



OPTIMISATION DU PLAN DE TRANSPORT PAR PLANIFICATION INTEGREE DES RESSOURCES

Faten Benhizia

► To cite this version:

Faten Benhizia. OPTIMISATION DU PLAN DE TRANSPORT PAR PLANIFICATION INTEGREE DES RESSOURCES. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2012. Français. NNT : 2012EMSE0668 . tel-01423840

HAL Id: tel-01423840

<https://theses.hal.science/tel-01423840>

Submitted on 1 Jan 2017

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.



Innovation et Recherche

N° d'ordre : 2012 EMSE 0668

THÈSE
Présentée par
Faten Benhizia

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne
Spécialité : Génie Industriel

**OPTIMISATION DU PLAN DE TRANSPORT PAR
PLANIFICATION INTÉGRÉE DES RESSOURCES**

Soutenue publiquement à Gardanne, le 25 octobre 2012

Membres du jury

Président :	Jean-Charles BILLAUT	Professeur, Université de Tours
Rapporteurs :	Christian ARTIGUES Christian PRINS	Chargé de Recherche, LAAS-CNRS, Toulouse Professeur, Université de Technologie de Troyes
Examineurs :	Xavier DELORME David DE ALMEIDA	Maître-Assistant, ENSM-SE, Saint-Étienne Docteur, SNCF-Dir. Innovation et Recherche, Paris
Directeurs de thèse :	Stéphane DAUZERE-PERES Dominique FEILLET	Professeur, CMP-GC, ENSM-SE, Gardanne Professeur, CMP-GC, ENSM-SE, Gardanne
Invité :	Housni DJELLAB	Docteur, SNCF-Dir. Innovation et Recherche, Paris

Table des matières

Table des matières	3
Table des figures	4
Liste des tableaux	5
Remerciements	7
Introduction Générale	9
1 Contexte industriel de la thèse	12
1.1 Ressources critiques pour la production des circulations ferroviaires	13
1.1.1 L'infrastructure	13
1.1.2 Les engins ferroviaires	19
1.1.3 Les Agents de Conduite (AdC)	20
1.2 Niveaux de décision dans la planification des ressources ferroviaires	20
1.2.1 Niveau stratégique	21
1.2.2 Niveau tactique	21
1.2.3 Niveau opérationnel	22
1.3 Procédure d'attribution des sillons	23
1.3.1 Demande de sillons	23
1.3.2 Attribution des sillons	23
1.4 Conclusion	24
2 Analyse du problème industriel et scientifique	25
2.1 Processus actuel d'optimisation du plan de transport	26
2.1.1 Conception d'une grille horaire	26
2.1.2 Planification des engins ferroviaires	27
2.1.3 Planification des Agents de Conduite (AdC)	28
2.2 Motivation et raisons de la thèse	31
2.2.1 Forte interaction entre les ressources ferroviaires	31
2.2.2 Limites du processus actuel	32
2.2.3 Gains potentiels observés dans d'autres secteurs de transport avec une approche intégrée	35
2.3 Etat de l'art	37
2.3.1 Planification séquentielle en transport ferroviaire	37
2.3.2 Planification intégrée en transport	40
2.4 Alternatives de planification intégrée des ressources	47
2.4.1 Grille horaire vide	48
2.4.2 Grille horaire fixée	48
2.4.3 Grille horaire préexistante modifiable	48
2.4.4 Catalogue de sillons	48
2.5 Démarche de planification intégrée des ressources	50
2.6 Conclusion	50

3	Modélisation mathématique du problème de planification intégrée engins/AdC	52
3.1	Eléments de contexte	53
3.2	Formalisation des données du problème	55
3.3	Modélisation du problème	58
3.3.1	Variables de décision	58
3.3.2	Contraintes d'utilisation des engins	60
3.3.3	Contraintes d'utilisation des AdC	64
3.3.4	Contraintes couplantes engins/AdC	66
3.3.5	Fonction Objectif	68
3.4	Programme linéaire mixte (MIP)	69
3.5	Prise en compte des étapes de repositionnement dans la couverture de la charge de travail AdC	71
3.6	Modèle simplifié	73
3.7	Conclusion	73
	Conclusion et perspectives	74
	Bibliographie	79

Table des figures

1.1	Infrastructure ferroviaire (ligne Amiens-Paris).	13
1.2	Voie unique sur la ligne Haut-Bugey (Rhône Alpes).	14
1.3	Ligne à double voie non électrifiée (Mulhouse-Paris).	14
1.4	Graphique Espace-Temps (GET) de la gare de Nîmes.	15
1.5	Signalisation en gare Saint-Lazare.	17
1.6	Schéma de principe du Block Automatique Lumineux.	17
1.7	Catalogue de sillons fret - Service Annuel 2012.	18
1.8	GET cadencé (gare d'Annemasse en Haute-Savoie)	19
1.9	GET Cadencé (gare de Paris Nord).	19
1.10	Processus d'attribution des sillons.	24
2.1	Grille horaire (réseau Infrabel)	26
2.2	Roulement de séries d'engins (Fret SNCF)	28
2.3	Grille de service AdC	30
2.4	Processus actuel de planification des ressources ferroviaires	30
2.5	Interaction existante entre les trois processus de planification.	31
2.6	Exemple 1. Limites du processus actuel de planification séquentielle des sillons et engins	33
2.7	Exemple 1. Apport d'une approche par planification intégrée des ressources sillons/engins	33
2.8	Exemple 2. Limites du processus actuel de planification séquentielle des engins et AdC	34
2.9	Exemple 2. Apport de l'approche par planification intégrée des ressources sillons/engins	35
2.10	Alternatives possibles de planification intégrée.	49
2.11	Processus de conception d'un plan de transport par planification intégrée engins/AdC	50
3.1	Phases de découpage du sillon	53
3.2	Approches de modélisation du problème de planification des AdC	54
3.3	Graphique espace-temps.	62
3.4	Extension de l'heuristique lagrangienne.	77

Liste des tableaux

2.1	Enjeux économiques de la planification intégrée dans d'autres secteurs de transport . .	37
2.2	Synthèse des articles de référence étudiés.	46

*Je dédie cette thèse à mes parents,
Dinara et Lokmane BENHIZIA,
à qui je dois cette réussite*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance à mes encadrants Stéphane Dauzère-Pérès, Directeur de Thèse au Centre Microélectronique de Provence - Georges Charpak (CMP-GC) de l'École des Mines de Saint-Étienne, et David De Almeida, Adjoint au Chef de Département Services, Réseaux et Optimisation (SRO) de la Direction de l'Innovation et de la Recherche de la SNCF, pour le travail d'encadrement qu'ils ont accompli et pour les orientations qu'ils ont su me donner tout au long de ma thèse. Je tiens sincèrement à les remercier pour toutes les connaissances métiers et scientifiques qu'ils m'ont transmises et qui m'ont permis d'évoluer professionnellement. Ce fut un réel plaisir de travailler avec eux, et je souhaite à tous les doctorants qu'ils puissent avoir un encadrement comme le mien. Leur professionnalisme, leur sens de la responsabilité, de la rigueur et du détail ont été très appréciables pendant le déroulement de ma thèse, et m'ont permis d'évoluer dans un contexte professionnel "presque idéal".

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Housni Djellab, Chef de groupe Optimisation des capacités d'exploitation à la Direction de l'Innovation et de la Recherche de la SNCF, qui m'a encadré durant mon stage de master Recherche et donné la chance d'intégrer la SNCF en me proposant un sujet sur "l'optimisation des journées de service des agents de conduite". Je tiens à le remercier pour tous ses encouragements et son soutien sans faille tout au long de mon passage à la direction de l'Innovation et de la Recherche, et même après. Je remercie également Christian Weber pour la confiance qu'il a su m'accorder en me proposant de poursuivre mon intégration à la SNCF à travers une Thèse de doctorat.

Je remercie infiniment Nicolas Marcos pour sa disponibilité tout au long de ma thèse et dont je lui exprime toute ma gratitude pour toutes les fois où il a répondu "présent" à mes appels. Son aide a été très précieuse dans l'avancement de ma thèse, je lui souhaite le meilleur dans son parcours professionnel.

Je remercie également Gilles Dessagne, pour toutes les connaissances qu'il a pu me transmettre et qui m'ont permis d'avancer.

Un grand merci à Philippe Le Yondre pour son implication dans le projet et sa disponibilité. Sa contribution a été précieuse, tant sur les sujets métiers que pour la construction des jeux de données dans le cadre des tests de validation des approches de résolution proposées.

Je remercie également Olivier Guyon pour toutes les interventions qu'il a pu faire dans le cadre du projet.

Mes remerciements vont maintenant à l'équipe de la direction de l'Innovation et de la Recherche : Caroline Desprez, Mathilde Carlier, Sabine Trefond, François Ramond, Jean Damay et Francis Sourd pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé. Leur bonne humeur au quotidien et les moments qu'on a pu partager ensemble m'ont permis d'évoluer dans un cadre de travail favorable.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à l'équipe GROIX : Nicole Jaillet, Eric Jaffret, Jean-Luc Daniel, Patrice Bauge, Juliette Barth, Irène-Flore Alima, Nicolas Sot, et Isabelle Cordeiro pour leur soutien et leur encouragement durant la dernière année de thèse. Les bonnes conditions de travail ont été d'une très grande importance dans l'avancement et l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Pierrick Vallat et à Timothée Dereu pour leur contribution technique à la conception et à la réalisation de SUPORT.

Enfin, un grand merci à ma famille et à mon mari qui ont su m'épauler, m'encourager et faire preuve de patience. Leur soutien m'a été inestimable durant ces années de thèse.

INTRODUCTION GENERALE

Problématique et objectifs

La production des circulations ferroviaires repose sur une exploitation synchronisée et chronologique de ressources rares et hétérogènes telles que les sillons¹, les ressources matérielles de traction (engins ferroviaires) et les ressources humaines de conduite (agents de conduite). L'exploitation de ces ressources ferroviaires critiques engendre des coûts très importants pour les Entreprises Ferroviaires (EF) comme la SNCF : l'acquisition, la location et la maintenance du matériel roulant, coût des péages des sillons acquittés à Réseau Ferré de France (RFF) pour l'utilisation de l'infrastructure, coûts liés à l'exploitation des Agents de Conduite (AdC). La rentabilité de l'EF SNCF dépend non seulement des recettes et des dépenses auxquelles elle doit faire face, mais aussi des multiples défis auxquels elle se trouve confrontée et qu'elle doit relever : ouverture à la concurrence, complexité de l'organisation des chemins de fer, etc. L'amélioration de ses performances passe par une gestion efficace et optimale des ressources matérielles et humaines de la production des circulations ferroviaires en vue d'améliorer la gestion globale des ressources, la qualité et l'efficacité de ce processus de production.

La planification de ces ressources ferroviaires critiques s'appuie actuellement sur un processus essentiellement séquentiel dans lequel la conception des grilles horaires de circulation (réservation de l'infrastructure pour la circulation des trains de l'offre de transport de l'EF) conditionne largement la conception des planifications des engins ferroviaires (les roulements des engins), puis celles des Agents de Conduite (les grilles de service des AdC). Cette stratégie de planification séquentielle des ressources nécessaires à la production des circulations ferroviaires a été massivement adoptée par l'EF SNCF, comme d'autres EF d'ailleurs, pour trois principales raisons pratiques et scientifiques :

1. elle permet de maîtriser la complexité du processus de planification et de diminuer considérablement la taille des problèmes de prises de décision étudiés,
2. elle permet de structurer la prise de décision et de privilégier la planification des ressources les plus coûteuses,
3. aucune démarche permettant de gérer globalement et de façon intégrée la production des circulations ferroviaires n'a jusqu'à présent été étudiée et évaluée (en termes de gains, de calculabilité) dans un contexte ferroviaire industriel.

Toutefois, cette stratégie de planification séquentielle génère des solutions qui peuvent être de coût élevé et moins robustes aux aléas, car les décisions prises à une étape donnée peuvent réduire considérablement l'ensemble des solutions réalisables aux étapes suivantes. Dans ce contexte, l'EF SNCF souhaite donc investiguer la praticabilité et les apports d'une démarche d'optimisation du plan de transport par planification intégrée des ressources. Fort de ce constat et de l'interaction qui existe entre ces différents types de ressources, l'objectif de la thèse est d'étudier la faisabilité et le prototypage d'une démarche de planification intégrée des ressources de la production des circulations ferroviaires permettant :

- d'améliorer l'efficacité globale du plan de transport,

1. Constitue la capacité d'infrastructure requise pour faire circuler un train donné entre deux points du réseau.

- d’accroître la compétitivité de l’EF SNCF (réduction des coûts d’exploitation des ressources critiques de la production des circulations ferroviaires, consolidation de la prise de décision en étudiant plusieurs scénarios),
- d’améliorer la qualité de ses services (production de plans de transport cohérents et stables).

Contribution et enjeux

La planification intégrée des ressources a été essentiellement abordée dans le domaine aérien et dans celui des transports en commun ; on constate que peu de travaux dans la littérature ferroviaire ont été consacrés à la planification intégrée des ressources. A un niveau industriel, l’utilisation coordonnée de ces ressources s’appuie souvent sur une décomposition de la planification globale des ressources lors de l’élaboration du plan de transport. La plupart des outils logiciels exploités à la SNCF pour planifier les ressources reposent fortement sur l’expertise humaine et embarquent peu (voire pas) des modules d’optimisation et d’aide à la décision. La principale contribution à cette thèse porte sur l’étude de faisabilité et la quantification des gains potentiels que peut apporter une démarche de planification intégrée des ressources par rapport à une approche traditionnelle (séquentielle). A ce titre, nous proposons des modèles d’optimisation génériques et des algorithmes de résolution performants pour traiter globalement le problème de planification intégrée des ressources de la production ferroviaire. Les modèles proposés tiennent compte de l’ensemble des contraintes techniques, commerciales et légales liées à l’exploitation de ces ressources dans l’organisation actuelle des chemins de fer Français. La forte interaction qui existe entre ces différents types de ressources est également définie et prise en compte dans les modèles à travers l’intégration de contraintes couplantes qui lient entre elles les différentes ressources hétérogènes étudiées. Les enjeux économiques d’une telle démarche pour le système ferroviaire concernent :

- la production de plans de transport cohérents avec des coûts d’exploitation des ressources moins élevés,
- les gains de productivité induits par la mise en place d’un tel prototype pour étudier différents scénarios à moindre coût.

C’est dans cette optique d’amélioration de la performance et de la qualité de service que s’inscrit notre démarche de planification intégrée.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit comprend les chapitres suivants :

1. Contexte industriel de la thèse - dans ce chapitre, nous présentons les différentes ressources nécessaires à la production des circulations ferroviaires. Nous présentons également les différents acteurs et niveaux de décision qui interviennent dans le processus de planification des ressources. On retrouve dans ce chapitre une description de la procédure d’attribution des sillons par le Réseau Ferré de France (RFF) aux EF SNCF, qui est déterminante dans la politique de choix des stratégies de modélisation (dans le choix de la stratégie de modélisation).

2. Analyse du problème industriel et scientifique - ce chapitre est consacré à la description du processus actuel de planification des ressources ferroviaires lors de l’élaboration du plan de transport. Nous présentons ainsi les principales motivations qui nous ont menées à proposer une nouvelle démarche pour appréhender la problématique de gestion des ressources ferroviaires. Ce chapitre présente également une revue de la littérature dans le domaine de la planification intégrée des ressources qui regroupe les modèles d’optimisation et les approches de résolutions proposés pour traiter des problématiques d’intégration des ressources dans différents secteurs de transport. Les alternatives de planification intégrée des ressources à différents niveaux de décision sont également abordées et constituent les principaux axes de recherche proposés pour traiter de manière pragmatique et réaliste le problème de planification intégrée dans l’organisation actuelle. Parmi ces différents axes de recherche

proposés, nous avons retenu pour les travaux de la thèse proposés aux chapitre 3 à 5 l'axe associé à la planification intégrée des ressources engins/AdC. Nous présenterons en perspective quelques pistes de recherche à investiguer pour traiter la problématique de planification intégrée des ressources selon les autres axes proposés.

3. Modélisation mathématique du problème de planification intégrée des ressources engins/AdC - ce chapitre est consacré essentiellement à la formulation mathématique du problème de planification intégrée des engins et des AdC. Les problèmes de planification séquentielle des engins et des AdC sont d'abord modélisés séparément en prenant en compte l'ensemble des contraintes dont des ressources font l'objet, avant d'ajouter des contraintes couplantes qui lient entre elles les ressources planifiées, représentant ainsi la forte interaction qui existe entre ces ressources ferroviaires. Le modèle résultant est représenté sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers noté MIP.

4. Résolution du problème de planification intégrée des ressources engins/AdC (MIP)- les tests expérimentaux réalisés avec un logiciel standard de programmation linéaire ont très vite montré des limites quant à la résolution du modèle (MIP) étudié. Nous avons donc proposé dans ce chapitre des algorithmes de résolution plus performants basés sur une approche par relaxation lagrangienne des contraintes couplantes pour résoudre le problème de planification intégrée engins/AdC (MIP). Différents schémas de relaxation lagrangienne sont ainsi étudiés selon les contraintes couplantes dualisées. Ces différents schémas sont ensuite testés avec un logiciel standard de programmation linéaire (IBM ILOG CPLEX) sur des instances de données réalistes de l'activité Train Express Régional (TER) de la région BRETAGNE, construites à partir d'applicatifs utilisés en production. Les résultats obtenus sont présentés et comparés pour, in fine, retenir un schéma de relaxation lagrangienne performant et adapté à une mise en œuvre industrielle de notre approche de résolution. Certaines évolutions sur les contraintes couplantes sont également présentées et ont pour but de rendre l'application de l'approche de résolution proposée plus efficace avec la formulation du modèle mathématique (MIP).

5. Résolution industrielle du problème de planification intégrée engins/AdC - ce chapitre présente la mise en œuvre industrielle du schéma de résolution retenu au chapitre 4. Cette mise en œuvre repose sur l'exploitation de deux briques logicielles développées à la SNCF pour résoudre chacun des sous-problèmes de planification des engins et des AdC (respectivement les briques PRESTO et CARACO). Pour rendre l'application de notre approche de résolution possible avec les modèles mathématiques industriels, nous avons également dû réaliser d'importantes évolutions dans les modèles industriels PRESTO et CARACO et, par suite, dans le modèle industriel de planification intégrée engins/AdC résultant (ajout de contraintes couplantes, modification de la formulation mathématique des contraintes couplantes, etc.). Les résultats obtenus sur quelques instances réelles issues de TER Bretagne sont présentés et comparés avec une approche traditionnelle (séquentielle) de planification des ressources.

Chapitre 1

Contexte industriel de la thèse

Sommaire

1.1	Ressources critiques pour la production des circulations ferroviaires . . .	13
1.1.1	L'infrastructure	13
1.1.2	Les engins ferroviaires	19
1.1.3	Les Agents de Conduite (AdC)	20
1.2	Niveaux de décision dans la planification des ressources ferroviaires	20
1.2.1	Niveau stratégique	21
1.2.2	Niveau tactique	21
1.2.3	Niveau opérationnel	22
1.3	Procédure d'attribution des sillons	23
1.3.1	Demande de sillons	23
1.3.2	Attribution des sillons	23
1.4	Conclusion	24

La production des circulations ferroviaires repose sur l'utilisation coordonnée de plusieurs ressources rares et hétérogènes, en particulier ; le sillon¹, les engins ferroviaires, appelés également matériels roulants et les Agents De Conduite (AdC), appelés également conducteurs ou encore mécaniciens. Ces ressources critiques de la production des circulations ferroviaires sont, actuellement planifiées suivant une démarche essentiellement séquentielle et sont quelquefois optimisées dans l'organisation actuelle de l'entreprise. La mise en place d'une démarche de planification intégrée pour l'élaboration d'un plan de transport optimisé est motivée par la forte interaction qui existe entre ces trois ressources ferroviaires. Nous présentons dans la section 1.1 les différentes ressources étudiées dans la thèse ainsi que les principaux acteurs intervenant dans le processus de production des circulations ferroviaires. La section 1.2 expose les niveaux de décision pouvant intervenir dans la planification de chacune de ces ressources et l'impact du choix du niveau de décision sur les leviers d'action et les enjeux de la planification de chacune de ces ressources. La section 1.3 est consacrée à la description de la procédure d'attribution des sillons par Réseau Ferré de France (RFF), le gestionnaire de l'infrastructure.

1. Constitue la capacité d'infrastructure requise pour faire circuler un train donné entre deux points du réseau.

1.1 Ressources critiques pour la production des circulations ferroviaires

1.1.1 L'infrastructure

Il s'agit de l'ensemble des installations fixes comme : la voie ferrée, les caténaires², le système de signalisation, les bâtiments, etc. Ces installations appartiennent à Réseau Ferré de France (RFF), propriétaire et gestionnaire du réseau ferré national, qui a pour principal objectif d'assurer le financement, le développement, la cohérence et la mise en valeur du réseau ferré. La figure 1.1 représente un train de voyageurs sur une ligne à double voie avec différentes installations ferroviaires.



FIGURE 1.1 – Infrastructure ferroviaire (ligne Amiens-Paris).

Le réseau ferré : il est constitué par l'ensemble des lignes de chemin de fer (voies ferrées), des gares et des installations techniques diverses (ateliers, dépôts, triages, embranchements particuliers, etc.) qui permettent la circulation des convois ferroviaires. Il existe deux types de voie :

1. **Voie à sens unique** : elle n'est utilisée que dans un seul sens (une seule direction). Ce type de voie requiert des règles spécifiques de gestion de trafic afin d'assurer la sécurité des convois ferroviaires. La figure 1.2 représente une voie unique située sur la ligne Haut-Bugey (source : <http://www.rff.fr>).

2. Câble assurant l'alimentation en courant des engins ferroviaires électriques



FIGURE 1.2 – Voie unique sur la ligne Haut-Bugey (Rhône Alpes).

2. **Voie banalisée** : elle peut être empruntée (alternativement) dans les deux directions. La figure 1.3 représente une voie classique à double sens (source : [http ://www.rff.fr](http://www.rff.fr)).



FIGURE 1.3 – Ligne à double voie non électrifiée (Mulhouse-Paris).

Le sillon : un élément caractérisant chaque demande de clients est l'itinéraire suivi par la circulation assurant cette demande. La prise en compte de l'infrastructure se fait par le biais de la ressource **sillon**. Le sillon représente la capacité d'infrastructure requise pour faire circuler un train donné entre deux points du réseau ferré pendant une période de temps donnée. Il permet de caractériser les dimensions

Eurostar, Thalys, Lyria, IDTGV³ et voyages-sncf.com.

4. **SNCF Geodis** a pour mission le transport et la logistique des marchandises en France et dans le monde.
5. **SNCF Gares & connexions** : créée en avril 2009, elle a pour rôle la gestion et le développement des gares en faisant émerger des services innovants dans les gares tout en inventant de nouveaux espaces pour la mobilité des villes. Ses principales filiales sont les entités AREP (architecture et aménagement urbain), A2C (valorisation commerciale en gares) et Parvis.

Avant l'ouverture des demandes de sillons par Réseau Ferré de France (RFF), chaque activité assurant un service de transport de voyageurs ou de marchandises procède à des études de faisabilité (au moins un an à l'avance) pour préparer son plan de transport et orienter sa demande de sillons à RFF selon l'offre commerciale envisagée. Nous présentons en section 1.3 la procédure d'attribution des sillons par RFF aux différentes activités de la SNCF.

Cantonnement, Signalisation et Block : la sécurité des circulations (deux trains ne doivent pas se trouver au même endroit au même moment) est assurée en divisant la voie en **cantons** pour que tout train en mouvement dispose devant lui d'une distance au moins égale à sa distance de freinage. Le cantonnement fonctionne sur un principe d'espacement entre deux signaux des trains circulant dans le même sens sur une même voie afin d'assurer leur sécurité. Par principe, on n'admet la présence que d'un seul train dans un canton donné. Lorsqu'un train poursuivant sa marche entre dans le canton suivant, le signal d'entrée de ce dernier est fermé tandis que celui du canton précédent est ouvert. Historiquement, les cantons étaient les tronçons entre deux postes de cantonnement situés habituellement au niveau des gares les plus importantes, où le personnel de conduite actionnait des mécanismes qui activaient les signaux. Aujourd'hui, ce système d'exploitation est connu comme Block Manuel (BM) et il a pratiquement disparu des voies françaises, ne restant en place que sur des lignes à faible densité de trafic. Ce système a été remplacé par le Block Automatique à Permissivité Restreinte (BAPR), où les signaux sont actionnés directement par les trains dès leur passage, soit par compteurs d'essieux, soit par relais électriques sur les rails. Etant donné que la réduction de la longueur des cantons permet d'augmenter la capacité des voies, le système BAPR est remplacé par le Block Automatique Lumineux (BAL) (cf. figure 1.6) sur les voies à trafic dense où la longueur des cantons est au moins égale à la plus grande distance de freinage des trains empruntant la voie. Ce système assure à la fois la protection des circulations et l'amélioration du débit par rapport aux blocks manuels. Les figures 1.5 et 1.6 représentent, respectivement, la signalisation en gare St Lazare avec 27 voies à quai (la gare tête de ligne du réseau Saint-Lazare dispose d'équipements adéquats afin d'absorber les 1500 trains quotidiens) et un schéma de principe du Block Automatique Lumineux (BAL) (source : [http : //www.metro-pole.net/expl/exploit/sillons.html](http://www.metro-pole.net/expl/exploit/sillons.html)).

3. Service TGV de la SNCF, mis en place en 2004 et accessible uniquement par internet.



FIGURE 1.5 – Signalisation en gare Saint-Lazare.

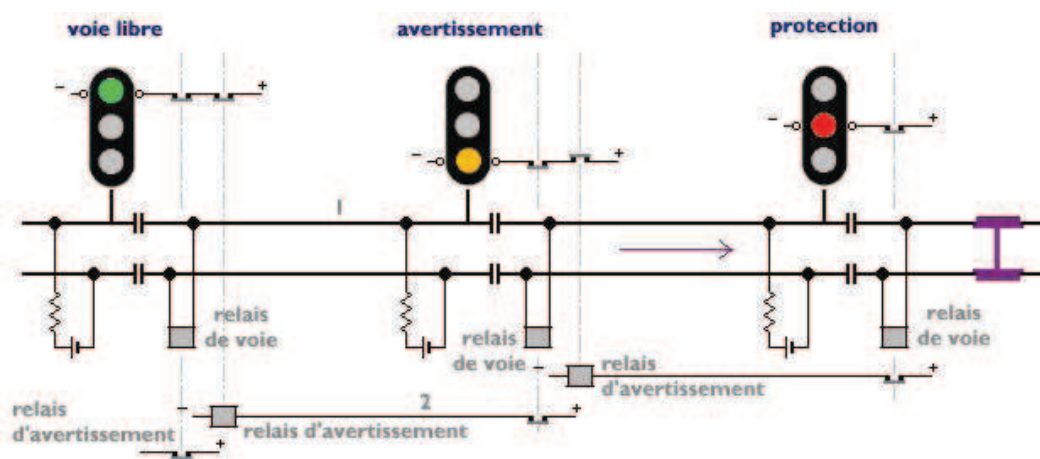


FIGURE 1.6 – Schéma de principe du Block Automatique Lumineux.

Cadencement et catalogue de sillons

Sept millions de sillons font l'objet d'une demande de réservation chaque année, soit 20 000 trains par jour. Le Réseau Ferré de France (RFF) a pour principale mission de faciliter l'accès au réseau et de trouver un bon compromis entre :

- la rentabilité des sillons,
- la satisfaction des demandes de transport par lignes (grandes lignes, lignes régionales, fret),
- l'aménagement de plages horaires pour les travaux de maintenance.

Le défi est relevé grâce à une bonne connaissance des besoins exprimés par les clients et une production de sillons de qualité. L'atteinte des objectifs que s'est fixé RFF en termes de rentabilité et de satisfaction de ses clients passe également par une offre de sillons préconstruits proposés en **catalogue**. Le catalogue de sillons est bâti pour faciliter l'offre de transport faite aux clients en leur permettant

1.1. RESSOURCES CRITIQUES POUR LA PRODUCTION DES CIRCULATIONS FERROVIAIRES

de sélectionner, parmi les sillons proposés dans ce catalogue, ceux qui répondent au mieux à leurs besoins. La figure 1.7 expose une liste des sillons-catalogue du fret SNCF pour le Service Annuel (SA) 2012.

RESEAU FERRÉ DE FRANCE
Pôle commercial
Direction des sillons

LISTE DES SILLONS-CATALOGUE FRET
du service annuel 2012

Avec sur lesquels il y a des modifications depuis la dernière version publiée le 20 mars

N° de section	Sens	Nom de l'onglet pour la création du lien hypertexte	Origine (code)	Destination (code)	Arrêts commerciaux	Engin et Tonnage	Canton
Sections INTERNATIONALES							
1	1	01_1-LDY-MOU	LILLE-DELIVRANCE (LDV)	MOUSCRON → ANVERS (Belgique) (MOU)		Alstom Prima 1800 t	
1	2	01_2-MOU-LDY	ANVERS → MOUSCRON (Belgique) (MOU)	LILLE-DELIVRANCE (LDV)		Alstom Prima 1800 t	
2	1	02_1-AYE-QUI	AULNOYE-AYMERIES (AYE)	QUEY → MUZEN G. (Belgique) (QUI)		Alstom Prima 1800 t	
2	2	02_2-QUI-AYE	MUZEN G. → QUEY (Belgique) (QUI)	AULNOYE-AYMERIES (AYE)		Alstom Prima 1800 t	
3	1	03_1-AYE-ERQ	AULNOYE-AYMERIES (AYE)	ERQUELINNES → CHATELET (Belgique) (ERQ)		Alstom Prima 1800 t	
3	2	03_2-ERQ-AYE	CHATELET (Belgique) → ERQUELINNES (ERQ)	AULNOYE-AYMERIES (AYE)		Alstom Prima 1800 t	
4	1	04_1-LDY-BAI	LILLE-DELIVRANCE (LDV)	BAISIEUX → TOURNAI (Belgique) (BAI)		Alstom Prima 1800 t	
4	2	04_2-BAI-LDY	TOURNAI (Belgique) → BAISIEUX (BAI)	LILLE-DELIVRANCE (LDV)		Alstom Prima 1800 t	
5	1	05_1-VPY-MSM	VOIPPY (VPY)	MONT-ST-MARTIN → Belgique → Hc (MSM)		Alstom Prima 1800 t	
5	2	05_2-MSM-VPY	Belgique → Belgique → MONT-ST-MARTIN (MSM)	VOIPPY (VPY)		Alstom Prima 1800 t	
6	1	06_1-BTG-VPY	Belgique → BETTEMBOURG (Luxembourg) (BTG)	VOIPPY (VPY)	Arrêt S à Thionville	Alstom Prima 1800 t	
6	2	06_2-VPY-BTG	VOIPPY (VPY)	BETTEMBOURG → Belgique (BTG)	Arrêt S à Thionville	Alstom Prima 1800 t	
7	1	07_1-BTG-BAY	Belgique → BETTEMBOURG (Luxembourg) (BTG)	BÂLE (Suisse) (BAV)	Arrêt [S] à Mulhouse et Thionville BV	Alstom Prima 1800 t	
7	2	07_2-BAY-BTG	BÂLE (Suisse) (BAV)	BETTEMBOURG → Belgique (BTG)	Arrêt [S] à Mulhouse et Thionville BV	Alstom Prima 1800 t	
8	1	08_1-MSN-BAY	MONT-ST-MARTIN (MSN)	BÂLE (Suisse) (BAV)	Via Conflan, Hagondange, Hausbergen, Arrêt [S] à Mulhouse	Alstom Prima 1800 t	
8	2	08_2-BAY-MSN	BÂLE (Suisse) (BAV)	MONT-ST-MARTIN (MSN)	Via Conflan, Hagondange, Hausbergen, Arrêt [S] à Mulhouse	Alstom Prima 1800 t	
9	1	09_1-VPY-AP	VOIPPY (VPY)	APACH-MOSELLE → KOBLENZ (Allemagne) (AP)		Alstom Prima 1800 t	
9	2	09_2-AP-VPY	BLENZ (Allemagne) → APACH-MOSELLE (AP)	VOIPPY (VPY)		Alstom Prima 1800 t	
10	1	10_1-LHS-BAI	LE HAYRE (Suisse) (LHS)	BAISIEUX → TOURNAI (Belgique) (BAI)		Alstom Prima 1800 t	
10	2	10_2-BAI-LHS	TOURNAI (Belgique) → BAISIEUX (BAI)	LE HAYRE (Suisse) (LHS)		Alstom Prima 1800 t	
11	1	11_1-VPY-FB	VOIPPY (VPY)	FORBACH → MANNHEIM (Allemagne) (FB)	Via Thionville (1640 t) ou Metz-Sablon (1800 t)	Alstom Prima 1800 t	
11	2	11_2-FB-VPY	MANNHEIM (Allemagne) → FORBACH (FB)	VOIPPY (VPY)	Via Thionville (1640 t) ou Metz-Sablon (1800 t)	Alstom Prima 1800 t	
12	1	12_1-VON-MOD-Turin	VALENTON (VON)	MODANE → TURIN (Italie) (MOD)	Arrêt [S] 3 min à Penigny et S 30 min à Ambérieu et St-Avre-la-Chambre	7200PH VSG-AMB puis UN7200PH/1800 t (+ pousseuse de St-Av. à Mod)	
12	2	12_2-Turin-MOD-VON	TURIN (Italie) → MODANE (MOD)	VALENTON (VON)	Arrêt S 20 min à Ambérieu et arrêt [S] 3 Penigny		
13	1	13_1-SIB-MOD-Turin	LYON-SIBELIN (SIB)	MODANE → TURIN (Italie) (MOD)	Arrêt [S] 3 min à Ambérieu et 30 min à St-Avre-la-Chambre	2 u 7200 PH 1800 t (+ pousseuse de St-Av. à Mod)	
13	2	13_2-Turin-MOD-SIB	TURIN (Italie) → MODANE (MOD)	LYON-SIBELIN (SIB)	Arrêt [S] 3 min à Ambérieu		
14	1	14_1-AF BTG LBP	AF BETTEMBOURG (BTG)	LE BOULOU (LBP)	Arrêt [S] 3 mn à Chalon et Nîmes ; longueur 850 mètres	Alstom Prima 1800 t	
14	2	14_2-AF LBP BTG	AF LE BOULOU (LBP)	BETTEMBOURG (BTG)	Arrêt [S] 3 mn à Nîmes et Chalon, S à Voippy (30 min) ; longueur 850 mètres	Alstom Prima 1800 t	
15	1	15_1-AF AEB-MOD	AF AIGUEBELLE (AEB)	MODANE → ORBASSANO (Italie) (MOD)	Arrêt [2] 7mn à Modane BV	36000 + 36000 ou pousseuse, 500T	
15	2	15_2-AF MOD-AEB	AF ORBASSANO (Italie) → MODANE (MOD)	AIGUEBELLE (AEB)	Arrêt [2] 7mn à Modane BV		

FIGURE 1.7 – Catalogue de sillons fret - Service Annuel 2012.

Ces sillons préconstruits suivent un principe de **cadencement** qui consiste à ranger les familles de sillons de manière régulière. On peut également voir les sillons cadencés comme des clones d'un sillon de référence. Le but du cadencement est :

- d'harmoniser les horaires des sillons qui obéiront à une certaine règle plus facile à retenir par les voyageurs (des horaires qui se répètent),
- d'optimiser les correspondances,
- d'optimiser l'exploitation du réseau,
- d'augmenter, à terme, le trafic.

C'est vers cette offre de transport que cherche à tendre RFF en 2012 pour faciliter l'accès au réseau. Le Service Annuel (SA) 2012 a permis de cadencer 16 à 20% des trains. La figure 1.8 (resp. 1.9) représente la gestion de la capacité en gare sur un Graphique Espace Temps (GET) cadencé de la gare d'Annemasse en Haute-Savoie (resp. un GET de la gare de Paris Nord avec un trafic plus dense).

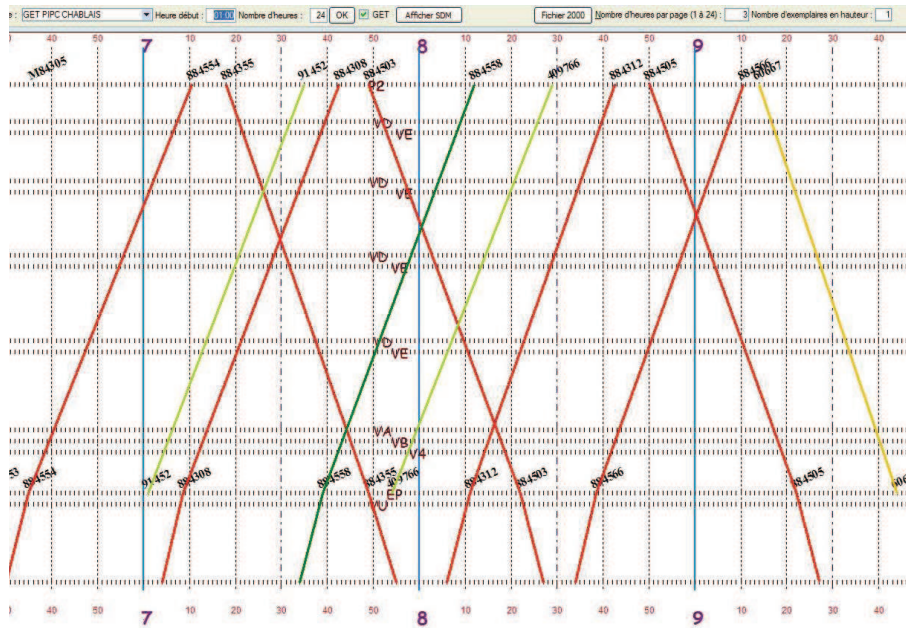


FIGURE 1.8 – GET cadencé (gare d'Annemasse en Haute-Savoie)

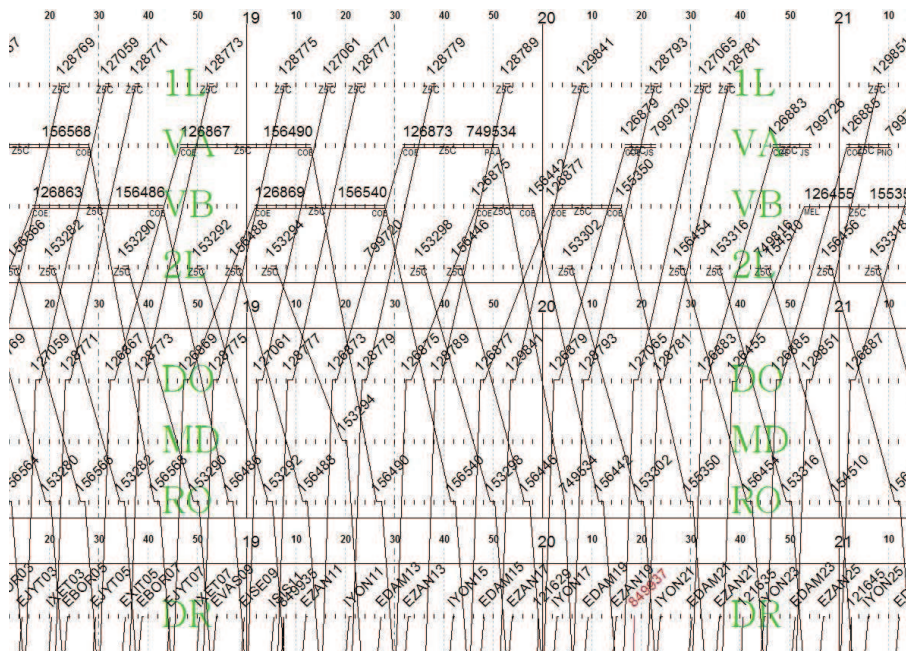


FIGURE 1.9 – GET Cadencé (gare de Paris Nord).

1.1.2 Les engins ferroviaires

La ressource engin ferroviaire est une ressource matérielle nécessaire pour tracter un train. Plusieurs séries d'engins ferroviaires sont prises en compte dans notre étude et sont caractérisées par des types d'engins qui diffèrent selon leurs caractéristiques techniques (capacité de traction, alimentation, etc.) et un dépôt où des rendez-vous de maintenance des engins peuvent être programmés. La planification optimisée de ces ressources présente des enjeux très importants à la SNCF et doit lui permettre d'être compétitive en produisant davantage de sillons à un niveau constant de ses ressources. Dans ce contexte, la SNCF s'inscrit dans une démarche forte de planification de la gestion de ses ressources afin :

- d’assurer efficacement une qualité de production des circulations ferroviaires,
- de satisfaire ses clients et usagers en respectant les engagements de régularité,
- de réduire les coûts d’exploitation qui sont très importants pour la SNCF ; chaque engin coûte plusieurs millions d’euros à l’achat,
- de rentabiliser les engins engagés pour la traction des trains.

1.1.3 Les Agents de Conduite (AdC)

La ressource Agent de Conduite (AdC) est indispensable pour le bon déroulement des opérations d’acheminement de marchandises et de voyageurs. Deux critères caractérisent le profil de qualification des agents ;

- la connaissance des lignes qui reflète les capacités de chaque agent à conduire un train sur une ligne donnée,
- la connaissance des types d’engins que l’agent est apte à conduire.

On peut séparer les AdC en deux groupes :

1. les agents réguliers, dont le travail est organisé en journées de service et planifié à l’avance en roulements de service,
2. les agents en réserve qui sont appelés pour conduire lorsqu’une charge supplémentaire ne pouvant être assurée par les agents réguliers se présente ou lors d’absences d’agents réguliers.

Les agents de conduite sont répartis par pôle d’activité suivant leur Unité de Conduite (UC) de rattachement.

1.2 Niveaux de décision dans la planification des ressources ferroviaires

La production ferroviaire repose sur un système complexe, dans lequel interagissent différentes ressources rares et hétérogènes. Cela conduit à un processus de décision très riche en terme de problèmes d’optimisation combinatoire. Ces problèmes constituent des opportunités pour des modèles mathématiques et des techniques de recherche opérationnelle qui vont aider à optimiser la planification et l’exécution des opérations du système ferroviaire. Cependant, la façon d’appréhender les différentes problématiques de gestion des ressources évoquées précédemment varie suivant le niveau de décision dans lequel la planification s’inscrit et dépend fortement de deux paramètres.

1. **Le niveau temporel dans lequel on se place** ; quel est l’horizon de planification considéré ?
Le niveau de décision dans lequel on se place est déterminé par l’horizon temporel de planification considéré qui permet de spécifier si la planification des ressources doit être établie de manière anticipée ou tardive. Cet aspect temporel joue un rôle très important dans la prise de décision ; il est lié au temps disponible entre le début de la planification prévisionnelle des ressources et leur date de mise en service définissant ainsi un délai minimal nécessaire à l’organisation des opérations de production des circulations ferroviaires.
2. **Le niveau de service attendu par les clients/usagers** ; selon le niveau de décision dans lequel on se place, les objectifs diffèrent et les contraintes à intégrer évoluent en fonction du niveau de service souhaité. Ainsi, la prise en compte d’un niveau de détail plus important dans la gestion des ressources conduit à augmenter la combinatoire du problème et à le rendre plus complexe à résoudre. Ce qui nous incite en pratique à développer des modèles et des techniques d’optimisation combinatoire plus performants en vue d’apporter des solutions pertinentes au problème de décision, et qui répondent de manière efficace à une demande évoluant dans un

environnement dynamique où les délais impartis dans la prise de décision sont parfois très courts.

La SNCF s'inscrit dans une démarche forte de planification de la gestion de ses ressources humaines et matérielles pour assurer efficacement une qualité de production satisfaisante. Cette démarche porte ainsi sur différents niveaux temporels de décision qui sont complémentaires.

1.2.1 Niveau stratégique

Les décisions à ce niveau concernent les enjeux stratégiques et sont prises sur un horizon temporel habituellement long pouvant s'étendre sur plusieurs années, et impliquent des investissements de capitaux considérables, comme c'est le cas par exemple pour :

- les décisions concernant les projets de choix d'investissement (infrastructure, ressources, etc.),
- la modification de la topologie du réseau [Chandesris, Gauyacq, Jalard and Lerin 2006], [Kuby, Xu, and Xie 2001], [Crainic, Florian, and Leal 1990],
- la conception et l'amélioration du réseau,
- l'emplacement des équipements des gares et des triages,
- le projet de cadencement,
- les décisions de cheminement prises à un niveau agrégé,
- l'étude de capacité du réseau [Labouisse, Djellab 2001].

Si l'on considère plus spécifiquement la gestion des ressources matérielles (engins ferroviaires) et des ressources humaines (agents de conduite) à un niveau stratégique, les décisions concernent principalement l'acquisition et la gestion du matériel roulant :

- l'étude du cycle de vie d'un matériel roulant,
- le choix de la série de matériel roulant à exploiter,
- l'acquisition de nouvelles ressources,
- la location du matériel roulant,
- l'amélioration de l'utilisation du matériel roulant,
- le cycle de vie des engins ferroviaires,
- la destruction du matériel roulant à la fin de son cycle de vie,
- la politique de maintenance à appliquer : une stratégie de maintenance plus intensive exige plus de matériel roulant qu'une stratégie moins intensive. En contrepartie, elle mènera à un matériel roulant plus fiable et par suite à moins de perturbations et à plus de ponctualité dans les opérations,
- le dimensionnement du parc de ressources locomotives [Marcos 2006],
- la répartition des agents de conduite par pôle d'activité [Benhizia, Djellab, Paschos 2008].

1.2.2 Niveau tactique

Les décisions prises à ce niveau concernent plus particulièrement l'attribution rationnelle et efficace des ressources ferroviaires (sillons, engins et agents de conduite) sur un horizon temporel de planification à moyen terme (1 mois à 1 an). Ces décisions visent habituellement à améliorer la performance des opérations de production des circulations ferroviaires sur tout le réseau afin d'être en mesure de proposer aux clients/usagers le niveau de service attendu et ne considèrent pas les perturbations journalières et les acquisitions majeures. Entre autres, le niveau tactique concerne les problèmes suivants :

- la conception des roulements de personnel,
- la conception des roulements du matériel roulant [Fioole, Kroon, Maróti, and Schrijver 2006] [Marcos 2006],
- la conception des roulements pour les agents sédentaires [Ramond, De Almeida, Dauzère-Pérès, and Serali 2004],

- la construction d’une grille horaire.

La charge de travail que doit assurer chaque ressource doit être planifiée longtemps à l’avance (plusieurs semaines), et donner lieu à un plan de transport qui définit un planning journalier d’affectation des différentes ressources à un niveau plus ou moins détaillé et fournit aux usagers/clients le service de transport attendu. A ce niveau de décision, la gestion des engins ferroviaires et des agents de conduite n’est pas nominative. En effet, elle se base uniquement sur la réservation dans le temps des ressources disponibles qui doit permettre :

- d’améliorer l’efficacité de l’utilisation des ressources disponibles,
- de garantir l’adéquation du niveau de ressources disponibles à la charge à traiter (dont le volume est induit par l’offre de transport),
- d’apporter des gains de productivité en anticipant, par exemple, les opérations de maintenance du matériel roulant et les repositionnements à vide des véhicules.

1.2.3 Niveau opérationnel

Contrairement aux autres niveaux de décision, le temps imparti dans la prise de décision à un niveau opérationnel est très réduit ; entre quelques secondes et plusieurs minutes. Ces problèmes de décision peuvent intervenir aléatoirement, au jour le jour, et exigent une réponse en temps réel dans un environnement qui est très dynamique, et où la prise en compte d’un niveau de détail important joue un rôle prépondérant. C’est pourquoi, lors de la résolution, on doit être capable de concevoir des modèles et des méthodes de résolution avec un souci constant de performance au niveau calculatoire. Ce sont ces temps de réaction qui vont permettre de déterminer la capacité opérationnelle d’un système à faire face (réagir) aux aléas et ainsi renforcer sa robustesse. Ce niveau concerne les problèmes suivants :

- modélisation et optimisation de la gestion opérationnelle du trafic en cas d’aléas [Gély, Dessagne, Pesneau, Vanderbeck, 2009],
- conception d’horaires de trains pour replanifier des circulations ou insérer très tardivement de nouvelles circulations,
- replanification des horaires des ressources matérielles et humaines,
- gestion des activités de maintenance.

Une gestion efficace des ressources de la production des circulations ferroviaires à un niveau opérationnel permet un meilleur suivi journalier de la production en cours et une gestion plus efficace des incidents.

Nous avons exposé dans cette section les différents niveaux de décisions associés à la planification des ressources de la production de circulations ferroviaires. Dans une démarche de planification intégrée, plusieurs manières d’appréhender la problématique peuvent être envisagées en fonction du niveau de décision dans lequel on se place (cf. chapitre 2). Il apparaît donc très important de bien cibler la stratégie de planification que l’on souhaite mettre en place et de bien définir le niveau de détail que l’on souhaite atteindre dans un modèle de planification intégrée des ressources ferroviaires. Les enjeux économiques de la planification demeurent primordiaux que ce soit à un niveau stratégique, tactique ou opérationnel. En effet, la principale préoccupation de la SNCF est d’optimiser le taux d’utilisation de ses ressources de façon à satisfaire les demandes de ses usagers/clients qui sont exprimées sous forme de services de transport, tout en respectant les contraintes commerciales et techniques à chaque niveau de décision.

1.3 Procédure d'attribution des sillons

1.3.1 Demande de sillons

Avant la dernière ré-organisation majeure des chemins de fer en France, qui est intervenue en 1997 et a marqué la séparation entre le gestionnaire de l'infrastructure et les entreprises de transport ferroviaire, les demandes de sillons étaient directement adressées aux horairistes des Bureaux Horaires (BH) de la SNCF pour préparer le plan de transport. Les demandes incompatibles étaient traitées dans des réunions entre les parties concernées. Depuis la restructuration des chemins de fer en France, RFF est devenu le propriétaire du réseau ferré national. Dans le cadre de sa mission d'Organisme de Répartition de la Capacité (ORC), est chargé d'assurer :

- la définition et l'évaluation des capacités disponibles,
- l'attribution des sillons aux entreprises ferroviaires (EF),
- la détermination des graphiques de circulations,
- l'arrêt des horaires du service pour une période d'une année (service annuel).

RFF doit donc réaliser des études de faisabilité destinées à la connaissance et à l'amélioration de la capacité du réseau ferré national en se basant sur les études précédentes réalisées au niveau des Entreprises Ferroviaires (EF). Ces études et les demandes de sillons effectuées par les entreprises ferroviaires permettent de réaliser l'attribution de la capacité en résolvant les conflits potentiels entre demandeurs.

Les premières études qui permettent la conception du plan de transport sont réalisées au niveau des EF. Les différentes activités de la SNCF expriment au service sillon (SL) leurs besoins en terme de sillons afin de satisfaire les demandes de leurs clients. SL a été créé au sein de la Direction des Opérations Industrielles (DOI) de la SNCF et constitue l'interface unique de la SNCF vis-à-vis de RFF pour les questions concernant la répartition des capacités. Son rôle est de ;

- centraliser l'ensemble des demandes de sillons,
- vérifier la cohérence des demandes,
- réaliser un arbitrage entre les demandes avant leur transmission à RFF. Le cas échéant, les harmonisations entre demandes incompatibles sont résolues par le comité horaire des arbitrages (CHA).

Ces premières études assurent une mise en forme préalable d'optimisation et d'expression des besoins de sillons et assurent une transparence entre les activités. Parallèlement, les besoins en matériel (type et nombre de rames TGV, nombre de voitures, séries d'engins, etc.) et en personnel (agents de conduite, etc.) doivent être fixés. Les études amont sont faites au moins un an et demi à l'avance et sont transmises au service sillon. Cette démarche périodique suit un calendrier très strict imposé par RFF et tient compte des directives européennes. Après réception des études amont réalisées par les activités, RFF déclenche d'autres études de prévision de trafic dites "études de faisabilité" qui tiennent compte des programmes de grands travaux afin qu'il n'y ait pas de risque d'incompatibilité entre les besoins de refonte de desserte des Entreprises Ferroviaires (EF) et les dernières évolutions du graphique que seul RFF connaît (dernières décisions concernant des travaux, etc.). Il s'agit seulement d'une vérification technique et non d'un engagement d'attribution des sillons. Le retour de RFF est connu à J-270, date limite de remise des demandes de sillons à RFF pour une mise en service en décembre de l'année suivante (J étant la date à laquelle le service annuel démarre).

1.3.2 Attribution des sillons

A la suite de la conclusion des études de faisabilité, RFF ouvre la période de demande de sillons. En théorie, chaque service d'attribution des sillons devrait démarrer avec une grille vide mais, en pratique, le manque d'outils et de temps font que les sillons sont largement reconduits d'une année sur l'autre. Dans le cas de demandes incompatibles, RFF a l'obligation de recontacter les Entreprises Ferroviaires (EF) concernées et de résoudre les incompatibilités de la façon la moins pénalisante. Après arbitrage

entre les demandes, RFF envoie aux EF le plan de transport provisoire issu de son arbitrage. Celles-ci auront un mois pour l'analyser et dix jours pour lui présenter des réclamations au cas où elles détecteraient des situations injustes. Après la limite de l'échéance, RFF a l'obligation d'étudier et de répondre à toutes les réclamations faites avant la publication du plan de transport définitif pour le service prévu à J-140. Les demandes de sillons supplémentaires seront exclues de ce processus d'itération entre RFF et les Entreprises Ferroviaires, et seront soumises à une politique FIFO (premier arrivé premier servi). Ces demandes de sillons supplémentaires seront analysées par rapport aux contraintes de sécurité vis-à-vis du plan définitif de transport publié par RFF et qui ne peut être modifié. Si les sillons demandés ne créent pas de conflits, ils seront accordés. En revanche, dans le cas contraire, la demande se verra refusée. Toutefois, dans certains cas, la demande peut être accordée en modifiant les horaires de certains sillons et en prévenant ultérieurement l'activité concernée. La figure 1.10 reprend les différentes phases du processus d'attribution des sillons par RFF dans l'organisation actuelle du système ferroviaire français.

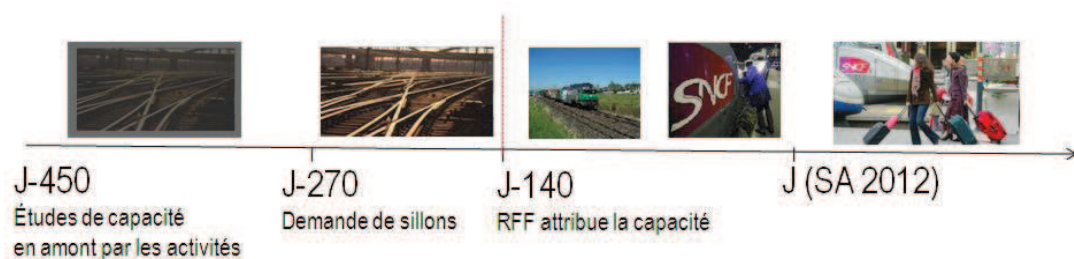


FIGURE 1.10 – Processus d'attribution des sillons.

1.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes ressources hétérogènes nécessaires à la production des circulations ferroviaires pour la conception du plan de transport. Ces ressources critiques sont planifiées de manière essentiellement séquentielle, et quelques fois optimisée dans l'organisation actuelle du système ferroviaire français. L'optimisation de la planification intégrée des ressources ferroviaires peut être réalisée à différents niveaux de décision ; soit à un niveau tactique pour mieux orienter les futures demandes de sillons et anticiper la planification optimisée des ressources engins et AdC, soit à un niveau pré-opérationnel (resp. opérationnel) pour la gestion des sillons de dernière minute et la planification à moyen terme des ressources engins et AdC (resp. gestion des aléas de production en temps réel). D'un point de vue pratique, la gestion intégrée des ressources est complexe et ce constat est valide aussi bien à des niveaux anticipés (stratégique et tactique) que pour la gestion opérationnelle de la production où le niveau de détail exigé est encore plus important (description plus fine de l'infrastructure et des circulations ferroviaires). Il apparaît donc très important de bien déterminer avec les experts métiers (ou commanditaires de l'étude) le niveau de détail souhaité dans la planification des ressources afin de définir la complexité d'une modélisation exploitable à des fins pratiques. Nous exposons en chapitre 2 les différents axes de recherche envisagés pour traiter la problématique de planification intégrée des ressources ferroviaires à différents niveaux de décision.

Chapitre 2

Analyse du problème industriel et scientifique

Sommaire

2.1	Processus actuel d'optimisation du plan de transport	26
2.1.1	Conception d'une grille horaire	26
2.1.2	Planification des engins ferroviaires	27
2.1.3	Planification des Agents de Conduite (AdC)	28
2.2	Motivation et raisons de la thèse	31
2.2.1	Forte interaction entre les ressources ferroviaires	31
2.2.2	Limites du processus actuel	32
2.2.3	Gains potentiels observés dans d'autres secteurs de transport avec une approche intégrée	35
2.3	Etat de l'art	37
2.3.1	Planification séquentielle en transport ferroviaire	37
2.3.2	Planification intégrée en transport	40
2.4	Alternatives de planification intégrée des ressources	47
2.4.1	Grille horaire vide	48
2.4.2	Grille horaire fixée	48
2.4.3	Grille horaire préexistante modifiable	48
2.4.4	Catalogue de sillons	48
2.5	Démarche de planification intégrée des ressources	50
2.6	Conclusion	50

Ce chapitre pose le problème industriel étudié d'optimisation du plan de transport par planification intégrée des ressources critiques de la production ferroviaire. Nous consacrons la première partie à la présentation du processus actuel de planification des ressources matérielles et humaines (sillons, engins, AdC) lors de la construction du plan de transport. Les motivations qui nous ont conduit à proposer une nouvelle démarche pour appréhender le problème posé sont présentées à la section 2.2. La section 2.3 fait état de nos recherches bibliographiques sur les problèmes de planification intégrée des ressources rencontrés dans différents secteurs de transport ; nous présentons les approches de modélisation prenant en compte l'aspect intégré de la planification des ressources. L'objectif de cette étude bibliographique est de mettre en évidence les problèmes de planification des ressources de transport émergeant de différents domaines étudiés, et d'exposer les diverses techniques de modélisation et les approches de résolution exploitées pour en tirer des conclusions sur les meilleures pistes de recherche vis-à-vis des objectifs fixés dans la thèse. La section 2.4 est consacrée à la présentation des différents axes de recherche qui ont été proposés pour aborder la nouvelle approche de planification intégrée des ressources ferroviaires. Parmi les pistes étudiées, celle qui présente un fort intérêt scientifique et qui prend en compte le contexte industriel dans lequel évolue le système actuel de la production ferroviaire est privilégiée pour la suite de notre démarche (section 2.5).

2.1 Processus actuel d'optimisation du plan de transport

La SNCF, en tant qu'Entreprise Ferroviaire (EF), est organisée en activités qui visent à offrir les services de transport les plus adaptés aux divers besoins exprimés par ses clients (voyageurs, chargeurs, autorités organisatrices...). Ces services se traduisent par une demande de sillons propre à chacune de ces activités, assemblée par le service Sillons de SNCF qui est en charge des interactions avec le gestionnaire de l'infrastructure (RFF). La production des circulations ferroviaires requiert l'exploitation de plusieurs ressources rares et hétérogènes, en particulier :

1. les sillons,
2. les engins ferroviaires,
3. les agents de conduite (AdC).

Côté EF, la conception du plan de transport passe aussi par différentes étapes de planification des ressources matérielles et humaines de la production ferroviaire, qui interviennent à des périodes bien définies dans l'organisation actuelle de l'entreprise.

2.1.1 Conception d'une grille horaire

La prise en compte de l'offre commerciale se traduit par l'élaboration d'une grille horaire où toutes les circulations possibles des trains sont représentées par leurs sillons, ce qui permet de définir la réservation dans le temps et l'espace de l'infrastructure ferroviaire. Le sillon est alors décrit par un itinéraire, un horaire et les caractéristiques du convoi (caractéristiques des lignes, série de référence utilisée pour le tracé, etc.). La construction d'une grille horaire se base sur une représentation abstraite du réseau et du fonctionnement du système ferroviaire. Cette représentation doit tenir compte de l'ensemble des contraintes métiers du système ferroviaire et de la formulation de l'objectif poursuivi par la régulation. La figure 2.1 représente une grille horaire du réseau ferroviaire Belge Infrabel.

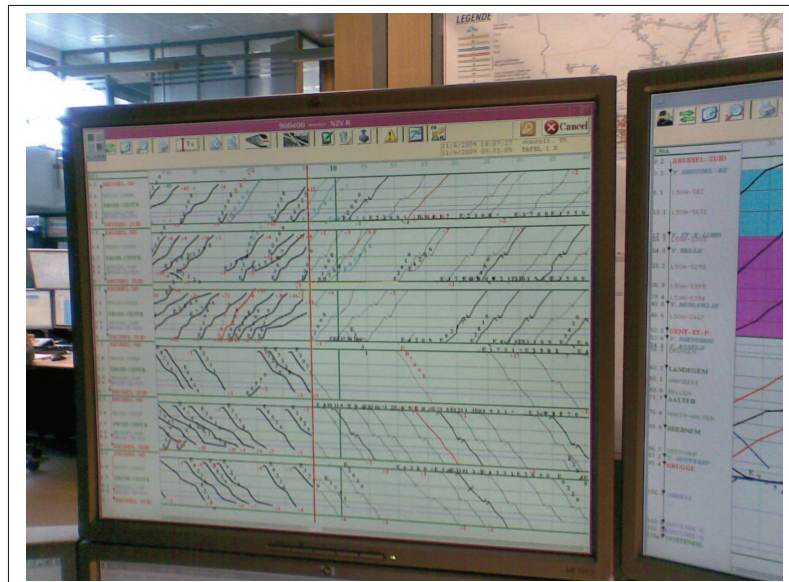


FIGURE 2.1 – Grille horaire (réseau Infrabel)

Il existe à la SNCF plusieurs outils permettant de concevoir des horaires (THOR, CHAO, etc.) et d'étudier la capacité du réseau ferroviaire. L'outil DEMIURGE [6] permet d'optimiser une grille horaire en s'appuyant sur une description de l'infrastructure par un modèle mathématique conforme à la théorie des graphes. Les règles et contraintes d'exploitation ferroviaire sont portées par les éléments

constitutifs du graphe, c'est-à-dire les arcs et les nœuds. A titre d'exemple, un arc porte les informations "intervalle minimal de succession en ligne" entre deux trains et ce pour différentes catégories de trains ; même chose pour les temps d'arrêts en gare. Cette modélisation unifiée autorise différents niveaux d'abstraction dans la description du réseau. En fonction des besoins, l'expert décrit plus ou moins précisément les installations et les trains qui vont transiter sur ce graphe. Les horaires peuvent être respectés strictement ou être assortis de marges pour pouvoir être plus facilement insérés dans des tracés déjà fixés. L'algorithme d'optimisation exploite toutes les possibilités pour choisir le parcours et les horaires de trains qui maximisent une fonction "objectif" mesurant le nombre de circulations qui peuvent être programmées moins des pénalités induites par les écarts entre un tracé souhaité (et donné) pour chaque train (horaires de passage aux nœuds) et celui qui pourrait être choisi et permettrait d'accéder à un optimum global pour les critères fixés.

DEMIURGE est un outil d'étude qui peut être exploité pour certaines études amont ; les grilles exploitées en planification et gestion opérationnelle sont conçues avec les outils THOR et CHAO. Ces deux outils sont exploités par des horairistes de la Direction des Circulations Ferroviaires (DCF) (et, dans une moindre mesure, certains experts de la SNCF). Ils intègrent des fonctions de calcul de marches et de contrôle de certaines contraintes métiers (détection de conflits notamment). Ils ne disposent pas de modèles d'optimisation pour apporter une aide à la décision lors de la construction des grilles. L'optimisation des grilles repose sur la compétence des horairistes.

2.1.2 Planification des engins ferroviaires

Une fois la grille horaire construite à partir des demandes commerciales, la charge de travail associée à la production d'un sillon est alors définie par décomposition de chaque sillon en étapes sillons selon les caractéristiques de l'infrastructure. La planification des engins consiste à engager les ressources matérielles de traction de manière à couvrir la charge de travail (les étapes sillons) induite par la production des sillons. Des successions d'étapes sillons à assurer sont ainsi construites pour chaque série d'engins de manière à bâtir des lignes de roulements d'engins en respectant l'ensemble des contraintes commerciales et techniques qui leur sont appliquées. Ces lignes de roulements représentent les itinéraires suivis par les séries d'engins sur une journée type. Il est ainsi envisageable d'engager plusieurs séries d'engins en unités multiples sur une même étape sillon. Cette composition d'engins correspond à une association d'engins de séries homogènes ou hétérogènes permettant de tracter un train et est utilisée lorsque, par exemple, la capacité d'emport en voyageurs d'une seule série d'engins ne suffit pas pour transporter tous les voyageurs prévus. Toutefois, à ce niveau, seuls les volumes de ressources (et non des ressources nominatives) sont gérés.

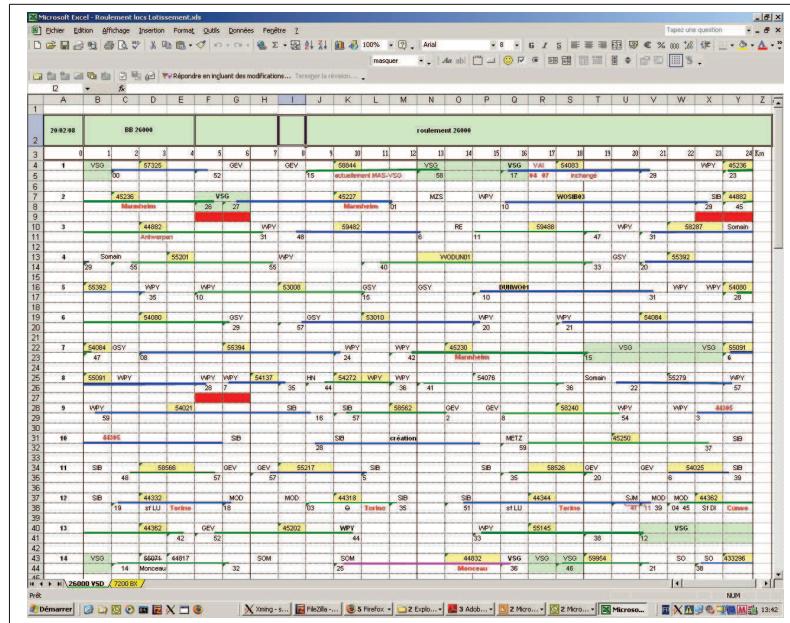


FIGURE 2.2 – Roulement de séries d’engins (Fret SNCF)

Les lignes de roulements sont ensuite combinées pour concevoir un roulement par série d’engins représentant ainsi le planning des itinéraires suivis pour les engins d’une série sur une période de temps donnée. La figure 2.2 représente le roulement d’une série d’engins BB26000 (Fret SNCF) sur 14 jours, réalisé de manière non automatique par des experts métiers. Un outil de planification optimisée des engins ferroviaires a été développé au sein de la SNCF, baptisé PRESTO (Planification des RESsources du Transport Optimisé). Il permet de calculer de manière optimale les itinéraires des engins qui minimisent essentiellement des coûts de production, tout en respectant les contraintes structurantes sur les circulations des engins ainsi que les contraintes techniques et fonctionnelles liées à l’exploitation des engins. Le modèle mathématique exploité par PRESTO repose sur une représentation des données et des paramètres du problème étudié par un graphe spatio-temporel, intégrant les contraintes structurantes sur les circulations des ressources. L’avantage de la représentation actuelle de PRESTO est qu’il s’appuie sur une approche de modélisation générique qui permet de construire un graphe adaptable à tout type de problématique. Ce graphe spatio-temporel est ensuite exploité pour formuler un Programme Linéaire en Nombres Entiers, qui exprime la recherche d’un multi-flot entier optimisé vis-à-vis de l’arbitrage entre les gains induits par la production des sillons composant la charge de travail et les coûts d’exploitation des ressources. Dans ce programme linéaire sont intégrées les contraintes de structuration et de couverture de la charge de travail, de validité des circulations des ressources et de respect des règles techniques et fonctionnelles liées à l’utilisation des ressources. Le chapitre 3 présente et détaille plus précisément ces deux éléments de modélisation, graphe et Programme Linéaire, qui constituent le socle du modèle PRESTO.

2.1.3 Planification des Agents de Conduite (AdC)

Les lignes de roulements d'engins ferroviaires construites à l'étape précédente sont ensuite exploitées pour concevoir des grilles de service AdC¹. Chaque étape sillon, si elle présente un arrêt suffisant dans le sillon sous-jacent, peut être découpée en plusieurs étapes AdC insécables dont la durée n'excède pas la durée maximale autorisée par la réglementation du travail (pour qu'un AdC puisse assurer l'étape de bout en bout sans programmer de relèves). En transport de marchandises par exemple, il s'agit d'une étape indispensable puisque la plupart des trajets sont très longs et qu'ils ne peuvent être assurés de bout en bout par les mêmes AdC ; les relèves AdC lors d'arrêts dans des gares intermédiaires du parcours sont donc une nécessité. Cette décomposition vise donc à structurer la production des trains

1. Planning des tâches des AdC sur plusieurs semaines, par roulement.

et à déterminer clairement la charge de travail requise vis-à-vis des AdC à engager dans cette production. Une étape AdC est caractérisée par une heure de début et une heure de fin, une localisation de début et de fin, une durée et une période de travail dans laquelle l'AdC effectue sa mission (nuit ou jour).

Une fois le découpage des lignes de roulement en étapes AdC effectué, le problème consiste à planifier les AdC nécessaires pour couvrir la charge de travail induite par la planification des engins ferroviaires. Au delà des contraintes de connaissances des lignes ferroviaires importées par les sillons, la planification des AdC est également contrainte par la connaissance technique des engins (un AdC n'est pas apte à conduire n'importe quelle série d'engins) qui est héritée de la planification des engins. La planification des AdC vise à concevoir un ensemble de Journées de Services (JS)² pour chaque roulement AdC, en optimisant le nombre des journées de services construites et en respectant les contraintes de réglementation de travail appliquées aux AdC.

Un outil de planification optimisée des roulements de service AdC a été développé à la SNCF, baptisé CARACO (Calcul Automatisé des Roulements d'Agents de CONduite). Il permet de calculer de manière optimale les itinéraires suivis par les AdC qui minimisent les coûts de couverture de la charge de travail résultante de la production des sillons. Le modèle mathématique exploité par CARACO s'appuie sur une approche traditionnelle de la littérature qui décompose le problème en trois étapes résumées ci-dessous.

1. Génération des Journées de Service (JS) : consiste à construire des journées de travail AdC qui minimisent le nombre d'AdC exploités pour couvrir la charge de travail, en respectant les contraintes de réglementation de travail appliquées aux AdC sur une journée de travail. On est confronté à un problème de *set covering* [7]. La figure 2.3 expose le diagramme de GANTT des Journées de Service (JS) AdC pour une journée type.
2. Construction des tournées : cette phase de planification consiste à rassembler les JS en tournées de coût minimal respectant les contraintes légales (repos, découchés hors résidence de rattachement, etc). Une tournée contient une ou deux JS ; elle commence et se termine à la même résidence de rattachement des AdC. On est confronté à un problème de *set pairing* ([1], [2]).
3. Génération des Grandes Périodes de Travail (GPT) et de la grille de service AdC : les tournées construites précédemment sont enchaînées dans des roulements de service AdC exploitant le minimum d'ADC sur plusieurs jours consécutifs (GPT) séparés par des jours de repos, puis sur plusieurs semaines. Ceci définit des affectations pour chaque ADC qui garantissent la réalisation de toutes les tâches. On est confronté à un problème de *crew rostering* [3].

2. La JS représente la journée de travail d'un AdC et est composée d'étapes AdC qui peuvent s'enchaîner dans l'espace et le temps, en alternance (ou non) avec des coupures ou des opérations techniques localisées sur un même site.



FIGURE 2.3 – Grille de service AdC

Le processus actuel d'optimisation du plan de transport s'appuie donc sur une planification chronologique des ressources critiques de la production ferroviaire. La figure 2.4 illustre les étapes de planification de ces ressources ferroviaires lors de l'élaboration du plan de transport.

Chaque activité de l'EF établit ainsi les roulements de ses propres ressources, pour produire au meilleur coût l'offre de transport proposée pour répondre aux besoins exprimés par ses clients. Ces roulements de référence sont réalisés une fois l'attribution définitive des sillons connue par les activités (entre 3 et 5 mois avant la mise en service) ; il est vrai aussi que des projets de grilles horaires réalisés dans des études amont peuvent permettre d'anticiper la construction des roulements des ressources de l'EF.

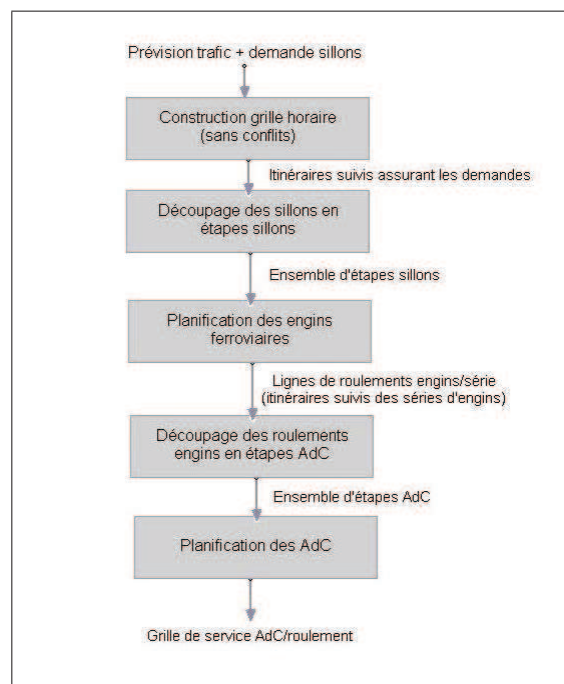


FIGURE 2.4 – Processus actuel de planification des ressources ferroviaires

2.2 Motivation et raisons de la thèse

Nous exposons dans cette section les raisons qui nous ont conduits à proposer une nouvelle démarche pour appréhender la problématique de planification optimisée des ressources contributives au plan de transport.

2.2.1 Forte interaction entre les ressources ferroviaires

La figure 2.5 expose la dépendance qui existe entre les trois processus de planification des ressources critiques de la production ferroviaire décrits dans la section 2.2. La détermination d'un plan de transport optimisé nécessite une exploitation coordonnée et chronologique de ces trois ressources. Ainsi la production d'un train requiert ;

1. la réservation de l'infrastructure ferroviaire,
2. la détermination d'un plan de roulements engins,
3. la détermination d'un plan de roulements AdC.

Pour répondre à la demande d'offre de transport formulée par les différentes entités de la SNCF, l'affectation optimisée de ces trois ressources rares et hétérogènes doit être organisée de manière simultanée ou espacée dans le temps, en respectant l'ensemble des contraintes techniques, commerciales et légales auxquelles elles sont assujetties pour couvrir la charge de travail induite par la production des sillons.

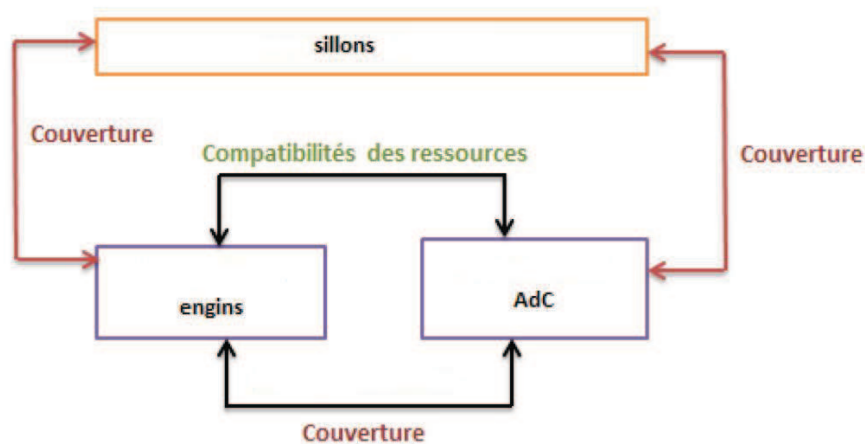


FIGURE 2.5 – Interaction existante entre les trois processus de planification.

Une fois les horaires des sillons connus, l'affectation des ressources engins et AdC est faite de manière cohérente, en respectant la compatibilité entre l'engin et l'AdC affecté au sillon. Ainsi, la production d'un train ne peut être réalisée que si le sillon associé est couvert par les ressources, et la réservation de ces trois ressources est donc nécessaire pour la production d'un train. Ce dernier ne peut être produit si l'une de ces ressources n'a pas été réservée. L'affectation des ressources engins et AdC doit se faire de manière cohérente, en respectant la compatibilité entre l'engin et l'AdC affecté au train. Ainsi, un AdC n'ayant pas les compétences requises pour conduire une série d'engins ne peut être affecté à cette série. De même qu'un engin ne respectant pas les caractéristiques techniques d'une ligne ferroviaire ne peut assurer la production du train affecté à cette ligne.

Face à ce constat, et en raison de la forte interaction qui existe entre ces différentes ressources dans le processus de production, il n'est pas surprenant d'observer à un niveau industriel la mise en place

d'une démarche forte de planification pour coordonner l'utilisation de ces ressources.

La décomposition des sillons en étapes sillons et AdC est rarement identique. Les raisons de cette dissymétrie sont réglementaires et techniques. En effet, la charge de travail qui peut être allouée aux AdC et aux engins n'est pas réglementée de la même manière : le travail des AdC est régi par la réglementation du travail de la SNCF qui stipule, par exemple, qu'un agent de conduite ne peut travailler plus d'un certain nombre d'heures par jour. Or, il n'existe pas de restriction similaire sur le nombre d'heures de circulation effectuées par les engins. Néanmoins, le roulement de locomotives est lui aussi régi par des contraintes techniques, tel que l'entretien des engins (au bout d'un certain temps de circulation ou à chaque fois que les engins ont parcouru un nombre fixé de kilomètres, ils doivent être inspectés, contrôlés et réparés). Ces entretiens se font lors de rendez-vous de maintenance dans des gares précises, appelées centres de maintenance. Cependant, la durée des opérations techniques nécessaires au changements de l'engin sur un train est sans commune mesure avec le temps pris par la relève de l'AdC. Ainsi, il est très fréquent (étant donné le nombre important de relèves possibles d'AdC) que les étapes AdC soient plus nombreuses que les étapes sillons lors du découpage des étapes traction. Ce découpage est réalisé de telle manière à ce que la durée d'une étape sillon ou d'une étape AdC n'excède pas la durée autorisée par la réglementation de la SNCF appliquée aux engins et aux AdC.

Plusieurs cas de figure sont alors possibles pour la décomposition d'un sillon en étapes sillons et en étapes AdC :

- découpage identique des sillons en étapes sillons et en étapes AdC ; on retrouve ce cas lorsque les trajets effectués par les AdC ne sont pas suffisamment longs pour que les étapes sillons soient découpées en plusieurs étapes AdC ; par exemple pour les trains de banlieue où la durée nécessaire pour acheminer les voyageurs d'un point d'origine à un point de destination ne dépasse pas la durée maximale de conduite autorisée.
- découpage des sillons en plusieurs étapes sillons et étapes AdC ; on retrouve ce cas de figure dans l'activité Fret, lorsque les trajets sont trop longs pour être assurés de bout en bout par les mêmes engins et AdC. Des changements d'engins sont programmés et des relèves AdC sont prévues durant le parcours.

2.2.2 Limites du processus actuel

Le processus actuel de production des circulations ferroviaires s'appuie sur des outils qui implantent une décomposition de la planification globale suivant un processus séquentiel dans lequel la planification d'une ressource conditionne largement la planification d'une autre. Nous présentons dans ce qui suit, à travers quelques exemples simples, les limites du système actuel de production des circulations ferroviaires.

Planification séquentielle des ressources sillons et engins

Considérons les trois sillons exposés dans la figure 2.6 :

1. le sillon A démarre de Paris à 9h et arrive à Marseille à 12h,
2. le sillon B démarre de Marseille à 11h55 et arrive à 13h59 à Nice,
3. le sillon C démarre de Paris à 12h20 et arrive à 14h23 à Lyon.

On constate que ces trois sillons se chevauchent dans le temps et qu'il n'est alors pas possible à une seule ressource engin d'assurer la couverture de ces trois sillons consécutivement. Il est donc nécessaire d'avoir au moins trois engins pour couvrir les sillons A, B et C.

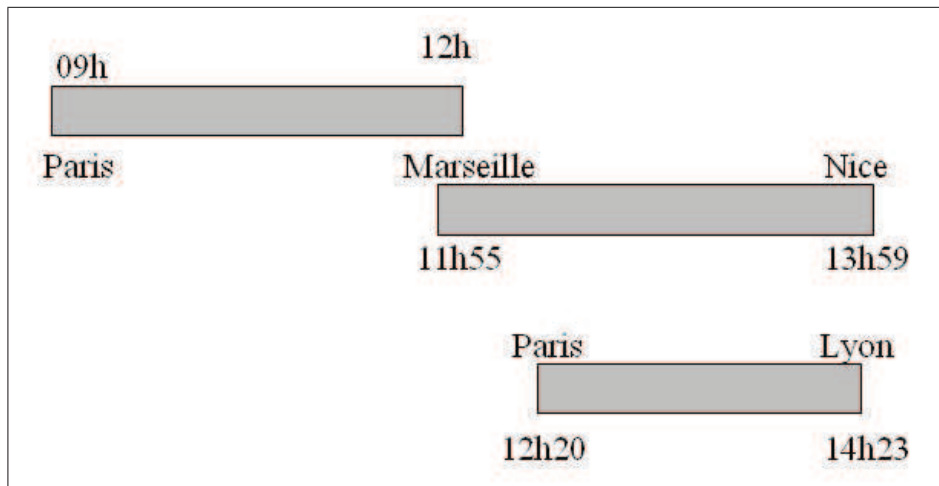


FIGURE 2.6 – Exemple 1. Limites du processus actuel de planification séquentielle des sillons et engins

Planification intégrée des ressources sillons/engins

En planifiant les ressources sillons et engins de manière simultanée, il pourrait être envisageable de remettre en cause les horaires des sillons de manière à optimiser le taux d'utilisation des engins. A cet effet, nous proposons de modifier légèrement les horaires du sillon B, en retardant son heure de départ de 10 minutes. Avec ce décalage, l'engin affecté au sillon A de 09h à 12h peut ensuite assurer le sillon B en démarrant à 12h05 de Marseille et en arrivant à 14h05 à Nice (pour être plus réaliste, il faudrait prévoir une durée de réutilisation de l'engin supérieure à 5 minutes, soit en retardant davantage le sillon B, soit en avançant le sillon A). Deux ressources engins sont alors nécessaires pour la couverture de ces trois sillons au lieu de trois initialement. En replanifiant les horaires des sillons, nous avons modifié l'affectation des engins ferroviaires en recalculant de manière optimale leurs itinéraires, ce qui nous a permis de réduire de un le nombre de ressources exploitées dans cette production. Toutefois, il n'est pas toujours simple de modifier les horaires des sillons déjà construits. En effet, la SNCF n'est pas propriétaire de l'infrastructure, et il peut être difficile de remettre en cause les horaires des sillons quand la grille horaire pour le Service Annuel (SA) est établie. Cependant, ces modifications peuvent intervenir à un niveau stratégique de décisions, lors des études réalisées pour le prochain SA dans le but d'anticiper la demande des sillons à RFF, et ainsi garantir une planification optimale de l'ensemble des ressources critiques de la production ferroviaire. La figure 2.7 illustre l'apport potentiel d'une approche par planification intégrée des ressources sillons/engins par rapport à une approche séquentielle.

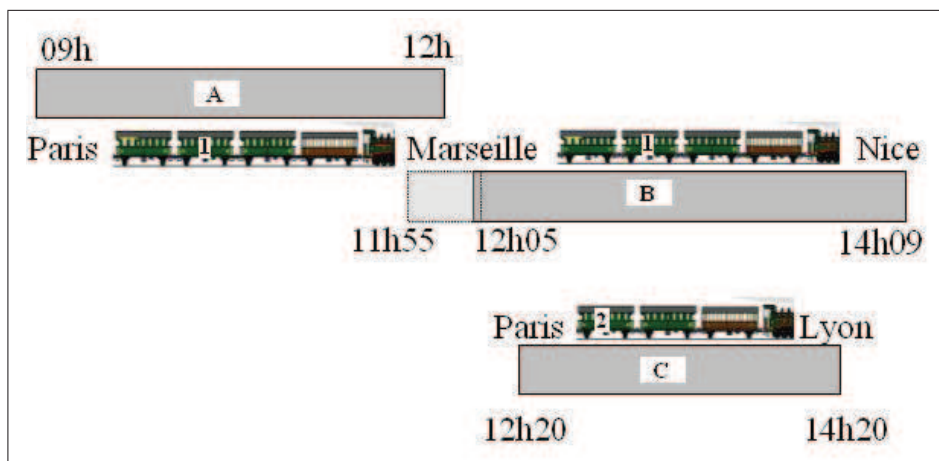


FIGURE 2.7 – Exemple 1. Apport d'une approche par planification intégrée des ressources sillons/engins

Planification séquentielle des ressources engins et AdC

Dans ce deuxième exemple, nous considérons trois sillons fixes (déjà construits) :

1. le sillon A démarre de Toulouse à 10h et arrive à Borceaux à 12h,
2. le sillon B démarre de Paris à 8h et arrive à Bordeaux à 12h,
3. le sillon C démarre de Bordeaux à 13h et arrive à Paris à 17h.

L'exemple de la figure 2.8 vise à montrer les limites du processus actuel en considérant la planification des ressources engin et AdC séparément lors de l'optimisation du plan de transport. Dans cet exemple, nous faisons l'hypothèse que deux roulements AdC r1 et r2 sont disponibles et que seules les séries d'engins S1 et S2 sont valides sur ces trois sillons. Nous supposons également, afin de respecter la durée de travail effectif réglementaire, qu'un seul AdC ne peut pas assurer les sillons B et C consécutivement (la somme des durées des deux sillons est trop longue d'un point de vue réglementation). Par ailleurs, les compatibilités entre les séries d'engins et roulement AdC sont données comme suit :

- le roulement AdC r1 est compatible avec la série d'engins S1,
- le roulement AdC r2 est compatible avec la série d'engins S2.

Dans cet exemple, les engins et AdC ont été planifiés séparément en respectant l'ensemble des contraintes auxquelles ils sont assujettis et en optimisant le nombre de ressources utilisées. L'approche de planification de ces ressources engins et AdC s'est donc appuyée sur un processus entièrement séquentiel (cf. section 2.2) dans lequel on a d'abord planifié les engins et ensuite les AdC à partir des roulements engins construits antérieurement. Deux séries d'engins (le sillon A est couvert par la série S1 et les sillons B et C sont couverts par la série S2) et trois ressources AdC sont alors nécessaires pour couvrir ces trois sillons (cf. figure 2.8).

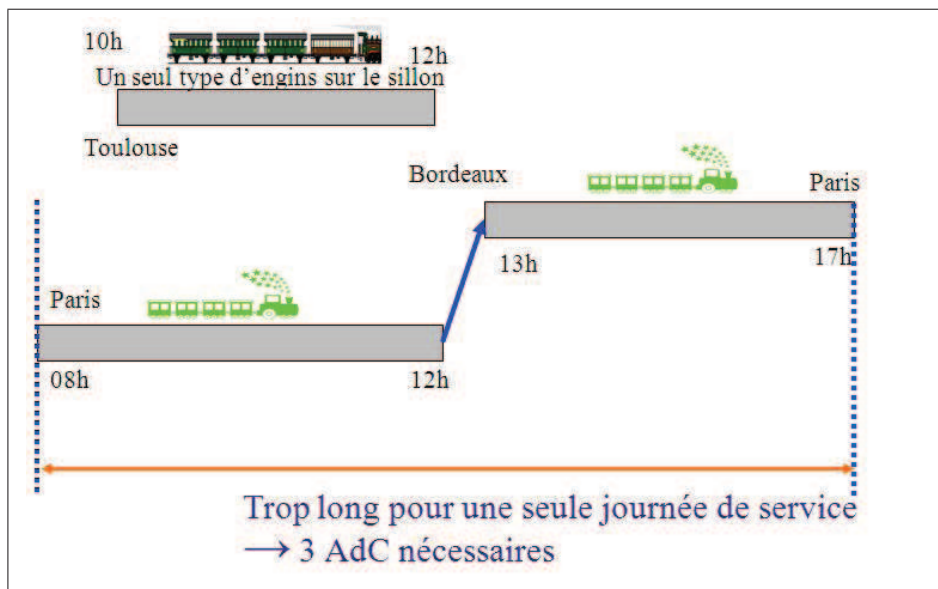


FIGURE 2.8 – Exemple 2. Limites du processus actuel de planification séquentielle des engins et AdC

En fixant les sillons et en planifiant de manière simultanée les ressources engins et AdC, la précédente affectation des séries d'engins et des roulements AdC aux sillons A, B et C peut être remise en cause. L'objectif étant d'optimiser le nombre de ressources engins et AdC exploitées, la couverture de ces trois sillons en ressources engins est ainsi établie :

- Un engin de série S1 assure le sillon A de 10h à 12h, puis le sillon B de 13h à 17h. On suppose que la capacité technique de cette série est suffisante pour assurer ces deux sillons consécutivement,

- Un engin de série S2 est affecté au sillon C de 8h à 12h.

L'affectation des séries d'engins aux sillons ayant été réorganisée, les compatibilités entre les roulements AdC et séries d'engins données ci-dessus permettent d'affecter les AdC comme suit :

- un AdC du roulement r1 peut assurer les sillons A et B puisque les compatibilités et la réglementation de travail le permettent,
- un AdC du roulement r2 peut assurer le sillon C étant donné qu'il est compatible avec la série S2.

Comme illustré en figure 2.9, cette nouvelle approche permet de gagner une ressource AdC par rapport à une approche traditionnelle (séquentielle).

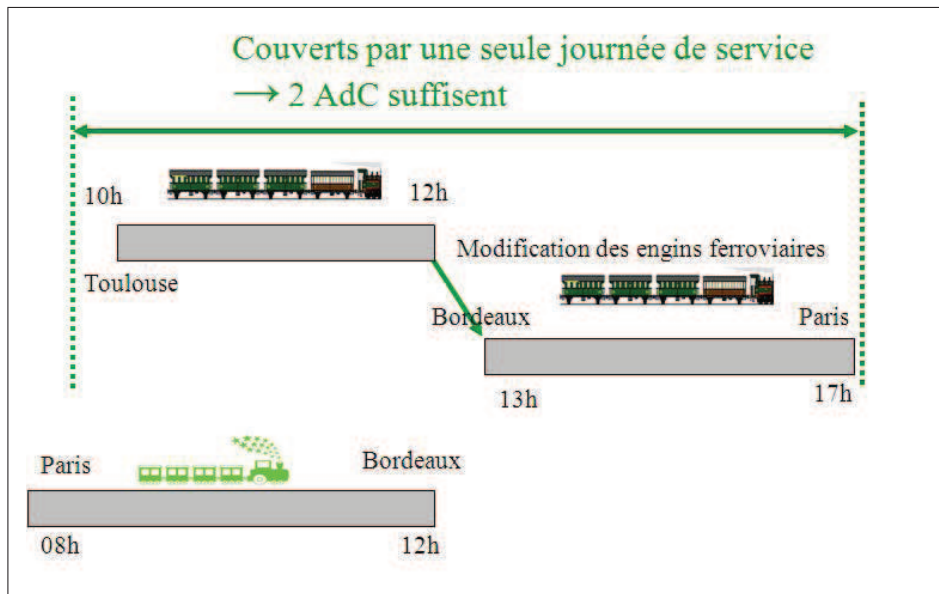


FIGURE 2.9 – Exemple 2. Apport de l'approche par planification intégrée des ressources sillons/engins

2.2.3 Gains potentiels observés dans d'autres secteurs de transport avec une approche intégrée

La gestion intégrée des ressources paraît souhaitable dans différents domaines, en particulier en transport aérien et en transport en commun. Cependant, d'un point de vue pratique, elle génère des problèmes de décision dont la combinatoire est très élevée. Cette difficulté a toujours été abordée en décomposant le problème de planification globale en plusieurs sous problèmes plus faciles à résoudre, mais qui demeurent toujours difficiles en raison de leur grande taille et des différentes contraintes auxquelles l'utilisation de ces ressources est assujettie. Or, dans la littérature consacrée au domaine aérien par exemple, il a été montré que bien qu'une approche séquentielle réduit considérablement la complexité de la planification globale, elle peut cependant donner des résultats de moindre qualité puisque les décisions prises à une étape peuvent réduire considérablement l'ensemble des solutions réalisables aux étapes subséquentes.

En transport aérien, des modèles et des approches de résolution ont été proposés pour intégrer la création des itinéraires d'avions et des rotations d'équipages et permettre de parvenir à une meilleure utilisation globale des ressources. Soumis et al [27] proposent une méthode intégrant partiellement le problème de la création des horaires de vols au problème intégré de planification des avions et des équipages. Cette approche a été testée avec des données provenant de trois flottes d'une compagnie aérienne canadienne de taille moyenne. Les problèmes de routage d'avions et de rotation d'équipages ont été résolus pour toutes les instances d'abord séquentiellement et ensuite de façon intégrée. Les

réductions de coûts obtenues grâce au modèle intégré sont en moyenne de 9,4% des coûts variables³.

La qualité globale des solutions a pu encore être améliorée en considérant un niveau supplémentaire d'intégration : prendre certaines décisions par rapport aux horaires des vols. Cette flexibilité peut se traduire par la possibilité de modifier l'heure de départ des vols à l'intérieur d'une fenêtre de temps. Lorsque seules des petites modifications des horaires sont permises, il est raisonnable de croire que la demande pour les vols ne change pas. Ce modèle de planification intégrée avec fenêtres de temps a été testé avec les mêmes données que celles utilisées pour le modèle intégré de routage d'avions et des rotations d'équipage, mais en incluant un certain nombre d'heures de départ possibles pour chaque vol, à cinq minutes d'intervalle. Les résultats numériques ont montré également, pour toutes les instances, que le modèle avec fenêtres de temps conduit à une solution entière à la fois moins chère pour ce qui est des coûts d'équipages et nécessitant un plus petit nombre d'appareils par rapport à un modèle où les heures de départ des vols sont fixées. Les coûts variables d'équipages sont réduits, en moyenne, de 8,3% quand les heures de départ des vols peuvent être avancées ou reculées d'aussi peu que cinq minutes. En même temps, ces petites modifications de l'horaire ont permis de diminuer de deux, en moyenne, le nombre d'appareils nécessaires à la création d'itinéraires d'avions respectant les contraintes d'entretien.

Barnhart et al [21] proposent également des modèles et des algorithmes de résolution pour optimiser simultanément le problème intégré de création des trajets (segments) de vols et d'affectation des types d'avions aux segments de vols sélectionnés. Ces modèles ont été testés avec des données provenant d'une flotte d'une grande compagnie aérienne américaine (U.S. airline) ; les résultats obtenus ont été satisfaisants et ont permis de diminuer de façon significative le nombre d'appareils utilisés (soit une réduction de 5,5% en moyenne sur un parc d'environ 800 appareils).

Papadakos [34] traite le problème intégré d'affectation de la flotte, des roulements d'avions et de rotation des équipages. Les solutions obtenues ont été comparées avec les meilleures solutions connues dans la littérature en transport aérien. La plus grande instance résolue est composée de 700 segments de vols et de 6 types d'avions. Les résultats obtenus ont montré une réduction des coûts d'utilisation simultanée des ressources aériennes de 1,6% en comparaison avec la meilleure méthode utilisée et connue dans la littérature en transport aérien.

En transport en commun, Huisman et al. [35] proposent des modèles et des algorithmes de résolution pour optimiser simultanément l'affectation des bus aux itinéraires sélectionnés et des rotations des chauffeurs de bus. Les résultats obtenus ont montré des gains pouvant aller jusqu'à 10 chauffeurs sur 51 par rapport à une approche traditionnelle (séquentielle).

Le tableau 2.1 résume les quelques travaux cités ci-dessus avec différents niveaux possibles d'intégration et les performances obtenues. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des enjeux économiques importants et nous apporte une motivation supplémentaire dans notre démarche d'optimisation globale du plan de transport ferroviaire par planification intégrée des ressources. Dans la section 2.4, nous étudions plus en détails les différents articles de référence cités ci-dessus.

3. Incluent les coûts d'attente et ceux des vols de repositionnement.

Enjeux économiques liés à la planification intégrée des ressources					
Niveaux d'intégration de la planification				Performances/Remarques	Source
Horaires des vols	Affectation de flotte	Roulements avions	Rotation des équipages		
Choix de vols	Oui	Oui	Non	-5,5 % sur un parc de 800 appareils (demandes des clients intégrées)	[21]
Fixés	Oui	Oui	Oui	-9,4 % en moyenne sur les coûts issus d'une approche séquentielle	[27]
$\pm 5'$	Oui	Oui	Oui	-8,3 % sur les coûts variables des équipages	[27]
Fixés	Oui	Oui	Oui	-1,6 % en moyenne sur les coûts	[34]
Horaires de bus	Affectation des bus	Itinéraires de bus	Affectation des chauffeurs	Performances/Remarques	Source
Fixés	Oui	Non	Oui	Un gain allant jusqu'à 10 chauffeurs sur 51	[35]

TABLE 2.1 – Enjeux économiques de la planification intégrée dans d'autres secteurs de transport

2.3 Etat de l'art

2.3.1 Planification séquentielle en transport ferroviaire

Nous présentons dans cette section une courte revue des travaux de recherche (méthodologies, modèles, techniques de résolution) liés aux problèmes de décision rencontrés dans le domaine du transport et de la production ferroviaire et, en particulier, à la gestion optimisée des ressources matérielles (engins) et humaines (AdC).

Forbes et al. [8] traite le problème classique d'affectation des engins à des tâches sur un planning cyclique journalier : pour chaque tâche, les heures de départ et d'arrivée, l'origine et la destination et les types d'engins sont connus. La formulation proposée est une formation à base de chemins sur un graphe espace-temps classique représentant la charge de travail à produire. Le modèle mathématique est un modèle de partitionnement (*Set Partitionning*) qui vise à enchaîner les tâches de même type en séquences (affectation des tâches aux mêmes types d'engins). Ainsi, résoudre le problème consiste à sélectionner un ensemble de chemins dans le graphe de sorte à ce que chaque tâche apparaisse sur un et un seul chemin sélectionné. L'optimisation repose sur la construction d'un ensemble de chemins de coût minimum par rapport aux coûts d'exploitation et des circulations à vide des engins. Les auteurs proposent un algorithme exact pour la résolution de ce problème ; il est basé sur une méthode de séparation et d'évaluation (*Branch & Bound*), dont la fonction d'évaluation est la relaxation continue du problème. Nou et al. [9] traitent un problème d'affectation des engins à des trains. Ils proposent une modélisation multi-flot qui représente chaque engin individuellement et intègre des contraintes de

respect des rendez-vous de maintenance visant à s'assurer que tous les engins rentrent régulièrement à l'atelier de maintenance, avant d'avoir parcouru une distance maximale autorisée. Les auteurs proposent une approche par décomposition de Dantzig-Wolfe : le problème linéaire est décomposé en un problème maître et autant de sous-problèmes qu'il y a de locomotives. Les résultats obtenus avec des jeux de données d'une compagnie ferroviaire suédoise n'étant pas satisfaisants en termes de temps de calcul, les auteurs proposent de relâcher les contraintes de maintenance pour accélérer la résolution. La gestion de la maintenance est réintégrée lors d'une phase de post-traitement des solutions. Ahuja et al. [10] proposent une approche à base de flots pour répondre au problème tactique de planification cyclique des engins sur un horizon d'une semaine. Le problème complet sur une semaine n'ayant pu être résolu dans des temps de calcul raisonnables, les auteurs utilisent une démarche heuristique de résolution basée notamment sur une simplification du problème hebdomadaire en un problème journalier. La charge de travail est alors redéfinie et seuls les trains circulant au moins cinq fois par semaine sont considérés dans le problème journalier. De plus, des fonctionnalités originales sont prises en compte ; en particulier, la possibilité de réengager des unités multiples entre deux trains, sans opération technique, est intégrée dans le graphe sous la forme de connexions spéciales, dites connexions train-à-train. Ce point est particulièrement intéressant lorsqu'on observe que les opérations d'assemblage et de désassemblage des unités multiples sont très coûteuses et sources de retard (Marcos, 2006) [38].

La ponctualité et la stabilité du plan de transport sont des leviers importants dans l'élaboration du plan de transport en termes de qualité de service et de satisfaction des clients vis-à-vis de la SNCF. Les différents incidents qui se produisent en opérationnel concernent l'ensemble des ressources matérielles et humaines (infrastructure, engins, personnel) et peuvent engendrer des retards et une dégradation significative du plan de transport et de la qualité de service aux clients. C'est pourquoi les problématiques de décision liées à la robustesse de la planification des ressources ferroviaires suscitent un intérêt croissant de la communauté de recherche opérationnelle. Trefond et al. [13] se sont intéressés au problème de planification robuste du matériel roulant ferroviaire (engins ferroviaires) pour faciliter la gestion des aléas à un niveau opérationnel de décision. Les données incertaines du problème sont essentiellement associées aux horaires de départ et d'arrivée des trains. Dans ce contexte, les auteurs définissent la robustesse à partir des roulements d'engins qui garantissent une certaine stabilité pour une typologie d'aléa prédéfinie ; en cas d'incident sur un train, l'impact sur les autres trains et la remise en cause des roulements conçus sont ainsi limités. Des indicateurs de robustesse sont définis pour guider la recherche d'une solution robuste et s'inspirent des travaux de recherche de Nielsen et al [11] qui proposent plusieurs indicateurs de robustesse adaptés au problème de planification du matériel roulant en transport ferroviaire :

- le retard propagé, à limiter : il est calculé en simulant les répercussions d'un incident par rapport au retard cumulé,
- le temps de retournement, à maximiser : il correspond à l'intervalle de temps entre l'arrivée et le départ d'un engin en gare.

Une démarche heuristique est proposée dans un premier temps pour produire des solutions de référence dans des temps de calcul très courts. Une seconde méthode de résolution par génération de colonnes est aussi proposée. Des tests expérimentaux sur des jeux de données réels sont toujours en cours et les résultats préliminaires obtenus se sont avérés très encourageants. Kouvelis et al. [14] présentent différentes approches robustes d'optimisation discrète et leur application.

Les problèmes de planification d'horaires de travail correspondent à des problèmes d'optimisation combinatoire classiquement étudiés en recherche opérationnelle, mais issus d'applications réelles, qui sont souvent très complexes et de grande taille. Les solveurs de programmation linéaire en variables mixtes sont des outils puissants pour la résolution de nombreux problèmes de recherche opérationnelle. Face à de nombreux problèmes complexes réels de grande taille, ces solveurs perdent rapidement leur efficacité. C'est pourquoi, en pratique, pour des problèmes de planification, on se contente souvent de solutions faisables qui remplissent certains critères de qualité. Des méthodes approchées sont utilisées

afin d'obtenir un compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul. La planification d'horaires de travail vise, pour un horizon de planification d'un jour à quelques mois, à dimensionner une force de travail et à optimiser l'utilisation de cette force de façon à couvrir un besoin exprimé par une charge de travail prévisionnelle, tout en respectant un ensemble de contraintes. Elle aboutit à des programmes définissant les horaires de travail et de repos de la force de travail, en trouvant le meilleur compromis entre les préférences des différents acteurs [15].

En transport ferroviaire, le problème de planification des Agents de Conduite (AdC) consiste à affecter des roulements AdC aux tâches (tronçons) dans un horizon de planification d'une semaine en général. Un tronçon (ou étape AdC) est caractérisé par une heure de début et de fin et une localisation de début et de fin. Il constitue la plus petite tâche insécable que doit produire un AdC de bout en bout sans relâche. Une Journée de Service (JS) représente la journée de travail d'un AdC et est composée d'un ensemble de tronçons successifs. Pour enchaîner deux tronçons, il faut que la localisation de la fin du premier tronçon et la localisation du début du second tronçon coïncident, et que le temps séparant les deux tronçons permette à la ressource AdC de se déplacer d'un tronçon à l'autre. Le problème de construction de journées de service correspond dans la littérature au problème de recouvrement d'ensembles (*Set Covering Problem*) [33]. Ces problèmes sont généralement de très grande taille. Une des techniques les plus utilisées pour la résolution de ces problèmes est la génération de colonnes. Djellab et al. [18] proposent une approche par génération de colonnes explicite pour résoudre le problème de construction de journées de service. Cette approche consiste à générer toutes les JS réglementaires possibles et, en s'appuyant sur les indicateurs de la résolution du problème maître, les meilleures JS à intégrer dans le problème maître sont sélectionnées. La convergence de la méthode de génération de colonnes dépend de l'efficacité de l'algorithme générateur. Le rôle de cet algorithme est de fournir à chaque itération une nouvelle colonne dont le coût réduit négatif peut améliorer la valeur de la fonction objectif. Même si, théoriquement, n'importe quelle colonne de coût négatif peut améliorer la solution courante, il se trouve qu'en pratique un compromis doit être trouvé entre la vitesse de convergence et la complexité de l'algorithme générateur. Ce dernier peut donc résoudre un problème esclave restreint, ou bien faire appel à des méthodes approchées pour réduire le temps de calcul. Différents travaux de recherche portent sur les techniques d'accélération de la convergence qui consistent à contrôler au mieux les valeurs duales qui tendent à converger vers l'optimum en oscillant de manière irrégulière. Dans [18], le sous-problème générateur de colonnes est décomposé en plusieurs sous-problèmes, un sous-problème par résidence de rattachement des AdC. A chaque itération du processus de génération de colonnes, une (ou plusieurs) colonne(s) est (sont) ajoutée(s) pour chacune des résidences. Pour chaque résidence, le coût réduit de toutes les colonnes qui lui sont associées (et qui sont hors base) est évalué, et la (ou les) meilleure(s) colonne(s) sélectionnée(s) est (sont) ajoutée(s) au problème maître. Cette stratégie permet de diversifier les colonnes ajoutées à chaque itération et ainsi d'accélérer la convergence du processus de génération de colonnes. La génération de colonnes appliquée à un problème maître en nombres entiers fournit une solution optimale de la relaxation linéaire. Généralement, cette solution n'est pas entière mais fournit une borne inférieure de la solution entière du problème maître. Une première approche pour la recherche d'une solution entière consiste à lancer une recherche arborescente sur le problème maître restreint à l'ensemble Ω des colonnes explicitées lors du processus de génération de colonnes. C'est une approche heuristique car, même si l'ensemble des colonnes Ω permet de trouver la solution optimale continue du problème maître à la racine de l'arborescence, il n'y a pas de garantie d'obtenir la solution optimale (ni même une solution réalisable) aux autres noeuds de l'arbre, car des colonnes qui ne sont pas dans Ω , sont susceptibles d'améliorer la solution (ou de rendre le problème admissible) au cours de la recherche arborescente. Ainsi, une deuxième approche, appelée *Branch & Price* [29], adapte les principes du *Branch & Bound* au contexte de la génération de colonnes, en permettant d'expliciter de nouvelles colonnes à chaque noeud de l'arbre, c'est-à-dire en utilisant une procédure d'évaluation des noeuds par la méthode de génération de colonnes. Les techniques de séparation doivent alors permettre de supprimer des solutions fractionnaires, tout en n'introduisant que des contraintes qui puissent être prises en compte aisément par l'algorithme générateur. Djellab et al. [18] proposent une approche basée sur des heuristiques d'arrondi pour construire une solution entière à partir des solutions relâchées. Les solutions obtenues avec les heuristiques d'arrondi sont apparues

de bonne qualité. Un post-traitement est ensuite opéré pour imposer à certaines journées de service réglementaires de s'achever dans leur résidence de départ. Cependant, ce post-traitement peut rendre certaines journées de service non réglementaires. Ce traitement est donc activé selon les préférences des utilisateurs. Ces derniers peuvent juger s'il est préférable ou non que plusieurs contraintes réglementaires soient "légèrement" violées pour assurer le retour à la résidence au départ de la JS. Benhizia et al. [17] proposent une modélisation explicite du problème de construction optimisée des Journées de Service en prenant en compte l'ensemble des contraintes réglementaires auxquelles les AdC sont assujettis et qui sont liées à la réglementation de travail du système ferroviaire français (RH077). Le modèle proposé a été validé et testé sur des données expérimentales avec plusieurs logiciels standards de programmation linéaire (IBM ILOG CPLEX, Coin, GLPK). En terme de temps de calcul de la solution optimale, les résultats ont montré que le modèle proposé est efficace sur des petites instances de données. Cependant, le temps de calcul augmente en fonction de la volumétrie du problème, ce qui peut représenter un inconvénient majeur dans le cadre d'une planification tactique (voire opérationnelle).

Les problèmes de génération des tournées, connus dans la littérature sous le nom de *Crew Pairing Problem* sont généralement traités en décomposant le traitement du problème global en deux étapes :

1. génération de toutes les tournées réglementaires,
2. sélection, parmi les tournées générées en amont, d'un sous-ensemble de tournées qui couvre toutes les journées de service avec un coût minimal (Caprara et al. [33], Bodin et al. [2]).

La deuxième étape d'optimisation des tournées consiste à résoudre un problème de *Set Covering* (SCP). Des méthodes exactes sont utilisées pour résoudre le SCP avec des petites instances de données (quelques dizaines de JS et des milliers de tournées) [7] et [19]. Cependant, pour des problèmes de plus grandes tailles, des approches heuristiques sont très souvent utilisées. L'approche de résolution la plus efficace pour résoudre ce type de problèmes est celle utilisant la relaxation lagrangienne [20]. Une approche basée sur la relaxation lagrangienne est proposée par Caprara et al. [12] pour résoudre un problème similaire de construction de tournées dans le transport ferroviaire italien appliqué aux trains de voyageurs. Ces approches sont difficilement adaptables à la problématique de génération de tournées dans le système ferroviaire français puisque les contraintes réglementaires du système ferroviaire italien sont très différentes de celles du système ferroviaire français. Rahmoune et al. [16] proposent un algorithme glouton permettant de minimiser le nombre de tournées. Les résultats obtenus ont montré que le nombre de tournées générées est amélioré de plus de 35% en moyenne (allant jusqu'à 50% sur certains jeux de données) en comparaison avec un algorithme développé par une autre entité de la SNCF. Cependant, il génère des temps de non productivité des AdC de 3,7% en moyenne, avec des pics pouvant aller jusqu'à 33%).

Le problème de construction de roulements de service AdC, connu dans la littérature sous le nom de *Crew Rostering Problem* (CRP), comporte un ensemble de tournées sur un horizon de planification d'une semaine. Caprara et al. [12] proposent un modèle de base pour le CRP et décrivent une borne inférieure lagrangienne basée sur la solution d'un problème d'affectation. La borne inférieure obtenue est ensuite utilisée pour guider une heuristique pour trouver une solution approximative plus proche de la solution optimale du problème. Les résultats obtenus sur des données réelles (jusqu'à 1000 journées de service) sont présentés et montrent que les valeurs des bornes supérieures et inférieures sont relativement proches.

2.3.2 Planification intégrée en transport

Au cours de ces dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour l'intégration des problèmes de planification des ressources en transport aérien. Parmi ces problématiques, on retrouve le problème qui consiste à concevoir les itinéraires d'avions et les rotations d'équipages afin de couvrir de manière efficiente la charge de travail des avions et des équipages induite par la production des segments de

vol, en respectant les contraintes liées aux règles et restrictions imposées aux équipages et aux vols des avions. Bien que les compagnies aériennes exploitent souvent des horaires différents suivant les jours de la semaine, les problèmes sont généralement résolus de manière générique pour obtenir une solution initiale qui est ensuite modifiée pour tenir compte des exceptions. La principale interaction qui existe entre ces deux processus de planification des ressources aériennes concerne le temps de correspondance disponible pour que les ressources (avions et équipages) enchaînent (assurent) deux tâches successives (vols successifs). Compte tenu du fait que le temps minimal de correspondance entre deux vols couverts par le même équipage est réduit si le même avion couvre les deux vols, l'ensemble des rotations d'équipages réalisables dépend des itinéraires d'avions construits. Une correspondance entre deux vols est dite "*courte*" si ces vols ne sont pas assurés par le même avion et si la correspondance entre ces vols ne dure pas assez longtemps pour permettre au même équipage de changer d'avion.

Lorsque l'on formule le problème de planification intégrée de routage des avions et des rotations d'équipages, on doit prendre en compte des contraintes couplantes pour garantir qu'un équipage ne puisse assurer une correspondance courte que si l'avion assure aussi cette correspondance. La volumétrie (taille) du problème intégré est plus importante que celle de l'union des deux modèles séquentiels, ce qui rend le problème encore plus difficile à résoudre. L'approche de résolution qu'on retrouve très souvent dans la littérature de Recherche Opérationnelle pour appréhender les problématiques de planification intégrée des ressources en transport aérien est la décomposition de Benders (voir [22]). Cette dernière est très souvent utilisée pour résoudre des problèmes mixtes complexes de grandes tailles. La décomposition de Benders est une méthode qui permet de partitionner les variables de décision du problème ; à chaque itération, un problème maître de Benders est résolu pour fixer les valeurs des variables d'un sous-problème de Benders (il s'agit ici de fixer les valeurs des variables d'affectation de la flotte et de résoudre le sous-problème de rotation des équipages). La solution du sous-problème de Benders complète ainsi l'affectation du problème maître et la résolution du problème dual du sous-problème fournit une coupe de Benders qui est intégrée au problème maître. Le problème maître est résolu avec l'approche de Barnhart et al [29] et des techniques sont utilisées pour accélérer la convergence de la méthode de génération de colonnes.

Bien qu'une approche séquentielle permette de simplifier le problème de planification, Cordeau et al. [23], Klabjan et al. [32], Cohn et Barnhart [25] montrent que le problème de planification intégrée de routage d'avions et de rotation d'équipages peut générer des solutions significativement meilleures que les solutions obtenues en résolvant le problème de manière séquentielle. En effet, en raison du lien fort qui existe entre le temps minimum nécessaire à un équipage pour effectuer une correspondance et la durée disponible de correspondance entre deux vols, les décisions prises sur l'affectation des avions aux vols ont un impact considérable sur l'élaboration des rotations d'équipages. Par conséquent, une approche par planification séquentielle peut générer des solutions fortement sous-optimales.

Cordeau et al. [23] ont introduit un modèle qui intègre la formulation complète (entière) du problème de routage d'avions et de rotation des équipages en considérant une contrainte couplante pour chaque connexion courte. Pour traiter ces contraintes couplantes qui rendent le problème plus difficile à résoudre, une approche basée sur la décomposition de Benders est utilisée. Le processus de résolution itère alors entre le problème maître, qui résout un problème de routage d'avions, et le sous-problème de Benders qui traite le problème de rotation d'équipages. Les connexions courtes sont fixées par le problème maître et le sous-problème construit des rotations d'équipages de moindre coût en exploitant uniquement les connexions courtes fixées par le problème maître. En raison de la particularité de ces deux modèles, le problème maître et le sous-problème sont résolus avec la méthode de génération de colonnes. Des tests de performances de l'approche ont été réalisés sur des données réelles provenant d'une compagnie aérienne canadienne ; l'approche intégrée a permis de réduire le coût variable des équipages de 9,4% par rapport à l'approche séquentielle habituellement utilisée en pratique. Ce modèle a ensuite été amélioré par Mercier et al. [26] qui ont introduit une formulation générique où la robustesse des solutions est améliorée en pénalisant les connexions qui peuvent engendrer des délais de retard si elles ne sont pas assurées par le même avion. Les auteurs montrent aussi que l'inversion de

l'ordre des étapes dans le processus de résolution (i.e. résoudre le problème de rotation des équipages dans le problème maître de Benders et le problème de routage d'avions dans le sous-problème) donne des améliorations significatives sur l'approche de Cordeau et al. [23]. Une partie importante des coûts dans le problème intégré est associée aux rotations des équipages et, en inversant l'ordre du processus habituel de résolution, le sous-problème de routage d'avions transmet des informations au problème maître sur la réalisabilité du sous-problème de routage d'avions. Ceci aboutit à une réduction significative du nombre de coupes de Benders générées. Les auteurs ont également montré que l'identification des coupes optimales de Pareto peut améliorer la vitesse de convergence de l'algorithme de Benders.

Mercier et Soumis [27] traitent un autre problème de planification intégrée de routage d'avions et de rotation des équipages, en sélectionnant les horaires (heure de départ) des vols dans une fenêtre de temps donnée (± 5 minutes par rapport à l'heure de départ initialement prévue). Ils supposent que la demande sur les vols ne change pas de manière significative avec une modification aussi limitée des horaires de vols. Des contraintes couplantes lient la durée de correspondance disponible pour les équipages et les avions avec l'heure de départ des vols prévue dans la fenêtre de temps. Un niveau supplémentaire de décision est donc considéré dans la problématique de planification intégrée de routage des avions et de rotation des équipages : celui de décaler les horaires de départ des vols (avec une avance/un retard compris dans un intervalle de 5 minutes), en sélectionnant les horaires qui permettent de fournir un plan optimal de routage d'avions et de rotation des équipages. Bien évidemment, les mêmes heures de départ doivent être sélectionnées pour les avions et les équipages, ce qui complique le problème puisque un choix optimal pour une ressource ne l'est pas forcément pour l'autre. Une approche intégrée peut ainsi bénéficier de la flexibilité des horaires de départ des vols dans une plus large mesure, puisque les horaires de départ sont choisis en prenant en compte les avantages des affectations tant au niveau des cheminements d'avion qu'au niveau des rotations d'équipage. Dans cette optique de replanification des horaires de départ des vols, les auteurs supposent que le problème d'affectation des avions aux vols est résolu et que le type d'avions assigné à chaque vol est connu. Le problème de planification intégrée avion/equipage avec replanification des horaires de vols est alors associé à chaque type d'avion. L'objectif est de déterminer les heures de départ de vols qui minimisent le coût d'exploitation des avions et équipages de manière à ce que chaque vol soit couvert par exactement un avion et un équipage. La formulation mathématique proposée est une formulation à base de chemins où ceux-ci sont associés à des variables binaires sur chaque graphe spatio-temporel représentant la charge de travail des avions et des équipages pour la production de l'ensemble des vols (L). Ces graphes sont construits de manière à respecter les contraintes d'exploitation et de routage des avions (nombre de jours maximum d'utilisation des avions en vols avant de se rendre à une station de maintenance), ainsi que les règles du secteur aérien appliquées aux personnels de vol (respect de la durée maximale de travail, de la durée de vol et du nombre total d'atterrissages, respect du nombre maximal de périodes de travail dans une rotation, etc.). Compte tenu du fait que chaque segment de vol doit être couvert par exactement un équipage et un avion, les auteurs considèrent qu'une partie significative des coûts d'exploitation est fixe et que les seuls coûts pertinents sont ceux associés à une meilleure optimisation des rotations d'équipages. Les coûts variables des équipages sont engendrés par les coûts de correspondances (qui dépendent de la durée de correspondance), les frais d'hébergement lors des découchés des équipages, les frais supplémentaires générés lorsque les passagers changent d'avion pendant les correspondances. Hormis les contraintes usuelles et spécifiques à chacun des problèmes de planification d'avions et d'équipages, des contraintes couplantes sont introduites pour modéliser l'interaction entre ces ressources aériennes et proposer ainsi un modèle qui permet d'approcher la problématique de manière intégrée. Ces contraintes assurent que, pour chaque segment de vol dans les graphes de routage d'avions et de rotation des équipages, les mêmes horaires de vol sont sélectionnés pour le cheminement des avions et pour les rotations des équipages. Elles assurent également que les équipages ne changent pas d'avion si, pour les horaires de vol choisis, la correspondance est trop courte pour être assurée par le même équipage. L'approche de résolution proposée par les auteurs est une méthode qui combine la décomposition de Benders, la génération de colonnes et une procédure de génération dynamique de contraintes. En effet, l'approche consiste à relâcher, dans un premier temps, les contraintes d'intégrité du problème primal et à le résoudre par décomposition de Benders. Le problème maître de rotation des

équipes et le sous-problème de routage d'avions sont résolus par génération de colonnes. Des coupes d'optimalité sont introduites dans le sous-problème de routage d'avions si des contraintes couplantes sont violées. Des coupes de faisabilité sont introduites dans le problème maître des équipes si des contraintes associées au transport des équipes en repositionnement sont violées. La deuxième phase de l'algorithme de Benders consiste à résoudre le problème maître en introduisant les contraintes d'intégrité et à résoudre le sous-problème de Benders relâché ; si la solution du sous-problème est réalisable et qu'aucune contrainte couplante n'est violée, alors les contraintes d'intégrité sont introduites dans le sous-problème de routage d'avions qui est résolu une seule fois avec les connexions courtes fixées par la solution des équipes (en introduisant des coupes associées aux connexions courtes interdites). La résolution du PLNE a ensuite été améliorée en relâchant une nouvelle contrainte liée à l'utilisation des équipes en repositionnement et en la générant de manière dynamique dans le problème maître à chaque itération de l'algorithme de Benders. Les tests ont montré que le nombre possible de correspondances "courtes" est augmenté en moyenne de 58,4% par rapport au modèle avec des heures de départ fixées. Les résultats obtenus ont montré qu'avec une approche intégrée (choix des horaires de vols), les coûts variables de gestion des équipes peuvent être réduits de 8,30% en moyenne avec des temps de calcul raisonnables.

Papadakos [28] propose une approche de résolution basée sur la décomposition de Benders et la génération de colonnes pour résoudre le problème intégré d'affectation d'une flotte aérienne, de planification de la maintenance et de rotation des équipes. Le problème d'affectation d'une flotte aérienne consiste à déterminer un plan d'affectation de la flotte à chaque segment de vol qui minimise le coût des opérations. Les compagnies aériennes possèdent différents types d'avions avec des caractéristiques différentes qui varient selon la capacité d'emport des avions, leur consommation d'essence, leur poids à l'atterrissage qui détermine les frais d'aéroport, le temps de préparation requis entre deux vols, etc. Lors de l'affectation des types d'avions aux vols, il est important de bien sélectionner les avions dont la capacité répond à une demande commerciale de transport des voyageurs pour éviter de faire perdre des profits potentiels à la compagnie aérienne en laissant des passagers au sol ou en prenant un avion de trop grande capacité avec des coûts d'opérations élevés. Chaque segment de vol doit être couvert par exactement un type d'avions en prenant en compte le nombre d'avions disponibles et en respectant des contraintes spécifiques au transport aérien (restrictions à certaines heures pour les appareils dont le niveau de bruit est trop élevé, capacité des portes d'embarquements dans les aéroports, etc.). Le problème de maintenance des avions est ensuite résolu et consiste à s'assurer que chaque routage d'avion permet de programmer la maintenance de manière périodique. En raison de la forte interaction qui existe entre ces deux problématiques de planification des ressources aériennes, l'auteur a jugé qu'il était pertinent de les combiner pour obtenir un seul modèle complet d'affectation de la flotte et de routage de la maintenance. Les itinéraires d'avions ainsi construits sont ensuite utilisés pour concevoir un programme de vols de coût minimum pour les équipes. L'algorithme de Benders utilisé [30] pour résoudre à l'optimum la relaxation linéaire du problème maître a été étendu en ajoutant des coupes au sens de l'optimum de Pareto et en modifiant l'ordre d'exécution des trois phases de l'algorithme. Ainsi, plus le problème maître devient précis, plus la précision de la résolution du sous-problème augmente, ce qui nécessite moins d'itérations. L'approche de résolution est testée sur des instances d'une compagnie aérienne européenne et américaine (700 segments de vols pour 6 flottes) et comparée avec la meilleure approche utilisée dans la littérature ; une réduction de 24 millions de dollars des coûts alloués à la gestion de la flotte, la maintenance des avions et la gestion des équipes est ainsi constatée.

Sandhu et Klabjan [31] proposent deux méthodes pour résoudre le problème de planification intégrée d'affectation de la flotte et de rotation des équipes à un niveau tactique de décision, en garantissant la faisabilité de contraintes sur le nombre d'avions au sol d'une flotte à un instant t donné dans la construction des itinéraires d'avions. Les contraintes de maintenance des avions ne sont pas considérées dans cette problématique. Les auteurs montrent que pour intégrer le problème de rotation d'avions et d'équipes, il suffit d'ajouter les contraintes liées au nombre d'avions au sol à la formulation du problème de partitionnement de rotation des équipes [32]. En effet, les auteurs stipulent que la résolution du problème intégré d'affectation de la flotte et de rotation d'équipes implique que le

problème de rotation d'équipages est résolu avant le problème de planification des itinéraires d'avions. Cette démarche peut conduire au fait que le problème de rotation de la maintenance soit infaisable en termes d'entretien des avions et du nombre d'avions se trouvant au sol. Pour éviter d'obtenir des itinéraires d'avions infaisables, les auteurs ont proposé d'introduire dans le modèle intégré d'affectation de la flotte et de rotation des équipages des contraintes supplémentaires sur le nombre d'avions qui doivent se trouver au sol [32] à un instant t . Ces conditions sont nécessaires et suffisantes pour que les contraintes sur le nombre d'avions se trouvant au sol soient faisables dans le problème d'itinéraire d'avions. La première méthode utilisée pour résoudre le problème intégré est basée sur la combinaison d'une approche par relaxation lagrangienne et d'une approche par génération de colonnes. L'idée est de démarrer avec un ensemble restreint de tournées obtenu en résolvant d'abord le problème d'affectation de la flotte, puis le problème de rotation d'équipages en intégrant les contraintes sur le nombre d'avions au sol. Les contraintes jugées compliquantes sont ensuite dualisées dans l'objectif et le dual lagrangien résolu avec l'algorithme du sous-gradient. Les solutions duales (multiplicateurs de Lagrange associées aux contraintes relâchées) sont utilisées pour trouver et évaluer de nouvelles tournées d'équipages (nouvelles colonnes) candidates à ajouter à l'ensemble des tournées initiales (colonnes initiales du problème de rotation d'équipages). L'évaluation des tournées se fait à travers deux approches, la première est explicite et permet d'énumérer l'ensemble des tournées candidates, la deuxième est plus efficace et s'appuie sur un algorithme restreint de plus court chemin dans un graphe. La solution finale est obtenue en utilisant la solution d'affectation de la flotte obtenue à la dernière itération pour générer les itinéraires d'avions et les rotations d'équipes avec l'approche traditionnelle. La deuxième approche utilisée par les auteurs pour résoudre le problème intégré est une approche par décomposition de Benders classique. Dans cette approche, les variables entières associées au problème de rotation d'équipages sont relâchées en conservant les variables entières d'affectation de la flotte. Ces deux approches de résolutions ont été comparées et les résultats obtenus ont montré que pour trois instances (sur les quatre étudiées), la méthode de résolution par relaxation lagrangienne est en moyenne plus performante que la décomposition de Benders. Sur la quatrième instance, l'algorithme de décomposition fournit un résultat légèrement meilleur. En conclusion, les auteurs suggèrent d'utiliser la décomposition de Benders si une amélioration est souhaitable dans un temps de calcul très court. En revanche, à un niveau tactique, l'approche par relaxation lagrangienne est souhaitable car elle fournit des solutions plus robustes. Elle est également plus facile à mettre en œuvre en pratique.

Haouari et al. [36] ont proposé un modèle intégré de création des segments de vol et d'affectation des types d'avions aux vols en considérant simultanément des segments de vol facultatifs à sélectionner avec l'affectation des types d'avion à tous les segments de vol prévus. Le problème de création des segments de vol consiste à concevoir un calendrier de vols (horairisés) dans lequel l'origine et la destination ainsi que l'heure de départ et l'heure d'arrivée du vol sont à déterminer. Ce modèle prend également en compte les demandes d'itinéraires avec différentes classes de prix. Le problème est modélisé sous la forme d'un programme linéaire en variables mixtes et une analyse polyédrale du modèle est exploitée pour générer diverses inégalités valides qui sont intégrées ensuite dans le modèle. La construction de représentations d'enveloppes convexes partielles avec des routines de séparation spécifiques et une approche de décomposition de Benders sont utilisées pour faciliter le processus de résolution. Des tests expérimentaux sont réalisés en utilisant des données réelles d'une compagnie aérienne américaine (United Airlines) pour démontrer l'efficacité des procédures proposées ainsi que les bénéfices potentiels issus d'un modèle intégré. La comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle initialement proposé et ceux obtenus avec les différents niveaux d'amélioration du modèle ont montré que la meilleure stratégie de modélisation (parmi celles testées) est celle qui utilise une variété de cinq types d'inégalités valides pour des problèmes de taille moyenne, et celle qui implémente une approche de décomposition de Benders pour des problèmes de grande taille. Des tests expérimentaux sont également réalisés pour évaluer l'impact de l'intégration des modèles en comparant les solutions intégrées avec celles issues d'une démarche séquentielle dans laquelle la création des segments de vols est exécutée séparément et avant l'affectation de la flotte. Les résultats ont montré un net avantage du modèle intégré en termes d'augmentation de profits ; 11,4% par rapport au modèle séquentiel de création des segments de vols et 5,5% par rapport au modèle séquentiel d'affectation de la flotte. Ces chiffres traduisent une augmen-

tation des profits annuels évalués à 18,3 millions de dollars et à 13,7 millions de dollars, respectivement.

En transport en commun, Huisman et al. [35] proposent des modèles et des algorithmes de résolution pour optimiser simultanément l'affectation des bus aux itinéraires sélectionnés et les rotations des chauffeurs de bus. L'approche de résolution proposée est basée sur la combinaison de la relaxation lagrangienne et de la génération de colonnes. La méthode de génération de colonnes est utilisée pour déterminer l'ensemble des périodes de travail des chauffeurs, alors que l'approche de relaxation lagrangienne est utilisée pour résoudre le problème maître. Une heuristique lagrangienne est utilisée pour calculer des solutions réalisables. Les résultats obtenus avec une approche intégrée ont montré des gains pouvant aller jusqu'à 10 chauffeurs sur 51 par rapport à une approche séquentielle.

Nous proposons dans le tableau 2.2 une synthèse des articles étudiés, en mettant en évidence les approches de résolutions utilisées pour résoudre les problèmes de planification intégrée des ressources.

Niveaux de planification	Approche de modélisation	Approche de résolution	Performances	Source
Planification intégrée de routage d'avions et de rotation des équipages	PLNE	Décomposition de Benders et génération de colonnes	Réduction de 9,4% des coûts variables d'équipages	[23]
Planification intégrée des équipages et des avions avec choix des horaires de vols dans une fenêtre de temps (± 5 minutes)	Chemins	Décomposition de Benders, génération de colonnes et procédure de génération dynamique de contraintes	Réduction de 8,3% en moyenne des coûts d'équipages	[27]
Affectation de la flotte, planification de la maintenance et rotation des équipages	PLNE	Décomposition de Benders et algorithme d'accélération de la génération de colonnes	Réduction de 24 millions de dollars en comparaison avec la meilleure approche utilisée dans la littérature	[28]
Planification intégrée d'affectation de la flotte et de rotation des équipages en garantissant la faisabilité des contraintes sur le nombre d'avions au sol	PLNE	Deux méthodes sont proposées : relaxation lagrangienne & génération de colonnes, décomposition de Benders	Relaxation lagrangienne en moyenne plus performante que la décomposition de Benders	[31]
Planification intégrée de création de segments de vol et d'affectation de type d'avions	PLNE	Analyse polyédrale pour générer divers inégalités valides, construction de représentations d'enveloppes complexes partielles avec des routines de séparation et évaluation, décomposition de Benders	Un profit de 11,4% sur le coût de création de segments de vols et de 5,5% sur le coût d'affectation de la flotte est constaté	[36]
Planification intégrée des itinéraires de bus et des chauffeurs de bus	PLNE	Relaxation lagrangienne et génération de colonnes. Une heuristique lagrangienne est utilisée pour calculer les solutions réalisables	Un gain pouvant aller jusqu'à 10 chauffeurs sur 51	[35]

TABLE 2.2 – Synthèse des articles de référence étudiés.

Notre étude de la littérature nous a permis de constater les apports de la planification intégrée et les difficultés liées à son exploitation en raison de la complexité et de la volumétrie de ces problèmes. La plupart des travaux de recherche effectués sur la planification intégrée des ressources exploitent des approches et des algorithmes de décomposition pour traiter le problème global. Ces approches conduisent à décomposer le problème global en plusieurs sous-problèmes plus "faciles à résoudre" que le problème initial. Cordeau et al. [23] ont montré que, lorsque le nombre de segments de vols et le nombre de connexion "courtes" dépassent la centaine, la résolution du problème intégrée devient difficile si une décomposition du problème global n'est pas envisagée. L'approche combinée de décomposition de Benders et de génération de colonnes est très souvent utilisée dans la littérature en transport aérien pour résoudre les problèmes de planification intégrée. Les méthodes utilisant la génération de colonnes ont souvent des problèmes de convergence (essentiellement lorsque la méthode du simplexe est utilisée pour résoudre le problème maître) car le problème dual est très peu contraint au début de la méthode. En pratique, ces problèmes conduisent l'approche par génération de colonnes à effectuer un grand nombre d'itérations qui ne permettent plus d'améliorer la solution courante. L'approche de décomposition de Benders permet alors de réduire la volumétrie de ces problèmes complexes et est très souvent appliquée de manière efficace en pratique à des problèmes de très grande taille. Vanderbeck [37] a comparé plusieurs approches de résolution pour traiter le problème relâché, en particulier la méthode de génération de colonnes pour traiter le problème maître relâché et l'algorithme du sous-gradient pour résoudre la relaxation lagrangienne. Ces approches diffèrent en termes de stratégies d'approximation et de convergence. Au cours de l'algorithme de génération de colonnes, la faisabilité du problème primal est conservée contrairement à l'algorithme du sous-gradient qui est utilisé pour résoudre le dual lagrangien, dans lequel les solutions intermédiaires sont souvent non réalisables. Les bornes intermédiaires sont des bornes inférieures valides, convergeant vers la solution optimale du problème dual. C'est pourquoi la résolution du problème relâché par relaxation lagrangienne ne suffit pas ; une heuristique lagrangienne doit être utilisée afin de rendre réalisable les solutions duales obtenues au cours de l'algorithme du sous-gradient. Dans le cadre de nos travaux de recherche, le choix de notre approche de résolution est motivé par l'existence de deux briques logicielles pouvant résoudre séparément chacun des problèmes de planification des engins et des AdC. Les contraintes couplantes introduites dans le modèle intégré traduisent la forte interaction qui existe entre les deux ressources ferroviaires engins et AdC et, en particulier, les compatibilités entre les engins et les AdC. Le modèle intégré qui prend en compte les modèles de planification des engins et des AdC et les contraintes couplantes est décomposable en deux principaux sous-problèmes lorsque les contraintes couplantes sont relâchées. Dans ce contexte, nous avons opté pour une approche de résolution par relaxation lagrangienne pour résoudre le problème intégré de manière efficace. L'utilisation de deux briques logicielles existantes pour résoudre les sous-problèmes de planification induits permet de simplifier notre démarche de résolution. Nous présentons dans le chapitre 4 différents schémas de relaxation lagrangienne proposés et testés selon les contraintes dualisées. Les résultats expérimentaux issus des différents schémas appliqués sont également présentés.

2.4 Alternatives de planification intégrée des ressources

L'approche d'optimisation du plan de transport par planification séquentielle des ressources a longuement été développée et est utilisée en pratique car elle permet de maîtriser la complexité du problème global, de privilégier la gestion des ressources les plus coûteuses (les sillons d'abord, puis les engins et in fine les AdC) lors de l'élaboration du plan de transport et, d'un point de vue mathématique, de diminuer considérablement la complexité des problèmes étudiés. Cependant, elle génère des solutions qui peuvent être de coût élevé et moins robustes aux aléas, car les décisions prises à une étape donnée peuvent réduire considérablement l'ensemble des solutions réalisables aux étapes subséquentes. Dans un contexte d'évolution concurrentiel, et face à la complexité du système de production des circulations ferroviaires, une démarche forte d'optimisation du plan de transport par planification intégrée des ressources est envisagée pour coordonner leur utilisation en vue d'améliorer leur exploitation globale ainsi que la qualité du processus de production des circulations ferroviaires.

L'optimisation du plan de transport par planification intégrée des ressources critiques peut être

abordée de différentes manières (selon différents axes de recherche), suivant le niveau temporel de décision dans lequel on se place.

2.4.1 Grille horaire vide

Le premier axe de recherche envisagé consiste à démarrer d'une grille horaire vide et à planifier de manière simultanée les trois ressources critiques (sillons, engins et AdC) lors de l'élaboration du plan de transport, en considérant l'ensemble des contraintes métiers dont ces trois ressources ferroviaires font l'objet. Cet axe de recherche a vite été abandonné en raison de la très forte complexité du problème à résoudre. De plus, la SNCF n'étant pas propriétaire de l'infrastructure, il n'apparaît pas réaliste de chercher à optimiser en amont la conception de la grille horaire en tenant compte de l'optimisation des ressources engins et AdC, sachant que les sillons demandés à RFF suivant l'organisation actuelle peuvent ne pas être attribués. Dans ce dernier cas, une réoptimisation des ressources engins et AdC est alors nécessaire pour prendre en compte la nouvelle attribution des sillons, après validation et acceptation de ces sillons par RFF et les activités de la SNCF.

2.4.2 Grille horaire fixée

La planification des ressources critiques de la production ferroviaire à partir d'une grille horaire vide paraît très ambitieuse d'un point de vue scientifique et peu réaliste d'un point de vue métier compte tenu de l'organisation actuelle du système ferroviaire. Cependant, il n'est pas absurde de s'en inspirer pour proposer une nouvelle piste permettant de répondre aux inconvénients que présente la grille horaire vide. La démarche consiste alors à considérer un nouveau scénario qui se base sur une grille horaire fixée et dont l'objectif est d'optimiser le taux d'utilisation des ressources engins et AdC à partir des sillons de la grille. Cette approche est pertinente à différents niveaux de décision :

- En étude, pour anticiper les demandes de sillons pour le futur service à partir d'une grille pré-existante,
- En conception, après validation par RFF et acceptation des sillons attribués à la SNCF,
- En opérationnel, pour prendre en compte les Sillons de Dernière Minute (SDM). L'objectif est alors de réoptimiser la planification des ressources engins et AdC en fonction des nouvelles données reçues sur les SDM. Les demandes des clients sont en effet gérées comme un processus dynamique. Il paraît donc important d'intégrer les demandes tardives de manière efficace, rationnelle et cohérente en prenant en compte la grille horaire déjà construite en amont. A ce niveau de décision, le temps d'exécution des algorithmes de résolution de planification intégrée engins/AdC doit être suffisamment petit.

2.4.3 Grille horaire préexistante modifiable

Dans cet axe de recherche, nous proposons de partir d'une grille horaire préexistante (service en cours par exemple) et de modifier très légèrement la position des sillons pour en évaluer l'impact sur le taux d'utilisation des ressources engins et AdC. Cette approche est pertinente et peut intervenir après validation des sillons par RFF en réoptimisant de manière globale les trois ressources de la production des circulations ferroviaires.

2.4.4 Catalogue de sillons

Une autre manière d'envisager la planification intégrée est de considérer un catalogue de sillons. Le catalogue de sillons permet de proposer un large choix de sillons à sélectionner pour répondre à une demande commerciale. Cette approche nécessite donc de prendre en compte les demandes commerciales effectuées par les activités de la SNCF et de considérer un niveau supplémentaire de décision dans cette planification.

La figure 2.10 illustre les différentes façons d'envisager la planification intégrée des ressources selon plusieurs axes organisationnels et à différents niveaux de décision. Ainsi, plusieurs outils ont été développés au sein de la SNCF et qui sont associés à l'un de ces quatre axes. On retrouve, par exemple, DEMIURGE qui prend en compte le fonctionnement du sous-système infrastructure à un niveau très détaillé (de nombreuses contraintes y sont prises en compte), suivant une approche totalement séquentielle (le modèle ne tient pas compte des ressources engins et AdC). D'autres outils ont également vu le jour comme PRESTO qui est un outil de planification des engins ferroviaires à un niveau détaillé et à partir d'une grille horaire fixée. L'outil PRESTO vise uniquement à construire des lignes de roulement engins et n'influe pas sur les sillons et les AdC dans son modèle de planification. CARACO est seulement un outil de planification des AdC à partir d'une grille horaire fixée et de lignes de roulements engins préalablement construites.

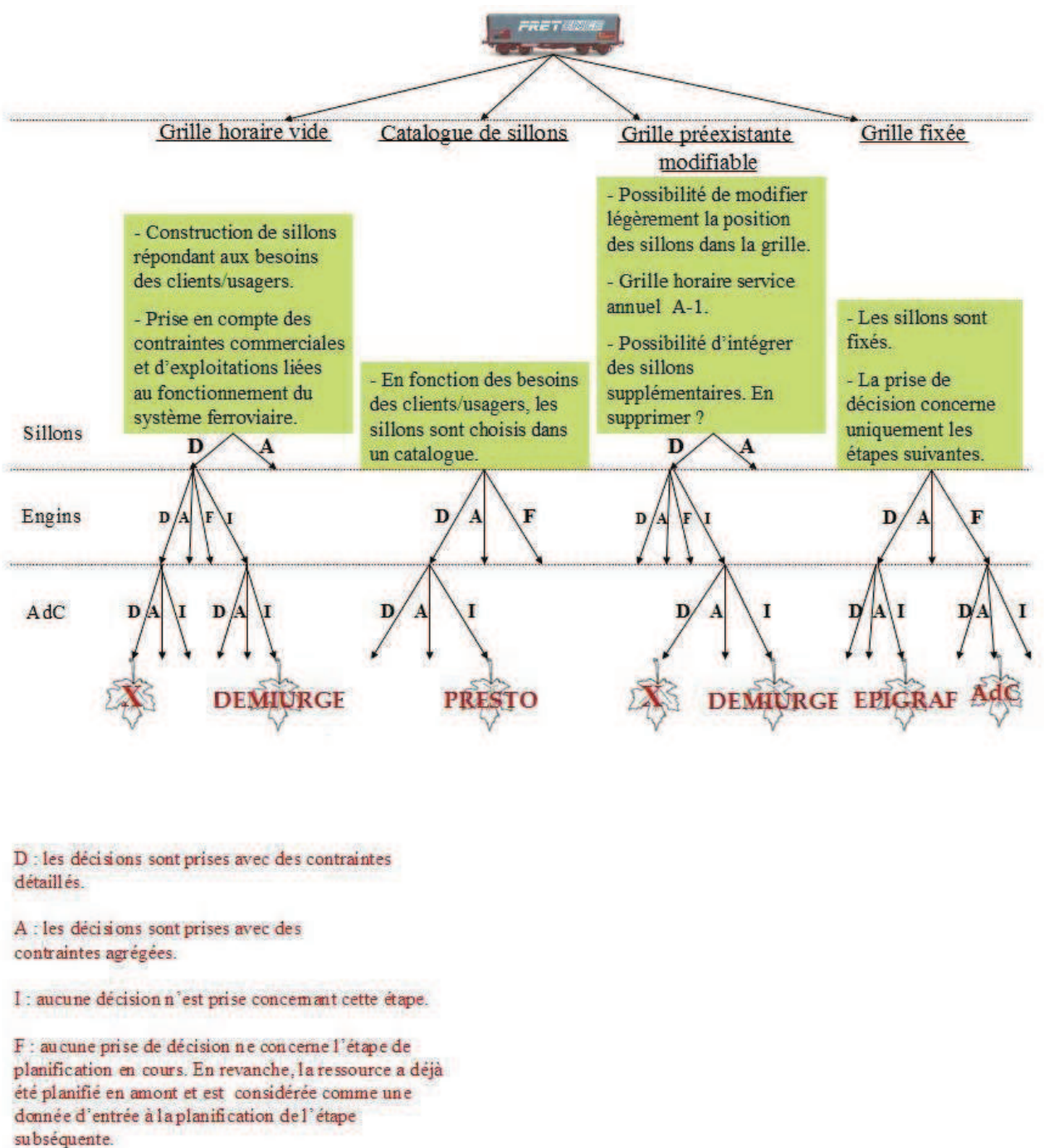


FIGURE 2.10 – Alternatives possibles de planification intégrée.

2.5 Démarche de planification intégrée des ressources

Dans la section 2.4, nous avons présenté différentes alternatives de planification intégrée pour appréhender la problématique d'optimisation du plan de transport, qui varient selon le niveau de décision et l'organisation de la production ferroviaire dans laquelle on se place. Parmi ces différentes configurations, nous retenons comme cadre de la thèse, le deuxième axe de recherche qui vise à planifier de manière intégrée les ressources engins et AdC, en se basant sur une grille horaire fixée.

Notre démarche de planification intégrée des ressources engins et AdC consiste alors à considérer par exemple la grille horaire du précédent service et à découper l'ensemble des sillons constituant cette grille en plusieurs étapes sillons et AdC. Ce découpage est effectué selon les différents points de relèvement potentiels engins et AdC. Les étapes sillons et AdC résultantes constituent ainsi la charge de travail engins et AdC requise pour la production des sillons. Chaque sillon doit être couvert, simultanément, par des séries d'engins et des roulements AdC valides pour, in fine, construire des lignes de roulements engins et des grilles de service AdC valides, cohérentes et efficientes. A la différence de l'approche séquentielle, cette démarche permet de planifier les ressources engins et AdC en partant d'une même source de données, à savoir les sillons. L'approche séquentielle nécessite quant à elle une planification, des lignes de roulements des engins, puis des roulements AdC à partir de la planification des engins.

La figure 2.11 présente cette approche de planification intégrée des ressources engins et AdC. Nous présentons dans le chapitre 4 le modèle mathématique proposé pour répondre à la problématique de planification intégrée des ressources engins/AdC.

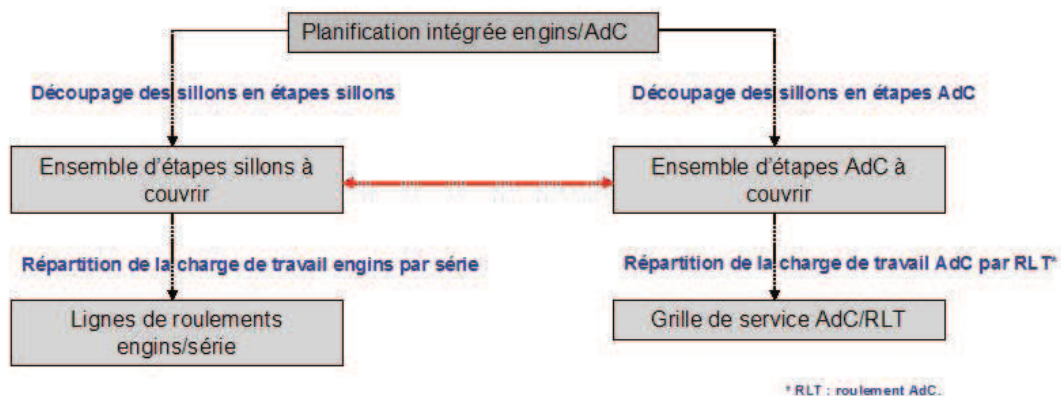


FIGURE 2.11 – Processus de conception d'un plan de transport par planification intégrée engins/AdC

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le processus actuel de planification des ressources ferroviaires sillons, engins et AdC lors de la construction du plan de transport. Bien qu'il présente des avantages non négligeables pour maîtriser la complexité et implanter la prise de décision, ce processus peut être amélioré quant à l'optimisation globale de la production des circulations ferroviaires. En effet, nous avons montré, à travers des exemples simples, les limites du processus adopté et les inconvénients de l'organisation actuelle. Il paraît donc pertinent de conduire des travaux de recherche exploratoire et d'exploiter les capacités de calcul accrues pour proposer une démarche permettant de prendre en compte la planification de ces ressources critiques de la production ferroviaire de manière simultanée. Cet objectif est par ailleurs cohérent avec l'objectif d'optimiser la production ferroviaire ; la planification intégrée des ressources constitue un élément potentiel de réponse dans ce sens. Notre revue de la littérature nous a par ailleurs permis de constater les apports de modèles intégrés, et les difficultés

liées à leur exploitation. Nous avons également observé que les méthodes de décomposition (Benders, relaxation lagrangienne) sont souvent exploitées, et que peu de travaux existent sur le sujet dans la littérature ferroviaire. Face à ce constat, nous proposons dans les chapitres suivants des modèles d'optimisation et des approches algorithmiques pour traiter de manière simultanée la planification des engins et des AdC à partir d'une grille horaire connue.

Chapitre 3

Modélisation mathématique du problème de planification intégrée engins/AdC

Sommaire

3.1	Eléments de contexte	53
3.2	Formalisation des données du problème	55
3.3	Modélisation du problème	58
3.3.1	Variables de décision	58
3.3.2	Contraintes d'utilisation des engins	60
3.3.3	Contraintes d'utilisation des AdC	64
3.3.4	Contraintes couplantes engins/AdC	66
3.3.5	Fonction Objectif	68
3.4	Programme linéaire mixte (MIP)	69
3.5	Prise en compte des étapes de repositionnement dans la couverture de la charge de travail AdC	71
3.6	Modèle simplifié	73
3.7	Conclusion	73

Ce chapitre vise à exposer l'approche de modélisation proposée pour traiter le problème de planification intégrée engins/AdC. Nous présentons en section 3.1. quelques éléments de contexte permettant de définir les principaux acteurs et objets intervenant dans la modélisation proposée. La section 3.2. formalise mathématiquement toutes les données métiers et les paramètres caractérisant les ressources critiques étudiées (sillons, engins, AdC). Nous présentons en section 3.3. et 3.4 les variables de décision, les contraintes, la fonction objectif ainsi que le programme linéaire résultant. Par ailleurs, outre les sillons commerciaux à produire, des sillons techniques (ou sillons de repositionnement) sont également considérés dans la construction du plan de transport afin d'offrir des possibilités de repositionnement "à vide" des engins (aussi appelées repositionnement "haut-le-pied" ou "W") et d'équilibrer la planification des engins. La couverture intégrée des étapes de repositionnement n'a pas été prise en compte dans le modèle mathématique proposé. Néanmoins, nous présentons en section 3.5 les éléments de modélisation permettant de les intégrer dans le modèle.

3.1 Eléments de contexte

Dans ce chapitre, nous visons à modéliser de manière détaillée le problème de planification intégrée des engins et des Agents de Conduite (AdC) dans un réseau ferroviaire. L'objectif est de satisfaire les besoins en ressources de traction et de conduite d'un ensemble de S sillons. Chaque sillon $s \in \mathcal{S}$ est découpé en ES_s étapes sillons en raison des caractéristiques techniques de l'infrastructure, et chaque étape sillon $es \in \mathcal{ES}_s$ correspond à une ou plusieurs étapes engins lesquelles varient selon le nombre d'engins affecté à une étape sillon. Cette dernière est découpée en EC_{es} étapes conducteurs (appelées également étapes AdC). Une étape conducteur représente la plus petite tâche insécable qu'un agent de conduite peut assurer de bout en bout. Il peut y avoir plusieurs étapes engins en parallèle associées à une même étape sillon $es \in \mathcal{ES}_s$. En pratique, ceci correspond à l'utilisation de plusieurs engins en unités multiples (UM) pour la couverture de es . Il faut noter qu'une étape engin a les mêmes heures de départ et d'arrivée que l'étape sillon dont elle dépend. En revanche, une étape sillon est associée soit à une seule étape conducteur de bout en bout, auquel cas elles ont la même structure spatio-temporelle, soit à plusieurs étapes conducteurs en séquence. Ces dernières ont des heures de départ et d'arrivée spécifiques (comprises entre les heures de départ et d'arrivée de l'étape sillon). L'objectif est de déterminer les plans optimisés des engins et des agents de conduite de manière à couvrir l'ensemble des étapes sillons (et plus précisément l'ensemble des S sillons), en assurant la compatibilité des qualifications entre les engins et les AdC affectés à une même étape sillon. La figure 3.1 résume les différentes phases de découpage du sillon évoquées ci-dessus.

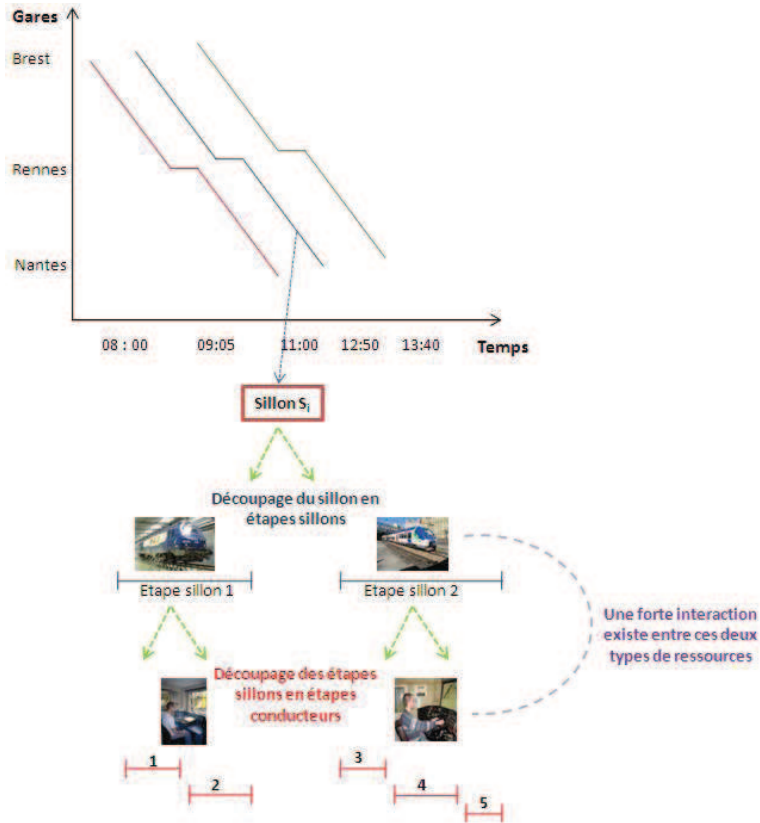


FIGURE 3.1 – Phases de découpage du sillon

La charge de travail considérée est composée d'étapes sillons et d'étapes AdC ; la production d'un sillon $s \in \mathcal{S}$ requiert la couverture de toutes les étapes sillons et de toutes les étapes AdC qui le composent (i.e : la couverture en engins de toutes les étapes sillons de $\mathcal{ES}_s$ et en AdC de toutes les étapes conducteurs de $\bigcup_{es \in \mathcal{ES}_s} \mathcal{EC}_{es}$).

Les deux problèmes de planification (engins et agents) peuvent dans un premier temps être modélisés indépendamment, avant d'ajouter des contraintes couplantes qui modélisent la forte interaction qui existe entre ces deux ressources ferroviaires critiques, en particulier la compatibilité entre les ressources engins et les profils AdC sélectionnés pour la couverture d'une même étape sillon. Deux manières de modéliser le problème de planification des agents de conduite peuvent être envisagées, qui diffèrent l'une de l'autre selon la façon de considérer le problème métier de la planification des AdC :

1. Dans le premier cas, la construction de journées de service se fait par roulement AdC. Un roulement AdC est caractérisé par un profil de qualification et une résidence à laquelle sont rattachés des AdC. Pour chaque roulement $r \in \mathcal{R}$, $\text{res}_r \in \mathcal{RES}$ désigne la résidence à laquelle est associée le roulement r , et $\text{pq}_r \in \mathcal{PQ}$ le profil de qualification des AdC appartenant au roulement r . Les agents de conduite appartenant à un même roulement ont les mêmes connaissances en termes de lignes et d'engins ferroviaires, ce qui nous conduit à associer à chaque profil de qualification AdC un (ou plusieurs) couple(s) (ligne, type d'engins) valide(s) pour le roulement. Chaque roulement $r \in \mathcal{R}$ comporte un effectif limité d'AdC qu'il faudra affecter à des journées de service puis à des GPT¹ organisées dans une grille de service AdC. L'objectif est de déterminer une grille de service AdC optimisée car permettant de couvrir au mieux l'ensemble des étapes conducteurs à moindre coût.
2. Dans le deuxième cas, on traite le problème de façon à considérer toutes les étapes conducteurs $ec \in \mathcal{EC}$ à couvrir, en construisant des journées de service homogènes par rapport à un profil de qualification $pq \in \mathcal{PQ}$. Chaque profil de qualification caractérise un ou plusieurs roulements. Il va donc falloir affecter chaque journée de service construite pour le profil de qualification $pq \in \mathcal{PQ}$ à un roulement $r \in \mathcal{R}$ selon certaines contraintes de localisation des résidences, structurant le roulement par rapport aux gares de prise et de fin de service d'un AdC dans sa journée de travail. Une répartition optimale par roulement AdC est alors nécessaire.

Nous exposons dans la figure 3.2 les deux cas de modélisation proposés ; dans le premier cas la planification des AdC se fait par roulement AdC tandis que dans le second, elle se fait par profil de qualification AdC.

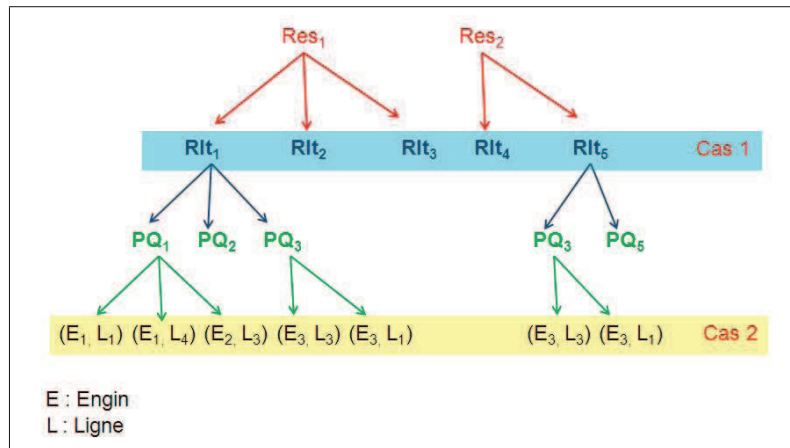


FIGURE 3.2 – Approches de modélisation du problème de planification des AdC

Remarque 1 : On notera que, par souci de lisibilité, nous ne traitons dans ce chapitre que le premier cas énoncé ci-dessus. Il n'y a cependant aucune différence, vis-à-vis des enjeux économiques de la problématique de planification intégrée des ressources, à choisir l'une ou l'autre modélisation.

1. Grande Période de Travail : séquence de journées de service (et donc d'étapes conducteurs) produites par un AdC entre le départ de sa résidence et le retour à sa résidence.

3.2 Formalisation des données du problème

Nous présentons dans ce qui suit les notations des différents éléments constituant le modèle mathématique proposé pour traiter le problème de planification intégrée des ressources engins et AdC.

Les indices :

s	identifiant de sillon ; $1 \leq s \leq S$.
es	identifiant d'étape sillon ; $1 \leq es \leq ES$.
r	identifiant de roulement AdC ; $1 \leq r \leq R$.
ec	identifiant d'étape AdC ; $1 \leq ec \leq EC$.
$es(ec)$	identifiant de l'étape sillon es correspondante à l'étape AdC ec ; $1 \leq es(ec) \leq ES$.
j	identifiant de journée de service à construire ; $1 \leq j \leq JS$.
l	identifiant d'engins ; $1 \leq l \leq L$.
kl	identifiant de type d'engin ; $1 \leq kl \leq KL$.
k	identifiant de la position d'une étape AdC ec dans la journée de service $j \in JS$; $1 \leq k \leq K$, K étant le nombre maximum d'étapes AdC dans une JS (valeur à estimer).
pq	identifiant du profil de qualification de l'AdC ; $1 \leq pq \leq PQ$.
g	identifiant de gare ferroviaire ; $1 \leq g \leq GARES$.
$as(g, kl)$	identifiant d'arc-source ; $1 \leq as(g, kl) \leq ASOURCE$.
$ap(g, kl)$	identifiant d'arc-puits ; $1 \leq ap(g, kl) \leq APUITS$.

Les ensembles :

S	ensemble des S sillons commerciaux considérés dans notre étude.
ES_s	ensemble des ES_s étapes sillons composant le sillon commercial $s \in S$.
ES	ensemble des ES étapes sillons à couvrir, i.e. $ES = \bigcup_{s \in S} ES_s$.
EC_{es}	ensemble des EC_{es} étapes conducteurs composant l'étape sillon $es \in ES$.
EC	ensemble des EC étapes conducteurs à couvrir en AdC, i.e. $EC = \bigcup_{es \in ES} EC_{es}$.
L	ensemble des L engins.
KL	ensemble des KL séries d'engins.
$VKL_{es} \subseteq KL$	ensemble des VKL_{es} séries d'engins valides sur l'étape sillon $es \in ES$.
R	ensemble des R roulements AdC.
JS	ensemble des JS journées de services à construire.
$JS_r \subset JS$	ensemble de JS_r journées de services à construire pour chaque roulement d'AdC $r \in R$.
PQ	ensemble des PQ profils de qualification des AdC.
$VPQ_{es} \subseteq PQ$	ensemble des VPQ_{es} profils de qualifications des AdC valides sur l'étape sillon $es \in ES$.
$INCOMP_{kl}$	ensemble des types d'engins incompatibles avec le type d'engin kl ; notons que ces incompatibilités sont supposées indépendantes de l'étape sillon à couvrir ; elles s'appliquent uniquement aux engins actifs d'une UM.
$GARES$	ensemble des $GARES$ gares du réseau ferré étudié.
RES	ensemble des RES résidences d'appartenance des AdC.
UC	ensemble des UC unités de conduite (unités de rattachement) des AdC.
$ASOURCE$	ensemble des $ASOURCE$ arcs-source (cf. section 3.3.2).
$APUITS$	ensemble des $APUITS$ arcs-puit (cf. section 3.3.2).

Les étapes sillons :

Max_{actif}	nombre maximal d'engins actifs dans une UM affectés à une étape sillon $es \in \mathcal{ES}$.
Max_{total}	nombre total maximal d'engins (actifs + passifs) dans une UM affectés à une étape sillon $es \in \mathcal{ES}$.
$\forall s \in \mathcal{S}, es \in \mathcal{ES}_s;$	
$Orig_{es}$	gare d'origine de l'étape sillon es .
$Dest_{es}$	gare de destination de l'étape sillon es .
$Dept_{es}$	heure de départ de l'étape sillon es .
$Arriv_{es}$	heure d'arrivée de l'étape sillon es .
$Esil_{es}$	numéro du sillon associé à l'étape sillon es (ici $Esil_{es} = s$).
prc_{es}	étape sillon qui précède l'étape sillon es dans $Esil_{es}$.
suc_{es}	étape sillon qui succède l'étape sillon es dans $Esil_{es}$.
PAF_{es}	prestation à fournir (en termes de capacité de traction et d'emport de voyageurs) pour produire l'étape sillon es .
VKL_{es}	types d'engins valides sur l'étape sillon commerciale es .

Les étapes AdC :

$\forall s \in \mathcal{S}, es \in \mathcal{ES}_s, ec \in \mathcal{EC}_{es};$	
$Orig_{ec}$	gare d'origine de l'étape conducteur ec .
$Dest_{ec}$	gare de destination de l'étape conducteur ec .
$Dept_{ec}$	heure de départ de l'étape conducteur ec .
$Esil_{ec}$	étape sillon associée à l'étape conducteur ec (ici $Esil_{ec} = es$).
prc_{ec}	étape conducteur qui précède l'étape conducteur ec dans $Esil_{ec}$.
suc_{ec}	étape conducteur qui suit l'étape conducteur ec dans $Esil_{ec}$.
d_{ec}	durée de l'étape conducteur ec .
d_0h30_{ec}	durée de l'étape conducteur ec comprise dans la période [00h30-04h30].
d_23h_{ec}	durée de l'étape conducteur ec comprise dans la période [23h-06h].
d_Parc_{ec,ec_1}	durée nécessaire à un AdC pour aller de la gare de destination de l'étape conducteur ec à la gare d'origine de l'étape conducteur ec_1 .
$dMin_ETAdC$	durée minimale d'une étape AdC.
DM_JS	durée moyenne de travail d'un AdC dans une journée de service.
DT_AdC	la durée totale de l'ensemble des étapes AdC. Autrement dit, il s'agit de $\sum_{ec \in \mathcal{EC}} d_{ec}$.

Les engins ferroviaires :

$\forall kl \in \mathcal{KL};$	
cap^{kl}	la capacité (exprimée, suivant le contexte, en voyageurs emportés ou en masse tractée) d'un engin de type kl .
TL^{kl}	la taille du parc d'engins de type kl .
CA_{kl}	coût d'affectation d'un engin actif ² de type kl à une étape sillon.
CP_{kl}	coût d'affectation d'un engin passif ³ de type kl à une étape sillon.
CE_{kl}	coût d'engagement d'un engin de type kl .
CV_{kl}	coût d'exploitation d'un engin de type kl en repositionnement à vide.
$\forall l \in \mathcal{L};$	
$Type_l \in \mathcal{KL}$	type de l'engin l .
$Gare - dispo(l) \in \mathcal{GARES}$	gare où l'engin l est disponible.
$Date - dispo(l)$	date à laquelle l'engin l est disponible.
$Atelier(l) \in \mathcal{GARES}$	atelier de maintenance auquel est attaché l'engin l .

2. Engin nécessaire à la couverture commerciale d'une étapes sillons.

Les agents de conduite :

$dMinTr_23h$	durée minimale que doit travailler un AdC dans la période 23h-06h pour que la réglementation de travail relative à cette période lui soit appliquée (valeur par défaut : 1h30).
dTr_23h	durée maximale de travail d'un AdC dans la période 23h-06h (valeur par défaut : 7h).
$dMinTr_0h30$	durée minimale que doit travailler un AdC dans la période 00h30-04h30 pour que la réglementation de travail relative à cette période lui soit appliquée (valeur par défaut : 2h).
dTr_0h30	durée maximale de travail d'un AdC dans la période 00h30-04h30 (valeur par défaut : 4h).
$Tdep$	durée maximale permise pour qu'un agent se déplace d'une gare à l'autre (valeur par défaut : 30min).
$Ampl$	amplitude maximale d'une journée de travail d'un AdC (valeur par défaut : 11h).
$TrvEff$	durée de travail effectif maximale d'un agent de conduite (valeur par défaut : 9h).
$TrvEff_23h$	durée de travail effectif maximale d'un agent de conduite lorsque sa journée de service comporte une période de travail ($\geq dMinTr_23h$) entre 23h et 06h (valeur par défaut : 08h).
$TrvEff_0h30$	durée de travail effectif maximale d'un agent de conduite lorsque sa journée de service comporte une période de travail ($\geq dMinTr_0h30$) entre 00h30 et 04h30 (valeur par défaut : 07h).
TP_r	taille du parc AdC du roulement $r \in \mathcal{R}$.
$res_r \in \mathcal{RES}$	résidence associée au roulement $r \in \mathcal{R}$.
$pqr \in \mathcal{PQ}$	profil de qualification du roulement $r \in \mathcal{R}$.
$dRes$	durée de trajet maximale autorisée entre la localisation de la résidence de rattachement d'un AdC et sa gare de prise ou de fin de service.

Remarque 2 : La taille TP_r du roulement r représente, sur une journée de travail, le nombre maximum de journées de service (JS) autorisées dans le roulement r . Cela représente également la capacité maximale disponible du roulement r . Le nombre de JS ainsi construites serait équivalent au nombre d'AdC nécessaires à la couverture des étapes AdC sur une journée de travail. En revanche, lors de la construction de GPT (Grandes Périodes de Travail) et de grilles de service AdC par roulement r , TP_r correspond au nombre maximum d'AdC disponibles dans le roulement r sur une semaine type. Ainsi, le nombre de lignes de la grille de service AdC d'un roulement r sera équivalent au nombre d'AdC nécessaire pour la couverture de l'ensemble de la charge de travail induite par la production des sillons et affectée au roulement r .

Estimation des paramètres

Estimation du paramètre K

$$K = \left\lceil \frac{TrvEff}{dMin_ETAdC}(\alpha + 1) \right\rceil \quad \alpha : \text{paramètre de dilatation.} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

Estimation du paramètre JS/JS_r

Le nombre maximum de journées de services JS à construire est calculé comme suit :

$$JS = \left\lceil \frac{DT}{DM_JS} AdC (\beta + 1) \right\rceil + 1 \quad \beta : \text{paramètre de "dilatation" permettant une légère surestimation de JS.} \\ 0 \leq \beta \leq 1$$

Le nombre maximum de JS_r à construire pour un roulement $r \in \mathcal{R}$ est "calculé" comme suit : $\forall r \in \mathcal{R} \quad JS_r \leq TP_r$

3. Engin repositionné à vide (sans transport de voyageurs).

Remarque 3 : La durée moyenne DM_JS de travail d'un AdC est estimée à partir des données.

Compatibilité entre les séries et les AdC :

$\forall r \in \mathcal{R}, \forall es \in \mathcal{ES}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es}$

$$Compt_{r,kl}^{es} = \begin{cases} 1 & \text{si le profil de qualification du roulement } r \text{ est compatible} \\ & \text{avec la série d'engins } kl \text{ pour l'étape sillon } es, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Cette donnée exprime la compatibilité entre l'engin ferroviaire et l'AdC affectés à une même étape sillon. Plus précisément, elle représente la capacité d'un AdC de profil de qualification pqr à conduire un engin ferroviaire de série kl sur la ligne caractérisée par l'étape sillon es .

Localisation des résidences par rapport aux gares de prise et de fin de service :

$\forall r \in \mathcal{R}, \forall ec \in \mathcal{EC}$

$$dist(res_r, Orig_{ec}) = \begin{cases} 1 & \text{si la durée de trajet entre la localisation de la résidence} \\ & res_r \in \mathcal{RES} \text{ du roulement } r \in \mathcal{R} \text{ et la gare de début de} \\ & \text{l'étape AdC } ec \in \mathcal{EC} \text{ (Orig}_{ec}) \text{ est inférieure ou égale à } dRes, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$dist(res_r, Dest_{ec}) = \begin{cases} 1 & \text{si la durée de trajet entre la localisation de la résidence} \\ & res_r \in \mathcal{RES} \text{ du roulement } r \in \mathcal{R} \text{ et la gare de fin de} \\ & \text{l'étape AdC } ec \in \mathcal{EC} \text{ est inférieure ou égale à } dRes, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

3.3 Modélisation du problème

Nous présentons dans cette section les variables de décision, les contraintes et la fonction objectif constituant le problème de planification intégrée engins/AdC.

3.3.1 Variables de décision

$\forall s \in \mathcal{S}$

$$es_s = \begin{cases} 1 & \text{si le sillon } s \text{ n'est pas produit (i.e. au moins une étape de } \mathcal{ES}_s \\ & \text{n'est pas couverte en ressources engin ou AdC),} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\forall es \in \mathcal{ES}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es}$$

$$Y_{kl,es} = \begin{cases} 1 & \text{si un engin de série } kl \text{ est choisi pour la couverture de l'étape sillon } es, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\forall es \in \mathcal{ES}$$

$$ee_{es} = \begin{cases} 1 & \text{si l'étape sillon } es \text{ n'est pas couverte en engins,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\forall es \in \mathcal{ES}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es},$$

$$nl_{kl,es} \quad \text{nombre (entier) d'engins valides (actifs) de série } kl \text{ affectés à l'étape sillon } es.$$

$$\forall es \in \mathcal{ES}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es},$$

$$nlp_{kl,es} \quad \text{nombre (entier) d'engins passifs de série } kl \text{ engagés sur l'étape sillon } es.$$

$$\forall kl \in \mathcal{KL},$$

$$n_{kl} \quad \text{nombre (entier) total d'engins de série } kl \text{ engagés.}$$

$$\forall kl \in \mathcal{KL},$$

$$TpsTrajet_{j,k} \quad \text{durée de trajet entre la gare de destination de l'étape conducteur en position } k \text{ et la gare d'origine de l'étape en position } k + 1 \text{ dans la journée de travail } j \text{ (changement de gare).}$$

$$\forall j \in \mathcal{JS}, \forall 1 \leq k < K,$$

$$TpsInterTache_{j,k} \quad \text{durée d'attente entre deux étapes AdC consécutives situées aux rangs } k \text{ et } k + 1 \text{ dans la journée de service } j, \text{ à laquelle on ajoute la durée éventuelle de déplacement.}$$

$$\forall j \in \mathcal{JS}, \forall ec \in \mathcal{EC}, \forall 1 \leq k \leq K.$$

$$X_{j,ec,k} = \begin{cases} 1 & \text{si la journée de service (JS) } j \text{ couvre l'étape conducteur } ec \text{ en position } k. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

La journée de service j représente la journée de travail d'un agent de conduite.

$$\forall ec \in \mathcal{EC}$$

$$ea_{ec} = \begin{cases} 1 & \text{si aucune journée de service } j \text{ n'est choisie pour la couverture de l'étape AdC } ec, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\forall j \in \mathcal{JS}$$

$$TrvNuit_{23h_j} = \begin{cases} 1 & \text{si la journée de service } j \text{ couvre des étapes conducteur comportant une période de travail entre 23h et 6h et dont la somme des durées est supérieure ou égale à } dMinTr_{23h}. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$\forall j \in \mathcal{JS}$$

$$TrvNuit_0h30_j = \begin{cases} 1 & \text{si la journée de service } j \text{ couvre des étapes conducteur comportant} \\ & \text{une période de travail entre 0h30 et 4h30 et dont la somme des durées} \\ & \text{est supérieure ou égale à } dMinTr_0h30, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

3.3.2 Contraintes d'utilisation des engins

Expression des besoins en engins ferroviaires pour la couverture des étapes sillons

La production d'une étape sillon implique que des engins de types valides et en nombre suffisant soient affectés à cette étape sillon. Il en résulte que pour chaque engin (actif, passif) affecté à l'étape sillon, une étape engin lui est associée, dont la structure spatio-temporelle est similaire à celle de l'étape sillon.

La composition d'Unités Multiples (UM) doit être prise en compte pour les étapes sillons nécessitant une capacité d'emport de voyageurs ou de traction supérieure à celle d'un seul engin. Les engins repositionnés en véhicule, dits aussi "passifs", sont également pris en compte et peuvent être intégrés dans la composition d'UM afin d'être repositionnés entre deux gares.

L'expression des besoins en engins ferroviaires pour la couverture des étapes sillons peut être envisagée de deux façons :

- le besoin est exprimé de façon explicite, i.e. on dispose d'une énumération de toutes les compositions d'UM valides et suffisantes pour assurer la production de l'étape sillon ;
- l'expression des besoins est implicite : dans ce cas, l'énumération explicite de toutes les compositions d'UM valides n'est pas disponible ; le choix des types d'engins valides et du nombre adéquat de ressources affectées constituent alors un levier de décision supplémentaire à intégrer dans la problématique.

D'un point de vue métier, il est plus fréquent et plus approprié d'adopter une expression implicite des besoins en engins ferroviaires pour la couverture des étapes sillons.

Par ailleurs, la nature homogène ou hétérogène des engins d'une UM est un point important à prendre en compte, ce qui nous conduit à considérer deux problématiques sensiblement différentes :

- un seul type d'engin peut être affecté à chaque étape sillon (UM homogènes),
- une UM peut contenir des engins de types différents (UM hétérogènes).

D'un point de vue métier, il est également plus fréquent de se trouver dans le cas où les unités multiples contiennent des engins de types différents. A ce niveau, la prise en compte des compatibilités entre engins actifs d'une même UM est nécessaire. Il convient donc, dans une optique de généricité, de proposer une version unifiée du modèle pour représenter les différentes problématiques ci-dessus. La modélisation proposée est issue des travaux de N. Marcos [38], et repose sur une représentation des données et des paramètres du problème étudié par un graphe spatio-temporel ; ce type de graphe intègre les contraintes structurantes sur les circulations d'engins. Il est ensuite exploité pour formuler un Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) dans lequel sont intégrées les contraintes de structuration et de couverture de la charge de travail, et de respect des contraintes techniques et fonctionnelles liées à l'utilisation des engins. Ce PLNE permet de déterminer le flot sur chacun des arcs du graphe évoqué ci-dessus, ce qui exprime la circulation d'engins sur le réseau et leur affectation à des étapes sillons. La recherche d'un multi-flot résulte de l'hétérogénéité du parc de ressources considéré : plusieurs ensembles de ressources aux caractéristiques distinctes doivent être appréhendés par autant de flots différents. En définitive, le parc d'engins ferroviaires peut être décomposé en un ensemble $\mathcal{KL}=1,2,..., KL$

de flots, les engins de chaque flot étant complètement interchangeables et vérifiant les critères suivants :

- les engins ont la même capacité de traction ou d'emport de voyageurs,
- ils sont valides sur exactement les mêmes étapes sillons,
- ils ont les mêmes coûts (affectation passive, affectation active, etc.),
- ils doivent être compatibles entre eux. En effet, il s'agit là d'une des spécificités de la production ferroviaire qui interdit d'associer certains types d'engins dans la composition d'une UM.

Construction du graphe spatio-temporel

Le graphe spatio-temporel $G = (N, A)$ schématisé en figure 3.3 représente les données métiers concernant la charge de travail et les engins ; ce graphe structure les possibilités de circulation des engins dans le respect des contraintes de la production ferroviaire (délais opérationnels en gare, enchaînements des étapes engins, etc.).

L'ensemble N des noeuds du graphe G est composé de cinq types de noeuds :

- $\mathcal{NDEP}$: ensemble de $Ndep$ noeuds-départ (par analogie avec le contexte industriel, il s'agit de l'ensemble des couples (gare départ, horaire départ) des étapes sillons),
- $\mathcal{NARR}$: ensemble de $Narr$ noeuds-arrivée (en pratique, il s'agit des couples (gares d'arrivée, horaire d'arrivée des étapes sillons),
- $\mathcal{NATT}$: ensemble de $Natt$ noeuds-attente,
- $\mathcal{S}_{kl \in \mathcal{KL}}$: un ensemble $\mathcal{S}_{kl \in \mathcal{KL}}$ de noeuds-source associés aux différents types d'engins,
- P : un unique noeud-puits.

L'ensemble A des arcs du graphe G est composé également de cinq types d'arcs :

- $\mathcal{ATACHE}$: ensemble de $Atache$ arcs-tâche. Par analogie avec le contexte métier, il s'agit de l'ensemble des étapes sillons $\mathcal{ES}$ à couvrir par des ressources engins ferroviaires pour chaque sillon $s \in \mathcal{S}$. Autrement dit, $\cup_{s \in \mathcal{S}} \mathcal{ES}_s$. Chaque étape sillon $es \in \mathcal{ES}$ est donc représentée dans le graphe par un arc tâche reliant un noeud-départ ($Orig_{es}$) et un noeud-arrivée ($Dest_{es}$),
- $\mathcal{ACO}$: ensemble de Aco arcs-connexion,
- $\mathcal{AVID}$: ensemble de $Avid$ arcs-à-vide (déplacements des véhicules en haut le pied). Le modèle prend en compte les possibilités de repositionnements "à vide" des engins ferroviaires sur le réseau au cours de l'horizon de planification en les intégrant dans le graphique espace-temps via l'ensemble des arcs $\mathcal{AVID}$,
- $\mathcal{AATT}$: ensemble de $Aatt$ arcs-attente,
- $\mathcal{ASOURCE}$: ensemble de $Asource$ arcs-source $\subseteq Aatt$,
- $\mathcal{APUITS}$: ensemble de $Apuits$ arcs-puits $\subseteq Aatt$.

Remarque 4 : Les repositionnements "à vide" correspondent à des circulations d'engins en unité simple (US) ou unité multiple (UM) (plusieurs engins passifs) entre deux gares sans production d'étapes sillons associées à des sillons commerciaux. Ces possibilités de repositionnements contribuent à l'équilibrage des circulations et à la minimisation du nombre total d'engins nécessaires pour produire une charge de travail puisqu'ils peuvent rendre réalisables des enchaînements d'étapes sillons qui seraient impossibles sinon. La couverture de ces étapes de repositionnement en engins ferroviaires est exposée en section 3.5.

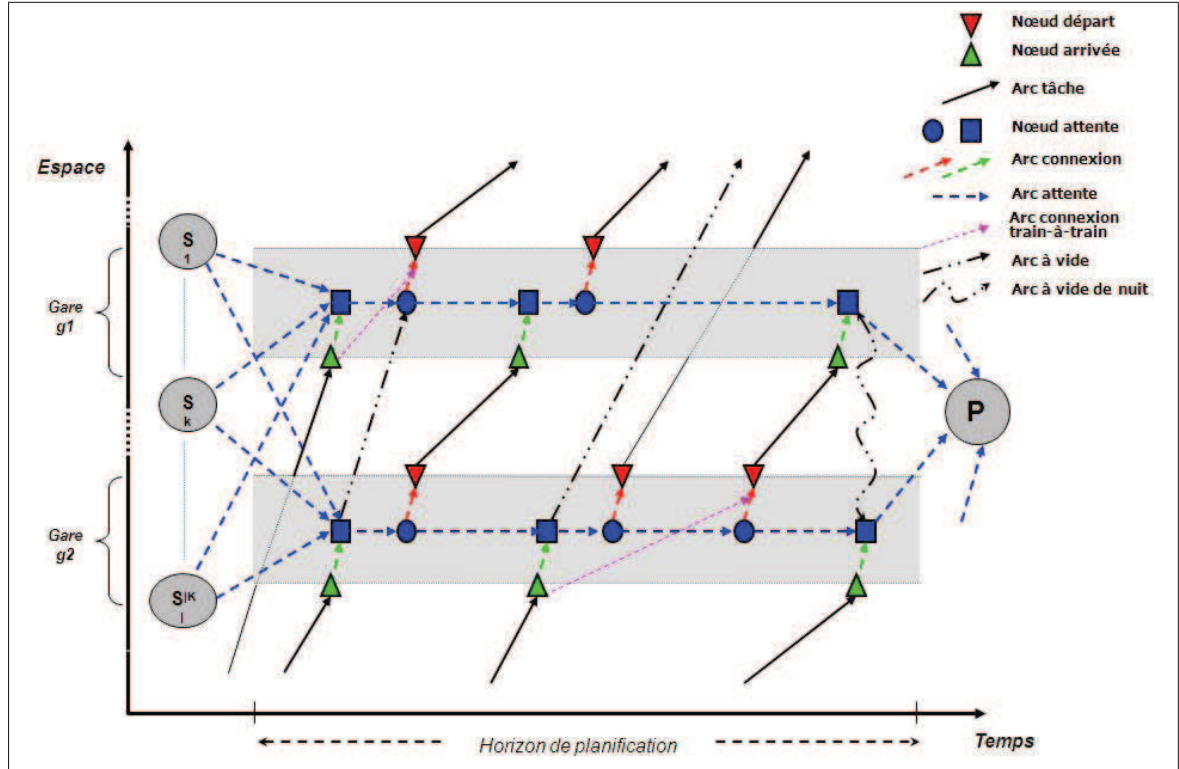


FIGURE 3.3 – Graphique espace-temps.

Modèle d'optimisation mathématique associé au graphe spatio temporel

Contraintes de couverture des étapes sillons (couverture de la charge de travail)

Ces contraintes assurent, d'une part, que des engins de types valides et en nombre suffisant sont affectés aux étapes sillons et, d'autre part, qu'un sillon est couvert si et seulement si toutes ses étapes sillons sont couvertes.

$$\forall es \in \mathcal{ES} \quad \sum_{kl \in \mathcal{VKL}_{es}} Y_{kl,es} + ee_{es} = 1 \quad (3.1)$$

Ces contraintes assurent que, pour chaque étape sillon $es \in \mathcal{ES}$, au plus un flot de type $kl \in \mathcal{VKL}_{es}$ lui est affecté. Ces flots sont choisis parmi les flots valides sur l'étape sillon $es \in \mathcal{ES}$; si aucun flot valide ne peut être affecté à cette étape sillon, la variable ee_{es} prend la valeur 1.

$$\forall es \in \mathcal{ES} \quad \sum_{kl \in \mathcal{VKL}_{es}} nl_{kl,es} Cap^{kl} \geq PAF_{es} \cdot (1 - ee_{es}) \quad (3.2)$$

Cette contrainte est imposée uniquement dans le cas où l'expression des besoins en engins est exprimée implicitement. Elle assure que, pour chaque étape sillon $es \in \mathcal{ES}$, les engins valides de série kl affectés à cette étape sillon doivent avoir une capacité de traction ou d'export de voyageurs supérieure ou égale à la capacité requise pour produire l'étape sillon es ; dans le cas contraire, la variable ee_{es} prend alors la valeur 1 et $nl_{kl,es}$ la valeur 0. On rappelle que PAF_{es} est la prestation à fournir sur l'étape sillon es en termes de capacité de traction des engins ferroviaires ou d'export de voyageurs.

$$\forall es \in \mathcal{ES} \quad \sum_{kl \in \mathcal{VKL}_{es}} nl_{kl,es} \leq Max_{actif} \quad (3.3)$$

La contrainte (3.3) de couverture assure que le nombre d'engins valides sur une étape sillon es ne dépasse pas le nombre maximal d'engins actifs autorisés.

$$\forall es \in \mathcal{ES}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es} \quad nlp_{kl,es} \leq Max_{actif} \cdot Y_{kl,es} \quad (3.4)$$

La contrainte (3.4) assure que, si l'étape sillon $es \in \mathcal{ES}$ n'est pas couverte avec des engins de série valide $kl \in \mathcal{VKL}_{es}$, alors le nombre d'engins de série kl engagé est égale à 0.

$$\forall s \in \mathcal{S} \quad \sum_{es \in \mathcal{ES}_s} ee_{es} \leq es_s ES_s \quad (3.5)$$

La contrainte (3.5) impose que, si au moins une étape sillon $es \in \mathcal{ES}$ associée au sillon $s \in \mathcal{S}$ n'est pas couverte en engins, alors le sillon s n'est pas produit. On peut considérer (3.5) comme une contrainte couplante.

$$\forall es \in \mathcal{ES}, kl \in \mathcal{VKL}_{es} \quad Y_{kl,es} + \sum_{kl' \in INCOMP(kl)} Y_{kl',es} \leq 1 \quad (3.6)$$

Cette contrainte doit être assurée dans le cas d'UM hétérogènes. Elle permet d'intégrer une spécificité de la production ferroviaire, à savoir les incompatibilités de matériel, qui interdit d'associer certains types d'engins dans la composition d'une UM.

Contraintes de circulation des ressources

$$\forall es \in \mathcal{ES} \quad \sum_{kl \in \mathcal{KL}} nlp_{kl,es} \leq Max_{total} \sum_{kl \in \mathcal{VKL}_{es}} Y_{kl,es} \quad (3.7)$$

Cette contrainte assure qu'aucun flot passif ne peut être engagé sur une étape sillon $es \in \mathcal{ES}$ si cette étape ne porte aucun flot actif.

$$\forall i \in N, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es} \quad \sum_{a \in \mathcal{In}(i)} (Y_{kl,a} + nlp_{kl,a}) = \sum_{a \in \mathcal{Out}(i)} (Y_{kl,a} + nlp_{kl,a}) \quad (3.8)$$

Cette contrainte assure que la somme des flots portés par les arcs entrant dans un noeud i du graphe est égale à la somme des flots portés par les arcs sortant de ce noeud. Cette contrainte classique de conservation des flots a pour but d'assurer la cohérence des circulations des unités de flots dans le graphe, que ces unités soient considérées comme actives (unités affectées pour la traction) ou passives (unités repositionnées (à vide)).

Contraintes de capacité des ensembles de ressources

La contrainte de capacité des ensembles d'engins assure que le nombre d'engins engagés ne dépasse pas la taille des ensembles de ressources disponibles pour chaque série d'engins.

$$\forall kl \in \mathcal{KL} \quad n_{kl} \leq TL^{kl} \quad (3.9)$$

Contraintes de cyclicité des affectations

Rechercher un planning cyclique revient à déterminer un ensemble de séquences d'étapes sillons qui puisse se répéter cycliquement avec les mêmes flots de ressources. Une condition nécessaire et suffisante pour obtenir un planning cyclique est donc de s'assurer que le nombre d'engins de chaque flot présents dans chaque gare est le même au début et à la fin de l'horizon temporel de planification. Cette condition est assurée par la contrainte ci dessous :

$$\forall kl \in \mathcal{KL}, \forall g \in \mathcal{GARES} \quad nlp_{kl,as(kl,g)} = nlp_{kl,ap(kl,g)} \quad (3.10)$$

La contrainte (3.10) garantit que, pour chaque gare $g \in \mathcal{GARES}$ et chaque flot $kl \in \mathcal{KL}$, le nombre d'unités de flot kl sur l'arc source as associé au flot kl et à la gare g est égal au nombre d'unités de flot kl sur l'arc puit ap associé au flot kl et à la gare g .

3.3.3 Contraintes d'utilisation des AdC

Contraintes de couverture des étapes AdC et de cohérence des planifications AdC

Les contraintes de couverture assurent que chaque étape AdC $ec \in \mathcal{EC}$ est couverte par au plus une journée de service j appartenant à un roulement r . Autrement dit, une étape AdC est prise en charge par au plus un AdC d'un roulement r lorsque la capacité du parc AdC de ce roulement le permet. Si aucune journée de service ne peut couvrir l'étape AdC ec , alors la variable ea_{ec} prend la valeur 1.

$$\forall ec \in \mathcal{EC} \quad \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{JS}_r} \sum_{k=1}^K X_{j,ec,k} + ea_{ec} = 1 \quad (3.11)$$

Une étape AdC $ec \in \mathcal{EC}$ est couverte par une journée de service j du roulement $r \in \mathcal{R}$ seulement si le profil de qualification de ce roulement est valide sur l'étape sillon $es \in \mathcal{ES}$ à laquelle est associée l'étape AdC ec .

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall es \in \mathcal{ES}, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es} \quad \sum_{j \in \mathcal{JS}_r} \sum_{k=1}^K X_{j,ec,k} \leq \text{Comp}_{pq_r}^{es} \quad (3.12)$$

Il y a au plus une étape AdC à chaque position k de la JS j .

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall 1 \leq k \leq K \quad \sum_{ec \in \mathcal{EC}} X_{j,ec,k} \leq 1 \quad (3.13)$$

Une étape AdC est placée en position $k+1$ si et seulement si une étape AdC est placée en position k .

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall 1 \leq k \leq K \quad \sum_{ec \in \mathcal{EC}} X_{j,ec,k} \geq \sum_{ec' \in \mathcal{EC}} X_{j,ec',k+1} \quad (3.14)$$

Contraintes de succession des étapes AdC dans une journée de travail

L'étape AdC $ec_1 \in \mathcal{EC}$ se trouvant en position $k+1$ de la journée de service j succède à l'étape AdC $ec \in \mathcal{EC}$ se trouvant en position k si et seulement si l'heure de début de l'étape AdC ec_1 est supérieure à l'heure d'arrivée de l'étape AdC ec .

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall (ec, ec') \in \mathcal{EC}^2, ec \neq ec' \text{ tq } \text{Dept}_{ec'} < \text{Arriv}_{ec}, \forall 1 \leq k \leq K \\ X_{j,ec,k} + X_{j,ec',k+1} \leq 1 \quad (3.15)$$

Conditions sur la localisation des résidences

Une journée de service valide $j \in \mathcal{JS}$ est affectée au roulement r si et seulement si la durée de trajet entre la résidence $res_r \in \mathcal{RES}$ du roulement $r \in \mathcal{R}$, et la gare de prise de service ou la gare de fin de service de la JS j est inférieure ou égale à $dRes$. Autrement dit, une étape AdC $ec \in \mathcal{EC}$ est couverte par une journée de service de roulement r , $j_r \in \mathcal{JS}_r$, à la position $k = 1$ si et seulement si la durée de trajet séparant la localisation de la résidence res_r et la gare de début de l'étape AdC ec est inférieure ou égale à $dRes$. De même, elle est couverte par $j_r \in \mathcal{JS}_r$, à la position $k = K$ (il faut cependant connaître le K réel dans la journée de service) si et seulement si la durée de trajet séparant la gare de fin de l'étape AdC ec et la localisation de la résidence res_r est inférieure ou égale à $dRes$. Ces conditions sont modélisées à l'aide de variables binaires indicatrices $U_{j,ec}^1$ et $V_{j,ec}^k$.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall ec \in \mathcal{EC}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \quad X_{j,ec,1} \leq \text{dist}(res_r, \text{Orig}_{ec}) + U_{j,ec}^1 \quad (3.16)$$

Cette contrainte assure que si ($U_{j,ec}^1 = 0$) et ($X_{j,ec,1} = 1$), alors la contrainte de localisation des résidences par rapport à la gare de prise de service est satisfaite. Autrement dit, on a : $\text{dist}(res_r, \text{Orig}_{ec}) = 1$. Si la condition sur la localisation des résidences est satisfaite, alors $U_{j,ec}^1$ peut être égale à 0 ou 1.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall ec \in \mathcal{EC}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad X_{j,ec,k} \leq \text{dist}(\text{Dest}_{ec}, \text{res}_r) + V_{j,ec}^k \quad (3.17)$$

De la même façon, cette contrainte assure que si $(V_{j,ec}^k = 0)$ et $(X_{j,ec,k} = 1)$, alors la contrainte de localisation des résidences par rapport à la gare de fin de service est satisfaite. Autrement dit, on a : $\text{dist}(\text{Dest}_{ec}, \text{res}_r) = 1$. Si la condition sur la localisation des résidences est satisfaite, alors $V_{j,ec}^k$ peut être égale à 0 ou 1.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r \quad \sum_{ec} U_{j,ec}^1 + \sum_k \sum_{ec} V_{j,ec}^k \leq \sum_k \sum_{ec} X_{j,ec,k} \quad (3.18)$$

Cette contrainte garantit que s'il y a p positions occupées dans la journée de service, i.e. $(\sum_k \sum_{ec} X_{j,ec,k} = p)$, alors soit $(\sum_{ec} U_{j,ec}^1 = 0)$, soit $\sum_k \sum_{ec} V_{j,ec}^k \leq p - 1$.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad \sum_{ec} V_{j,ec}^k \geq \sum_{ec} V_{j,ec}^{k+1} \quad (3.19)$$

Cette contrainte de cohérence garantit que $(\sum_{ec} V_{j,ec}^{k+1} = 1)$ si et seulement si $(\sum_{ec} V_{j,ec}^k = 1)$.

Contraintes réglementaires

Travail de nuit :

Ces contraintes permettent de définir les variables de décision dépendantes associées au travail de nuit (période nocturne).

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r \quad \text{TrvNuit_23h}_j > ((\sum_{ec \in \mathcal{EC}} \sum_{k=1}^K d_{_23h_{ec}} X_{j,ec,k} - dMinTr_23h) / dTr_23h) \quad (3.20)$$

La contrainte (3.20) signifie que la journée de service j contient une période de travail de nuit comprise entre 23h et 06h ($\text{TrvNuit_23h}_j = 1$) si et seulement si la somme des durées des étapes AdC appartenant à la période [23h-06h] et contenues dans la journée de service j est supérieure ou égale à $dMinTr_23h$ (1h30 par défaut).

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r \quad \text{TrNuit_0h30}_j > ((\sum_{ec \in \mathcal{EC}} \sum_{k=1}^K d_{_0h30_{ec}} X_{j,ec,k} - dMinTr_0h30) / dTr_0h30) \quad (3.21)$$

De même, la journée de service j contient une période nocturne comprise entre 00h30 et 04h30 ($\text{TrvNuit_0h30}_j = 1$) si et seulement si la somme des durées des étapes AdC appartenant à la période [00h30-04h30] et contenues dans cette journée de service est supérieure ou égale à $dMinTr_0h30$.

Durée de travail effectif :

La durée de travail effectif d'un AdC ne doit pas dépasser une limite supérieure. La durée de travail effectif comprend la durée totale des étapes AdC composant la journée de service j , à laquelle on ajoute la moitié de la durée des déplacements à vide (haut le pied de l'AdC) entre deux gares consécutives.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r$$

$$\sum_{ec \in \mathcal{EC}} d_c \sum_{k=1}^K X_{j,ec,k} + 1/2 \sum_{k=1}^{K-1} \text{TpsTrajet}_{j,k} \leq \text{TrvEff}(1 - \text{TrvNuit_23h}_j) + \text{TrvNuit_23h}_j \quad (3.22)$$

$$\sum_{ec \in \mathcal{EC}} d_c \sum_{k=1}^K X_{j,ec,k} + 1/2 \sum_{k=1}^{K-1} \text{TpsTrajet}_{j,k} \leq \text{TrvEff}(1 - \text{TrvNuit_0h30}_j) + \text{TrvNuit_0h30}_j \quad (3.23)$$

Ces contraintes signifient que la durée de travail effective d'un agent ne doit pas dépasser :

1. $TrvEff_23h$, si sa journée comporte une période de travail d'au moins $dMinTr_23h$ entre 23h et 06h,
2. $TrvEff_0h30$, si sa journée comporte une période de travail d'au moins $dMinTr_0h30$ entre 00h30 et 04h30,
3. $TrvEff$, dans les autres cas.

Amplitude :

L'amplitude d'une journée de travail d'un AdC est calculée comme étant la somme des durées des étapes AdC contenues dans sa journée de service, à laquelle on rajoute la moitié des durées des déplacements à vide, plus la durée des pauses (voir les 2 paragraphes suivants pour le calcul de ces durées).

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r$$

$$\sum_{ec \in \mathcal{EC}} d_{ec} \sum_{k=1}^K X_{j,ec,k} + \sum_{k=1}^{K-1} TpsInterTche_{j,k} + 1/2 \sum_{k=1}^{K-1} TpsTrajet_{j,k} \leq Ampl - 3 TrvNuit_23h_j \quad (3.24)$$

Durée entre les étapes AdC (incluant les pauses) :

C'est le temps séparant le début de l'étape AdC $ec \in \mathcal{EC}$ se trouvant en position $k+1$ et la fin de l'étape AdC $ec' \in \mathcal{EC}$ se trouvant en position k .

$$\forall r \in \mathcal{R} \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall 1 \leq k < K$$

$$TpsInterTche_{j,k} \geq \sum_{ec \in \mathcal{EC}} Dept_{ec} X_{j,ec',k+1} - \sum_{ec \in \mathcal{EC}} Arriv_{ec} X_{j,ec,k} \quad (3.25)$$

Calcul de la durée de déplacement (changement de gare) :

Il est nécessaire de calculer la durée que met un agent pour se déplacer d'une gare à une autre, si toutefois un tel déplacement a lieu.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall 1 \leq k \leq K$$

$$TpsTrajet_{j,k} \geq \sum_{ec \in \mathcal{EC}} \sum_{ec' \in \mathcal{EC}} (d_Parc_{ec,ec'} (2 X_{j,ec',k+1} - X_{j,ec,k})) \quad (3.26)$$

Par ailleurs, le temps de trajet d'un agent entre deux gares (pour changement de gare) ne doit pas dépasser une limite supérieure.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{JS}_r, \forall 1 \leq k < K \quad TpsTrajet_{j,k} \leq Tdep \quad (3.27)$$

3.3.4 Contraintes couplantes engins/AdC

Nous introduisons dans ce qui suit les principales contraintes couplantes qui décrivent de la forte interaction qui existe entre les différents types de ressources étudiés dans notre problématique. Les différents types de contraintes couplantes considérés dans cette section concernent particulièrement les compatibilités entre les engins et les AdC affectés à une même étape sillon. Ces compatibilités représentent en pratique la capacité des AdC à conduire les séries d'engins engagées sur les étapes sillons. D'autres contraintes couplantes sont également considérées et prennent en compte l'interaction qui existe entre les ressources sillons, engins et AdC en termes de production de la charge de travail. Cette contrainte couplante assure la compatibilité entre l'engin $kl \in \mathcal{VKL}_{es}$ et l'AdC appartenant au roulement $r \in \mathcal{R}$ affectés à l'étape sillon $es \in \mathcal{ES}$.

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall es \in \mathcal{ES}, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es}$$

$$\sum_{j \in J_r} \sum_{k=1}^K X_{j,ec,k} + Y_{kl,es} \leq \text{Compt}_{r,kl}^{es} + 1 \quad (3.28)$$

Principes possibles de couverture des sillons commerciaux :

Par définition, un sillon n'est pas couvert (produit) si au moins une de ses étapes sillons ou AdC n'est pas couverte en engins ou AdC. Autrement dit, $\forall s \in \mathcal{S}$, si au moins une étape sillon $es \in \mathcal{ES}_s$ ou une étape AdC $ec \in \bigcup_{es \in \mathcal{ES}_s} \mathcal{EC}_{es}$ n'est pas couverte ($ee_{es} = 1$ ou $ea_{ec} = 1$), respectivement en engins ou AdC, alors le sillon s n'est pas couvert. Mathématiquement, on a :

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall es \in \mathcal{ES}_s, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es}$$

$$ea_{ec} \leq es_s \quad (3.29)$$

Rappelons que le défaut de couverture d'un sillon est modélisé dans le modèle engins par la contrainte (3.5) qui impose qu'un sillon s n'est pas produit si au moins une de ses étapes sillon $es \in \mathcal{ES}_s$ n'est pas couverte en engins ferroviaires.

$$\forall s \in \mathcal{S} \quad \sum_{es \in \mathcal{ES}_s} ee_{es} \leq es_s \cdot ES_s \quad (3.5)$$

Pour les experts métiers, il s'agit là du principe de base à satisfaire pour la production d'un sillon. En effet, la réservation des sillons commerciaux répond à une demande commerciale en terme de transport de voyageurs, et il est souhaitable de la couvrir par des ressources matérielles et humaines. Nous retenons ce principe comme étant celui préconisé par les experts et nous le prenons en compte dans le modèle mathématique (MIP) exposé à la fin de ce chapitre.

Contrairement aux contraintes de couverture des sillons qui sont nécessaires dans la modélisation du problème intégré engins/AdC, les contraintes de couverture intégrée des étapes sillons et des étapes AdC que nous présentons par la suite peuvent différer dans la modélisation selon les besoins métiers attendus par les experts. Il en découle alors quatre scénarii possibles de couverture par les ressources engins et AdC.

1. Subordination de la couverture AdC à la couverture engins

$\forall s \in \mathcal{S}$, si une étape sillon $es \in \mathcal{ES}_s$ n'est pas couverte en engins, alors les étapes AdC associées ne seront pas couvertes. Mathématiquement, on a :

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall es \in \mathcal{ES}_s, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es}$$

$$ee_{es} \leq ea_{ec} \quad (3.30)$$

$$ea_{ec} \leq es_s \quad (3.31)$$

En pratique, la contrainte (3.30) impose que, si une étape sillon n'est pas couverte en engins, alors on considère qu'il est inutile de couvrir les étapes AdC associées. Dans le cas où une étape AdC n'est pas couverte, alors aucune contrainte n'est imposée aux étapes sillons. En revanche, le sillon ne sera pas couvert (contrainte (3.31) est identique à (3.29)) d'après la définition d'un sillon non couvert.

2. Subordination de la couverture engins à la couverture AdC

$\forall s \in \mathcal{S}, \forall es \in \mathcal{ES}_s$, si au moins une étape AdC $ec \in \mathcal{EC}_{es}$ n'est pas couverte en AdC alors l'étape sillon es associée ne sera pas couverte en engins et, par conséquent le sillon s ne sera pas produit (contrainte (3.5)). Cette contrainte se traduit en pratique par le fait que, si une étape AdC n'est pas couverte en AdC, alors il est inutile de la couvrir en engins.

$$\begin{aligned} \forall es \in \mathcal{ES}, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es} \\ ea_{ec} \leq ee_{es} \end{aligned} \quad (3.32)$$

3. Equivalence des couvertures engins et AdC

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall es \in \mathcal{ES}_s, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es} \\ ea_{ec} = es_s \quad (3.33)$$

$$ee_{es} = es_s \quad (3.34)$$

Le scénario (3) est clairement le plus extrême et le moins exploité pour des études stratégiques en amont. L'hypothèse (1) qui porte sur la subordination de la couverture AdC à la couverture engins est la plus réaliste d'un point de vue métier ; l'exploitation d'un engin ferroviaire supplémentaire coûte beaucoup plus cher que le recrutement ou la formation des AdC à la conduite d'un nouvel engin sur une nouvelle ligne. Les experts envisagent donc plus naturellement l'exploitation d'une unité supplémentaire de ressources AdC que l'exploitation d'une unité supplémentaire d'une ressource engin.

4. Cas du transport voyageurs

Toutes les étapes sillons et les étapes conducteurs doivent être couvertes respectivement par des engins ferroviaires et des agents de conduite. De même, le sillon doit être produit.

Dans ce cas, il y a équivalence entre couverture d'un sillon $s \in \mathcal{S}$ et couverture de toutes les étapes sillons $es \in \mathcal{ES}_s$ et de toutes les étapes AdC $ec \in \bigcup_{es \in \mathcal{ES}_s} \mathcal{EC}_{es}$.

$$\begin{aligned} \forall s \in \mathcal{S}, \forall es \in \mathcal{ES}_s, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es} \\ ea_{ec} + ee_{es} + e_s \leq 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

Remarque 5 : Cette contrainte est très forte et peut conduire à un problème infaisable dans le cas où la taille des parcs de ressources (engins et AdC) disponibles n'est pas suffisante pour couvrir toute la charge de travail engins et AdC. Ce scénario est donc très intéressant lorsqu'on traite une problématique de dimensionnement du parc des ressources engins et AdC exploitées pour la production de tous les sillons commerciaux.

3.3.5 Fonction Objectif

La fonction objectif du problème de planification intégrée engins/AdC à minimiser est composée des éléments suivants :

AdC

- Nombre de journées de service AdC construites.
- $$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{JS}_r} \sum_{ec \in \mathcal{EC}} \sum_{k=1}^K j X_{i,ec,k} \quad (3.36)$$

L'objectif est de minimiser le nombre de journées de services ainsi construites pour la couverture de la charge de travail par des AdC. Afin de minimiser ce nombre, nous avons multiplié $X_{j,ec,k}$ par j afin de privilégier un remplissage optimal des premières journées de service créées.

- Somme des pénalités liées aux étapes AdC non couvertes.
- $$\sum_{ec \in \mathcal{EC}} Pen_{ec} ea_{ec} \quad (3.37)$$

Engins ferroviaires

- Somme des coûts d'utilisation des ressources engins engagées .

$$\sum_{kl \in \mathcal{KL}} CE_{kl} n_{kl} \quad (3.38)$$

où CE_{kl} est le coût d'engagement d'un engin de type $kl \in \mathcal{KL}$.

- Somme des coûts d'affectation des engins actifs sur les étapes sillons.

$$\sum_{es \in \mathcal{ES}} \sum_{kl \in \mathcal{V}\mathcal{KL}_{ES}} CA_{kl} Y_{kl,es} \quad (3.39)$$

où CA_{kl} est le coût d'utilisation d'un engin actif de type $kl \in \mathcal{KL}$.

- Somme des coûts d'affectation des engins passifs sur les étapes sillons.

$$\sum_{es \in \mathcal{ES}} \sum_{kl \in \mathcal{KL}} CP_{kl} nlp_{kl,es} \quad (3.40)$$

où CP_{kl} est le coût d'utilisation d'un engin passif de type $kl \in \mathcal{KL}$.

- Somme des pénalités liées aux étapes sillons non couvertes en ressources engins.

$$\sum_{es \in \mathcal{ES}} Pn_{es} ee_{es} \quad (3.41)$$

Sillons

- Somme des pénalités liées aux sillons non couverts.

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} Pn'_s es_s \quad (3.42)$$

3.4 Programme linéaire mixte (MIP)

Le problème de planification intégrée engins/AdC est modélisé sous forme d'un programme linéaire en variables mixtes (MIP) que nous exposons ci-dessous :

3.5 Prise en compte des étapes de repositionnement dans la couverture de la charge de travail AdC

Dans le modèle (MIP), la couverture des étapes de repositionnement par des AdC valides n'a pas été prise en compte dans la formulation mathématique. Or, hormis l'ensemble des sillons commerciaux à couvrir, des repositionnements à vide (i.e. sans emport de voyageurs) de ressources engins sur le réseau au cours de l'horizon de planification sont possibles, et contribuent à l'obtention de solutions optimisées, notamment quand la problématique étudiée vise à construire des plans de transport cycliques (roulements). Ils constituent aussi un facteur de minimisation du nombre total d'engins nécessaires pour produire une charge de travail, puisqu'ils peuvent rendre réalisables des enchaînements d'étapes sillons qui seraient impossible sinon.

Chacun de ces repositionnements correspond à la circulation d'un engin ou d'une UM entre deux gares commerciales (ou bien entre une gare commerciale et un dépôt) sans production d'étape sillon commerciale. Les engins engagés pour la production d'une étape sillon de repositionnement es sont envisagés comme "passifs". Ces sillons de repositionnement sont généralement considérés par les experts métiers comme une donnée d'entrée du problème d'optimisation, souvent générées à partir du retour d'expérience. Ils représentent également une réservation de l'infrastructure ferroviaire entre deux instants et deux gares du réseau, et la demande est faite au Réseau Ferré de France (RFF) en même temps que les sillons commerciaux. A un niveau stratégique de décision, l'utilisation des sillons de repositionnement est alors un levier d'action majeur pour la problématique d'optimisation des lignes de roulements d'engins ferroviaires.

En pratique, les sillons de repositionnement sont des sillons qui ne sont pas découpés de façon spatio-temporelle en étapes sillons comme c'est le cas pour les sillons commerciaux. Un sillon de repositionnement comporte donc une unique étape sillon et une unique étape AdC. Autrement dit, un seul engin et un seul AdC sont autorisés à couvrir l'étape de repositionnement.

Afin d'intégrer les contraintes liées à la couverture des étapes de repositionnement, nous exploitons les variables de décision introduites en 3.3.1. Des contraintes de circulations des ressources sur les étapes de repositionnement et de compatibilités assurant la cohérence entre les ressources engins et AdC engagées sur ces étapes sont également introduites.

Variables de décision

$\mathcal{ESR}$: ensemble des ESR étapes sillons techniques à produire.

$\forall es \in \mathcal{ESR}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es}$

$$Y_{kl,es} = \begin{cases} 1 & \text{si un engin de série } kl \text{ est choisi pour la couverture de l'étape} \\ & \text{de repositionnement } es \in \mathcal{ESR}, \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$\forall es \in \mathcal{ESR}$

$$ee_{es} = \begin{cases} 1 & \text{si l'étape de repositionnement } es \text{ n'est pas couverte en engins,} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall es \in \mathcal{ESR}, \forall kl \in \mathcal{VKL}_{es}$$

$$Compt_{r,kl}^{es} = \begin{cases} 1 & \text{si le profil de qualification du roulement } r \text{ est compatible} \\ & \text{avec la série d'engins } kl \text{ pour l'étape sillon } es, \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

Contraintes de circulation des ressources

La contrainte (3.54) porte sur le respect de la taille maximale des UM en repositionnement à vide. Si l'étape de repositionnement es n'est pas sélectionnée, alors aucun engin de repositionnement (engin passif) ne peut être affecté à cette étape. Dans le cas contraire, le nombre maximum d'engins passifs de série kl affectés à l'étape es ne doit pas dépasser le nombre maximum d'engins autorisés sur l'étape es .

$$\forall es \in \mathcal{ESR} \quad \sum_{kl \in \mathcal{KL}} nlp_{kl,es} \leq Max_{total} (1 - ee_{es}) \quad (3.54)$$

Contraintes de compatibilité engins/AdC sur une étape de repositionnement

La contrainte (3.55) permet d'assurer la compatibilité entre l'engin et l'AdC affectés à une même étape de repositionnement $es \in \mathcal{ESR}$.

$$\forall es \in \mathcal{ESR}, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es}, \forall kl \in \mathcal{KL}, \forall r \in \mathcal{R} \\ \sum_{j \in J_r} \sum_{k=1}^K x_{j,ec,k} + Y_{kl,es} \leq Compt_{r,kl}^{es} + 1 \quad (3.55)$$

Contraintes de subordination de la couverture engins à la couverture AdC

Cette contrainte permet d'exprimer le fait que si aucun AdC valide n'est disponible pour couvrir l'étape AdC ec , alors l'étape sillon de repositionnement et donc le sillon de repositionnement n'est pas produit.

Autrement dit, aucun AdC n'est affecté à l'engin de repositionnement affecté au sillon à vide $es \in \mathcal{ES}$.

$$\forall es \in \mathcal{ESR}, \forall ec \in \mathcal{EC}_{es} \\ ea_{ec} \leq ee_{es} \quad (3.56)$$

Fonction objectif

L'objectif à minimiser est la somme des coûts d'exploitation des engins sur une étape de repositionnement et est formulée comme suit :

$$\sum_{es \in \mathcal{ESR}} \sum_{kl \in \mathcal{VKL}_{es}} CV^{kl} (1 - ee_{es}) \quad (3.57)$$

Les repositionnements à vide des engins ferroviaires représentent des dépenses (frais) supplémentaires pour l'entreprise ferroviaire puisqu'il sont effectués sans production de missions de transport de voyageurs. Néanmoins, ils restent indispensables à l'élaboration des roulements d'engins, dans le sens où ces repositionnements permettent d'assurer des étapes sillons qui seraient impossibles sinon. Ils constituent également un facteur de minimisation important du nombre total de ressources engins exploités dans cette production.

3.6 Modèle simplifié

Compte tenu de la volumétrie du modèle mathématique (MIP) proposé pour résoudre le problème de planification intégrée engins/AdC, nous avons introduit un modèle simplifié plus compacte construit à partir d'un nombre réduit de variables et de contraintes du modèle initial (cf. [39]). Ce modèle nous permet de tester expérimentalement les différents schémas de relaxation lagrangienne et d'analyser la performance de l'approche de résolution par relaxation lagrangienne dans des temps de calcul raisonnables (voir chapitre 4). Le modèle simplifié est représenté sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers où chacun des problèmes de planification des ressources est modélisé séparément avant d'ajouter des contraintes couplantes liant ces deux ressources. A titre d'exemple, le modèle simplifié de planification des agents prend en compte moins de contraintes légales (réglementation de travail) que le modèle complet des AdC. Le modèle simplifié de planification des engins ne se base pas sur une modélisation où toutes les contraintes du problème sont représentées dans un graphique espace-temps. Il n'autorise pas l'engagement d'unités multiples sur les trains et n'intègre pas la couverture des étapes de repositionnement. Par manque de temps, nous ne détaillerons pas, dans le cadre de la thèse, le modèle simplifié proposé.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle de planification intégrée des engins et des AdC sous forme d'un programme linéaire en variables mixtes (MIP). Les problématiques de planification des engins et des AdC ont été modélisées séparément, et des contraintes couplantes qui modélisent l'interaction directe existant entre ces deux ressources ont été introduites. Une solution au problème de planification des engins est composée de l'ensemble des séquences de tâches produites par des séries d'engins lors de la couverture de la charge de travail induite par la production des sillons. De même, une solution au problème de planification des AdC est composée d'un ensemble de tâches AdC produites par des roulements AdC sur un horizon de planification fixée. Une solution optimale du problème de planification intégrée engins/AdC est alors celle qui apparaît la plus économique en terme d'exploitation globale de ces ressources lors de la conception du plan de transport.

Le modèle de planification des engins que nous retenons dans ce chapitre (cf. section 3.3) sélectionne, parmi les séries valides sur une étape sillon *es*, une ou plusieurs séries d'engins pour satisfaire la contrainte de capacité d'emport des voyageurs sur cette étape sillon. Dans le cas d'une couverture par une unité multiple (UM), les engins ainsi sélectionnés peuvent appartenir :

- Soit à la même série d'engins, auquel cas on parle d'UM homogènes,
- Soit à des séries différentes, auquel cas on parle d'UM hétérogènes.

Pour que la couverture de ces étapes sillons (resp. étapes de repositionnement) soit alors complète, il est nécessaire d'affecter un AdC compatible avec l'engin se trouvant en *tête du train* sur l'étape sillon *es*. Or, le modèle de planification des roulements d'engins proposé ne permet pas de caractériser l'engin se trouvant en tête du train. Dans le cas où une unité multiple homogène est affectée à une étape sillon (resp. étape de repositionnement), la question de la compatibilité entre la série d'engins se trouvant en tête du train et le roulement AdC affecté à cette série ne se pose pas, puisque tous les engins appartiennent à la même série d'engins. En revanche, lorsqu'une unité multiple hétérogène est affectée à une étape sillon (resp. étape de repositionnement), la question de la série d'engins *kl* se trouvant en tête du train est alors posée, car le roulement AdC couvrant cette étape sillon (resp. étape de repositionnement) doit être valide pour la conduite de l'engin de traction *kl* se trouvant en tête. Nous présentons dans le chapitre 4 les différents schémas de relaxation proposés pour résoudre le problème de planification intégrée engins/AdC et présentons les résultats expérimentaux obtenus en testant les schémas de relaxation proposés avec le modèle simplifié sur des instances de données réelles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Face aux enjeux économiques auxquels l'EF SNCF doit faire face lors de l'élaboration et de l'exploitation de son plan de transport, le travail décrit dans ce manuscrit vise à proposer une démarche de planification intégrée des engins et des Agents de Conduite (AdC). Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une recherche exploratoire menée à la direction de l'Innovation et de la Recherche (I&R) de la SNCF. Notre principal objectif est d'étudier la faisabilité d'un logiciel de planification intégrée des ressources :

- offrant la meilleure représentation possible de la réalité de la production des circulations ferroviaires sur le terrain,
- basé sur des concepts de modélisation mathématique et des algorithmes de résolution performants,
- dont la mise en œuvre puisse être conduite de manière efficace.

Un tel outil logiciel devrait permettre à la SNCF d'améliorer l'efficacité globale et la qualité de son plan de transport, en optimisant notamment l'utilisation de ces deux ressources ferroviaires rares et hétérogènes. Dans une première partie de ce manuscrit, nous présentons les différentes ressources ferroviaires nécessaires à la production des circulations ferroviaires, les niveaux de décision existants (de la planification tactique à la gestion opérationnelle) et les principaux acteurs intervenant dans le processus de planification des ressources, dont Réseau Ferré de France qui assure la répartition de la capacité entre les différentes entreprises ferroviaires. L'utilisation optimisée des ressources est complexe et ce constat reste valide aussi bien à des niveaux anticipés de décision que pour la gestion opérationnelle de la production ferroviaire où le fonctionnement du système ferroviaire doit être modélisé de manière très détaillée. Nos travaux étant exploratoires et en rupture par rapport aux organisations et processus existants, nous les avons orientés vers les niveaux anticipés de décision.

Nous consacrons ensuite la deuxième partie de ce travail à la description du processus actuel de planification des ressources qui s'appuie essentiellement sur une démarche séquentielle de traitement où les résultats de la planification d'une ressource sont exploités comme données d'entrée pour la planification de la ressource suivante. Nous discutons également des motivations et des choix qui ont mené à proposer une approche intégrée pour la gestion des ressources ferroviaires. Bien que l'approche séquentielle de gestion des ressources permette de réduire considérablement la taille des problèmes et, par suite, de faciliter leur résolution par rapport à une approche intégrée, elle ne permet cependant pas de visiter toutes les opportunités d'affectation puisque la planification d'une ressource est largement conditionnée par les résultats de la planification de la ressource qui la précède dans l'organisation actuelle du système de production. Cette partie du manuscrit présente également une revue de la littérature dans le domaine de la planification intégrée des ressources qui regroupe les modèles d'optimisation, les techniques d'association entre les modèles et les approches de résolution proposés pour traiter les problématiques de grande taille d'intégration des ressources dans différents secteurs de transport. Nous y constatons notamment la place prépondérante des approches par décomposition pour résoudre ces problématiques dans le domaine aérien, ainsi que le peu de travaux existants sur le sujet dans le domaine ferroviaire. Plusieurs pistes d'action permettant de prendre en compte l'interaction "directe" entre les différentes ressources pour optimiser un objectif global sont décrites; celle qui vise à planifier de manière intégrée les ressources engins et AdC à partir d'une grille horaire existante est retenue, puisque cette piste nous semble la plus réaliste et la plus crédible d'un point de vue métier

dans un premier temps.

La troisième partie de ce manuscrit expose la formulation mathématique valide proposée pour modéliser le problème de planification intégrée des engins/AdC à partir d'un ensemble de sillons fixés pour répondre aux besoins exprimés par les entreprises ferroviaires en terme d'offre de transport. Ce modèle mathématique est écrit sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers noté (MIP). Il appréhende de manière rigoureuse l'ensemble des contraintes réglementaires (RH077) appliquées aux AdC dans le système ferroviaire Français, ainsi que l'ensemble des contraintes de structuration, de couverture de la charge de travail et de respect des règles techniques et fonctionnelles liées à l'utilisation des engins. La prise en compte de l'aspect intégré de la planification se fait par des contraintes couplantes qui traduisent la forte interaction entre la conception des roulements d'engins et celle des grilles de service AdC. A cet effet, différents principes de couverture des sillons sont étudiés avec les experts métiers et discutés dans cette partie du manuscrit, pour appréhender de façon réaliste et efficace le lien qui existe entre la couverture des sillons et la production des roulements d'engins et des grilles de service AdC. Parallèlement à cette étude de modélisation, nous avons procédé à la construction de jeux de données réalistes, à partir d'applicatifs utilisés en production pour l'activité TER de la région Bretagne. Ces applicatifs ne répondent pas directement à nos besoins dans le sens où ils ne sont pas adaptés à la structure de notre modèle de données. Un travail important de restructuration des données a donc été réalisé pour extraire les données de manière efficace et automatique. De plus, un comparatif entre les données extraites et celles utilisées en production est établi avec les experts métiers afin d'attester de l'exactitude et de la fiabilité de nos données, dans la perspective de constituer une base de donnée saine et unique pour la réalisation de tests comparatifs entre l'approche intégrée et l'approche séquentielle.

Nous avons testé le modèle mathématique (MIP) proposé avec un logiciel standard de programmation linéaire (IBM ILOG CPLEX) et les résultats obtenus ont montré des limites quant à la calculabilité du modèle (MIP) en raison de sa grande taille. Puisque la problématique de planification intégrée requiert des modèles d'optimisation mathématique novateurs et originaux, nous proposons dans une quatrième partie de ce manuscrit des approches de résolution dédiées et des algorithmes plus performants pour résoudre le problème de planification intégrée engins/AdC. L'investigation de démarches de résolution itératives basées sur une décomposition fonctionnelle du problème global semble indispensable pour traiter ce problème industriel de grande taille. A ce titre, la structure du modèle mathématique (MIP) proposé permet de décomposer le problème en deux principaux sous-problèmes plus faciles à résoudre, et nous conduit à proposer une approche de résolution basée sur la relaxation lagrangienne des contraintes couplantes. Cette approche nous permet également d'envisager l'exploitation des deux briques logicielles PRESTO et CARACO, développées à la SNCF et dédiées à la planification optimisée, respectivement, des engins et des AdC. Cette démarche nous conduit ainsi à présenter différents schémas de relaxation lagrangienne définis selon les contraintes couplantes dualisées, puis à les tester et les comparer avec ILOG IBM CPLEX sur un modèle simplifié extrait de (MIP). L'objectif est de déterminer le schéma de relaxation lagrangienne qui offre le meilleur compromis en termes de calculabilité, de performances et de facilité à une mise en œuvre industrielle. Ce comparatif nous a conduit à retenir le schéma de relaxation partielle des contraintes couplantes de couverture sillons/AdC : il présente des résultats intéressants et est plus adapté à la structure des modèles mathématique de PRESTO et CARACO, ce qui devrait permettre d'alléger les modifications à apporter dans la formulation mathématique des deux modèles exploités par PRESTO et CARACO par rapport aux autres schémas.

La dernière partie du manuscrit est dédiée essentiellement à la mise en œuvre industrielle et aux expérimentations numériques réalisées pour tester notre approche de planification intégrée des ressources. Dans cette perspective, nous décrivons les évolutions qui ont été proposées et réalisées sur les deux briques logicielles PRESTO et CARACO pour rendre l'application de l'approche de résolution par relaxation lagrangienne possible et plus efficace. Nous proposons également des évolutions sur les contraintes couplantes afin d'interdire la conception de solutions intégrées engins/AdC qui ne seraient pas réalistes et envisageables en production pour un expert métier. Le modèle industriel (MIPI) ré-

sultant de l'association des deux modèles mathématiques PRESTO et CARACO et des contraintes couplantes évoluées est ainsi présenté. En parallèle aux évolutions menées, l'approche de résolution proposée a été implantée dans un moteur de calcul baptisé SUPORT (Système Unifié de la Planification Optimisée des Ressources de Transport). Le travail de génie logiciel réalisé pour construire le moteur de calcul SUPORT repose sur une conception modulaire en programmation orientée objets, avec des développements en C++. Pour des raisons de confidentialité, ce travail n'est pas présenté de manière exhaustive. On peut cependant souligner les nombreuses difficultés fonctionnelles et techniques que nous avons dû résoudre durant toute cette phase de mise en œuvre industrielle pour faire communiquer les deux outils PRESTO et CARACO qui, initialement, n'ont pas été conçus pour être utilisés conjointement. Lorsque la théorie ne le permettait pas, ces difficultés ont été solutionnées en procédant à des choix fonctionnels et structurels pour permettre de faire collaborer efficacement ces deux modules dans un processus itératif piloté par un module maître de manière efficace. Les tests numériques préliminaires effectués sur deux instances de données réalistes ont donné des résultats satisfaisants et encourageants quant à la performance des algorithmes de résolution proposés. Sur les petites instances étudiées, un gain de 4% en nombre d'AdC exploités est notamment constaté en comparant l'approche intégrée à l'approche séquentielle. Les temps de réponse du moteur de calcul SUPORT dépendent non seulement de la volumétrie des données du problème mais également des performances des deux briques logicielles PRESTO et CARACO. Le temps de calcul du moteur PRESTO dépend des paramètres du problème, notamment le nombre de séries valides sur les étapes sillons considérées et la volumétrie des opportunités de repositionnement possibles pour les engins. Le temps de calcul de CARACO est plus important que celui de PRESTO, mais demeure plus stable et n'évolue pas significativement en fonction des données du problème. La calculabilité de SUPORT sur les deux jeux étudiés est de l'ordre de quelques minutes, ce qui nous semble raisonnable à un niveau stratégique ou tactique de décision. Toutefois, il est important de noter que l'amélioration des temps de réponse de SUPORT nécessitera une amélioration de la calculabilité des deux outils PRESTO et CARACO.

Au-delà des pistes d'actions que nous avons investiguées dans le cadre de la thèse pour répondre aux objectifs fixés par la SNCF, les travaux d'analyse, de cadrage de la problématique, de modélisation mathématique et de prototypage logiciel nous ont conduit à identifier de nombreuses pistes d'évolution (fonctionnelles, scientifiques/techniques, industrielles) et d'optimisation permettant d'améliorer les performances et les fonctionnalités de SUPORT :

- Extension du périmètre d'étude exploité pour les tests et la qualification : les différents échanges que nous avons eus avec les experts métiers nous ont conduit à retenir, dans le contexte de la thèse, l'activité TER de la région Bretagne comme région pilote pour les tests numériques de performance de l'approche de résolution proposée. Ce périmètre d'étude peut néanmoins être étendu à d'autres régions et/ou à d'autres branches de la SNCF comme par exemple le Fret ou SNCF-Voyages (TGV). Une qualification expérimentale complémentaire devrait débiter pour le TER de la région Rhône-Alpes. L'extension du périmètre d'étude à d'autres activités de la SNCF nécessite cependant la prise en compte de contraintes fonctionnelles et structurelles spécifiques à chacune des activités. Ainsi pour le Fret SNCF, comme les trajets considérés sont très longs, ils ne peuvent être assurés de bout en bout par une même ressource engins et AdC ; des relèves d'engins ou d'AdC doivent donc être prévues pendant le parcours. SUPORT n'intègre pas toutes ces spécifications fonctionnelles : pour l'activité TER, les trajets restent limités et il est souhaitable que les ressources engins et AdC ne soient pas changées au cours du parcours pour donner une meilleure stabilité au plan de transport. Pour étendre le périmètre d'étude à d'autres activités de la SNCF, une évolution fonctionnelle de nos travaux serait donc de prendre en compte dans SUPORT le découpage des sillons en étapes sillons pour permettre à d'autres activités de la SNCF d'utiliser l'outil SUPORT.
- Extension du périmètre décisionnel de planification intégrée : cette piste vise à étendre les modèles de planification intégrée des ressources engins/AdC proposés pour appréhender, en tant que ressources supplémentaires, des modifications marginales (limitées) des horaires des sillons ;

soit dans un voisinage continu de leurs horaires théoriques, ou dans un voisinage discrétisé et structuré par le concept de cadencement des grilles. Cette piste de recherche conduit à évaluer l'impact des modifications marginales des horaires des sillons et des choix optimisés de sillons parmi un stock existant, sur le taux d'utilisation des ressources engins et AdC. Toutefois, le choix optimisé des sillons dans un catalogue (sillons préconstruits) nécessite de prendre en compte la demande des clients au niveau de l'offre de transport, pour pouvoir finalement arbitrer le choix des sillons en fonction de leur adéquation à la demande de transport et des coûts de production induits (y compris les coûts de péages). Les stratégies de décalages des horaires de sillons peuvent également s'appliquer aux étapes de repositionnement en étudiant l'impact de tels décalages sur le taux d'utilisation conjointe des ressources engins et AdC. Les étapes de repositionnement sélectionnées par PRESTO peuvent également faire l'objet d'évolutions analogues. Par ailleurs, dans le cadre de la thèse, nous avons étudié la possibilité de fournir à CARACO un panel enrichi d'horaires pour le choix des étapes de repositionnement générées par PRESTO, sur une plage horaire délimitée par les heures d'arrivée et de départ des sillons encadrant les sillons de repositionnement ; cette option permet à CARACO de sélectionner l'heure de l'étape de repositionnement qui contribue à l'optimisation des journées de service construites selon les disponibilités des roulements AdC. En perspective de cette étude, il serait intéressant de tester ce levier d'action en complément des expérimentations en cours.

- Extension de l'heuristique lagrangienne : une des perspectives d'évolution de l'heuristique lagrangienne serait d'implémenter et de tester la première approche constructive présentée au chapitre 4 pour l'obtention de bornes supérieures. Cette approche consiste à fixer les variables de décision du sous-problème de planification des AdC aux valeurs issues de la solution du sous-problème lagrangien. A partir des contraintes couplantes de compatibilité engins/AdC et de couverture sillons/AdC, engins/AdC de $(MIPI)$, nous optimisons les variables de décision du sous-problème de planification des engins en associant de fortes pénalités à l'ensemble des séries d'engins non compatibles avec les roulements AdC sélectionnés par CARACO sur les étapes sillons. Dans cette approche, il est envisageable de construire des solutions où l'ensemble des étapes sillons à couvrir peuvent être assurées en engins mais pas en AdC. De telles solutions pourraient conduire les décideurs à entreprendre des actions pour palier à ce défaut de couverture en AdC en formant des AdC à de nouvelles séries d'engins. La figure 3.4 expose l'axe de l'heuristique lagrangienne faisant l'objet de perspectives d'évolution.

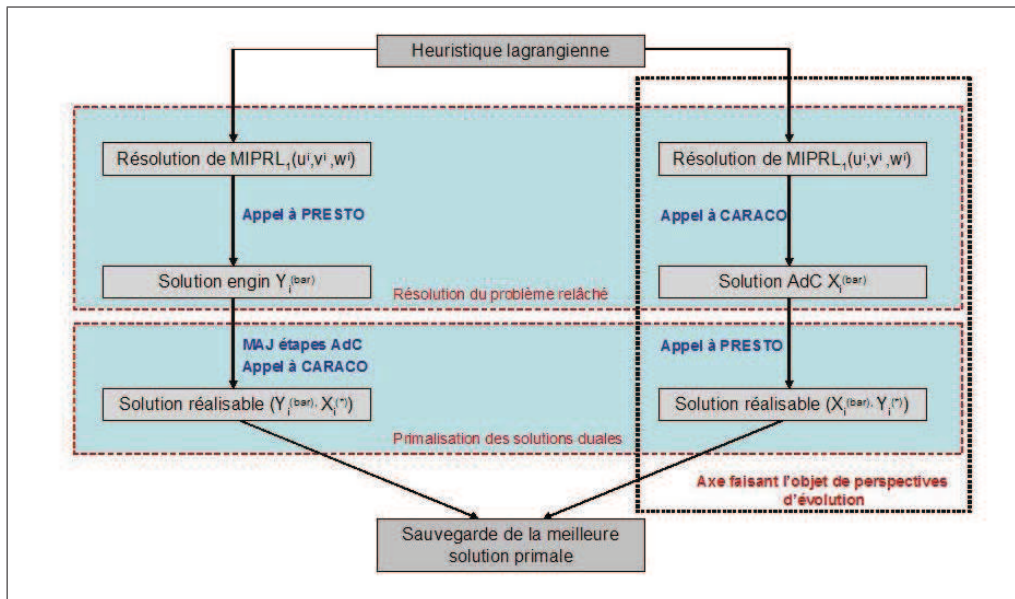


FIGURE 3.4 – Extension de l'heuristique lagrangienne.

- Extension des contraintes couplantes de $(MIPI)$ (ou évolution du modèle $(MIPI)$) : pour améliorer la convergence de la relaxation lagrangienne, la nécessité de faire évoluer les contraintes

couplantes de compatibilité engins/AdC (voir chapitre 4) nous a conduit à envisager deux évolutions possibles de ces contraintes couplantes ; vue des engins (3.28.1') et vue des AdC (3.28.2'). Nous avons retenu la contrainte couplante (3.28.1') pour les expérimentations et la résolution industrielle du problème de planification intégrée engins/AdC. L'une des évolutions du modèle mathématique (*MIPI*) serait d'intégrer la contrainte (3.28.2') en complément de la contrainte (3.28.1') dans le but d'évaluer les progrès de l'approche de relaxation lagrangienne.

- Enrichissement de la gestion des Unités Multiples (UM) hétérogènes : l'affectation multiple d'engins aux étapes sillon (resp. sillons de repositionnement) peut offrir un levier d'optimisation pour la planification des AdC. En effet, lorsque deux séries actives et différentes sont affectées à une étape sillon, le choix de la série d'engins se trouvant en tête de train se fait actuellement de manière essentiellement arbitraire. La planification des roulements AdC se base alors sur ce choix, d'ores et déjà établi, pour produire à coût minimum les grilles de service AdC. S'autoriser à choisir les séries d'engins se trouvant en tête de train peut également être un facteur de minimisation des ressources AdC, en s'appuyant sur les données existantes de compatibilités entre les roulements AdC et les séries d'engins affectées.
- Evolution de l'outil CARACO pour prendre en compte des pénalités variables sur les étapes AdC non couvertes, afin d'avoir une implantation du schéma lagrangien plus proche de la théorie.
- Evolution de PRESTO pour prendre en compte un coût d'affectation des séries d'engins sur les étapes de repositionnement. Actuellement, le coût d'engagement des séries d'engins est commun pour toutes les étapes de repositionnement. Une des évolutions possibles pour minimiser davantage les coûts d'exploitation des séries d'engins serait de considérer un coût d'engagement pour chaque série d'engins par étape de repositionnement.
- Industrialisation de l'outil SUPORT : dans l'hypothèse où la qualification de la planification engins/AdC serait acquise au-delà du périmètre de Bretagne, l'objectif serait d'industrialiser l'outil SUPORT en l'intégrant dans le processus actuel de planification des ressources (conduite du changement, déploiement, formations, etc.).

Bibliographie

- [1] A. Caprara, M. Fischetti, P. L. Guida, P. Toth et D. Vigo. Solution of Large-Scale Railway Crew Planing Problems : the Italian Experience. *DEIS University of Bologna, DMI University of Undine, Ferrovie dello Stato SpA*.
- [2] L. Bodin, B. Golden, A. Assad et M. Toth. Routing and Scheduling of Vehicles and Crews : the State of the Art. *Computers and Operations Research*, 10 : 63-211, 1983.
- [3] A. Caprara, P. Toth, D. Vigo, and Fischti. Modeling and Solving The Crew Rostering Problem. *Opertions Research*, 46 : 820-830, 1998.
- [4] V. Labouisse, and H. Djellab. DEMIURGE : a tool for the optimization and the capacity assessment for railway infrastructure. *WCRR*, Köln, November 2001.
- [5] M. Chandesris, D. Gauyacq, B. Jalard, C. Lérin. SARDAIGNE : comparer et prédire les performances de configurations du système ferroviaire. *RGCF*, N° 150, 2006.
- [6] H. Djellab, R. Rebai, V. De Vulpillieres. Projet DEMIURGE, Modèle mathématique. *SNCF & Eurodécision, Paris*, 2004.
- [7] J-E. Beasley. An Algorithm for Set Covering Problems. *European Journal of Operations Research*, 31: 85-93, 1987.
- [8] M.A. Forbes, J.N. Holt, A.M. Watts. Exact Solution of Locomotive Scheduling Problems. *Journal of Operational Research Society*, 42 : 825-31, 1991.
- [9] A. Nou, J. Desrosiers, F. Soumis. Weekly Locomotive Scheduling at Swedish State Railways. *Les cahiers du GERAD G-97-35*, 1997.
- [10] R.K. Ahuja, J. Liu, J.B. Orlin, D. Sharma, L.A. Shughart. Solving Real-Life Locomotive Scheduling Problems. *Transportation Science*, 39(4): 503-17, 2005.
- [11] L.K. Nielsen, L. Kroon et G Maroti. Absorption Robustness of Railway Resource Schedules. *Technical Report 0113, EU ARRIVAL project*, 2007.
- [12] A. Caprara, M. Fischetti, P. Toth. A Heuristic Method for the Set Covering Problem. *Technical Report OR-95-8, DEIS University of Bologna*, 1995.
- [13] S. Trefond, H. Djellab, A. Billionet, S. Elloumi. Planification robuste du matériel roulant ferroviaire. *ROADEF 2012, Angers*, 2012.
- [14] P. Kouvelis, G. Yu. Robust Discrete Optimization and Its Applications. *Kluwer Academic Publishers*, 1997.
- [15] A. Partouche. Planification d’horaires de travail : Méthodologie, Modélisation et Résolution à l’aide de la Programmation Linéaire en Nombres Entiers et de la Programmation Par Contraintes. *Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine, Paris*, 1998.
- [16] Y. Rahmoune, H. Djellab, F. Bonnans. Planification du roulement des agents de conduite pour le Fret SNCF. *Rapport de stage, Ecole Polytechnique, Paris*, 2006.
- [17] F. Benhizia, H. Djellab, V. Paschos. Optimisation de la couverture de charge pour l’habillage des trains Fret en agents de conduite. *Rapport de stage de master, Université Paris Dauphine*, 2008.
- [18] H. Djellab, M. Lamiri. Document de définition et de résolution du problème d’optimisation de la répartition de la charge JS/ADC par pôle d’activité. *Projet CARACO (CALcul de Roulements d’Agents de Conduite Optimisé), Direction de l’Innovation et de la Recherche, Paris*, 2010.
- [19] E. Balas et M.C. Carrera. A Dynamic subgradient-Based Branch-and-Bound Procedure for Set Covering. *Operations Research*, 44 : 875-890, 1996.

- [20] J.E. Beasley. A Lagrangian Heuristic for Set Covering Problems. *Naval Research Logistics*, 37 : 151-164, 1990.
- [21] M. Lohatepanont, C. Barnhart. Airline Schedule Planning : Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment. *Transportation Science*, 38(1) : 19-32, 2004.
- [22] J-F. Benders. Partitionning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4(3): 238-252, 1962.
- [23] J-F, Cordeau, G, Stojkovic, F.Soumis, J.Desrosiers. Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling. *Transportation Science*, 35: 375-388, 2001.
- [24] D. Klabjan, EL. Johnson, GL. Nemhauser. Airline crew scheduling with time windows and plane count constraints. *Transportation Science*, 36: 337-348, 2002.
- [25] AM. Cohn, C. Barnhart. Improving crew scheduling by incorporating key maintenance routing decisions. *Operations Research*, 51: 387-396, 2003.
- [26] A. Mercier, J-F. Cordeau, F. Soumis. A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 32: 1451-1476, 2005.
- [27] A. Marcier, F. Soumis. An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Computers & Operations Research*, 34: 2251-2265, 2005.
- [28] N. Papadakos. Integrated airline scheduling : decomposition and acceleration techniques, 2006.
- [29] C. Barnhart, N. Boland, L. Clarke, E. Johnson, G. Nemhauser, and R. Shenoi. Flight string models for aircraft fleetting and routing. *Transportation Science*, 32(3): 208-220, 1998a.
- [30] D. McDaniel, M. and Devine. A modified Benders' partitioning algorithm for mixed integer programming. *Management Science*, 24(2): 312-319, 1977.
- [31] R. Sandhu, D. Klabjan. Integrated airline fleetting and crew-pairing decisions. *Operations Research*, 55(3) : 439-456, 2007.
- [32] D. Klabjan, E. Johnson, G. Nemhauser, E. Gelman, S. Ramaswamy. Airline crew scheduling with time windows and plane count constraints. *Transportation Science*, 36 : 337-348, 2002.
- [33] A. Caprara, M. Fischetti, P. Toth. A heuristic algorithm for the set covering problem. *Operations Research*, 47 : 730-743, 1999.
- [34] N. Papadakos. Integrated Airline Scheduling. *Computers & Operations Research*, 36 : 176-195, 2009.
- [35] D. Huisman, R. Freling, A. P. M. Wagelmans. Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling. *Transportation Science*, 39(4) : 491-502, 2005.
- [36] M. Haouari, K.H. Bae. Integrated Airline Schedule Design and Fleet Assignment : Polyhedral Analysis and Benders' Decomposition Approach. *European Journal of Operational Research*, 39(4) : 491-502, 2010.
- [37] F. Vanderbeck, L.A. Wolsey. Decomposition and Column Generation for Integer Programs. *Thèse de doctorat, Louvain-La-Neuve, Belgique*, 1994.
- [38] N. Marcos. Modélisation et Optimisation de la Gestion du Matériel Roulant à la SNCF. *Thèse de doctorat de l'Université Paris 13*, 2006.
- [39] S. Dauzère-Pérès, D. Feillet. *Projet "Planification intégrée des ressources" - Travaux complémentaires sur la prise en compte des sillons, Rapport lot B1 - Spécifications et prototypage agile d'algorithmes de décomposition pour planification engins/agents*, 2010.
- [40] S. Dauzère-Pérès, D. Feillet, A. Zehrouni. *Projet "Planification intégrée des ressources" - Travaux complémentaires sur la prise en compte des sillons, Rapport lot A2 - Mise en oeuvre de la planification intégrée de ressources ferroviaires avec variations horaires limitées des sillons*, 2011.
- [41] R. G. Parker, R. L. Rardin. *Discrete Optimization*. Academic Press, 1988.
- [42] M. Guignard, S. Kim. Lagrangean decomposition : A model yielding stronger lagrangean bounds. *Mathematical Programming*, 39(2) : 215-28, 1987.

- [43] Direction des Ressources Humaines EPIC (RH) GRH-RT. *Référentiel ressources humaines (RH)*.
- [44] T.G. Crainic, M. Florian, J.E. Leal. A Model for the Strategic Planning of National Freight Transportation by Rail. *Transportation Science*, 24(1) : 1-24, 1990.
- [45] F. Benhizia, D. De Almeida, S. Dauzère-Pérès. Integrated Planning of Railway Transportation Resources. *RailRome, 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, 9 pages, Rome, Italy, February 2011.
- [46] F. Benhizia, D. De Almeida, S. Dauzère-Pérès. Heuristique lagrangienne pour la résolution du problème de planification intégrée des ressources en transport ferroviaire. *12ème congrès ROADEF*, Février 2011.

**Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne**

N° d'ordre : 2012 EMSE 0668

Faten Benhizia

Thesis title

Integrated planning of railway transportation resources

Major

Industrial engineering

Keywords

Integrated planning of railway transportation resources ; Mixed integer linear programming formulation ; Planning of railway production ; Lagrangian relaxation

Summary

The planning of railway production at the French national railways (SNCF) is currently based on a mainly sequential process in which the design of railway timetabling widely conditioning design planning of railway equipment (rolling stock), then one of the train drivers (driver rosters). This strategy of sequential planning of railway resources massively adopted for practical and scientific reasons (expertise, complexity of the railway system, etc.). However, this strategy generates solutions which can be more expensive and less robust to uncertainties, because decisions taken at any given stage can significantly reduce the overall feasible solutions of the following steps. Given this situation and the strong interaction between these heterogeneous and very expensive resources, the thesis deals with the feasibility and inputs of a process where these critical resources could be planned and optimized in an integrated way. The thesis focusses on the feasibility study, prototyping and validation of an integrated approach for planning rolling stocks and drivers, so as to improve the efficiency of the overall transportation plan, increase SNCF competitiveness and enhance the quality of its services. We propose a mixed integer linear programming formulation of the rolling stock/train drivers integrated planning problem. In this mathematical model, each planning sub-problem is formalized and coupling constraints are further introduced to model the interdependencies of these two resources when they are simultaneously used for train production. In this heuristic, the solution of the Lagrangian dual and the calculation of feasible solutions are performed by calling two proprietary software modules available at SNCF for planning rolling stocks and train drivers. The heuristic is tested experimentally with real data from the TER Bretagne region, and several evolutions are introduced in the models and algorithms so as to improve their performances. Validation tests on of real data sets at an industrial scale are encouraging and, when compared to a traditional (sequential) approach, show a gain of up to 4% for train drivers used.

**Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne**

N° d'ordre : 2012 EMSE 0668

Faten Benhizia

Thesis title

Integrated planning of railway transportation resources

Major

Industrial engineering

Keywords

Integrated planning of railway transportation resources ; Mixed integer linear programming formulation ; Planning of railway production ; Lagrangian relaxation

Summary

The planning of railway production at the French national railways (SNCF) is currently based on a mainly sequential process in which the design of railway timetabling widely conditioning design planning of railway equipment (rolling stock), then one of the train drivers (driver rosters). This strategy of sequential planning of railway resources massively adopted for practical and scientific reasons (expertise, complexity of the railway system, etc.). However, this strategy generates solutions which can be more expensive and less robust to uncertainties, because decisions taken at any given stage can significantly reduce the overall feasible solutions of the following steps. Given this situation and the strong interaction between these heterogeneous and very expensive resources, the thesis deals with the feasibility and inputs of a process where these critical resources could be planned and optimized in an integrated way. The thesis focusses on the feasibility study, prototyping and validation of an integrated approach for planning rolling stocks and drivers, so as to improve the efficiency of the overall transportation plan, increase SNCF competitiveness and enhance the quality of its services. We propose a mixed integer linear programming formulation of the rolling stock/train drivers integrated planning problem. In this mathematical model, each planning sub-problem is formalized and coupling constraints are further introduced to model the interdependencies of these two resources when they are simultaneously used for train production. In this heuristic, the solution of the Lagrangian dual and the calculation of feasible solutions are performed by calling two proprietary software modules available at SNCF for planning rolling stocks and train drivers. The heuristic is tested experimentally with real data from the TER Bretagne region, and several evolutions are introduced in the models and algorithms so as to improve their performances. Validation tests on of real data sets at an industrial scale are encouraging and, when compared to a traditional (sequential) approach, show a gain of up to 4% for train drivers used.

**Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne**

N° d'ordre : 2012 EMSE 0668

Faten Benhizia

Titre de la thèse

Optimisation du plan de transport par planification intégrée des ressources

Spécialité

Génie industriel

Mots clefs

Planification intégrée des ressources ferroviaires ; Programme linéaire en variables mixtes ; Production des circulations ferroviaires ; Relaxation Lagrangienne

Résumé

La production des circulations ferroviaires à la SNCF repose actuellement sur un processus essentiellement séquentiel dans lequel la conception des grilles horaires de circulation (réservation de l'infrastructure pour la circulation des trains de l'offre de transport de la SNCF) conditionne largement la conception des planifications des engins ferroviaires (les roulements engins), puis celle des Agents de Conduite (AdC) (les grilles de service des AdC). Cette stratégie de planification séquentielle des ressources ferroviaires a été massivement adoptée pour des raisons pratiques et scientifiques (historique, savoir faire, complexité du système ferroviaire, etc.). Toutefois, cette stratégie de planification séquentielle génère des solutions qui peuvent être de coût élevé et moins robustes aux aléas, car les décisions prises à une étape donnée peuvent réduire considérablement l'ensemble des solutions réalisables aux étapes suivantes. Face à ce constat et à la forte interaction entre ces trois ressources hétérogènes et très coûteuses, la SNCF a souhaité investiguer la praticabilité et les apports d'une démarche d'optimisation du plan de transport par planification intégrée de ces ressources critiques. Dans cette optique, les travaux de thèse ont porté sur l'étude de faisabilité, le prototypage et la validation d'une démarche de planification intégrée des ressources permettant d'améliorer l'efficacité globale du plan de transport, d'accroître la compétitivité de la SNCF et d'améliorer la qualité de ses services. Nous avons proposé une formalisation du problème de planification intégrée engins/AdC et des algorithmes performants qui s'appuient sur une approche par relaxation lagrangienne pour résoudre de manière efficace la problématique étudiée. Cette approche repose sur l'exploitation de deux briques logicielles développées à la SNCF pour résoudre chacun des sous-problèmes de planification des engins et des AdC. Les algorithmes ont été testés expérimentalement avec des données réelles de la région TER Bretagne. Différentes évolutions des modèles et des algorithmes ont été étudiées pour rendre ces derniers plus efficaces. Les tests de validation sur des jeux de données réelles à une échelle industrielle sont encourageants et montrent des gains potentiels allant jusqu'à 4% des AdC exploités par rapport à une approche traditionnelle (séquentielle).