



HAL
open science

Modélisation et Optimisation pour le Graphicage des Lignes de Bus

Valérie Guihaire

► **To cite this version:**

Valérie Guihaire. Modélisation et Optimisation pour le Graphicage des Lignes de Bus. Informatique [cs]. Université d'Angers, 2009. Français. NNT : . tel-00477743

HAL Id: tel-00477743

<https://theses.hal.science/tel-00477743>

Submitted on 30 Apr 2010

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.

Modélisation et Optimisation pour le Graphicage des Lignes de Bus

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Informatique

ÉCOLE DOCTORALE STIM

Présentée et soutenue publiquement

Le 3 décembre 2009

  Angers

Par **Valérie GUIHAIRE**

Devant le jury ci-dessous :

<i>Rapporteurs :</i>	Van-Dat CUNG, Philippe MICHELON,	Professeur à l'�cole Nationale Supérieure de Génie Industriel de Grenoble Professeur à l'Universit� d'Avignon et des Pays de Vaucluse
<i>Examineurs :</i>	Xavier GANDIBLEUX, Catherine ROUCAIROL,	Professeur à l'Universit� de Nantes Professeur à l'Universit� de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
<i>Directeur de thèse :</i>	Jin-Kao HAO,	Professeur à l'Universit� d'Angers
<i>Invité :</i>	Ari DADOUN,	Directeur de Perinfo SA

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à mon directeur de thèse, Jin-Kao Hao, pour m'avoir encadrée au cours de ces années de thèse. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour ses conseils et pour la confiance qu'il m'a accordée.

J'adresse mes sincères remerciements à Van-Dat Cung et Philippe Michelin pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, ainsi qu'à Xavier Gandibleux et Catherine Roucairol qui m'ont fait l'honneur de d'accepter de participer au jury de cette thèse.

Je tiens à remercier l'équipe de Perinfo pour m'avoir accueillie et avoir permis le développement de ce projet. En particulier, je suis reconnaissante à Armand Perez et à Ari Dadoun de m'avoir fait confiance au long de ces années. Mes collègues occupent une place prépondérante dans la réalisation de cette thèse. Merci à tous ceux avec qui j'ai travaillé sur le projet graphicage, je pense à Ari, Charles, Christophe, Fabien, François-Xavier, Sébastien et Stéphane notamment. Merci aussi à tous ceux qui ont fait de cette expérience une période agréable et ont grandement participé au plaisir d'aller travailler tous les jours, Alexis, Benoît, Fabien, Xavier, Marc-André, Odile, Sébastien et tous les autres. J'adresse un remerciement particulier à Benoît, avec qui j'ai travaillé quotidiennement pendant ces années de thèse. Après avoir été mon maître de stage, il m'a également prodigué de nombreux conseils au long de ma thèse. Les échanges avec lui ont souvent été riches d'idées, et ses relectures minutieuses m'ont été précieuses.

Même si la distance a limité mes séjours au laboratoire, je tiens à remercier les membres du LERIA et du département d'informatique pour leur accueil, et pour les conseils qu'ils m'ont apportés, particulièrement en cette fin de thèse.

Je remercie également mes amis pour les excellents moments passés en leur compagnie, pour leurs encouragements et leur amitié, en dépit de l'éloignement pour nombre d'entre eux. Je pense en particulier à Audrey, Aurélie, Bertrand, Catherine, Céline, Emilie, Hélène, Marine, Sandra et Xavier et à nouveau Benoît, Fabien et Sébastien.

Enfin, je remercie ma famille pour le soutien sans faille qu'elle m'a apporté. Merci surtout à mes parents et à mon frère, pour leur aide et leurs encouragements.

Sommaire

Introduction générale	1
1 Contexte : Transport en commun	7
1.1 Développement du transport routier de voyageurs	9
1.1.1 Spécificités du transport en commun routier	9
1.1.2 Critères de qualité de service	10
1.1.3 Besoins de planification	10
1.1.4 Contexte concurrentiel	11
1.2 Processus de planification	16
1.2.1 Étapes selon Ceder et Wilson	16
1.2.2 Création du réseau	19
1.2.3 Création des fréquences	21
1.2.4 Création des horaires	22
1.2.5 Création des services véhicules	24
1.2.6 Création des services conducteurs	25
1.2.7 Création des roulements conducteurs	26
1.3 Intégration d'étapes	28
1.3.1 Fréquences et horaires	28
1.3.2 Horaires et services véhicules	29
1.3.3 Services véhicules et services conducteurs	29
1.4 Comparatif des modes de transport en commun	30
1.4.1 Avion	30
1.4.2 Train	31
1.4.3 Métro et tramway	31
1.5 Synthèse du chapitre	32
2 Planification des horaires de lignes pour la qualité de service	33
2.1 Présentation du problème	35
2.1.1 Enjeux	35
2.1.2 État de l'art	36
2.1.3 Données	37
2.1.4 Objectifs	37
2.1.5 Contraintes	39
2.1.6 Sorties	39

2.2	Modélisation	39
2.2.1	Variables de décision et valeurs	41
2.2.2	Objectifs	41
2.2.3	Contraintes	44
2.3	Approche de résolution	44
2.3.1	Espace de recherche	45
2.3.2	Prétraitement des possibilités de correspondances	45
2.3.3	Stratégie de recherche multialgorithme	45
2.3.4	Voisinages	46
2.3.5	Taille des voisinages	50
2.4	Résultats	51
2.4.1	Jeux de tests	51
2.4.2	Conditions de test	53
2.4.3	Analyse des voisinages individuels	53
2.4.4	Recherche multialgorithme	56
2.5	Synthèse du chapitre	62
3	Planification des horaires de lignes et des services véhicules	65
3.1	Présentation du problème	67
3.2	État de l'art	68
3.3	Hypothèses de modélisation	69
3.4	Modélisation	70
3.4.1	Données	70
3.4.2	Variables de décision et valeurs	71
3.4.3	Contraintes	72
3.4.4	Objectifs	73
3.5	Approche de résolution	75
3.5.1	Méthode générale	75
3.5.2	Solution initiale	75
3.5.3	Algorithme par enchères	76
3.5.4	Affectation des horaires et des véhicules par TVA	77
3.5.5	Optimisation des services en boucle (LVA) par post-optimisation	81
3.6	Résultats	83
3.6.1	Jeu de tests et paramètres d'expérimentation	83
3.6.2	Références et critères de comparaison	84
3.6.3	Résultats expérimentaux	85
3.6.4	Analyse des voisinages	88
3.7	Adaptabilité du modèle	90
3.8	Synthèse du chapitre	92
4	Réoptimisation des horaires en préservant les plannings de ressources	95
4.1	Présentation du problème	97
4.2	Propositions de modélisation	99
4.3	Modélisations retenues	100

4.3.1	Données	101
4.3.2	Contraintes	101
4.3.3	Objectif : quantité et qualité des correspondances	102
4.3.4	Sorties	102
4.4	Formalisation des modèles	102
4.4.1	Notations	103
4.4.2	Contraintes	104
4.4.3	Objectif : quantité et qualité des correspondances	105
4.5	Approche de résolution	105
4.5.1	Méthode de résolution	106
4.5.2	Espace de recherche et prétraitement	106
4.5.3	Recherche tabou	107
4.5.4	Voisinages	107
4.5.5	Paramétrage de la méthode tabou pour le SbrT	109
4.6	Résultats	109
4.6.1	Jeux de tests	109
4.6.2	Comparaison des résultats pour les deux algorithmes	113
4.6.3	Analyses complémentaires	115
4.7	Synthèse du chapitre	117
	Conclusion générale	121
	Index	125
	Références bibliographiques	127
	Liste des publications personnelles	135
	Résumé / Abstract	138

Liste des figures

1.1	Réseau urbain Tan (Nantes)	12
1.2	Réseau interurbain Lila (44)	13
1.3	Étapes de la planification	17
1.4	Classification et terminologie des problèmes liés à la qualité de service dans le processus de planification	18
2.1	Modèle de grille horaire.	40
2.2	Fonction de coût pour l'objectif de correspondances.	42
2.3	Fonctions de coût pour les cas 1 et 2 du cadencement	44
2.4	Exemple de mouvement de DecalDesserte	47
2.5	Exemple de mouvement de DecalJournée	48
2.6	Exemple de mouvement de DecalCorrExistantes	49
2.7	Exemple de mouvement de DecalCorrIdeales	50
2.8	Réseau du Loiret	52
2.9	Évolution de la fonction objectif pour DecalDesserte	54
2.10	Évolution de la fonction objectif pour DecalJournée	54
2.11	Évolution de la fonction objectif pour DecalCorrExistantes	55
2.12	Évolution de la fonction objectif pour DecalCorrIdeales	55
2.13	Résultats obtenus par les compositions utilisant DecalCorrIdeales et DecalCorrExistantes	58
2.14	Résultats obtenus par les compositions utilisant DecalDesserte, DecalCorrIdeales et DecalCorrExistantes	59
2.15	Résultats obtenus par les compositions utilisant les quatre voisinages	61
2.16	Amélioration en valeur absolue apportée à la fonction objectif par chacun des algorithmes à l'intérieur des boucles du token ring C32	62
3.1	Graphicage par rapport au processus de planification	67
3.2	Modèle de graphique espace-temps par véhicule.	68
3.3	Modèle de graphique à plat.	68
3.4	Double affectation	72
3.5	Exemples de mouvements issus du voisinage ServiceCrossOver.	82
3.6	Évolution des coûts pondérés pour les quatre objectifs	86
4.1	Positionnement du SbrT dans le processus de planification	97

4.2	Constitution d'une affectation véhicule	98
4.3	Décalage des affectations véhicules	99

Liste des tables

2.1	Portrait chiffré du réseau de test.	51
2.2	Résultats obtenus par les voisinages utilisés individuellement	57
2.3	Valeurs de fonction objectif pour la solution finale obtenue par les différentes compositions de token ring	60
3.1	Jeu de pondérations par objectif utilisé dans les tests	84
3.2	Résultats croisés de la solution existante, l'approche séquentielle et l'approche simultanée au sens du premier type de critères de comparaison	87
3.3	Résultats croisés de la solution existante, l'approche séquentielle et l'approche simultanée au sens du deuxième type de critères de comparaison.	87
3.4	Résultats numériques pour le premier type de critères de comparaison.	89
3.5	Résultats numériques pour le deuxième type de critères de comparaison.	89
4.1	Jeux de pondérations	112
4.2	Différences de résultats selon les paires de jeux de pondérations.	112
4.3	Nombre de conducteurs par jeu de tests	113
4.4	Nombre moyen (écart-type) de correspondances par jeu de test et méthode, ainsi que pourcentage d'amélioration par rapport à la solution initiale	114
4.5	Coût de la fonction objectif par jeu de test et méthode (moyenne, écart-type) et pourcentage d'amélioration par rapport à la solution initiale	114
4.6	Pourcentage de performance supplémentaire de la méthode basée sur <i>DecalCourse</i> par rapport à celle basée sur <i>DecalCond</i> au sens de la fonction objectif.	115
4.7	Caractéristiques (moyenne, écart-type) des deux voisinages : taille et temps d'exploration totale par itération	116
4.8	Valeur de la fonction objectif par jeu de test et taille de liste tabou	117
4.9	Moyenne (écart-type) de temps pour l'exploration totale d'un voisinage par jeu de test et taille de liste tabou.	117

Liste des algorithmes

2.1	Stratégie token ring à N algorithmes de recherche locale	46
3.1	Algorithme - ILS pour TVA	78
3.2	Algorithme - ILS pour LVA	81
4.1	Algorithme de Recherche Tabou	108

Introduction générale

Contexte de travail

Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) impliquant un laboratoire de recherche, le LERIA ; une société industrielle, PERINFO ; et une doctorante, moi-même.

Perinfo, créé en 1982, est un éditeur de progiciels dédiés au domaine de la gestion des flottes de véhicules et du transport de personnes. Son PGI (Progiciel de Gestion Intégré), Gescar, dispose de nombreux modules qui permettent de répondre aux besoins des différents secteurs du monde du transport de voyageurs : les réseaux urbains, interurbains, les directions départementales de l'équipement, les prestataires de limousines, etc. Son offre est principalement centrée sur les outils de gestion (commerciale, d'exploitation, sociale, d'atelier, de parc). Depuis 5 ans, Perinfo a mis en place une cellule de recherche et développement dédiée à la création de modules complémentaires à forte valeur ajoutée, basés sur l'optimisation combinatoire.

Le domaine du transport (de frêt comme de personnes) est historiquement un domaine d'application majeur de la recherche opérationnelle. En complément de la gestion généralisée des réseaux par l'informatique, il constitue un marché en expansion pour l'aide à la décision. En particulier, le monde du transport routier de voyageurs connaît depuis quelques années une mutation profonde caractérisée par le rachat continu de petits exploitants par les grands groupes de transport. Le contexte concurrentiel intense entre ces groupes ainsi que la taille grandissante des flottes de véhicules demandent l'utilisation d'outils de planification sophistiqués, à des fins d'optimisation des réseaux. Pour être compétitifs vis-à-vis de leurs concurrents transporteurs et de l'automobile, les planificateurs doivent maximiser la qualité de service proposée tout en minimisant les coûts économiques liés à l'exploitation du réseau. Il existe alors un réel enjeu à faire appel aux outils d'aide à la décision, qui représentent un critère discriminant sur le marché.

Les domaines de planification concernés sont notamment la détermination des horaires de lignes, des services véhicules et des services conducteurs pour les lignes régulières et les trajets occasionnels, ainsi que les roulements des conducteurs. D'autres domaines connexes peuvent s'ajouter au panel, les transporteurs étant demandeurs d'outils permettant de gérer le transport à la demande, l'intermodalité, etc. Dans cette thèse, nous étudions des problématiques liées au graphissage, dont les enjeux s'articulent autour de la phase de détermination des grilles horaires dans le processus de planification du transport.

Motivations et objectifs

Les problématiques étudiées dans cette thèse sont issues du processus de travail des planificateurs de transport par bus et car, qui trouve un écho depuis longtemps dans le domaine scientifique.

La planification des réseaux de transport [Ceder et Wilson, 1986] se base sur une phase stratégique qui repose essentiellement sur la création des lignes ainsi que la détermination de leurs fréquences. Vient ensuite l'étape de création des grilles horaires, puis au niveau opérationnel, la constitution des services véhicules, des services conducteurs et des roulements conducteurs. La partie qui nous intéresse essentiellement dans le cadre de ce manuscrit est la détermination des grilles horaires des lignes, un point-clé de la qualité de service d'un réseau de transport.

Les grilles horaires déterminent en effet les temps de trajet et les correspondances qui seront utilisées par les usagers, deux critères largement reconnus comme primordiaux. Cette étape peut se baser sur des grilles vides, mais le cas de la réorganisation de grilles en fonctionnement est plus fréquent en pratique. C'est sur celui-ci que nous allons nous concentrer ici.

Lorsqu'on étudie l'aspect qualité de service de la planification des réseaux, on constate qu'il n'existe pas de synthèse sur les problèmes traitant du sujet, problèmes qui font l'objet de nombreux découpages, modélisations et méthodes de résolution. La première étape consiste donc à réaliser un état de l'art descriptif et comparatif des travaux portant sur les phases de la planification relatives à la qualité de service : la création des lignes, des fréquences et des horaires.

Deuxièmement, le défi est de proposer des modèles et méthodes de résolution pouvant faire face aux limites de ceux employés dans la littérature pour le problème de détermination des horaires. La majorité des travaux considèrent ce problème sous l'aspect synchronisation des correspondances. La plupart des modèles considèrent des cadencements (ou "fréquences") fixes par ligne (le QSAP par [Daduna et Voss, 1995] par exemple, voir également [Jansen *et al.*, 2002; Cevallos et Zhao, 2006]), ce qui n'est pas forcément justifié d'un point de vue qualité de service en pratique. Nous remettons en cause cette hypothèse et intégrons des cadencements variables par ligne, à l'instar de [Chakroborty *et al.*, 1997]. Ce dernier article propose une méthode de résolution par algorithme génétique, limitée cependant aux réseaux de petite taille. Le challenge est alors de tirer profit de la flexibilité supplémentaire apportée par le modèle choisi, de définir des fonctions d'évaluation de la qualité adaptées à ce modèle, et d'envisager d'autres méthodes de résolution capables de s'attaquer à des problèmes de taille réelle.

Parallèlement au processus traditionnellement séquentiel de planification évoqué plus haut, on assiste à un développement des approches dites "intégrées". Celles-ci traitent simultanément des aspects de problèmes appartenant en principe à des étapes distinctes du processus (par exemple, la planification simultanée des véhicules et des conducteurs [Huisman *et al.*, 2005]).

Notre troisième défi s'inscrit dans cette tendance en ce que l'on souhaite définir, modéliser et apporter une méthode de résolution au problème de réorganisation des grilles horaires en y mêlant cette fois des considérations issues de la planification des ressources

véhicules et conducteurs. Le challenge est d'adapter les horaires du réseau aux évolutions exogènes des horaires des autres modes en correspondance par exemple, afin de préserver ou améliorer la qualité de service interne et intermodale, sans bouleverser pour autant les plannings d'exploitation.

Toujours dans cette optique d'intégration d'étapes de la planification, un besoin exprimé par les planificateurs est la possibilité de combiner des objectifs de qualité de service avec des objectifs économiques au moment de la fixation des horaires de lignes. En effet, l'impact de la structure des grilles horaires sur la taille de la flotte nécessaire, et donc sur les objectifs de l'étape de constitution des services véhicules, est déterminant. Cette approche simultanée est encore très peu explorée dans la littérature, les approches existantes se limitant à de tout petits réseaux ou incluant nombre d'hypothèses restrictives sur les affectations des véhicules. Le challenge est ici de proposer un modèle qui permet de combiner des objectifs de qualité de service et des objectifs économiques, et une méthode de résolution capable de fournir des solutions intéressantes en un temps raisonnable sur différentes tailles de réseaux.

Principales contributions

Les travaux présentés dans cette thèse tentent d'apporter des réponses aux problématiques soulevées ci-dessus.

Notre première contribution est une revue de littérature portant sur la planification de réseaux de transport par bus et car. En l'absence d'état de l'art dans le domaine scientifique sur le sujet de la qualité de service par la planification, cette revue [Guihaire et Hao, 2008a] apporte un éclairage sur les différents modèles et méthodes employés pour les problématiques stratégiques et tactiques de création des lignes du réseau, des fréquences et des horaires.

Concernant la problématique de détermination des horaires dans une optique de qualité de service, nous proposons un modèle basé sur la régularité du cadencement et la qualité et la quantité des correspondances. Ce modèle est adapté aux situations pratiques rencontrées par les exploitants (traitement de l'intermodalité, considération de différentes périodes de cadencement) et permet de modéliser finement la réalité. Nous proposons pour ce problème, en plus du voisinage de base utilisé dans la littérature, un ensemble de voisinages qui définissent des structures de mouvements capables de diversifier la recherche tout en préservant de bonnes propriétés des solutions parcourues. La combinaison de ces mécanismes dans une stratégie de recherche multialgorithme permet d'apporter des gains notables en termes de qualité de service par rapport à la situation existante dans notre cas d'étude.

La contribution suivante est la modélisation d'un problème intégré de détermination des horaires et de création des services véhicules. Ceci répond à un besoin exprimé en pratique de combiner les objectifs de qualité de service avec ceux de coût économique au moment de la détermination des grilles horaires. Nous développons une méthode de résolution hybride basée sur une recherche locale itérée, une méthode de résolution exacte d'un sous-problème par un algorithme par enchères, et deux voisinages que nous définissons

spécifiquement pour ce problème. Cette approche intégrée s'inscrit dans le processus très actuel de regroupement des étapes de la planification. Elle permet d'obtenir, sur notre cas d'étude, des résultats nettement supérieurs à ceux obtenus par une approche séquentielle et par rapport à la situation actuelle.

La dernière contribution concerne un problème original que nous n'avons pas rencontré ailleurs dans la littérature. Il s'agit de réorganiser les grilles horaires d'un réseau en fonctionnement, dans l'objectif d'en améliorer la qualité de service, représentée par les possibilités de correspondances. La particularité de la problématique est de prendre comme contraintes les plannings de ressources existants (véhicules et conducteurs) afin de préserver les séquences de missions de transport qui leur sont affectées. Cette problématique permet d'ajuster la qualité de service sans devoir remettre à plat l'ensemble du fonctionnement de l'exploitation. Pour répondre à ce problème, nous proposons un modèle et une méthode de résolution basée sur une méthode tabou, qui sont validés par une série de tests.

Enfin, outre l'aspect scientifique, les outils auxquels nos travaux ont donné naissance ont été testés dans des contextes industriels. Ainsi, l'outil de graphycage est mis en place chez plusieurs exploitants urbains. Il a également servi, au niveau interurbain, à réaliser des études pour le compte d'autorités organisatrices du transport (conseil général).

Organisation de la thèse

Ce manuscrit comporte quatre chapitres dont nous présentons une brève description :

- **Chapitre 1.** Nous présentons le domaine du transport routier de voyageurs et en particulier détaillons le processus de planification usuel. Un état de l'art est établi pour chacune des étapes du processus ainsi que pour leurs combinaisons. Une attention particulière est portée aux étapes relatives à la qualité de service, pour lesquelles une terminologie est proposée afin d'identifier les problèmes étudiés dans la littérature. Le transport routier de voyageurs est ensuite comparé aux autres modes de transport en commun. Nous concluons sur le besoin d'outils de planification spécifiques pour les diverses problématiques rencontrées pour l'exploitation des bus et cars.
- **Chapitre 2.** Ce chapitre étudie le problème de création des horaires de lignes dans un réseau de transport routier de voyageurs. Nous y proposons une modélisation associée à une méthode de résolution orientées vers les objectifs de qualité de service que sont les correspondances et le cadencement des lignes. En plus du voisinage de décalage des horaires de début de ligne déjà rencontré dans la littérature, nous proposons trois types de voisinages dont nous définissons le mécanisme et comparons les performances sur un réseau de transport réel. Ce réseau constitue notre cas d'étude pour les trois derniers chapitres de la thèse en raison de l'absence de jeux de données dans la littérature, et particulièrement pour les problématiques et modélisations originales étudiées. Ces voisinages sont ensuite intégrés dans une recherche locale multialgorithme afin de tirer parti de leurs avantages respectifs.
- **Chapitre 3.** Nous étudions dans ce chapitre un problème intégré de planification

des horaires et des affectations véhicules dans un réseau interurbain, en présentant les extensions possibles pour le milieu urbain. Le modèle présenté dans le chapitre 2 est étoffé d'objectifs relatifs au niveau de ressources impliquées, en l'occurrence le nombre de véhicules et le kilométrage à vide. Ce nouveau modèle est propice au développement de voisinages spécifiques. La méthode de résolution se base sur une recherche locale itérée et un algorithme exact d'affectation par enchères. Des expérimentations viennent valider la pertinence de l'approche simultanée par rapport à l'approche séquentielle.

- **Chapitre 4.** Ce chapitre prend le processus de planification et la littérature associée à contre-courant, en modifiant les grilles horaires du réseau de lignes tout en préservant les plannings de ressources existants. L'objectif est d'améliorer la qualité de service à travers les possibilités de correspondances, en prenant pour contraintes les séquences de courses affectées aux véhicules et aux conducteurs. Une modélisation de ce problème original ainsi qu'une méthode de résolution basée sur une méthode tabou et des voisinages adaptés est proposée. Des tests sont menés sur le réseau de lignes utilisé dans les chapitres 2 et 3.

Cette thèse conclut sur une synthèse de nos différentes contributions, et ouvre sur quelques perspectives de recherche.

Chapitre 1

Contexte : Transport en commun

CE chapitre présente le contexte pratique et théorique dans lequel s’ancre le travail de cette thèse. Nous présentons dans un premier temps le développement du transport en commun dans la société actuelle. Quelles sont les conditions et les conséquences de ce développement ? Quels sont les besoins générés en termes d’optimisation ? Dans un deuxième temps nous réalisons un état de l’art de la planification du transport en commun en détaillant les étapes individuelles de ce processus séquentiel. Nous étudions ensuite la manière dont s’articulent ces différents problèmes dans la littérature et en pratique. Nous retrouvons en particulier dans cet état de l’art les étapes de la planification sur lesquelles portent les chapitres suivants de cette thèse, à savoir la création des horaires de ligne et la planification des services véhicules, qui constituent le problème de graphissage lorsqu’ils sont traités simultanément. Pour terminer, nous identifions les raisons complémentaires qui font que le milieu du transport routier de voyageurs nécessite ses propres méthodes d’optimisation par différenciation avec le transport aérien et ferroviaire. Le travail de revue présenté dans la partie 1.2 de ce chapitre a fait l’objet d’une publication [Guihaire et Hao, 2008a] .

Sommaire

1.1	Développement du transport routier de voyageurs	9
1.1.1	Spécificités du transport en commun routier	9
1.1.2	Critères de qualité de service	10
1.1.3	Besoins de planification	10
1.1.4	Contexte concurrentiel	11
1.2	Processus de planification	16
1.2.1	Étapes selon Ceder et Wilson	16
1.2.2	Création du réseau	19
1.2.3	Création des fréquences	21

1.2.4	Création des horaires	22
1.2.5	Création des services véhicules	24
1.2.6	Création des services conducteurs	25
1.2.7	Création des roulements conducteurs	26
1.3	Intégration d'étapes	28
1.3.1	Fréquences et horaires	28
1.3.2	Horaires et services véhicules	29
1.3.3	Services véhicules et services conducteurs	29
1.4	Comparatif des modes de transport en commun	30
1.4.1	Avion	30
1.4.2	Train	31
1.4.3	Métro et tramway	31
1.5	Synthèse du chapitre	32

1.1 Développement du transport routier de voyageurs

Dans le contexte économique, environnemental et politique actuel, le transport en commun présente de nombreux avantages. Il permet d'économiser sur les dépenses en carburant des voitures individuelles (au niveau financier comme écologique), de diminuer la congestion des routes et des zones de stationnement, et est également plus sûr que le transport dit privé. Le transport routier de voyageurs est en développement, comme le confirment les statistiques issues du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (<http://www.statistiques.equipement.gouv.fr>, rubrique Transport de voyageurs). Ainsi, entre 1995 et 2005, le nombre de voyageurs transportés par autocar en France métropolitaine a progressé de 8.34% en passant de 1129.90 à 1224.1 millions. Le kilométrage parcouru par les autocars a, lui, progressé de 3.58% sur cette même période, passant de 1590.10 à 1647.1 millions de kilomètres.

Toutefois, afin de convaincre de nouveaux usagers et d'élargir leurs cibles, les systèmes de transport doivent s'adapter aux nouvelles demandes et répondre à de hautes exigences de qualité. Nous exposons ici ces demandes, et les conséquences qui en résultent pour les transporteurs.

1.1.1 Spécificités du transport en commun routier

Le transport en commun se distingue d'autres modes de transport par un ensemble d'aspects :

- des itinéraires fixes : les points d'entrée et de sortie des individus dans le réseau correspondent rarement à leurs points d'origine et de destination réelles ;
- des horaires prédéfinis : les horaires d'arrivée sont prévus, grâce à la connaissance des temps de trajet par ligne et période horaire ;
- le partage du véhicule : avec les conditions de confort, d'utilisation et d'occupation qui y sont liées ;
- la tarification : elle ne dépend pas forcément du kilométrage effectué, mais peut dépendre d'un ou plusieurs abonnement(s) en fonction du caractère multimodal du trajet et être variable selon les catégories d'usagers (chômeurs, étudiants, seniors...).

Les usagers des transports en commun sont en grande partie passifs vis-à-vis d'un système statique par rapport auquel ils s'adaptent. Notons tout de même que la demande des usagers est prise en compte à chaque remise en question des itinéraires ou plus fréquemment des horaires de lignes. Ceci se fait à travers les enquêtes régulièrement organisées par les compagnies de transport ou les autorités organisatrices ainsi qu'à travers les demandes spontanées des usagers.

Nous ne traitons pas dans ce manuscrit du cas particulier du Transport à la Demande (TAD), qui peut se présenter sous des formes très variables et n'obéit pas au même processus de planification que le transport régulier par car en raison du caractère fortement dynamique du problème.

1.1.2 Critères de qualité de service

Conserver les usagers du transport en commun année après année, alors que la situation des individus évolue (naissances, chômage, handicap...) constitue un défi. Rendre attractif le transport en commun aux yeux d'un voyageur habitué à la flexibilité d'un véhicule privé en est un probablement encore plus grand. Ces deux objectifs nécessitent de nombreuses garanties d'un service de qualité.

Les critères généraux de qualité de service dans le transport routier de voyageurs peuvent être identifiés de la sorte, sans ordre de priorité particulier :

- bonne accessibilité du réseau : elle se caractérise par une couverture spatiale dense et étendue du réseau, et dépend du tracé des lignes et du positionnement des arrêts (voir Section 1.2.2) ;
- mobilité aisée à l'intérieur du réseau : elle provient du nombre élevé de possibilités de correspondances, au niveau intermodal comme intramodal, et des temps d'attente impliqués ;
- cadencement ajusté des lignes : il est souhaitable que le cadencement (*i.e.* les fréquences) soit régulier et lisible. De plus, il doit être en adéquation avec la demande des usagers afin d'éviter les surcharges des véhicules et de fournir un large choix d'horaires aux voyageurs ;
- temps de trajet total limité : les usagers apprécient les trajets directs, les correspondances synchronisées, et les vitesses de parcours élevées ;
- service ponctuel ;
- mode de transport sûr : les véhicules et les conducteurs doivent être fiables, les trajets sécurisés ;
- tarification adaptée : le service doit être abordable, modulable par catégories d'usagers, et intégrer des offres intermodales si le réseau est en connexion avec d'autres modes de transport ;
- niveau de confort satisfaisant : il se caractérise par des véhicules récents et propres, des arrêts de bus aménagés, un personnel aimable ;
- etc.

1.1.3 Besoins de planification

Parallèlement au développement des réseaux de transport en commun, les niveaux de ressources impliquées (véhicules, conducteurs) augmentent et la concurrence s'intensifie sur un marché grandissant, générant de nouveaux besoins d'optimisation face à une planification de plus en plus complexe. Les critères de coût financier généralement rencontrés par les exploitants sont les suivants :

- taille de la flotte de véhicules ;
- kilométrage en charge ;
- kilométrage à vide ;
- salaires des conducteurs ;
- etc.

Ils représentent des critères d'influence majeurs sur le processus de planification, qui doivent être intégrés dans les outils d'optimisation sous forme d'objectifs ou de contraintes. Ceux-ci dépendent également du contexte concurrentiel.

1.1.4 Contexte concurrentiel

Le contexte concurrentiel du transport en commun par car ou bus peut être assez complexe. Selon que l'on se situe en milieu urbain ou interurbain, que le marché soit régulé ou dérégulé, les enjeux de la planification ne sont pas les mêmes. Les techniques mises en place seront également différentes selon que l'entreprise soit un petit exploitant ou fasse partie d'un grand groupe de transport.

Nous présentons ici les caractéristiques déterminantes des systèmes de transport routier de voyageurs.

Milieu urbain

Le réseau s'étend sur une zone géographique restreinte, à l'intérieur de laquelle la densité des lignes et des arrêts est forte.

Les lignes du réseau dessinent souvent un maillage à l'intérieur d'une agglomération, qui peut s'étendre de manière radiale dans sa périphérie proche.

La figure 1.1 présente à titre d'exemple le plan du réseau de transport en commun Tan de la ville de Nantes (44). Afin de relativiser la densité du réseau avec la superficie couverte, précisons que la ville s'étend sur 65 km² et sa communauté urbaine sur 523 km².

Les véhicules utilisés en milieu urbain sont les bus (autobus), qui comportent des places assises et des places debout. Il en existe divers types, avec des capacités différentes.

Dans les réseaux urbains comme interurbains, il existe de fortes différences de cadencement entre lignes majeures et secondaires. Généralement, les fréquences les plus faibles d'un réseau urbain sont celles des lignes qui desservent la périphérie. Ces fréquences se rapprochent des fréquences les plus fortes des lignes d'un réseau interurbain.

L'intérêt principal du cadencement dans un réseau urbain réside dans sa régularité, afin de minimiser l'attente maximale des usagers aux arrêts de bus. En effet, en milieu urbain, les usagers ont plutôt tendance à arriver aux arrêts de départ de leurs trajets sans vérifier les horaires au préalable. Ceci est lié à la combinaison de deux facteurs : les horaires observés peuvent différer de quelques minutes par rapport à l'horaire annoncé (congestion, feux...), et lorsque la fréquence est assez élevée, comme elle l'est en milieu urbain, l'attente se révèle au final assez courte. Dans ce cas, l'attente potentiellement évitée ne compense pas forcément l'effort de se renseigner sur les horaires.

Du fait de la fréquence de passage et de la densité élevée des lignes, les correspondances peuvent être enchaînées assez facilement ; et même si elles représentent toujours un obstacle au déplacement, les usagers tolèrent d'en effectuer plusieurs.

En ce qui concerne l'exploitation quotidienne des lignes et l'utilisation des ressources, le milieu urbain est caractérisé par quelques aspects spécifiques. L'aire de service étant restreinte, les dépôts et les terminus sont généralement peu éloignés les uns des autres, nécessitant des trajets à vide (aussi appelés haut-le-pied) assez courts. De plus, il est

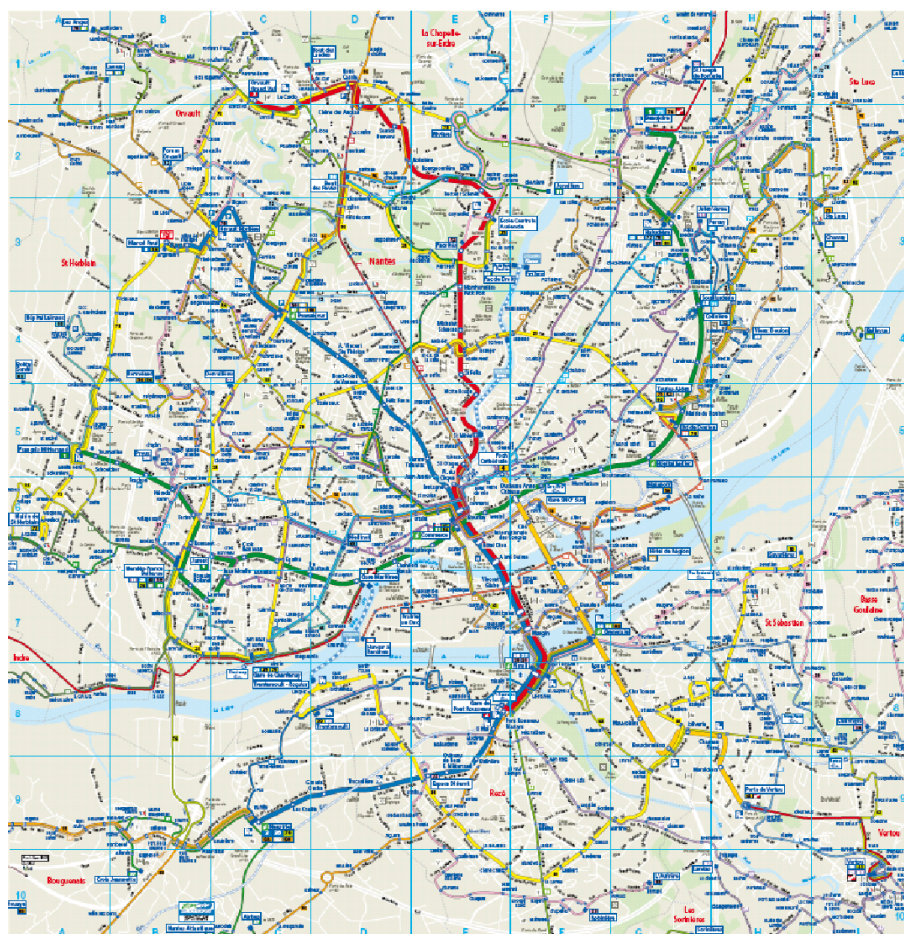


FIGURE 1.1 – Réseau urbain Tan (Nantes)

fréquent que les véhicules fassent des allers-retours sur une ligne pour la durée entière ou une partie de leur service. Cela évite tout trajet à vide lorsque la fréquence des trajets est suffisante pour pouvoir enchaîner un retour après chaque aller. Notons cependant que toutes les lignes n'ont pas des fréquences adaptées à ce type d'affectation véhicule, et que l'interligne (l'affectation successive d'un véhicule à des dessertes (ou "missions de transport") appartenant à des lignes différentes) peut permettre des gains notables en termes d'utilisation des ressources.

La plupart des réseaux urbains sont gérés par des exploitants privés bénéficiant de délégations de service public (voir infra).

Milieu interurbain

Les catégories comprises dans les transports routiers non urbains de personnes sont définies par la LOTI, Loi d'Orientations des Transports Intérieurs n°82-1153 du 30/12/82,

1.1 Développement du transport routier de voyageurs

dans le titre II, chapitre 3 :

- les services réguliers publics, y compris les services scolaires, définis comme services réguliers "à titre principal pour la desserte des établissements scolaires" ;
- les services à la demande ;
- les services privés ;
- les services occasionnels publics.

Dans ce manuscrit, nous nous concentrons sur les services réguliers publics.

Le réseau s'étend sur une zone géographique vaste (en général à l'échelle d'un département dans le cas de la France) ; la densité de ses lignes est relativement faible, et les arrêts espacés. La figure 1.2 présente à titre d'exemple le plan du réseau de transport en commun Lila du département Loire-Atlantique. Pour donner un ordre d'idée, la superficie de ce département est de 6815 km².



FIGURE 1.2 – Réseau interurbain Lila (44)

Les lignes du réseau présentent rarement une forme géométrique définie, l'objectif étant de lier quelques villes ou pôles d'attraction principaux entre eux, tout en desservant les villages intermédiaires de manière aussi directe que possible. Il est fréquent de ne voir qu'un arrêt par village, et que l'arrêt situé au pôle d'attraction corresponde à une zone intermodale, où les usagers peuvent passer du car au train ou au bus urbain.

Les véhicules utilisés en milieu interurbain sont les cars (autocars). Ils comportent uniquement des places assises, sont munis de ceintures de sécurité, ainsi que de compartiments à bagages situés sous l'habitacle. Il en existe de nombreux types, avec des capacités et des niveaux de confort variables.

L'intérêt du cadencement dans un réseau interurbain réside dans sa régularité, afin de minimiser l'attente maximale des usagers, et également dans sa lisibilité. Il peut en effet être pratique d'avoir des passages toutes les ·h03 et ·h43 par exemple, car c'est facilement mémorisable. Contrairement au milieu urbain, les usagers ont beaucoup plus tendance à se renseigner à l'avance sur les horaires de passage et à arriver aux arrêts du réseau pour l'heure prévue. Les fréquences étant plus faibles, l'attente engendrée par une arrivée "au hasard" pourrait être longue. Ces aspects de qualité du cadencement sont bien sûr à arbitrer avec d'autres considérations, telles que les correspondances.

Les correspondances nécessitent de grandes précautions quand elles impliquent des lignes à fréquence basse comme c'est souvent le cas en milieu interurbain. Rater une correspondance entre véhicules pourrait impliquer des temps d'attente longs pour les usagers concernés, un défaut de service très dommageable pour le réseau. En conséquence, les véhicules s'attendent souvent les uns les autres si besoin, ce qui peut par effet boule de neige perturber la suite des horaires de la journée. Une planification correcte des grilles horaires et des correspondances est donc cruciale au niveau interurbain. Notons également qu'il existe souvent des correspondances intermodales avec le train par exemple, ce qui nécessite une bonne synchronisation des horaires entre les modes.

Au niveau de l'exploitation quotidienne des véhicules, les trajets haut-le-pied sont plus longs du fait d'une zone géographique couverte beaucoup plus vaste, et souvent plus nombreux à cause de la différence importante de fréquence entre les trajets allers et retours sur une même ligne. Un modèle type de ligne interurbaine présente des fréquences intenses le matin en direction de l'agglomération centrale, et le soir au départ de cette agglomération vers les zones périurbaines. Il n'est donc pas toujours possible ni souhaitable pour un même véhicule d'enchaîner un aller avec un retour sur la même ligne.

En outre, la gestion des réseaux interurbains diffère selon que l'on se trouve en marché régulé ou dérégulé (voir infra).

Pour plus d'informations sur le transport interurbain, nous renvoyons à [Mermoud et Lartigau, 1998].

Marchés régulés

Dans les marchés régulés, le transport public est généralement la responsabilité et le monopole des autorités organisatrices locales, qui ont pour rôle d'organiser un service de qualité à coûts réduits.

En tant que service public et organisme politique, elles doivent prendre en compte un certain nombre d'objectifs sociaux, tels que l'inclusion des usagers captifs (la frange de la population qui n'a pas d'autre option que le transport public). Le service doit être fourni même s'il n'est pas financièrement profitable : l'objectif est alors plutôt de minimiser le déficit.

Dans ces marchés, les autorités organisatrices définissent les itinéraires des lignes du

réseau, ainsi que les fréquences, et bien souvent les grilles horaires. Ensuite, trois options se présentent :

- elles peuvent jouer un rôle de régie et opérer le réseau avec leur propre parc de véhicules et leurs conducteurs ;
- elles peuvent émettre des appels d'offre et sélectionner les transporteurs privés qui gagnent ainsi le droit d'opérer un ou plusieurs lots de lignes donnés ;
- elles peuvent utiliser une combinaison des deux options précédentes selon les lignes ou lots de lignes.

Les exploitants qui répondent aux appels d'offre sont des transporteurs privés qui disposent de leur propre flotte de véhicules, de leurs dépôts et de leurs conducteurs. Lors de leurs réponses aux appels d'offre, ils doivent proposer un devis correspondant au prix de leur prestation pour assurer l'ensemble des dessertes demandées par l'autorité organisatrice. Un certain nombre de critères peuvent expliquer les différences de montant proposés entre exploitants. Parmi ceux-ci :

- les différences de coûts fixe :
 - amortissement des véhicules,
 - amortissement des dépôts,
 - frais de maintenance,
 - salaires ;
- les différences de coûts variables / la rationalité de l'utilisation des ressources :
 - planification plus ou moins optimisée pour prendre en compte tous les coûts (trajets haut-le-pied, attente, etc.),
 - autorisation de l'interligne,
 - possibilité de combiner les dessertes demandées par l'autorité organisatrice avec d'autres missions propres à l'exploitant ;
- les différences de bénéfice net acceptable pour l'exploitant.

Une fois les appels d'offre émis, la marge de manœuvre est très faible pour les deux parties pour apporter des ajustements aux grilles horaires. Cependant, il suffit parfois de décaler une desserte de quelques minutes pour observer une diminution importante des coûts engendrés (cela peut arriver lorsque deux dessertes deviennent enchaînables par exemple).

Le processus de planification est ainsi principalement séquentiel en marché régulé, avec une séparation assez nette des rôles entre autorités organisatrices (responsables de la qualité de service) et exploitants privés (qui opèrent les lignes).

Marchés dérégulés

Dans les marchés dérégulés à l'inverse, chaque transporteur privé est responsable de l'intégralité de son processus de planification et dispose de toute marge de manœuvre pour déterminer et modifier les tracés des lignes, les grilles horaires et l'utilisation des ressources.

À cause des habitudes et d'une logique de planification par étapes stratégiques, tactiques et opérationnelles (voir Section 1.2), le processus initial est identique à celui des marchés régulés dans le sens où on commence par déterminer le tracé des lignes du réseau, puis les fréquences, les horaires et ensuite on crée les services (séquences de courses) véhi-

cules et conducteurs et les roulements conducteurs. Cependant, par la suite, il est beaucoup plus facile et courant de revenir sur les étapes précédentes de manière itérative.

Depuis le milieu des années 80, une série de privatisations et de politiques de dérégulation s'est mise en place dans de nombreux pays, où l'État se retire de ses responsabilités de transport public. Les gouvernements qui ont choisi la dérégulation misaient sur le fait que l'introduction de la concurrence améliorerait l'efficacité (avec des prix en baisse et une meilleure qualité), diversifierait les choix des usagers et réduirait les besoins de subventions.

En réalité, l'intensité de la compétition n'a pas forcément été un facteur d'amélioration qualitative. Selon les zones, on est progressivement revenu à une situation de monopole, privé cette fois, qui s'accompagne d'une augmentation des prix. Ailleurs, une coopération s'est développée entre exploitants, et dans les meilleurs scénarios, un service intégré a pu émerger. Cependant, même dans ce cas au final harmonieux, le temps d'adaptation est long avant d'arriver à l'équilibre et la période intermédiaire est chaotique pour les usagers. Les conséquences de la dérégulation en Grande-Bretagne, un des premiers pays à avoir privatisé son secteur des bus, ont été examinées par [White et Farrington, 1998].

La situation en France est sommairement la suivante :

- Les conseils généraux sont les autorités organisatrices responsables du transport interurbain au niveau du département. La plupart de ces réseaux sont exploités par des transporteurs privés, dont nous parlerons dans la section suivante.
- Les réseaux urbains sont pour la plupart exploités directement par un transporteur privé, qui bénéficie d'une délégation de service.

Petits exploitants et grands groupes de transport

En France, il existe 4 grands groupes de transport de voyageurs : Transdev, Keolis, Veolia Transport et RATP Développement.

Il y a quelques années, les petits exploitants assuraient la grande majorité des transports de voyageurs. La tendance est aujourd'hui au rachat de ces PME par des grands groupes de transport, qui se partagent l'exploitation de la quasi-totalité des réseaux urbains et d'une proportion grandissante des réseaux interurbains.

Cette évolution s'effectue en parallèle d'une "industrialisation" de la planification des transports, de plus en plus basée sur des outils de gestion et d'optimisation des réseaux.

Dans ce contexte de concurrence intense, le besoin en optimisation des réseaux et des ressources se fait croissant. Il est important de disposer d'outils performants et flexibles permettant de s'adapter aux problématiques propres aux diverses combinaisons de situations, marchés et entreprises.

1.2 Processus de planification

1.2.1 Étapes selon Ceder et Wilson

La mise en place de systèmes de transport en commun requiert une planification particulière, produisant plusieurs types de résultats :

1.2 Processus de planification

- les itinéraires et horaires commerciaux à destination du public ;
- les plannings des différents types de ressources impliquées (véhicules et conducteurs) à destination des exploitants.

[Ceder et Wilson, 1986] a formalisé le processus de planification du transport par autocar, isolant cinq étapes dans une logique séquentielle (voir Figure 1.3).

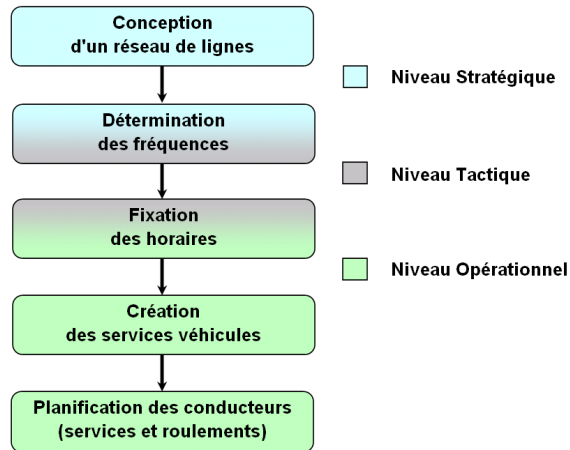


FIGURE 1.3 – Étapes de la planification

Le découpage présenté ici reflète le processus pratique et théorique classique, sur lequel se basent la plupart des travaux dans le domaine de la planification du transport, et la plupart des problématiques auxquelles doivent faire face les planificateurs au sein des groupes de transport. Chacune de ces étapes est détaillée individuellement dans la suite de ce chapitre.

Le découpage entre étapes des niveaux stratégique, tactique et opérationnel est flou car il peut varier en fonction du type de marché et/ou de milieu auquel appartient le réseau. Il existe une relation de dépendance très forte entre chacune des étapes, chacune se basant sur les données issues de la résolution du problème étudié à l'étape précédente et fournissant les données nécessaires à la résolution de l'étape suivante. Les étapes primaires portent ainsi une responsabilité d'autant plus forte, tant au niveau de la qualité de service que des coûts économiques impliqués.

La définition du réseau appartient au niveau stratégique de décision, car le tracé des lignes est un paramètre qui n'est remis en question que très rarement, du fait de son impact très lourd tant au niveau financier (si des modifications de l'infrastructure sont nécessaires) qu'au niveau du service aux usagers (dont la couverture par le réseau peut alors changer).

La définition des fréquences des lignes est une étape qui peut être partiellement intégrée à celle du tracé du réseau lors de la prise en compte de la réponse à la demande. Cependant, c'est un paramètre qu'il est plus facile d'adapter au fil du temps. On peut alors considérer que cette décision fait plutôt partie de l'étape tactique du processus. Son horizon de validité peut varier de la durée d'une saison à plusieurs années.

Les horaires sont quant à eux révisés très régulièrement, car ils peuvent prendre en compte, par exemple, les horaires variables des lignes de réseaux externes avec lesquels le réseau est en correspondance intermodale. On peut donc considérer que leur définition se situe entre les niveaux tactique et opérationnel.

La création des plannings véhicules et conducteurs est une étape opérationnelle. Elle est effectuée non seulement à chaque modification saisonnière des horaires mais également peut être remise en cause pour inclure des missions dites "occasionnelles" qui viennent compléter les plannings au jour le jour.

Le processus séquentiel exposé ici peut se voir modifié en réalité, par des sauts d'étapes (telle que la détermination des fréquences), des intégrations (services véhicules et conducteurs, comme nous le verrons dans la section 1.3), ou des allers-retours entre étapes.

Les trois premières étapes de ce processus sont celles qui déterminent la qualité de service offerte par le réseau de transport, en termes de temps de trajet et de correspondances notamment. Dans [Guihaire et Hao, 2008a] nous proposons une revue de littérature détaillée centrée sur ces étapes, et établissons une classification des travaux par problème traité et type de méthode de résolution employée. Devant la variété des dénominations utilisées dans la littérature pour identifier les problèmes traités, nous y proposons la terminologie illustrée dans la figure 1.4. Sur la trame centrale, on retrouve les étapes du processus séquentiel : Transit Network Design Problem (définition de la structure du réseau), Transit Network Frequencies Setting Problem (fixation des fréquences) et Transit Network Timetabling Problem (détermination des grilles horaires). En complément, des problèmes intégrés prennent en compte plusieurs de ces éléments : le Transit Network Design and Frequencies Setting Problem qui intègre les enjeux des deux premiers problèmes, le Transit Network Scheduling Problem qui gère à la fois les fréquences et les horaires de lignes, et enfin le Transit Network Design and Scheduling Problem qui regroupe toutes les phases du processus de planification responsables de la qualité de service au sein du réseau.

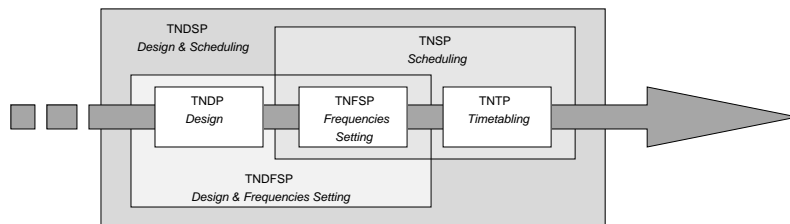


FIGURE 1.4 – Classification et terminologie des problèmes liés à la qualité de service dans le processus de planification

Dans les chapitres suivants, nous nous focalisons sur l'étape de création des horaires, ainsi que sur celle de création des services véhicules. La combinaison de ces deux problèmes au sein d'une approche intégrée constitue le problème de graphissage.

1.2.2 Création du réseau

Définition

Ce problème consiste à déterminer l'ensemble des lignes en positionnant l'ensemble des arrêts qui les constituent (y compris les terminus) et en liant ceux-ci de manière ordonnée par des itinéraires. Cette étape peut parfois inclure le positionnement des dépôts, seule infrastructure nécessaire au fonctionnement du système, les bus circulant généralement sur des routes pré-existantes et partagées avec les véhicules privés (automobiles, motos, vélos).

Enjeux

Deux types de données entrent en compte dans la résolution de ce problème. Ils sont relatifs à deux aspects du processus : les coûts projetés pour l'exploitant et la qualité de service. Les coûts sont liés au nombre de lignes du réseau ainsi qu'à la longueur totale des lignes, deux paramètres qui vont influencer fortement par la suite le nombre de ressources (véhicules et conducteurs) nécessaires pour opérer le système.

À ce niveau du processus de planification, la qualité de service correspond à la satisfaction de la demande des usagers. Cette demande est considérée insatisfaite lorsque l'origine ou la destination réelle de l'usager est trop éloignée du réseau (couverture spatiale), ou lorsque le meilleur trajet pouvant répondre à la demande n'est pas assez direct (par exemple, il demande plus de deux correspondances). Un paramètre de conservation de tracés pré-existants, pour des raisons politiques, peut également entrer en ligne de compte :

- Couverture spatiale :

La couverture spatiale du réseau mesure le pourcentage de la demande estimée qui peut être servie par le réseau. Différents modes de calcul sont possibles [Spasovic *et al.*, 1993]. Les critères principaux à prendre en compte sont la longueur des lignes, la densité du réseau, la distance interarrêts et la distance interlignes [Murray *et al.*, 1998; Benn, 1995]. Ces valeurs divergent fortement selon que l'on parle de milieu urbain ou interurbain. En milieu interurbain, la longueur des lignes ainsi que les distances interarrêts et interlignes sont souvent grandes alors que la densité est relativement faible, et inversement en milieu urbain. En milieu urbain, la norme généralement acceptée indique que les personnes vivant à moins de 400-500 mètres d'un arrêt de bus sont desservies par le réseau, alors que celles ayant des domiciles plus éloignés ne sont pas couvertes. Des plans tels que celui de [Murray *et al.*, 1998] visent une couverture spatiale de 90%.

- Caractère direct des trajets :

Dans l'idéal, chaque demande de trajet devrait être satisfaite par une possibilité de trajet impliquant un minimum de correspondances, de kilométrage à bord et de distance à pied en début et fin de trajet. Afin d'évaluer ces valeurs, il est nécessaire de résoudre le problème d'affectation des itinéraires aux demandes des usagers. Celui-ci consiste à définir, pour chaque demande de trajet, les points d'entrée et de sortie du réseau, ainsi que l'ensemble des lignes et correspondances à utiliser. Cette affectation se fait généralement de manière à prendre en compte des objectifs de plus court chemin et de nombre minimal de correspondances [Desaulniers et Hickman, 2007].

Données principales

- La topologie, qui se compose des routes, des zones d'arrêt de bus possibles, et des terrains pouvant être lieu d'implantation de dépôts.
- Les matrices origine-destination, qui recensent le nombre de demandes de trajet par couple origine-destination et pour chaque tranche horaire de demande homogène. La précision de ces matrices dépend notamment de la taille de la zone correspondant à chaque "origine" et à chaque "destination", de la découpe des périodes horaires, et des conditions d'enquête. Celles-ci recouvrent la fréquence des enquêtes et la représentativité de l'échantillon, notamment l'inclusion des personnes dont les demandes de trajet ne sont pas couvertes par le réseau pour l'instant (usagers potentiels).
- Les contraintes économiques.

Travaux de référence

[Murray, 2003] étudie deux aspects du problème. L'un se focalise sur le repositionnement des arrêts de bus dans un réseau existant dans le but de minimiser leur nombre. L'autre concerne la localisation des arrêts de bus dans le contexte d'une extension pour maximiser l'accès au réseau. Notons que plus la fréquence des arrêts est élevée sur une ligne, plus l'accessibilité est élevée, mais plus la vitesse de parcours est faible.

Les travaux suivants sont relatifs au problème général de définition des lignes du réseau.

[Patz, 1925] est la référence la plus ancienne concernant le problème de définition du réseau par méthode heuristique. Au début de la procédure, le réseau contient une ligne par paire origine-destination, lignes qui sont itérativement supprimées en fonction des niveaux d'occupation des véhicules et du caractère direct des trajets qu'elles permettent. À l'inverse, [Mandl,] propose une approche du problème qui se base sur un réseau vide et ajoute des lignes progressivement en tenant compte des objectifs de satisfaction de la demande. Dans le même esprit constructif, [Pape *et al.*, 1992] se base sur l'objectif de nombre de trajets directs satisfaits et définit le concept de "corelines", parties de lignes très demandées. Ces corelines servent de base pour dessiner heuristiquement un réseau dans un objectif complémentaire de couverture spatiale.

[Zhao et Gan, 2003; Zhao et Ubaka, 2004; Zhao et Zeng, 2006] présentent des approches du problème basées sur des métaheuristiques dans un objectif de satisfaction de la demande. Ils utilisent le concept de "key nodes" (arrêts d'importance particulière) pour élaborer de nouveaux voisinages.

[Xiong et Schneider, 1993] propose une méthode évolutionnaire (cumulative genetic algorithm) pour traiter le problème de définition du réseau. [Chakroborty et Dwivedi, 2002] utilise également une méthode évolutionnaire basée sur le jeu de critères suivant : durée du trajet à bord, taux de trajets directs, trajets avec une correspondance, trajets avec deux correspondance, et taux de demandes non satisfaites.

[Yu *et al.*, 2005] présente une approche de colonie de fourmis qui considère les objectifs suivants : minimum de correspondances et de nombre de passagers par unité de longueur des lignes, ainsi que des contraintes impliquant le caractère direct des lignes.

La définition des lignes du réseau est une étape fondamentale de la planification des transports publics. En effet, les itinéraires sont rarement modifiés dans la vie d'un réseau. Ce problème se situe au niveau stratégique, avec une durée d'application de 5 à 15 ans. L'étape suivante de la planification est la détermination des fréquences sur les lignes.

1.2.3 Création des fréquences

Définition

Ce problème consiste à affecter des fréquences aux lignes du réseau, par direction et par période horaire. En conséquence, le nombre de dessertes par ligne est grossièrement défini à cette étape. Une notion très liée est celle de cadencement, qui se calcule comme l'inverse de la fréquence sur une période donnée. Le cadencement correspond à l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux dessertes successives de la ligne.

Enjeux

Deux types de données entrent à nouveau en compte dans la résolution de ce problème : les coûts projetés pour l'exploitant et la qualité de service.

Les coûts sont liés à la distance en charge cumulée approchée (nombre de dessertes de lignes multiplié par leur temps de trajet), et donc au nombre estimé de véhicules nécessaires.

De plus, dans la perspective des usagers, le cadencement doit s'adapter au niveau de demande par ligne et tranche horaire afin d'éviter la surcharge des véhicules et d'assurer une couverture temporelle suffisante. La couverture temporelle définit l'amplitude sur laquelle un service est assuré (intervalle entre la première et la dernière desserte de la journée). Ce critère est particulièrement intéressant par rapport aux usagers captifs (ceux qui n'ont pas d'autre option de transport) afin de savoir sur quelle plage horaire ils peuvent se déplacer, indépendamment du temps d'attente et de trajet qui sera associé. De plus, on peut inclure dans ce critère le fait d'assurer une fréquence minimum pendant toute période afin de minimiser les temps d'attente maximaux.

Données principales

- Réseau de lignes : il est constitué d'un ensemble de lignes, et par conséquent de points d'arrêts, de terminus et de zones de correspondances. Pour chaque ligne, il est utile de disposer des temps de trajet par tranche horaire.
- Demandes de trajets : ce sont les matrices origine-destination qui représentent la demande quantitativement par paire origine-destination.
- Flotte de véhicules : sa taille peut contraindre le problème en limitant le nombre de dessertes qu'il est possible d'affecter à chaque ligne.

Travaux de référence

Les premières approches [Scheele, 1980; Furth et Wilson, 1982] puis [Constantin et Florian, 1995] modélisent le problème sous forme d'un programme non linéaire et présentent

des méthodes mathématiques pour la résolution du problème d'affectation de fréquences aux lignes. Elles affectent un nombre optimal de véhicules par ligne sous contrainte de taille de flotte à l'échelle du réseau. Certaines résolvent simultanément le problème d'affectation des fréquences aux lignes et des trajets aux demandes [Scheele, 1980]. Toujours parmi les approches mathématiques, [Salzborn, 1980] analyse le problème d'un système de bus intermodal avec pour objectif la minimisation de la taille de la flotte et du temps d'attente des usagers. Le problème étudié est très simplifié.

[Han et Wilson, 1982] considère également une flotte de taille donnée et résout de manière heuristique cette fois le problème d'allocation des véhicules aux différentes lignes du réseau. Dans un premier temps, des fréquences minimales sont affectées à chaque ligne, puis celles-ci sont augmentées jusqu'à utilisation complète du parc de véhicules. À nouveau heuristiquement, [Gao *et al.*, 2004] propose une méthode à deux niveaux dont le premier est basé sur l'affectation de fréquences en fonction du temps de trajet impliqué pour les usagers et le deuxième considère le problème d'affectation des trajets à ces mêmes usagers. Une particularité de l'approche est de cibler particulièrement le problème sous l'aspect ajustement des fréquences dans un réseau pré-existant.

Très récemment, [Park, 2005] propose des méthodes génétiques mêlées à des outils de simulation pour traiter les problèmes d'affectation des fréquences. Deux cas sont étudiés dans cette étude, basés sur des horaires déterministes puis stochastiques.

La définition des fréquences concerne la partie tactique de la planification. Elle est suivie de la création des grilles horaires.

1.2.4 Création des horaires

Définition

Ce problème consiste à définir, pour chaque ligne du réseau, la grille horaire commerciale qui sera distribuée au public. Cette grille horaire est variable selon les saisons et les types de jour, afin de s'adapter aux variations de la demande. Elle comporte un horaire de départ initial pour chaque desserte de ligne, et des horaires de passage à chacun des arrêts successivement desservis. Dans ce manuscrit, nous utilisons indifféremment les termes de course et de desserte.

Enjeux

Comme chaque étape de la planification du transport, celle de détermination des horaires comporte des implications multiples. D'une part, elle influence le nombre de véhicules et conducteurs qui vont être nécessaires à l'opération du réseau, car seule la fixation des horaires (par opposition à l'affectation des fréquences) permet de définir les enchaînements de courses possibles. D'autre part, elle détermine les possibilités de correspondances internes et intermodales et permet de connaître précisément les temps de trajet associés à chaque demande de trajet. C'est uniquement après cette étape que le problème d'affectation des trajets aux demandes peut être résolu en connaissance de toutes les données. Enfin, il est

également possible de prendre en compte des exigences de conservation des horaires de dessertes existantes.

Données principales

- Le réseau de lignes, avec les temps de trajet associés, ainsi que les points de correspondances.
- Les fréquences ou ordres de fréquence par ligne.
- Les lieux et horaires d'arrivée et de départ des modes en connexion avec le réseau.

Travaux de référence

Dans le cadre séquentiel défini par [Ceder et Wilson, 1986], la majorité des travaux considèrent ce problème sous l'aspect coordination des correspondances. Deux approches coexistent : dans la première approche, des véhicules de différentes lignes sont programmés pour être à l'arrêt simultanément sur certaines zones de correspondance, par exemple par l'ajout de temps d'attente intermédiaire aux arrêts de bus. Dans la deuxième approche, les heures de départ des lignes sont déterminées de manière à minimiser une fonction du temps de correspondance global des usagers [Bookbinder et Désilets, 1992].

Une possibilité particulière pour coordonner les correspondances est de normaliser les cadencements de telle manière que les véhicules de différentes lignes arrivent simultanément aux zones de correspondances qui les lient. Quand les cadencements sont du même ordre, il est possible de les harmoniser en une valeur intermédiaire unique. À l'inverse, quand les cadencements sont d'échelles suffisamment différentes, une piste est de les rapprocher de valeurs multiples les unes des autres [Ting et Schonfeld, 2005].

Une représentation récurrente du problème de définition des horaires est celle d'un problème de semi-affectation quadratique [Klemt et Stemme, 1988; Daduna et Voss, 1995; Bookbinder et Désilets, 1992]. [Klemt et Stemme, 1988] propose une méthode heuristique constructive qui programme les dessertes les unes après les autres relativement à la synchronisation des correspondances.

Utilisant également des modèles basés sur des lignes aux fréquences prédéfinies, [Daduna et Voss, 1995; Jansen *et al.*, 2002] proposent des méthodes de résolution à base de métaheuristiques dans l'objectif de minimiser le temps d'attente des usagers.

[Bookbinder et Désilets, 1992], qui base également son approche sur une modélisation par QSAP, propose quant à lui une combinaison de méthodes de simulation et d'optimisation pour prendre en compte l'aspect stochastique des temps de trajet des véhicules.

Enfin, [Chakroborty *et al.*, 1995; Chakroborty *et al.*, 1997; Deb et Chakroborty, 1998] et [Cevallos et Zhao, 2006] préfèrent l'approche génétique. Les premiers s'attaquent à des cas simples et à de petits réseaux avec des approches prenant en compte un grand nombre d'objectifs et contraintes, tandis que le dernier s'attaque à un réseau important avec une approche simplifiée.

La définition des horaires concerne la partie opérationnelle de la planification et apporte les dernières informations déterminant le niveau de qualité de service. C'est sur cette étape que nous nous concentrons dans les chapitres suivants.

L'étape suivante, la création des services véhicules, s'attache uniquement aux considérations économiques.

1.2.5 Création des services véhicules

Définition

Ce problème consiste à définir les plannings des véhicules avec, en filigrane, la taille de la flotte nécessaire. Chaque véhicule se voit ainsi attribuer une séquence de courses commerciales (les dessertes) et de courses non-commerciales (les trajets haut-le-pied) qui vont définir l'ensemble de son itinéraire quotidien de manière chronométrée. Chaque planning peut varier par type de jour et selon la saison.

Enjeux

Cette étape est déterminante pour les coûts subis par l'exploitant. Par contre, elle n'a aucune répercussion sur le niveau de qualité de service. L'aspect financier est déjà multifacette en lui-même. Il inclut :

- Les coûts fixes :

Chaque véhicule représente un investissement très conséquent dans le budget des exploitants. Le coût relatif au nombre de véhicules requis, par type, est le coût principal lié à cette étape.

Le kilométrage en charge est également un coût fixe dans le sens où les courses doivent toutes être servies quoi qu'il arrive.

- Les coûts variables :

Le kilométrage à vide des véhicules représente une valeur à minimiser, du fait principalement du coût du gasoil. Il est constitué des haut-le-pied qui lient les courses entre elles (pour rejoindre le lieu de début de la course suivante à partir du lieu d'arrivée d'une course donnée), ainsi que des haut-le-pied liant les courses au dépôt en début et en fin de service.

Les autres coûts variables à minimiser sont les temps dits improductifs tels que les temps d'attente.

Données principales

- La flotte de véhicules, avec ses caractéristiques (nombre de véhicules par type, caractéristiques de chaque type).
- L'emplacement des dépôts, ainsi que leur capacité.
- Le détail des courses à effectuer, avec les lieux et horaires de début et de fin, ainsi que le type de véhicule ou les caractéristiques requises.
- Les temps de trajet associés aux trajets à vide liant les terminus des dessertes.

Travaux de référence

Il existe plusieurs variations du problème avec des niveaux de complexité associés. Les principales différences selon les réseaux portent sur le nombre de dépôts et de types de véhicules de la flotte. Pour plus de détails sur ce problème, nous renvoyons à [Bunte *et al.*, 2006; Laurent et Hao, 2009a].

Dans le cas monodépôt, la flotte est homogène et située au même endroit (ce qui est important pour les calculs de temps de trajet à vide). De nombreuses méthodes exactes et modèles coexistent pour traiter ce problème. Parmi eux, [Paixão et Branco, 1987] assimile le problème à un problème de quasi-affectation, en laissant de côté les liaisons avec le dépôt. Ce type de problème peut être résolu à l'aide d'un algorithme hongrois, ou d'un algorithme par enchères [Freling *et al.*, 2001] par exemple.

Le cas multidépôt est plus complexe. Lorsque la flotte est hétérogène, on peut considérer être dans le cas multidépôt même si tous les véhicules sont rattachés à un garage unique. Le problème se complexifie au fur et à mesure que le nombre de dépôts augmente.

D'un point de vue heuristique, il existe deux types d'approches usuelles :

- créer les services sans tenir compte des dépôts dans un premier temps, puis les affecter aux dépôts ;
- affecter les courses aux dépôts puis résoudre un problème monodépôt à l'intérieur de chacun.

Des modélisations ont été proposées sous forme de problème monoflot [Carpetano *et al.*, 1989; Fischetti *et al.*, 2001], multiflot [Löbel, 1998; Kliwer *et al.*, 2006], partition d'ensemble [Oukil *et al.*, 2007] ou problème de satisfaction de contraintes et d'optimisation [Laurent et Hao, 2009b].

Les services véhicules constitués lors de cette étape de la planification servent de base à l'étape suivante, la planification des conducteurs.

1.2.6 Création des services conducteurs

Définition

Ce problème consiste à définir les plannings quotidiens pour chaque type de conducteurs, et ainsi implicitement le nombre de conducteurs nécessaires. Les conducteurs sont catégorisés selon leur type de contrat, déterminant des conditions de travail différentes. Le problème consiste à découper les services véhicules en tronçons d'habillage puis à combiner ces tronçons entre eux pour créer les services conducteurs. Chaque service consiste ainsi en une suite ordonnée de trajets commerciaux et trajets à vides (issus des services véhicules), commençant et terminant au même dépôt et incluant ou non des pauses et coupures.

Enjeux

De même que l'étape précédente, la création des services conducteurs n'impacte pas la qualité de service.

Les contraintes peuvent concerner les bornes sur les éléments suivants : l'amplitude, le temps de travail effectif, le temps de conduite, les heures de début et de fin de service,

le nombre de vacations par conducteur, ou encore le nombre de contrats par type. Les objectifs prennent en compte la minimisation du nombre de services générés, du temps payé, du coût total des services, ou encore l'équilibrage de la charge de travail.

Données principales

- La liste des types de contrats de travail avec leurs caractéristiques.
- Les services véhicules à accomplir avec les points de relève associés.
- Les bornes à prendre en compte pour l'application des contraintes.

Travaux de référence

Le problème de création des services conducteurs est généralement traité par programmation mathématique. Deux types d'approches coexistent.

Le premier type [Rousseau et Blais, 1985; Blais *et al.*, 1975; Lessard *et al.*, 1989; Wren et Smith, 1988] se déroule en deux phases consécutives. Dans un premier temps, un problème de partitionnement génère l'ensemble des services conducteurs possibles, en découpant les services véhicules au niveau des points de relève et en combinant les blocs créés. Dans un deuxième temps, un problème de recouvrement sélectionne le sous-ensemble qui permet de satisfaire les contraintes tout en minimisant les coûts générés. L'inconvénient de cette méthode est la lourdeur du processus en termes de ressources de calcul et de stockage, qui ne permet pas de s'attaquer à des problèmes de grande taille.

Le deuxième type d'approche a recours à une méthode de type génération de colonnes [Desrochers et Soumis, 1989]. Il permet de s'affranchir d'une partie des limitations attribuées au premier type de méthode en générant les services au fur et à mesure de manière judicieuse.

Outre ces deux types d'approche, [Paixão, 1990] introduit la programmation dynamique, et les algorithmes génétiques sont utilisés pour la première fois par [Clement et Wren, 1995]. [Lourenco *et al.*, 2001] propose une approche basée sur les métaheuristiques dans le cadre d'une approche multiobjective. [Kroon et Fischetti, 2001] présente une procédure de génération de colonnes dynamique. Pour une revue plus détaillée, nous nous référons à [Ceder, 2007].

L'étape qui conclut le processus de planification peut alors être réalisée : la génération des roulements, qui se base sur les résultats fournis par l'étape de création des services conducteurs.

1.2.7 Création des roulements conducteurs

Définition

Ce problème consiste à affecter une série de services conducteurs à chaque conducteur sur une période donnée pouvant aller jusqu'à l'année. Cette affectation doit prendre en compte un grand nombre de règles sociales afin de créer des plannings réalisables tout en minimisant les coûts induits, *i.e.* en adaptant les roulements par rapport aux types de

contrats, et en minimisant le nombre de conducteurs nécessaires. Ce problème est également connu sous le nom d'"habillage".

Enjeux

L'objectif principal ici est la rentabilité financière, étant donné que les salaires des conducteurs représentent une des dépenses principales des exploitants. Il est donc important d'utiliser au mieux les ressources selon les types de contrat.

L'aspect social de la planification est bien évidemment une considération d'importance prioritaire dans ce processus. À ce titre, il entre en partie dans les objectifs, mais plus souvent et en plus grande partie dans les contraintes du problème, en fonction des règles définies dans les contrats individuels, les règles de l'entreprise et les conventions collectives. Les contraintes sociales peuvent inclure :

- une limite haute de temps de travail effectif ;
- un nombre minimal de jours de repos dans une fenêtre glissante ;
- une quantité minimale de repos par unité de temps ;
- une durée minimale du repos entre deux services ;
- un nombre maximal de dimanches travaillés par an ;
- un nombre maximal d'heures supplémentaires annuelles ;
- la disponibilité du conducteur ;
- un nombre maximal de vacances ;
- la connaissance du service par le conducteur ;
- etc.

Les objectifs quant à eux incluent souvent :

- le nombre de conducteurs (à minimiser) ;
- le nombre de services non affectés (à minimiser) ;
- la continuité de service (à maximiser) ;
- la charge de travail (à équilibrer entre les conducteurs) ;
- etc.

Données principales

- La liste des contrats de travail avec leurs caractéristiques, ainsi que l'ensemble des règles à appliquer.
- La liste des services conducteurs.

Travaux de référence

La littérature sur le problème de roulement des personnels (crew rostering) au sens large est abondante. [Ernst *et al.*, 2004] présente une importante revue de littérature sur le sujet, abordant les approches mathématiques, heuristiques et métaheuristiques du problème.

Cependant, assez peu d'études portent sur le problème plus précis de roulement des conducteurs de bus. [Carrara *et al.*, 1984; Bianco *et al.*, 1992; Catanas *et al.*, 1995; Caprara *et al.*, 1998] basent leurs approches sur des modèles mathématiques. [Sodhi *et al.*, 2004; Ceder, 2007] présentent des méthodes heuristiques. Très récemment, [Moz *et*

al., 2006] propose un modèle bi-objectif (répartition des heures supplémentaires et nombre de conducteurs) et deux heuristiques évolutionnaires.

Cette étape constitue la dernière étape du processus de planification. Ensuite, lorsque les résultats des étapes précédentes sont remis en question, le processus peut recommencer pour toutes les étapes suivantes de manière itérative.

1.3 Intégration d'étapes

Dans l'idéal, une intégration totale des étapes du processus de planification permettrait d'obtenir, sous réserve de ressources de calcul suffisantes, des résultats globalement meilleurs en s'affranchissant des limitations imposées par les étapes successives du processus séquentiel. En effet, chaque étape définit des données et contraintes pour les suivantes, bornant ainsi les résultats qu'elles peuvent fournir.

Une intégration totale des étapes (voir Figure 1.3) fournirait uniquement une solution adaptée aux paramètres de l'instant t où elle est réalisée. Or, d'une part, pour un réseau de lignes donné, les horaires vont être modifiés très souvent (au moins deux fois par an), il n'est donc pas forcément pertinent d'optimiser le tracé des lignes du réseau en fonction des horaires qui vont s'y appliquer sur une période unique. D'autre part, la fréquence de remise en question des différents composants du système de transport (tracé, fréquences, horaires, plannings véhicules, plannings conducteurs) n'est pas la même selon le composant en question. Aussi, un processus totalement intégré n'est pas pertinent lorsque seul un sous-ensemble d'étapes est à ré-optimiser.

Cependant, il peut être utile d'intégrer à chaque étape de la planification, un ensemble de contraintes et d'objectifs relatifs aux étapes adjacentes. Les progrès en termes de puissance de calcul, de modélisation et de résolution permettent maintenant de s'attaquer à des problématiques plus larges que les étapes individuelles de la figure 1.3.

Le challenge consiste alors à définir de bons modèles qui vont permettre de répondre à chaque problématique de manière adaptée et valide dans la durée.

L'intégration d'étapes la plus complète du processus à notre connaissance est celle développée par [Fleurent *et al.*, 2004], qui considère des éléments relatifs à la détermination des fréquences, des horaires et des services véhicules. On regrette cependant le peu de détails fournis quant à la méthode de résolution employée dans cet effort.

1.3.1 Fréquences et horaires

Les étapes de fixation des fréquences et des horaires peuvent être intégrées dans certains cas, principalement lorsque l'importance accordée à la synchronisation des correspondances est grande, en comparaison avec la régularité du cadencement tout du moins. L'aspect "régularité des fréquences" peut alors être limité dans un premier temps à une contrainte de couverture temporelle minimale, en imposant une fréquence minimale par ligne et par période horaire. Ensuite, le planificateur peut ajouter autant de dessertes qu'il le souhaite en combinant les objectifs de coordination des correspondances, de régularité du cadencement et de quantité de ressources mobilisées.

Dans la littérature, [Koutsopoulos *et al.*, 1985; Rapp et Gehner, 1976; Ceder *et al.*, 2001; Eranki, 2004] travaillent sur ce problème en accordant une place importante à l'objectif de coordination des correspondances.

[Ceder, 2003] propose une étude assez représentative du problème en définissant trois procédures pour fixer simultanément fréquences et horaires. L'objectif principal est de satisfaire la demande de trajets. Les méthodes proposées permettent de gérer un ensemble de périodes horaires (de demande homogène) ainsi que le délicat problème des transitions entre périodes.

1.3.2 Horaires et services véhicules

Intégrer l'étape de fixation des horaires avec l'étape de création des services véhicules est justifiable par leur appartenance commune possible au niveau de décision opérationnel et par l'influence directe de la grille horaire sur le nombre de véhicules nécessaire.

Une première approche peut être la prise en compte, dans le problème de création des horaires, de contraintes sur le nombre de véhicules. C'est ce que propose [Castelli *et al.*, 2004]. Une solution plus satisfaisante peut être la prise en compte d'objectifs portant sur la taille de la flotte. [Chakroborty *et al.*, 2001] propose ainsi une étude basée sur un réseau simplifié qui intègre des objectifs appartenant initialement aux deux étapes séquentielles. [Fleurent *et al.*, 2004] fait également mention d'une approche intégrée, sans détailler la méthode de résolution utilisée.

L'intégration de ces deux étapes constitue ce que l'on appelle en français le graphissage. Nous étudions deux versions de cette problématique intégrée aux chapitres 3 et 4.

1.3.3 Services véhicules et services conducteurs

L'intégration des étapes de définition des services véhicules et conducteurs est assez intuitive. Ces deux étapes se situent au même niveau de décision, opérationnel, et sont réalisées à la même fréquence, l'une immédiatement après l'autre y compris dans le cadre du processus séquentiel. Il n'y a donc pas d'incompatibilité temporelle à les unir. Il est particulièrement intéressant d'utiliser cette intégration dans un réseau où les lieux de changement possible de conducteur (les points de relève) sont éloignés les uns des autres [Gaffi et Nonato, 1999] et dans le cas où les conducteurs ne sont pas autorisés à changer de véhicule en cours de journée. Cependant, cette intégration est rendue délicate par le fait que les deux problèmes pris individuellement sont NP-difficiles.

[Freling *et al.*, 1995; Haase et Friberg, 1999] proposent des approches intégrées pour le cas monodépôt. [Laurent et Hao, 2008] traite le cas intermédiaire d'une flotte hétérogène et un seul dépôt. Enfin, [Gaffi et Nonato, 1999; Huisman *et al.*, 2005; Steinzen *et al.*, 2007] s'attaquent au cas multidépôt.

Pour une revue plus complète, nous renvoyons à [Laurent, 2008; Huisman *et al.*, 2005].

1.4 Comparatif des modes de transport en commun

Nous présentons dans cette section les raisons qui font que les modèles et méthodes applicables à certains modes de transport ne le sont pas à d'autres. Dans le monde des transports en commun, les modes se distinguent par un ensemble de critères (distances parcourues, couverture, type de véhicules, infrastructure, etc.) mais partagent également des caractéristiques communes.

Nous voyons ici dans quelle mesure le processus de planification exposé dans la section précédente peut s'appliquer à ces modes de transport et en quoi leurs problématiques divergent. Ce comparatif n'a pas vocation à être exhaustif mais à mettre en relief les différences entre contraintes de planification selon les modes de transport. Nous n'exposons ici que quelques uns des plus importants.

1.4.1 Avion

- Création du réseau : les aéroports servent à la fois d'arrêts et de dépôts. Ce sont des infrastructures très lourdes, et dont l'emplacement ne peut être remis en question. Il n'y a pas d'infrastructure à construire entre les arrêts, et les lignes peuvent être relativement facilement modifiées tout en restant à l'intérieur des couloirs aériens.
- Création des fréquences : la problématique du cadencement est beaucoup moins importante, en particulier l'accent porte moins sur la régularité à l'intérieur d'une même journée.
- Création des grilles horaires : les contraintes de capacité sont très fortes, les places étant souvent numérotées et réservées. Au niveau de la synchronisation, les correspondances intermodales ne sont pas ou peu prises en compte. Les correspondances intramodales sont par contre très importantes.
- Création des services véhicules : la planification des avions est en général divisée en deux parties : l'affectation des avions et la création des rotations. L'horizon de planification du premier est typiquement d'une saison, alors qu'il est d'une semaine pour le deuxième. Par opposition, celui des bus est généralement d'une journée. Les contraintes de capacité sont très fortes, les places étant en nombre limité. L'horizon de planification est également plus long que pour les bus. Les temps de maintenance comme les trajets en charge sont plus longs que pour les bus. Sur les longues distances, il faut prévoir des pauses obligatoires pour reprendre du kérosène.
- Création des services et roulements de personnel : le processus de planification des personnels navigants est divisé en trois étapes : création des services (duty scheduling, en anglais), construction de rotations d'équipage (crew pairing), puis affectation du personnel navigant (crew rostering). En raison des distances, temps de trajet, et fonctionnement global du réseau aérien, l'horizon de planification est en général plus long que la journée. Par contre, on y trouve moins d'éléments que dans les services des conducteurs de bus. Plusieurs types de personnels sont également nécessaires à bord. Cependant, leur planification peut généralement être réalisée indépendamment.

1.4.2 Train

- Création du réseau : le réseau de lignes est une infrastructure utilisée uniquement par les trains. Sa création est à la fois complexe (acquisition des terrains...), longue et onéreuse. Les lignes ne sont donc quasiment jamais remises en question une fois créées.
- Création des fréquences et des grilles horaires : dans le milieu ferroviaire, ces deux étapes sont intimement liées en raison de l'importance particulière que revêt le cadencement. Il est fréquent d'utiliser des horaires facilement identifiables (un départ de la ville A vers la ville B à toutes les 13 par exemple). De plus, les horaires périodiques sont très souvent utilisés. Les correspondances intermodales ne sont pas ou peu prises en compte, par contre l'accent est mis sur les correspondances entre trains, notamment entre trains de différents niveaux (TER et TGV par exemple). Des contraintes sont également à prendre en compte par rapport au nombre de voies à se partager. Une distance de sécurité entre trains est également à respecter, il faut prendre en compte les vitesses très variables entre types de train, et enfin les gares ne disposent que d'un nombre de quais limité pouvant accueillir les trains simultanément.
- Création des services véhicules : les contraintes de capacité sont très fortes, particulièrement dans les trains à places réservées tels que les TGV. Des contraintes de maintenance plus importantes que dans les bus sont également à prendre en compte (livraison pour les voitures restaurants, entretien des équipements sanitaires, entretien mécanique supplémentaire du fait des longues distances). Enfin, les trains ne se trouvent pas systématiquement au même endroit le matin et le soir comme les bus, ceci étant à nouveau lié au fait que les horizons de planification peuvent être plus longs que la journée dans le milieu ferroviaire.
- Création des services et roulements de personnels : plusieurs types de personnels sont requis dans chaque train, ce qui implique une complexification de la planification des personnels par rapport au transport par bus. Selon les caractéristiques du réseau, l'horizon de planification peut être plus long que celui appliqué en transport routier. Enfin, les règles sociales et conventions collectives sont propres à chaque mode de transport.

On constate qu'il existe, dans le milieu ferroviaire, un certain nombre de contraintes additionnelles par rapport au milieu des bus et cars, ce qui rend le problème généralement plus complexe.

1.4.3 Métro et tramway

- Création du réseau : les infrastructures en jeu sont longues et onéreuses à mettre en place, ceci étant lié au fait que le réseau est utilisé par un seul mode de transport. Leur remise en question une fois construits est rarissime.
- Création des fréquences et des grilles horaires : les lignes de métro et de tramway ont souvent des fréquences beaucoup plus élevées que les cars ou bus urbains, sans parler des trains et des avions. Aussi, il est fréquent de voir sur les grilles horaires de ces modes de transport qu'aux heures de pointe il y a un passage toutes les X minutes,

sans préciser davantage les heures de passage. En raison de ces fréquences élevées, il n'y a pas beaucoup d'intérêt à synchroniser les correspondances. Par contre, en période creuse, on se rapproche des objectifs trouvés dans les systèmes de bus urbain pour cette étape. Notons quand même qu'on retrouve ici des contraintes d'espacement minimal entre les véhicules.

- Création des services véhicules : en raison des fréquences importantes dans ces systèmes, l'interligne est assez rare car inutile, les véhicules pouvant enchaîner les allers et retours sur la même ligne. Les véhicules sont d'ailleurs souvent équipés spécifiquement en fonction de leur ligne attitrée (panneaux fixes indicateurs des arrêts par exemple).
- Création des services et roulements conducteurs : les règles sociales et les conventions collectives sont propres à chaque mode de transport voire à chaque société. Aussi, elles diffèrent de celles appliquées dans le milieu des cars et des bus.

Chaque mode de transport possède ses propres caractéristiques, contraintes et objectifs. Aussi, les modèles et méthodes relatifs à chaque étape de la planification sont à différencier les uns des autres, même s'ils se recoupent parfois. Dans la suite de ce manuscrit, nous nous concentrons sur le transport de voyageurs par bus et car, un domaine qui, nous l'avons vu, est déjà large et comporte d'importantes variantes.

1.5 Synthèse du chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre le contexte général du transport de voyageurs par car et par bus. L'essor de ce mode de transport génère de nouveaux besoins d'optimisation de la planification. Le défi pour les autorités organisatrices et les exploitants est de fournir un haut niveau de service à coûts réduits, dans des conditions variées de marché, de milieu et de taille de réseau. Des outils doivent alors être développés pour répondre de manière efficace et personnalisée aux différentes problématiques.

Nous avons également établi un comparatif avec les autres modes de transport en commun. Cette démarche nous amène à l'observation que la planification des bus et cars nécessite une approche adaptée et spécifique aux caractéristiques de ces modes.

Nous avons identifié et étudié les différentes étapes du processus de planification des réseaux de bus et avons mis en relief les enjeux, objectifs et contraintes, de chacune. Ces étapes correspondent toutes à des problèmes rencontrés par les exploitants et étudiés dans la littérature, individuellement et de plus en plus de manière intégrée.

Les étapes de création des horaires et des services véhicules en particulier, ainsi que leur combinaison font l'objet de la suite de ce manuscrit.

Au chapitre suivant, nous abordons la première étape, la détermination des horaires, et présentons une modélisation ainsi qu'une méthode de résolution pour ce problème, dans une optique focalisée sur la qualité de service.

Chapitre 2

Planification des horaires de lignes pour la qualité de service

CE chapitre concerne le problème de définition des grilles horaires d'un réseau de transport en commun par bus ou car, dans une optique centrée sur la qualité de service. Nous définissons cette notion à travers la quantité et la qualité des correspondances ainsi que la régularité du cadencement. Nous intégrons ces deux objectifs au sein d'un modèle flexible et précis qui repose sur la variabilité des cadencements. Ce modèle définit un espace de recherche vaste en comparaison de la majorité des études portant sur le sujet, et prometteur en termes de qualité des solutions accessibles. Nous proposons ensuite un ensemble de voisinages adaptés, que nous comparons et combinons au sein d'une méthode de recherche locale basée sur une stratégie d'algorithmes en boucle (token ring). Une amélioration sensible est observée sur l'ensemble des objectifs définis, créant un réseau plus attractif pour les usagers en termes de temps de trajet et de possibilités de déplacements.

Sommaire

2.1	Présentation du problème	35
2.1.1	Enjeux	35
2.1.2	État de l'art	36
2.1.3	Données	37
2.1.4	Objectifs	37
2.1.5	Contraintes	39
2.1.6	Sorties	39
2.2	Modélisation	39
2.2.1	Variables de décision et valeurs	41
2.2.2	Objectifs	41
2.2.3	Contraintes	44

2.3	Approche de résolution	44
2.3.1	Espace de recherche	45
2.3.2	Prétraitement des possibilités de correspondances	45
2.3.3	Stratégie de recherche multialgorithme	45
2.3.4	Voisinages	46
2.3.5	Taille des voisinages	50
2.4	Résultats	51
2.4.1	Jeux de tests	51
2.4.2	Conditions de test	53
2.4.3	Analyse des voisinages individuels	53
2.4.4	Recherche multialgorithme	56
2.5	Synthèse du chapitre	62

2.1 Présentation du problème

Le problème consiste à fixer les grilles horaires d'un réseau de transport en commun dans l'objectif d'en améliorer la qualité de service à travers les correspondances et le cadencement.

2.1.1 Enjeux

Le temps de trajet est un critère majeur pour les individus dans la décision d'utiliser les transports en commun. Ce temps, considéré comme improductif par les usagers, doit être minimisé afin de rendre le service attractif. Chaque trajet est constitué d'un ensemble de composantes :

1. Le trajet entre le point d'origine réelle et le point d'entrée dans le réseau.
2. L'attente au point d'entrée dans le réseau.
3. Le temps de transport dans les véhicules du réseau.
4. Le temps d'attente en correspondance entre lignes du réseau.
5. L'attente au point de sortie du réseau (lorsque l'utilisateur attend un train par exemple).
6. Le trajet entre le point de sortie du réseau et le point de destination réelle.

Nous étudions dans cette thèse des problématiques qui s'articulent autour de la phase de détermination des grilles horaires dans le processus de planification du transport. Nous ne considérons nullement la phase de création du réseau, ce qui exclut toute action sur les composantes 1 et 6 du temps de trajet (trajets à l'extérieur du réseau).

Par contre, en créant les grilles horaires des lignes, nous pouvons jouer sur les composantes d'attente en entrée et sortie du réseau (composantes 2 et 5) ainsi que sur l'attente en correspondance interne (composante 4).

Premièrement, en jouant sur les horaires commerciaux des lignes, le planificateur peut créer, défaire ou modifier les possibilités de correspondances entre les lignes du réseau et au niveau intermodal.

Deuxièmement, deux cas doivent être différenciés pour la composante 2. Dans le cas où l'utilisateur arrive d'un mode de transport appartenant à un autre réseau, ce temps d'attente est impacté à travers la gestion des correspondances intermodales. Dans le cas contraire, l'utilisateur entre directement dans le réseau. Comptabiliser ce temps d'attente initial impliquerait de connaître les heures précises d'arrivée des usagers à l'arrêt de bus [Palma et Lindsey, 2001]. Cependant, ces données sont impossibles à se procurer en pratique dans les réseaux. Nous proposons alors de prendre en compte un paramètre alternatif, et de considérer la régularité du cadencement à l'intérieur de chaque période horaire comme un facteur de qualité de service représentatif du temps de trajet initial (il est généralement admis qu'en milieu urbain, l'attente initiale est égale à la moitié du cadencement). En dehors même de la notion de temps de trajet, ce critère de régularité est pertinent. Il est utilisé dans les réseaux de bus comme de train. Afin de pouvoir prendre ce paramètre en compte, nous définissons nos variables de décision comme l'ensemble des dessertes du réseau. Le problème consiste alors à affecter une heure de passage à chacune de ces variables

(voir 2.2.1). Cette modélisation s’oppose à une représentation commune qui veut que les variables correspondent à l’ensemble des lignes, un seul horaire étant affecté à chaque ligne. Dans cette dernière modélisation, le cadencement fixe appliqué à chaque ligne permet de déduire les horaires de toutes les dessertes en fonction de celui de la première desserte de la ligne. Notre modélisation, plus complexe mais plus précise, permet de définir un espace de recherche plus large et susceptible de contenir des minima locaux de meilleure qualité.

Troisièmement, lors de la création des grilles horaires du réseau, c’est aussi l’itinéraire même des passagers à titre individuel qui se joue. Ceux qui ont différentes possibilités de parcours choisissent également leur itinéraire en fonction des possibilités de correspondances. Cette affectation correspond au problème de Transit Trip Assignment [Friedrich *et al.*, 1999; Guan *et al.*, 2003]. Ainsi, la composante 3 est indirectement affectée par la création des grilles horaires.

Les objectifs que nous prenons en compte dans ce problème sont ainsi les correspondances et le cadencement.

2.1.2 État de l’art

Le chapitre 1 présente un état de l’art pour le problème de détermination des horaires de lignes d’un réseau de transport en commun par bus et car. Rappelons que ce problème se situe, dans le processus de planification séquentiel du transport en commun, en aval des étapes de création du réseau et des fréquences, et en amont des étapes de création des services véhicules et conducteurs (Figure 1.3).

Les études portant sur le problème de détermination des horaires dans un réseau de transport en commun par bus se focalisent souvent sur l’aspect correspondances des grilles horaires. Deux types d’approches principalement sont utilisés : celles qui cherchent à maximiser le nombre d’arrivées simultanées de lignes en un point de correspondance [Ceder *et al.*, 2001; Eranki, 2004] et celles qui cherchent à minimiser une fonction du temps d’attente total imposé en correspondance aux usagers. Cette dernière approche est plus flexible et permet de prendre en compte plus de paramètres. C’est sur celle-ci que nous nous basons dans ce chapitre.

Le problème est souvent modélisé sous forme d’un problème de semi-affectation quadratique [Klemm et Stemme, 1988; Daduna et Voss, 1995; Bookbinder et Désilets, 1992]. Dans ce cadre, l’objectif est de minimiser le temps d’attente global des usagers en correspondances en affectant une heure de départ à chaque ligne du réseau. Les horaires des dessertes individuelles sont déduits en appliquant un cadencement fixe et prédéterminé à chaque ligne. Cette modélisation ne prend donc pas du tout en compte d’objectifs liés au cadencement. L’inconvénient de ce modèle est une certaine rigidité, car le décalage des dessertes à l’unité pourrait parfois permettre d’atteindre des solutions de meilleure qualité en termes de correspondances. Des travaux plus récents portant sur la synchronisation des correspondances continuent cependant à adopter ce modèle par ligne [Jansen *et al.*, 2002; Cevallos et Zhao, 2006].

À l’inverse, [Chakroborty *et al.*, 1995; Chakroborty *et al.*, 1997; Deb et Chakroborty, 1998] proposent une approche permettant de faire varier le cadencement des lignes à l’intérieur d’un intervalle borné. Ils développent pour cela une méthode de résolution basée sur

un algorithme évolutionnaire. Des contraintes portant sur le nombre de véhicules par ligne sont intégrées au modèle mais les algorithmes proposés ne permettent pas d’appréhender des réseaux de grande taille (le plus grand jeu de données utilisé dans ces articles comporte trois lieux de correspondances).

Nous proposons de développer un modèle basé sur une affectation d’horaires à chaque desserte individuellement et pouvant fournir des solutions pour des réseaux de taille réelle. Nous allons donc intégrer au modèle un objectif de cadencement afin de préserver cet aspect de la qualité de service, et développer une méthode à base de métaheuristique pour gérer la masse de données.

2.1.3 Données

Selon le processus usuel (voir Figure 1.3), au moment de la fixation des horaires, le tracé du réseau et les fréquences par période sont déjà établis. On dispose donc des itinéraires des lignes, temps de trajet et lieux de correspondances. De plus, on connaît toutes les informations exogènes relatives aux modes de transport en connexion avec le réseau, incluant les points de contact avec le réseau et les horaires de passage.

2.1.4 Objectifs

Dans ce problème, nous nous focalisons sur la qualité de service. Les objectifs que nous avons retenus sont relatifs aux correspondances ainsi qu’au cadencement.

Correspondances

Pour une bonne mobilité des usagers dans le réseau, il est nécessaire d’assurer des possibilités de correspondances entre les différentes lignes et avec les réseaux en connexion. Il est en effet impensable d’un point de vue économique de fournir des déplacements complets aux usagers, entre leurs points d’origine et de destination réels. L’accessibilité du réseau dépend donc en grande partie de l’organisation des correspondances. Cet aspect est complexe et peut regrouper divers indicateurs : le nombre de possibilités, leur fréquence, les temps d’attente impliqués, etc. De plus, toutes les situations ne peuvent pas subir un traitement identique selon les lieux de correspondance, les lignes en jeu ou les horaires concernés. Par exemple il peut falloir prendre en compte un certain temps de déplacement et les temps d’attente acceptables peuvent varier en fonction des équipements sur place.

Aussi nous avons sélectionné les deux critères suivants :

- Qualité des correspondances :

il s’agit globalement du temps d’attente. Dans le contexte d’usagers non captifs, il existe pour chaque correspondance une valeur moyenne de temps d’attente au-delà de laquelle les usagers renoncent à l’utiliser. La correspondance est alors considérée impossible. De même, en-deçà d’une certaine limite de temps (constituée d’un éventuel temps de trajet lorsque les points d’arrêt, bien que proches, ne sont pas identiques,

additionné d'une certaine marge de sécurité), la correspondance ne sera pas comptabilisée comme faisable. Le troisième paramètre que nous prenons en compte pour chaque correspondance au niveau de la qualité est le temps d'attente idéal, qui permet d'assurer la correspondance confortablement pour les usagers. La qualité d'une correspondance dépend ainsi de la proximité du temps d'attente réel avec la valeur idéale souhaitée. En dehors de l'intervalle défini par l'attente minimale et maximale, la qualité est nulle [Fleurent *et al.*, 2004].

- Quantité de correspondances :
il s'agit du nombre de possibilités de correspondances dans le réseau, une correspondance étant possible lorsque le temps d'attente impliqué est situé à l'intérieur de l'intervalle autorisé (voir point précédent sur la qualité des correspondances).

Ces deux critères sont complémentaires l'un de l'autre.

Régularité des cadencements

La notion de cadencement est cruciale dans la définition des grilles horaires commerciales. Le cadencement d'une ligne est l'intervalle de temps qui sépare le passage de deux dessertes consécutives à un même arrêt. Il se calcule comme l'inverse de la fréquence sur une période donnée. Il varie le plus souvent en fonction des heures de pointe (cadencement faible) et des heures creuses (cadencement élevé).

Lorsqu'il est bien adapté par jour, période, ligne et arrêt, il doit permettre :

- d'éviter les surcharges de passagers (pouvoir accueillir tous les usagers qui désirent monter dans le véhicule) ;
- d'assurer des passages suffisamment fréquents pour à la fois laisser du choix aux usagers quant à leurs horaires d'embarquement et assurer une sécurité pour le cas où ils ratent leur bus. Cette notion de couverture temporelle est très importante pour la qualité de service, car le fait de pouvoir se déplacer "quand on veut" est un argument souvent avancé par les utilisateurs de véhicules personnels.

Pour une adaptation optimale, il est souhaitable de définir des périodes de cadencement par ligne et par période horaire. Ces tranches horaires sont définies de manière à retranscrire des périodes de demande homogène, à l'intérieur desquelles on souhaite que les passages soient le plus réguliers possible. Ces périodes peuvent être découpées différemment selon les lignes.

Précisons quelques points particuliers :

- Le choix du point principal comme référence.
Toutes les dessertes d'une même ligne ne possèdent pas une structure de grille horaire identique en pratique. Il existe notamment des lignes à branches avec des terminus partiels, et des ajouts ou suppressions ponctuels d'arrêt en fonction des heures. Nous utilisons alors un paramètre dont la valeur est fixée par le planificateur en entrée : l'arrêt principal de la ligne. Si le point d'arrêt principal d'une ligne n'est pas desservi par une desserte, il faut extrapoler l'heure de passage associée pour gérer l'exception. Nous utilisons pour cela les valeurs de temps de trajet par période fournies en entrée du problème.

- La transition entre périodes de cadencement.
La gestion de la transition entre périodes de cadencement représente un cas limite. Celui-ci est cependant intéressant à traiter car la réalité des réseaux de transport est constituée de journées multipériodes. Au niveau des transitions entre périodes, il existe un risque de sur-affecter ou sous-affecter des dessertes, générant potentiellement une différence dans le nombre de véhicules nécessaires à l’exploitation des lignes. [Ceder, 2003] étudie cette problématique et propose une solution heuristique à ce problème en fonction de la charge en passagers. Nous ne connaissons, à cette étape, ni la capacité des véhicules utilisés, ni le nombre exact d’usagers susceptibles de transiter sur chaque desserte. Ainsi, nous définissons une autre méthode de calcul, qui va plutôt chercher à pénaliser les cadencements qui ne respectent pas les cadencements des deux périodes en question. Deux cas sont ainsi à envisager selon la position horaire des dessertes consécutives relativement à la découpe des tranches horaires de cadencement demandé.
- *Cas #1 : Les dessertes consécutives desservent le point principal de la ligne au cours de la même période de cadencement.* Le cadencement observé doit se rapprocher au mieux du cadencement demandé pour la période.
- *Cas #2 : Les dessertes consécutives desservent le point principal de la ligne au cours de périodes de cadencement consécutives.* Seuls les intervalles observés qui sont soit plus brefs que les deux cadencements demandés soit plus longs qu’au moins un des cadencements demandés sont pénalisés. Des vérifications supplémentaires sont effectuées en liaison avec la durée des marges de variation autorisées (pour le détail, voir la section 2.2).

2.1.5 Contraintes

La structure de modèle choisie permet de ne soumettre le problème qu’à un petit nombre de contraintes.

- *L’affectation* est complète : une heure de départ est affectée à chaque desserte.
- Le décalage entre l’heure de passage au point principal de chaque desserte dans les grilles horaires finales et initiales est inférieur ou égal au *décalage maximal* autorisé.

2.1.6 Sorties

En sortie du problème, on dispose des grilles horaires pour l’ensemble des lignes du réseau. Cela inclut l’heure de départ de chaque desserte, ainsi que les heures de passage à tous les points d’arrêt qu’elle dessert (voir Figure 2.1). Ces informations permettent d’analyser le réseau en termes de correspondances et de cadencement.

2.2 Modélisation

Dans le modèle que nous définissons, les variables représentent les courses. Une heure de départ doit être affectée à chaque variable, en respectant un ensemble de contraintes et

Ligne :	Ligne 02 (02A)								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
02A-POUDRIERE	07:03	07:17	07:31	07:45	07:59	08:13	08:27	08:41	08:55
02A-HOTEL HARFA	07:05	07:19	07:33	07:47	08:01	08:15	08:29	08:43	08:57
02A-FACE HLM	07:07	07:21	07:35	07:49	08:03	08:17	08:31	08:45	08:59
02A-CITE GUENANI	07:09	07:23	07:37	07:51	08:05	08:19	08:33	08:47	09:01
02A-CITE CHEGUVARA 1	07:10	07:24	07:38	07:52	08:06	08:20	08:34	08:48	09:02
02A-CITE CHEGUVARA 2	07:11	07:25	07:39	07:53	08:07	08:21	08:35	08:49	09:03
02A-CENTRE CULTUREL	07:13	07:27	07:41	07:55	08:09	08:23	08:37	08:51	09:04
02A-CITE CHABANI	07:14	07:28	07:42	07:56	08:10	08:24	08:38	08:52	09:05
02A-COUR DE JUSTICE	07:15	07:29	07:43	07:57	08:11	08:25	08:39	08:53	09:06
02A-SIEGE DE LA WILA	07:17	07:31	07:45	07:59	08:13	08:27	08:41	08:55	09:08
02A-CITE DES JARDINS	07:19	07:33	07:47	08:01	08:15	08:29	08:43	08:57	09:09
02A-CNAS	07:21	07:35	07:49	08:03	08:17	08:31	08:45	08:59	09:11
02A-SURETE URBAIN	07:22	07:36	07:50	08:04	08:18	08:32	08:46	09:00	09:12
02A-SOUK ELFALAH	07:23	07:37	07:51	08:05	08:19	08:33	08:47	09:01	09:13
02A-DIRECTION DE FOR	07:25	07:39	07:53	08:07	08:21	08:35	08:49	09:03	09:15
02A-ARCADE	07:27	07:41	07:55	08:09	08:23	08:37	08:51	09:04	09:16
02A-ECOLE PRIMAIRE	07:29	07:43	07:57	08:11	08:25	08:39	08:53	09:06	09:18
02A-LYCEE IBN KHALDO	07:31	07:45	07:59	08:13	08:27	08:41	08:55	09:07	09:19
02A-SURETE URBAIN 2	07:33	07:47	08:01	08:15	08:29	08:43	08:57	09:09	09:21

FIGURE 2.1 – Modèle de grille horaire.

en suivant un ensemble d'objectifs. Pour la présentation du modèle, les notations suivantes sont utilisées pour les données :

Soient \mathcal{A} l'ensemble des activités, (dont \mathcal{L} l'ensemble des lignes du réseau et \mathcal{M} l'ensemble des lignes de modes externes), \mathcal{R} l'ensemble des dessertes, \mathcal{C} l'ensemble des arrivées et départs de lignes externes, \mathcal{S} l'ensemble des arrêts de bus, \mathcal{T} l'ensemble des correspondances, et \mathcal{H} l'horizon de planification.

- $\lceil S \rceil$: décalage horaire maximal autorisé par desserte.
- Pour toute ligne $l \in \mathcal{L}$:
 - m_l : arrêt principal.
 - \mathcal{P}_l : ensemble des périodes de cadencement homogène. Pour tout $p \in \mathcal{P}_l$:
 - $bt_{l,p}, et_{l,p}$: heure de début et de fin de période.
 - $h_{l,p}, v_{l,p}$: cadencement attendu et marge de variation associée.
 - \mathcal{R}_l : ensemble des dessertes.
- Pour toute desserte $r \in \mathcal{R}$:
 - $\mathcal{S}^r \subset \mathcal{S}$: ensemble des arrêts desservis.
 - $\mathcal{S}^{*r} \subset \mathcal{S}^r$: ensemble restreint des arrêts desservis les plus importants.
 - s_r^α : premier arrêt.
 - h_r^\rightarrow : heure de départ dans la grille horaire existante.
 - r_l^\dagger : desserte suivant r dans la ligne l .
- Pour toute ligne externe $m \in \mathcal{M}$:
 - s : point unique de connexion de m avec le réseau.
 - $\mathcal{C}_m \subset \mathcal{C}$: ensemble des arrivées à s ou départs de s .

- $h_{m,c}^{\leftarrow}, h_{m,c}^{\rightarrow}$: heure d'arrivée et de départ de $c \in \mathcal{C}_m$.
- Pour toute correspondance $t = (a_1, s_1, a_2, s_2) \in \mathcal{T}$ (où $a_1, a_2 \in \mathcal{A}, s_1, s_2 \in \mathcal{S}$) :
 - il_t : niveau d'importance.
 - $[wt_t], [wt_t], [wt_t]$: temps d'attente minimal, idéal et maximal.

2.2.1 Variables de décision et valeurs

- Une *variable de décision* est une desserte de \mathcal{R} .
- La *valeur* d'une variable de décision est une heure de début $\pi_r \in \mathcal{H}$ (l'unité de temps est la minute).
- Une *configuration* σ est une affectation complète de valeurs à l'ensemble des variables de décision : $\sigma : \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{H}$.

Parallèlement, les itinéraires des dessertes et les temps de parcours sont des données du problème. Ainsi, l'ensemble de la grille horaire du réseau est facilement reconstituable.

Un ensemble de variables d'état est maintenu à jour pour faciliter le calcul des valeurs liées aux correspondances et à la régularité des cadencements. Il inclut les heures d'arrivée et de départ des dessertes pour un ensemble restreint d'arrêts. Cet ensemble ($\mathcal{S}^{*r}, \forall r \in \mathcal{R}$) est composé de l'arrêt principal de la ligne, du premier et du dernier arrêt de chaque desserte, et des arrêts situés sur des zones de correspondance. On note $\pi_{r,s}^{\rightarrow} \in \mathcal{H}$ et $\pi_{r,s}^{\leftarrow} \in \mathcal{H}$ les variables d'état correspondant aux heures de départ et d'arrivée de la desserte r de \mathcal{S}^r à l'arrêt s . Ainsi, la variable de décision π_r correspond à la variable d'état $\pi_{r,s_r}^{\rightarrow}$.

2.2.2 Objectifs

La fonction objectif de notre problème est une somme pondérée des fonctions de coût relatives à chacun des objectifs.

Correspondances

La fonction de coût liée à l'objectif de correspondances prend en compte les différents types de transferts. La première partie concerne les correspondances intramodales (qui ont lieu entre lignes du réseau), la seconde concerne les correspondances intermodales sortantes et la dernière les correspondances intermodales entrantes. Le coût lié à chaque possibilité de transfert est de plus pondéré par le niveau d'importance global de la correspondance (paramètre fixé par le planificateur en entrée).

$$\begin{aligned}
 cost_1(\sigma) = & \sum_{t=(l_1 \in \mathcal{L}, s_1 \in \mathcal{S}, l_2 \in \mathcal{L}, s_2 \in \mathcal{S}) \in \mathcal{T}} \left[il_t * \sum_{\substack{r_1 \in \mathcal{R}_{l_1} \\ r_2 \in \mathcal{R}_{l_2}}} fTr(t, \pi_{r_1, s_1}^{\leftarrow}, \pi_{r_2, s_2}^{\rightarrow}) \right] \\
 & + \sum_{t=(l_1 \in \mathcal{L}, s_1 \in \mathcal{S}, m_2 \in \mathcal{M}, s_2 \in \mathcal{S}) \in \mathcal{T}} \left[il_t * \sum_{\substack{r_1 \in \mathcal{R}_{l_1} \\ c_2 \in \mathcal{C}_{m_2}}} fTr(t, \pi_{r_1, s_1}^{\leftarrow}, h_{m_2, c_2}^{\rightarrow}) \right]
 \end{aligned}$$

$$+ \sum_{t=(m_1 \in \mathcal{M}, s_1 \in \mathcal{S}, l_2 \in \mathcal{L}, s_2 \in \mathcal{S}) \in \mathcal{T}} \left[il_t * \sum_{\substack{c_1 \in \mathcal{C}_{m_1} \\ r_2 \in \mathcal{R}_{l_2}}} fTr(t, h_{m_1, c_1}^{\leftarrow}, \pi_{r_2, s_2}^{\rightarrow}) \right] \quad (2.1)$$

où

$$fTr(t, h_1, h_2) = \begin{cases} \text{décroissante de } -0.5 \text{ à } -1 & \text{si } \lfloor wt_t \rfloor < h_2 - h_1 < \lceil wt_t \rceil \\ \text{croissante de } -1 \text{ à } 0 & \text{si } \lceil wt_t \rceil < h_2 - h_1 < \lfloor wt_t \rfloor \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour modéliser cet objectif, nous définissons une fonction non linéaire du temps d'attente, fonction qui favorise les temps d'attente les plus proches de leur valeur idéale (Figure 2.2, Formule 2.1). La fonction de coût relative aux correspondances est toujours négative, symbolisant la valeur additionnelle apportée par chaque correspondance supplémentaire à la qualité de la grille horaire. Le coût est nul en dehors de l'intervalle de temps autorisé. On calcule le coût lié aux correspondances pour chaque couple de dessertes qui se croisent.

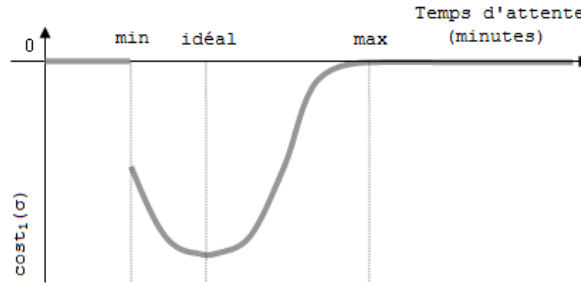


FIGURE 2.2 – Fonction de coût pour l'objectif de correspondances. Le temps d'attente idéal permet des correspondances fluides pour l'utilisateur.

Cadencement

Pour l'objectif de cadencement, nous utilisons une fonction de coût (Formule 2.2) qui pénalise les écarts entre le cadencement observé et celui demandé par le planificateur en entrée, avec une corrélation positive à la taille de cet écart.

Selon la modélisation que nous avons définie plus haut, deux cas sont à envisager dans le calcul du coût associé à l'objectif de cadencement. Le premier permet de traiter le cas général et le second la transition entre périodes de cadencement (Figure 2.3).

$$cost_2(\sigma) = \sum_{l \in \mathcal{L}} \left(\sum_{r, r_l^+ \in \mathcal{R}_l} fHw(l, r, r_l^+) \right) \quad (2.2)$$

avec :

Soit $gap(l, r, r_l^+)$ le cadencement actuel, calculé par $\pi_{r_l^+, m_l}^{\rightarrow} - \pi_{r, m_l}^{\rightarrow}$.

- Cas #1 : les deux dessertes consécutives desservent l'arrêt principal de la ligne au cours de la même tranche horaire de cadencement $p \in \mathcal{P}_l$.

$$fHw(l, r, r_l^+) = \left(\frac{gap(l, r, r_l^+) - h_{l,p}}{v_{l,p}} \right)^2$$

- Cas #2 : les deux dessertes consécutives desservent l'arrêt principal de la ligne au cours de deux périodes de cadencement consécutives $p_1, p_2 \in \mathcal{P}_l$. C'est le cas le plus délicat. Les non-respects de cadencement sont pénalisés différemment en fonction des caractéristiques de la situation :

- Le cadencement observé est plus court que les cadencements demandés pour les deux périodes, *i.e.* $gap(l, r, r_l^+) < \min(h_{l,p_1}, h_{l,p_2})$

$$fHw(l, r, r_l^+) = \begin{cases} \left(\frac{gap(l, r, r_l^+) - h_{l,p_1}}{v_{l,p_1}} \right)^2 & \text{si } h_{l,p_1} > h_{l,p_2} \\ \left(\frac{gap(l, r, r_l^+) - h_{l,p_2}}{v_{l,p_2}} \right)^2 & \text{sinon} \end{cases}$$

- Le cadencement observé est plus long que celui demandé pour au moins une des périodes.

Deux conditions doivent être satisfaites pour qu'un cadencement interpériodes observé soit considéré comme trop long : pour au moins une des périodes, il doit être supérieur au cadencement demandé et la partie de l'intervalle comprise à l'intérieur de cette période doit être plus longue que la marge de variation autorisée.

i.e.

$$\begin{cases} gap(l, r, r_l^+) > h_{l,p_1} & \wedge & \pi_{r, m_l}^- < et_{l,p_1} - v_{l,p_1} \\ \vee \\ gap(l, r, r_l^+) > h_{l,p_2} & \wedge & \pi_{r_l^+, m_l}^- > bt_{l,p_2} + v_{l,p_2} \end{cases}$$

Soient $dist(l, r, r_l^+, p_1)$ et $dist(l, r, r_l^+, p_2)$ les différences entre $gap(l, r, r_l^+)$ et l'intervalle de temps maximal qui respecterait le cadencement demandé (marge de variation incluse) pour les deux périodes concernées, avec respectivement, les horaires de r et de r_l^+ fixés. Cette valeur est nulle lorsque le cadencement observé est plus court ou égal au cadencement demandé pour la période.

$$fHw(l, r, r_l^+) = \begin{cases} \left(\frac{dist(l, r, r_l^+, p_1)}{v_{l,p_1}} \right)^2 & \text{si } dist(l, r, r_l^+, p_1) \geq dist(l, r, r_l^+, p_2) \\ \left(\frac{dist(l, r, r_l^+, p_2)}{v_{l,p_2}} \right)^2 & \text{sinon} \end{cases}$$

Fonction objectif

Soit σ la configuration à évaluer.

$$f(\sigma) = w_1 * cost_1(\sigma) + w_2 * cost_2(\sigma) \quad (2.3)$$

où w_1 et w_2 sont des poids spécifiés par le planificateur.

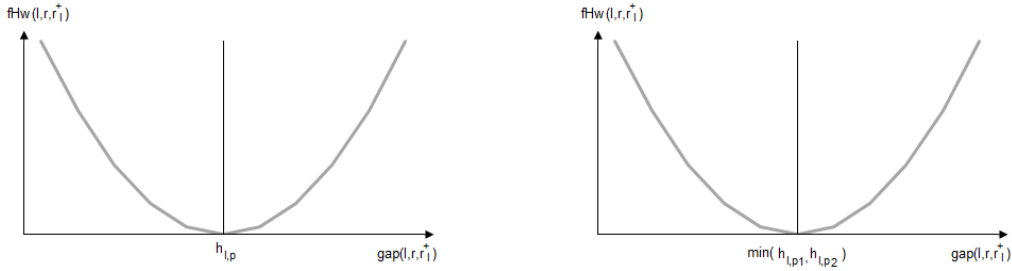


FIGURE 2.3 – Fonctions de coût pour les cas 1 et 2 du cadencement

2.2.3 Contraintes

Deux types de contraintes s'appliquent à notre problème :

- L'*affectation* est complète : une heure de départ est affectée à chaque desserte.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \quad \pi_r \in \mathcal{H} \quad (2.4)$$

- Le décalage entre l'heure de passage au point principal de chaque desserte dans les grilles horaires finales et initiales est inférieur ou égal au *décalage maximal* autorisé.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \quad |\pi(r) - h_r^-| \leq [S] \quad (2.5)$$

2.3 Approche de résolution

La solution initiale est constituée des horaires en cours du réseau en fonctionnement. Comme nous étudions le cas de la réorganisation et non de la création de grilles horaires (voir Introduction Générale), il est intéressant voire nécessaire en réalité de prendre en compte l'existant afin de préserver certaines caractéristiques historiques du réseau (en termes d'horaires et de correspondances notamment). D'ailleurs, des contraintes imposant la préservation des horaires initiaux de dessertes peuvent être prises en compte facilement dans le modèle. Ces raisons historiques justifient les contraintes de décalage maximal qui s'appliquent à notre problème.

En combinaison avec la structure connue du réseau, ces horaires initiaux permettent d'évaluer le coût en termes de cadencement et de correspondances, fournissant une première valeur de fonction objectif. La situation existante sert ici à la fois de point de comparaison et de solution initiale.

Nous utilisons cette solution initiale au sein d'une méthode de recherche multialgorithme (token ring) basée sur quatre types de voisinages dont nous développons le mécanisme dans la suite de cette section.

2.3.1 Espace de recherche

Une configuration σ est une affectation complète de valeurs de \mathcal{H} aux variables du modèle, qui correspondent à l'ensemble \mathcal{R} . Autrement dit, une configuration peut être représentée comme un vecteur d'horaires : $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{R}|})$.

Le domaine de chaque variable est de taille $2\lceil S \rceil + 1$. L'espace de recherche est donc constitué de $(2\lceil S \rceil + 1)^{|\mathcal{R}|}$ configurations réalisables.

2.3.2 Prétraitement des possibilités de correspondances

Étant donné le domaine initial \mathcal{H} de chaque variable, une possibilité de correspondance peut être potentiellement générée entre n'importe quelle paire de courses appartenant aux lignes d'arrivée et de départ de la correspondance.

Cependant, il est possible de tirer profit de la contrainte de décalage maximal qui définit des domaines de valeurs restreints pour chaque variable. En conséquence, le nombre de paires de courses entre lesquelles des correspondances peuvent potentiellement être créées est drastiquement réduit.

On définit $\mathcal{T}_o(t) \subset [\mathcal{R} \times (\mathcal{R} \cup \mathcal{C})]$ l'ensemble des paires de dessertes entre lesquelles une possibilité de correspondance peut apparaître pour t en tenant uniquement compte de la contrainte de décalage horaire maximal.

Nous réécrivons alors la fonction de coût 2.1 de la manière suivante, pour un calcul plus rapide (en se concentrant sur les correspondances intramodales dans un souci de clarté) :

$$cost(\sigma) = \sum_{\substack{t \in \mathcal{T} \\ t=(l_1, s_1, l_2, s_2)}} \left[il_t * \sum_{(r_1, r_2) \in \mathcal{T}_o(t)} fTr(t, \pi_{r_1, s_1}^{\leftarrow}, \pi_{r_2, s_2}^{\rightarrow}) \right]$$

2.3.3 Stratégie de recherche multialgorithme

La stratégie de recherche "token ring" [DiGaspero, 2003] combine de manière séquentielle un ensemble d'algorithmes de recherche locale. Ceux-ci peuvent notamment être basés sur des méthodes de recherche et des voisinages différents. À partir d'une solution initiale, le token ring applique à tour de rôle chaque algorithme à la meilleure solution trouvée par l'algorithme précédent. Les critères d'arrêt du token ring peuvent être entre autres le nombre de "boucles" (*i.e.* passage par tous les algorithmes) réalisées sans amélioration ou le temps de calcul écoulé. Chaque algorithme possède de plus ses propres critères d'arrêt.

L'algorithme 2.1 présente le fonctionnement de la stratégie de recherche token ring avec nos paramètres :

- le critère d'arrêt global de la méthode est le temps de calcul écoulé, dont la valeur maximale autorisée est $maxTemps$;
- les algorithmes de recherche locale utilisés diffèrent les uns des autres par le type de voisinage utilisé et/ou le critère de sélection de mouvement utilisé ;

- les critères d'arrêt de chaque algorithme de recherche locale sont le temps de calcul maximal et le nombre de mouvements sélectionnés maximal n'apportant pas d'amélioration à la qualité de la solution courante, respectivement $maxTemps(n)$ et $nbMaxStagn(n)$ pour l'algorithme n ;
- seuls les mouvements strictement améliorants sont appliqués.

Algorithme 2.1 : Stratégie token ring à N algorithmes de recherche locale

```

 $\sigma \leftarrow \text{GenererSolutionInitiale}()$ 
 $temps \leftarrow \text{DebutChrono}()$ 
 $n \leftarrow 0$ 
tant que  $temps < maxTemps$ 
   $temps2 \leftarrow \text{DebutChrono2}()$ 
   $nbStagn \leftarrow 0$ 
  tant que  $temps2 < maxTemps(n)$  et  $nbStagn < nbMaxStagn(n)$ 
     $m \leftarrow \text{SelectMvt}(\sigma, n, f)$ 
    si  $f(\sigma \circ m) < f(\sigma)$ 
       $\sigma \leftarrow \sigma \circ m$ 
    sinon
       $nbStagn \leftarrow nbStagn + 1$ 
     $n \leftarrow (n + 1) \bmod N$ 
  renvoyer  $\sigma$ 

```

2.3.4 Voisinages

Nous avons défini quatre mécanismes de voisinage. *DecalJournée* est utilisé dans la littérature [Jansen *et al.*, 2002], *DecalDesserte* est plus précis et adapté à notre modèle, quant à *DecalCorrExistantes* et *DecalCorrIdeales*, nous les avons pensés de manière à tirer profit de la structure du modèle et à se focaliser sur l'objectif de correspondances.

DecalDesserte

Un mouvement issu du voisinage *DecalDesserte* modifie la valeur d'une unique variable. Une solution voisine est obtenue en décalant l'heure de départ d'une desserte donnée de n minutes.

On peut noter $mv_{DD} = (r, n)$ un mouvement de ce voisinage.

Soit $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{R}|})$ la configuration courante, $mv_{DD} = (r, n)$ le mouvement sélectionné, et $\sigma' = \sigma \circ mv_{DD}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_{|\mathcal{R}|})$ répond à la description suivante :

$$\forall r^* \in \mathcal{R}, \begin{cases} t'_{r^*} = t_{r^*} + n & \text{si } r^* = r \\ t'_{r^*} = t_{r^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

2.3 Approche de résolution

Les figures 2.4 à 2.7 présentent un graphique espace-temps sur lequel sont positionnées les dessertes de trois lignes de couleurs différentes. En abscisses on trouve les heures de service, et en ordonnées les arrêts desservis par les lignes. Les traits pleins représentent la configuration courante (chaque desserte est une variable, chaque horaire de départ sa valeur). Les traits en pointillés représentent la ou les modification(s) apportée(s) par un mouvement du voisinage considéré.

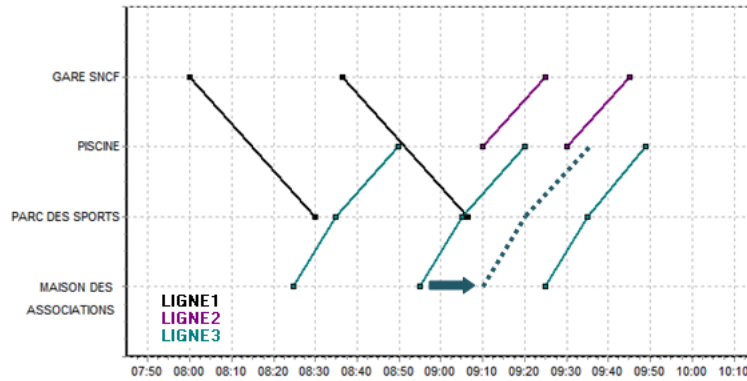


FIGURE 2.4 – Exemple de mouvement de DecalDesserte :
 $mv_{DD} = (\text{desserte2 de la ligne3, } +15)$

DecalJournee

Un mouvement issu du voisinage *DecalJournee* modifie la valeur d'un ensemble donné de variables. Une solution voisine est obtenue en décalant l'heure de départ de toutes les dessertes d'une même ligne par n minutes.

On peut noter $mv_{DJ} = (l, n)$ un mouvement de ce voisinage.

Soit $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{R}|})$ la configuration courante, $mv_{DJ} = (l, n)$ le mouvement sélectionné, et $\sigma' = \sigma \circ mv_{DJ}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_{|\mathcal{R}|})$ répond à la description suivante :

$$\forall l^* \in \mathcal{L}, \begin{cases} \forall r \in \mathcal{R}_{l^*}, t'_r = t_r + n & \text{si } l^* = l \\ \forall r \in \mathcal{R}_{l^*}, t'_r = t_r & \text{sinon} \end{cases}$$

Un mouvement de *DecalJournee* correspond de fait à une composition de mouvements du voisinage *DecalDesserte*. Il présente l'avantage de préserver le cadencement de la ligne tout en permettant de diversifier le processus de recherche locale par rapport à *DecalDesserte*.

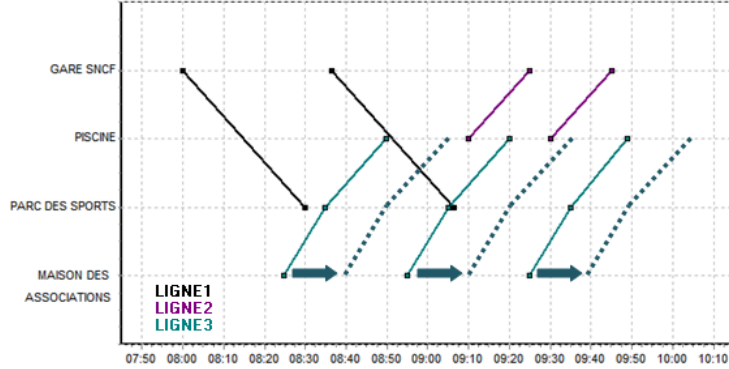


FIGURE 2.5 – Exemple de mouvement de DecalJournee :
 $mv_{DJ} = (\text{ligne3}, +15)$

DecalCorrExistantes

Un mouvement issu du voisinage *DecalCorrExistantes* modifie la valeur d'un ensemble donné de variables. Une solution voisine est obtenue par le procédé suivant :

- Sélection d'une variable $r \in \mathcal{R}$ aléatoirement.
- Sélection d'une nouvelle valeur t'_r pour cette variable à l'intérieur de son domaine. On en déduit la valeur n du décalage à appliquer par rapport à la valeur actuelle de la variable.
- Détermination de l'ensemble des variables à impacter simultanément. Il s'agit de l'ensemble des dessertes avec lesquelles il existe une possibilité de correspondance impliquant r .
- Pour chacune de ces variables impliquées, détermination du décalage qui va s'appliquer à leur valeur. Ce décalage est la valeur du domaine de la variable qui soit le plus proche de n .

On peut noter $mv_{DCE} = (r, n)$ un mouvement de ce voisinage. Soient $maxDom_{r^*}$ et $minDom_{r^*}$ les deux valeurs de \mathcal{H} qui encadrent le domaine associé à la variable r^* de \mathcal{R} . Ces valeurs sont calculées en fonction de la valeur de r^* dans la configuration initiale et de la valeur du décalage maximal autorisé. Soit $corrExist(\sigma, r, r^*)$ un booléen qui indique si les horaires des deux dessertes r et r^* génèrent une possibilité de correspondance (l'attente associée étant comprise dans l'intervalle autorisé).

Soit $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{R}|})$ la configuration courante, $mv_{DCE} = (r, n)$ le mouvement sélectionné, et $\sigma' = \sigma \circ mv_{DCE}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_{|\mathcal{R}|})$ répond à la description suivante :

$$\forall r^* \in \mathcal{R}, t'_{r^*} = \begin{cases} \min(t_{r^*} + n, maxDom_{r^*}) & \text{si } corrExist(\sigma, r, r^*) \text{ et } n > 0 \\ \max(t_{r^*} + n, minDom_{r^*}) & \text{si } corrExist(\sigma, r, r^*) \text{ et } n < 0 \\ t_{r^*} + n & \text{si } r^* = r \\ t_{r^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

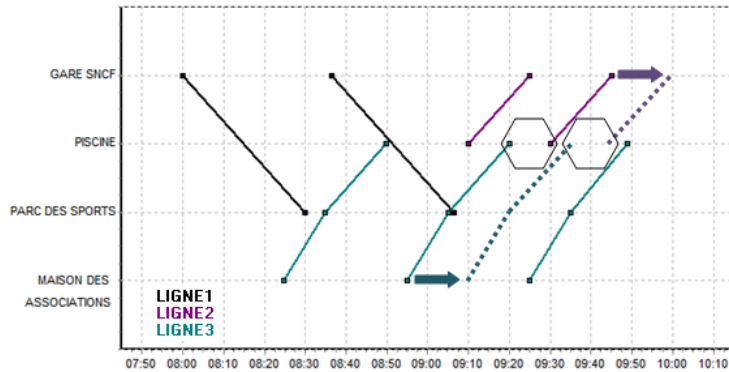


FIGURE 2.6 – Exemple de mouvement de DecalCorrExistantes :
 $mv_{DCE} = (\text{desserte2 de la ligne3}, +10)$

De la même manière que *DecalJournee*, *DecalCorrExistantes* est assimilable à une composition de mouvements de *DecalDesserte*.

L'idée sous-jacente de ce mécanisme de voisinage est de permettre le décalage simultané des horaires de plusieurs dessertes liées entre elles par des possibilités de correspondance dans une configuration donnée.

Le voisinage *DecalCorrExistantes* permet de conserver certaines bonnes propriétés lors du passage d'une configuration à une autre. En modifiant parallèlement la valeur d'un ensemble de variables liées entre elles, on préserve la combinaison intéressante qu'elles représentent.

Alors que *DecalJournee* préserve grandement le cadencement des lignes, *DecalCorrExistantes* est axé vers la préservation des possibilités de correspondances existantes.

Dans les trois voisinages précédents, la valeur du décalage horaire $n \in \mathbb{Z}^*$ est choisie aléatoirement de manière à respecter les contraintes de décalage horaire maximal autorisé.

DecalCorrIdeales

Un mouvement issu du voisinage *DecalCorrIdeales* modifie la valeur d'un ensemble donné de variables. Une solution voisine est obtenue par le procédé suivant :

- Sélection d'une variable $r \in \mathcal{R}$ aléatoirement.
- Détermination de l'ensemble des variables à impacter simultanément. Il s'agit de l'ensemble des dessertes dont les domaines contiennent des valeurs permettant une possibilité de correspondance avec certaines valeurs du domaine de r (voir Section 2.3.2).
- Pour chacune de ces variables impliquées, détermination du décalage qui va s'appliquer à leur valeur. Ce décalage doit permettre de se rapprocher au maximum du temps d'attente idéal pour la correspondance tout en restant dans le domaine de la variable.

On peut noter $mv_{DCI} = (r)$ un mouvement de ce voisinage. Soient $maxDom_{r^*}$ et $minDom_{r^*}$ les deux valeurs de \mathcal{H} qui encadrent le domaine associé à la variable r^* . Ces

valeurs sont calculées en fonction de la valeur de r^* dans la configuration initiale et de l'intervalle de décalage maximal autorisé pour la ligne. Soit $interDom_{r,r^*}$ un booléen (issu du prétraitement des données) qui indique si les domaines des deux variables r et r^* contiennent des valeurs générant une possibilité de correspondance. Si une telle relation existe entre r et r^* , alors dId_{r,r^*} est la valeur de \mathbb{Z} qui doit séparer les valeurs associées à r et r^* pour créer une possibilité de correspondance bénéficiant d'un temps d'attente idéal.

Soit $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{R}|})$ la configuration courante, $mv_{DCI} = (r)$ le mouvement sélectionné, et $\sigma' = \sigma \circ mv_{DCI}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_{|\mathcal{R}|})$ répond à la description suivante :

$$\forall r^* \in \mathcal{R}, t'_{r^*} = \begin{cases} \min(t_{r^*} + dId_{r,r^*}, \max Dom_{r^*}) & \text{si } interDom_{r,r^*} \text{ et } dId_{r,r^*} \in \mathbb{Z}^{+*} \\ \max(t_{r^*} + dId_{r,r^*}, \min Dom_{r^*}) & \text{si } interDom_{r,r^*} \text{ et } dId_{r,r^*} \in \mathbb{Z}^{-*} \\ t_{r^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

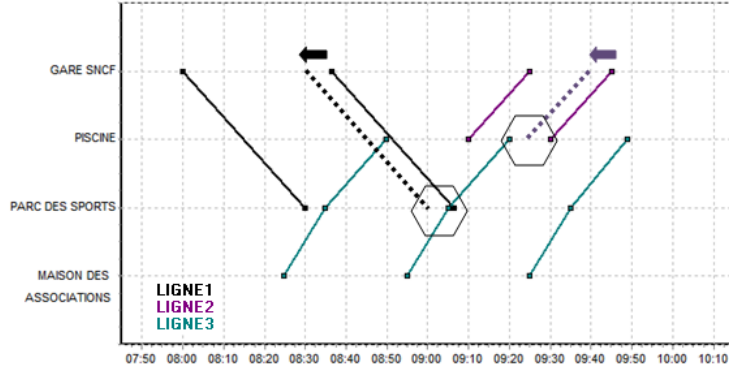


FIGURE 2.7 – Exemple de mouvement de *DecalCorrIdeales* : $mv_{DCI} = (\text{desserte2 de la ligne3})$, avec un temps idéal de correspondance de 5 minutes.

De la même manière que *DecalJournee* et *DecalCorrExistantes*, *DecalCorrIdeales* est assimilable à une composition de mouvements de *DecalDesserte*.

L'idée sous-jacente de ce mécanisme de voisinage est de parfaire les possibilités de correspondances intramodales liées à une desserte donnée, tout en restant dans le domaine réalisable (quand la valeur de temps d'attente ne peut être égale à la valeur idéale, on s'en approche au mieux).

Le voisinage *DecalCorrIdeales* crée ainsi de bonnes propriétés dans la configuration, dont on suppose qu'elles peuvent ensuite être réutilisées et mises à profit par le voisinage *DecalCorrExistantes* (voir Section 2.4.4).

2.3.5 Taille des voisinages

De par la nature des contraintes du problème, la taille des voisinages est indépendante des configurations explorées. Pour les voisinages *DecalDesserte* et *DecalCorrExistantes*, il

existe pour toute configuration donnée, $2 * \lceil S \rceil * |\mathcal{R}|$ configurations voisines. Pour *DecalJournée*, il existe à tout moment de la recherche, $2 * \lceil S \rceil * |\mathcal{L}|$ configurations voisines. Pour *DecalCorrIdeales*, il en existe $|\mathcal{R}|$.

Ainsi, pour une configuration donnée, *DecalDesserte* et *DecalCorrExistantes* permettent d'atteindre le plus grand nombre de solutions voisines parmi les quatre voisinages.

2.4 Résultats

Dans un premier temps, nous présentons une analyse des performances des voisinages employés individuellement. Pour une comparaison objective, nous les utilisons au sein de méthodes de recherches dépendant de peu de paramètres : la descente simple et la meilleure descente. Pour ces méthodes, seuls les mouvements de coût strictement négatifs (*i.e.* améliorants) sont acceptés.

Dans un deuxième temps, nous étudions les meilleures combinaisons de ces voisinages et méthodes afin d'optimiser la qualité de fonction objectif obtenue.

2.4.1 Jeux de tests

Nos expérimentations se basent sur un réseau interurbain réel d'une vaste zone géographique française, en l'occurrence le département du Loiret (Figure 2.8). Cette zone couvre trois villes de taille moyenne et de nombreux villages. Les caractéristiques numériques principales de ce réseau lors d'une journée typique d'exploitation sont exposées dans le tableau 2.1. Les activités externes en connexion avec le réseau incluent les arrivées et départs de trains ainsi que les entrées et sorties de collèges et lycées. Un type de correspondance est une paire de lignes qui se croisent à un arrêt du réseau et par conséquent entre lesquelles des correspondances sont susceptibles d'être créées.

Dans le contexte interurbain, la plupart des lignes fonctionnent de manière non continue, avec des pics d'activité entre 07h00 et 09h00, 12h00 et 14h00, et 17h00 et 19h00. La couverture temporelle est variable entre lignes principales et lignes secondaires du réseau.

	Lignes	Arrêts	Dessertes	Lignes externes	Types de correspondances
Quantité	50	673	318	30	282

TABLE 2.1 – Portrait chiffré du réseau de test.

La situation existante constitue la solution initiale σ_0 de notre méthode de recherche locale. Le jeu de pondérations utilisé pour les tests est de $w_1 = 50$ et $w_2 = 5$. Ce jeu a été choisi de manière à prendre en compte les deux objectifs de qualité de service (les fonctions de coût ne sont pas normalisées). Une évaluation à l'aide des fonctions de coût exposées dans ce chapitre fournit les valeurs de départ suivantes : $f(\sigma_0) = -3966.09$, $w_1 * cost_1(\sigma_0) = -6383.98$ et $w_2 * cost_2(\sigma_0) = 2417.89$.

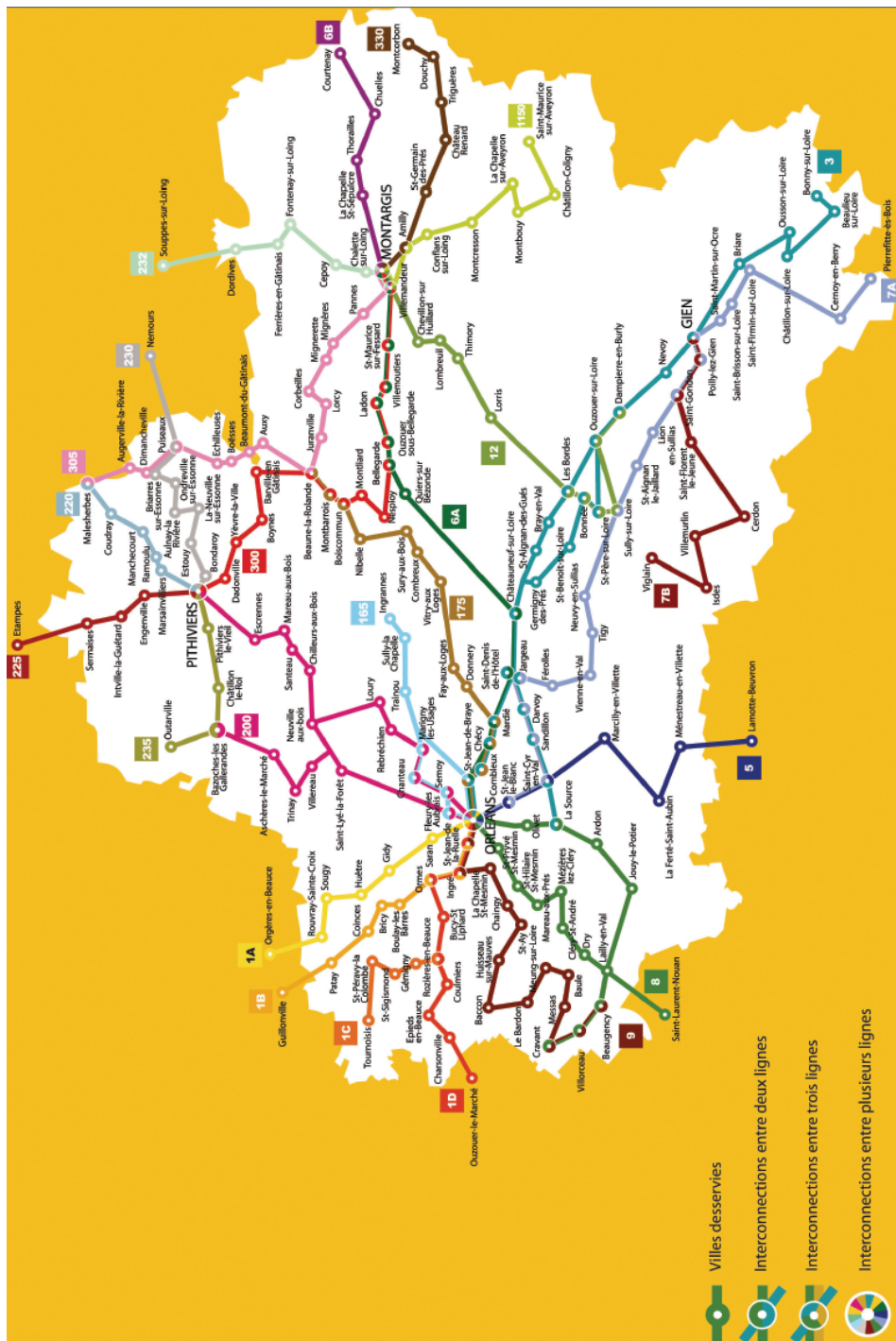


FIGURE 2.8 – Réseau du Loiret

Un décalage maximal par desserte a été fixé à 10 minutes pour l'ensemble du réseau. Ce paramètre amène la taille de l'espace de recherche à $21^{318} \simeq 2.922E420$ configurations. Les différents voisinages permettent d'atteindre 6360 configurations voisines dans le cas de *DecalDesserte* et *DecalCorrExistantes*, 318 dans le cas de *DecalCorrIdeales*, et 1000 dans le cas de *DecalJournee* (voir Section 2.3.5).

2.4.2 Conditions de test

Notre algorithme a été codé en C++, compilé avec VC++ 9.0, sur un ordinateur portable équipé de Windows Vista, d'un processeur 2.10 Ghz Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU et disposant de 4Go RAM.

Chaque algorithme a fait l'objet de 30 lancements indépendants en raison de la nature stochastique des méthodes utilisées. Les méthodes de descente simple ont par essence un comportement aléatoire, quant à la méthode de meilleure descente que nous avons implémentée, elle sélectionne aléatoirement un des mouvements à appliquer parmi ceux de meilleur coût. L'objectif de la série de tests pour chaque algorithme est ainsi d'obtenir des échantillons de valeurs statistiquement significatifs.

Chaque algorithme est de plus limité par un critère d'arrêt défini à 2 minutes de temps de calcul CPU, afin d'accorder des chances égales à chacun. De plus, nous avons constaté une atteinte de minima locaux nettement inférieure à cette valeur pour chaque algorithme, comme nous l'exposons dans la section à venir, signifiant que ce temps de calcul est suffisant.

2.4.3 Analyse des voisinages individuels

Les méthodes que nous comparons ici sont les suivantes :

- DS_{DD} : Descente Simple basée sur le voisinage *DecalDesserte* ;
- DS_{DJ} : Descente Simple basée sur le voisinage *DecalJournee* ;
- DS_{DCE} : Descente Simple basée sur le voisinage *DecalCorrExistantes* ;
- DS_{DCI} : Descente Simple basée sur le voisinage *DecalCorrIdeales* ;
- MD_{DD} : Meilleure Descente basée sur le voisinage *DecalDesserte* ;
- MD_{DJ} : Meilleure Descente basée sur le voisinage *DecalJournee* ;
- MD_{DCE} : Meilleure Descente basée sur le voisinage *DecalCorrExistantes* ;
- MD_{DCI} : Meilleure Descente basée sur le voisinage *DecalCorrIdeales*.

Les figures 2.9 à 2.12 présentent l'évolution de la fonction objectif pour les méthodes de descente simple et de meilleure descente basées sur chacun des voisinages. Le zoom a été porté sur les premières secondes, jusqu'à obtention du plateau de stagnation correspondant à l'atteinte d'un minimum local. L'échelle de temps peut ainsi différer selon l'algorithme étudié.

Le tableau 2.2 présente les résultats détaillés pour la solution initiale et pour chacune des méthodes en termes de fonction objectif et coût par objectif. Pour chacun de ces critères, la valeur moyenne et l'écart-type sont présentés.

DecalDesserte

La figure 2.9 montre que les deux méthodes aboutissent à une solution de qualité équivalente. La différence se fait principalement sur le temps de convergence vers le minimum local. Alors que dans le cas de la descente simple, le plateau est atteint pratiquement immédiatement, dans le cas de la meilleure descente, il n'est atteint qu'au bout de 10 secondes. Ceci est lié à la taille du voisinage (6360 configurations) à explorer à chaque itération pour la méthode de meilleure descente.

Le tableau 2.2 (lignes 1, 2 et 6) indique les valeurs atteintes avec plus de précision, et confirme la proximité des solutions obtenues par DS_{DD} par MD_{DD} en termes de coût total, avec respectivement 189.53% et 189.20% d'amélioration de la fonction objectif.

La différence entre les résultats obtenus par les deux méthodes n'est pas statistiquement significative, le test de Student ne permettant pas de rejeter l'hypothèse nulle (avec une p-value de 0.82). Le temps de calcul nécessaire est par contre un critère discriminant dans ce cas, celui demandé par MD_{DD} étant beaucoup plus important que celui demandé par DS_{DD} . Suite à ces résultats, nous ne sélectionnons pas MD_{DD} comme algorithme à intégrer à la stratégie multialgorithme. Le risque est en effet de passer trop de temps dans l'exploration du voisinage, en particulier si l'on augmente la valeur du décalage autorisé ou si l'on ajoute des dessertes au réseau.

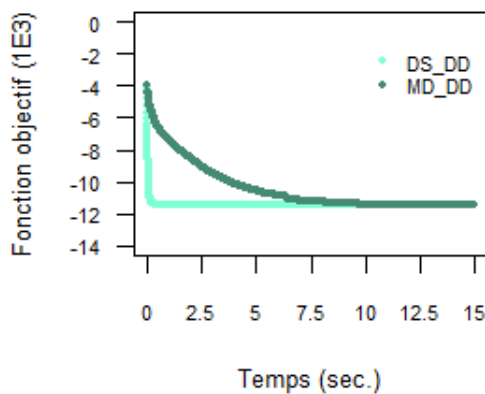


FIGURE 2.9 – Évolution de la fonction objectif pour DecalDesserte

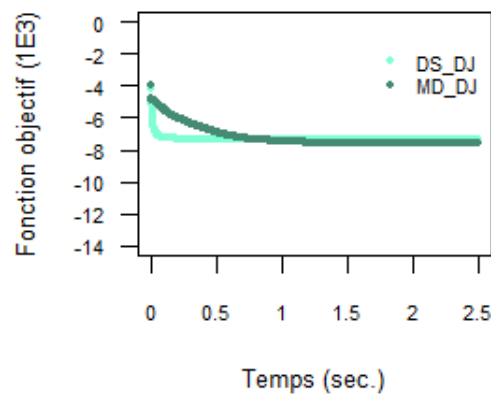


FIGURE 2.10 – Évolution de la fonction objectif pour DecalJournee

DecalJournee

Sur la figure 2.10, on constate que la descente aléatoire permet d'atteindre un minimum local presque instantanément, alors que MD_{DJ} met environ 1.5 secondes à atteindre le sien, ce qui reste un temps de calcul raisonnable. Cette figure le montre et le tableau 2.2 (lignes

1, 3 et 7) le confirme, MD_{DJ} permet d'atteindre une meilleure valeur de fonction objectif, avec 91.45% d'amélioration par rapport à 84.14% pour DS_{DJ} . Le test de Student conduit sur les deux séries de résultats a d'ailleurs validé que la différence est statistiquement significative (p-value = 0.00046).

MD_{DJ} et DS_{DJ} présentent ainsi des avantages divers (rapidité et qualité) qui nous incitent à poursuivre les tests sur les deux méthodes.

DecalCorrExistantes

La figure 2.11 montre à nouveau que l'atteinte du minimum local est plus rapide avec la méthode de descente aléatoire qu'avec celle de meilleure descente, cette dernière atteignant un plateau aux environs de 45 secondes de temps de calcul. Ceci reflète en partie la supériorité du temps demandé par l'évaluation des mouvements de ce voisinage par rapport aux autres.

Le tableau 2.2 (lignes 1, 4 et 8) indique des performances peu éloignées en termes de valeur de fonction objectif atteinte pour DS_{DCE} et MD_{DCE} , avec respectivement 138.87% et 138.12% d'amélioration. La différence entre les résultats obtenus par les deux méthodes n'est pas statistiquement significative, le test de Student conduit ne permettant pas de rejeter l'hypothèse nulle (avec une p-value de 0.48). Le temps de calcul nécessaire est par contre un critère discriminant dans ce cas, celui demandé par MD_{DCE} étant beaucoup plus important que celui demandé par DS_{DCE} .

La différence conséquente de rapidité entre les deux méthodes nous pousse à préférer l'utilisation de DS_{DCE} à celle de MD_{DCE} . Au vu de ces résultats, nous ne sélectionnons pas MD_{DCE} pour l'intégration à la stratégie multialgorithme, pour les mêmes raisons que nous avons éliminé MD_{DD} .

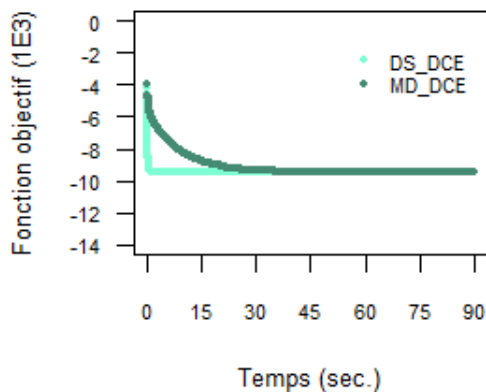


FIGURE 2.11 – Évolution de la fonction objectif pour DecalCorrExistantes

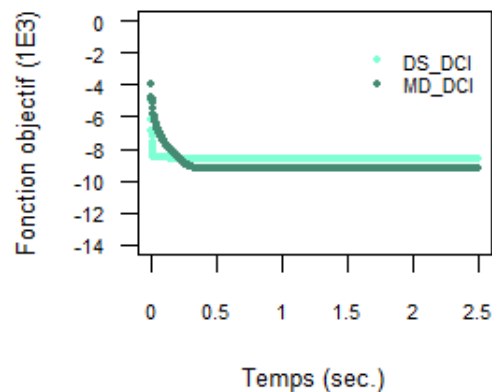


FIGURE 2.12 – Évolution de la fonction objectif pour DecalCorrIdeales

DecalCorrIdeales

Sur la figure 2.12, on constate que MD_{DCI} réalise une performance notablement meilleure en termes de valeur de fonction objectif atteinte, avec 131.99% d'amélioration en comparaison de 116.41% pour DS_{DCI} (Tableau 2.2, lignes 1, 5 et 9). Le test de Student rejette d'ailleurs l'hypothèse nulle (avec une p-value de 1.52E-16).

Cependant, la méthode de descente simple est préférable selon un critère de temps de calcul (particulièrement si l'on souhaite s'affranchir d'éventuelles limitations qui pourraient apparaître avec des réseaux beaucoup plus grands). C'est pourquoi nous proposons de soumettre les deux algorithmes à des tests supplémentaires au sein d'une méthode multialgorithme.

Comparaison entre algorithmes

Le tableau 2.2 compile les résultats obtenus par méthode sur l'ensemble des tests.

En termes de performance décroissante par rapport à la valeur de fonction objectif obtenue, on obtient le classement d'algorithmes suivant :

$$DS_{DD} > MD_{DD} > DS_{DCE} > MD_{DCE} > MD_{DCI} > DS_{DCI} > MD_{DJ} > DS_{DJ}.$$

Le voisinage *DecalDesserte* est nettement le plus performant, suivi de *DecalCorrExistantes*, *DecalCorrIdeales* et enfin *DecalJournée*.

Au cours de l'analyse par algorithme, nous avons éliminé MD_{DD} et MD_{DCE} en raison du temps de calcul qu'ils nécessitent. Dans la section suivante, nous étudions les combinaisons possibles des autres algorithmes au sein d'une recherche dite de token ring, dans le but de créer un effet de synergie entre leurs pouvoirs d'intensification et de diversification.

2.4.4 Recherche multialgorithme

La stratégie de recherche token ring est prônée par plusieurs auteurs [DiGaspero, 2003; Glover et Laguna, 1997]. L'utilisation de diverses méthodes amène notamment une diversification de la recherche, permettant de s'extraire d'optima locaux.

Le tableau 2.2 et les figures 2.9 à 2.12 montrent une nette supériorité du voisinage *DecalDesserte* par rapport aux autres. Cependant, il atteint rapidement un minimum local. Aussi, il peut être souhaitable de le combiner avec d'autres voisinages porteurs de diversification au sein d'une métaheuristique plus complexe que les méthodes de descentes utilisées précédemment dans ce chapitre.

Dans cette section, nous cherchons à combiner au mieux les algorithmes (méthode de recherche locale associée à un type de voisinage) exposées dans la section précédente au sein d'une stratégie token ring. Pour cela, il faut identifier quels algorithmes intégrer et dans quel ordre.

Dans un premier temps, on souhaite analyser les performances conjointes de *DecalCorrIdeales* et *DecalCorrExistantes*, car on émet l'hypothèse que ces deux voisinages peuvent se compléter. Dans un deuxième temps, on cherche à combiner ces deux voisinages avec *DecalDesserte*, qui a déjà montré sa grande efficacité au sein d'une recherche monovoisinage. Enfin, nous testons l'intégration de *DecalJournée* à l'ensemble, afin de voir si ce voisinage permet d'apporter des atouts supplémentaires au sein de la stratégie token ring.

		Fonction Objectif $f(\sigma)$	Objectif de Correspondances $w_1 * cost_1(\sigma)$	Objectif de Cadencement $w_2 * cost_2(\sigma)$
Solution Initiale		-3966.09	-6383.98	2417.89
<i>DS_{DD}</i>	moyenne	-11482.89	-13159.48	1676.59
Descente Simple	écart-type	309.66	314.68	35.66
DecalDesserte	évolution (%)	-189.53	-106.13	-30.66
<i>DS_{DJ}</i>	moyenne	-7303.31	-9733.71	2430.39
Descente Simple	écart-type	144.62	130.39	30.89
DecalJournee	évolution (%)	-84.14	-52.47	+0.52
<i>DS_{DCE}</i>	moyenne	-9473.82	-11153.27	1679.47
Descente Simple	écart-type	229.83	240.84	40.83
DecalCorrExistantes	évolution (%)	-138.87	-74.71	-30.54
<i>DS_{DCI}</i>	moyenne	-8582.87	-10930.18	2347.31
Descente Simple	écart-type	272.54	272.45	27.95
DecalCorrIdeales	évolution (%)	-116.41	-71.21	-2.92
<i>MD_{DD}</i>	moyenne	-11469.89	-13175.19	1705.36
Meilleure Descente	écart-type	0.03	0.03	0.06
DecalDesserte	évolution (%)	-189.20	-106.38	-29.47
<i>MD_{DJ}</i>	moyenne	-7593.14	-10003.3	2410.13
Meilleure Descente	écart-type	0	0	0
DecalJournee	évolution (%)	-91.45	-56.69	-0.32
<i>MD_{DCE}</i>	moyenne	-9444.02	-11159.6	1715.6
Meilleure Descente	écart-type	0.02	0	0.02
DecalCorrExistantes	évolution (%)	-138.12	-74.81	-29.04
<i>MD_{DCI}</i>	moyenne	-9200.85	-11543.61	2342.72
Meilleure Descente	écart-type	113.26	109.92	15.40
DecalCorrIdeales	évolution (%)	-131.99	-80.82	-3.11

TABLE 2.2 – Résultats obtenus par les voisinages utilisés individuellement

Les résultats pour l'ensemble des expérimentations menées sont présentés dans le tableau 2.3. Les combinaisons de token ring y sont renommées et classées par moyenne décroissante de valeur de fonction objectif.

Pour chacun des algorithmes étudiés, nous avons défini un critère d'arrêt basé sur le nombre d'itérations sans amélioration. Pour les méthodes de descente simple, ce nombre est dépendant de la taille du voisinage, à savoir 1.5 fois cette valeur, moment à partir duquel on considère que la recherche a atteint un minimum local. Ce critère d'arrêt vient s'ajouter à celui défini précédemment de temps de calcul CPU global et fixé à 2 minutes. Afin de toujours tirer profit de l'aspect multivoisinage du token ring, nous avons également défini un temps de calcul maximal pour chaque algorithme, permettant à chacune de contribuer

au minimum 3 fois à la stratégie ($maxTemps(n) = maxTemps/(N * 3)$).

Combinaison de DecalCorrIdeales et DecalCorrExistantes

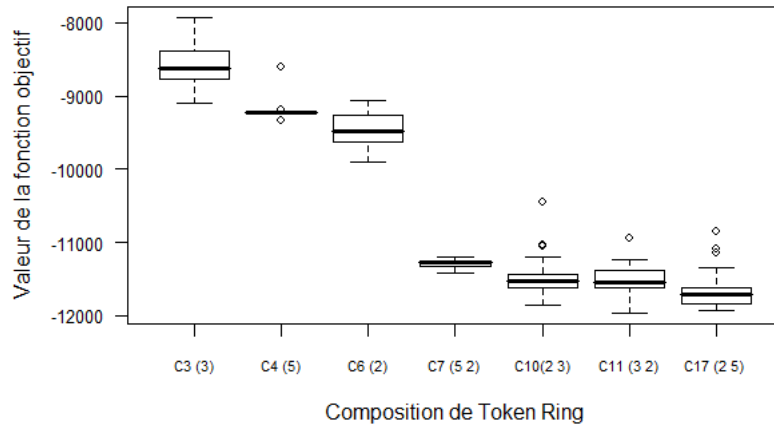


FIGURE 2.13 – Résultats obtenus par les compositions utilisant DecalCorrIdeales et DecalCorrExistantes. 2 : DS_{DCE} ; 3 : DS_{DCI} ; 5 : MD_{DCI} . Les compositions sont triées par moyenne décroissante.

Nous supposons que les deux voisinages *DecalCorrIdeales* et *DecalCorrExistantes* possèdent des propriétés complémentaires qui peuvent leur permettre une efficacité supérieure dans le cadre d’une utilisation conjointe. Alors que le premier crée des associations de variables dont les valeurs prises dans leur ensemble constituent une bonne propriété pour la configuration, le deuxième cherche à améliorer la qualité globale de la configuration en préservant ces bonnes propriétés. Nous testons à cette fin 4 compositions de token ring : $C10(DS_{DCE}, DS_{DCI})$, $C11(DS_{DCI}, DS_{DCE})$, $C7(MD_{DCI}, DS_{DCE})$ et $C17(DS_{DCE}, MD_{DCI})$. L’algorithme MD_{DCE} ayant montré une trop grande lenteur à la section précédente, nous le laissons désormais de côté.

Les résultats comparatifs de ces expérimentations sont présentés dans la figure 2.13. On y constate une nette supériorité de performances des approches combinées de *DecalCorrIdeales* et *DecalCorrExistantes* par rapport aux approches qui les utilisent individuellement. Les résultats obtenus permettent même de dépasser, en moyenne, ceux obtenus par *DecalDesserte* (Tableau 2.3). Le test de Student entre les séries de résultats obtenus par C17 et C9 a d’ailleurs rejeté l’hypothèse nulle (avec une p-value de 0.02), validant le fait que la différence observée est statistiquement significative. Ceci tend à valider l’hypothèse que ces deux voisinages possèdent des propriétés complémentaires qu’il est intéressant de combiner.

Combinaison de DecalCorrIdeales, DecalCorrExistantes et DecalDesserte

Ayant constaté les bonnes performances de *DecalDesserte* et de la combinaison de *DecalCorrIdeales* et *DecalCorrExistantes*, nous testons maintenant toutes les combinaisons possibles de DS_{DD} avec DS_{DCE} et soit DS_{DCI} soit MD_{DCI} afin de tirer profit de leurs bonnes propriétés respectives.

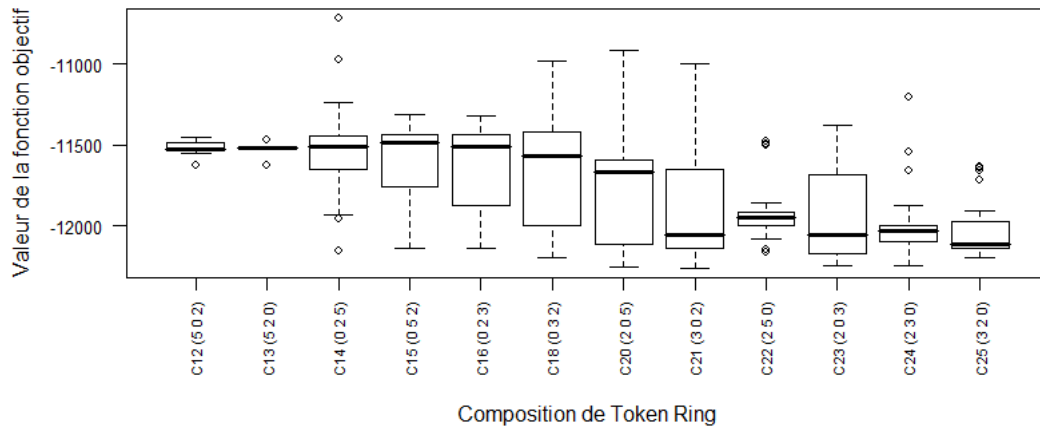


FIGURE 2.14 – Résultats obtenus par les compositions utilisant DecalDesserte, DecalCorrIdeales et DecalCorrExistantes. 0 : DS_{DD} ; 2 : DS_{DCE} ; 3 : DS_{DCI} ; 5 : MD_{DCI} . Les compositions sont triées par moyenne décroissante.

On constate sur la figure 2.14 que la combinaison C25 ($DS_{DCI}/DS_{DCE}/DS_{DD}$) fournit la valeur médiane la plus basse, la valeur moyenne la plus faible (les combinaisons sont triées par moyenne décroissante, cf. Tableau 2.3), ainsi que la valeur maximale la plus faible. C'est donc cette combinaison que nous sélectionnons pour la suite. La valeur moyenne de fonction objectif obtenue est de -12038.04, faisant de C25 la meilleure combinaison testée jusqu'alors. Le test de Student entre les séries de résultats obtenus par C17 (meilleure combinaison à 2 voisinages) et C25 (meilleure combinaison à 3 voisinages) a d'ailleurs permis de rejeter l'hypothèse nulle (avec une p-value de 1.46E-08).

On observe que les combinaisons utilisant MD_{DCI} ont globalement été moins efficaces que celles utilisant DS_{DCI} . La combinaison de *DecalCorrIdeales* avec *DecalCorrExistantes* dans cet ordre et de *DecalDesserte* constitue par contre un ensemble performant. Malgré les résultats plus faibles obtenues par *DecalJournée*, nous allons terminer par tester l'intérêt de l'inclusion de ce voisinage dans la combinaison totale.

Combinaison des quatre voisinages

La dernière étape consiste à tester l'inclusion de *DecalJournée* dans les combinaisons de token ring. Lors des tests par voisinage individuel, c'est *DecalJournée* qui s'était révélé

	Composition du token ring	Valeur Moyenne	Écart- type	Valeur Minimale	Valeur Maximale
C1	1	-7303.31	144.62	-7592.36	-7003.34
C2	4	-7593.14	0	-7593.14	-7593.14
C3	3	-8582.87	272.54	-9099.18	-7935.56
C4	5	-9200.85	113.26	-9332.99	-8614.15
C5	7	-9444.02	0.02	-9444.03	-9443.97
C6	2	-9473.82	229.83	-9895.14	-9065.68
C7	5 2	-11289.62	55.63	-11411.4	-11209.2
C8	6	-11469.89	0.03	-11469.9	-11469.8
C9	0	-11482.89	309.66	-12006.5	-10999.3
C10	2 3	-11485.92	271.74	-11866.9	-10451.1
C11	3 2	-11506.42	212.47	-11962.2	-10948.4
C12	5 0 2	-11518.87	33.45	-11626.6	-11458
C13	5 2 0	-11523.9	23.23	-11630.8	-11467.7
C14	0 2 5	-11529.73	275.59	-12157.4	-10718.7
C15	0 5 2	-11593.77	239.29	-12140.9	-11312.8
C16	0 2 3	-11609.26	263.51	-12136.5	-11318.2
C17	2 5	-11652.74	262.74	-11926.7	-10857.5
C18	0 3 2	-11668.69	322.31	-12197	-10982.7
C19	4 3 2 0	-11697.19	190.35	-12258.7	-11522.4
C20	2 0 5	-11785.67	350.25	-12255.6	-10917.1
C21	3 0 2	-11929.10	162.54	-12164	-11477.7
C22	2 5 0	-11930.39	321.59	-12263.4	-10998.8
C23	2 0 3	-11963.33	253.97	-12245	-11380.5
C24	2 3 0	-11996.49	209.37	-12243.9	-11202
C25	3 2 0	-12038.04	169.65	-12199.2	-11632.4
C26	1 3 2 0	-12092.97	308.98	-12557	-11262.9
C27	3 2 1 0	-12121.57	250.89	-12500	-11621.4
C28	3 4 2 0	-12150.59	338.47	-12851	-11328
C29	3 2 4 0	-12162.45	247.28	-12441.2	-11653.4
C30	3 1 2 0	-12177.68	234.09	-12503.3	-11552.8
C31	3 2 0 1	-12215.20	170.43	-12486.6	-11741.8
C32	3 2 0 4	-12272.8	132.98	-12506.2	-11933.4

TABLE 2.3 – Valeurs de fonction objectif pour la solution finale obtenue par les différentes compositions de token ring.

Les compositions sont triées par moyenne décroissante. 0 : DS_{DD} ; 1 : DS_{DJ} ; 2 : DS_{DCE} ; 3 : DS_{DCI} ; 4 : MD_{DJ} ; 5 : MD_{DCI} ; 6 : MD_{DD} ; 7 : MD_{DCE}

comme étant de loin le moins performant. Cependant, de par sa structure de composition de mouvements de *DecalDesserte*, il est susceptible d'apporter une impulsion porteuse de diversification au processus global. Nous testons son inclusion sous forme de DS_{DJ} et MD_{DJ} dans la composition C25 obtenue précédemment.

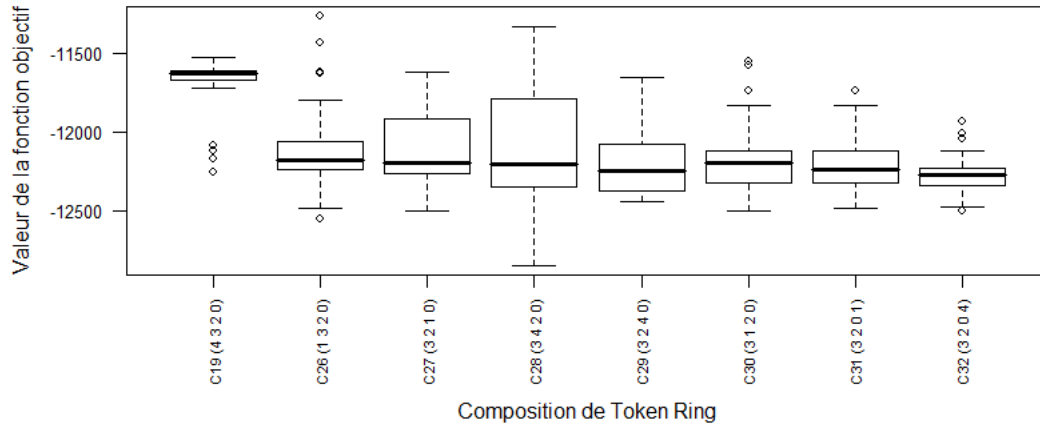


FIGURE 2.15 – Résultats obtenus par les compositions utilisant les quatre voisinages.
 0 : DS_{DD} ; 1 : DS_{DJ} ; 2 : DS_{DCE} ; 3 : DS_{DCI} ; 4 : MD_{DJ} .
 Les compositions sont triées par moyenne décroissante.

La figure 2.15 présente les résultats obtenus par les combinaisons à quatre voisinages. Les deux meilleures combinaisons testées préservent la séquence DCI/DCE, ce qui assoit à nouveau la conclusion de leur bonne complémentarité. Des résultats légèrement meilleurs sont obtenus avec la technique de meilleure descente qu'avec la technique de descente simple pour le voisinage *DecalJournée*.

Un test de Student réalisé entre les séries de résultats obtenus par C25 (meilleure combinaison à 3 voisinages) et C32 (meilleure combinaison à 4 voisinages) a rejeté l'hypothèse nulle (avec une p-value de 8.6E-08).

La figure 2.16 présente le détail de l'évolution moyenne de la fonction objectif sur l'ensemble des lancements de C32, et ce en fonction de l'amélioration apportée par chaque algorithme. Seules les 8 premières boucles sont représentées sur ce graphique en bâtons. En moyenne 212 boucles sont parcourues au cours du temps de calcul imparti, montrant que le critère d'arrêt de nombre de mouvements stagnants maximal est largement utilisé au sein des algorithmes individuels. En ce qui concerne le temps de calcul total, il pourrait être nettement diminué avec peu de perte de performance, 99.87% de l'amélioration totale étant obtenue à l'issue des quatre premières boucles du token ring en moyenne.

Alors qu'au cours des 6 premières boucles, chaque voisinage apporte des améliorations à la valeur de la fonction objectif, au cours des boucles suivantes, ce n'est plus le cas. En moyenne, sur la durée du test, DS_{DCI} apporte une amélioration au cours de 10 des boucles, DS_{DCE} au cours de 74 des boucles, DS_{DD} au cours de 16 des boucles et MD_{DJ}

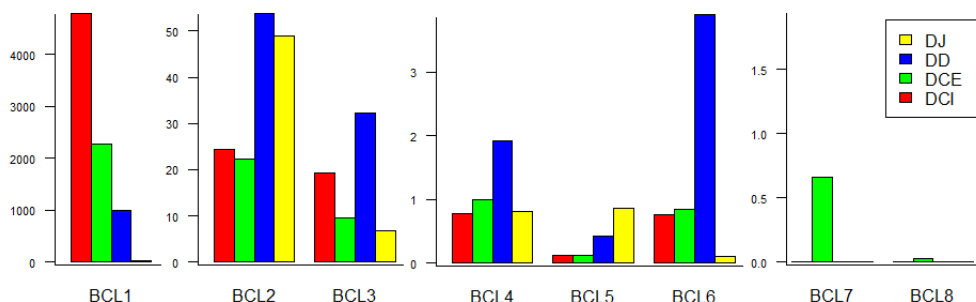


FIGURE 2.16 – Amélioration en valeur absolue apportée à la fonction objectif par chacun des algorithmes à l’intérieur des boucles du token ring C32

au cours de 30 des boucles. Parallèlement, en termes d’amélioration cumulée à la fonction objectif par rapport à l’ensemble des voisinages, DS_{DCI} apporte le maximum avec 58.15%, viennent en suite DS_{DCE} avec 27.78%, DS_{DD} avec 13.10% et MD_{DJ} avec 0.97%. Notons que ces proportions reflètent les positions respectives des algorithmes dans le token ring et sont également à considérer au regard du jeu de données et de pondérations utilisé.

Le token ring basé sur la combinaison C32 se distingue ainsi comme la meilleure stratégie à appliquer pour notre problème de détermination des horaires dans un objectif de qualité de service. En termes plus concrets, l’amélioration apportée à la qualité de la solution initiale par C32 correspond à une augmentation nette du nombre de possibilités de correspondances, qui passe de 180 à 306.23 en moyenne (avec un écart-type de 4.12). L’intégration du voisinage *DecalJournee* à la combinaison à 3 algorithmes permet d’obtenir une amélioration statistiquement significative de la valeur de fonction objectif obtenue. Ceci s’explique par un fort pouvoir de diversification de la recherche, MD_{DJ} ayant contribué par 30 fois à l’amélioration de la qualité des solutions courantes, quand bien même pour un gain minime (0.97% de l’amélioration totale).

2.5 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème de détermination des horaires dans un réseau en fonctionnement, avec une optique de qualité de service. Nous avons défini les objectifs de régularité du cadencement et de qualité et de quantité de correspondances pour représenter cette notion. Des fonctions de coût complexes sont utilisées pour s’adapter aux besoins réels des réseaux de transport (prise en compte de plannings à heures creuses et heures de pointe, de l’intermodalité, de différentes caractéristiques des correspondances).

Nous avons utilisé un modèle basé sur un niveau de détail important, en définissant les variables comme l’ensemble des dessertes, par opposition à beaucoup d’études qui considèrent pour cela l’ensemble des lignes (une ligne représentant un groupe de dessertes). Relativement à ce modèle souple, nous avons défini quatre voisinages. Le premier tire pro-

fit de la structure du modèle de manière directe et permet en théorie une exploration totale de l'espace de recherche par des mouvements simples et rapides. Les trois autres sont des compositions intelligentes des mouvements du premier, et tirent parti de la structure du problème. Ils permettent de créer et/ou de préserver de bonnes propriétés des configurations rencontrées, en l'occurrence de bonnes associations de valeurs affectées à un ensemble de variables.

Nous avons procédé à des séries de tests sur des données émanant d'un réseau de transport réel afin de comparer les performances de chacun des voisinages et de leurs combinaisons au sein d'une stratégie multialgorithme. Les résultats fournis par l'approche mise en place sont concluants par comparaison à la situation initiale et à l'usage de voisinages simples de la littérature. La force de la méthode proposée s'appuie sur trois fondements :

- le modèle utilisé, qui permet une bonne flexibilité ;
- les voisinages complexes implémentés, qui savent tirer parti du modèle et de la structure du problème ;
- la stratégie de recherche multialgorithme, qui permet de mutualiser les forces de chaque voisinage et de mettre à profit leur complémentarité.

Nous avons ainsi proposé une combinaison de quatre algorithmes intégrée dans une unique stratégie de recherche qui permet d'obtenir un gain sensible en termes de quantité de correspondances et plus généralement en termes de valeur de fonction objectif obtenue.

Enfin, le niveau de détail permis par le modèle n'a pas mis en péril l'applicabilité d'une méthode efficace, les temps de calcul nécessaires pour un réseau à l'échelle d'un département restant très faibles. Bien que nous n'ayons pu multiplier les jeux de données, ces résultats viennent valider l'intérêt du modèle et de la méthode développée.

Une piste supplémentaire de travail serait d'implémenter, au sein du token ring et pour chacun des voisinages, une méthode tabou qui viendrait remplacer les méthodes de descente afin de multiplier les sources de diversification au cours du processus de recherche.

Dans le chapitre suivant, nous allons intégrer au problème étudié ici, des objectifs relatifs au niveau de ressources véhicules nécessaires. Ce problème, encore plus complexe, s'inscrit dans la tendance actuelle de combiner les problématiques de différentes étapes du processus séquentiel de planification du transport.

Chapitre 3

Planification des horaires de lignes et des services véhicules

DANS ce chapitre, nous présentons un modèle pour le problème simultané de création des horaires et des affectations véhicules. Ce problème est également connu sous le nom de *graphicage*. Une formulation sous forme de problème d'optimisation sous contraintes nous permet de représenter le problème et constitue une base pour développer une approche de résolution par métaheuristiques. Pour cette approche, nous mettons en œuvre deux nouveaux voisinages adaptés à notre modèle ainsi qu'un algorithme exact de quasi-affectation linéaire pour l'affectation des véhicules. Nous étudions en particulier la problématique rencontrée par les autorités organisatrices, grâce à un troisième voisinage et à une méthode de post-optimisation. De plus, l'adaptabilité et la flexibilité du modèle et de la méthode permettent de gérer facilement divers cas d'utilisation complémentaires. Des expérimentations sont conduites sur un réseau de transport français réel et produisent des améliorations conséquentes sur la qualité de service comme sur le nombre de véhicules nécessaires. Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication [Guihaire et Hao, 2008b].

Sommaire

3.1	Présentation du problème	67
3.2	État de l'art	68
3.3	Hypothèses de modélisation	69
3.4	Modélisation	70
3.4.1	Données	70
3.4.2	Variables de décision et valeurs	71
3.4.3	Contraintes	72
3.4.4	Objectifs	73

3.5	Approche de résolution	75
3.5.1	Méthode générale	75
3.5.2	Solution initiale	75
3.5.3	Algorithme par enchères	76
3.5.4	Affectation des horaires et des véhicules par TVA	77
3.5.5	Optimisation des services en boucle (LVA) par post-optimisation	81
3.6	Résultats	83
3.6.1	Jeu de tests et paramètres d'expérimentation	83
3.6.2	Références et critères de comparaison	84
3.6.3	Résultats expérimentaux	85
3.6.4	Analyse des voisinages	88
3.7	Adaptabilité du modèle	90
3.8	Synthèse du chapitre	92

3.1 Présentation du problème

Le graphichage regroupe deux des étapes de la planification dans le processus tel que présenté sur la figure 1.3. Ce terme désigne l'action de définir les grilles horaires des lignes et les plannings des véhicules, en liant les courses par des trajets haut-le-pied et en affectant les services aux dépôts.

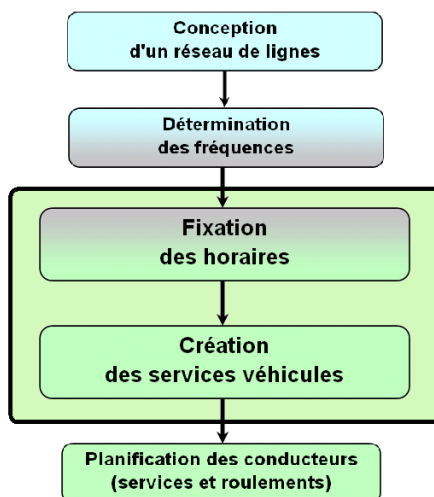


FIGURE 3.1 – Graphichage par rapport au processus de planification

Les résultats fournis par le graphichage se présentent sous différentes formes :

- Les *grilles horaires* par type de jour (Figure 2.1), qui constituent la base des dépliants commerciaux. Pour chaque ligne, la grille présente un ensemble d'arrêts, avec les horaires de passage associés par type de jour. Ces informations sont destinées aux usagers. Elles sont complétées aux arrêts de bus par les grilles horaires de poteau qui indiquent uniquement les heures de passages à l'arrêt concerné. Les types de résultats suivants sont tous à destination des exploitants.
- Les *tableaux de marche* par véhicule, qui représentent les itinéraires chronométrés de chaque véhicule de manière détaillée. Le format de ces tableaux est proche de celui des grilles horaires.
- Le *graphique espace-temps par véhicule* (Figure 3.2), qui présente les services véhicules en fonction du temps et des lieux. En abscisses se trouvent les horaires de la journée, et en ordonnées les arrêts du réseau. Les courses sont représentées par des successions de traits diagonaux dans cet espace. Les traits pleins correspondent à des trajets en charge, les traits en pointillés à des trajets à vide. Le graphique permet de visualiser le parcours précis des véhicules sur la journée.
- Le *graphique espace-temps par ligne*, qui présente de la même manière les dessertes par ligne. Le graphique permet de visualiser les cadencements de ligne sur la journée, et de repérer les correspondances lorsque plusieurs lignes sont affichées.

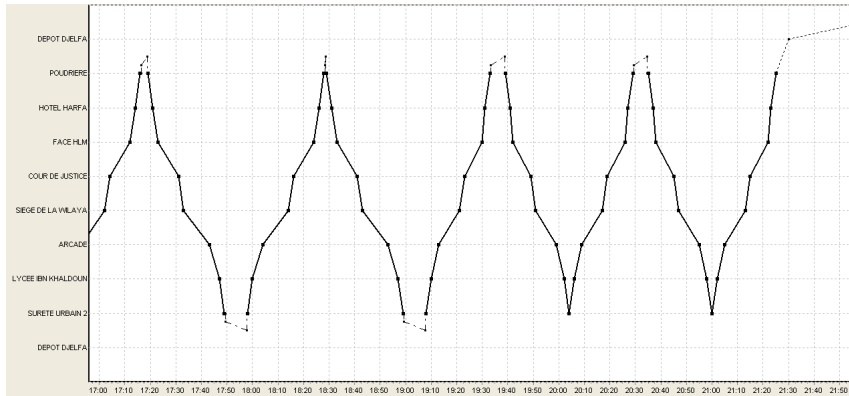


FIGURE 3.2 – Modèle de graphique espace-temps par véhicule.

- Le *graphique à plat* (Figure 3.3), qui représente l'enchaînement des courses servies par chaque véhicule, sous forme de diagramme de Gantt. Il permet notamment de percevoir visuellement l'utilisation des véhicules heure par heure et de réorganiser les plannings en déplaçant les courses d'un véhicule à l'autre.

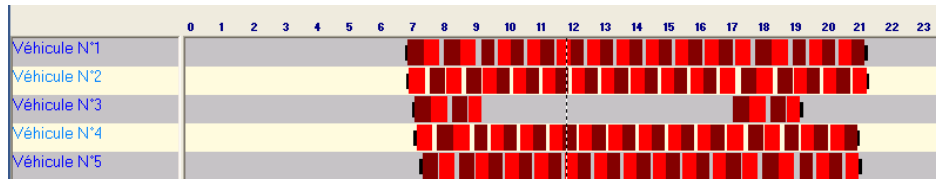


FIGURE 3.3 – Modèle de graphique à plat.

La création des horaires de lignes ainsi que des affectations véhicules constituent deux étapes clés dans le processus de planification du réseau. Une approche combinée du problème doit prendre en compte un ensemble de contraintes et d'objectifs d'optimisation incluant en particulier la qualité de service et le niveau de ressources utilisées (voir Section 1.3.2).

3.2 État de l'art

Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre précédent (Section 2.1.2), les études portant sur le problème de détermination des horaires dans un réseau de transport en commun par bus modélisent souvent le problème sous forme d'un problème de semi-affectation quadratique [Klemt et Stemme, 1988; Daduna et Voss, 1995; Bookbinder et Désilets, 1992]. Le problème consiste alors à affecter une heure de départ à chaque ligne dans l'objectif de minimiser le temps d'attente global des usagers en correspondance. Les horaires des dessertes individuelles sont ensuite simplement déduits en appliquant un cadencement fixe et prédéterminé à chaque ligne [Jansen *et al.*, 2002; Cevallos et Zhao, 2006].

Nous avons constaté au chapitre précédent la rigidité de ce modèle et mis en place

un modèle qui consiste à affecter des horaires de départ à toutes les dessertes et non uniquement à la première desserte de chaque ligne du réseau. Rappelons que [Chakroborty *et al.*, 1995; Chakroborty *et al.*, 1997; Deb et Chakroborty, 1998] ont recours au même type d'affectation en permettant de faire varier le cadencement des lignes à l'intérieur d'un intervalle borné. Cependant, la complexité des modèles proposés dans ces études, ainsi que les méthodes évolutionnaires développées en parallèle, ne permettent de travailler que sur des réseaux de petite taille.

Nous proposons, à l'instar du chapitre précédent, de développer un modèle basé sur une affectation d'horaires à chaque desserte individuellement et pouvant fournir des solutions pour des réseaux de taille réelle.

De plus, nous souhaitons intégrer des considérations économiques au modèle, en prenant comme objectifs à part entière la taille de la flotte à l'échelle du réseau ainsi que le kilométrage à vide impliqué. Rappelons que ces deux coûts économiques sont traditionnellement calculés au cours du problème de création des services véhicules dans le processus de planification du transport exposé au chapitre 1.

Le problème de création des services véhicules peut être considéré sous l'aspect monodépôt ou multidépôt en fonction de la composition de la flotte de véhicules et du nombre de garages [Bunte *et al.*, 2006]. Nous nous positionnons dans la problématique des autorités organisatrices, ce qui signifie qu'au moment où se pose le problème, nous ne disposons pas de ces informations (le choix du transporteur qui remportera l'exploitation du réseau n'ayant pas encore été fait). Le cas se rapporte alors à un problème monodépôt [Paixão et Branco, 1987]. Nous détaillons les autres implications de cette hypothèse dans les sections suivantes.

Récemment, la tendance est à l'intégration d'étapes du processus de planification (Section 1.3). Intégrer l'étape de fixation des horaires avec l'étape de création des services véhicules est pertinent par leur appartenance commune possible au niveau de décision opérationnel et par l'influence directe de la grille horaire sur le nombre de véhicules nécessaires. Cependant, les approches simultanées à ce moment de la planification ont été rares jusqu'à présent dans la littérature. Des contraintes ont parfois été intégrées pour limiter le nombre de véhicules disponibles au moment de la détermination des horaires [Castelli *et al.*, 2004; Chakroborty *et al.*, 1997]. Une solution plus satisfaisante peut être la prise en compte d'objectifs portant sur la taille de la flotte. [Chakroborty *et al.*, 2001] propose ainsi une étude basée sur un réseau simplifié qui intègre des objectifs appartenant initialement aux deux étapes séquentielles. Notons cependant que l'approche est limitée à un réseau de petite taille et que l'interligne n'est pas pris en compte dans l'approche, contraignant fortement l'optimisation de l'utilisation des véhicules dans le réseau. Enfin, [Fleurent *et al.*, 2004] fait également mention d'une approche intégrée à base de résolution de problèmes de flot, de relaxation lagrangienne et d'heuristiques.

3.3 Hypothèses de modélisation

Nous proposons ici un modèle intégré pour le problème d'affectation des horaires et des véhicules. L'approche que nous définissons ici a pour but d'être réaliste et adaptée aux

besoins des planificateurs. C'est pourquoi nous utilisons des données facilement disponibles, telles que des temps de trajet et des cadencements par période, et le niveau d'importance des correspondances, par opposition aux matrices origine-destination par exemple.

Nous considérons des usagers non captifs, qui n'utiliseront pas de correspondance nécessitant plus d'un certain temps d'attente. Ceci implique que l'on doit considérer à la fois la quantité et la qualité des correspondances proposées. Cette qualité est relative au temps d'attente, qui doit s'approcher de la valeur idéale demandée.

Le modèle est capable de gérer des grilles horaires complexes, dans lesquelles les itinéraires varient entre dessertes de la même ligne (en desservant plus ou moins d'arrêts, dans des ordres différents, etc.) Nous prenons également en compte l'interligne, c'est-à-dire que les véhicules peuvent enchaîner des dessertes appartenant à des lignes différentes si c'est une décision économiquement justifiée. Afin de gérer cet aspect, nous permettons au planificateur de définir des groupes de lignes à l'intérieur desquels l'interligne est autorisé.

Nous couvrons trois types de situations afin de répondre aux problématiques des autorités organisatrices comme de celles des exploitants, selon l'importance accordée à la localisation des dépôts dans la création des services véhicules. Cette diversité est explorée dans la section 3.7. Des variantes du même modèle peuvent être utilisées pour les trois cas, aussi nous nous focalisons sur le cas le plus complexe, qui correspond à la perspective des autorités organisatrices. Dans ce cas, la localisation des dépôts n'est pas connue. Cependant, on souhaite créer des services réalistes et approximer la durée des trajets à vide de début et de fin de service. À cette fin, nous considérons chaque service comme une boucle en liant le point d'arrivée de la dernière desserte et le point de départ de la première desserte de chaque service par un haut-le-pied fictif. Nous définissons un modèle à deux niveaux pour gérer cet aspect de services en boucle.

Nous formalisons le modèle dans la partie suivante.

3.4 Modélisation

Nous présentons dans cette section les notations utilisées dans notre modélisation.

Soient \mathcal{G} l'ensemble des groupes de lignes, \mathcal{A} l'ensemble des activités (dont l'ensemble des lignes du réseau \mathcal{L}), \mathcal{R} l'ensemble des dessertes de lignes, \mathcal{S} l'ensemble des arrêts de bus, \mathcal{T} l'ensemble des correspondances, \mathcal{V} l'ensemble des véhicules, et \mathcal{H} l'horizon de planification.

3.4.1 Données

- Pour toute ligne $l \in \mathcal{L}$:
 - m_l : arrêt principal.
 - \mathcal{P}_l : ensemble des périodes de cadencement homogène. Pour tout $p \in \mathcal{P}_l$:
 - $bt_{l,p}, et_{l,p}$: heure de début et de fin de période.
 - $h_{l,p}, v_{l,p}$: cadencement attendu et marge de variation associée.
 - $tt_{l,s}$: temps de retournement au terminus $s \in \mathcal{S}$.

- g_l : groupe de lignes contenant la ligne l . L'interligne est autorisé à l'intérieur des groupes de lignes. Chaque ligne ne peut appartenir qu'à un groupe.
- \mathcal{R}_l et r_l^α, r_l^ω : ensemble des dessertes, en particulier première et dernière.
- Pour toute desserte $r \in \mathcal{R}$:
 - l_r : ligne du réseau à laquelle appartient r .
 - $\mathcal{S}^r \subset \mathcal{S}$: ensemble des arrêts desservis.
 - $\mathcal{S}^{*r} \subset \mathcal{S}^r$: ensemble restreint des arrêts desservis les plus importants.
 - s_r^α, s_r^ω : premier et dernier arrêt.
 - s_r^+ : arrêt suivant s .
 - $h_{r,s}^{\leftarrow}, h_{r,s}^{\rightarrow}$: heure d'arrivée et de départ pour l'arrêt $s \in \mathcal{S}^r$ dans la grille horaire existante.
 - r_l^+ : desserte suivant r dans la ligne l .
- Pour toute correspondance $t = (a_1, s_1, a_2, s_2) \in \mathcal{T}$ (avec $a_1, a_2 \in \mathcal{A}, s_1, s_2 \in \mathcal{S}$) :
 - il_t : niveau d'importance.
 - $\lfloor wt_t \rfloor, [wt_t], \lceil wt_t \rceil$: temps d'attente minimal, idéal et maximal.
 - $dt_{s,s'}$: temps de trajet à vide entre les arrêts s et s' .

3.4.2 Variables de décision et valeurs

Les résultats fournis sont de trois types :

- grilles horaires des lignes ;
- taille de la flotte ;
- services véhicules.

Dans la plupart des études (e.g. [Jansen *et al.*, 2002]), les variables de décision pour les problèmes de création des horaires portent sur les heures de départ des lignes, à partir desquelles les grilles horaires entières peuvent être déduites. En effet, elles considèrent des cadencements prédéterminés, ainsi que des temps de trajet fixes.

Ici, nous proposons un modèle plus flexible, avec des cadencements modifiables et des temps de trajet en charge variables par période horaire. Dans ce modèle, toutes les heures d'arrivée et de départ peuvent être déduites pour les autres arrêts à partir de l'heure de départ de chaque desserte.

- Une *variable de décision* est une desserte sur la grille horaire.
- La *valeur* d'une variable de décision est une paire (heure de début, véhicule) (voir Figure 3.4). Le domaine de valeurs est un produit cartésien de deux ensembles discrets (l'unité de temps est la minute). Le nombre de véhicules est au pire égal au nombre de dessertes de lignes. Par la suite, nous utiliserons les termes de valeur temporelle et de valeur véhicule pour désigner les deux membres de l'affectation.
- Une *configuration* σ est une affectation complète de valeurs à l'ensemble des variables de décision : $\sigma : \mathcal{R} \rightarrow (\mathcal{H} \times \mathcal{V})$.

De plus, un ensemble de variables d'état est maintenu à jour pour faciliter le calcul des valeurs liées aux correspondances et à la régularité des cadencements. Elles incluent les heures d'arrivée et de départ des dessertes pour un ensemble restreint d'arrêts. Cet ensemble ($\mathcal{S}^{*r}, \forall r \in \mathcal{R}$) est composé de l'arrêt principal de la ligne, du premier et du dernier arrêt de chaque desserte, et des arrêts situés sur des zones de correspondance.

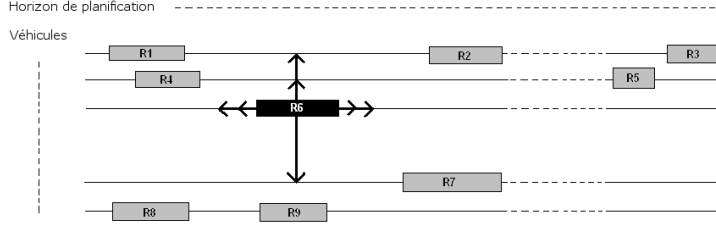


FIGURE 3.4 – Double affectation

Les rectangles représentent les variables de décision, *i.e.* les dessertes de lignes. Une configuration correspond au positionnement de chaque desserte sur l'espace bi-dimensionnel créé par la flotte des véhicules et l'horizon de planification.

On note $\pi_{r,s}^{\rightarrow} \in \mathcal{H}$ et $\pi_{r,s}^{\leftarrow} \in \mathcal{H}$ les variables d'état correspondant aux heures de départ et d'arrivée de la desserte r de \mathcal{S}^r à l'arrêt s .

Les variables d'état liées aux ressources véhicules incluent la taille de l'ensemble \mathcal{V}_g des véhicules utilisés dans chaque groupe de lignes g , et les séquences de dessertes auxquelles ils sont affectés : $\forall g \in \mathcal{G}, \forall v \in \mathcal{V}_g, \Phi(v) = \{\mathcal{R}\}^n, n \in \mathbb{N}$.

On désigne par r_v^+ la desserte qui suit r sur le service du véhicule v et on désigne par r_v^α et r_v^ω la première et la dernière desserte auxquelles est affecté le véhicule v . Soient $a(v) = s_{r_v^\alpha}^\alpha$ (resp. $z(v) = s_{r_v^\omega}^\omega$) le premier (resp. dernier) arrêt de la première (resp. dernière) desserte servie par le véhicule v .

3.4.3 Contraintes

Notre modèle compte cinq types de contraintes.

- La *séquence de dessertes* pour chaque ligne est semblable à celle trouvée dans les grilles horaires initiales.

$$\forall l \in \mathcal{L}, \forall r_1, r_2 \in \mathcal{R}_l, \quad (h_{r_1, m_l}^{\rightarrow} > h_{r_2, m_l}^{\rightarrow}) \Leftrightarrow (\pi_{r_1, m_l}^{\rightarrow} > \pi_{r_2, m_l}^{\rightarrow}) \quad (3.1)$$

- Les *bornes d'amplitude par ligne* sont respectées : la première (resp. dernière) desserte d'une ligne ne peut pas desservir l'arrêt principal avant (resp. après) le début (resp. la fin) de la première (resp. dernière) période de cadencement de la ligne.

$$\forall l \in \mathcal{L}, \quad (\pi_{r_l^\alpha, m_l}^{\rightarrow} \geq bt_{l,0}) \wedge (\pi_{r_l^\omega, m_l}^{\rightarrow} \leq et_{l, |\mathcal{P}_l|}) \quad (3.2)$$

- Quel que soit le *service véhicule*, l'intervalle de temps séparant deux dessertes consécutives de ce service est supérieur ou égal au temps de retournement (temps inséré dans les services à la fin de chaque desserte) additionné au temps de trajet à vide nécessaire pour lier les deux.

$$\forall g \in \mathcal{G}, \forall v \in \mathcal{V}_g, \forall r, r_v^+ \in \Phi(v), \quad \pi_{r_v^+, s_{r_v^+}^\alpha}^{\leftarrow} - \pi_{r, s_r^\omega}^{\rightarrow} \geq tt_{l, s_r^\omega} + dt_{s_r^\omega, s_{r_v^+}^\alpha} \quad (3.3)$$

- L'*interligne* n'est utilisé qu'entre dessertes appartenant au même groupe de lignes, autrement dit chaque véhicule est affecté à des dessertes qui appartiennent toutes au même groupe de lignes.

$$\forall g \in \mathcal{G}, \forall v \in \mathcal{V}_g, \forall r_1, r_2 \in \Phi(v), \quad g_{l_{r_1}} = g_{l_{r_2}} \quad (3.4)$$

- L'*affectation* est complète : un couple (heure de départ, véhicule) doit être affecté à chaque desserte.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \quad \sigma(r) = (\pi \in \mathcal{H}, v \in \mathcal{V}) \quad (3.5)$$

3.4.4 Objectifs

Le modèle que nous proposons intègre quatre objectifs qui concernent la qualité de service et l'utilisation des ressources véhicules. Les objectifs relatifs à la qualité de service sont les mêmes que ceux pris en compte dans le chapitre 2. Nous ajoutons ici deux critères de ressources : le nombre de véhicules et les temps de trajet à vide.

Quantité et qualité des correspondances

Pour cet objectif, nous utilisons la même modélisation et la même fonction de coût que celle que nous avons définie en section 2.2.2. Rappelons que cette formulation prend en compte un ensemble de paramètres pour chaque correspondance : temps minimal, idéal et maximal d'attente, ainsi que niveau d'importance, valeurs toutes choisies par le planificateur.

La fonction de coût (Formule 3.6) prend ses valeurs dans \mathbb{R}^- , symbolisant la valeur ajoutée à la solution par chaque nouvelle correspondance dont le temps d'attente est compris dans l'intervalle défini.

$$cost_1(\sigma) = \sum_{\substack{t \in \mathcal{T} \\ t=(l_1, s_1, l_2, s_2)}} \left[il_t * \sum_{\substack{r_1 \in \mathcal{R}_{l_1} \\ r_2 \in \mathcal{R}_{l_2}}} fTr(t, \pi_{r_1, s_1}^{\leftarrow}, \pi_{r_2, s_2}^{\rightarrow}) \right] \quad (3.6)$$

où

$$fTr(t, h_1, h_2) = \begin{cases} \text{décroissante de } -0.5 \text{ à } -1 & \text{si } [wt_t] < h_2 - h_1 < [wt_t] \\ \text{croissante de } -1 \text{ à } 0 & \text{si } [wt_t] < h_2 - h_1 < [wt_t] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Seuls les coûts liés aux correspondances intramodales sont ici présentés par simplicité, mais la fonction $cost_1(\sigma)$ utilisée dans l'application inclut aussi, sous les mêmes conditions, les coûts liés aux correspondances intermodales.

Régularité des cadencements

Pour l'objectif de cadencement, nous utilisons la même modélisation et la même fonction de coût que celle que nous avons définie en section 2.2.2.

Rappelons que cette formulation prend en compte les intervalles de temps entre les passages de dessertes successives au point principal de la ligne. Si cet arrêt n'est pas desservi à chaque fois, son horaire de passage est extrapolé en fonction des temps de trajet de la ligne.

Pour chaque ligne, le planificateur renseigne un ensemble de périodes de cadencement homogène, ainsi qu'une marge de variation associée. L'objectif est de rapprocher le plus possible le cadencement observé du cadencement demandé. Le cas particulier de la transition entre périodes de cadencement est également pris en compte.

Nous rappelons ici uniquement le cas le plus commun, *i.e.* celui où des dessertes consécutives passent toutes deux au point principal de la ligne et appartiennent à la même période de cadencement $p \in \mathcal{P}_l$.

$$cost_2(\sigma) = \sum_{l \in \mathcal{L}} \left[\sum_{r, r_l^+ \in \mathcal{R}_l} fHw(l, r, r_l^+) \right] \quad (3.7)$$

Soit $gap(l, r, r_l^+)$ le cadencement actuel, calculé par $\pi_{r_l^+, m_l}^{\rightarrow} - \pi_{r, m_l}^{\rightarrow}$.

$$fHw(l, r, r_l^+) = \left[\frac{gap(l, r, r_l^+) - h_{l,p}}{v_{l,p}} \right]^2 \quad (3.8)$$

Nombre de véhicules

La taille de la flotte représente l'objectif principal à minimiser parmi ceux liés aux ressources véhicules. Chaque groupe de lignes est indépendant au niveau des véhicules, car l'interligne n'est pas autorisé entre lignes de groupes différents. La taille de la flotte est donc la somme des nombres de véhicules utilisés dans chaque groupe de lignes.

$$cost_3(\sigma) = \sum_{g \in \mathcal{G}} |\mathcal{V}_g| \quad (3.9)$$

Temps de trajet à vide

Les haut-le-pied sont les trajets à vide effectués par les véhicules au cours de leurs services. Ils doivent être évités ou minimisés car ils représentent du temps improductif et de la consommation de carburant. L'évaluation du coût de cet objectif se fait en deux parties : $cost_4 = cost_{4a} + cost_{4b}$.

La première partie concerne les trajets à vide qui lient les dessertes entre elles.

$$cost_{4a} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[\sum_{r, r_v^+ \in \Phi(v)} dt_{s_r^\omega, s_{r_v^+}^\alpha} \right] \quad (3.10)$$

La deuxième partie concerne les trajets à vide de début et de fin de service. Dans notre modèle, il s'agit d'un unique haut-le-pied fictif qui lie le dernier arrêt du service au premier arrêt, de manière à créer une boucle.

$$cost_{4b} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[dt_{z(v),a(v)} \right] \quad (3.11)$$

3.5 Approche de résolution

3.5.1 Méthode générale

Pour parer à la complexité du problème et préserver la flexibilité du modèle (voir Section 3.7), nous établissons une approche de résolution en deux niveaux. Cette approche est basée sur la recherche locale itérée (Iterated Local Search, ILS) [Lourenco *et al.*, 2002].

- Affectation des horaires et des véhicules (TVA - pour Timetabling and Vehicle Assignment) par ILS.

Cette première étape ignore l'objectif de minimisation des haut-le-pied fictifs des services en boucle ($cost_{4b}$). Deux voisinages sont utilisés alternativement durant cette ILS, à des fins d'intensification et de perturbation. À chaque itération, les grilles horaires sont modifiées et les affectations véhicules optimales sont recalculées.

- Optimisation des services en boucle (LVA - pour Loop Vehicle Assignment) par post-optimisation.

À partir de cette étape, les grilles horaires (et par là-même, la qualité de service) sont figées. L'ILS pour LVA se base sur un troisième type de voisinage qui modifie les affectations véhicules en interchangeant des portions de services entre véhicules. Cette ILS se focalise sur les coûts liés aux ressources impliquées, y compris les haut-le-pied fictifs des services en boucle ($cost_{4b}$).

3.5.2 Solution initiale

Notre approche de résolution par ILS nécessite une solution initiale. Celle-ci est construite en deux phases à l'aide d'un modèle de quasi-affectation linéaire.

- Dans un premier temps, une heure de départ est affectée à chaque desserte du réseau : celle de la grille horaire existante.
- Dans un deuxième temps, un véhicule est affecté à chaque desserte par un algorithme exact. Cet algorithme exact est un algorithme d'affectation par enchères, que nous détaillons dans la section 3.5.3.

Étant donné que la partie temporelle de l'affectation est basée sur les grilles horaires initiales existantes, les contraintes 3.1 et 3.2 sont satisfaites par essence. Si on considère que de plus, la taille de la flotte est a priori non bornée, la contrainte 3.5 est également respectée. Notre méthode exacte d'affectation par groupes de lignes assure que les contraintes restantes (3.3 et 3.4) sont satisfaites. Ainsi, la solution initiale de notre ILS est toujours réalisable.

3.5.3 Algorithme par enchères

Pour réaliser un chaînage optimal des dessertes sous forme de services véhicules, nous modélisons notre problème comme un problème de quasi-affectation linéaire basé sur un problème de flot, et avons recours à une adaptation d'un algorithme issu de la littérature pour la résolution. Il s'agit d'un algorithme par enchères [Bertsekas, 1991; Freling *et al.*, 2001] qui permet de résoudre optimalement le problème. Il consiste à affecter des dessertes et la source à d'autres dessertes ou au puits. Le coût des arcs liant les dessertes dépend de la faisabilité du trajet, du temps de trajet à vide et du poids associé à cet objectif. La moitié du coût d'un véhicule est attribué aux arcs liant la source aux dessertes et à ceux liant les dessertes au puits.

Notre modèle diffère légèrement de celui de [Freling *et al.*, 2001] en ce que nous n'incluons pas de coûts liés aux trajets à vide partant ou arrivant au dépôt, étant donné que nous ne disposons pas des données géographiques nécessaires (temps et distances associés au trajet).

L'algorithme *AuctionAlgo* donne des résultats optimaux en un temps de calcul très bref, particulièrement sur des petits réseaux. Ceci correspond bien à notre contexte de sous-groupes de lignes pour l'affectation des véhicules.

Détaillons rapidement le fonctionnement de cet algorithme en nous plaçant dans le cadre défini par l'analogie des enchères.

Supposons devoir traiter un problème d'affectation linéaire où n personnes et n objets doivent être mis en correspondance. Les personnes vont chercher à acquérir l'objet leur offrant le plus grand profit net, c'est-à-dire :

$$a_{ij_i} - p_{j_i} = \max_{j=1, \dots, n} \{a_{ij} - p_j\} \quad (3.12)$$

où a_{ij_i} représente le profit brut et p_{j_i} le prix de l'objet, qui varie sous l'effet des enchères, faisant varier simultanément l'intérêt porté par les personnes aux objets. Le but du problème est de maximiser le profit net total, qui est obtenu lorsque la condition est vérifiée pour toutes les personnes, ce qui résout le problème d'affectation linéaire.

L'algorithme procède par itérations, à partir d'une affectation et d'un ensemble de prix quelconques. Si au début d'une itération, la condition 3.12 est satisfaite pour toutes les personnes, l'algorithme s'arrête. Sinon, une personne i pour laquelle cette condition n'est pas satisfaite est sélectionnée. Soit j_i l'objet qui lui fournit le profit net maximum :

$$j_i \in \arg \max_{j=1, \dots, n} \{a_{ij} - p_j\}$$

Les actions suivantes sont alors déclenchées :

1. la personne i échange son objet actuel avec la personne qui détient j_i .
2. le prix de l'objet j_i est augmenté de $\gamma_i = w_i - w'_i$ où w_i et w'_i sont le meilleur et le second meilleur profits respectivement :

$$w_i = \max_j \{a_{ij} - p_j\}$$

$$w'_i = \max_{j \neq j_i} \{a_{ij} - p_j\}$$

Notons que γ_i est le plus grand incrément (= enchère) auquel peut consentir la personne i . En effet, une augmentation supérieure rend automatiquement le second objet plus attractif.

Ce processus est répété durant un certain nombre d'itérations jusqu'à ce que chaque personne soit en possession de l'objet lui apportant le meilleur profit net (condition 3.12 vérifiée).

L'analogie avec les enchères prend tout son sens puisque le prix des objets tend à augmenter sous l'effet des enchères.

Notons cependant que certaines complications sont susceptibles d'apparaître au cours du processus d'enchères : il peut arriver que $w_i = w'_i$ auquel cas l'incrément devient nul et l'algorithme se bloque. Pour prévenir ce cas de figure, il est imposé un incrément minimal ϵ , ce qui est consistant avec la métaphore des enchères (notion d'enchère minimum). Il est même possible de jouer sur ce paramètre pour accélérer l'algorithme. Il a été observé d'une part que l'algorithme est accéléré lorsque ϵ est grand (enchères agressives) au prix d'une perte de l'optimalité. D'autre part, si l'algorithme démarre avec une configuration proche de l'optimum, il termine très rapidement. [Bertsekas, 1991] décrit ainsi une technique appelée ϵ -scaling, consistant à lancer l'algorithme plusieurs fois, d'abord avec ϵ grand, puis en réduisant ce paramètre pour aboutir à l'optimalité. Nous avons utilisé cette technique avec les paramètres par défaut indiqués dans l'article.

Par ailleurs, il existe une autre technique permettant d'accélérer le processus. Appelée "version combinée", elle consiste à échanger ponctuellement les rôles des personnes et des objets. Dans le cadre de notre problème de quasi-affectation, elle est même la seule possible : puisqu'il n'y a plus bijection entre les deux ensembles, il faut à un moment connecter plusieurs courses au dépôt. Ne pouvant pas entrer dans les détails techniques ici, nous renvoyons à [Freling *et al.*, 2001] pour l'adaptation de l'algorithme par enchères au problème de planification des véhicules en monodépôt.

3.5.4 Affectation des horaires et des véhicules par TVA

Algorithme ILS pour le TVA

L'algorithme de recherche locale itérée pour le TVA (Algorithme 3.1) se fonde sur deux types de voisinages qui intensifient et diversifient alternativement la recherche. Les composants de ces voisinages sont décrits dans les sous-sections suivantes.

Algorithme 3.1 : Algorithme - ILS pour TVA

```

 $\sigma \leftarrow \text{GenererSolutionInitiale}(t \leftarrow ET, v \leftarrow \text{AuctionAlgo})$ 
 $\text{temps} \leftarrow \text{DebutChrono}()$ 
 $\text{nbIter} \leftarrow 0$ 
 $\text{nbStagn} \leftarrow 0$ 
 $\sigma \leftarrow \text{RechercheLocale}(\sigma, \text{RunShift})$ 
 $\text{best}\sigma \leftarrow \sigma$ 
répéter
   $\sigma_1 \leftarrow \text{Perturbation}(\sigma, \text{LineShift})$ 
   $\sigma \leftarrow \text{RechercheLocale}(\sigma_1, \text{RunShift})$ 
  if ( $f_1(\sigma) \leq f_1(\text{best}\sigma)$ )
     $\text{best}\sigma \leftarrow \sigma$ 
   $\text{MettreAJour}(\text{nbIter}, \text{nbStagn})$ 
jusqu'à ( $\text{temps} > \text{maxTemps}$  ou  $\text{nbIter} > \text{maxIter}$  ou
 $\text{nbStagn} > \text{maxStagn}$ )
renvoyer  $\sigma$ 

```

Configuration et espace de recherche

Une configuration pour le TVA est constituée d'une valeur (heure de départ, véhicule) pour chaque variable (desserte). L'espace de recherche non contraint associé peut être défini par : $\mathcal{S} = (\pi \in \mathcal{H}, v \in \mathcal{V})^{|\mathcal{R}|}$, de taille $(|\mathcal{H}| * |\mathcal{V}|)^{|\mathcal{R}|}$. Cependant, notre algorithme explore uniquement les solutions situées à l'intérieur du domaine de réalisabilité, qui est considérablement plus réduit, étant délimité par l'ensemble de contraintes défini en section 3.4.3. Les deux voisinages utilisés dans l'algorithme permettent d'explorer différentes parties de cet espace de recherche, à des fins de diversification et d'intensification (voir infra).

Évaluation de configuration

Pour le problème de TVA, la fonction d'évaluation utilisée par l'algorithme ILS est définie par la somme pondérée suivante :

$$f_1(\sigma) = w_1 * \text{cost}_1(\sigma) + w_2 * \text{cost}_2(\sigma) + w_3 * \text{cost}_3(\sigma) + w_4 * \text{cost}_{4a}(\sigma) \quad (3.13)$$

Typiquement, les poids sont attribués par le planificateur humain afin de refléter l'importance relative qu'il donne à chaque objectif. Modifier les poids impacte le comportement de recherche de l'algorithme ILS.

Voisinages et mouvements

Les deux voisinages proposés permettent une exploration de l'espace de recherche cantonnée au domaine réalisable.

LineShift

Un mouvement issu du voisinage *LineShift* modifie la valeur temporelle et la valeur véhicule de deux ensembles de variables. Une solution voisine est obtenue en décalant l'heure de départ de toutes les dessertes d'une même ligne de n minutes. L'affectation véhicule optimale est ensuite complètement recalculée sur les grilles horaires obtenues, à l'aide de l'algorithme par enchères (voir Section 3.5.3).

On peut noter $mv_{LS} = (l, n)$ un mouvement de ce voisinage.

Soit $\sigma = ((t_1, v_1), (t_2, v_2), \dots, (t_{|\mathcal{R}|}, v_{|\mathcal{R}|}))$ la configuration courante, $mv_{LS} = (l, n)$ le mouvement sélectionné, et $\sigma' = \sigma \circ mv_{LS}$ une configuration voisine.

Alors, $\sigma' = ((t'_1, v'_1), (t'_2, v'_2), \dots, (t'_{|\mathcal{R}|}, v'_{|\mathcal{R}|}))$ répond à la description suivante :

$$\forall l^* \in \mathcal{L}, \begin{cases} \forall r \in \mathcal{R}_{l^*}, t'_r = t_r + n & \text{si } l^* = l \\ \forall r \in \mathcal{R}_{l^*}, t'_r = t_r & \text{sinon} \end{cases}$$

$$(v'_1, v'_2, \dots, v'_{|\mathcal{R}|}) = \underset{(v''_1, v''_2, \dots, v''_{|\mathcal{R}|})}{\operatorname{argmin}} (w_3 * \operatorname{cost}_3(\sigma'') + w_{4a} * \operatorname{cost}_{4a}(\sigma''))$$

$$\text{où } \sigma'' = ((t'_1, v''_1), (t'_2, v''_2), \dots, (t'_{|\mathcal{R}|}, v''_{|\mathcal{R}|}))$$

LineShift est un voisinage original dans le sens où il impacte à la fois les affectations d'horaire et de véhicule de chaque desserte, une approche qui découle de notre modèle et qui est, à notre connaissance, particulière à notre étude. Il existe toutefois des équivalents limités à l'aspect horaire de l'affectation, qui ont été utilisés dans le cadre de la résolution de problèmes de synchronisation des correspondances [Jansen *et al.*, 2002].

Dans la plupart des études, les variables utilisées sont les heures de départ de la première desserte de chaque ligne. Décaler l'heure de départ d'une ligne revient à décaler l'heure de départ de toutes ses dessertes. Notre choix de modélisation concernant la définition des variables permet d'établir un espace de recherche plus étendu en définissant chaque desserte individuelle comme une variable.

RunShift

Un mouvement issu du voisinage *RunShift* modifie la valeur temporelle d'une unique variable ainsi que la valeur véhicule d'un ensemble de variables. Une solution voisine est obtenue en décalant l'heure de départ d'une desserte donnée de n minutes. L'affectation véhicule est ensuite complètement recalculée sur les grilles horaires obtenues, à l'aide de l'algorithme par enchères (voir Section 3.5.3).

On peut noter $mv_{RS} = (r, n)$ un mouvement de ce voisinage.

Soit $\sigma = ((t_1, v_1), (t_2, v_2), \dots, (t_{|\mathcal{R}|}, v_{|\mathcal{R}|}))$ la configuration courante, $mv_{RS} = (r, n)$ le mouvement sélectionné et $\sigma' = \sigma \circ mv_{RS}$ une configuration voisine.

Alors, $\sigma' = ((t'_1, v'_1), (t'_2, v'_2), \dots, (t'_{|\mathcal{R}|}, v'_{|\mathcal{R}|}))$ répond à la description suivante :

$$\forall r^* \in \mathcal{R}, \begin{cases} t'_{r^*} = t_{r^*} + n & \text{si } r^* = r \\ t'_{r^*} = t_{r^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

$$(v'_1, v'_2, \dots, v'_{|\mathcal{R}|}) = \underset{(v''_1, v''_2, \dots, v''_{|\mathcal{R}|})}{\operatorname{argmin}} (w_3 * \operatorname{cost}_3(\sigma'') + w_{4a} * \operatorname{cost}_{4a}(\sigma''))$$

$$\text{où } \sigma'' = ((t'_1, v''_1), (t'_2, v''_2), \dots, (t'_{|\mathcal{R}|}, v''_{|\mathcal{R}|}))$$

RunShift est un voisinage original de la même manière que l'est *LineShift*, à cause de son impact sur les deux valeurs de l'affectation. Il a été suggéré parfois sous une forme limitée à l'aspect temporel comme une possibilité d'extension de recherche, mais pas réellement implémenté dans les études dont nous avons connaissance. Dans notre algorithme, ce voisinage est appelé lors de la phase d'intensification.

Dans les deux voisinages, la valeur du décalage horaire $n \in \mathbb{Z}^*$ est choisie au hasard dans un intervalle restreint défini de manière à respecter les contraintes 3.1 et 3.2, et à éviter les décalages trop importants, susceptibles de fortement dégrader l'objectif de régularité du cadencement. *RunShift* définit un voisinage plus large que *LineShift* et qu'un mouvement de *LineShift* est équivalent à une composition de plusieurs mouvements de *RunShift*. Le voisinage associé à *LineShift* est ainsi plus petit que celui de *RunShift* en termes de cardinal du nombre de configurations voisines. À l'inverse, la distance entre configurations voisines au sens du nombre de variables ayant une valeur différente, est supérieure dans le cas de *LineShift* par rapport à *RunShift*.

Mécanismes d'intensification et de diversification

L'algorithme d'ILS alterne les phases d'intensification et de diversification. La phase d'intensification est basée sur le voisinage le plus large (et le plus rapide) *RunShift*. À chaque itération de l'algorithme ILS, la solution courante est remplacée itérativement par une solution voisine de meilleure qualité au sens de la fonction d'évaluation (Formule 3.13). Cette phase d'intensification s'arrête lorsqu'aucun voisin améliorant n'est trouvé au cours d'un nombre préfixé de mouvements testés consécutifs.

À ce moment-là, la phase de diversification se déclenche : elle consiste à perturber la meilleure solution trouvée au cours de la phase d'intensification. Plus précisément, on laisse de côté le voisinage *RunShift* au profit du plus petit *LineShift*. Chaque mouvement de *LineShift* correspondant à une composition de mouvements de *RunShift*, il est capable de modifier substantiellement la configuration courante. Un seul mouvement issu de *LineShift* est donc appliqué, afin d'éviter une détérioration excessive de la qualité de la solution. Ce mouvement est issu d'un processus de test et évaluation, qui sélectionne le mouvement de coût minimal parmi m mouvements générés.

La phase de diversification est suivie d'une nouvelle phase d'intensification à partir de la solution perturbée obtenue.

Critères d'acceptation et d'arrêt

Dans l'ILS pour TVA, seuls les mouvements non détériorants sont acceptés au cours de la phase d'intensification, alors qu'aucune condition de coût n'entre en jeu durant la phase de diversification. Les critères d'arrêt de l'algorithme ILS global sont le temps de calcul autorisé *maxTemps*, le nombre d'itérations *maxIter* et le nombre d'itérations sans amélioration *maxStagn*.

3.5.5 Optimisation des services en boucle (LVA) par post-optimisation

Quand l'algorithme d'ILS pour TVA s'est arrêté, les valeurs temporelles de l'affectation courante sont définitives. Seules les valeurs véhicules de l'affectation peuvent être modifiées. On focalise alors la recherche sur l'aspect ressources, en prenant désormais en compte également les trajets à vide fictifs qui ferment la boucle des services véhicules.

Algorithme ILS pour LVA

L'algorithme ILS pour LVA (Algorithme 3.2) prend pour solution initiale la solution obtenue pour le TVA, et vise à améliorer la qualité de la solution au sens de la fonction d'évaluation f_2 (Formule 3.14). Un nouveau voisinage est défini à cet effet, *ServiceCrossOver*.

Algorithme 3.2 : Algorithme - ILS pour LVA

```

 $\sigma \leftarrow ILS\_pour\_TVA()$ 
 $nbIter \leftarrow 0$ 
 $\sigma = Recherche\ Locale(\sigma, ServiceCrossOver)$ 
répéter
   $\sigma_1 = Perturbation(\sigma, ServiceCrossOver)$ 
   $\sigma_2 = Recherche\ Locale(\sigma_1, ServiceCrossOver)$ 
   $\sigma = CritereAcceptation(\sigma, \sigma_2)$ 
  MettreAJour( $nbIter$ )
jusqu'à  $nbIter > maxIter$ 
renvoyer  $\sigma$ 

```

Évaluation de la configuration

Dans cette phase, le temps de haut-le-pied correspondant au trajet qui lie le dernier au premier arrêt du service d'un véhicule est inclus dans les coûts liés aux temps de trajet à vide. Les valeurs temporelles de la configuration ne sont pas modifiées par le voisinage mis en place, ainsi les valeurs des objectifs de qualité de service ($cost_1$ et $cost_2$) ne sont pas impactées et peuvent être isolées de la fonction d'évaluation. La fonction d'évaluation utilisée pour le LVA s'écrit alors ainsi :

$$f_2(\sigma) = w_3 * cost_3(\sigma) + w_4 * (cost_{4a}(\sigma) + cost_{4b}(\sigma)) \quad (3.14)$$

Voisinages et mouvements

ServiceCrossOver

Un mouvement issu du voisinage *ServiceCrossOver* modifie la valeur véhicule d'un ensemble de variables à la fois sans impacter les affectations temporelles. Une solution

voisine est obtenue en échangeant les valeurs véhicules de dessertes appartenant à deux services différents à partir d'un instant donné de l'horizon de planification. Les mouvements (voir Figure 3.5) sont choisis aléatoirement parmi ceux qui ne violent pas de contraintes de faisabilité du service (contraintes 3.3) ni d'interligne (contraintes 3.4), et qui modifient au moins une valeur de l'affectation courante. Chaque mouvement impacte le coût de la solution courante par la modification d'un ou deux trajet(s) haut-le-pied entre dessertes et par conséquent d'un ou deux trajet(s) haut-le-pied fictif(s).

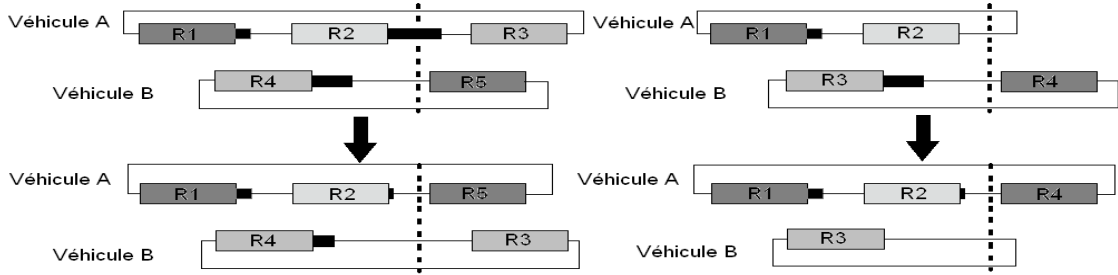


FIGURE 3.5 – Exemples de mouvements issus du voisinage *ServiceCrossOver*.

Un mouvement $(vehicleA, vehicleB, time_point)$ consiste à échanger les valeurs véhicules d'un ensemble de variables donné. Cet ensemble est constitué de toutes les dessertes dont l'affectation véhicule est soit $vehicleA$ soit $vehicleB$ et dont l'affectation temps est postérieure à $time_point$.

On peut noter $mv_{SCO} = (v_1 \in \mathcal{V}, v_2 \in \mathcal{V}, h \in \mathcal{H})$ un mouvement de ce voisinage. Soit $\sigma = ((t_1, v_1), (t_2, v_2), \dots, (t_{|\mathcal{R}|}, v_{|\mathcal{R}|})) \in \mathcal{S}$ la configuration courante, $mv_{SCO} = (v_1, v_2, h)$ le mouvement sélectionné et $\sigma' = \sigma \circ mv_{SCO}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = ((t'_1, v'_1), (t'_2, v'_2), \dots, (t'_{|\mathcal{R}|}, v'_{|\mathcal{R}|}))$ répond à la description suivante :

$$\forall r \in \mathcal{R}, t'_r = t_r \quad \text{et} \quad \begin{cases} v'_r = v_1 & \text{si } v_r = v_2 \text{ et } t_r \geq h \\ v'_r = v_2 & \text{si } v_r = v_1 \text{ et } t_r \geq h \\ v'_r = v_r & \text{sinon} \end{cases}$$

Le voisinage *ServiceCrossOver* comporte une certaine ressemblance avec les opérateurs génétiques de crossover (d'où son nom) et avec le voisinage 2-opt avec chaînes d'éjection sur tournées multiples (qui correspondent, ici, chacune à un service).

ILS pour LVA

Les processus d'intensification et de perturbation dans l'ILS pour LVA se basent tous les deux sur le voisinage *ServiceCrossOver*. Le mécanisme d'intensification consiste en un algorithme de descente tandis que lors du mécanisme de perturbation, une courte séquence (trois mouvements) de mouvements est appliquée à la solution courante, quels que soient les coûts impliqués (on reste toujours à l'intérieur du domaine réalisable). Le critère d'acceptation est validé quand la qualité de la solution est au moins égale à la meilleure valeur

obtenue jusqu'alors, favorisant l'intensification à la diversification. Le critère d'arrêt dépend du nombre d'itérations de l'algorithme, qui doit rester inférieur à une fonction de $|\mathcal{R}|$ et de $\sum_{g \in \mathcal{G}} |V_g|$.

3.6 Résultats

Dans cette section, nous testons la performance de l'approche simultanée d'affectation d'horaires et de véhicules aux dessertes. Dans cet objectif, nous réalisons des expérimentations sur un jeu de données issu d'un réseau de transport réel. À titre de comparaison, nous prenons deux solutions de référence : la solution existante (basée sur les grilles horaires du réseau) et la solution obtenue grâce à une approche séquentielle conventionnelle.

3.6.1 Jeu de tests et paramètres d'expérimentation

Nos expérimentations se basent sur un réseau interurbain réel d'une vaste zone géographique française, en l'occurrence le département du Loiret. Il s'agit du même réseau que celui présenté en section 2.4.1. Nous n'avons pas trouvé de benchmarks disponibles pour la problématique étudiée ici. Quant aux données relatives à l'utilisation des véhicules, elles restent confidentielles au sein de nombreux réseaux en raison des enjeux économiques qui y sont liés.

Le réseau étudié ici englobe trois villes de taille moyenne et un ensemble de petits villages. Il compte 50 lignes orientées, 673 arrêts, 30 lignes extérieures en connexion, et 282 types de correspondances possibles. La grille horaire pour un jour type d'opération comporte 318 dessertes.

Trois exploitants se partagent les lignes du réseau. L'exploitation de chaque ligne est du ressort d'un opérateur parmi les trois qui se partagent le réseau. Nous modélisons cette répartition par trois groupes de lignes de 8, 16 et 26 lignes.

Notre algorithme a été codé en C++, compilé avec VC++ 9.0, sur un ordinateur portable équipé d'un processeur 2.8 Ghz Intel(R) Pentium(R) 4 et de Windows XP et disposant de 1.5Go RAM. Pour ces tests, nous avons paramétré un temps de calcul de 300 minutes. Cette limite est utilisée dans nos tests comme critère d'arrêt unique de notre algorithme. Ce temps de calcul relativement élevé permet de tester l'effet des diversifications sur le long terme et est tolérable en raison du mode d'utilisation du module d'optimisation, cette étape de la planification ne présentant pas de caractère temps réel. Cependant, il est possible de stopper le calcul bien avant l'écoulement du temps autorisé sans perte fondamentale de qualité de la solution (voir Section 3.6.3).

Le jeu de pondérations que nous avons utilisé pour les objectifs est présenté dans le tableau 3.1. Ce jeu permet de simuler des scénarios dans lesquels le nombre de véhicules est un critère très important du point de vue économique, alors que le cadencement et les correspondances sont cruciales d'un point de vue qualité de service. Les trajets haut-le-pied ont un poids relativement mineur par rapport aux autres objectifs. Il est évidemment possible de simuler des scénarios différents en utilisant d'autres stratégies de pondération. La flexibilité de ce mécanisme constitue une caractéristique simple et appréciable du système d'aide à la décision pour le planificateur.

	Taille de la flotte ($cost_1$)	Correspondances ($cost_2$)	Cadencement ($cost_3$)	Haut-le-pied ($cost_4$)
Poids	$w_1=1000$	$w_2=50$	$w_3=66.6$	$w_4=1.25$

TABLE 3.1 – Jeu de pondérations par objectif utilisé dans les tests. Ce jeu favorise en premier lieu le nombre de véhicules, puis la qualité de service (cadencement et correspondances) et laisse les trajets haut-le-pied comme objectif secondaire.

3.6.2 Références et critères de comparaison

Deux solutions sont utilisées comme points de comparaison : la solution existante basée sur les grilles horaires actuelles, et la solution obtenue grâce à une approche séquentielle conventionnelle, dans laquelle le problème de fixation des horaires et de création des services véhicules sont résolus successivement et séparément.

Solution initiale existante

Les valeurs temporelles de la solution existante correspondent aux grilles horaires actuelles du réseau. À partir de ces informations, on peut calculer le coût lié à l'objectif de cadencement. En les combinant aux horaires des lignes des modes externes, on peut également évaluer le coût lié aux correspondances intermodales et intramodales.

À l'inverse, les affectations véhicules de la solution initiale ne sont pas issues de la planification actuelle du réseau. Ce sont en effet des données confidentielles, car elles entrent en jeu au moment des réponses aux appels d'offre du Conseil Général.

L'affectation véhicule initiale est alors réalisée à l'aide de l'algorithme par enchères et conclut à une flotte minimale de 91 véhicules. Il est possible que les exploitants du réseau utilisent en réalité plus de véhicules pour servir les lignes. Cependant, ce nombre représente une borne inférieure par rapport à notre problème.

Le détail des coûts est visualisable pour comparaison dans les tableaux 3.2 (colonne 3) et 3.3 (ligne 3). La solution existante définie ici est utilisée comme point de référence, mais également comme solution initiale pour notre algorithme d'ILS.

Approche séquentielle

L'approche séquentielle consiste à définir les grilles horaires du réseau dans un premier temps, et seulement ensuite, à définir les services véhicules à partir de ces horaires.

Nous utilisons pour cela une variante du modèle présenté dans la section 2.2. Dans cette variante, deux problèmes d'affectation distincts sont résolus l'un après l'autre.

Dans un premier temps, seules les valeurs temporelles (heures de départ) sont affectées aux dessertes. Ceci est réalisé par une méthode ILS basée sur des adaptations de *RunShift* et *LineShift* (voir Section 3.5.4). Ces nouveaux voisinages sont restreints à une modification de la valeur temporelle affectée à chaque desserte. L'évaluation du coût des mouvements appartenant à ces voisinages est alors beaucoup plus rapide car il n'est plus nécessaire de faire appel à l'algorithme par enchères. En conséquence, l'algorithme séquentiel permet de générer un nombre de mouvements très supérieur dans le même temps de calcul.

C'est seulement une fois cette première étape réalisée, et les grilles horaires définitivement fixées, que peut commencer la deuxième partie de la construction de la solution initiale. Celle-ci consiste à affecter des véhicules à chaque desserte et est réalisée quasi instantanément par un unique appel à l'algorithme par enchères.

Notons que ce processus séquentiel, que l'on retrouve dans la littérature [Ceder et Wilson, 1986], considère, par essence, deux ensembles d'objectifs l'un après l'autre. Cela est équivalent à une approche hiérarchique où les objectifs de qualité de service viendraient avant ceux de ressources. Cette approche s'oppose à notre approche simultanée dans laquelle une somme pondérée de tous les objectifs est utilisée comme fonction d'évaluation.

Critères de comparaison

Nous avons défini deux types de critères de comparaison :

- la qualité de la solution au sens de la fonction agrégée (Formule 3.13) ;
- la qualité de la solution au sens "unitaire" de chaque objectif : 1) le nombre de véhicules, 2) le nombre de correspondances, 3) le nombre de problèmes repérés dans la répartition des cadencements (*i.e.* quand le cadencement observé ne rentre pas dans la marge de variation autorisée) et 4) le nombre de minutes de trajet à vide.

3.6.3 Résultats expérimentaux

Nous désignons par Initial, SQ et SM la solution existante, l'approche séquentielle et l'approche simultanée.

Approche simultanée vs. solution existante

Tout d'abord, observons le comportement de la méthode simultanée sur chaque objectif et analysons sa performance par rapport à la solution initiale. La figure 3.6 présente l'évolution du coût pondéré pour chaque objectif au sein de la meilleure solution trouvée au long de la recherche, le point de départ correspondant aux valeurs de la solution initiale.

On observe sur cette figure en début de processus, des réductions de coût brutales pour les objectifs de régularité du cadencement et de quantité et qualité des correspondances. Les améliorations liées aux correspondances sont moins massives au départ mais sont plus persistantes dans le temps. Elles impactent la qualité globale de la solution sur une période de temps plus étendue. Ce phénomène est lié à la structure de l'évaluation de cet objectif et au mécanisme de voisinage utilisé : il n'accorde qu'un faible pouvoir à chaque mouvement au regard des correspondances. Le focus a été placé sur le début du processus, les améliorations étant beaucoup plus lentes par la suite. En effet, cette figure montre aussi que l'algorithme peut être arrêté bien avant l'écoulement du temps de calcul utilisé ici ($t=300$ min), et continuer à fournir des résultats intéressants. Ainsi, à $t=50$ min, l'algorithme a déjà obtenu, en moyenne, 96.6% de l'amélioration de coût totale réalisée par les tests plus longs. Notons que l'évolution de chaque courbe de cette figure est influencée par la stratégie de pondération des objectifs mise en place par le planificateur.

Le tableau 3.2 présente de manière plus détaillée les résultats de l'approche simultanée (colonne 5, SM) et les valeurs liées à la solution existante (colonne 3, Initial) selon la

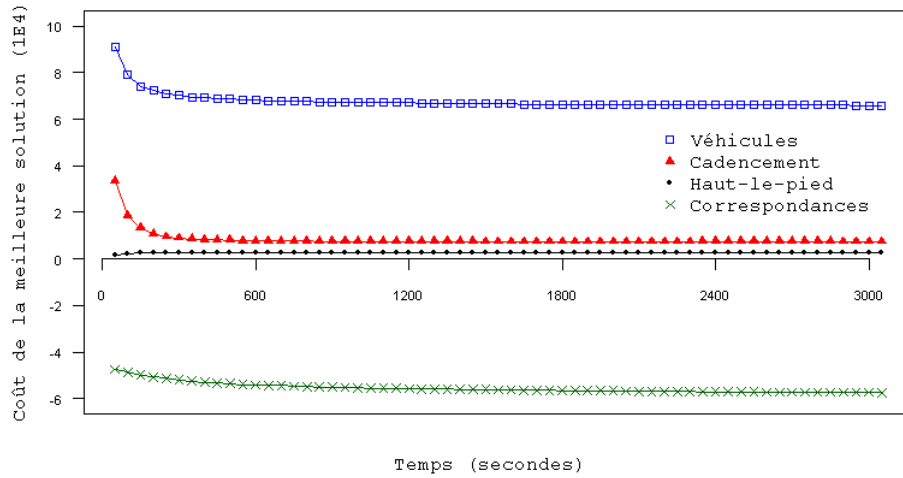


FIGURE 3.6 – Évolution des coûts pondérés pour les quatre objectifs (voir Tableau 3.1) dans la meilleure solution trouvée par l'algorithme ILS.

Les objectifs principaux ($cost_1$, $cost_2$, $cost_3$) bénéficient fortement de l'algorithme. L'instant $t=0$ correspond à la solution initiale existante.

fonction de coût agrégée pondérée (ligne 1) et par objectif individuel pondéré. Dans ce tableau, on liste les valeurs moyennes, minimales et maximales ainsi que les écarts-types sur 20 tests indépendants. De la même manière, le tableau 3.3 rassemble les valeurs obtenues pour chacun des quatre objectifs en fonction du second type de critères de comparaison. On peut y comparer les résultats obtenus pour la solution initiale (ligne 3) et ceux obtenus par l'approche simultanée (ligne 5, SM).

À partir de ces tableaux, on constate que l'approche simultanée fournit des améliorations significatives comparativement à la solution existante sur tous les objectifs mis à part le dernier, qui se trouve être, de loin, le moins important. La qualité de service, aussi bien que le niveau de ressources nécessaires, bénéficient fortement de l'ILS pour TVA. En particulier, le nombre de véhicules requis chute de 28.35%, le nombre de correspondances possibles augmente de 112.33%, et le nombre de cadencements non respectés fléchit de 75.72%. Seuls les trajets à vide sont pénalisés, ce qui est dû à l'importance moindre de cet objectif relativement aux autres, et qui se reflète nettement dans la répartition des poids.

Approche simultanée vs. approche séquentielle

Nous portons ici notre attention sur la comparaison des résultats de SM et de SQ à l'aide des résultats synthétisés dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Ces tables nous amènent à une observation principale : l'approche simultanée basée sur les voisinages *RunShift* et *LineShift* est considérablement plus performante que l'approche séquentielle au sens de la fonction d'évaluation. Elle permet de réduire drastiquement la taille de la flotte requise tout en améliorant sensiblement la qualité de service.

3.6 Résultats

		Initial	ILS Séquentielle (SQ)	ILS Simultanée (SM)
Coût $f_1(\sigma)$	Moy	78763.8	27420.0	16732.5
	Min	-	25478.1	14869.9
	Max	-	29794.3	18441.6
	é-t	-	1262.7	991.0
Véhicules $w_3 * cost_3(\sigma)$	Moy	91000.0	78706.0	65150.0
	Min	-	77000.0	62000.0
	Max	-	81000.0	67000.0
	é-t	-	1213.0	1226.0
Correspondances $w_1 * cost_1(\sigma)$	Moy	-47373.1	-62648.7	-58716.6
	Min	-	-64050.0	-61136.4
	Max	-	-60606.3	-55732.1
	é-t	-	883.6	1428.6
Cadencement $w_2 * cost_2(\sigma)$	Moy	33526.9	8420.1	7469.7
	Min	-	7551.1	6345.3
	Max	-	9206.8	8307.9
	é-t	-	434.7	414.0
Trajets à vide (internes) $w_4 * cost_{4a}(\sigma)$	Moy	1610.0	2942.7	2829.4
	Min	-	2603.8	2462.5
	Max	-	3138.8	3218.8
	é-t	-	154.4	203.1

TABLE 3.2 – Résultats croisés de la solution existante (Initial), l’approche séquentielle (SQ) et l’approche simultanée (SM) au sens du premier type de critères de comparaison

	Véhicules				Correspondances				Cadencement				Haut-le-pied			
	Moy	Min	Max	StD	Moy	Min	Max	StD	Moy	Min	Max	StD	Moy	Min	Max	StD
Initial	91.0	-	-	-	180.0	-	-	-	131.0	-	-	-	1288.0	-	-	-
SQ	78.7	77	81	1.2	398.4	352	428	21.9	34.9	28	39	2.9	2354.2	2083	2511	123.5
SM	65.2	62	67	1.2	382.2	361	425	17.7	31.8	23	39	3.4	2263.5	1970	2575	162.5

TABLE 3.3 – Résultats croisés de la solution existante (Initial), l’approche séquentielle (SQ) et l’approche simultanée (SM) au sens du deuxième type de critères de comparaison.

Le tableau 3.2 montre qu’en moyenne, le meilleur coût total atteint par SM est $f_1 = 16732.5$, alors que SQ atteint $f_1 = 27420.0$. Ceci démontre la supériorité de l’approche simultanée par rapport à la méthode séquentielle. Selon le deuxième type de critères de comparaison (voir Tableau 3.3), les résultats de SM sont 52.32% meilleurs que ceux de SQ sur le nombre de véhicules, 3.125% meilleurs sur le nombre d’irrégularités de cadencement, 9.29% meilleurs sur la durée des trajets à vide, et 8% moins bons sur le nombre de possibilités de correspondances. Ces différences sont particulièrement notables étant donné que SQ et SM partent toutes deux de la même solution initiale.

Comme c’était prévisible, on constate qu’avec SQ, la qualité de service est fortement favorisée aux dépens du niveau de ressources engagées. En effet, au cours de la première partie de l’algorithme, aucune considération n’est faite des ressources, et ainsi moins de contraintes viennent interférer avec l’objectif de créer et d’améliorer les possibilités de correspondances. Ceci explique les résultats supérieurs de SQ par rapport à SM relativement à l’objectif de quantité et qualité des correspondances. Par contre, une fois les grilles horaires figées, la taille de la flotte est aussi implicitement fixée, privant cet objectif de tout poids dans la fonction objectif. L’approche simultanée permet d’obtenir un nombre de véhicules

significativement plus faible : 65.2 au lieu de 78.7 pour SQ (*i.e.* une diminution de 17.15%).

Pour conclure cette partie, nous observons que la qualité globale (au sens de la fonction d'évaluation) de la solution fournie est nettement supérieure avec l'approche simultanée qu'avec l'approche séquentielle. Ceci s'explique par le fait que le planificateur peut jouer sur la stratégie de pondération à sa guise, alors que dans le cas séquentiel, la taille de la flotte est réduite à être une conséquence des décisions prises en amont et de manière indépendante des objectifs de qualité de service.

Résultats de l'ILS pour LVA

L'ILS pour LVA vise à optimiser la partie ressources (trajets à vide et taille de la flotte), en incluant la prise en compte des haut-le-pied fictifs de boucle des services ($cost_{4b}$), contrairement à la première partie de la méthode de résolution générale. Ici, nous présentons brièvement la manière dont cette phase de post-optimisation impacte la qualité de la solution obtenue par l'ILS pour TVA.

L'inclusion d'un coût supplémentaire dans la fonction d'évaluation signifie une modification du paysage de recherche, ce qui explique la nouvelle marge de manœuvre libérée pour améliorer la qualité de la solution. Le voisinage *ServiceCrossOver* de l'ILS pour LVA permet de réduire considérablement le coût total $cost_4$ lié aux temps de trajet à vide, qui passe de 5275.4 à 3029.85 en moyenne, ce qui représente une réduction de 42.6%, avec un écart-type de 2.3. Parallèlement, le nombre de véhicules reste constant. Ceci s'explique par le jeu de pondérations choisi pour les objectifs liés aux ressources, qui dans notre cas favorise clairement l'objectif de nombre de véhicules requis par rapport à la durée des haut-le-pied. Ainsi, le nombre minimal de véhicules est préservé tout au long de la recherche.

Par essence, l'ILS pour LVA n'a aucun impact sur les objectifs relatifs à la qualité de service de la solution.

3.6.4 Analyse des voisinages

Dans cette section, nous comparons les performances des deux voisinages proposés : *LineShift* et *RunShift*, grâce aux méthodes suivantes :

- algorithme de descente avec le voisinage *LineShift* (LS) ;
- algorithme de descente avec le voisinage *RunShift* (RS).

L'objectif est d'étudier si, dans le cadre de ce problème, la modélisation que nous avons choisie, où les variables représentent les dessertes, est judicieuse par rapport au modèle plus traditionnel dans lequel les variables correspondent aux lignes. Le modèle que nous proposons définit un espace de recherche qui englobe celui lié à l'autre type de modèle, et permet des mouvements plus précis, d'un niveau de détail supérieur. Alors que *LineShift* peut être utilisé dans les deux cas, *RunShift* est spécifique à notre modèle, car il fait usage de la plus grande précision de celui-ci.

Rappelons que les deux voisinages sont originaux dans le sens où ils intègrent des modifications tant au niveau de la partie horaire qu'au niveau de la partie véhicule. De plus, des versions "simples" (qui sont uniquement relatives à la partie temporelle) de *LineShift* sont rencontrées dans la littérature, ce qui n'est pas le cas pour *RunShift* à notre connaissance.

3.6 Résultats

Les tableaux 3.4 et 3.5 exposent les résultats obtenus avec les deux méthodes selon, respectivement, les premiers et deuxièmes types de critères de comparaison.

		Initial	Approche Simultanée	
			LineShift (LS)	RunShift (RS)
Coût $f_1(\sigma)$	Moy	78763.8	62991.8	17079.5
	Min	-	62649.2	15287
	Max	-	63294.5	18986.9
	é-t	-	156.9	1112.5
Véhicules $w_3 * cost_3(\sigma)$	Moy	91000	75100	65150
	Min	-	74000	64000
	Max	-	76000	67000
	é-t	-	788	933
Correspondances $w_1 * cost_1(\sigma)$	Moy	-47373.1	-48282.8	-58422.6
	Min	-	-49135.1	-59725.5
	Max	-	-47313.3	-56844.9
	é-t	-	527.6	782.6
Cadencement $w_2 * cost_2(\sigma)$	Moy	33526.9	33379.3	7515.3
	Min	-	32834	6475.3
	Max	-	34161.8	8362.8
	é-t	-	305.9	390.5
Haut-le-pied (internes) $w_{4a} * cost_{4a}(\sigma)$	Moy	1610	2795.3	2836.8
	Min	-	2577.5	2598.8
	Max	-	3032.5	3040
	é-t	-	134.3	128.9

TABLE 3.4 – Résultats numériques pour le premier type de critères de comparaison. *RunShift* fournit de meilleurs résultats que *LineShift* sur les quatre objectifs principaux. *LineShift* est moins efficace sur les objectifs de ressources et n’a quasiment aucun impact sur les objectifs de qualité de service.

	Véhicules				Correspondances				Cadencement				Haut-le-pied			
	Moy	Min	Max	StD	Moy	Min	Max	StD	Moy	Min	Max	StD	Moy	Min	Max	StD
Initial	91	-	-	-	180	-	-	-	131	-	-	-	1288	-	-	-
LS	75.1	74	76	0.8	216.5	190	229	11.3	128.1	125	132	1.7	2236.2	2062	2426	107.4
RS	65.2	64	67	0.9	351.2	267	402	34.3	33.9	27	40	4	2269.4	2079	2432	103.1

TABLE 3.5 – Résultats numériques pour le deuxième type de critères de comparaison. En partant de la même solution initiale, la performance de RS est 62.26% meilleure que celle de LS sur le nombre de véhicules, 369% meilleure sur le nombre de possibilités de correspondances, 3248% meilleure sur le nombre d’irrégularités de cadencement et 3.5% moins bonne sur la durée des trajets à vide.

Le nombre de véhicules requis ainsi que les coûts liés aux correspondances chutent avec les deux méthodes, mais de manière beaucoup plus drastique avec *RunShift* qu’avec *LineShift*, ce qui peut s’expliquer par le manque de flexibilité de ce dernier.

En ce qui concerne la régularité des cadencements, le coût reste relativement stable avec *LineShift* alors qu’il s’effondre avec *RunShift*. Ceci est dû au fait que l’objectif de cadencement est très peu affecté par les mouvements issus de *LineShift*. Pour chaque ligne, seuls les intervalles de cadencement de début et de fin de journée, ainsi que ceux qui entourent une période de transition, subissent des variations de coût lors de l’application de ces mouvements. Les problèmes de cadencements qui se produisent à l’intérieur de périodes de cadencement homogène ne peuvent jamais être corrigés par les mouvements

du voisinage *LineShift*.

Même si les deux voisinages permettent d'apporter des améliorations importantes à la solution initiale, *RunShift* amène donc des résultats de qualité très nettement supérieure à ceux de *LineShift*.

En croisant les tables 3.2, 3.3, 3.4 et 3.5, une hiérarchie de méthodes se dégage selon le critère de valeur de fonction objectif obtenue :

$$SM(Sim.ILS) < RS(RunShift) < SQ(Seq.ILS) < LS(LineShift).$$

Ces résultats confirment la pertinence d'utiliser un modèle basé sur les dessertes comme variables plutôt que sur les lignes. Dans la continuité de ce raisonnement, on peut se questionner sur la possibilité de raffiner encore plus les modèles. Par exemple, l'hypothèse de temps de stationnement fixes aux arrêts pourrait être abandonnée, dégageant un nouveau degré de liberté dans la recherche. En contrepartie, le nombre de variables augmenterait considérablement, pour inclure tous les arrivées et départs de tous les arrêts de toutes les dessertes. La résolution d'un tel problème devient alors plus complexe et gourmande en ressources de calcul. De plus, imposer des temps de stationnement variables aux usagers aux arrêts de bus pourrait être un procédé commercialement délicat.

3.7 Adaptabilité du modèle

Le modèle et la méthode que nous avons présentés dans ce chapitre présentent l'avantage d'être flexibles et de pouvoir facilement intégrer de nouveaux besoins.

Nous avons étudié dans ce chapitre le problème de graphicaage du point de vue des autorités organisatrices, c'est-à-dire sans connaître la localisation des dépôts. Nous avons alors proposé un modèle qui considère chaque service comme une boucle fermée, et développé une méthode de résolution en deux phases adaptée.

Cependant, d'autres cas d'utilisation surviennent, qui correspondent aux différents modes de planification exposés en section 1.1.4. Nous exposons ici ces problèmes connexes, la façon dont ils peuvent être représentés par des adaptations mineures de notre modèle, et comment des variantes de notre méthode de résolution peuvent s'y appliquer.

Pour la facilité de comparaison, nous commençons par rappeler brièvement les caractéristiques du mode exposé dans cette section dit "Mode services en boucle" avant de passer au "Mode services nets" et au "Mode services avec dépôt".

Mode "services en boucle"

On considère un cas où soit on ne connaît pas précisément la localisation des dépôts, soit on n'a pas encore décidé quelles lignes rattacher à quel dépôt. On part alors dans l'optique de créer des services véhicules dont le point de départ $a(v) = s_{r_v}^\alpha$ de la première desserte et le point d'arrivée $z(v) = s_{r_v}^\omega$ de la dernière desserte sont rapprochés. Cette approche émane de la nécessité de faire commencer et terminer les services des véhicules, et ensuite des conducteurs, au même dépôt. Il est donc en général souhaitable d'éviter qu'un véhicule termine la dernière desserte de son service trop loin de l'endroit où il a

commencé. Les haut-le-pied fictifs permettent ainsi également d'approximer le kilométrage à vide supplémentaire qui sera effectué après l'affectation des services à un dépôt par la suite. On nomme ce mode "service en boucle" car on inclut dans la fonction de coût associée à l'objectif de trajets à vide un trajet à vide fictif liant le lieu $z(v)$ au lieu $a(v)$. La fonction obtenue est la suivante :

$$cost_4 = cost_{4a} + cost_{4b} \text{ où}$$

$$cost_{4a} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[\sum_{r, r_v^+ \in \Phi(v)} dt_{s_r^\omega, s_{r_v^+}^\alpha} \right]$$

et

$$cost_{4b} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[dt_{z(v), a(v)} \right]$$

Mode "services nets"

Dans ce mode, les dépôts n'existent pas. Ne connaissant pas leur localisation, on n'inclut aucun haut-le-pied de début ni de fin de service. Les services sont uniquement constitués d'une séquence de dessertes liées entre elles par des trajets haut-le-pied si nécessaire. Ce mode, le plus simple, correspond à une utilisation qui peut être faite par les autorités organisatrices (qui ne connaissent pas encore les dépôts qui entreront en jeu) ou par les exploitants, dans le cadre d'une première approche.

La fonction de coût utilisée est alors simple :

$$cost_4 = cost_{4a} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[\sum_{r, r_v^+ \in \Phi(v)} dt_{s_r^\omega, s_{r_v^+}^\alpha} \right]$$

La résolution, quant à elle, correspond directement au résultat de l'algorithme *TVA*, c'est-à-dire qu'on omet la post-optimisation dans l'approche proposée dans ce chapitre.

Mode "services avec dépôt"

Ce mode s'adresse en priorité aux exploitants, car il concerne les cas où la localisation des dépôts est connue. Dans notre modèle, un dépôt correspond à chaque groupe de ligne. Notre approche se base sur une hypothèse de groupes de lignes définis de manière à délimiter les interlignes possibles (ceux-ci ne sont autorisés qu'à l'intérieur d'un même groupe). Ces groupes correspondent au minimum à un exploitant, étant donné que deux exploitants ne peuvent pas partager le même véhicule. De plus, il est possible de raffiner le découpage des groupes de lignes par type de véhicules, en faisant correspondre une ligne à un type de véhicule. Ensuite, chaque groupe est rattaché à un dépôt géolocalisé.

On peut alors intégrer au calcul les hauts-le-pied de début et de fin de service. Concrètement, par rapport au mode "services nets", on va favoriser les services qui commencent et terminent à proximité du dépôt.

Soit $dpt(g)$ le dépôt associé au groupe g . Afin de prendre en compte cet objectif complémentaire, la fonction de coût liée à l'objectif de durée des trajets à vide devient : $cost_4 = cost_{4a} + cost_{4c}$ où

$$cost_{4a} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[\sum_{r, r_v^+ \in \Phi(v)} dt_{s_r^w, s_{r_v^+}^\alpha} \right]$$

et

$$cost_{4c} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[dt_{dpt(g), a(v)} + dt_{z(v), dpt(g)} \right]$$

Au niveau de l'affectation des véhicules, on modifie les coûts des arcs partant de la source et arrivant au puits par rapport à la méthode exposée en 3.5.3.

Dans ce mode, on sait à quel dépôt est rattachée chaque desserte. Aussi, on ajoute à chaque arc partant ou arrivant au dépôt le coût lié à la durée du trajet à vide correspondant, pondéré par le poids affecté à l'objectif de haut-le-pied.

AuctionAlgo résout alors le problème d'affectation véhicule de façon optimale à chaque itération, en prenant en compte les dépôts.

Par ailleurs, comme dans le mode "services nets", on omet la post-optimisation dans l'approche proposée dans ce chapitre, l'algorithme *TVA* pouvant tout à fait résoudre ce problème adjacent sous réserve de la modification de coût expliquée ici dans *AuctionAlgo*.

3.8 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème intégré de planification des horaires de lignes et de création des affectations véhicules.

Nous avons proposé une modélisation sous forme de problème d'optimisation sous contraintes, qui s'est avérée riche et flexible, notamment grâce à la prise en compte des dessertes et non des lignes comme variables de décision et grâce à une double affectation d'horaire et de véhicule à chacune de ces variables. Le modèle s'appuie également sur un raisonnement par groupes de lignes qui permet de prendre en compte l'interligne. L'intermodalité est gérée par le modèle, en combinaison avec une modélisation complète des correspondances.

Nous avons développé une approche de résolution en deux niveaux qui permet de prendre en compte la problématique des autorités organisatrices dans ce contexte, et avons montré l'adaptabilité de la méthode qui permet d'intégrer facilement de nouvelles contraintes pour se placer du point de vue des exploitants par exemple.

Cette méthode s'appuie sur deux algorithmes imbriqués de recherche locale itérée et sur un algorithme efficace d'affectation par enchères.

Afin d'étayer cette méthode, nous avons développé deux types de voisinages adaptés à notre modèle, et avons comparé leurs performances entre eux et par rapport à une approche séquentielle conventionnelle. Un troisième type de voisinage a été élaboré pour répondre spécifiquement à la problématique des autorités organisatrices, que nous avons modélisée comme une création de services en boucle.

Suite à une série d'expérimentations, nous avons constaté la supériorité de l'approche simultanée par rapport à l'approche séquentielle sur le réseau réel sur lequel nous avons basé nos tests. De fortes améliorations ont été constatées, tant au niveau des ressources (taille de la flotte) que de la qualité de service (quantité et qualité des correspondances, régularité du cadencement). À l'aide de tests réalisés sur les deux voisinages, nous avons également conclu à l'intérêt de notre modélisation par desserte.

L'algorithme développé a été intégré dans un système d'aide à la décision commercial qui est maintenant utilisé à la fois par des planificateurs de réseaux urbains et de réseaux interurbains. L'outil permet de générer, évaluer et comparer un ensemble de scénarios rapidement. Le produit est utilisé pour préparer des simulations et des propositions utilisant différents jeux de pondérations et différentes contraintes.

Nous allons étudier, dans le chapitre suivant, un problème de planification qui se place dans un contexte différent, modifiant les horaires des lignes d'un réseau en fonctionnement, avec pour objectif de préserver les plannings de ressources.

Chapitre 4

Réoptimisation des horaires en préservant les plannings de ressources

Ce chapitre concerne une problématique originale vis-à-vis du processus traditionnel séquentiel de planification des réseaux de transport. Comment apporter des améliorations à l'offre horaire d'un réseau en activité sans rendre caduque l'organisation de l'exploitation associée (*i.e.* devoir refaire tous les plannings des véhicules et des conducteurs)? L'objectif est l'amélioration de la qualité de service par les correspondances, tant en nombre de possibilités qu'en temps d'attente impliqué. Cette approche va à l'encontre du processus usuel qui veut que les ressources soient affectées en fonction des grilles horaires définies. Nous présentons dans un premier temps la justification empirique de notre approche, puis proposons deux modèles pouvant s'appliquer. Pour chacun, nous développons des voisinages adaptés et exposons une méthode de résolution basée sur une méthode tabou. Nous validons enfin l'approche par une série de tests réalisés sur cinq jeux de données, pour lesquels nous présentons la méthode de génération utilisée. Des gains importants sont obtenus sur le réseau considéré, permettant une meilleure mobilité des usagers à l'intérieur du réseau et au niveau intermodal. Les travaux présentés dans ce chapitre sont en cours de soumission pour publication.

Sommaire

4.1	Présentation du problème	97
4.2	Propositions de modélisation	99
4.3	Modélisations retenues	100
4.3.1	Données	101
4.3.2	Contraintes	101

4.3.3	Objectif : quantité et qualité des correspondances	102
4.3.4	Sorties	102
4.4	Formalisation des modèles	102
4.4.1	Notations	103
4.4.2	Contraintes	104
4.4.3	Objectif : quantité et qualité des correspondances	105
4.5	Approche de résolution	105
4.5.1	Méthode de résolution	106
4.5.2	Espace de recherche et prétraitement	106
4.5.3	Recherche tabou	107
4.5.4	Voisinages	107
4.5.5	Paramétrage de la méthode tabou pour le SbrT	109
4.6	Résultats	109
4.6.1	Jeux de tests	109
4.6.2	Comparaison des résultats pour les deux algorithmes	113
4.6.3	Analyses complémentaires	115
4.7	Synthèse du chapitre	117

4.1 Présentation du problème

Nous considérons ici le problème qui consiste à décaler les horaires d'un réseau en fonctionnement (*i.e.* avec des grilles horaires et des affectations de ressources). L'objectif que nous définissons est d'améliorer la qualité de service à travers les correspondances en minimisant l'impact subi par les exploitants du réseau. Nous nommons ce problème SbrT (Schedules-based re-Timetabling) dans ce chapitre.

Ce problème est régulièrement rencontré par les planificateurs en pratique, mais prend à rebours le processus théorique utilisé dans la littérature, selon lequel les grilles horaires sont définies dans un premier temps, alors que les affectations de ressources sont réalisées en fonction de celles-ci. C'est également le fonctionnement reflété en pratique, et les planificateurs manquent d'outils leur permettant d'accomplir ce travail d'ajustement *a posteriori*.

La figure 4.1 rappelle le processus usuel et schématise le positionnement du SbrT dans celui-ci.

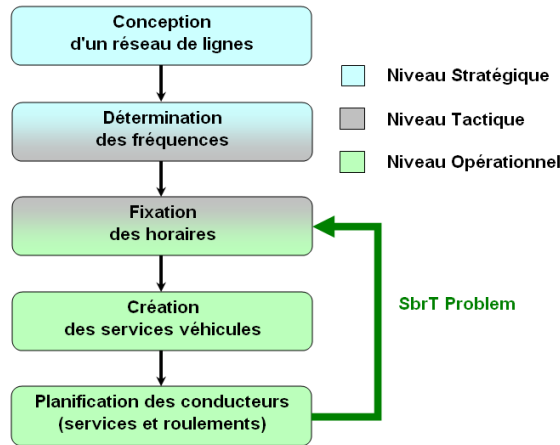


FIGURE 4.1 – Positionnement du SbrT dans le processus de planification

Dans un réseau de transport en activité, l'environnement continue à évoluer, modifiant les paramètres qui ont été pris en compte au moment de la création du réseau, de ses lignes et de ses horaires. Les évolutions de la demande et de l'offre des réseaux en connexion intermodale peuvent nuire à la qualité de service offerte par le réseau, ou du moins rendre la situation améliorable, par des changements de l'offre horaire.

Dans une situation où les horaires doivent être remis en cause, le processus traditionnel théorique voudrait que le planificateur reprenne toutes les étapes successives à partir de la création des horaires. Cependant, affecter les ressources véhicules et conducteurs est une tâche extrêmement complexe qui doit prendre en considération un grand nombre de contraintes, d'objectifs et de paramètres. Parmi ceux-ci, on retrouve les contraintes relatives aux véhicules (types et capacités) et celles relatives aux conducteurs (toutes les contraintes sociales : durée des pauses, temps de travail effectif, etc.). Ce travail est suffisamment fastidieux pour décourager les responsables d'appliquer des changements aux grilles horaires.

Ceci est d'autant plus vrai en milieu interurbain, que lorsque les exploitants ont remporté un appel d'offre, les conseils généraux (responsables de la qualité de service proposée) n'ont qu'une marge de manœuvre minimale pour demander des avenants au contrat.

Ainsi, pour s'attaquer à ce problème, nous proposons une modélisation et une méthode de résolution qui permettent de travailler à l'amélioration de la qualité de service par les horaires tout en laissant inchangées les affectations véhicules et conducteurs. Pour cela, nous proposons de décaler légèrement les horaires des courses pour générer plus de correspondances ou diminuer les temps d'attente impliqués. Ces décalages doivent permettre de garantir que les affectations véhicules et conducteurs existantes restent réalisables. Les horaires sont légèrement impactés, mais pas les séquences (affectations). Par conséquent, les contraintes sociales et l'utilisation des ressources ne pâtiront pas des modifications apportées.

Parmi les études relatives au problème de détermination des horaires, on en distingue certaines qui présentent quelques similitudes avec notre approche :

- certaines études intègrent au problème de création des horaires des contraintes relatives aux ressources. Cependant, ces contraintes se limitent au nombre de véhicules [Chakroborty *et al.*, 1995; Chakroborty *et al.*, 1997; Deb et Chakroborty, 1998; Chakroborty *et al.*, 2001];
- [Jansen *et al.*, 2002] propose de modifier des grilles horaires existantes en décalant simultanément toutes les dessertes d'une même ligne. Notons que cette approche se focalise sur le cadencement, qu'elle préserve rigoureusement, et les correspondances, mais ne tient aucunement compte des ressources nécessaires hormis dans le cas où l'interligne est prohibé sur l'ensemble du réseau.

Afin de mieux saisir les enjeux du problème, détaillons le concept d'affectation pour un conducteur ou un véhicule. Une affectation (ou service) véhicule est une séquence de courses, de trajets haut-le-pied (liant les courses entre elles ou au dépôt), de temps de retour et de temps de stationnement. Chaque service commence et finit au dépôt (voir Figure 4.2). Une affectation conducteur suit globalement le même schéma, à l'exception du temps de stationnement, remplacé par du temps de pause.

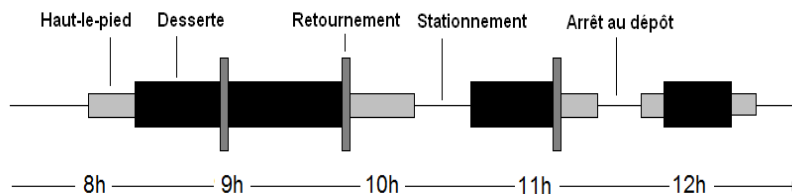


FIGURE 4.2 – Constitution d'une affectation véhicule

4.2 Propositions de modélisation

Dans le but d'améliorer la qualité de service en impactant au minimum la gestion des ressources, nous avons défini puis sélectionné ou éliminé plusieurs propositions de modèles. Nous exposons ici les principales pistes étudiées et les raisons pour lesquelles elles ont été validées ou rejetées.

- i **Décaler les courses sans considération de ressources** dans un réseau existant [Jansen *et al.*, 2002] est voué à compromettre les affectations véhicules et conducteurs, hormis dans des cas très simplifiés. Typiquement, cette approche ne répond pas au besoin du milieu interurbain. Il n'y a aucune garantie du maintien du nombre de véhicules et de conducteurs requis, et des incompatibilités peuvent apparaître dans les affectations, nécessitant nombre de vérifications et d'ajustements.
- ii **Décaler les courses avec des objectifs de ressources** tels que réduire la taille de la flotte [Guihaire et Hao, 2008b], est une piste qui, quoique présentant de nombreux avantages, ne répond pas au problème considéré ici : les affectations de ressources risquent d'être totalement remises en question.
- iii **Décaler les affectations véhicules entières** est une possibilité. Cela consiste à décaler du même intervalle toutes les courses affectées à un véhicule donné. L'ensemble des variables du modèle est alors celui des véhicules (ou plus précisément celui des heures de départ de la première course de chaque service véhicule). Le reste de la grille horaire peut ensuite être facilement déduit de ces valeurs. Ceci constitue un modèle simple, naturel et pratique. Cependant, lorsque l'interligne est autorisé et que les conducteurs changent de véhicules durant leur service, ce modèle seul (*i.e.* sans contraintes additionnelles) ne permet pas de garantir la préservation des services conducteurs. Par exemple, considérons le cas exposé dans la figure 4.3 où chaque ligne représente une affectation véhicule : le conducteur A utilise deux véhicules au cours de son service, ce qui peut se produire lorsque des types de véhicules différents sont requis selon les courses. Le risque représenté ici est qu'en retardant l'affectation du véhicule 1 et en avançant celle du véhicule 2, des courses affectées au conducteur A se chevauchent, rendant les plannings irréalisables.

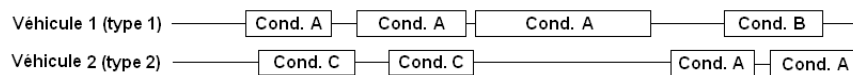


FIGURE 4.3 – Décalage des affectations véhicules

- iv **Décaler les affectations conducteurs entières**. Si nous examinons maintenant la possibilité de décaler les affectations conducteurs, le problème symétrique de chevauchement des services véhicules se produit.

Les deux dernières approches peuvent sembler relativement équivalentes, cependant quelques points nous font préférer le modèle **iv** : dans la plupart des cas, l'amplitude des affectations conducteurs est plus faible que celle des affectations véhicules (les premières sont souvent d'ailleurs des sous-parties des secondes). En effet, les véhicules peuvent théoriquement être utilisés en quasi-permanence, à l'exclusion des temps de prise de carburant, nettoyage, maintenance, etc. alors que les régulations sociales limitent l'amplitude des services conducteurs. Le modèle **iv** permet donc plus de flexibilité que le modèle **iii**. De plus, les régulations sociales imposent des contraintes strictes sur la durée, la fréquence et la localisation des pauses. Le modèle **iv** permet de garantir par essence le respect de ces contraintes, alors que dans le modèle **iii**, un grand nombre de vérifications s'imposent pour maintenir la réalisabilité des services conducteurs. Pour ces raisons, nous éliminons de notre étude le modèle **iii**.

En conséquence, les propositions que nous avons retenues pour répondre à notre problème sont les suivantes :

- v Une variante du modèle **iv** : décaler les affectations conducteurs entières en ajoutant des vérifications sur les services véhicules.
- vi Une variante des modèles **i** et **ii** : décaler les courses à l'unité en ajoutant des contraintes sur les services véhicules et conducteurs.

4.3 Modélisations retenues

Dans cette section, nous présentons les deux modèles retenus, et pour lesquels nous allons développer des méthodes adaptées dans la suite de ce chapitre.

- v **Décaler les affectations conducteurs entières en ajoutant des vérifications sur les services véhicules.** Ce modèle considère les heures de départ de toutes les affectations conducteurs comme les variables du problème. Des contraintes existent sur les affectations véhicules, qui imposent que les séquences actuelles soient préservées. Parallèlement, ce modèle restreint l'espace de recherche de manière assez importante par rapport aux autres précédemment exposés.
- vi **Décaler les courses à l'unité en ajoutant des contraintes sur les services véhicules et conducteurs.** Ce modèle est le plus flexible de tous en termes d'optimisation des correspondances, tout en autorisant des changements plus importants au niveau des affectations de ressources. Les temps de pause des conducteurs peuvent varier légèrement, d'où la présence de contraintes portant sur les affectations conducteurs, et qui encadrent cet aspect social.

Nous étudions ces deux modèles dans le reste de ce chapitre, et utilisons les notations suivantes :

- SDA (pour Shifting Driver Assignment) pour le premier : décaler les affectations conducteurs entières en ajoutant des vérifications sur les services véhicules ;
- SLR (pour Shifting Line Runs) pour le second : décaler les courses à l'unité en ajoutant des contraintes sur les services véhicules et conducteurs.

4.3.1 Données

Dans les **deux modèles**, nous devons disposer :

- du réseau de lignes ;
- des grilles horaires actuelles ;
- des informations (point de connexion et horaires) des modes de transport en relation ;
- de la liste paramétrée des correspondances (avec les lignes impliquées, le sens de la correspondance, le niveau d'importance, les temps d'attente minimal, idéal et maximal) ;
- du décalage horaire maximal ;
- des affectations véhicules (courses, retournements, haut-le-pied, stationnement) ;
- des affectations conducteurs (courses, retournements, haut-le-pied et pauses).

Notons que dans les **deux modèles**, les décalages horaires des courses sont limités. Aussi, nous considérons que les temps de trajet en charge sont fixes par desserte au cours du processus de recherche.

Des informations supplémentaires sont requises pour le **Modèle SLR** :

- Intervalles de temps de pause autorisés. Pour prendre en considération les règles sociales à ce sujet ainsi que les taux de rémunération appliqués en fonction de la durée de ces pauses, nous utilisons des intervalles de temps définis par le planificateur. Par exemple, si les intervalles (en minutes) définis sont : [0-15] ;[16-30] ;[31-45] ;[46-N], alors un temps de pause initial de 28 pourra varier entre 16 et 30 dans le planning final, tandis qu'un temps de pause initial de 32 devra varier entre 31 et 45.

4.3.2 Contraintes

Un ensemble de contraintes s'applique aux **deux modèles** :

Affectation complète Chaque variable (conducteur pour le modèle SDA, course pour le modèle SLR) doit se voir affecter une heure de départ.

Décalage maximal Les grilles horaires en place ont probablement été définies de manière à prendre en compte l'autre critère décisif pour la qualité de service : le cadencement. La détermination des cadencements permet d'assurer un service régulier d'une part, et adapté aux pics de demandes d'autre part, afin d'éviter les dépassements de capacité. Dans le but de respecter cette adaptation, le décalage autorisé est limité à l'intérieur d'un intervalle donné.

En complément, un ensemble de contraintes spécifiques s'applique à chaque modèle individuellement.

Modèle SDA

Affectation Véhicule L'affectation véhicule initiale doit rester réalisable avec les nouveaux horaires. Concrètement, chaque véhicule doit être en mesure d'effectuer la

même séquence ordonnée de courses, retournements et trajets haut-le-pied, sans qu'aucun de ces éléments ne se chevauche. Seuls les temps de stationnement, en terminus ou en dépôt, peuvent varier. Notons que pour ce modèle, cette contrainte peut être réduite à la considération des liaisons entre courses affectées à des conducteurs différents, puisque le reste est géré par essence par le modèle.

Modèle SLR

Affectation Conducteur L'affectation conducteur initiale doit rester réalisable avec les nouveaux horaires de courses. Concrètement, chaque conducteur doit être capable de servir la même séquence de courses, retournements, haut-le-pied et temps de pause, dans le même ordre et sans que ces éléments se chevauchent. Afin de respecter ces contraintes sociales tout en accordant une certaine flexibilité au modèle, chaque temps d'attente est autorisé à varier à l'intérieur d'un intervalle défini en entrée.

Affectation Véhicule L'affectation véhicule actuelle doit rester réalisable avec les nouveaux horaires. Chaque véhicule doit être en mesure d'effectuer la même séquence ordonnée de courses, retournements et trajets haut-le-pied, sans qu'aucun de ces éléments ne se chevauche. Seuls les temps de stationnement, en terminus ou en dépôt, peuvent varier.

4.3.3 Objectif : quantité et qualité des correspondances

L'objectif est le même dans **les deux modèles**. Il consiste à créer des possibilités de correspondances nombreuses et de bonne qualité pour les usagers du système.

Une politique d'usagers non captifs est appliquée, symbolisant le fait qu'une correspondance est possible uniquement lorsque le temps d'attente impliqué se situe à l'intérieur d'un intervalle prédéfini. Une valeur minimale, idéale et maximale du temps d'attente, ainsi qu'un niveau d'importance, sont spécifiés pour chaque type de correspondance. Plus le temps d'attente observé est proche du temps d'attente idéal, meilleure est la qualité.

Nous considérons ici les correspondances interlignes, intralignes et intermodales.

À l'inverse du chapitre précédent, et en raison du caractère mono-objectif de notre problème, nous nous plaçons maintenant dans le contexte d'un problème de maximisation, avec une fonction de coût toujours positive.

4.3.4 Sorties

Dans **les deux modèles**, les variables d'état sont les mêmes et permettent de générer la sortie finale du problème, à savoir les grilles horaires complètes des lignes du réseau. En complément, on obtient également les statistiques sur la quantité et la qualité des correspondances.

4.4 Formalisation des modèles

Dans cette partie, nous présentons la formulation mathématique des modèles **iv** et **v**.

4.4.1 Notations

Soient \mathcal{R} l'ensemble des courses du réseau, \mathcal{S} l'ensemble des arrêts, \mathcal{V} l'ensemble des véhicules, \mathcal{D} l'ensemble des conducteurs, \mathcal{T} l'ensemble des correspondances, \mathcal{H} l'horizon de planification.

Données

- Pour toute desserte $r \in \mathcal{R}$:
 - $\mathcal{S}^r \subset \mathcal{S}$: ensemble des arrêts desservis.
 - $\mathcal{S}^{*r} \subset \mathcal{S}^r$: ensemble restreint des arrêts desservis.
 - s_r^α, s_r^ω : premier et dernier arrêt.
 - $h_{r,s}^\leftarrow, h_{r,s}^\rightarrow$: heure d'arrivée et de départ pour $s \in \mathcal{S}^r$ dans la grille horaire actuelle.
 - v_r : véhicule affecté à r .
 - d_r : conducteur affecté à r .
 - r_v^+ : desserte suivant r dans le service du véhicule $v = v_r$.
 - r_d^+ : desserte suivant r dans le service du conducteur $d = d_r$.
- Pour toute correspondance $t = (a_1, s_1, a_2, s_2) \in \mathcal{T}$ (avec $a_1, a_2 \in \mathcal{A}, s_1, s_2 \in \mathcal{S}$) :
 - il_t : niveau d'importance.
 - $\lfloor wt_t \rfloor, [wt_t], \lceil wt_t \rceil$: temps d'attente minimal, idéal et maximal.
- Pour tout conducteur $d \in \mathcal{D}$:
 - r_d^α et r_d^ω : première et dernière desserte du service.
 - $\lceil S \rceil$: décalage horaire maximal autorisé par desserte.

En supplément, pour le modèle SDA :

- $h(d)$: heure initiale de début de service du conducteur d ($h(d) = h_{r_d^\alpha, s_{r_d^\alpha}}^\rightarrow$).
- $ttv_{r,r'}$ et $dhv_{r,r'}$: temps de retournement et de haut-le-pied pour chaque paire de dessertes $(r, r') \in \mathcal{R}^2$ affectées consécutivement au même véhicule mais à un conducteur différent dans les services initiaux.

En supplément, pour le modèle SLR :

- $h(r)$: heure initiale de début de la desserte r ($h(r) = h_{r, s_r^\alpha}^\rightarrow$).
- $ttv_{r,r'}$ et $ttd_{r,r'}$: temps de retournement entre deux dessertes consécutives r et r' au sein d'un service véhicule et au sein d'un service conducteur respectivement.
- $dhv_{r,r'}$ et $dhd_{r,r'}$: temps de haut-le-pied entre deux dessertes consécutives r et r' au sein d'un service véhicule et au sein d'un service conducteur respectivement. Ce haut-le-pied peut être direct entre deux dessertes, ou scindé en deux parties si il y a un passage par le dépôt.
- $\lfloor dw_{r,r'} \rfloor$ et $\lceil dw_{r,r'} \rceil$: durée minimale et maximale du temps d'attente entre deux dessertes consécutives dans un service conducteur. On la déduit du temps d'attente initial ($h_{r', s_{r'}}^\rightarrow - h_{r, s_r}^\leftarrow - ttd_{r,r'} - dhd_{r,r'}$, où $h_{r', s_{r'}}^\rightarrow$ correspond à l'heure de départ de la desserte r' et h_{r, s_r}^\leftarrow à l'heure d'arrivée de la desserte r), et des périodes de temps d'attente (Section 4.3.1).

Variables de décision et valeurs

Dans le modèle SDA, l'ensemble des variables de décision correspond aux heures de début de service de chaque conducteur $d \in \mathcal{D} : \pi(d) \in \mathcal{H}$. Dans le modèle SLR, il correspond aux heures de début de chaque desserte $r \in \mathcal{R} : \pi(r) \in \mathcal{H}$. Toutes les variables de décision prennent leur valeur dans \mathcal{H} .

En complément, un ensemble de variables d'état est tenu à jour afin de faciliter le calcul des valeurs liées à l'objectif de correspondances. Cet ensemble inclut les heures d'arrivée et de départ des dessertes pour un ensemble restreint d'arrêts, qui est lui-même composé du premier et dernier arrêt de chaque desserte ainsi que des arrêts qui peuvent être lieu de correspondance. On note ces variables d'état $\pi_{r,s}^{\leftarrow} \in \mathcal{H}$ et $\pi_{r,s}^{\rightarrow} \in \mathcal{H}, \forall r \in \mathcal{R}, \forall s \in \mathcal{S}^r$. Notons que $\pi(d) = \pi_{r_1, s_{r_1}^{\alpha}}^{\rightarrow}$, où $r_1 = r_d^{\alpha}$ (la première desserte du service conducteur), et que $\pi(r) = \pi_{r, s_r^{\alpha}}^{\rightarrow}$.

Une *configuration* σ est l'affectation complète de valeurs dans \mathcal{H} à l'ensemble des variables de décision.

4.4.2 Contraintes

Soit $sta(r, r') = \pi_{r', s_{r'}^{\alpha}}^{\rightarrow} - \pi_{r, s_r^{\omega}}^{\leftarrow} - dhv_{r,r'} - ttv_{r,r'}$ le temps de stationnement du véhicule v entre les dessertes r et r' qui se suivent dans son service.

Modèle SDA

Affectation Complète

$$\forall d \in \mathcal{D}, \pi(d) \in \mathcal{H} \quad (4.1)$$

Décalage Horaire Maximal

$$\forall d \in \mathcal{D}, |\pi(d) - h(d)| \leq \lceil S \rceil \quad (4.2)$$

Affectation Véhicule

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall (r, r') \in \mathcal{R}^2, (r' = r_v^+ \wedge d_r \neq d_{r'}) \Rightarrow (sta(r, r') \geq 0) \quad (4.3)$$

Modèle SLR

Affectation Complète

$$\forall r \in \mathcal{R}, \pi(r) \in \mathcal{H} \quad (4.4)$$

Décalage Horaire Maximal

$$\forall r \in \mathcal{R}, |\pi(r) - h(r)| \leq \lceil S \rceil \quad (4.5)$$

Affectation Conducteur Soit $att(r, r') = \pi_{r', s_{r'}}^{\rightarrow} - \pi_{r, s_r}^{\leftarrow} - dh_{d, r, r'} - ttd_{r, r'}$ le temps d'attente du conducteur d entre les dessertes r et r' qui se suivent dans son service.

$$\forall d \in \mathcal{D}, \forall (r, r') \in \mathcal{R}^2, (r' = r_d^+) \Rightarrow (att(r, r') \geq \lfloor dw_{r, r'} \rfloor \wedge att(r, r') \leq \lceil dw_{r, r'} \rceil) \quad (4.6)$$

Affectation Véhicule

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall (r, r') \in \mathcal{R}^2, (r' = r_v^+) \Rightarrow (sta(r, r') \geq 0) \quad (4.7)$$

4.4.3 Objectif : quantité et qualité des correspondances

La fonction de coût relative aux correspondances est une fonction non linéaire du temps d'attente, qui favorise en priorité les temps d'attente proches des valeurs idéales. Chaque temps d'attente compris dans l'intervalle autorisé symbolise une possibilité de correspondance et génère une addition au coût de la configuration. Le coût engendré pour la configuration est également pondéré par le niveau d'importance de chaque correspondance. Nous sommes dans le cadre d'un problème de maximisation.

$$cost(\sigma) = \sum_{\substack{t \in \mathcal{T} \\ t=(l_1, s_1, l_2, s_2)}} \left[il_t * \sum_{\substack{r_1 \in \mathcal{R}_{l_1} \\ r_2 \in \mathcal{R}_{l_2}}} fTr(t, \pi_{r_1, s_1}^{\leftarrow}, \pi_{r_2, s_2}^{\rightarrow}) \right]$$

où

$$fTr(t, h_1 \in \mathcal{H}, h_2 \in \mathcal{H}) = \begin{cases} \text{croissante de } 0.5 \text{ à } 1 & \text{si } \lfloor wt_t \rfloor < h_2 - h_1 < \lceil wt_t \rceil \\ \text{décroissante de } 1 \text{ à } 0 & \text{si } \lceil wt_t \rceil < h_2 - h_1 < \lfloor wt_t \rfloor \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Seuls les coûts liés aux correspondances intramodales sont exposés ici, mais ceux liés aux correspondances intermodales sont également inclus dans le coût de la configuration. Le calcul de ces valeurs est similaire à celui exposé ici.

4.5 Approche de résolution

Dans cette partie, nous présentons notre approche de résolution pour le SbrT, en portant une attention particulière aux voisinages utilisés.

4.5.1 Méthode de résolution

Une méthode tabou est mise en place. La solution initiale est constituée des horaires et affectations de ressources existantes, en place dans le réseau et chez l'exploitant. Cette solution est réalisable. Au cours de la recherche tabou, nous restons toujours à l'intérieur du domaine de réalisabilité. Une phase de prétraitement permet dans un premier temps de réduire le domaine de chaque variable. Un voisinage est ensuite utilisé qui modifie les horaires des courses sans changer les séquences affectées aux véhicules et aux conducteurs. L'intégralité du voisinage de la solution courante est exploré à chaque itération et un mouvement parmi ceux de coût maximal est appliqué. Le paramétrage de notre méthode tabou est développé dans les sections suivantes. En sortie, de nouvelles grilles horaires sont proposées, avec une qualité supérieure au sens de la fonction objectif, tandis que les séquences de courses affectées aux véhicules et aux conducteurs restent identiques.

4.5.2 Espace de recherche et prétraitement

Une configuration σ est une affectation complète de valeurs aux variables du modèle. L'espace de recherche Σ est défini comme suit :

$$\begin{aligned} \Sigma &= \{\sigma | \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{H}\} \text{ pour le modèle SDA,} \\ \Sigma &= \{\sigma | \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{H}\} \text{ pour le modèle SLR,} \end{aligned}$$

Au cours de la phase de prétraitement, l'objectif est de réduire les domaines des variables par propagation de contraintes et de réaliser les calculs qui peuvent être faits une fois pour toutes en début de processus, de manière à accélérer la recherche par la suite.

Réduction de domaine - consistance de nœud

Étant donné le domaine initial des variables (\mathcal{H} dans les deux modèles) et la contrainte de décalage horaire maximal, la taille du domaine de chaque variable peut être réduite à une valeur égale à deux fois la taille du décalage maximal autorisé.

$$\text{Modèle SDA : } \forall d \in \mathcal{D}, \text{Domaine}(d) = [h(d) - \lceil S \rceil; h(d) + \lceil S \rceil]$$

$$\text{Modèle SLR : } \forall r \in \mathcal{R}, \text{Domaine}(r) = [h(r) - \lceil S \rceil; h(r) + \lceil S \rceil]$$

Prétraitement des décalages minimaux entre variables - consistance d'arcs

Dans les deux modèles, une contrainte cruciale est le respect des affectations de ressources initiales. Il est impératif de s'assurer qu'aucun élément de ces affectations ne chevauche ses voisins au cours de la recherche.

Afin d'empêcher les chevauchements, il faut prendre en compte la durée de tous les éléments des affectations. Rappelons que tous ces éléments ont une durée fixe prédéfinie à l'exception des temps de pause et de stationnement. Il est alors possible de calculer un intervalle minimal de séparation entre toutes les paires de variables.

Dans le Modèle SDA, on liste, pour chaque conducteur, les conducteurs qui lui sont liés par une contrainte. En pratique, cela correspond à tous les conducteurs qui utilisent au moins un véhicule en commun au cours de leur service (*i.e.* pour des courses différentes).

Afin de maintenir la réalisabilité du service véhicule associé, il faut en permanence s'assurer que ses éléments de durée fixe (courses, retournement, haut-le-pied) ne se chevauchent pas, et donc que le temps de stationnement interdessertes est toujours positif ou nul. À partir de là, on déduit les intervalles de temps minimaux qui doivent séparer les heures de départ de chaque paire de services conducteurs liés par ce type de contrainte. Il s'agit du traitement préliminaire associé à la contrainte 4.3.

Dans le Modèle SLR, il faut élargir le champ des contrôles aux affectations véhicules et conducteurs. Pour chaque desserte, on liste la desserte suivante et précédente sur l'affectation véhicule, ainsi que la desserte suivante et précédente pour le conducteur. Ensuite, pour chacune, on calcule l'intervalle minimal entre les heures de départ de la desserte qui nous intéresse et celles de ses voisines. Dans cet intervalle, on prend en compte la durée de la desserte, le temps de retournement et celui de haut-le-pied. De plus, en ce qui concerne les écarts avec les dessertes voisines dans l'affectation conducteur, on doit maintenir un temps de pause minimal et maximal en fonction du temps de pause initial. Il s'agit du traitement préliminaire associé aux contraintes 4.6 et 4.7.

4.5.3 Recherche tabou

La recherche tabou (Tabu Search) est une métaheuristique qui s'appuie sur une recherche locale combinée à un mécanisme de prévention des cycles, grâce à un système de mémoire des mouvements précédemment appliqués ou des configurations visitées (la liste tabou). Elle a été présentée initialement par [Glover, 1986] et utilisée depuis dans un très grand nombre d'applications.

À partir d'une solution initiale, le principe général de la recherche tabou est le suivant (voir Algorithme 4.1). À chaque itération de la recherche, une partie ou l'ensemble des voisins de la solution est exploré, et un des mouvements parmi ceux de coût minimal est sélectionné. Ce mouvement est appliqué quel que soit son coût, à la condition de ne pas créer un cycle dans le processus de recherche locale à court terme (en menant à une configuration dont les caractéristiques sont stockées dans la liste tabou). Une exception est faite (critère d'aspiration) lorsque le mouvement permet d'atteindre une solution de meilleure qualité que la meilleure solution enregistrée à ce stade. La liste tabou est mise à jour à chaque itération de la recherche en fonction des mouvements choisis. Ce mécanisme permet de sortir des minima locaux en acceptant des mouvements détériorants et en empêchant parallèlement le retour immédiat à la solution de minimum local qui vient d'être quittée.

4.5.4 Voisinages

Nous avons défini deux types de voisinages afin de s'adapter aux caractéristiques de nos deux modèles. Le premier, *DecalCond*, permet de s'attaquer au problème formulé dans le modèle SDA, tandis que le deuxième, *DecalCourse*, est adapté au modèle SLR.

DecalCond

Un mouvement issu du voisinage *DecalCond* modifie la valeur d'une unique variable (en l'occurrence, l'heure de départ d'un service conducteur). Une solution voisine est obtenue

Algorithme 4.1 : Algorithme de Recherche Tabou

```

 $s_0 \leftarrow \text{GenererSolutionInitiale}$ 
 $s^* \leftarrow s_0$ 
 $\mathcal{L}_T \leftarrow \emptyset$ 
tant que  $\neg \text{CriteresArret}()$  faire
   $\mathcal{N}^t(s) \leftarrow \{s' \in \mathcal{N}(s) \mid s' \notin \mathcal{L}_T \vee f(s') \leq f^*\}$ 
   $s' \leftarrow \min_f \mathcal{N}^t(s)$ 
   $s \leftarrow s'$ 
  remplacer le plus ancien élément de  $\mathcal{L}_T$  par  $s$ 
  si  $f(s') < f(s^*)$  alors  $s^* \leftarrow s'$ 
renvoyer  $s^*$ 

```

en décalant cette heure de n minutes ($n \in \mathbb{Z}^*$).

On peut noter $mv_{DCond} = (d, n)$ un mouvement de ce voisinage.

Soit $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{D}|})$ la configuration courante, $mv_{DCond} = (d, n)$ le mouvement sélectionné et $\sigma' = \sigma \circ mv_{DCond}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_{|\mathcal{D}|})$ répond à la description suivante :

$$\forall d^* \in \mathcal{D}, \begin{cases} t'_{d^*} = t_{d^*} + n & \text{si } d^* = d \\ t'_{d^*} = t_{d^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

En conséquence, lors de la restitution des grilles horaires complètes, toutes les dessertes qui constituent le service du conducteur sont décalées de n minutes par rapport à leur valeur initiale.

DecalCourse

Un mouvement issu du voisinage *DecalCourse* modifie la valeur d'une unique variable (en l'occurrence, l'heure de départ d'une course). Une solution voisine est obtenue en décalant cette heure de n minutes ($n \in \mathbb{Z}^*$).

On peut noter $mv_{DCourse} = (r, n)$ un mouvement de ce voisinage.

Soit $\sigma = (t_1, t_2, \dots, t_{|\mathcal{R}|})$ la configuration courante, $mv_{DCourse} = (r, n)$ le mouvement sélectionné et $\sigma' = \sigma \circ mv_{DCourse}$ une configuration voisine. Alors, $\sigma' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_{|\mathcal{R}|})$ répond à la description suivante :

$$\forall r^* \in \mathcal{R}, \begin{cases} t'_{r^*} = t_{r^*} + n & \text{si } r^* = r \\ t'_{r^*} = t_{r^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

Notre méthode de recherche locale reste en permanence à l'intérieur du domaine réalisable de recherche. Lors de la génération des mouvements, un ensemble de contraintes doivent ainsi être vérifiées pour que le mouvement soit considéré comme valide. Rappelons que ces contraintes concernent le décalage horaire maximal autorisé pour les deux types de voisinages, ainsi que :

- pour le voisinage *DecalCond* : les intervalles minimaux à respecter entre les heures de début de chaque affectation conducteur ;

- pour le voisinage *DecalCourse* : les intervalles de temps minimaux à respecter entre les heures de départ de chaque desserte et de celles qui l’entourent dans les services conducteur et véhicule.

4.5.5 Paramétrage de la méthode tabou pour le SbrT

- La *solution initiale* est constituée des horaires existants des courses, ainsi que de services véhicules et conducteurs générés par des algorithmes externes (voir Section 4.6.1) Cette solution respecte les contraintes du problème et est donc réalisable.
- Les *voisinages* utilisés sont *DecalCond* et *DecalCourse*, indépendamment, dans deux méthodes tabou testées à titre de comparaison.
- L’*exploration de chaque voisinage* est intégrale. Ceci est possible dans notre cas car le voisinage est de taille restreinte (en raison notamment de la restriction des domaines des variables lors de la phase de prétraitement), et l’évaluation du coût de chaque configuration est rapide en raison de l’objectif unique que nous utilisons.
- Dans un objectif de *diversification* et pour éviter à la recherche de stagner, la sélection du mouvement à appliquer est aléatoire parmi ceux de coût maximal.
- Chaque mouvement reste dans la liste tabou pendant un nombre aléatoire d’itérations. Ce nombre, qui détermine la *taille de la liste* à chaque itération, varie entre deux bornes (voir Section 4.6.3).
- Le *critère d’aspiration* consiste à accepter un mouvement qui fait partie de la liste tabou à la condition qu’il permette d’atteindre un niveau de qualité (au sens de la fonction objectif) supérieur au meilleur niveau enregistré jusqu’alors.
- Le *critère d’arrêt* dans le cas de nos tests est le temps de calcul. Cependant, dans l’application industrielle, nous avons utilisé en complément le nombre maximal d’itérations sans amélioration.

4.6 Résultats

4.6.1 Jeux de tests

Pour les jeux de données, nous nous sommes basés sur un réseau interurbain existant, en place dans un département français : le Loiret. Il s’agit du même réseau que celui présenté en section 2.4.1. Nous avons créé tous nos jeux de données à partir de ce réseau en raison de l’absence de benchmarks dans la littérature, de la confidentialité des données liées à l’utilisation des ressources chez les transporteurs, et du temps important nécessaire à la collecte, mise en place et traitement des données. Ce traitement suit l’approche classique, en trois phases consécutives :

- les lignes et horaires viennent du réseau en place ;
- les services véhicules sont générés par notre algorithme du chapitre 3, basé sur un algorithme par enchères ;
- les services conducteurs (habillage) sont générés par un moteur d’optimisation externe.

Réseau

Nos expérimentations se basent sur un réseau interurbain réel d'une vaste zone géographique française. Ce réseau englobe trois villes de taille moyenne et un ensemble de petits villages. Il compte 50 lignes orientées, 673 arrêts, 30 lignes extérieures en connexion, et 282 types de correspondances possibles. La grille horaire pour un jour type d'opération comporte 318 dessertes. Trois exploitants se partagent les lignes du réseau (avec 8, 16 et 26 lignes chacun).

Pour ce qui est de l'objectif de correspondances, 180 sont possibles avec les horaires actuels, pour un coût de 947.462 au sens de la fonction objectif.

Le nombre de véhicules nécessaire est de 91 au minimum pour assurer l'ensemble des dessertes. Dans tous les jeux de données que nous avons utilisé par rapport à ce réseau, la taille de la flotte est ainsi de 91. Le nombre de conducteurs minimal dépend de la constitution des services véhicules. Dans nos jeux de données, il varie entre 159 et 171. Le processus d'obtention de ces valeurs est détaillé dans les deux sections suivantes.

Génération des services véhicules

Afin de créer les services véhicules associés au réseau et de déterminer la taille de la flotte associée, nous nous sommes basés sur la méthode présentée dans le chapitre 3, qui utilise un algorithme par enchères. Cet algorithme exact permet d'obtenir des résultats optimaux par rapport à l'utilisation des ressources.

Une différence notable avec le problème étudié au chapitre précédent est la présence de dépôts. À chaque groupe est associé un dépôt géolocalisé, ce qui nous permet de connaître les distances des trajets à vide liant les courses et le dépôt. Nous sommes donc dans le troisième cas précisé en section 3.7. Selon la modélisation exposée en section 3.4.4, $s_{r_v}^\alpha (= a(v))$ est le premier arrêt de la première dessertte du service de v , et $s_{r_v}^\omega (= z(v))$ le dernier arrêt de la dernière dessertte. Soit $dpt(g)$ le dépôt associé au groupe g . La fonction de coût liée à l'objectif de durée des trajets à vide devient :

$cost_4 = cost_{4a} + cost_{4c}$ où

$$cost_{4a} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[\sum_{r, r_v^+ \in \Phi(v)} dh_{s_r^\omega, s_{r_v^+}^\alpha} \right]$$

et

$$cost_{4c} = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \left[dh_{dpt(g), a(v)} + dh_{z(v), dpt(g)} \right]$$

Dans l'algorithme par enchères, cela se traduit, en entrée, par une modification des coûts des arcs partant de la source et arrivant au puits par rapport à la version "services en boucle" exposée au chapitre 3.

De plus, nous avons voulu créer différentes affectations véhicules par rapport à ce réseau pour disposer de plusieurs jeux de données. À cette fin, nous avons ajouté un objectif supplémentaire au problème d'affectation des véhicules aux courses. Le temps d'attente (à minimiser) vient ainsi s'ajouter au nombre de véhicules et au temps de trajet à vide. Ce

temps d'attente est la durée de stationnement d'un véhicule en terminus de desserte, et correspond à $sta(r, r') = \pi_{r', s_{r'}}^{\rightarrow, \alpha} - \pi_{r, s_r}^{\leftarrow, \omega} - dh_{r, r'} - tt_{l_r, s_{r'}}^{\omega}$.

On définit $p_{dpt}(r, r')$ comme un booléen indiquant si le véhicule rentre ou non au dépôt entre les deux dessertes.

$$\forall g \in \mathcal{G}, \forall v \in \mathcal{V}_g, \forall (r, r' = r_v^+) \in \mathcal{R}^2,$$

$$p_{dpt}(r, r') = (w_4 * (dh_{r, dpt(g)} + dh_{dpt(g), r'}) \leq w_4 * dh_{r, r'} + w_5 * sta(r, r')) \quad (4.8)$$

Nous pouvons alors exprimer ce nouvel objectif de la manière suivante :

$$cost_5 = \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{v \in \mathcal{V}_g} \sum_{r, r_v^+ \in \Phi(v)} \begin{cases} sta(r, r_v^+) & \text{si } p_{dpt}(r, r_v^+) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.9)$$

La fonction objectif 3.13 devient alors :

$$f_2(\sigma) = \sum_{i \in [1..3]} w_i * cost_i(\sigma) + w_4 * (cost_{4a}(\sigma) + cost_{4c}(\sigma)) + w_5 * cost_5(\sigma) \quad (4.10)$$

Grâce à cet objectif supplémentaire, les véhicules peuvent repasser au dépôt en milieu de service, ce qui est préférable à de l'attente en terminus du point de vue social (au dépôt, le lieu de pause est aménagé), financier (les véhicules peuvent être réutilisés plus facilement s'ils sont stationnés au dépôt, et les pauses sont souvent payées à un taux plus faible) et pratique (le stationnement des véhicules peut être problématique selon les zones).

Ces modifications des coûts liés aux temps de trajet à vide et aux temps d'attente permettent de fournir une matrice de coût différente à l'algorithme par enchères, et ainsi d'obtenir en sortie des résultats adaptés à la problématique de ce chapitre.

Par rapport à cet algorithme, nous avons défini cinq jeux de pondérations (Tableau 4.1) afin d'obtenir cinq scénarios différents sur lesquels baser nos expérimentations. Dans tous les cas, nous avons attribué un poids maximal à l'objectif de taille de la flotte, afin de garantir un nombre minimal de véhicules et ainsi fournir des plannings réalistes. Dans chacun des cas ci-dessous, nous avons obtenu une taille de flotte de 91. Nous avons ensuite modulé les poids affectés aux objectifs de temps de trajet à vide et de temps d'attente afin d'obtenir des résultats variés. Notons que l'objectif de temps de trajet à vide a toujours un poids supérieur ou égal à celui du temps d'attente car les coûts associés sont supérieurs (en raison de la consommation de carburant). Cependant, nous avons choisi des valeurs relativement proches pour les poids de ces deux objectifs afin d'encourager notamment les retours au dépôt lorsque cela est possible entre dessertes successives d'un même service véhicule. Cette caractéristique est ensuite utile lors de la création des services conducteurs (voir le point suivant de cette section).

Afin d'évaluer l'impact des jeux de pondérations sur les résultats obtenus et de quantifier la différence existant entre les services qui vont constituer nos jeux de données, nous avons comptabilisé le nombre de liaisons différentes entre les 5 résultats. Une liaison unit un

	Véhicules	Temps de trajet à vide	Temps d'attente
Jeu #1	1000	100	50
Jeu #2	1000	100	100
Jeu #3	1000	150	50
Jeu #4	1000	150	100
Jeu #5	1000	200	50

TABLE 4.1 – Jeux de pondérations

dépôt à une desserte, une desserte à une autre ou une desserte à un dépôt, et est constituée de temps d'attente et/ou de trajet(s) à vide.

Sachant que la flotte nécessaire est de 91 véhicules et que 318 dessertes doivent être couvertes, nous avons 91 liaisons d'un dépôt vers une desserte (début de service) et 318 liaisons d'une desserte vers la suivante ou vers le dépôt (fin de service), pour un total de 409 liaisons dans chacun des résultats. Le tableau 4.2 présente le nombre et le pourcentage de liaisons différentes entre chaque paire de résultats obtenus pour des jeux de pondérations différents.

	Jeu #2	Jeu #3	Jeu #4	Jeu #5
Jeu #1	138 (33.74%)	144 (35.20%)	138 (33.74%)	147 (35.94%)
Jeu #2	-	172 (42.05%)	158 (38.63%)	172 (42.05%)
Jeu #3	-	-	143 (34.96%)	137 (33.49%)
Jeu #4	-	-	-	153 (37.40%)

TABLE 4.2 – Différences de résultats selon les paires de jeux de pondérations.

Les valeurs entières correspondent au nombre de liaisons différentes entre les résultats obtenus avec chacun des jeux de poids, et les pourcentages sont relatifs à ce nombre mis en relation avec le nombre total de liaisons.

Nous observons une différence supérieure au tiers des liaisons entre chaque paire de résultats, ce qui garantit un niveau minimal de différence entre les jeux de tests. Une fois les services véhicules ainsi créés, nous pouvons passer à l'étape d'affectation des conducteurs.

Génération des services conducteurs

La génération des services conducteurs consiste à découper les services véhicules en tronçons et à répartir ceux-ci entre les conducteurs. Durant cette étape est ainsi défini le nombre de conducteurs nécessaire [Ceder, 2007].

Nous prenons pour hypothèse que les changements de conducteurs peuvent prendre place uniquement au dépôt. C'est le cas rencontré le plus souvent en pratique, notamment

en milieu interurbain. Nous découpons alors les services véhicules à chaque retour au dépôt. Ces retours ont été favorisés par les jeux de poids utilisés durant l'étape de création des services véhicules.

Pour cette étape de la création des jeux de données, nous avons recours à un algorithme d'habillage qui suit le modèle classique. Cet algorithme utilise la procédure séquentielle de génération puis sélection des services conducteurs.

Dans une optique de simplicité, nous avons défini des paramètres minimaux pour cet algorithme : un seul type de contrat existe. Le résultat fourni indique le nombre minimal de conducteurs nécessaires relativement à ce type de contrat et aux services véhicules.

Jeu #1	Jeu #2	Jeu #3	Jeu #4	Jeu #5
170	171	163	171	159

TABLE 4.3 – Nombre de conducteurs par jeu de tests

On constate d'après le tableau 4.3 que le nombre de conducteurs requis varie selon le jeu de tests utilisé. Dans l'idéal, il serait intéressant de considérer simultanément la génération des services véhicules et des services conducteurs. Cependant, cette intégration constitue un problème particulièrement difficile. Nous ne l'avons pas abordé ici, dans le cadre de la génération des données utilisées pour notre problème de création des horaires sous contraintes de ressources.

4.6.2 Comparaison des résultats pour les deux algorithmes

Notre algorithme a été codé en C++, compilé avec VC++ 9.0, sur un ordinateur portable équipé de Windows Vista, d'un processeur 2.10 Ghz Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU et disposant de 4Go RAM. Pour ces tests, nous avons autorisé un temps de calcul de 1 minute. Cette limite est utilisée dans nos tests comme critère d'arrêt unique de nos algorithmes.

Nous avons lancé une série de 30 tests pour chaque jeu de données et chaque algorithme (adapté à chacun de nos deux modèles). Ceci se justifie par le comportement non déterministe de nos algorithmes tabou. En effet, à chaque itération, c'est un mouvement choisi aléatoirement parmi ceux de coût maximal qui est appliqué à la configuration courante.

Au niveau du paramétrage de la taille de la liste tabou, chaque nouvel élément se voit attribuer un nombre d'itérations (au cours desquelles il restera présent dans la liste) compris entre les valeurs arbitraires de 7 et 20. Le décalage maximal autorisé par desserte est de 10 minutes (dans chaque sens), une valeur moyenne qui permet de définir un espace de recherche conséquent sans toutefois mettre trop en péril l'organisation existante du réseau en termes de cadencement.

Le tableau 4.4 présente le nombre de possibilités de correspondances obtenu selon les jeux de données et les algorithmes. Tous les types de correspondances sont pris en compte, à savoir les correspondances intralignes, interlignes et intermodales.

La colonne 2 présente le nombre de possibilités dans la solution initiale, à savoir avec les grilles horaires actuellement en application. Le nombre de 180 est identique pour chacun des jeux de tests, étant donné que ceux-ci sont basés sur des grilles horaires identiques (alors que les affectations de véhicules et de conducteurs diffèrent). Les colonnes 3 et 4 présentent le nombre moyen de possibilités de correspondances et l'écart-type associé, pour l'algorithme tabou utilisant le voisinage *DecalCond*. Les colonnes 5 et 6, quant à elles, récapitulent le nombre moyen de possibilités de correspondances et l'écart-type associé, pour l'algorithme tabou utilisant le voisinage *DecalCourse*.

	Solution Initiale	Recherche Tabou avec DecalCond		Recherche Tabou avec DecalCourse	
		moy (e-t)	%	moy (e-t)	%
Jeu #1	180	182 (0)	1.11	245.07 (0.25)	36.15
Jeu #2	180	184 (0)	2.22	247 (0)	37.22
Jeu #3	180	196 (0)	8.89	245.2 (0.41)	36.22
Jeu #4	180	182 (0)	1.11	243 (0)	35.00
Jeu #5	180	188 (0)	4.44	245.1 (0.31)	36.17

TABLE 4.4 – Nombre moyen (écart-type) de correspondances par jeu de test et méthode, ainsi que pourcentage d'amélioration par rapport à la solution initiale

Le tableau 4.5 présente les résultats des mêmes séries de tests, mais en termes de valeur de fonction objectif. Pour la même raison que dans le tableau 4.4, le coût initial est identique pour l'ensemble des jeux de tests. Les colonnes 3 et 4 sont relatives à l'algorithme basé sur le voisinage *DecalCond* et les colonnes 5 et 6 à celui basé sur le voisinage *DecalCourse*.

	Solution Initiale	Recherche Tabou avec DecalCond		Recherche Tabou avec DecalCourse	
		moy (e-t)	%	moy (e-t)	%
Jeu #1	947.462	959.1 (0)	1.22	1057.37 (0.12)	11.60
Jeu #2	947.462	963.48 (0)	1.69	1061.63 (0)	12.05
Jeu #3	947.462	972.73 (0)	2.67	1072.58 (0.08)	13.21
Jeu #4	947.462	959.71 (0)	1.29	1047.14 (0)	10.52
Jeu #5	947.462	967.97 (0)	2.16	1072.35 (0.06)	13.18

TABLE 4.5 – Coût de la fonction objectif par jeu de test et méthode (moyenne, écart-type) et pourcentage d'amélioration par rapport à la solution initiale

Les tableaux 4.4 et 4.5 montrent tout d'abord que les deux algorithmes apportent une amélioration sensible à la configuration initiale, tant en qualité qu'en quantité des possibilités de correspondances. Ainsi, la méthode tabou basée sur *DecalCond* apporte une

augmentation moyenne de 3.55% sur le nombre de possibilités de correspondances, et celle basée sur *DecalCourse* 36.15% en moyenne. En termes de coût total des configurations, la méthode tabou basée sur *DecalCond* apporte une moyenne de 1.81% d'amélioration, et celle basée sur *DecalCourse* 12.11%.

La deuxième conclusion de ces tests est la supériorité de l'algorithme basé sur le voisinage *DecalCourse*. Les résultats montrent en effet une nette différence de performance entre les deux méthodes. L'algorithme basé sur le modèle SLR permet d'améliorer le nombre et la qualité des correspondances dans le réseau de manière beaucoup plus significative que celui basé sur le modèle SDA. Le tableau 4.6 présente le pourcentage de performance supplémentaire accomplie par la méthode basée sur le voisinage *DecalCourse* relativement à celle basée sur *DecalCond*.

Jeu #1	Jeu #2	Jeu #3	Jeu #4	Jeu #5
10.37	10.36	10.54	9.23	13.4

TABLE 4.6 – Pourcentage de performance supplémentaire de la méthode basée sur *DecalCourse* par rapport à celle basée sur *DecalCond* au sens de la fonction objectif.

La comparaison des deux méthodes amène à la conclusion que le modèle SLR est plus adapté à l'objectif d'amélioration de la qualité de service alors que le modèle SDA a un effet trop limité. Il préserve mieux les services mais implique un espace de recherche beaucoup plus restreint, susceptible de ne pas atteindre des solutions aussi bonnes que *DecalCourse*. Le voisinage *DecalCourse* du modèle SLR semble ainsi représenter un compromis intéressant entre conservation des plannings de ressources (minimisation de la réorganisation de l'exploitation) et amélioration des correspondances (maximisation de la qualité de service).

On conclut de ces tests que prendre à rebours les étapes du problème de planification du transport en commun, en se basant sur l'utilisation des ressources pour modifier les grilles horaires, possède le potentiel pour améliorer la qualité de service d'un réseau existant.

La section suivante présente des analyses complémentaires relatives à ces algorithmes.

4.6.3 Analyses complémentaires

Dans cette section, nous présentons quelques résultats portant sur les paramètres utilisés par nos algorithmes.

Temps de calcul

Le temps de calcul requis pour atteindre la solution finale est très court, 87% des tests atteignant leur valeur maximale en moins d'une seconde et 99.3% en moins de deux secondes pour l'algorithme utilisant *DecalCond*. L'algorithme utilisant le voisinage *DecalCourse* évolue plus lentement et plus longtemps, atteignant sa meilleure valeur au bout de 19.3 secondes de temps CPU en moyenne. Ces temps de calculs sont tout à fait négligeables

en pratique pour les exploitants. En effet, la réoptimisation est une opération ponctuelle, qui ne requiert pas de réponse en temps réel.

Exploration du voisinage

	DecalCond		DecalCourse	
	Taille	Temps (ms.)	Taille	Temps (ms.)
Jeu #1	266 (1.78)	1.3 (0.7)	2520 (36.50)	12 (3.4)
Jeu #2	246 (1.60)	1.4 (0.8)	2286 (37.99)	10 (1.6)
Jeu #3	346 (1.53)	1.2 (0.6)	2800 (19.76)	13 (0.8)
Jeu #4	260 (1.71)	1.3 (0.7)	2516 (29.23)	11 (0.9)
Jeu #5	361 (1.75)	1.7 (0.8)	2630 (21.17)	12 (0.7)

TABLE 4.7 – Caractéristiques (moyenne, écart-type) des deux voisinages : taille et temps (en secondes) d’exploration totale par itération.

Le tableau 4.7 présente les caractéristiques principales des deux voisinages utilisés. Ce tableau confirme que le voisinage *DecalCond* est de taille plus restreinte que *DecalCourse*. Ceci s’explique entre autres par le nombre de variables beaucoup moins élevé dans le premier que dans le deuxième, cumulé au fait que la taille des domaines des variables pour les deux voisinages est bornée par la même constante : le décalage maximal autorisé par rapport aux grilles horaires initiales. La taille du voisinage varie en fonction des itérations car il se limite aux solutions réalisables accessibles par des mouvements respectant les contraintes de consistance d’arc (respect des affectations conducteurs et véhicules).

Notons que les temps d’exploration pour un voisinage entier, tel que nécessité dans le cadre de notre méthode tabou, restent faibles, permettant d’envisager la prise en compte de réseaux de taille encore supérieure à celui étudié.

Taille de liste tabou

Nous analysons ici l’effet de la taille de la liste tabou utilisée dans les deux algorithmes. Nous avons choisi d’utiliser un nombre d’itérations de présence variable pour chaque mouvement entré dans la liste. Ce nombre est sélectionné aléatoirement dans un intervalle défini par deux bornes.

Nous avons testé un ensemble d’intervalles différents, mais l’impact de ce paramètre s’est avéré très faible. Pour illustrer cette conclusion, nous présentons dans le tableau 4.8 les résultats obtenus avec les intervalles de taille extrêmes testés. Le premier maintient une taille de liste tabou assez faible, chaque mouvement restant entre 7 et 20 dans la liste. Le deuxième intervalle, le plus large testé, correspond pour sa borne supérieure à la moitié de la taille du voisinage, soit 50 à 100 pour *DecalCond* et 500 à 1000 pour *DecalCourse*, afin d’essayer de sortir des grands plateaux. Pour ces intervalles, nous avons lancé une série de 30 tests, dont nous présentons une moyenne des résultats dans le tableau suivant.

L'impact sur la méthode utilisant *DecalCond* a été nul (d'où son absence du tableau 4.8), par contre celle utilisant *DecalCourse* a bénéficié légèrement de l'augmentation du nombre d'itérations durant lesquelles sont présents les mouvements.

	DecalCourse	
	[7-20]	[500-1000]
Jeu #1	1057.37	1057.52
Jeu #2	1061.63	1062.62
Jeu #3	1072.58	1072.65
Jeu #4	1047.14	1047.25
Jeu #5	1072.35	1072.37

TABLE 4.8 – Valeur de la fonction objectif par jeu de test et taille de liste tabou

	DecalCourse	
	[7-20]	[500-1000]
Jeu #1	0.012 (0.003)	0.031 (0.007)
Jeu #2	0.010 (0.002)	0.028 (0.006)
Jeu #3	0.013 (0.001)	0.033 (0.008)
Jeu #4	0.011 (0.001)	0.030 (0.007)
Jeu #5	0.012 (0.001)	0.032 (0.008)

TABLE 4.9 – Moyenne (écart-type) de temps (en secondes) pour l'exploration totale d'un voisinage par jeu de test et taille de liste tabou.

Le tableau 4.9 montre que lorsque les mouvements stockés dans la liste tabou y restent pendant un nombre d'itérations compris entre 500 et 1000 plutôt qu'entre 7 et 20, le temps d'exploration totale du voisinage a une itération donnée est en moyenne 2.65 fois plus long.

On observe que les résultats sont de meilleure qualité avec l'intervalle [500-1000] qu'avec l'intervalle [7-20] dans les 5 cas, cependant la différence observée est minime. Parallèlement, l'utilisation de listes tabou de taille importante ralentit la recherche, car son parcours intégral est réalisé à chaque itération, pour l'ensemble des mouvements du voisinage. C'est pourquoi nous avons choisi de conserver un intervalle [7-20] dans notre méthode, afin de ne pas pénaliser des réseaux de dimension supérieure.

4.7 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié une problématique qui prend le processus traditionnel de planification du transport en commun à contre-courant. L'enjeu est d'adapter l'offre

horaire commerciale à de nouveaux besoins ou simplement de la retravailler, en évitant aux exploitants de réviser complètement leurs plannings. La refonte des plannings des véhicules et des conducteurs est en général une décision lourde de conséquences, car elle peut entraîner la modification du nombre de ressources nécessaires, impacter les conditions sociales et entraîner des variations de coût importantes. De plus, la création des plannings de ressources est un travail conséquent, qui doit souvent prendre en compte un grand nombre de contraintes et paramètres, tels que les compétences, souhaits, régulations sociales, etc. Il s'agit alors de trouver un modèle et une méthode qui représentent un compromis entre l'amélioration de la qualité de service du réseau par les correspondances et la préservation de l'organisation de l'exploitation à travers les plannings des véhicules et conducteurs.

Afin de répondre à cette problématique, nous avons proposé deux modèles qui se basent sur les services véhicules et conducteurs. Nous avons choisi de ne pas modifier les séquences (de courses commerciales, retournements, trajets à vide et temps d'attente) qui constituent les services existants de toutes les ressources, préservant ainsi une grande quantité de bonnes propriétés des plannings actuels. Le nombre de ressources nécessaires est conservé à l'identique, et les ajustements sont mineurs du point de vue des conducteurs, dont les affectations véhicules et de trajet ne changent pas.

- Le premier modèle (SDA : Shifting Driver Assignment) décale les horaires de début des services conducteurs sans modifier la durée de ses composantes. Il préserve ainsi parfaitement tout l'aspect social relatif aux contrats des conducteurs. En parallèle, de nombreuses contraintes sont appliquées par rapport aux services véhicules, afin d'assurer qu'ils restent réalisables (*i.e.* que leurs composantes ne se chevauchent pas avec les nouveaux horaires).
- Le deuxième modèle (SLR : Shifting Line Runs) permet de décaler les horaires de début de toutes les courses commerciales individuellement, avec la seule (mais cruciale) contrainte de ne pas entraîner de chevauchements entre les éléments des services véhicules comme des services conducteurs. À l'instar du premier modèle, les séquences d'éléments à l'intérieur des services sont conservées, mais à l'inverse de cet autre modèle, la durée des services conducteurs peut avoir une durée variable. En effet, les temps d'attente (des conducteurs) peuvent varier à l'intérieur d'intervalles définis pour préserver les conditions sociales.

Pour chacun des modèles, nous avons développé un voisinage adapté que nous avons intégré dans une méthode tabou afin d'en tester les performances.

Le premier modèle s'est avéré capable de proposer des améliorations de qualité de service, mais de manière très limitée, les contraintes imposées sur les services conducteurs étant trop nombreuses et restrictives. L'espace de recherche associé à ce modèle est en effet réduit.

Le deuxième modèle s'est révélé plus flexible que le premier, permettant des gains beaucoup plus importants en termes de quantité et de qualité des correspondances, au détriment de la conservation des plannings, puisque les temps de pause des conducteurs ont été autorisés à varier. Cependant, la détermination d'intervalles à l'intérieur desquels ces temps de pause peuvent varier permet de préserver certaines qualités sociales du planning.

En conclusion, nous avons proposé une méthode et un modèle (SLR) qui répondent bien à notre problématique de départ. La réorganisation de l'exploitation découlant des

4.7 Synthèse du chapitre

changements apportés aux grilles horaires par cette méthode reste très limitée, alors que les gains en termes de possibilités de correspondances sont importants.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE passée entre le LERIA et Perinfo. Les problématiques traitées correspondent à celles des transporteurs autocaristes et des autorités organisatrices du transport en commun. Elles sont centrées autour de la planification des horaires des lignes de réseaux de bus et s'articulent autour de trois axes permettant l'inclusion de divers objectifs et contraintes.

Nous avons émis l'hypothèse, au regard de la littérature sur le sujet, que des méthodes à base de métaheuristiques et particulièrement de voisinages, étaient susceptibles d'apporter de nouvelles propositions de réponses intéressantes en se basant sur une modélisation plus flexible que celle longtemps adoptée dans les études sur le sujet. Nous avons également voulu aborder les problématiques liées à la fixation des horaires sous des angles différents de l'approche traditionnelle, en intégrant les enjeux liés à l'utilisation des ressources véhicules, tout en restant focalisés sur la qualité de service.

Dans cette dernière partie, nous présentons une synthèse des différents apports de cette thèse ainsi qu'une discussion ouvrant sur quelques perspectives de recherche.

Principales contributions

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont donné lieu à plusieurs contributions de natures différentes.

Notre *premier apport* (Chapitre 1) est une revue de littérature répertoriant et classifiant les études portant sur la qualité de service dans la planification des réseaux de transport en commun. Elle catégorise les approches par problème traité, selon une terminologie spécifique, et par type de méthode de résolution. Cette revue comble un certain manque dans la littérature en apportant un éclairage synthétique sur les problématiques stratégiques et tactiques de la planification des réseaux de transport.

La *seconde contribution* (Chapitre 2) est une approche de résolution à base de métaheuristique pour le problème de planification des horaires de lignes d'un réseau. Le modèle utilisé s'appuie sur un niveau de détail élevé. Il est muni de fonctions de coût adaptées aux réalités des réseaux de bus pour deux objectifs de qualité de service : la régularité des cadencements ainsi que la qualité et quantité des correspondances. Ce modèle diffère de la plupart des études sur le sujet en permettant une grande flexibilité par la relaxation de la contrainte de cadencement fixe. Quatre types de voisinages ont été proposés, qui tirent parti à la fois de la structure du problème et de celle du modèle. Une stratégie de recherche

multialgorithme a été mise en place. Des expérimentations menées sur un jeu de données issu d'un grand réseau réel de transport ont permis de faire ressortir une combinaison particulièrement performante des voisinages définis ici afin de profiter au mieux des qualités d'intensification et de diversification de la recherche de chacun.

Au chapitre 3, nous avons intégré dans un unique problème les objectifs de qualité de service présentés au chapitre précédent et des objectifs relatifs aux coûts économiques impliqués (nombre de véhicules et kilométrage à vide), ce qui constitue le *troisième apport* de cette thèse. Cette approche simultanée qui recouvre les problèmes de détermination des horaires et de création des affectations véhicules répond à un besoin réel des exploitants mais a été peu étudiée dans la littérature. Nous avons utilisé la modélisation définie au chapitre 2 et l'avons enrichie des aspects véhicules. Nous avons également proposé une méthode de résolution hybride basée sur une recherche locale itérée, une méthode de résolution exacte d'un sous-problème par un algorithme par enchères, et deux voisinages définis spécifiquement pour le modèle. L'approche simultanée a été comparée très favorablement à l'approche séquentielle et à la situation actuelle sur notre cas d'étude.

La *dernière contribution* (Chapitre 4) concerne un problème original que nous n'avons pas rencontré ailleurs dans la littérature. Il s'agissait ici de réorganiser les horaires d'un réseau en fonctionnement, dans l'objectif d'améliorer la qualité et la quantité des correspondances, mais sans remettre en question les plannings d'affectation aux ressources conducteurs et véhicules. Nous avons défini pour cela deux modèles qui utilisent le niveau de définition de l'espace de recherche ayant fait ses preuves au cours des chapitres précédents, et avons défini des ensembles de contraintes permettant de satisfaire à la problématique envisagée. Nous avons développé une méthode de résolution basée sur la recherche tabou et deux types de voisinages. Ceux-ci ont montré leur efficacité sur des jeux de données issus d'un réseau réel, permettant d'améliorer de manière conséquente la qualité de service en termes de correspondances tout en conservant les séquences de courses affectées aux véhicules comme aux conducteurs.

D'un point de vue académique, nos travaux ont donné lieu à publication en revue scientifique et à des actes de conférences internationales. D'un point de vue industriel, un moteur d'optimisation dédié au graphicaage a été intégré à un outil de gestion et implanté chez plusieurs exploitants de réseaux de transport.

Perspectives de recherche

Bien évidemment, les travaux réalisés au cours de cette thèse comportent certaines limites. Notamment, nous regrettons l'absence de jeux de données plus nombreux pour tester les performances de nos algorithmes. Cela est dû en partie à l'originalité des problèmes étudiés et à la confidentialité des données liées à la planification des ressources chez les exploitants de transport. Par ailleurs, la complexité des problèmes étudiés et la taille du réseau d'étude ne nous ont pas permis d'utiliser de méthode exacte pour évaluer différemment la qualité de nos résultats. Quant au calcul de bornes, il a été rendu complexe par l'aspect multiobjectif des problèmes, et par le calcul des coûts liés aux correspondances particulièrement. Les bornes envisageables étant de pauvre qualité, nous ne les avons pas

mentionnées ici. De même, la gestion de l'aspect multiobjectif pourrait être améliorée, en particulier pour le chapitre 3 qui combine des objectifs de qualité de service et de coût économique.

Au cours de cette thèse, nous avons étudié des problématiques qui combinent des éléments appartenant à des phases traditionnellement séparées dans le processus de planification du transport. Dans le même esprit, nous pouvons identifier d'autres axes de recherche pour l'avenir.

Le *premier axe* concerne l'intégration de plus d'éléments venant de la planification des véhicules dans la phase de détermination des horaires. Nous pensons particulièrement aux différents types de véhicules qui peuvent être préaffectés aux dessertes. Le cas où une ligne entière requiert un même type de véhicule est géré par l'approche que nous avons définie au chapitre 3. Le cas où les types de véhicules requis diffèrent selon les dessertes demande par contre un développement supplémentaire, et une adaptation de la modélisation employée.

Le *deuxième axe* de recherche se rapporte également à l'intégration des phases de détermination des horaires et des services véhicules. Cette fois, la problématique consiste à prendre pour contrainte le nombre de véhicules disponibles et pour objectif la qualité de service. Ce problème est issu de la réalité des exploitants. Il se distingue du problème abordé au chapitre 3 par le fait que le nombre de véhicules est une contrainte à respecter et non un objectif à minimiser, et de celui abordé au chapitre 4 par le fait que l'on ne se base pas sur des séquences de courses préaffectées pour les ressources.

Enfin, le *troisième axe* de recherche concerne la détermination des horaires de lignes de bus à partir de grilles horaires vides. Les approches utilisées dans cette thèse sont basées sur les horaires existants d'un réseau, avec leurs qualités et défauts d'origine relativement aux différents objectifs. En effet, dans un réseau existant, il existe des aspects historiques (en termes d'horaires, de correspondances) qu'il faut préserver, ce qui justifie notamment les contraintes de décalage maximal utilisées aux chapitres 2 et 4. Une piste complémentaire est ainsi d'étendre la problématique à la création des horaires qui constituent dans nos approches, la solution initiale. Cette problématique est intéressante à la fois au niveau théorique et dans le cadre pratique de créations ou extensions de réseau.

Index

- affectations
 - conducteurs, 98
 - véhicules, 98
- aide à la décision, 1
- algorithme
 - de recherche locale, 45
 - par enchères, 76, 84, 110
 - recherche tabou, 107
- approche
 - évolutionnaire, 20
 - de colonie de fourmis, 20
 - génétique, 22, 23
 - heuristique, 20, 22, 23
 - intégrée, 28, 69
 - métaheuristique, 20, 23
 - mathématique, 22
 - par simulation, 23
 - séquentielle, 83, 84, 86
 - simultanée, 83, 86
- autorités organisatrices, 9, 14, 70
- cadencement, 10, 21, 33, 38, 42, 85
 - régularité, 11, 74
- CIFRE, 1
- coûts économiques, 1
- composition, 47, 80
- configuration, 41, 71, 78, 104
- consistance
 - d'arcs, 106
 - de nœud, 106
- contraintes
 - d'affectation complète, 39, 44, 73, 101, 104
 - d'affectation conducteur, 102, 105
 - d'affectation véhicule, 102, 104, 105
 - d'interligne, 73
 - de bornes d'amplitude par ligne, 72
 - de décalage maximal, 39, 44, 101, 104, 105
 - de séquence de dessertes, 72
 - de service véhicule, 72
 - sociales, 98
- correspondances, 23, 33, 41, 85, 102, 105
 - intermodales, 35
 - qualité, 37, 73
 - quantité, 38, 73
- course, 22, 39
- critères
 - d'acceptation, 80, 82
 - d'arrêt, 46, 53, 58, 80, 83, 109
 - d'aspiration, 109
 - de coût, 10
- dépôt, 91
- détermination
 - de la structure du réseau, 19
 - des fréquences, 21
 - des grilles horaires, 22, 33, 67, 97
 - des roulements conducteurs, 26
 - des services conducteurs, 25, 112
 - des services véhicules, 24, 67, 112
- desserte, 22
- diversification, 56, 80
- domaine, 41, 104
- espace de recherche, 45, 78, 106
- fonction
 - d'évaluation, 43, 45, 78, 81
 - de coût, 42, 73, 105
- fréquences, 10, 21, 38
- graphicage, 65
- graphique à plat, 68
- graphique espace-temps, 47
 - par ligne, 67
 - par véhicule, 67
- grille horaire, 67
- habillage, 27, 113
- haut-le-pied, 11, 74, 98
- intensification, 80

-
- interligne, 12, 74, 91, 99
 - intermodalité, 10
 - LERIA, 1
 - métaheuristique, 107
 - matrices origine-destination, 20
 - milieu
 - interurbain, 12, 99
 - urbain, 11
 - minimum local, 53
 - optimisation combinatoire, 1
 - PERINFO, 1
 - planification, 1, 36
 - post-optimisation, 88
 - prétraitement, 45, 106
 - problème
 - d'optimisation sous contraintes, 65
 - de quasi-affectation linéaire, 76
 - de semi-affectation quadratique, 23, 36, 68
 - processus de planification, 16, 67
 - qualité de service, 1, 10, 33, 97
 - réoptimisation, 95
 - recherche
 - locale, 46
 - locale itérée, 77
 - multialgorithme, 56
 - multivoisinage, 45
 - opérationnelle, 1
 - tabou, 107
 - services, 67, 98
 - avec dépôt, 91
 - en boucle, 90
 - nets, 91
 - tableau de marche, 67
 - temps
 - de pause, 98
 - de retournement, 98
 - de stationnement, 98
 - de trajet, 33
 - token ring, 33, 45, 56
 - Transit Network
 - Design and Frequencies Setting Problem, 18
 - Design and Scheduling Problem, 18
 - Design Problem, 18
 - Frequencies Setting Problem, 18
 - Scheduling Problem, 18
 - Timetabling Problem, 18
 - Transit Trip Assignment, 36
 - transport
 - en commun, 9
 - routier de voyageurs, 1
 - variables
 - d'état, 41, 71, 104
 - de décision, 41, 71, 104
 - voisinage, 46, 78, 81, 88, 107

Références bibliographiques

- [Benn, 1995] cité page 19
H.P. Benn. Bus route evaluation standards. Technical report, Transportation Research Board, Washington, 1995.
- [Bertsekas, 1991] cité page 75, 77
D.P. Bertsekas. *Linear Network Optimization : Algorithms and Codes*. MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [Bianco *et al.*, 1992] cité page 27
L. Bianco, M. Bielli, A. Mingozzi, S. Ricciardelli, and M. Spadoni. A heuristic procedure for the crew rostering problem. *European Journal of Operational Research*, 58(2) :272–283, 1992.
- [Blais *et al.*, 1975] cité page 26
J.Y. Blais, J.M. Rousseau, and G. Laporte. The problem of assigning drivers to bus routes in an urban public transit system. Technical report, CRT, Université de Montréal, 1975.
- [Bookbinder et Désilets, 1992] cité page 23, 23, 23, 36, 68
J.H. Bookbinder and A. Désilets. Transfer optimization in a transit network. *Transportation Science*, 26(2) :106–118, 1992.
- [Bunte *et al.*, 2006] cité page 24, 69
S. Bunte, N. Kliewer, and L. Suhl. An overview on vehicle scheduling models in public transport. In *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Leeds UK, 2006. Springer Verlag.
- [Caprara *et al.*, 1998] cité page 27
A. Caprara, P. Toth, M. Fischetti, and D. Vigo. Modeling and solving the crew rostering problem. *Operations Research*, 46(6) :820–830, 1998.
- [Carpetano *et al.*, 1989] cité page 25
G. Carpetano, M. Dell’Amico, M. Fischetti, and P. Toth. A branch and bound algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Networks*, 19(5) :531–548, 1989.
- [Carraraesi et Gallo, 1984] cité page 27
P. Carraraesi and G. Gallo. A multilevel bottleneck assignment approach to the bus driver’s rostering problem. *European Journal of Operational Research*, 16(2) :163–173, 1984.
- [Castelli *et al.*, 2004] cité page 29, 69
L. Castelli, R. Pesenti, and W. Ukovich. Scheduling multimodal transportation systems. *European Journal of Operational Research*, 155(3) :603–615, 2004.
- [Catanas et Paixao, 1995] cité page 27
F. Catanas and J.M.P. Paixao. A new approach for the crew rostering problem. In J.R. Dadona, I. Branco, and J.M.P. Paixao, editors, *Computer-aided transit scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, volume 430, pages 267–277. Springer Verlag, 1995.

- [Ceder *et al.*, 2001] cité page 28, 36
A. Ceder, B. Golany, and O. Tal. Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A*, 35(10) :913–928, 2001.
- [Ceder et Wilson, 1986] cité page 2, 17, 23, 85
A. Ceder and N.H.M. Wilson. Bus network design. *Transportation Research Part B*, 20(4) :331–344, 1986.
- [Ceder, 2003] cité page 29, 39
A. Ceder. *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, chapter Public Transport Timetabling and Vehicle Scheduling, pages 31–57. Elsevier Science Ltd., New York, 2003.
- [Ceder, 2007] cité page 26, 27, 112
A. Ceder. *Public Transit Planning and Operation : Theory, Modeling and Practice*, chapter Crew Scheduling, pages 279–318. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [Cevallos et Zhao, 2006] cité page 2, 23, 36, 68
F. Cevallos and F. Zhao. Minimizing transfer times in a public transit network with a genetic algorithm. *Transportation Research Record*, 1971 :74–79, 2006.
- [Chakroborty *et al.*, 1995] cité page 23, 36, 68, 98
P. Chakroborty, K. Deb, and P.S. Subrahmanyam. Optimal scheduling of urban transit systems using genetic algorithms. *Journal of Transportation Engineering*, 121(6) :544–553, 1995.
- [Chakroborty *et al.*, 1997] cité page 2, 23, 36, 68, 69, 98
P. Chakroborty, K. Deb, and P. Porwal. A genetic algorithm based procedure for optimal transit systems scheduling. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, pages 330–341, 1997.
- [Chakroborty *et al.*, 2001] cité page 29, 69, 98
P. Chakroborty, K. Deb, and R.K. Sharma. Optimal fleet size distribution and scheduling of urban transit systems using genetic algorithms. *Transportation Planning and Technology*, 24(3) :209–226, 2001.
- [Chakroborty et Dwivedi, 2002] cité page 20
P. Chakroborty and T. Dwivedi. Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms. *Engineering Optimization*, 34(1) :83–100, 2002.
- [Clement et Wren, 1995] cité page 26
R. Clement and A. Wren. Greedy genetic algorithms, optimizing mutations and bus driver scheduling. In J.R. Daduna, I. Branco, and J.M.P. Paixao, editors, *Computer-aided transit scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, volume 430, pages 213–235. Springer Verlag, 1995.
- [Constantin et Florian, 1995] cité page 21
I. Constantin and M. Florian. Optimizing frequencies in a transit network : a nonlinear bi-level programming approach. *International Transactions in Operational Research*, 2(2) :149–164, 1995.
- [Daduna et Voss, 1995] cité page 2, 23, 23, 36, 68
J.R. Daduna and S. Voss. Practical experiences in schedule synchronization. In *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, volume 430, pages 39–55, 1995.
- [Deb et Chakroborty, 1998] cité page 23, 36, 68, 98
K. Deb and P. Chakroborty. Time scheduling of transit systems with transfer considerations using genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 6(1) :1–24, 1998.

- [Desaulniers et Hickman, 2007] cité page 19
 G. Desaulniers and M. Hickman. Public transit. In *Handbooks in Operation Research and Management Science*, pages 69–120. 2007.
- [Desrochers et Soumis, 1989] cité page 26
 M. Desrochers and F. Soumis. A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem. *Transportation Science*, 23(1) :1–13, 1989.
- [DiGasparo, 2003] cité page 45, 56
 L. DiGasparo. *Local Search Techniques for Scheduling Problems : Algorithms and Software Tools*. PhD thesis, Dipartimento di Matematica e Informatica – Università degli Studi di Udine, 2003.
- [Eranki, 2004] cité page 28, 36
 A. Eranki. A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops. Master’s thesis, University of South Florida, 2004.
- [Ernst *et al.*, 2004] cité page 27
 A. Ernst, H. Jiang, M. Krishnamoorthy, and D. Sier. Staff scheduling and rostering : A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, 153(1) :3–27, 2004.
- [Fischetti *et al.*, 2001] cité page 25
 Matteo Fischetti, A. Lodi, S. Martello, and Paolo Toth. A polyhedral approach to simplified crew and vehicle scheduling problems. *Management Science*, 47(6) :833–850, 2001.
- [Fleurent *et al.*, 2004] cité page 28, 29, 37, 69
 C. Fleurent, R. Lessard, and L. Seguin. Transit timetable synchronization : evaluation and optimization. In *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Leeds UK, 2004. Springer Verlag.
- [Freling *et al.*, 1995] cité page 29
 R. Freling, G. Boender, and J.M.P. Paixão. An integrated approach to vehicle and crew scheduling. Technical Report 9503/A, Economie Institute, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam, 1995.
- [Freling *et al.*, 2001] cité page 25, 75, 76, 77
 R. Freling, A. Wagelmans, and J.M.P. Paixao. Models and algorithms for single-depot vehicle scheduling. *Transportation Science*, 35(2) :165–180, 2001.
- [Friedrich *et al.*, 1999] cité page 36
 M. Friedrich, T. Haupt, and K. Nökel. Planning and analyzing transit networks - an integrated approach regarding requirements of passengers and operators. *Journal of Public Transportation*, 2(4) :19–39, 1999.
- [Furth et Wilson, 1982] cité page 21
 P.G. Furth and N.H.M. Wilson. Setting frequencies on bus routes : theory and practice. *Transportation Research Record*, 818 :1–7, 1982.
- [Gaffi et Nonato, 1999] cité page 29, 29
 Andrea Gaffi and Maddalena Nonato. An integrated approach to the extra-urban crew and vehicle scheduling problem. In Nigel H. M. Wilson, editor, *Computer-Aided Transit Scheduling*, pages 103–128, Berlin, 1999. Springer Verlag.
- [Gao *et al.*, 2004] cité page 22
 Z. Gao, H. Sun, and L. Shan. A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems. *Transportation Research Part B*, 38(3) :235–250, 2004.
- [Glover et Laguna, 1997] cité page 56
 F. Glover and M. Laguna. *Tabu search*. Kluwer Academic Publishers, 1997.

- [Glover, 1986] cité page 107
F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5) :533–549, 1986.
- [Guan *et al.*, 2003] cité page 36
J.F. Guan, H. Yang, and S.C. Wirasinghe. Simultaneous optimization of transit line configuration and passenger line assignment. *Transportation Research Part B*, 40(10) :885–902, 2003.
- [Guihaire et Hao, 2008a] cité page 3, 7, 18
V. Guihaire and J.K. Hao. Transit network design and scheduling : a global review. *Transportation Research Part A*, 42(10) :1251–1273, 2008.
- [Guihaire et Hao, 2008b] cité page 65, 99
V. Guihaire and J.K. Hao. Transit network re-timetabling and vehicle scheduling. In Le Thi Hoai An, Pascal Bouvry, and Pham Dinh Tao, editors, *MCO*, volume 14 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 135–144. Springer, 2008.
- [Haase et Friberg, 1999] cité page 29
K. Haase and C. Friberg. An exact branch and cut algorithm for the vehicle and crew scheduling problem. In N.H.M. Wilson, editor, *Computer-aided Transit Scheduling*, volume 471, pages 63–80, Berlin, 1999. Springer Verlag.
- [Han et Wilson, 1982] cité page 22
A.F. Han and N.H.M. Wilson. The allocation of buses in heavily utilized networks with overlapping routes. *Transportation Research Part B*, 16(3) :221–232, 1982.
- [Huisman *et al.*, 2005] cité page 2, 29, 29
D. Huisman, R. Freling, and A.P.M. Wagelmans. Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling. *Transportation Science*, 39(4) :491–502, 2005.
- [Jansen *et al.*, 2002] cité page 2, 23, 36, 46, 68, 71, 79, 98, 99
L.N. Jansen, M.B. Pedersen, and O.A. Nielsen. Minimizing passenger transfer times in public transport timetables. In *Seventh Conference of the Hong Kong Society for Transportation Studies : Transportation in the Information Age*, pages 229–239, 2002.
- [Klemmt et Stemme, 1988] cité page 23, 23, 36, 68
W.D. Klemmt and W. Stemme. Schedule synchronization for public transit networks. In *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, pages 327–335. Springer-Verlag, 1988.
- [Kliwer *et al.*, 2006] cité page 25
N. Kliwer, T. Mellouli, and L. Suhl. A timespace network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research*, 175(3) :1616–1627, 2006.
- [Koutsopoulos *et al.*, 1985] cité page 28
H.N. Koutsopoulos, A. Odoni, and N.H.M. Wilson. *Computer Scheduling of Public Transport 2*, chapter Determination of Headways as Function of Time Varying Characteristics on a Transit Network, pages 391–414. North-Holland, Amsterdam, 1985.
- [Kroon et Fischetti, 2001] cité page 26
L. Kroon and M. Fischetti. Crew scheduling for Netherlands railways 'destination customer'. In S. Voss and J.R. Daduna, editors, *Computer-aided transit scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, volume 505, pages 181–201. Springer Verlag, 2001.
- [Laurent et Hao, 2008] cité page 29
B. Laurent and J.K. Hao. Simultaneous vehicle and crew scheduling for extra urban transports. In *Proceedings of the 21st conference on Industrial, Engineering and other Applications of Applied Intelligent Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 5027, pages 466–475. Springer-Verlag, 2008.

- [Laurent et Hao, 2009a] cité page 24
 B. Laurent and J.K. Hao. Iterated local search for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1) :277–286, 2009.
- [Laurent et Hao, 2009b] cité page 25
 B. Laurent and J.K. Hao. List graph colouring for multiple-depot vehicle scheduling. *International Journal of Mathematics in Operations Research*, 1(1-2) :228–245, 2009.
- [Laurent, 2008] cité page 29
 B. Laurent. *Algorithmes pour la planification des véhicules et des conducteurs en transport routier de voyageurs*. PhD thesis, LERIA, Université d’Angers, 2008.
- [Löbel, 1998] cité page 25
 A. Löbel. Vehicle scheduling in public transit and lagrangian pricing. *Management Science*, 44(12) :1637–1649, 1998.
- [Lessard et al., 1989] cité page 26
 R. Lessard, M. Minoux, and J.M. Rousseau. A new approach to general matching problems using relaxation and network flow subproblems. *Networks*, 19(4) :459–480, 1989.
- [Lourenco et al., 2001] cité page 26
 H.R. Lourenco, J.P. Paixao, and R. Portugal. Multiobjective metaheuristics for the bus-driver scheduling problem. *Transportation Science*, 35(3) :331–343, 2001.
- [Lourenco et al., 2002] cité page 75
 H.R. Lourenco, O.C. Martin, and T. Stutzle. Iterated local search. In F. Glover and G. Kochenberger, editors, *Handbook of Metaheuristics, ISORMS 57*, pages 321–353. Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2002.
- [Mandl,] cité page 20
 C.E. Mandl. Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 5(6) :396–404.
- [Mermoud et Lartigau, 1998] cité page 14
 F. Mermoud and Y. Lartigau. Le transport par autocar. Technical report, Centre d’Etudes sur les Réseaux, les Transports, l’urbanisme et les Constructions Publiques (CERTU), 1998.
- [Moz et al., 2006] cité page 27
 M. Moz, A. Respicio, and M. Vaz Pato. Bi-objective evolutionary heuristics for bus drivers rostering. In *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Leeds UK, 2006. Springer Verlag.
- [Murray et al., 1998] cité page 19, 19
 A.T. Murray, R. Davis, R.J. Stimson, and L. Ferreira. Public transportation access. *Transportation Research Part D*, 3(5) :319–328, 1998.
- [Murray, 2003] cité page 20
 A.T. Murray. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access. *Annals OR*, 123(1-4) :143–156, 2003.
- [Oukil et al., 2007] cité page 25
 A. Oukil, H.B. Amor, J. Desrosiers, and H.E. Gueddari. Stabilized column generation for highly degenerate multiple-depot vehicle scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 3(34) :817–834, 2007.
- [Paixão et Branco, 1987] cité page 25, 69
 J.P.M. Paixão and I.M. Branco. A quasi-assignment algorithm for bus scheduling. *Networks*, 17(3) :249–269, 1987.
- [Paixão, 1990] cité page 26
 J.P.M. Paixão. *Operational Research’90*, chapter Transit crew scheduling on a personal workstation (MS/DOS), pages 421–432. Pergamon Press, 1990.

- [Palma et Lindsey, 2001] cité page 35
 A. De Palma and P. Lindsey. Optimal timetables for public transportation. *Transportation Research Part B*, 35(8) :798–813, 2001.
- [Pape et al., 1992] cité page 20
 U. Pape, U. Reinecke, and Y. Reinecke. Entwurf und Implementierung eines Liniensplanungs-systems für den Busverkehr im PNV unter einer Objektorientierten grafischen Entwicklungsumge-bung. Master’s thesis, Gruppendiplomarbeit, 1992.
- [Park, 2005] cité page 22
 S.J. Park. Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation. Master’s thesis, University of Maryland, 2005.
- [Patz, 1925] cité page 20
 A. Patz. Die richtige Auswahl von Verkehrslinien bei großen Straßenbahnnetzen. Technical report, Verkehrstechnik 50/51, 1925.
- [Rapp et Gehner, 1976] cité page 28
 M.H. Rapp and C.D. Gehner. Transfer optimization in an interactive graphic system for transit planning. *Transportation Research Record*, 619 :27–33, 1976.
- [Rousseau et Blais, 1985] cité page 26
 J.M. Rousseau and J.Y. Blais. *Computer Scheduling of Public Transport 2*, chapter HASTUS : an interactive system for buses and crew scheduling, pages 45–60. North-Holland, Amsterdam, 1985.
- [Salzborn, 1980] cité page 21
 F.J.M. Salzborn. Scheduling bus systems with interchanges. *Transportation Science*, 14(3) :211–220, 1980.
- [Scheele, 1980] cité page 21, 21
 S. Scheele. A supply model for public transit services. *Transportation Research Part B*, 14(1-2) :133–146, 1980.
- [Sodhi et Norris, 2004] cité page 27
 M. Sodhi and S. Norris. A flexible, fast, and optimal modeling approach applied to crew rostering at London Underground. *Annals of Operations Research*, 127(1-4) :259–281, 2004.
- [Spasovic et al., 1993] cité page 19
 L.N. Spasovic, M.P. Boile, and A.K. Bladikas. A methodological framework for optimizing bus transit service coverage. In *Proceedings of the 73rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1993.
- [Steinzen et al., 2007] cité page 29
 I. Steinzen, M. Becker, and L. Suhl. A hybrid evolutionary algorithm for the vehicle and crew scheduling problem in public transit. In *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC2007)*, pages 3784–3789, 2007.
- [Ting et Schonfeld, 2005] cité page 23
 C.J. Ting and P. Schonfeld. Schedule coordination in a multiple hub transit network. *Journal of Urban Planning and Development*, 131(2) :112–124, 2005.
- [White et Farrington, 1998] cité page 16
 P. White and J. Farrington. Bus and coach deregulation and privatization in Great Britain, with particular reference to Scotland. *Journal of Transport Geography*, 6(2) :135–141, 1998.
- [Wren et Smith, 1988] cité page 26
 A. Wren and B.M. Smith. Experiences with a crew scheduling system based on set covering. In J.R. Daduna and A. Wren, editors, *Computer-aided transit scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, volume 308, pages 104–118, Berlin, 1988. Springer Verlag.

- [Xiong et Schneider, 1993] cité page 20
Y. Xiong and J.B. Schneider. Transportation network design using a cumulative algorithm and neural network. *Transportation Research Record*, 1364 :37–44, 1993.
- [Yu *et al.*, 2005] cité page 20
B. Yu, Z. Yang, C. Cheng, and C. Liu. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, volume 5, pages 374–389, 2005.
- [Zhao et Gan, 2003] cité page 20
F. Zhao and A. Gan. Optimization of transit network to minimize transfers. Technical Report BD015-02, Florida Department of Transportation, Center for Transportation Research, Florida International University, 2003.
- [Zhao et Ubaka, 2004] cité page 20
F. Zhao and I. Ubaka. Transit network optimization - minimizing transfers and optimizing route directness. *Journal of Public Transportation*, 7(1) :67–82, 2004.
- [Zhao et Zeng, 2006] cité page 20
F. Zhao and X. Zeng. Simulated annealing-genetic algorithm for transit network optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(1) :57–68, 2006.

Liste des publications personnelles

Revue internationale

- i V. Guihaire and J. K. Hao. Transit Network Design and Scheduling : a Global Review. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 42(10) :1251-1273, Elsevier, 2008.

Conférences internationales avec comité de sélection

- i B. Laurent, V. Guihaire and J. K. Hao. A heuristic solution for a driver-vehicle scheduling problem. *Proceedings of the German Operations Research Conference (GOR'05)*, pages 703-708, Springer-Verlag, 2005.
- ii V. Guihaire, and J. K. Hao. Transit Network Re-Timetabling and Vehicle Scheduling. *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*, CCIS 14, pages 135-144, Springer-Verlag, H.A. Le Thi, P. Bouvry, and T. Pham Dinh (Eds.), 2008.

Conférences nationales avec actes de résumés étendus

- i V. Guihaire and J. K. Hao. Graphique d'un réseau de bus par groupes de lignes. *Actes du neuvième Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'08)*, pages 225-226, Clermont-Ferrand, Février 2008.

En soumission à une revue internationale

- i V. Guihaire and J. K. Hao. Transit Network Timetabling and Vehicle Assignment for Regulating Authorities. 2009.

En soumission à une conférence internationale avec comité de sélection

- i V. Guihaire and J. K. Hao. Improving Timetable Quality in Scheduled Transit Networks. 2009.

MODÉLISATION ET OPTIMISATION POUR LE GRAPHICAGE DES LIGNES DE BUS

Résumé

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre l'université d'Angers et la société Perinfo. Elle porte sur le développement de nouveaux modèles et algorithmes dédiés à la détermination des horaires de lignes dans les réseaux de bus. Le cœur de ce manuscrit est la qualité de service perçue par l'utilisateur. Nous réalisons dans un premier temps un état de l'art des étapes relatives à la planification du réseau. Nous proposons ensuite un modèle et des fonctions d'évaluation pour les objectifs de synchronisation des correspondances et de régularité du cadencement. Ces éléments sont utilisés au sein d'une méthode de recherche locale basée sur un ensemble de voisinages que nous définissons pour le problème. Notre troisième contribution est la modélisation d'un problème original et intégré qui résout simultanément le problème de fixation des horaires et de création des affectations de véhicules. Pour ce problème complexe, nous proposons une méthode de résolution hybride basée sur une recherche locale itérée et un algorithme exact par enchères, ainsi que deux voisinages spécifiques. Les tests réalisés sur données réelles valident la supériorité de l'approche simultanée par comparaison avec la situation existante et l'approche séquentielle, tant au niveau de la qualité de service que des coûts économiques. Enfin, nous étudions une problématique originale qui prend à contre-courant le processus traditionnel de planification. Ce problème de fixation des horaires, visant des objectifs liés aux correspondances, prend pour contraintes les séquences de courses affectées aux véhicules et aux conducteurs. Cette approche permet d'améliorer la qualité de service sans remettre en cause les plannings d'exploitation. Une méthode tabou basée sur deux voisinages adaptés est développée et testée sur un cas d'étude.

Mots-clés : graphicage, planification d'un réseau de bus, métaheuristiques.

MODELS AND OPTIMISATION FOR BUS NETWORK TIMETABLING

Abstract

This thesis was realized within a collaboration between the university of Angers and the company Perinfo. It deals with the development of new models and algorithms dedicated to bus network timetabling. This manuscript is built around the notion of quality of service. We start by establishing a literature review of the steps of the network planning process. We then propose a model and evaluation functions for the headway evenness and transfer synchronization objectives. Those elements are used inside a local search method based on a set of neighborhoods that we tailor for the problem. Our third contribution is a model for an original and integrated problem which solves simultaneously the timetabling and the vehicle assignment problems. To tackle this complex problem, we propose a hybrid solution method based on an iterated local search procedure and an exact auction algorithm, as well as two specific neighborhoods. The computational results obtained on a real case study show the superiority of the simultaneous approach compared to the existing solution and to the sequential approach, with respect to quality of service and to the economic costs. Finally, we address an original problem which works backwards given the traditional planning process. This timetabling problem, aiming for better transfer possibilities, is constrained by the sequences of line runs assigned to vehicles and drivers. This approach enables a quality of service improvement without making the resources schedules obsolete. A tabu search method based on two specific neighborhood mechanisms is developed and assessed on a case study.

Keywords : bus network timetabling, metaheuristics.