intensification ou de diversification, voire à trouver un équilibre entre les deux. La structure du problème auquel est appliquée la métaheuristique, a un impact direct sur le choix à faire.

Compte tenu du nombre de paramètres et des valeurs qu'ils peuvent prendre, il n'est pas envisageable d'analyser l'ensemble des combinaisons possibles, à travers un plan factoriel complet. Pour déterminer les meilleures valeurs des paramètres de chaque variante, nous utilisons la méthode Taguchi.

4.1. Introduction à la méthode Taguchi

La méthode Taguchi est une approche statistique, qui permet l'établissement de plans d'expériences réduits, tout en assurant une bonne précision. Au départ, cette méthode a été

développée pour le secteur industriel, car elle permet de réduire les variabilités des processus de fabrication qui sont soumis à différents aléas, à travers un paramétrage optimal de ces derniers. Le principe étant d'identifier les différents facteurs (paramètres) contrôlables, de définir leurs niveaux, c'est à dire les valeurs qu'ils peuvent prendre. Puis, il faut en déduire la combinaison la plus robuste pour faire face aux aléas (i.e. un paramétrage qui présente une sensibilité minimum face aux aléas). Depuis, le champ d'application de cette méthode s'est élargie. Les différentes notions de cette méthode et ses différentes applications, sont présentées dans (Taguchi, 1986) et (Roy, 2010).

L'avantage principal de cette méthode, est la réduction du nombre d'expériences à réaliser. Pour cela, les travaux de Taguchi ont permis la définition d'un nombre d'essais (ou d'expériences) à mener, suivant le cas étudié. Ces différents essais traduisent des combinaisons particulières entre les niveaux des différents facteurs considérés. La liste des essais à mener se présente sous la forme de tables orthogonales (i.e. chaque niveau de chaque facteur est confronté à tous les niveaux des autres facteurs et dans des proportions égales).

Il n'est pas évident de développer ce type de tables, toutefois, Taguchi a développé un certain nombre de tables, qui s'avèrent suffisantes. Ainsi, au besoin, il s'agira de sélectionner la table qui correspond au mieux aux besoins de l'étude.

Telle que décrit dans (Roy, 2010), la sélection d'une table de Taguchi requiert au préalable, une étude du processus concerné, à travers :

- La détermination des facteurs contrôlables, qui ont un impact sur ce processus.
- La difficulté de faire varier chacun de ces facteurs. Par exemple, pour un processus de fabrication d'un produit utilisant un four, il peut être difficile de faire varier la température. Ceci permet de faire un classement des facteurs par groupe de difficulté.
- La détermination des niveaux que peuvent prendre les facteurs.
- Les interactions entre les facteurs.
- Ecrire un modèle qui va traduire la relation entre les différents facteurs, sachant que : les facteurs indépendants s'additionnent et les interactions entre facteurs sont modélisées par des produits. Exemple avec deux facteurs :

  $y = A + B + AB$ (6.2)

  y : La réponse (i.e. le résultat suite à l'implémentation des paramètres de l'essai en cours).

  A, B : deux facteurs ayant chacun 2 niveaux.

  AB : interaction entre les facteurs A et B. Ce terme s'annule en cas d'indépendance des facteurs.
- La détermination du nombre minimum d'essais. Pour cela, il faut calculer le degré du modèle. En reprenant l'exemple ci-dessus, ce calcul s'effectue comme suit :

  $d_M = (n_A - 1) + (n_B - 1) + (n_A - 1)(n_B - 1)$ (6.3)

  d_M : degré du modèle.

  n_A : niveau du facteur A.

  n_B : niveau du facteur B.

D'où,

$$d_M = (2-1) + (2-1) + (2-1)(2-1) = 3$$

Ainsi, pour cet exemple, il faut au moins 3 essais.

- La recherche de la table de Taguchi qui assure au moins le nombre d'essais minimum, dont le nombre de colonnes est supérieur ou égal au nombre de facteurs et d'interactions entre facteurs, avec le nombre de niveaux de tous les facteurs.

Un exemple d'une table de Taguchi est donné dans le Tableau VI.12. Dans cet exemple, il s'agit de trouver la combinaison optimale de 7 facteurs sans interactions, à 2 niveaux chacun. Dans ce cas $d_M = 7$. Donc le nombre minimum d'essais est égal à 7. Toutefois, comme il y a une condition sur le fait que les tables de Taguchi doivent être orthogonales, la première table qui satisfait toutes ces caractéristiques est celle qui compte 8 essais. A noter que le plan factoriel complet aurait nécessité ($2^7 = 128$) essais.

Tableau VI.12 : Illustration d'une table de Taguchi $L_8(2^7)$

N° essai	Facteurs contrôlables						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

La notation d'une table de Taguchi se présente sous la forme $L_T(n^C)$ (Sabre, 2007), avec :

- T : nombre d'essais (lignes de la table)
- n : nombre de niveaux des facteurs
- C : nombre de facteurs (colonnes de la table)

Les résultats obtenus à partir des plans d'expériences de Taguchi, sont évalués à travers des ratios signal/bruit « *S/N* ». L'avantage de cet indicateur de performance résulte du fait qu'il considère simultanément, l'objectif recherché (signal), ainsi que la dispersion de cette valeur (le bruit). Son calcul est donné par la formule suivante (dans le cas d'un critère à minimiser) (Roy, 2010) :

$$S/N = -10.\log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \qquad (6.4)$$

- n : nombre de mesures effectuées pour chaque essai.
- y_i : c'est l'observation à l'issue de l'application du paramétrage de l'essai en cours, pour la $i^{ème}$ mesure.

Enfin, pour chaque paramètre, la moyenne des ratios S/N pour chaque niveau est calculée. Puis, le ratio le plus élevé va déterminer le meilleur niveau. A noter que la différence entre les *S/N* le plus élevé et le plus faible, pour chaque paramètre, nous permettra de définir « $delta$ » qui représente l'influence du paramètre sur la performance de la variante. Plus $delta$ sera faible, moins le paramètre correspondant aura de l'influence.

4.2. Paramétrage des variantes de colonies de fourmis

La démarche suivant la méthode Taguchi, pour le paramétrage des différentes variantes de colonies de fourmis, s'articule autour de 5 points.

4.2.1. Définition de l'objectif

La première étape est l'identification de l'objectif des processus ou méthodes à paramétrer. Dans notre cas, l'objectif du FRTSP permettant de minimiser les temps d'attente cumulés est considéré.

4.2.2. Sélection des paramètres

Dans un premier temps, il s'agit de définir les paramètres qui ont un impact sur la performance du processus de construction de la solution, pour chaque variante de colonies de fourmis. Dans un second temps, il s'agit de déterminer les niveaux de chacun des paramètres identifiés précédemment.

D'abord, un premier paramètre est exclu de l'étude, il s'agit du nombre de fourmis composant la colonie. En effet, dans la littérature, il est conseillé de le fixer au vu du nombre de choix que doit considérer chaque fourmi. Dans notre cas, chaque fourmi doit sélectionner une affectation pour chaque commande, en d'autres termes, elle a autant de choix que de commandes à transporter, par conséquent $m = J$.

Pour les autres paramètres et selon les différentes possibilités suggérées dans la littérature, pour chacune des variantes, nous proposons ce qui suit :

- **Pour les variantes AS et MMAS (3 paramètres / 4 niveaux)**
  Dans le cas de ces deux variantes, le paramètre α est fixé à 1, suivant les recommandations faites dans (Dorigo & Stützle, 2004). En effet, une démonstration expérimentale suggère d'écarter des valeurs d'alpha telle que $\alpha > 1$, qui conduiraient à la stagnation prématurée du processus de recherche.
  Pour les autres paramètres de ces variantes, nous proposons quatre niveaux : faible, intermédiaires (2 valeurs) et élevé, que présentent le Tableau VI.13.

Tableau VI.13 : Niveaux des paramètres pour les variantes AS et MMAS

Paramètres	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4
β	2	3	4	5
ρ	0,25	0,5	0,75	0,98
Q	0,1	1	10	100

- **Pour la variante ACS (6 paramètres / 5 niveaux)**

Pour cette variante, deux paramètres supplémentaires sont introduits. Il s'agit du paramètre q_0 et du facteur de persistance locale de phéromone φ. En ce qui concerne le paramètre α, la littérature ne fournit aucune recommandation, donc, nous allons aussi évaluer ce dernier.

Ainsi, nous avons six paramètres. Nous proposons pour chacun d'entre eux, cinq niveaux (faible, moyen, élevée et deux niveaux intermédiaires), que présente le Tableau VI.14.

- **Pour la variante MMACS (5 paramètres / 5 niveaux)**

Pour cette variante, il s'agit des mêmes paramètres que ceux de la variante ACS, hormis le paramètre de mise à jour locale de phéromones, qui n'est pas considéré par cette variante. Ainsi, nous reprenons les mêmes niveaux du Tableau VI.14.

Tableau VI.14 : Niveaux des paramètres pour la variante ACS

Paramètres	Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	Niv. 4	Niv. 5
α	1	2	3	4	5
β	1	2	3	4	5
ρ	0,02	0,25	0,5	0,75	0,98
Q	0,1	1	10	100	1 000
q_0	0,02	0,25	0,5	0,75	0,98
φ	0,02	0,25	0,5	0,75	0,98

A noter que dans notre cas, nous recherchons le paramétrage optimal d'algorithmes, ainsi, les variations au niveau de chacun des paramètres (ou facteurs) définis sont faciles. D'autre part, selon la littérature, il n'y a pas d'interactions entre les différents paramètres.

4.2.3. Sélection des tables de Taguchi adéquates

Une fois les paramètres et leurs niveaux identifiés, l'étape actuelle consiste à sélectionner les tables d'expériences de Taguchi adéquates. Pour cela, il faut chercher les tables avec, au moins, le nombre minimum d'essais (lignes) et dont le nombre de facteurs est supérieur ou égal au nombre de paramètres considérés, avec le nombre de niveaux adéquat.

En ce qui concerne les variantes AS et MMAS, le modèle qui traduit la relation entre les différents paramètres, s'écrit comme suit :

$$y = \beta + \rho + Q \tag{6.5}$$

Le degré de ce modèle est donné par :

$$d_{AS/MMAS} = (4-1) + (4-1) + (4-1) = 9$$

Ainsi, il faut au moins 9 essais. La recherche de la table de Taguchi la plus adéquate, nous a permis d'identifier la table $L_{16}(4^5)$ qui est donnée par le Tableau VI.15. Cette dernière permet d'étudier le cas avec au plus 5 facteurs à 4 niveaux. Dans notre cas, nous avons 3 facteurs seulement, donc les deux dernières colonnes de la table, ne seront pas considérées. Cette table propose d'effectuer 16 essais pour trouver la combinaison optimale, alors que le plan factoriel complet requiert ($4^3 = 64$) essais.

Tableau VI.15 : Table de Taguchi $L_{16}(4^5)$

N° essai	Facteurs contrôlables					N° essai	Facteurs contrôlables				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	9	3	1	3	4	2
2	1	2	2	2	2	10	3	2	4	3	1
3	1	3	3	3	3	11	3	3	1	2	4
4	1	4	4	4	4	12	3	4	2	1	3
5	2	1	2	3	4	13	4	1	4	2	3
6	2	2	1	4	3	14	4	2	3	1	4
7	2	3	4	1	2	15	4	3	2	4	1
8	2	4	3	2	1	16	4	4	1	3	2

En ce qui concerne les deux variantes ACS et MMACS, les modèles qui traduisent la relation entre les différents paramètres, s'écrivent respectivement comme suit :

$$y = \alpha + \beta + \rho + Q + q_0 + \varphi \qquad (6.6)$$

$$y = \alpha + \beta + \rho + Q + q_0 \qquad (6.7)$$

Les degrés de ces deux modèles sont donnés par :

$$d_{ACS} = (5-1) + (5-1) + (5-1) + (5-1) + (5-1) + (5-1) = 24$$

$$d_{AMMACS} = (5-1) + (5-1) + (5-1) + (5-1) + (5-1) = 20$$

Ainsi, il faut au moins 24 essais, pour la variante ACS et 20 essais, pour la variante MMACS. La recherche de la table de Taguchi la plus adéquate pour ces deux cas, nous a permis d'identifier la table $L_{25}(5^6)$ (elle est donnée par le Tableau VI.16). Elle permet la considération au plus de 6 facteurs à 5 niveaux. Elle propose d'effectuer 25 essais, au lieu de ($5^6 = 15\,625$) essais pour la variante ACS et ($5^5 = 3\,125$) essais pour la variante MMACS. A noter que pour la variante MMACS, la dernière colonne n'est pas considérée.

Tableau VI.16 : Table de Taguchi $L_{25}(5^6)$

N° essai		Facteurs contrôlables					N° essai		Facteurs contrôlables				
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1	14	3	4	1	3	5	2
2	1	2	2	2	2	2	15	3	5	2	4	1	3
3	1	3	3	3	3	3	16	4	1	4	2	5	3
4	1	4	4	4	4	4	17	4	2	5	3	1	4
5	1	5	5	5	5	5	18	4	3	1	4	2	5
6	2	1	2	3	4	5	19	4	4	2	5	3	1
7	2	2	3	4	5	1	20	4	5	3	1	4	2
8	2	3	4	5	1	2	21	5	1	5	4	3	2
9	2	4	5	1	2	3	22	5	2	1	5	4	3
10	2	5	1	2	3	4	23	5	3	2	1	5	4
11	3	1	3	5	2	4	24	5	4	3	2	1	5
12	3	2	4	1	3	5	25	5	5	4	3	2	1
13	3	3	5	2	4	1							

4.2.4. Réalisation des essais et analyse des résultats

Dans notre cas, nous effectuons 25 mesures pour chaque essai. Nous considérons les mêmes 25 instances générées aléatoirement, avec 100 commandes. Le choix de ce nombre de commandes, nous permet d'avoir des instances assez complexes à résoudre, mais qui peuvent être résolues par CPLEX. Ceci nous permettra d'évaluer la performance de chaque configuration de chaque variante, en comparant ses résultats à la solution optimale. En effet, dans notre cas, la réponse sur laquelle se base la sélection des paramètres optimaux de chaque variante, est le gap d'optimalité. Ainsi, pour chaque mesure de chaque essai, nous allons calculer le gap d'optimalité, puis nous calculons la moyenne et le ratio S/N pour chaque essai.

- **Variante AS**

Le Tableau VI.17 présente les résultats des essais de la variante AS. La colonne « Moy » donne la moyenne des gap d'optimalité des différentes mesures de chaque essai.

Tableau VI.17 : Résultats des essais pour la variante AS

N° essai	β	ρ	Q	Moy	S/N		N° essai	β	ρ	Q	Moy	S/N
1	2	0,25	0,1	41,26%	7,690		9	4	0,25	10	15,33%	16,292
2	2	0,5	1	42,15%	7,504		10	4	0,5	100	14,79%	16,601
3	2	0,75	10	44,01%	7,129		11	4	0,75	0,1	15,27%	16,325
4	2	0,98	100	44,17%	7,097		12	4	0,98	1	15,48%	16,205
5	3	0,25	1	22,29%	13,037		13	5	0,25	100	12,43%	17,110
6	3	0,5	0,1	20,71%	13,677		14	5	0,5	10	12,18%	18,286
7	3	0,75	100	19,92%	14,015		15	5	0,75	1	12,50%	18,393
8	3	0,98	10	20,55%	13,742		16	5	0,98	0,1	12,48%	18,076

Le Tableau VI.18 présente la moyenne des ratios S/N pour chaque niveau de chaque paramètre, ainsi que le delta. En vert, le niveau des paramètres optimaux.

Tableau VI.18 : Ratio S/N pour la variante AS

Niveau	β	ρ	Q
1	7,355	55,129	55,768
2	13,618	56,068	55,139
3	16,356	55,862	55,448
4	18,216	55,121	55,824
$delta$	10,861	0,947	0,685

Ainsi, le paramétrage optimal de la variante AS est :

$$\alpha = 1\ ;\ \beta = 5\ ;\ \rho = 0{,}5\ ;\ Q = 100$$

Nous notons que les influences de ρ et Q sont très faibles, comparativement à β.

- **Variante MMAS**

Le Tableau VI.19 présente les résultats des essais de la variante MMAS.

Tableau VI.19 : Résultats des essais pour la variante MMAS

N° essai	β	ρ	Q	Moy	S/N		N° essai	β	ρ	Q	Moy	S/N
1	2	0,25	0,1	11,35%	18,898		9	4	0,25	10	7,24%	22,811
2	2	0,5	1	4,36%	27,367		10	4	0,5	100	7,81%	22,151
3	2	0,75	10	4,76%	26,452		11	4	0,75	0,1	9,91%	20,078
4	2	0,98	100	25,25%	11,956		12	4	0,98	1	12,65%	17,957
5	3	0,25	1	6,37%	23,913		13	5	0,25	100	7,79%	22,164
6	3	0,5	0,1	10,17%	19,850		14	5	0,5	10	8,20%	21,720
7	3	0,75	100	7,76%	22,202		15	5	0,75	1	8,65%	21,261
8	3	0,98	10	15,22%	16,354		16	5	0,98	0,1	11,74%	18,607

Le Tableau VI.20 présente la moyenne des ratios S/N pour chaque niveau de chaque paramètre, ainsi que le delta. En vert, le niveau des paramètres optimaux.

Tableau VI.20 : Ratio S/N pour la variante MMAS

Niveau	β	ρ	Q
1	21,168	87,786	77,434
2	20,580	91,088	90,498
3	20,749	89,994	87,337
4	20,938	64,875	78,474
$delta$	0,588	26,213	13,064

Ainsi, le paramétrage optimal de la variante MMAS est :

$$\alpha = 1\ ;\ \beta = 2\ ; \rho = 0{,}5\ ;\ Q = 1$$

Nous notons que l'influence de β est très faible, comparativement à ρ et Q.

- **Variante ACS**

Le Tableau VI.21 présente les résultats des essais de la variante ACS.

Tableau VI.21 : Résultats des essais pour la variante ACS

N° essai	α	β	ρ	Q	q_0	φ	Moy	S/N
1	1	1	0,02	0,1	0,02	0,02	13,64%	17,301
2	1	2	0,25	1	0,25	0,25	4,37%	27,185
3	1	3	0,5	10	0,5	0,5	6,14%	24,235
4	1	4	0,75	100	0,75	0,75	8,89%	21,023
5	1	5	0,98	1 000	0,98	0,98	8,92%	20,990
6	2	1	0,25	10	0,75	0,98	10,41%	19,647
7	2	2	0,5	100	0,98	0,02	9,92%	20,069

8	2	3	0,75	1 000	0,02	0,25	3,71%	28,602
9	2	4	0,98	0,1	0,25	0,5	12,84%	17,826
10	2	5	0,02	1	0,5	0,75	5,90%	24,584
11	3	1	0,5	1000	0,25	0,75	6,97%	23,140
12	3	2	0,75	0,1	0,5	0,98	7,41%	22,601
13	3	3	0,98	1	0,75	0,02	12,08%	18,356
14	3	4	0,02	10	0,98	0,25	9,40%	20,535
15	3	5	0,25	100	0,02	0,5	3,73%	28,232
16	4	1	0,75	1	0,98	0,5	10,00%	20,001
17	4	2	0,98	10	0,02	0,75	40,63%	7,822
18	4	3	0,02	100	0,25	0,98	4,10%	27,740
19	4	4	0,25	1 000	0,5	0,02	5,14%	25,781
20	4	5	0,5	0,1	0,75	0,25	8,31%	21,606
21	5	1	0,98	100	0,5	0,25	63,92%	3,887
22	5	2	0,02	1 000	0,75	0,5	10,74%	19,379
23	5	3	0,25	0,1	0,98	0,75	9,33%	20,604
24	5	4	0,5	1	0,02	0,98	3,68%	28,686
25	5	5	0,75	100	0,25	0,02	3,61%	28,850

Le Tableau VI.22 présente la moyenne des ratios S/N pour chaque niveau de chaque paramètre, ainsi que le delta. En vert, le niveau des paramètres optimaux.

Tableau VI.22 : Ratio S/N pour la variante ACS

Niveau	α	β	ρ	Q	q_0	φ
1	22,147	16,795	20,979	20,962	22,327	22,250
2	22,344	19,411	21,129	21,457	25,127	20,531
3	22,573	24,105	21,197	21,244	20,218	20,218
4	20,590	22,770	21,447	21,447	20,002	19,435
5	20,460	25,031	20,730	20,655	20,440	23,933
$delta$	2,113	8,236	0,717	0,802	5,125	4,498

Ainsi, le paramétrage optimal de la variante ACS est :

$$\alpha = 3\ ;\ \beta = 5\ ;\ \rho = 0{,}75\ ;\ Q = 1\ ;\ q_0 = 0{,}25\ ;\ \varphi = 0{,}98$$

Nous notons que les influences de ρ et Q sont les plus faibles.

- **Variante MMACS**

Le Tableau VI.23 présente les résultats des essais de la variante MMACS.

Tableau VI.23 : Résultats des essais pour la variante MMACS

N° essai	α	β	ρ	Q	q_0	Moy	S/N
1	1	1	0,02	0,1	0,02	18,71%	14,558

2	1	2	0,25	1	0,25	6,38%	23,908
3	1	3	0,5	10	0,5	8,86%	21,055
4	1	4	0,75	100	0,75	9,36%	20,577
5	1	5	0,98	1 000	0,98	9,37%	20,568
6	2	1	0,25	10	0,75	10,95%	19,211
7	2	2	0,5	100	0,98	9,43%	20,513
8	2	3	0,75	1 000	0,02	3,56%	28,981
9	2	4	0,98	0,1	0,25	13,32%	17,513
10	2	5	0,02	1	0,5	7,29%	22,742
11	3	1	0,5	1000	0,25	6,91%	23,212
12	3	2	0,75	0,1	0,5	7,90%	22,046
13	3	3	0,98	1	0,75	12,07%	18,366
14	3	4	0,02	10	0,98	9,35%	20,582
15	3	5	0,25	100	0,02	3,38%	29,426
16	4	1	0,75	1	0,98	9,58%	20,375
17	4	2	0,98	10	0,02	21,18%	13,483
18	4	3	0,02	100	0,25	3,01%	30,422
19	4	4	0,25	1 000	0,5	6,13%	23,931
20	4	5	0,5	0,1	0,75	8,45%	21,461
21	5	1	0,98	100	0,5	9,08%	20,841
22	5	2	0,02	1 000	0,75	9,76%	20,218
23	5	3	0,25	0,1	0,98	9,62%	20,334
24	5	4	0,5	1	0,02	3,02%	30,405
25	5	5	0,75	100	0,25	2,56%	31,602

Le Tableau VI.24 présente la moyenne des ratios S/N pour chaque niveau de chaque paramètre, ainsi que le delta. En vert, le niveau des paramètres optimaux.

Tableau VI.24 : Ratio S/N pour la variante MMACS

Niveau	α	β	ρ	Q	q_0
1	20,133	19,640	21,545	21,492	23,371
2	21,792	20,034	21,808	22,181	25,331
3	22,727	23,832	22,103	21,243	22,123
4	21,935	22,602	22,582	22,582	19,967
5	24,680	25,160	21,981	21,883	20,475
$delta$	4,547	5,52	1,037	1,401	5,364

Ainsi, le paramétrage optimal de la variante MMACS est :

$$\alpha = 5\ ;\ \beta = 5\ ;\ \rho = 0{,}75\ ;\ Q = 100\ ;\ q_0 = 0{,}25$$

Même chose que la variante ACS, nous notons que les influences de ρ et Q sont les plus faibles.

4.2.5. Validation

Le paramétrage optimal de chaque variante est le résultat d'une étude théorique, qui s'appuie principalement, sur l'hypothèse d'addition des effets moyens. Ainsi, il est indispensable de valider ce résultat théorique, en effectuant le même nombre de mesures pour chaque essai des plans d'expériences de Taguchi. A l'issue de cette opération, il convient de vérifier que ce paramétrage, permet effectivement de produire la meilleure solution. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de réajuster certains paramètres.

Dans notre cas et pour chacune des quatre variantes, cette étape de validation a permis la confirmation de la performance des paramètres sélectionnés. Dans la section suivante, nous présenterons les résultats des quatre variantes de colonies de fourmis, avec les paramètres fixés précédemment.

4.3. Résultats des différentes variantes de colonies de fourmis

Comme montré précédemment, le modèle mathématique ne peut être résolu de manière optimale, pour des instances avec un nombre de commandes important. De plus, les règles décisionnelles de base, ainsi que la résolution optimale du sous problème avec un seul train, ne sont pas en mesure de fournir des solutions de bonne qualité. La métaheuristique des colonies de fourmis peut être une alternative, pour la proposition d'une solution de bonne qualité, avec un temps de résolution raisonnable. Dans cette section, nous allons comparer les résultats des différentes variantes de colonies de fourmis que nous avons proposées.

Pour chaque variante, nous considérons le paramétrage déterminé à partir de l'application de la méthode Taguchi. En ce qui concerne le nombre d'itérations, nous considérons 1000 itérations. Les résultats des différentes variantes, sont présentés dans la Figure VI.7. Nous mesurons la performance de ces variantes, en rapportant le gap moyen des 25 instances pour chaque famille d'instances. Le Tableau VI.25 présente ces résultats.

D'abord, nous relevons que la variante de base AS, est beaucoup moins performante que les trois autres variantes. Aussi, jusqu'à 50-60 commandes à transporter, les quatre variantes sont plus ou moins équivalentes. Cependant, la performance de la variante MMAS se dégrade, avec l'augmentation du nombre de commandes. Pour les deux variantes ACS et MMACS, leur performance est relativement stable, indépendamment du nombre de commandes. Toutefois, pour les familles d'instances avec 90 et 100 commandes, nous avons relevé deux instances difficiles à résoudre, qui dégradent la moyenne des écarts observés.

En ce qui concerne les temps de résolution, en secondes dans le Tableau VI.25, nous pouvons observer qu'ils augmentent suivant une tendance linéaire, avec l'augmentation du nombre de commandes. Toutefois, cette augmentation n'est pas liée uniquement au nombre de commandes, mais aussi au nombre de fourmis de la colonie. Pour rappel, nous avons décidé de lier le nombre de fourmis au nombre de commandes. D'autre part, nous remarquons pour les familles d'instances avec 100 commandes, que la variante MMAS a les temps de résolution les plus faibles, à contrario, la variante ACS a les temps de résolution les plus importants. Pour une meilleure étude de dominance au vu des deux critères (gap et temps de résolution), la Figure VI.8 confronte les temps de résolution et les résultats (gap). Nous relevons que les deux variantes AS et ACS sont dominées par MMAS et MMACS. Par

ailleurs, on peut départager ces deux dernières au vu du gap obtenu avec la variante MMACS pour moins de 2 secondes de temps de calcul supplémentaires. Ainsi, on peut dire que la variante MMACS présente de meilleures performances.

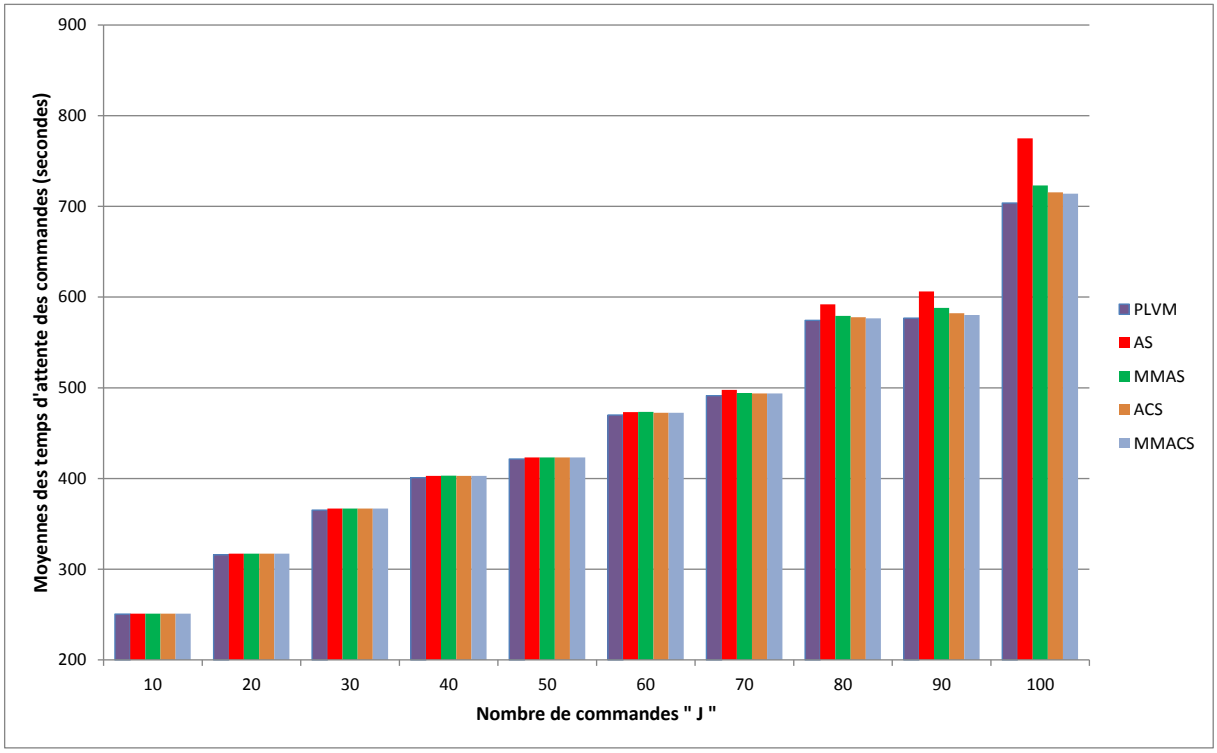


Figure VI.7 : Moyennes des temps d'attente des commandes – Colonies de fourmis VS PLVM

Tableau VI.25 : Résultats des variantes colonies de fourmis VS solutions optimales

Nombre de commandes	AS		MMAS		ACS		MMACS	
	Gap%	Temps Res.	Gap%	Temps Res.	Gap%	Temps Res.	Gap%	Temps Res.
10	0,20%	0,1	0,20%	0,1	0,20%	0,1	0,20%	0,1
20	0,42%	0,4	0,42%	0,2	0,42%	0,5	0,42%	0,4
30	0,46%	0,6	0,46%	0,4	0,46%	0,7	0,46%	0,7
40	0,52%	1,3	0,60%	0,7	0,52%	1,6	0,52%	1,2
50	0,40%	1,8	0,39%	1,1	0,39%	2,9	0,39%	1,8
60	0,67%	2,6	0,72%	1,7	0,50%	4,1	0,50%	2,6
70	1,29%	3,5	0,62%	2,3	0,52%	5,9	0,49%	3,6
80	3,05%	4,5	0,85%	3,1	0,59%	8,2	0,38%	4,4
90	5,09%	5,6	1,96%	3,8	0,95%	8,9	0,60%	5,4
100	10,13%	6,7	2,76%	4,8	1,67%	10,9	1,46%	6,7

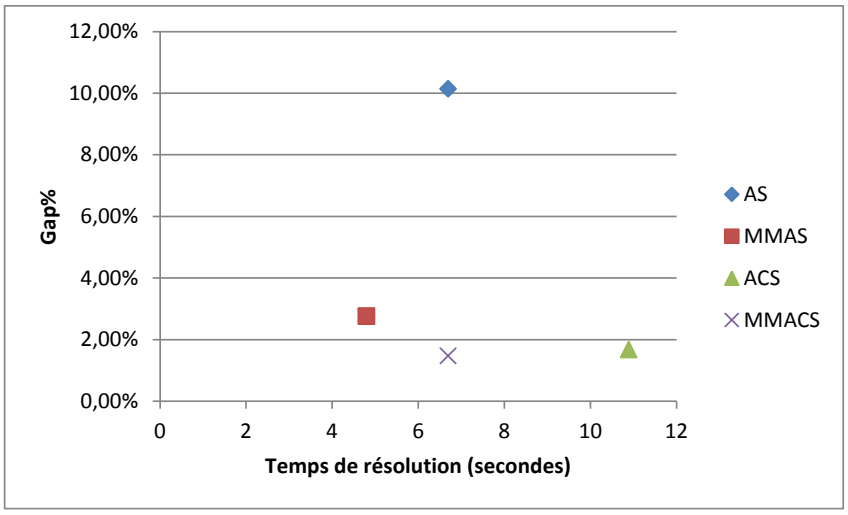


Figure VI.8 : Etude bi-critère des performances des colonies de fourmis

Comme mentionné précédemment, le principe des colonies de fourmis est d'exploiter les résultats de chaque itération, pour guider la recherche des itérations suivantes. Ce principe est mis en œuvre, à travers le mécanisme de dépôt de quantités de phéromones, proportionnelles à la qualité de la solution produite par chaque fourmi (ou la meilleure fourmi, suivant la variante). Les différentes variantes permettent une exploitation différente de ce mécanisme. L'objectif étant d'accentuer son apport dans le processus de recherche de la solution optimale, ou bien, de l'atténuer, pour une exploration plus large du champ des possibilités. La Figure VI.9 montre la vitesse de convergence de chaque variante. Pour cela, nous avons considéré une instance particulière avec 100 commandes.

La Figure VI.9 nous permet de relever plusieurs constats, comme suit :

- La variante de base AS converge assez rapidement vers un optimum local et reste bloquée sur cette solution. Ce phénomène est lié au processus de mise à jour de la trace de phéromones, qui privilégie rapidement la convergence autour de la première bonne solution trouvée.
- La variante MMAS converge assez rapidement. Cependant, elle continue à améliorer la solution, même après un nombre important d'itérations. Cette caractéristique découle du principe de réinitialisation de la trace de phéromones, si la solution n'a pas été améliorée depuis un certain nombre d'itérations (dans notre cas, 100 itérations).
- La variante ACS présente un processus de convergence, le moins rapide des quatre variantes. Ceci découle de la particularité de son mécanisme de sélection des possibilités, lors de la construction de la solution. Toutefois, après un certain nombre d'itérations, l'amélioration de la solution stagne et la métaheuristique n'arrive plus à quitter l'optimum local, dans lequel elle est bloquée. Ceci découle de l'intensité de phéromones sur le parcours de cette solution et l'évaporation des phéromones sur toutes les autres. Comparativement à la variante de base, la convergence est moins rapide, en raison de la mise à jour locale de phéromones, qui atténue l'intensité de cette dernière, en cours de construction d'une solution, pour permettre aux fourmis suivantes d'explorer d'autres alternatives.

- La variante MMACS combine les avantages des deux variantes précédentes, à savoir : elle permet une convergence assez rapide, et grâce au mécanisme de réinitialisation de la trace de phéromones, elle arrive à quitter les optimaux locaux, pour chercher d'autres solutions de meilleure qualité. En effet, le résultat final le confirme, puisqu'on est à 0,09% de la solution optimale.
- Après 100 itérations, les variantes AS et ACS proposent des solutions équivalentes. Cependant, 200 itérations plus tard, la variante ACS a réussi à améliorer la solution de 13%.

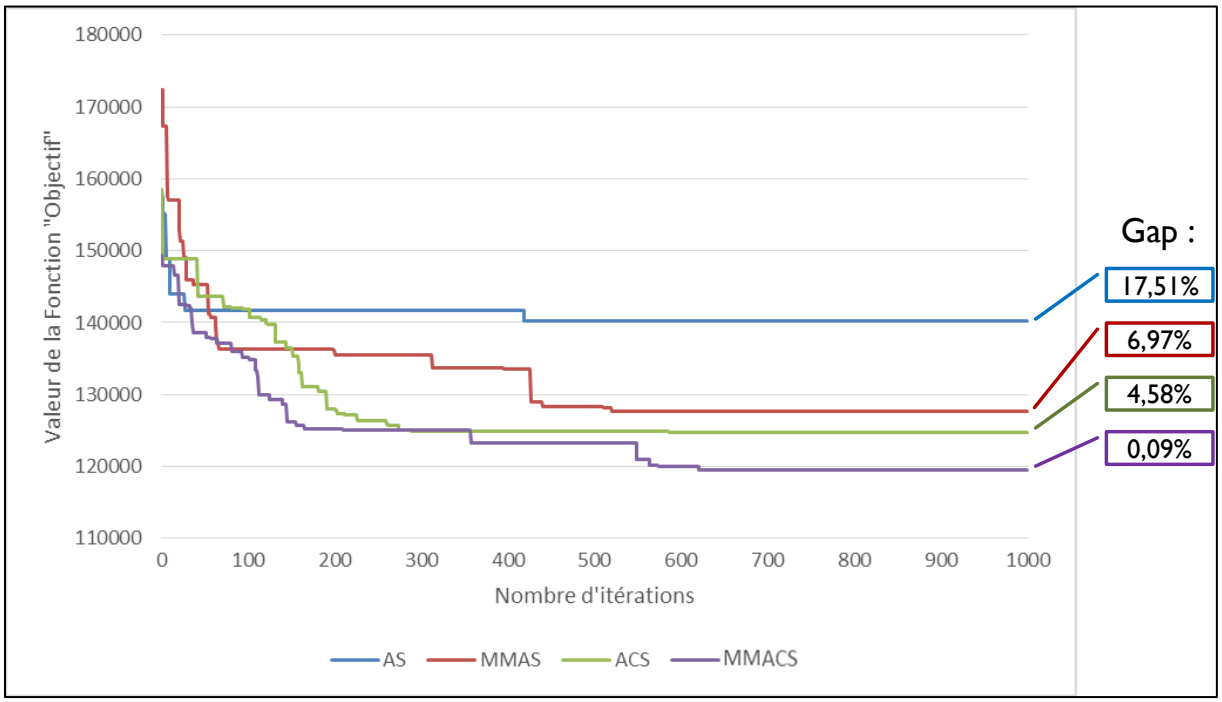


Figure VI.9 : Comparaison de convergence des différentes variantes

A noter que d'autres instances ont été testées, avec des nombres de commandes différents. Le comportement des différentes variantes a été le même que celui décrit ci-dessus. Enfin, nous pouvons conclure que la variante MMACS, présente la meilleure performance (qualité de la solution / temps de résolution), au vu des spécificités de la problématique étudiée.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les résultats numériques des différentes approches proposées, pour le FRTSP. Pour cela, nous avons généré un certain nombre d'instances aléatoirement de différentes tailles.

Les résultats numériques ont montré que le PLVM, dans le cas prédictif, est en mesure de résoudre rapidement des instances de taille modérée, avec un nombre de commandes allant jusqu'à 100. En ce qui concerne les instances de grande taille, ce PLVM a montré ses limites pour fournir la solution optimale, en un temps raisonnable pour un problème de niveau opérationnel.

D’autre part, les règles de priorité, qui sont souvent privilégiées en milieu industriel, pour la facilité de leur mise en œuvre, présentent des résultats assez médiocres dans le cas du système de transport étudié. De plus, la qualité des solutions qu’elles fournissent, se dégrade très rapidement, avec l’augmentation du nombre de commandes. A noter que la décomposition du FRTSP, en plusieurs sous-problèmes mono-train, apporte les meilleurs résultats. Mais même ces derniers, ne sont pas à la hauteur des efforts de calcul.

Les résultats numériques de l’approche de replanification, ont confirmé que ce dernier est en mesure de fournir rapidement, un plan de transport réajusté, qui considère les différentes perturbations, en minimisant l’écart par rapport au calcul initial. A noter que le point de départ de la replanification, étant le plan de transport initial, il est possible de générer ce dernier en utilisant l’algorithme des colonies de fourmis, notamment pour les instances de grande taille.

Concernant les colonies de fourmis, nous avons adapté différentes variantes de ces dernières. Nous avons fait appel à la méthode Taguchi qui garantit la qualité du paramétrage des colonies de fourmis, en déterminant les meilleures combinaisons pour ces algorithmes. L’étude expérimentale et l’analyse des résultats, mettent en évidence la dominance de la variante MMACS au vu du gap obtenu et du temps de résolution.

Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, nous avons développé une méthodologie pour modéliser et optimiser, une nouvelle solution de transport de marchandises en milieu urbain, basée sur la mutualisation du réseau de transport ferroviaire urbain, pour le transport des marchandises et des voyageurs. D'abord, nous avons montré la nécessité de déployer de nouvelles solutions de transport de marchandises en milieu urbain. Ces dernières doivent être en mesure d'absorber une partie des mouvements de marchandises, tout en réduisant l'impact de cette activité sur la qualité de vie en ville (moins de pollution et moins de circulation routière). Dans ce contexte, l'utilisation du réseau ferroviaire, actuellement exploité pour le transport de voyageurs, est une idée qui est en mesure de répondre favorablement à ces attentes, d'une part, d'autre part, elle permet d'améliorer le rendement des équipements et infrastructures de ce mode de transport durant les heures creuses. L'état de l'art dans ce domaine permet de conforter cette idée, puisque plusieurs études ont mis en évidence le potentiel et la faisabilité d'une telle solution de mixité, pour intégrer le fret urbain au flux de passagers.

L'idée d'offrir ce nouveau service de transport, émane principalement des opérateurs de transport de voyageurs en ville, en particulier la RATP dans la région Ile-de-France. L'objectif étant de profiter du projet du Grand Paris Express pour disposer d'un système de transport intégrant ce service dès la phase de conception. L'évolution des modes de consommation conjuguée à la densification des villes rend crédible cette perspective du point de vue économique. Ainsi, l'enjeu est de capter une partie substantielle de l'activité de transport de marchandises, et d'améliorer le rendement des ressources utilisées.

Cette mixité fret/voyageurs partageant et mutualisant différentes ressources du même système de transport, requiert des solutions techniques et technologiques d'une part, et le développement d'une démarche méthodologique, pour accompagner le processus de mise en œuvre d'autre part. C'est dans ce cadre méthodologique que s'inscrit la contribution de la présente thèse, en fournissant une méthodologie complète partant de la définition des niveaux de mutualisation possibles, en passant par l'identification et la décomposition des problèmes décisionnels sous-jacents, pour finir avec l'élaboration d'un outil d'aide à la décision, pour mettre en œuvre cette solution de mixité.

Dans le chapitre 2, nous avons proposé une identification et une classification des 19 différentes configurations de mixité, permettant de définir le niveau de difficulté de mise en œuvre correspondant. Cette classification se base sur le degré de partage des ressources du système de transport. Dans une perspective de déploiement de cette solution dans d'autres villes, il serait pertinent de se doter d'une méthodologie qui permettrait d'identifier le cas de mixité à adopter. Cette identification devrait s'appuyer sur les caractéristiques de la ville d'implantation, le type de marchandises à transporter et particulièrement, les caractéristiques du réseau ferroviaire.

Dans cette thèse, nous avons souhaité montrer la faisabilité de cette solution, c'est pourquoi nous avons retenu le cas de mixité le plus critique, à savoir le degré maximal de partage des ressources. Une seconde contribution a consisté en une approche par décomposition temporelle pour lier l'ensemble des 9 problématiques décisionnelles (stratégique, tactique et opérationnelle). Une seconde perspective serait de généraliser l'approche de décomposition, à

l'ensemble des cas de mixité possibles, en identifiant les problématiques communes et celles qui sont spécifiques pour chacun des cas de mixité.

Nous avons retenu le problème FRTSP, car si ce dernier ne serait pas capable d'absorber un flux supplémentaire, qu'est celui des marchandises, la solution n'aurait aucune chance d'être adoptée. De plus, si le modèle économique de la nouvelle offre de service venait à se préciser, l'étude de ce problème permettrait à l'opérateur de transport d'effectuer une première évaluation de ses gains potentiels. Ceci pourrait se faire de manière assez immédiate, pour passer d'une quantification des volumes pouvant être transporté à une évaluation financière du flux correspondant. Par ailleurs, cet outil de simulation pourrait également être adapté, pour dimensionner la capacité nécessaire pour maximiser les bénéfices.

Dans le chapitre 4, nous avons formalisé le problème FRTSP, en définissant ses différentes hypothèses. Ensuite, nous avons proposé un modèle de simulation à évènements discrets, qui se justifie par l'étude du comportement dynamique de cette solution, non encore déployée à l'échelle réelle. Ce modèle est enrichi grâce à l'implémentation de plusieurs règles décisionnelles. La validation de ce modèle de simulation a été faite, en s'appuyant sur le retour d'experts du transport ferroviaire en milieu urbain. Par la suite, nous avons formulé un modèle mathématique de type PLVM qui a été validé lui-même, grâce au modèle de simulation.

En étudiant la complexité du FRTSP, en montrant que c'est une généralisation du problème d'affectation généralisé et pour permettre la résolution d'instances de grande taille, nous avons développé plusieurs variantes de colonies de fourmis. Nous avons proposé l'utilisation de la méthode Taguchi, initialement proposée pour les plans d'expériences dans le domaine industriel, pour définir les paramètres des différentes variantes de la métaheuristique. La phase expérimentale, nous a permis d'établir la performance du PLVM dans la résolution d'instances de taille modérée. Aussi, la variante MMACS s'est révélée la plus performante, en termes de gap et de temps de calcul.

L'analyse de l'impact du plan de transport optimal, nous a permis de relever que l'utilisation de l'espace dans les stations, bien que corrélée au nombre de commandes, est relativement maîtrisée. Ceci est une conséquence directe de l'optimisation du taux de rotation, ce qui permet d'accélérer la dynamique, en prenant en charge le plus rapidement possible les commandes, dès leur réception. Toutefois, cette conclusion doit être modérée par l'occurrence d'incidents majeurs, qui risquent de créer un tassement des commandes, si aucune action n'est entreprise. D'où une troisième perspective de ce travail, la considération de perturbations sur la ligne ferroviaire, telles que l'annulation de trains, l'interruption du service durant un laps de temps assez important, l'impact de ces incidents sur l'accroissement temporaire de la demande de transport de voyageurs, etc.

Cette thèse ouvre la voie à plusieurs autres perspectives très intéressantes. Par exemple, une quatrième perspective consisterait en la généralisation du FRTSP au cas multi-ligne avec rupture de charge (correspondance). La pertinence de cette perspective relève de sa capacité à accroitre les taux de couverture du réseau de transport de fret. La généralisation au cas multimodal s'inscrit également dans le même objectif de l'amélioration du taux de couverture,

mais aussi, de la diminution éventuelle de l'empreinte carbone des colis. En outre, la considération de ce service de transport, dans le cadre d'un schéma plus global de TMV, pourrait montrer l'impact direct des véhicules-kilomètres sauvegardés.

Une cinquième perspective évidente, est la résolution progressive des 8 autres problématiques. A noter que ces problématiques peuvent se poser dans le cas de l'utilisation d'autres modes de transport, voire dans le cas de la gestion d'entrepôts de stockage, avec des mouvements de stocks importants (en particulier avec les objectifs d'amélioration des délais de livraison liés au e-commerce). Bien que les enjeux soient différents, la démarche de résolution à développer, pourrait avoir des applications qui vont au-delà de la solution de transport ferroviaire avec mixité fret / voyageurs.

Bibliographie

Akkan, C., 2015. Improving schedule stability in single-machine rescheduling for new operation insertion. *Computers&OperationsResearch,* Volume 64, pp. 198-209.

Almeder, C., Preusser, M. & Hartl, R., 2009. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?. *OR spectrum,* 31(1), pp. 95-119.

Altazin, E., Dauzère-Pérès, S., Ramond, F. & Tréfond, S., 2017. Rescheduling through stop-skipping in dense railway systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* Volume 79, pp. 73-84.

Altiok, T. & Melamed, B., 2007. *Simulation Modeling and Analysis with ARENA.* Burlington: Academic Press.

Alumur , S., Kara , B. & Melo , M., 2015. Location and Logistics. *In: Laporte G., Nickel S., Saldanha da Gama F. (eds) Location Science. Springer, Cham.*

Amaran, S., Sahinidis, N., Sharda, B. & Bury, S., 2016. Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research,* Volume 240, pp. 351-380.

Amini, M. & Racer, M., 1994. A rigorous computational comparison of alternative solution methods for the generalized assignment problem. *Management Science,* 40(7), pp. 868-890.

Anu, M., 1997. Introduction to modeling and simulation. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference.*

Bakalem, M., 1996. Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers. *Thèse de doctorat en Électronique - Électrotechnique - Automatique, Université de Savoie, France.*

Baptiste, P., Le Pape, C. & Nuijten, W., 2003. *Constraint-based scheduling applying constraint programming to scheduling problems.* London: Kluwer Academic Publisher.

Bellman, R., 1956. Dynamic programming and lagrange multipliers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 42(10), pp. 767-769.

Bellman, R., 1957. *Dynamic programming.* Princeton: Princeton university press.

Bellman, R. & Dreyfuce, S., 1962. *Applied dynamic programming.* Princeton: Princeton university press.

Ben-Khedher, N., Kintanar, J., Queille, C. & Stripling, W., 1998. Schedule optimization at SNCF: from conception to day of departure. *INTERFACES,* 28(1), pp. 6-23.

Bertier, P. & Roy, B., 1964. Une Procédure de résolution pour une classe de problèmes pouvant avoir un caractère combinatoire. *Cahiers du Centre d'Études de recherche Opérationnelle,* Volume 6, pp. 202-208.

Bhattacharya, A., Kumar, S., Tiwari, M. & Talluri, S., 2014. An intermodal freight transport system for optimal supply chain. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* Volume 38, pp. 73-84.

Bierlaire, M., 2015. Simulation and optimization: A short review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* Volume 55, pp. 4-13.

Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F. & Labadie, N., 2017. COTS software integration for simulation optimization coupling: Case of ARENA and CPLEX products. *Preprint submitted to Mathematics and Computers in Simulation.*

Boudouin, D., 2006. *Guide de mise en oeuvre d'espaces logistiques urbains,* s.l.: CRET-Log, Action fédérative ELU, PREDIT.

Boudouin, D. & Morel, C., 2002. *L'optimisation de la circulation des biens et services en ville: logistique urbaine : Programme national "marchandises en ville".* s.l.:Documentation française.

Brice, D., Marinov, M. & Rüger, B., 2015. A newly designed baggage transfer system implemented using event-based simulations. *Urban Rail Transit,* 1(4), pp. 194-214.

Browne, M., Allen, J., Woodburn, A. & Piotrowsk, M., 2014. The potential for non-road modes to support environmentally friendly urban logistics. *1st International Conference Green Cities 2014 – Green Logistics for Greener Cities, London, UK,* pp. 29-36.

Browne, M., Sweet, M., Woodburn, A. & Allen, J., 2005. *Urban freight consolidation : Final Report,* University of Westminster for the Department for Transport: Transport Studies Group.

Cacchiani, V. et al., 2014. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research Part B: Methodological,* Volume 63, pp. 15-37.

CargoCap, 2002. *Automated underground transportation of cargo: The 5th transportation alternative for the transport of goods in congested urban areas.* [Online] Available at: www.cagocap.com [Accessed 28 07 2017].

Carosi, S., Gualandi, S., Malucelli, F. & Tresoldi, E., 2015. Delay management in public transportation: service regularity issues and crew re-scheduling. *Transportation Research Procedia: 18th Euro Working Group on Transportation, Delft, The Netherlands,* Volume 10, pp. 483-492.

Carrie, A., 1988. *Simulation of manufacturing systems.* Chichester: John Wiley & Sons.

Carson, Y. & Maria, A., 1997. Simulation optimization: methods and applications. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Atlanta, Georgia: IEEE,* pp. 118-126.

Cattrysse, D. & Van Wassenhove, L., 1992. A survey of algorithms for the generalized assignment problem. *European Journal of Operational Research,* 10(3), pp. 260-272.

Cauvin, A., Ferrarini, A. & Tranvouez, E., 2009. Disruption management in distributed enterprises: A multiagent modelling and simulation of cooperative recovery behaviors. *International Journal of Production Economics,* Volume 122, pp. 429-439.

Chand, S., Hsu, V. & Sethi, S., 2002. Forecast, solution and rolling-horizons in operations management problems: A classified bibliography. *Manufacturing and Service Operations Management,* 4(1), pp. 25-43.

Chiron-Augereau, V., 2009. Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine, quels rôles pour un opérateur de transports publics urbains ? L'exemple de la RATP. *Thèse de doctorat, Université Paris-Est.*

Christofides, N., Mingozzi, A. & Toth, P., 1981. Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations. *Mathematical Programming,* Volume 20, pp. 255-282.

Chu, P. & Beasley, J., 1997. A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Computers & Operations Researc,* 24(1), pp. 17-23.

Chvatal, V., 1983. *Linear programming.* W. H. Freeman and Company ed. New York: Macmillan .

Comi, A. & Nuzzolo, A., 2016. Exploring the Relationships between E-Shopping Attitudes and Urban Freight Transport. *Transportation Research Procedia,* Volume 12, pp. 399-412.

Corman, F., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. & Pranzo, M., 2012. Bi-objective conflict detection and resolution in railway traffic management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 20(1), pp. 79-94.

Courivault, N., 2004. *Les livraisons/enlèvements en centre-ville : quels problèmes ? quelles solutions ?,* Université Lumière, Lyon 2 / école nationale des travaux publics de l'Etat: Mémoire DESS transport urbains et régionaux de personnes.

CST, 2016. *Cargo sous terrain: The goods transport system of the future. Press release 26th January 2016.* [Online] Available at: http://www.cargosousterrain.ch [Accessed 28 07 2017].

Dablanc, L., 2007. Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A,* 41(3), pp. 280-285.

Dablanc, L., 2007. Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* 41(3), pp. 280-285.

Dablanc, L., 2009. Freight transport for development toolkit: Urban freight. *Department for International Development, The World Bank.*

Dablanc, L. & Andriankaja, D., 2011. Desserrement logistique en Île-de-France : la fuite silencieuse en banlieue des terminaux de fret. *La revue Flux,* 85-86(3), pp. 72-88.

Dakin, R., 1965. A Tree Search Algorithm for Mixed Integer Programming Problems. *Computer Journal,* 8(3), pp. 250-255.

Dampier, A. & Marinov, M., 2015. A study of the feasibility and potential implementation of metro-based freight transportation in Newcastle upon Tyne. *Urban Rail Transit,* 3(1), pp. 164-182.

Dantzig, G., 1951. *Activity analysis of production and allocation - Chapter XXI. Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities.* New York: John Wiley & Sons.

Dantzig, G. & Ramser, J., 1959. The Truck Dispatching Problem. *Management Science* , 6(1), pp. 80-91.

De Langhe, K., 2014. Analysing the role of rail in urban freight distribution. *Next Generation Supply Chains: Trends and Opportunities, epubli GmbH, Berlin.*

Delaitre, L., 2014. Introduction à la logistique urbaine - Entre intérêt public et optimisation industrielle. *Logistic Systems & Software, SAVOYE.*

Dell'Amico, M., Maffioli, F. & Martello, S., 1997. *Annotated bibliographies in combinatorial optimization.* s.l.:John Wiley & Sons.

Delmastro, C., Lavagno, E. & Schranz, L., 2016. Underground urbanism: Master plans and sectorial plans. *Tunnelling and Underground Space Technology,* Volume 55, pp. 103-111.

Denardo, E. & Mitten, L., 1967. Elements of sequential decision processes. *Journal of industrial engineering,* Volume 18, pp. 106-112.

Dessouky, M. & Leachman, R., 1995. A simulation modeling methodology for analyzing large complex rail network. *Simulation,* 65(2), pp. 131-142.

Dıaz, J. & Fernández, E., 2001. A tabu search heuristic for the generalized assignment problem. *European Journal of Operational Research,* 132(1), pp. 22-38.

Diziain, D., Taniguchi, E. & Dablanc, L., 2014. Urban logistics by rail and waterways in France and Japan. *8th International Conference on City Logistics, Procedia - Social and Behavioral Sciences,* Volume 125, pp. 159-170.

Dollevoet, T. & Huisman, D., 2014. Fast heuristics for delay management with passenger rerouting. *Public Transport,* 6(1-2), pp. 67-84.

Dorigo, M., Birattari, M. & Stutzle, T., 2006. Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine,* 1(4), pp. 28-39.

Dorigo, M. & Gambardella, L., 1997. nt colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation,* 1(1), pp. 53-66.

Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colorni, A., 1991. Positive feedback as a search strategy. *Technical report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan.*

Dorigo, M. & Stützle, T., 2004. *Ant Colony Optimization.* A Bradford Book ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Dufour, J., Patier, D. & Routhier, J., 2007. Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine. *Techniques de l'ingénieur,* p. ag8210.

Eberhart, R. & Kennedy, J., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science,* Volume 1, pp. 39-43.

European Commission, 2011. *White Paper - Roadmap to a single European transport area - Towards a competitive and resource efficient transport system, COM/2011/0144 final,* s.l.: European Commission publishing.

Feo, T., Resende, M. & Smith, S., 1994. A greedy randomized adaptive search procedure for maximum independent set. *Operations Research,* 42(5), pp. 860-878.

Figueira, G. & Almada-Lobo, B., 2014. Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. *Simulation Modelling Practice and Theory,* Volume 46, pp. 118-134.

Fisher, M., Jaikumar, R. & Van Wassenhove, L., 1986. A multiplier adjustment method for the generalized assignment problem. *Management Science,* 32(9), pp. 1095-1103.

Flodén, J., 2007. *Modelling intermodal freight transport: the potential of combined transport in Sweden,* s.l.: PhD Thesis, Goteborg University, BAS Publisher.

Flodén, J. & Williamsson, J., 2016. Business models for sustainable biofuel transport: the potential for intermodal transport. *Journal of Cleaner Production,* Volume 113, pp. 426-437.

Fontan, G., Mercé, C. & Lasserre, J., 2001. La planification des flux de production. In: *Performance Industrielle et Gestion des flux (P. Burlat, J.P. Campagne).* s.l.:Hermers Science Publications Traité IC2.

Fortz, B., 2012. Algorithmique et recherche opérationnelle: le problème de transport. *Cours à l'Université Libre de Bruxelles.*

Fu, M., 1994. Optimization via simulation: a review. *Annals of Operations Research,* 53(1), pp. 199-204.

Fu, M., 2002. Optimization for simulation: theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing,* 14(3), pp. 192-215.

Galasso, F., 2007. Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.*

Glover , F., 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research,* 13(5), pp. 533-549.

Gonzalez-Feliu, J., 2014. Costs and benefits of railway urban logistics: a prospective social cost benefit analysis. <*halshs-01056135*>.

Gonzalez-Feliu, J., Malhéné, N., Morganti, E. & Trentini, A., 2013. *Développement des espaces logistiques urbains. CDU et ELP dans l'europe du sud-ouest,* s.l.: halshs-00862009.

Guignard, M. & Rosenwein, M., 1989. An improved dual-based algorithm to the knapsack problem. *Operations Research,* 37(4), pp. 658-663.

Guo, Y., Huang, M., Wang, Q. & Leon, V., 2016. Single-machine rework rescheduling to minimize maximum waiting-times with fixed sequence of jobs and ready times. *Computers & Industrial Engineering,* Volume 91, pp. 262-273.

Gupta, A. & Könemann, J., 2011. Approximation algorithms for network design: a survey. *Surveys in Operations Research and Management Science,* 16(1), pp. 3-20.

Haralick, R. & Elliott, G., 1980. Increasing tree search efficiency for constraint satisfaction problems. *Artificial intelligence,* 14(3), pp. 263-313.

Herrmann, J. W., 2006. Rescheduling strategies, policies, and methods. *Handbook of production scheduling,* Volume 89, pp. 135-148.

Hétreux, G., 1996. Structures de decision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et coherence des decisions. *these de doctorat, INSAT, France.*

Holland, J., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.* Michigan : University of Michigan Press.

Huisman, D., Kroon, L., Lentink, R. & Vromans, M., 2005. Operations Research in passengerrailway transportation. *Statistica Neerlandica,* 59(4), pp. 467-497.

Insee, 2014. *Comparateur de territoire : Région d'Île-de-France (11).* [Online] Available at: https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=REG-11 [Accessed 29 06 2017].

Insee, 2015. *Institut national de la statistique et des études économiques : Transports routiers de fret de proximité.* [Online] Available at: http://www.insee.fr [Accessed 13 05 2015].

Interface Transport, 2006. *Guide d'aménagement et de localisation des aires de livraison,* Grand Lyon: s.n.

Islam, D. et al., 2013. Logistics and supply chain management. *Research in Transportation Economics,* 41(1), pp. 3-16.

Jacobson, S. & Schruben, L., 1989. Techniques for simulation response optimization. *Operations Research Letters,* 8(1), pp. 1-9.

Johnson, D., 1990. Local optimization and the Traveling Salesman Problem. *17th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming,* Volume 443, pp. 446-461.

Johnson, D. & Garey, M., 1985. A 71/60 theorem for bin packing. *Journal of complexity,* Volume 1, pp. 65-106.

Kashima, S. et al., 1993. Study of an underground physical distribution system in a high-density, built-up area. *Tunnelling and Underground Space Technology,* 8(1), pp. 53-59.

Kirkpatrick, S., Vecchi, M. & Gelatt Jr, C., 1983. Optimization by simmulated annealing. *Science,* 220(4598), pp. 671-680.

Kleijnen, J. & Wan, J., 2007. Optimization of simulated systems: OptQuest and alternatives. *Simulation Modelling Practice and Theory,* 15(3), pp. 354-362.

Köhler, J., Whitmarsh, L., Nykvist, B. & Schilpero, M., 2009. A transitions model for sustainable mobility. *Ecological Economics,* 68(12), pp. 2985-2995.

Laguna, M., Kelly, J., González-Velarde, J. & Glover, F., 1995. Tabu search for the multilevel generalized assignment problem. *European journal of operational research,* 82(1), pp. 176-189.

Land , A. & Doig, A., 1960. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica,* 28(3), pp. 497-520.

Lawler, E. & Wood, D., 1966. Branch-and-bound methods : A survey. *Operations research,* 14(4), pp. 699-719.

Le Moigne, J., 1990. *La modélisation des systèmes complexes.* Paris: Dunod.

Lindholm, M. & Behrends, S., 2012. Challenges in urban freight transport planning - a review in the Baltic Sea Region. *Journal of Transport Geography,* Volume 22, pp. 129-136.

Lin, S. & Kernighan, B., 1973. An efficient heuristic algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research,* Volume 21, pp. 498-516.

Macharis, C. & Bontekoning, Y., 2004. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review. *European Journal of Operational Research,* Volume 153, pp. 400-416.

Macharis, C., Caris, A., Jourquin, B. & Pekin, E., 2011. A decision support framework for intermodal transport policy. *European Transport Research Review,* 3(4), pp. 167-178.

MacHaris, . C., Van Mierlo, J. & Van Den Bossche, P., 2007. Combining intermodal transport with electric vehicles: towards more sustainable solutions.. *Transportation Planning and Technology,* 30(2-3), pp. 311-323.

Mackworth, A., 1977. Consistency in networks of relations. *Artificial Intelligence,* 8(1), pp. 99-118.

Mairie de Paris, 2009. *Le transport de marchandises dans la ville de Paris,* Paris: Direction de la Voirie & des Déplacements, Agence de la Mobilité - Usagers & Marchandises.

Mairie de Paris, 2009. *Le transport de marchandises dans la ville de Paris,* s.l.: Direction de la Voirie & des Déplacements, Agence de la Mobilité - Usagers & Marchandises.

Martello, S. & Toth, P., 1990. *Knapsack problems: algorithms and computer implementations.* Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.

Martí, R., Laguna, M. & Glover, F., 2006. Principles of scatter search. *European Journal of Operational Research,* 169(2), pp. 359-372.

Meketon, M., 1987. Optimization in simulation: a survey of recent results.. *Proceedings of the 1987 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ: IEEE,* pp. 58-67.

Melo, M., Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F., 2009. Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research,* 196(2), pp. 401-412.

Minoux, M., 1983. *Programmation mathématique : théorie et algorithmes.* Paris: Dunod.

Moglestue, A., 2011. *CargoTram of Zürich.* [Online] Available at: http://www.proaktiva.ch/tram/zurich/cargotram_index.html [Accessed 06 08 2017].

MONOPRIX, 2007. L'acheminement des marchandises par voie ferrée et véhicules roulant au GNV vers les magasins monoprix et MONOP' de Paris. *Dossier de Presse Ferroviaire, July 04, MONOPRIX*.

Montreuil, B., Meller , R. & Ballot, E., 2012. Physical Internet Foundations. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest, Romania.*

Motraghi, A. & Marinov, M., 2012. Analysis of urban freight by rail using event based simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory,* Volume 25, pp. 73-89.

MTA, 2014. NYCT Trash Can Free Stations Pilot Update. *Report Presentation, January, Metropolitan Transportation Authority "MTA".*

Narendra, P. & Fukunaga, K., 1977. A branch and bound algorithm for feature subset selection. *IEEE transactions on computers,* 26(9), pp. 917-922.

Nations United, 2015. *World Urbanization Prospects - The 2014 Revision,* s.l.: United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division.

Nemhauser, G. & Wolsey, L., 1988. *Integer and Combinatorial Optimization.* s.l.:John Wiley & Sons.

Nielsen, L., Kroon, L. & Maróti, G., 2012. A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock. *European Journal of Operational Research,* Volume 220, pp. 496-509.

Nuzzolo, A., Crisalli, U. & Comi, A., 2008. Metropolitan freight distribution by railways. In: R. G. T. Eiichi Taniguchi, ed. *Innovations in City Logistics.* New York: Nova Science Publishers, pp. 351-368.

OECD, 2014. *OECD Economic Surveys: European Union 2014*, s.l.: OECD Publishing.

Offer, G., Howey, D., Contestabile, M. & Clague , R., 2010. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy,* 38(1), pp. 24-29.

Osman, I. & Laporte, G., 1996. Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operations Research,* 63(5), pp. 511-623.

Padberg, M. & Rinaldi, G., 1991. A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems. *SIAM review,* 33(1), pp. 60-10.

Paris Region, 2017. Paris region: key figures 2017. *IAU Ile-de-France.*

Patier, D., 2004. *La place du transport de marchandises en compte propre,* Lyon: Laboratoire d'économie des transport.

Pellegrini, P., Marlière, G. & Rodriguez, J., 2012. Real time railway traffic management modeling track-circuits. *In ATOMOS, 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems,* Volume 25, pp. 23-34.

Pielage, B., 2001. Underground Freight Transportation - A new development for automated freight transportation systems in the Netherlands. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings - Oakland (CA) USA.*

Pimor, Y. & Fender, M., 2008. *Logistique - 5ème édition - Production - Distribution - Soutien.* l'usine nouvelle ed. Paris: Dunod.

pôle-emploi, 2012. *Tour d'horizon du secteur Transport et Logistique.* [Online] Available at: http://www.pole-emploi.fr/candidat/tour-d-horizon-du-secteur-transport-et-logistique-@/article.jspz?id=61339 [Accessed 15 06 2017].

PREDIT GO n°3, 2012. *Faisabilité de l'intégration logistique des espaces transport,* Paris: Rapport finale.

PREDIT GO n°4, 2012. *Intégration de la mixité opérationnelle en transports : états et possibles,* Paris: Rapport Final.

PREDIT GO n°6, 2012. *Transport collectifs urbains : surcouts consécutifs à l'ajout logistique dans un projet,* Paris: Rapport intermédiaire.

Pritsker, A., 1986. *Introduction to simulation and SLAM II.* New York: Halsted Press.

Pritsker, A., Sigal, C. & Hammesfahr, R., 1989. *SLAM II : Network Models for decision Support.* Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Quak, H., 2008. Sustainability of urban freight transport: Retail distribution and local regulations in cities. *PhD Thesis, Erasmus Universiteit Rotterdam.*.

Ramalhinho Lourenço, H. & Serra, D., 2000. Adaptative search heuristics for the generalized assignment problem. *Mathware & soft computing,* Volume 7, pp. 1-15.

Reece, D. & Marinov, M., 2015. Modelling the implementation of a Baggage Transport System in Newcastle upon Tyne for passengers using Mixed-Mode Travel. *Transport Problems,* 10(4), pp. 149-155.

Ripert, C., 2004. Transport de marchandises dans Paris. *Mairie de Paris, présentation Pollutec.*

Rodriguez, J., 2007. A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions. *Transportation Research Part B: Methodological,* 41(2), pp. 231-245.

Rossetti, M., 2015. *Simulation Modeling and Arena, 2nd ed.* New York: John Wiley & Sons, Incorporated.

Ross, G. & Soland, P., 1975. A branch and bound based algorithm for the generalized assignment problem. *Mathematical Programming,* Volume 8, pp. 91-103.

Routhier, J., Segalou, E. & Durand, S., 2001. *Mesurer l'impact du transport de marchandises en ville : le modèle de simulation FRETURB (V.1),* s.l.: LET, MTL, ADEME.

Roy, B., Bertier, P. & Nghiem, P., 1965. Programmes linéaires en nombre entiers et procédures SEP. *Metra,* 4(3).

Roy, R., 2010. *A primer on the Taguchi method, 2nd edition.* s.l.:Society of Manufacturing Engineers.

Runge, D. & Becker, H., 2008. Urban Commercial Transport - Background Paper for the Commission 4 Meeting on 22nd October 2008. *World Association of the Major Metropolises - Urban Mobility Management, Metropolis, Berlin.*

Sabar, M., Montreuil, B. & Frayret, J., 2009. An Agent-based Algorithm for Personnel Scheduling and Rescheduling in Assembly Centers. *Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Moscow, Russia.*

Sabre, R., 2007. Plans d'expériences - Méthode de Taguchi. *Techniques de l'ingénieur, F1006 V1*.

Sakarovitch, M., 1984. *Optimisation combinatoire, méthodes mathématiques et algorithmiques.* Paris: Hermann.

Salido, M., Escamilla, J., Barber, F. & Giret, A., 2017. Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *Journal of Cleaner Production,* Volume 162, pp. S121-S132.

Sato, K., Tamura, K. & Tomii, N., 2013. A MIP-based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers. *Journal of Rail Transport Planning & Management,* Volume 3, pp. 38-53.

Savelsbergh, M., 1997. A branch-and-price algorithm for the generalized assignment problem. *Operations research,* 45(6), pp. 831-841.

Schrijver, A., 2005. On the History of Combinatorial Optimization (Till 1960). *Handbooks in Operations Research and Management Science,* Volume 12, pp. 1-68.

Siarry, P., 2014. *Métaheuristiques : recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinage variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essaims particulaires et autres méthodes d'optimisation.* Paris: Editions Eyrolles.

Silva, C., Sousa, J. & Runkler, T., 2008. Rescheduling and optimization of logistic processes using GA and ACO. *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 21(3), pp. 343-352.

SitraM-I, 2017. *flux-marchandises-sitram-i.* [Online] Available at: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/flux-marchandises-sitram-i.html [Accessed 26 06 2017].

Southworth, F. & Peterson, B., 2000. Intermodal and international freight network modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 8(1-6), pp. 147-166.

Stützel, T., 1998. Local search algorithms for combinatorial problems analysis, improvements and new applications. *PhD thesis, Departement of computer science, Darmstadt university of technology, Germany.*

Stützel, T. & Hoos, H., 2000. Max-Min ant system. *Future generation computer systems,* Volume 16, pp. 889-914.

Stützle, T. & Dorigo, M., 2002. A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithms. *IEEE Transactions on evolutionary computation,* 6(4), pp. 358-365.

Sun, X. & Quilliot, A., 1993. *Résolution de la programmation linéaire en nombre entiers.* Clermont-Ferrand: Thèse de Doctorat à l'Université Blaise Pascal.

Taguchi, G., 1986. *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes.* s.l.:Asian Productivity Organization.

Thierry, C., 2003. Gestion de chaînes logistiques, Modèles et mise en oeuvre pour l'aide à la décision à moyen terme. *Mémoire HDR, Université Toulouse 2, Le Mirail.*

Toilier, F. et al., 2016. How can Urban Goods Movements be Surveyed in a Megacity? The Case of the Paris Region. *Transportation Research Procedia,* Volume 12, pp. 570-583.

Törnquist Krasemann, J., 2012. Design of an effective algorithm for fast response to the re-scheduling of railway traffic during disturbances. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 20(1), pp. 62-78.

Trentini, A., 2012. Proposition d'un système de transport urbain mixte. Application dans le cadre de la ville moyenne de La Rochelle. *Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris.*

Vamanan, M., Wang, Q., Batta, R. & Szczerba, R., 2004. Integration of COTS software products ARENA & CPLEX for an inventory/logistics problem. *Computers & Operations Research,* 31(4), pp. 533-547.

Van Audenhove, F., De Jongh, S. & Durance, M., 2015. *Urban Logistics – How to unlock value from last mile delivery for cities, transporters and retailers,* s.l.: Arthur D. Little Future of Urban Mobility Lab.

Van Duin, J., Tavasszy, L. & Quak, H., 2013. Towards E(lectric)- urban freight: first promising steps in the electric vehicle revolution. *European Transport \ Trasporti Europei,* Volume 54, p. Paper n° 9.

Van Wee, B., Maat, K. & De Bont, C., 2012. Improving Sustainability in Urban Areas: Discussing the Potential for Transforming Conventional Car-based Travel into Electric Mobility. *European Planning Studies,* 20(1), pp. 95-110.

Vanderbeck, F. & Wolsey, L., 1996. An exact algorithm for ip column generation. *Operations research letters,* 19(4), pp. 151-159.

Veelenturf, L., Potthoff, D., Huisman, D. & Kroon, L., 2012. Railway crew rescheduling with retiming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 20(1), pp. 95-110.

Vernadat, F., 1999. *Techniques de modélisation en entreprise : application aux processus opérationnels.* Paris: Economica.

Vieira, G., Herrmann, J. & Lin, E., 2003. Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies, and methods. *Journal of Scheduling,* Volume 6, pp. 39-62.

Visser, J., 2017. Automated freight transport. *1th Chinas Symposium on Underground Freight Transportation - Shanghai.*

Walker, C., Snowdon, J. & Ryan, D., 2005. Simultaneous disruption recovery of a train timetable and crew roster in real time. *Computers & Operations Research,* 32(8), pp. 2077-2094.

Wang, L. & Shi, L., 2013. Simulation optimization: a review on theory and applications. *Acta Automatica Sinica,* 39(11), pp. 1957-1968.

Wang, Y. et al., 2016. Towards enhancing the last-mile delivery: An effective crowd-tasking model with scalable solutions. *Transportation Research Part E,* Volume 93, pp. 279-293.

Wu, S., Storer, R. & Chang, P., 1992. A rescheduling procedure for manufacturing systems under random disruptions. In: *New directions for operations research in manufacturing (G. Fandel, T. Gulledge, & A. Jone).* Berlin: Springer, pp. 292-308.

Xie, M. & Li, X., 2012. Railway Timetable Rescheduling Based on the Feedback of. *Procedia - Social and Behavioral Sciences: 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies Changsha, China*, Volume 43, pp. 781-789.

Yin, Y., Cheng, T. & Wang, D., 2016. Rescheduling on identical parallel machines with machine disruptions to minimize total completion time. *European Journal of Operational Research*, Volume 252, pp. 737-749.

Zeigler, B., 1976. *Theory of Modeling and simulation.* New York: John Wiley & Sons.

Liste des publications

Communications en conférences internationales :

- W. Behiri, S. Belmokhtar-Berraf. **"A rolling horizon approach to goods transport rescheduling problem using passenger urban rail network".** The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Toulouse, France, 9-14 July 2017.
- W. Behiri, S. Belmokhtar-Berraf, O. Ozturk. **"Urban freight by rail: a coupled simulation–optimization approach for optimizing transport of goods".** The 11th International Conference on Modeling, Optimization & Simulation, Montréal, Québec, Canada, 22-24 August 2016.
- W. Behiri, S. Belmokhtar-Berraf, O. Ozturk. **"MILP modeling for transporting goods using urban rail passenger network".** The 3rd International Conference on Green Supply Chain, London, UK, 10-13 July 2016.
- W. Behiri, O. Ozturk, S. Belmokhtar-Berraf. **"Urban Freight by Rail: A MILP Modeling for Optimizing the Transport of Goods".** The 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Bordeaux, France, 1-4 June 2016.

Communications en conférences nationales :

- W. Behiri, S. Belmokhtar-Berraf. **"Une métaheuristique basée sur les colonies de fourmis pour le transport urbain par rail mixant fret et voyageurs"**. ROADEF 2017, Metz, 22-24 Février.
- W. Behiri, O. Ozturk, S. Belmokhtar-Berraf. **"Une approche couplée optimisation / simulation pour le chargement de marchandises dans le transport par rail".** ROADEF 2016, Compiègne, 10-12 Février.
- W. Behiri, O. Ozturk, S. Belmokhtar-Berraf. **"Logistique urbaine par rail : une approche couplée optimisation / simulation pour le dimensionnement de rames de trains mixant fret et voyageurs"**. GDR MACS 2015, Nantes, 26-27 Novembre.

Séminaires et journées thématiques :

- W. Behiri, S. Belmokhtar-Berraf. **"Transport ferroviaire urbain de marchandises dans la perspective de mixité fret / voyageurs : modélisation et optimisation"**. SMRT - Séminaire Modélisation des réseaux de transport – IFSTTAR, 17 Novembre 2016.
- W. Behiri, O. Ozturk, S. Belmokhtar-Berraf. **"Logistique urbaine par rail : Identification de différentes problématiques à plusieurs niveaux décisionnelles"**. Journée du groupe de travail P2LS du GDR-RO, 19 Novembre 2015.

Publication en cours dans une revue internationale :

- W. Behiri, S. Belmokhtar-Berraf, C. Chu. **"A modeling methodology to introduce freight into urban passenger rail network"**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, (soumis en février 2017, 3ème round).

Résumé / Abstract

Titre : Une méthodologie pour modéliser et optimiser la mutualisation du transport ferroviaire urbain de marchandises et de passagers

Mots clés : transport de marchandises, transport ferroviaire, optimisation, simulation à évènements discrets, couplage simulation / optimisation.

Malgré la prédominance actuelle du mode routier, pour le transport de marchandises en milieu urbain, une alternative durable est nécessaire, au vu des enjeux environnementaux et sociétaux. Dans cette thèse, nous proposons l'étude d'une des perspectives possibles, pour absorber une partie de ce flux de marchandises toujours plus dense, en utilisant le réseau ferroviaire urbain, initialement dédié aux voyageurs. Une méthodologie intégrant le fret dans ce dernier est proposée, avec comme première étape, l'identification et la classification de tous les niveaux de mixité fret / voyageurs possibles. Le niveau le plus contraint est retenu, car sa faisabilité induira celle des autres. Notre seconde contribution est relative à une approche par décomposition du problème d'insertion du flux de fret en plusieurs sous-problèmes interdépendants, selon les trois horizons temporels (long, moyen et court). Dans le but d'évaluer la capacité du système global, à absorber un flux supplémentaire de nature différente, le problème de détermination du meilleur plan de transport des marchandises est identifié comme central et critique. La troisième contribution concerne la simulation du système de transport, puis sa formalisation par un PL en variables mixtes, pour affecter chaque commande à un train, en déterminant le moment auquel elle sera chargée et en minimisant les temps d'attente cumulés des commandes. Plusieurs variantes de colonies de fourmis sont développées, pour la résolution d'instances de grande taille. La quatrième contribution concerne le couplage du modèle de simulation, qui permet l'évaluation des performances de cette nouvelle solution de transport, avec les différents algorithmes optimisant le plan de transport. Enfin, nous proposons une approche de replanification par horizon glissant, pour absorber les perturbations de la demande, en minimisant les changements du plan de transport.

Title: A modeling methodology to introduce freight into urban passenger rail network

Keywords: urban freight, rail transport, optimization, discrete event simulation, simulation optimization coupling.

Urban freight transport is almost exclusively carried out by truck. Beyond the drawbacks caused in the city, this transport mode is nearly saturated. This study discusses an alternative way of transporting freight by using urban rail infrastructure. The first contribution deals with the identification and classification of all different sharing possibilities of mixing freight with passenger's traffic using rail network. The second contribution is the definition of global freight/passenger transport problem, which is decomposed into several optimization interdependent sub-problems with different temporal decision horizon. In order to show the capacity of the global system to absorb an additional flow with different nature, the Freight Rail Transport Schedule Problem "FRTSP" is identified as the bottleneck of transportation system and is formalized with MIP model. As third contribution, this problem determines train and loading time for each demand to be assigned respecting several constraints while minimizing total waiting time. The fourth contribution deals with a discrete event simulation approach, which studies this alternative and validates several proposed decision algorithms. Finally, the fifth contribution consists in a dynamic approach based on a rolling horizon, which is proposed in order to update the initial plan. The updated plan allows to determine a new assignment regarding new demand such as the modifications from the previous plan are minimized.