



HAL
open science

Planification intégrée et robuste des ressources ferroviaires

Afafe Zehrouni

► **To cite this version:**

Afafe Zehrouni. Planification intégrée et robuste des ressources ferroviaires. Autre. Université de Lyon, 2016. Français. NNT: 2016LYSEM008 . tel-03270916

HAL Id: tel-03270916

<https://theses.hal.science/tel-03270916>

Submitted on 25 Jun 2021

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

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



N°d'ordre NNT : **2016LYSEM008**

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'Ecole des Mines de Saint-Etienne

Ecole Doctorale N° 488
Sciences, Ingénierie, Santé

Spécialité de doctorat :
Génie industriel

Soutenue publiquement le 12/05/2016, par :
Afafe ZEHROUNI

**Planification intégrée et robuste des
ressources ferroviaires**

Devant le jury composé de :

Castagna, Pierre	Professeur	Université de Nantes	Président
Elloumi, Sourour	Maître de conférence	ENSIEE	Rapporteur
Rodriguez, Joaquin	Directeur de recherche	IFSTTAR	Rapporteur
Dauzère-Pérès, Stéphane	Professeur	EMSE	Examineur
Feillet, Dominique	Professeur	EMSE	Directeur de thèse
Delorme, Xavier	Maître de conférence	EMSE	Co-directeur de thèse
Grimaud, Frédéric	Maître de conférence	EMSE	Encadrant
Guyon, Olivier	Docteur	SNCF	Encadrant

Spécialités doctorales
 SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Responsables :
 K. Wolski Directeur de recherche
 S. Drapier, professeur
 F. Gruy, Maître de recherche
 B. Guy, Directeur de recherche
 D. Graillot, Directeur de recherche

Spécialités doctorales
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables
 O. Roustant, Maître-assistant
 O. Boissier, Professeur
 JC. Pinoli, Professeur
 X. Delorme, Maître assistant
 Ph. Lalevée, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

Nom	Responsable	Grade	Spécialité	Responsable
ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AUGUSTO	Vincent	CR	Image, Vision, Signal	CIS
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BADEL	Pierre	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BEIGBEDER	Michel	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	MA(MDC)	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
CHRISTIEN	Frédéric	PR	Science et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	MA(MDC)	Génie industriel	FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DJENIZIAN	Thierry	PR	Science et génie des matériaux	CMP
DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FAVERGEON	Loïc	CR	Génie des Procédés	SPIN
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FOREST	Valérie	MA(MDC)	Génie des Procédés	CIS
FOURNIER	Jacques	Ingénieur chercheur CEA	Microélectronique	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GAVET	Yann	MA(MDC)	Image Vision Signal	CIS
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GONDRAN	Natacha	MA(MDC)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche	Mécanique et ingénierie	CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
OWENS	Rosin	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
PERES	Véronique	MR	Génie des Procédés	SPIN
PICARD	Gauthier	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

NNT : **2016LYSEM008**

Afafe ZEHROUNI

Integrated and robust optimization of railway resources

Speciality : Industrial Engineering

Keywords : Railway , Integrated scheduling, Robustness

Abstract :

The railway operations' planning consists in finding the best use of the available infrastructure, rolling stock and crew units to cover a given timetable. A commonly adopted scheme breaks down planning as decision-making levels and resources.

However, the occurrence of perturbations may deteriorate the quality of the solutions or even make them infeasible. Therefore, railway operators aim to find robust schedules that minimize the impact of perturbations. To this purpose, the decisions made for each resource (infrastructure, rolling stock and crew) must include the demand cover as well as the robustness objectives.

Nevertheless, all tested strategies focus on a single resource at a time, neglecting resource sharing and its impact on the robustness. But the sequential scheme of resource planning can increase the propagation delays on other trains. Integrating of tactical decisions of the three resources infrastructure, rolling stock and crew can result in a more robust schedule that minimizes the propagation of delays. The main motivations of the thesis come from this idea.

The objective of this work is to develop decision support tools that provide an integrated and robust planning of railway resources at the tactical level. We propose in this thesis several contributions:

1. An optimization model that aims to develop a robust transport plan of the three critical resources simultaneously.
2. A simulation model (discrete event) to assess the robustness of transport plans. We are trying at this stage to reproduce the actual behavior of the rail system and the use of three critical resources.

NNT : 2016LYSEM008

Afafa ZEHROUNI

Planification robuste et intégrée des ressources ferroviaires

Spécialité: Génie industriel

Mots clefs : Transport ferroviaires, Planification intégrée, Robustesse

Résumé :

La production de la circulation ferroviaire nécessite l'utilisation et le partage de ressources critiques et hétérogènes, notamment le réseau ferroviaire et les ressources roulantes et humaines. Un schéma communément adopté décompose la planification selon les niveaux décisionnels et les ressources.

Depuis les dernières années, les acteurs ferroviaires accordent un intérêt croissant à la robustesse de la circulation ferroviaire. Néanmoins, toutes les stratégies étudiées se concentrent sur une seule ressource à la fois, négligeant ainsi le partage des ressources et son impact sur la robustesse. Or, la séquentialité de la planification des ressources peut augmenter la propagation des retards sur les autres trains. L'intégration des décisions tactiques des trois ressources infrastructure, engins et agents de conduite peut aboutir à un plan de transport plus robuste dans le sens de la propagation des retards. Les motivations principales de la thèse émanent de cette idée.

L'objectif de ce travail est d'aboutir à des outils d'aide à la décision pour proposer une planification intégrée et robuste des ressources ferroviaires au niveau tactique. Nous proposons dans cette thèse plusieurs contributions :

1. Un modèle d'optimisation qui vise à élaborer un plan de transport robuste des trois ressources critiques simultanément.
2. Un modèle de simulation à événements discrets pour évaluer la robustesse des plans de transport. Nous tentons dans cette phase de reproduire le comportement réel du système ferroviaire et l'utilisation des trois ressources critiques.

Table des matières

1	Contexte et concepts ferroviaires	7
1.1	Introduction	7
1.2	Planification des ressources ferroviaires	9
1.3	Incertitudes dans le transport ferroviaire	17
1.4	Impact de la planification séquentielle des ressources sur la robustesse	24
1.5	Conclusion	27
2	Revue de littérature sur la robustesse des transports ferroviaires	29
2.1	Introduction	29
2.2	Évaluation de la robustesse ferroviaire	30
2.3	Optimisation de la robustesse ferroviaire	35
2.4	Conclusion	44
3	Approche générale et modèle de données	45
3.1	Introduction	45
3.2	Schéma général de notre approche	46
3.3	Modèle général des données	50
3.4	Conclusion	53
4	Évaluation de la robustesse des plans de transport par simulation	55
4.1	Introduction	55
4.2	Simulation à événements discrets	56
4.3	Objectifs de la simulation et indicateurs de robustesse	58
4.4	Modélisation du système ferroviaire	61
4.5	Construction, validation et vérification du modèle	68
4.6	Conclusion	72
5	Optimisation intégrée et robuste des ressources ferroviaires	73
5.1	Introduction	73
5.2	Phase de génération : L'existant à SNCF	77
5.3	Phase de sélection : Modèle mathématique	83
5.4	Méthode de résolution	93
5.5	Conclusion	96
6	Expérimentations et résultats numériques	99
6.1	Introduction	99
6.2	Modèle d'optimisation : expérimentations et résultats	100
6.3	Évaluation par simulation des plans de transport optimisés	109
6.4	Conclusion	116

Confidentiel

Liste des figures

1.1	Processus séquentiel de la planification du plan de transport ferroviaire. . .	11
1.2	Schéma d'intégration des problèmes engins et agents présenté dans [Dauzère-Pérès et al., 2015]	15
1.3	Les différents schémas d'intégration étudiés dans le transport aérien. . . .	16
1.4	Schéma de traitement des incertitudes dans un système complexe [McManus and Hastings, 2006]	17
1.5	Types d'incertitudes dans un processus de décision.	18
1.6	Représentation d'une approche proactive dans un processus de décision. . .	22
1.7	Représentation d'une approche réactive dans un processus de décision. . .	23
1.8	Représentation d'une approche proactive-réactive dans un processus de décision.	23
1.9	Exemple illustrant l'impact de l'intégration des ressources sur la robustesse	26
2.1	Étapes de déplacements dans le système ferroviaire.	33
2.2	Illustration des différentes marges d'un train dans la grille horaire	37
2.3	Illustration des temps de retournement par [Nielsen et al., 2007]	38
3.1	Schéma général de notre approche	47
3.2	Schéma de la phase de planification	50
3.3	Synthèse de l'approche générale et modèle de données	51
4.1	Exemple illustrant l'intérêt de l'intégration des ressources dans l'évaluation de robustesse	61
4.2	Représentation macroscopique d'une section du réseau ferroviaire	62
4.3	Représentation des voies entre deux gares	63
4.4	Synthèse de la modélisation des ressources ferroviaires et leurs attributs . .	64
4.5	Modélisation d'un plan de transport	65
4.6	Processus de circulation d'un train	66
4.7	Processus de circulation d'un train entre deux gares successives	67
4.8	Scénarios de retards primaires testés	71
5.1	Approche d'optimisation (génération et sélection) avec décalages horaires limités	76

5.2	Schéma de synthèse de l'utilisation des outils <i>PRESTO</i> et <i>PLAISANCE</i> en phase de génération	83
6.1	Nombre de variables et de contraintes des modèles associés aux instances.	102
6.2	Variations des critères de robustesse par rapport à la solution de référence	105
6.3	Pourcentage de lignes de roulements d'engins supplémentaires	106
6.4	Pourcentage d'emplois du temps d'agents supplémentaires par rapport à la solution de référence	107
6.5	Scénario de retards primaires utilisé dans le modèle de simulation	110
6.6	Amélioration de la ponctualité au départ et à l'arrivée par rapport à la solution de référence	111
6.7	Pourcentage des trains touchés par un retard secondaire par rapport à la solution de référence	113
6.8	Retard secondaire moyen et maximal par rapport à la solution de référence	114
6.9	Responsabilité des ressources dans la propagation des retards	115

Liste des tableaux

2.1	Relation entre les variations telles que vu par l'opérateur et par le passager .	33
4.1	Indicateurs de performance du système	60
4.2	Indicateurs des retards secondaires et les sources de propagation	61
4.3	Instance expérimentale pour la validation du modèle de simulation	69
4.4	Indicateurs de robustesse pour l'instance présentée dans la table 4.3	71
5.1	Données d'entrée de <i>PRESTO</i>	79
5.2	Données de sortie de <i>PRESTO</i>	80
5.3	Données d'entrée de <i>PLAISANCE</i>	81
5.4	Données de sortie de <i>PLAISANCE</i>	82
6.1	Informations communes à toutes les instances expérimentales	100
6.2	Instances expérimentales en fonction du nombre d'emplois du temps et de décalages autorisés.	101
6.3	Valeurs des décalages autorisés sur les horaires des trains	101
6.4	Valeur de l'objectif du modèle d'optimisation pour la résolution exacte et pour l'algorithme de recherche locale	103
6.5	Résultats obtenus avec les contraintes de contrôle des coûts	108
6.6	Pourcentages des trains ponctuels au départ et à l'arrivée	111
6.7	Pourcentages des trains ponctuels au départ et à l'arrivée	112

Confidentiel

Introduction générale

La production de la circulation ferroviaire nécessite l'utilisation et le partage de ressources critiques et hétérogènes, notamment le réseau ferroviaire et les ressources roulantes et humaines. La planification de ces ressources a souvent pour objectif de minimiser les coûts de production tout en respectant les différentes contraintes techniques, légales et opérationnelles. Naturellement, l'optimisation du processus de planification a intéressé depuis plusieurs décennies les opérateurs ferroviaires et les académiques. Un schéma communément adopté décompose la planification selon les niveaux décisionnels et les ressources. Ainsi, traiter la planification d'une unique ressource sur un unique niveau de décision permet de maîtriser la complexité de la planification ferroviaire. Depuis les dernières années, les acteurs ferroviaires accordent un intérêt croissant à la robustesse de la circulation ferroviaire. Bien qu'aucune définition commune ne soit adoptée pour définir la robustesse, cette notion a le plus souvent un rapport aux retards des trains. Ces derniers impactent à la fois les coûts de production et la qualité du service proposé aux passagers. Ainsi, le processus séquentiel de planification des ressources ferroviaires, jusque-là déterministe, doit inclure des objectifs de robustesse face aux différentes incertitudes qui peuvent toucher le système ferroviaire.

Dans la littérature ferroviaire, la recherche de la robustesse de la circulation ferroviaire est abordée avec une grande variété d'approches, notamment pour les raisons suivantes :

- Selon le niveau décisionnel considéré, la robustesse peut concerner des types de décisions très diverses : niveaux d'investissements (niveau stratégique), affectation de ressources (niveau tactique), stratégies de réparation (niveaux opérationnels et temps réel).
- La robustesse peut-être définie de multiples manières en fonction des objectifs poursuivis : limiter l'apparition de retards, la propagation des retards, privilégier l'opérateur (objectifs de coûts) ou les passagers (objectifs de qualité de service), etc.
- La palette des outils utilisables pour optimiser la robustesse est elle aussi très large : programmation stochastique, optimisation robuste, simulation...

Ces exemples montrent les possibilités et combinaisons envisageables lorsque l'on

s'intéresse à la robustesse de la circulation ferroviaire. Un intérêt particulier est porté à la planification au niveau tactique dans lequel l'utilisation des ressources est décidée. Néanmoins, à ce niveau, toutes les stratégies étudiées se concentrent sur une seule ressource à la fois, négligeant ainsi le partage des ressources et son impact sur la robustesse. La séquentialité de la planification des ressources, principalement au niveau tactique, peut augmenter la propagation des retards sur les autres trains. L'intégration des décisions tactiques des trois ressources infrastructure, engins et agents de conduite peut aboutir à un plan de transport plus robuste dans le sens de la propagation des retards.

Les motivations principales du travail présenté dans ce manuscrit émanent de cette idée. Le projet SCRIPT¹, dans lequel s'inscrit cette thèse, est subventionné par l'ANR² et fait l'objet d'une collaboration entre l'école des Mines de Saint-Étienne et SNCF³. L'objectif de ce travail est d'aboutir à des outils d'aide à la décision pour proposer une planification intégrée et robuste des ressources ferroviaires au niveau tactique. Nous proposons dans cette thèse plusieurs contributions :

1. Un modèle d'optimisation qui vise à proposer un plan de transport robuste des trois ressources critiques simultanément, selon des critères de robustesse pertinents. L'intégration des ressources dans ce modèle permet de maîtriser les interactions des ressources, et les critères de robustesse définissent les caractéristiques qui définissent a priori un plan de transport robuste.
2. Un modèle de simulation à événements discrets pour évaluer la robustesse des plans de transport. Nous tentons dans cette phase de reproduire le comportement réel du système ferroviaire et l'utilisation des trois ressources critiques. Ce modèle a pour but de fournir des indicateurs qui quantifient l'impact des retards sur la circulation des trains et les interactions des ressources responsables de la propagation.

Le manuscrit s'organise de la manière suivante :

Le chapitre 1 présente les concepts et définitions ferroviaires nécessaires à la compréhension de la suite du manuscrit. Nous présentons en premier le processus de planification des ressources ferroviaires et les contraintes associées. Nous y détaillons le schéma séquentiel communément adopté ainsi que les possibilités d'intégration de plusieurs sous-problèmes, que cela soit dans le transport ferroviaire ou les domaines très proches. Nous introduisons ensuite la notion de robustesse dans le transport ferroviaire. Nous présentons d'abord les différentes sources d'incertitudes et leurs effets sur la production des trains, et définissons ensuite les catégories d'approches pouvant être utilisées. Enfin, nous

1. Système d'aide à la décision pour une Conception Robuste et Indicateurs de la qualité de service des Plans de Transport ferroviaires

2. Agence Nationale de la Recherche, ANR-12-VPTT-0003

3. Société Nationale des Chemins de Fer

illustrons par un exemple simple l'impact potentiel de l'intégration des décisions de planification des ressources sur la robustesse des plans de transport.

Dans le chapitre 2, nous présentons une revue de littérature sur la recherche de la robustesse dans la planification ferroviaire. Nous concentrons nos recherches sur les études situées au niveau tactique et qui s'intéressent à l'évaluation de la robustesse ferroviaire. Bien que l'ensemble des travaux rencontrés porte sur une seule ressource à la fois, nous tentons d'identifier dans ces études les composantes nécessaires à la réalisation de notre travail : comment définir la robustesse ? Comment intégrer les retards dans la planification des ressources ? Comment quantifier la robustesse ?

Nous présentons dans le chapitre 3 une vision globale des contributions de cette thèse. Nous énonçons l'ensemble des définitions sur lesquelles se base notre approche : la définition de la robustesse dans notre travail, les critères qui définissent la robustesse et les indicateurs qui la quantifient. Nous montrons ensuite les interactions entre les modèles d'optimisation et de simulation et détaillons les deux modèles dans les chapitres suivants.

Le modèle de simulation à événements discrets est détaillé dans le chapitre 4. Nous y présentons la modélisation de chaque ressource ainsi que leur utilisation pour la circulation des trains. Nous introduisons la modélisation des règles de circulation et la formalisation des incertitudes. Enfin, nous présentons les familles d'indicateurs qui nous permettent de quantifier et comparer la robustesse des plans de transport.

Dans le chapitre 5, nous détaillons l'approche d'optimisation intégrée de la robustesse. Nous présentons un programme linéaire en nombre entiers dont nous détaillons les contraintes et objectifs. Ces derniers se basent sur des critères de robustesse adaptés à l'intégration des trois ressources. Nous tentons par ce modèle d'obtenir un plan de transport robuste en amont, dont nous validons a posteriori la robustesse à l'aide du modèle de simulation. Enfin, nous présentons un algorithme de recherche locale pour résoudre le modèle d'optimisation en un temps de calcul raisonnable.

Nous testons notre approche sur des instances issues de données réelles et présentons les résultats dans le chapitre 6. Nous commençons par le modèle d'optimisation et l'évaluation de la performance de l'algorithme de résolution. Nous faisons varier dans ces expérimentations plusieurs paramètres permettant ainsi d'obtenir plusieurs plans de transport intégrés et robustes. Nous utilisons ensuite le modèle de simulation pour évaluer la robustesse des plans de transport avec des scénarios de retards primaires. Nous tentons d'identifier l'impact des décisions de l'optimisation sur les indicateurs de robustesse mesurés et sur la propagation des retards.

Pour finir, nous présentons plusieurs conclusions suite à l'ensemble des travaux réa-

lisés dans cette thèse. Nous passons en revue les différentes contributions de la thèse et leur apport au problème étudié. Nous présentons également plusieurs perspectives pour continuer ce travail à la fois sur les définitions adoptées et sur les outils et techniques employés.

Confidentiel

Chapitre 1

Contexte et concepts ferroviaires

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Planification des ressources ferroviaires	9
1.2.1	Planification séquentielle des ressources ferroviaires	10
1.2.2	Planification intégrée des ressources ferroviaire	14
1.3	Incertitudes dans le transport ferroviaire	17
1.3.1	Identification des incertitudes	17
1.3.2	Effets des incertitudes	19
1.3.3	Objectifs face aux incertitudes	21
1.3.4	Approches de prise en compte des incertitudes	22
1.4	Impact de la planification séquentielle des ressources sur la robustesse	24
1.5	Conclusion	27

1.1 Introduction

En France, comme dans la majorité des pays Européens, le transport ferroviaire joue un rôle très important dans le développement social, économique et environnemental. C'est un service qui nécessite des investissements importants et il est naturel d'en optimiser les coûts de production. La production de la circulation des trains nécessite l'utilisation et le partage de ressources critiques et hétérogènes, notamment le réseau ferroviaire et les ressources roulantes et humaines. Dans un contexte de capacités limitées, il est important d'optimiser la planification de ces ressources sur des horizons de plusieurs années à plusieurs jours. Souvent étudié dans la littérature de recherche opérationnelle,

le processus de planification communément utilisé est séquentiel et décomposé en plusieurs sous-problèmes afin d'en réduire la complexité.

Ce processus de planification est souvent modélisé de manière déterministe qui suppose une connaissance complète de toutes les composantes de processus. Cela est peu probable en réalité. Dans le transport ferroviaire, plusieurs sources d'incertitudes peuvent avoir pour effet des retards ou des annulations des trains qui se propagent dans le temps et dans l'espace dans la mesure où les trains partagent leurs ressources. Les effets des incertitudes impactent à la fois les coûts de production et la qualité de service telle que perçue par les utilisateurs (passagers).

Le service attendu par les passagers est une combinaison des différents besoins, à des niveaux d'exigence et sous un seuil d'acceptabilité définis. Dans le modèle présenté dans [Kano et al., 1984], les critères de qualité de service définis par la norme NF EN 13816 ([Bidault and Jallageas, 2002]) sont répartis selon trois catégories : attributs de base, de performance et d'enthousiasme.

Les attributs de base regroupent les attentes de base d'un service de transport. Ainsi, le premier besoin des passagers est la disponibilité du service, c'est-à-dire permettre de se déplacer d'un point à un autre. Ensuite, le passager a besoin d'être rassuré sur sa sécurité personnelle pendant le déplacement (en gare et en train), que ça soit face aux actes criminels ou aux accidents. Enfin, la fiabilité du service est une composante de base des besoins, et contribue fortement au choix des déplacements. Dans la seconde catégorie de besoins, l'accessibilité définit la facilité d'entrer, de traverser et de quitter le système ferroviaire. Ce critère comprend la localisation des gares, l'accès aux différents quais, et la considération des transferts. Dans la dernière catégorie, le modèle regroupe les besoins de confort en train et en gare (propreté et places assises, par exemple), les besoins d'informations sur la circulation (notamment en cas de perturbations) et les besoins de support et d'attention de la part du personnel.

Afin d'établir l'importance de chaque besoin ou critère dans la satisfaction globale des passagers, plusieurs études européennes se basent sur des données d'enquêtes de satisfaction. [van Oort et al., 2011] présente une synthèse de ces études qui montre que la fiabilité du système ferroviaire face aux différentes variations est le critère le plus important dans la qualité de service. Il est par conséquent naturel pour les opérateurs ferroviaires d'essayer d'améliorer la robustesse des plans de transport élaborés.

Nous présentons d'abord les concepts ferroviaires et les différentes définitions associées à la planification des ressources ferroviaires. . Nous présentons ensuite les sources des incertitudes et leur impact sur le processus de planification. Enfin, nous illustrons par un exemple l'intérêt de la planification intégrée des ressources sur la robustesse.

1.2 Planification des ressources ferroviaires

Un plan de transport définit la façon de transporter des passagers entre deux points géographiques en utilisant les ressources matérielles et humaines disponibles. L'élaboration d'un plan doit prendre en considération un ensemble de contraintes techniques et réglementaires afin d'atteindre les objectifs économiques et commerciaux fixés. Plusieurs ressources sont nécessaires à la circulation des trains, les plus critiques sont :

- L'infrastructure : Elle représente l'ensemble des installations physiques permettant de la circulation des trains. L'infrastructure est composée, d'un point de vue macroscopique, des gares et des voies les reliant. D'un point de vue microscopique, elle inclut les quais en gares, les aiguillages et les feux de signalisation.
- Les engins ferroviaires : Ils permettent de transporter les passagers entre les différents points de l'infrastructure. Ils sont divisés en plusieurs catégories en fonction de leurs caractéristiques techniques (capacité, alimentation, vitesse...).
- Les agents de conduite : Ils se caractérisent par leurs profils de qualification (connaissances du réseau et des engins) et leur résidence géographique.

Le processus d'élaboration d'un plan de transport consiste à définir l'utilisation optimale de ces ressources critiques pour couvrir la demande des passagers. Cela revient à prendre des décisions à long terme (construction d'infrastructure par exemple) et des décisions à très court terme (la conduite de deux trains successifs par un même agent, par exemple). Cette différence chronologique justifie une décomposition dans le temps et l'espace de la planification de chaque ressource. Cela a engendré un processus séquentiel sur les trois niveaux décisionnels (stratégique, tactique et opérationnel) communément présenté dans littérature. Dans ce processus, un ordre est également adopté dans la planification des ressources de manière à ce que le processus démarre à chaque niveau par l'infrastructure et se termine par les agents de conduite. Cet ordre est justifié par les coûts d'investissement dans chaque ressource : il semble plus raisonnable de former les agents de conduite en fonction de l'infrastructure existante que d'adapter l'infrastructure aux agents.

Le processus séquentiel permet de maîtriser la complexité de la planification des ressources ferroviaires. Néanmoins, les intégrations horizontales et verticales peuvent améliorer la productivité du système. Cela a inspiré peu de travaux dans la littérature et a connu plus d'intérêt dans le domaine aérien.

Nous présentons dans cette partie le processus séquentiel de la planification des ressources, en énonçant les objectifs, entrées et sorties de chaque sous-problème. Nous pré-

sentons ensuite les possibilités d'intégrations dans le processus en nous inspirant principalement du domaine du transport aérien.

1.2.1 Planification séquentielle des ressources ferroviaires

La planification de ces ressources est réalisée suivant des niveaux temporels. La planification à long terme (*Niveau stratégique*) concerne les décisions durables de construction et d'acquisition des ressources. La planification à moyen terme (*Niveau tactique*) se concentre sur l'affectation non nominative des ressources disponibles aux trains à produire. La planification à court terme (*Niveau opérationnel*) se charge de la construction détaillée des plans de transport. Durant l'exécution d'un plan de transport, une gestion en temps réel est souvent nécessaire localement afin d'assurer le bon déroulement de la circulation et prendre des décisions face aux perturbations.

Nous illustrons le processus global de la planification dans la figure 4.6, où les nœuds représentent les problèmes associés à chaque ressource par niveau décisionnel. Les données d'entrée de chaque problème sont les résultats des deux problèmes suivants :

- Problème associé à la même ressource, traité dans le niveau décisionnel supérieur (arc en pointillés).
- Problème associé à une autre ressource, traité dans le même niveau décisionnel (arc continu).

Il est important de préciser que ce schéma est une représentation simplifiée de la planification réelle omettant les nombreuses itérations entre les étapes. Ce schéma se retrouve dans plusieurs études de recherche sur la planification des ressources ferroviaires ([Acuña-Agost, 2009], [Huisman et al., 2005], par exemple). Nous recommandons particulièrement la revue présentée dans [Caprara et al., 2007] où les auteurs détaillent les sous-problèmes associés aux ressources, et présentent un état de l'art des différentes approches de résolution étudiées.

Décisions stratégiques

En considérant les évolutions technologiques du transport ferroviaire et l'analyse de la demande, le gestionnaire de l'infrastructure doit décider des modifications à apporter au réseau ferroviaire (voies et gares). Le problème doit être considéré d'un point de vue économique (rentabilité financière du réseau à long terme), social (profit social du réseau à long terme), et technique (capacité de l'infrastructure et emplacement des gares).

Le nombre de trains circulant sur le réseau doit couvrir la demande des passagers en

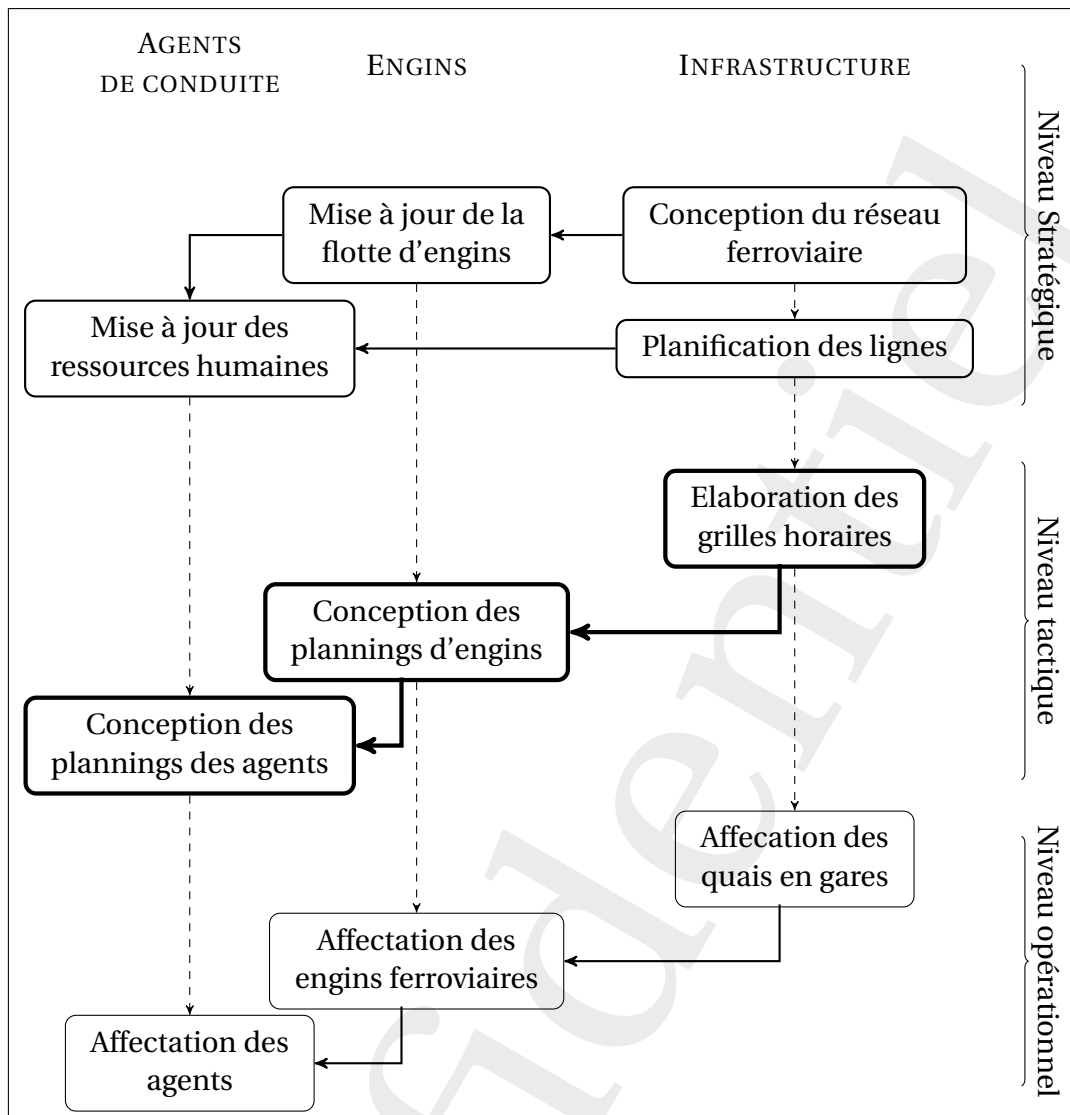


FIGURE 1.1 – Processus séquentiel de la planification du plan de transport ferroviaire.

minimisant les coûts fonctionnels et en respectant la capacité l'infrastructure. L'objectif du problème de planification des lignes est de définir la fréquence de circulation des trains entre deux gares sur une période donnée. Il faut pour cela prendre en considération l'hétérogénéité des lignes (par exemple régionales ou inter régionales) et les contraintes commerciales (les dessertes en gares).

Les entreprises adaptent alors, en fonction des lignes élaborées, la taille du parc d'engins ferroviaires et des ressources humaines (embauches et formations), en considérant les compatibilités techniques entre les différentes ressources.

Décisions tactiques

La conception du plan de transport au niveau tactique commence par l'élaboration d'une grille horaire qui définit la liste des trains à faire circuler sur le réseau pendant une période donnée. Un train est défini comme un service reliant deux points du réseau afin de transporter les passagers. La grille horaire doit respecter la fréquence des lignes décidée au niveau stratégique afin de couvrir la demande des passagers.

Les contraintes de ce problème peuvent être réparties en plusieurs catégories, dont voici quelques exemples :

- Les contraintes de sécurité : deux trains sur une ligne doivent garder une distance minimale entre eux.
- Les contraintes de capacité : il existe un temps minimal à respecter entre deux arrivées/départs d'une gare, ainsi que des conditions de dépassement entre trains sur les voies. Notons que les contraintes de capacité sont très souvent couplées voire se déduisent des contraintes de sécurité.
- Les contraintes commerciales : la demande des passagers définit les horaires des trains ainsi que les dessertes commerciales.

La construction d'une grille horaire peut démarrer d'une grille vide, ce qui représente un processus complexe et coûteux, ou se baser sur une grille existante, généralement utilisée l'année précédente, et l'ajuster aux besoins en déplaçant, ajoutant ou supprimant des trains. Différents objectifs peuvent être considérés pour l'élaboration des grilles horaires (par exemple, la minimisation du temps de voyage des passagers), mais l'objectif le plus commun est la minimisation des coûts ou la maximisation des profits.

La planification des engins consiste à élaborer des roulements d'engins définis comme un ensemble de séquences de trains pouvant être réalisées par des engins de caractéristiques similaires. Ces séquences sont appelées des lignes de roulement. Par exemple, un roulement de dix engins d'un même modèle technique est composé de dix lignes de roulement, représentant chacune une séquence de trains à réaliser par un seul engin.

De plus, la demande des passagers n'est pas toujours symétrique entre deux points du réseau (i.e. le nombre de trains circulant d'une gare A à une gare B peut être différent de celui entre la gare B et la gare A). Néanmoins, il est nécessaire de maintenir une répartition optimale des engins entre les gares. Le problème de planification des engins doit par conséquent inclure des trajets à vide permettant de repositionner les engins pour les trains suivants.

Les contraintes principales du problème de planification des engins peuvent être ré-

parties en trois catégories :

- Contraintes de couverture : l'ensemble des trains doivent être couverts par un nombre d'engins suffisant pour respecter la demande des passagers. Les engins doivent de plus être techniquement adaptés pour la section du réseau sur laquelle circule le train.
- Contraintes de capacité : la flotte d'engins est hétérogène et limitée. Le nombre d'engins d'un type défini affectés aux trains ne doit pas excéder le nombre d'engins disponibles dans ce type.
- Contraintes de circulation : certains engins sont tractés par des engins dits actifs pour couvrir la demande ou pour les repositionner et sont appelés passifs. Le nombre d'engins passifs est limité pour des raisons de sécurité de la circulation. De plus, le problème doit respecter les contraintes de conservation des flots des engins entre les gares.

Le problème de planification des agents de conduite a pour objectif d'affecter des agents de conduite qualifiés à chaque train à un coût minimal en respectant la compatibilité avec les engins affectés.

La solution de ce problème est formulée comme un planning des trains à couvrir par un agent de conduite associé à un dépôt prédéfini. Ce problème est souvent décomposé en deux sous-problèmes :

- *Crew Scheduling* : L'objectif de cette étape est d'élaborer des séquences de trains réalisables par un agent de conduite sur une période de un ou deux jours. Ces enchainements sont appelés *tournées* et doivent respecter les contraintes spatio-temporelles et la réglementation du travail.
- *Crew Pairing* : Les tournées sont séquencées pour obtenir des plannings sur plusieurs semaines, séparés par les temps de repos des agents. Ces plannings sont affectés à des roulements d'agents, définis par un dépôt et un ensemble de connaissances techniques.

Les contraintes des deux problèmes, principalement réglementaires, sont nombreuses et rendent ces deux problèmes très complexes.

Décisions opérationnelles

À la différence des décisions tactiques, le niveau opérationnel permet d'obtenir un plan de transport détaillé par une affectation nominative des ressources. Ce niveau inclut également les décisions locales (qui concernent chaque gare) relatives aux problèmes

d'affectation des quais et de manœuvres (garage). L'affectation détaillée des engins consiste à prendre les décisions optimales de gestion des rames de traction et des voitures, en respectant la nature du réseau. L'affectation nominative des agents de conduite revient à établir une grille de service pour chaque agent, en respectant les contraintes techniques et réglementaires. Ces décisions sont souvent décentralisées et dépendent fortement de l'expérience des experts du métier.

1.2.2 Planification intégrée des ressources ferroviaire

La séquentialité de la planification diminue la complexité du problème de planification des ressources ferroviaires. Les décisions prises à chaque étape sont des données d'entrée pour les étapes suivantes. Par conséquent, l'élaboration des grilles horaires ne prend pas en compte les contraintes d'utilisation des engins et agents de conduite, par exemple. Cela peut conduire à une sous-optimalité des plannings des engins et des agents.

Nous illustrons dans les exemples suivants l'impact de l'intégration des décisions sur la solution globale d'un point de vue de productivité. Notons que l'intégration peut avoir d'autres impacts sur la solution globale (en dehors des coûts) et nous détaillerons cette idée dans la suite de ce chapitre.

- L'impact grille horaire - engins : La construction d'une grille horaire ne prend pas en considération les contraintes techniques des engins. Ainsi, si la différence entre l'heure de fin d'un train et l'heure de début du train suivant est courte (i.e. inférieure au temps d'arrêt minimal de l'engin), deux engins seront utilisés pour couvrir les deux trains. Une intégration des deux problèmes grille horaire et engins offre la possibilité de construire une grille horaire permettant de couvrir les deux trains par le même engin en adaptant les horaires de départ.
- L'impact engins - agent de conduite : Il est important de noter que la réglementation de l'utilisation des agents est différente de celle de l'exploitation du matériel roulant pour des raisons évidentes de sécurité. Ainsi, si un engin est sélectionné en amont pour couvrir deux trains consécutifs, et que la durée totale des trains dépasse une journée de travail, deux agents de conduite sont choisis pour couvrir les deux trains. Une planification intégrée des deux problèmes engins et agents permettrait d'adapter les roulements d'engins aux contraintes du travail, minimisant ainsi le nombre d'agents utilisés.

En partant de cette idée, [Dauzère-Pérès et al., 2015] présente une intégration au ni-

veau tactique des ressources engins et agents de conduite. La résolution simultanée de ces deux problèmes ajoute des contraintes couplantes qui rendent la résolution de ce problème plus difficile et unifie l'objectif de couverture des trains planifiés (Figure 1.2).

D'une part, il faut s'assurer que les trains sont couverts à la fois par un engin et un agent, et d'autre part, que les ressources sélectionnées soient techniquement compatibles (l'agent est qualifié pour conduire le type d'engins choisi).

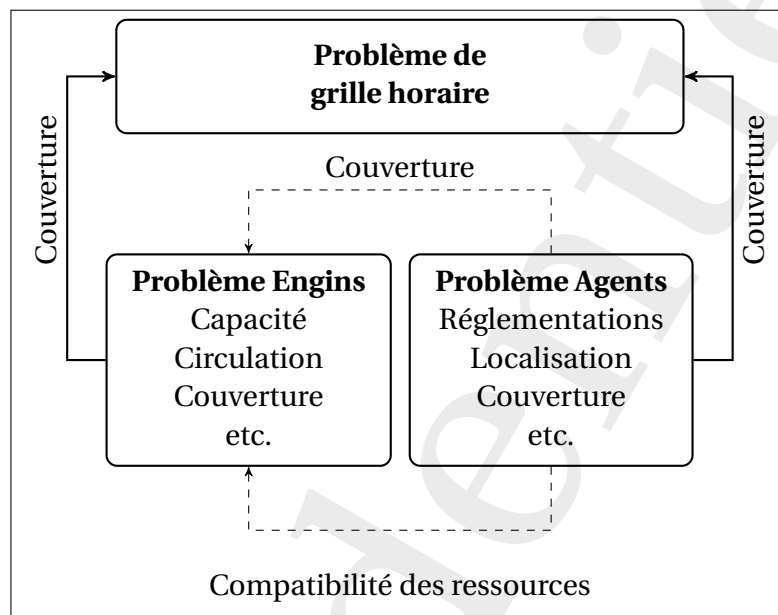


FIGURE 1.2 – Schéma d'intégration des problèmes engins et agents présenté dans [Dauzère-Pérès et al., 2015]

Bien que l'idée de l'intégration soit prometteuse, cette étude est à notre connaissance la seule tentative d'intégration des ressources dans le transport ferroviaire. Néanmoins, dans des domaines similaires, plusieurs intégrations partielles ont été étudiées :

Transport urbain

Le problème de planification des ressources dans le transport urbain est moins complexe que dans le transport ferroviaire. En effet, d'une part, la construction d'une grille horaire est basée sur la demande, sans être contrainte par la répartition du réseau. D'autre part, l'échelle de temps diffère entre les deux modes, car les trajets et les roulements sont plus courts. L'affectation des véhicules pour couvrir les trajets sélectionnés a pour objectif de minimiser les coûts associés à l'utilisation des bus. À ces véhicules sont attribués des conducteurs qualifiés à coût minimal, en respectant la réglementation du travail.

L'intégration des deux problèmes véhicules-conducteurs a été étudiée dans [Freling et al., 2003], [Haase et al., 2001] et [Huisman et al., 2005] et les résultats confirment l'inté-

rêt de la planification intégrée en comparaison avec la planification séquentielle. En effet, avec des temps de calcul raisonnables, l'intégration a permis une réduction du nombre de conducteurs utilisés sans augmenter le nombre de véhicules. Cela implique néanmoins une réflexion sur les méthodes de résolution afin de maîtriser la complexité du couplage.

Transport aérien

Le processus de planification des ressources aériennes suit des étapes similaires à celles du transport ferroviaire : La planification des vols commence par la création de grilles horaires sous forme de matrice Origines-Destinations. Ensuite des roulements d'engins (avions) sont construits en respectant les contraintes de capacité et de maintenance. Enfin, des roulements d'agents sont affectés aux roulements des avions sous les contraintes de réglementation du travail. À la différence du transport ferroviaire, la circulation aérienne ne nécessite pas un réseau physique.

Différentes intégrations partielles ont été étudiées :

- Grille horaire et engins (Figure 1.3a) a été étudiée dans [Lohatepanont and Barnhart, 2012] et [Yan and Tseng, 2002],
- Engins et agents (Figure 1.3b) présentée dans [Cordeau et al., 2001], [Mercier et al., 2005] et [Weide et al., 2010],
- Grille horaire, engins et agents (Figure 1.3c) étudiée dans [Mercier and Soumis, 2007] où la grille horaire est intégrée sous forme de décalages limités des horaires des vols.

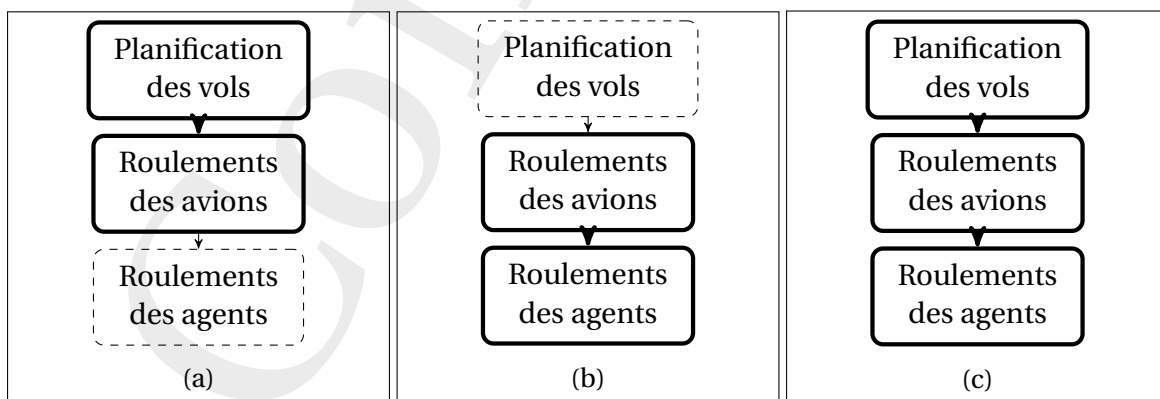


FIGURE 1.3 – Les différents schémas d'intégration étudiés dans le transport aérien.

1.3 Incertitudes dans le transport ferroviaire

Une modélisation déterministe d'un processus complexe suppose une connaissance complète des données du problème. Mais en pratique il existe des incertitudes inévitables à différents niveaux du problème dues à différentes sources, et dont les effets impactent la faisabilité et l'optimalité des solutions. Par conséquent l'intégration des incertitudes dans la prise de décision a connu un intérêt croissant ces dernières années dans plusieurs domaines d'application.

Néanmoins, la prise en compte des incertitudes dans un processus de décision est une tâche complexe et nécessite la définition d'une démarche et de critères et objectifs précis. Nous nous inspirons du cadre d'intégration des incertitudes proposé par [McManus and Hastings, 2006] pour présenter la définition suivante :

Définition 1. *L'intégration des incertitudes dans un processus de planification consiste à identifier les **types** d'incertitudes dont on veut minimiser les **effets**, et de trouver des **réponses techniques** afin d'atteindre les **objectifs** de performance fixés (Figure 1.4).*

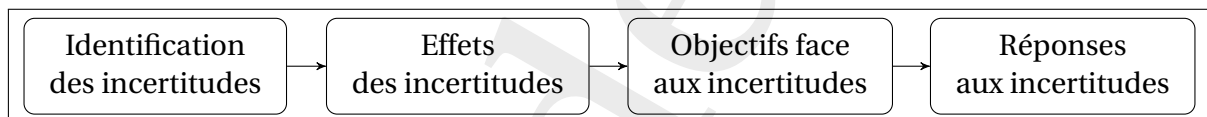


FIGURE 1.4 – Schéma de traitement des incertitudes dans un système complexe [McManus and Hastings, 2006]

1.3.1 Identification des incertitudes

Les incertitudes dans un processus de prise de décision surviennent à des "endroits" (données, hypothèses etc.) considérés comme des points de fragilité [Roy, 2007]. Elles sont le résultat d'informations inconnues ou imprécises, ou d'erreurs d'interprétation et de calcul et peuvent affecter chacune des composantes du processus (figure 1.5).

Nous choisissons la classification présentée dans [Beyer and Sendhoff, 2007] pour décrire les différentes sources d'incertitudes dans un processus de décision, que nous illustrons pour le problème de planification ferroviaire :

- Type A : les incertitudes environnementales. Il peut s'agir de conditions météorologiques qui gênent l'exécution des plans de transport, par exemple. Ces variables sont peu contrôlables en général.
- Type B : les incertitudes sur les décisions. Par exemple, les durées des trains planifiés sont correctement estimées mais contiennent une part incertaine.

- Type C : les incertitudes sur les solutions. La planification des ressources ferroviaires est un processus complexe sujet à des erreurs de mesure et de calcul dues aux choix subjectifs de certains paramètres ou seuils.
- Type D : les incertitudes sur la faisabilité. Ces incertitudes sont souvent liées (voire issues) des incertitudes de types A et B, dont les effets rendent la faisabilité de la solution incertaine.

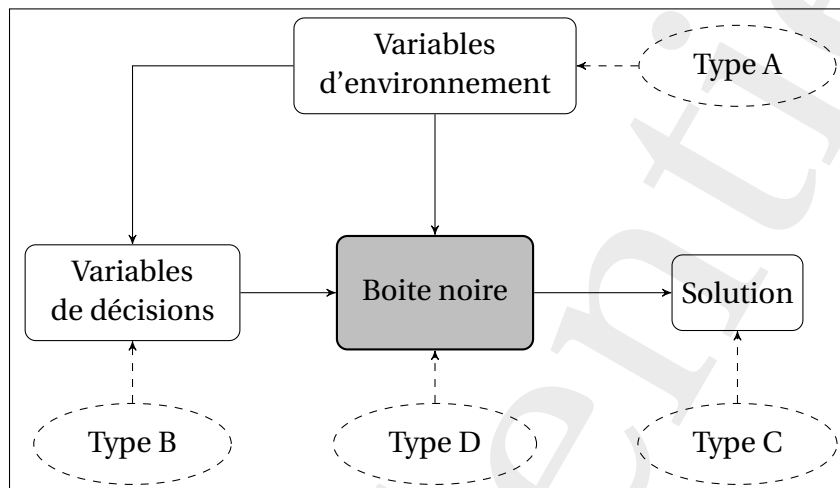


FIGURE 1.5 – Types d'incertitudes dans un processus de décision.

Une classification supplémentaire des incertitudes concerne leur nature et leur contrôlabilité. On différencie ainsi, les données *aléatoires* des données *incertaines*. Les premières sont des données sujettes à des aléas, que le décideur ne peut pas contrôler. Ainsi, la valeur d'une donnée est considérée fixe pour un fonctionnement normal, et ses variations sont décrites par des distributions probabilistes. La seconde catégorie contient les données dont les valeurs sont incertaines par manque de savoir, et théoriquement contrôlables.

Les incertitudes dans le transport ferroviaire sont dues à des sources internes du système (e.g. disponibilité des ressources, décisions opérationnelles), ou à des sources externes (e.g. météo, conditions économiques et sociales). Les premières sont des incertitudes (en théorie) contrôlables, alors que les dernières sont des aléas. Les sources d'incertitudes contrôlables sont réparties dans la littérature en deux catégories : les caractéristiques des ressources, et les paramètres opérationnels [Hansen and Pacht, 2008], [Olsson and Haugland, 2004], [Abril et al., 2008]. On peut citer :

1. Des exemples de sources liées aux ressources :

- * L'infrastructure : les différentes parties de l'infrastructure peuvent être sujettes à des dysfonctionnements (problèmes de signalisations ou des voies, par exemple).

- * Les engins : Par exemple, l'âge, la qualité et régularité de la maintenance sont corrélés au risque de pannes, et donc d'indisponibilité de ressources. La longueur des trains est un autre exemple de source car elle détermine le nombre de portes et par conséquent la fluidité des montées et descentes des passagers.
- * Les agents de conduite : les ressources humaines sont considérées incertaines dans la mesure où leur disponibilité est naturellement affectée par des maladies, retards, ou accidents.

2. Des exemples de sources liées aux opérations :

- * Les temps d'arrêt en station, planifiés dans la grille horaire, et qui augmentent le risque de création de retards en cas de flux important de voyageurs, ou de complications dans les manœuvres.
- * Le nombre d'arrêts d'un train augmente le risque de création de retards en station ou en marche.
- * Les règles de priorité qui peuvent engendrer des retards en cas de situations perturbées.

Cette liste non exhaustive donne un aperçu sur la diversité des sources d'incertitudes qui rend leur intégration dans la prise de décision complexe. Les techniques d'analyse des effets des incertitudes permettent d'identifier les données incertaines critiques dont les effets sont les plus importants.

1.3.2 Effets des incertitudes

L'analyse des effets des incertitudes sur le système permet de quantifier l'impact des variations sur le plan de transport, et ainsi de déterminer les priorités dans l'intégration des incertitudes dans la prise de décision. Il existe différentes techniques de quantification et d'analyse de ces effets. On peut citer :

- L'expertise du métier : résultat des connaissances détaillées du problème et du processus, et des expériences antérieures face aux incertitudes,
- L'analyse de sensibilité : étudie l'impact de la variation d'un seul paramètre sur les objectifs. Cela permet d'identifier les paramètres les plus influents sur la solution.
- L'analyse de stabilité : permet de déterminer un rayon de variation des paramètres incertains tel que la solution reste optimale et/ou réalisable. À la différence de l'analyse de sensibilité, l'analyse de stabilité permet d'identifier les limites de variations de plusieurs paramètres au-delà desquelles la solution devient obsolète.

- La simulation : relie les incertitudes à leurs impacts potentiels et permet de tester différentes réalisations possibles.

Dans le transport ferroviaire, l'évocation d'incertitudes induit une notion de retard, pouvant aller jusqu'à l'annulation, d'un train planifié. Un retard est une déviation de la planification du service prévue et détériore la qualité du service réalisé. En effet, le transport ferroviaire est un service et les variations subies affectent à la fois la productivité du plan de transport et la satisfaction des passagers. Nous expliquons, pour chacun des points de vue, les effets des incertitudes et les différentes définitions de retards associées.

Point de vue de l'opérateur

Les retards dans le système ferroviaire peuvent être causés par le train lui-même (une ou plusieurs des ressources associées au train), et sont dits *primaires*; ou être causés par les trains avec lesquels il partage des ressources, ces retards sont dits *secondaires*.

Cette distinction est importante du point de vue de l'opérateur dans le sens où les retards primaires peuvent résulter de tout type d'incertitudes, alors que les retards secondaires sont entièrement dus aux incertitudes liées aux opérations (Types B et C) et sont par conséquent (en théorie) contrôlables. Ainsi les retards primaires sont dus, en plus des aléas, aux décisions de tous les niveaux décisionnels alors que les retards secondaires dépendent principalement des décisions tactiques et opérationnelles.

La quantification des effets des incertitudes, du point de vue de l'opérateur, doit refléter l'impact des variations sur la productivité. Par exemple, combien de trains retardés? Quelle était la durée de perturbation dans le système? Cela permet de mesurer le coûts des variations par rapport au plan de transport ferroviaire en distinguant, si possible, les retards secondaires des retards primaires.

Point de vue des passagers

La qualité de service est une des priorités des différents acteurs ferroviaires qui visent à imposer une différenciation avec la concurrence croissante, qu'elle soit interne (autres opérateurs) ou externes (autres modes). Le concept de la qualité de service revient à comprendre et modéliser les relations entre la performance du service et la satisfaction qu'en tirent les utilisateurs.

La satisfaction semble être principalement corrélée aux différentes caractéristiques du service face aux variations et aux incertitudes. Par conséquent, les opérateurs fer-

roviaires ont tout intérêt à identifier l'impact des variations non seulement sur les ressources, mais également sur les passagers.

Le trajet tel qu'il est vécu par le passager ne se limite pas au temps passé dans le train, mais regroupe différents types de temps selon les étapes de ses déplacements dans le système ferroviaire. Lorsqu'un retard se produit, une ou plusieurs composantes de ce trajet sont prolongées. Quantifier la perception des passagers revient à comprendre la valeur de satisfaction donnée à chaque composante.

De plus, les passagers ne distinguent pas les retards primaires des secondaires : un retard est un retard ! La performance globale du système est également une mauvaise mesure de la qualité du service réalisé, dans le sens où chaque passager est préoccupé par son propre trajet limité dans le temps et l'espace.

1.3.3 Objectifs face aux incertitudes

Il s'agit de déterminer l'exigence souhaitée sur le comportement du système face aux incertitudes. Du point de vue de la productivité du système, et en partant de la distinction entre les retards primaires et les retards secondaires, deux directions paraissent évidentes pour choisir les objectifs face aux incertitudes : minimiser l'occurrence des retards ou minimiser leur propagation. Les deux objectifs sont complémentaires mais difficiles à traiter simultanément. En effet, les deux types de retards ne sont pas dus aux mêmes sources d'incertitudes ni du même niveau décisionnel.

La notion de robustesse revient souvent dans la planification des ressources ferroviaires mais, à notre connaissance, aucune définition commune n'a été adoptée dans la littérature. [Bourez et al., 2007a] définit néanmoins trois directions pour définir et quantifier la robustesse des plans de transport :

1. La capacité du plan de transport à absorber des retards primaires sans intervention en temps réel (absorption).
2. Le nombre de changements nécessaires dans le plan de transport pour gérer l'occurrence d'un retard primaire (réparabilité).
3. Le temps nécessaire au plan de transport pour résorber les effets d'un retard primaire (résilience).

Ces trois directions permettent la définition de plusieurs familles de critères que nous détaillerons dans le chapitre 2. Ces critères dépendent des connaissances de l'opérateur et doivent être calculables et pertinentes. De plus, les objectifs de robustesse s'ajoutent aux objectifs de performance des solutions et représentent des coûts supplémentaires pour la mise en exécution. Par conséquent, le choix des objectifs de robustesse et des degrés

d'exigence associés se base sur un compromis entre la robustesse des solutions et leurs coûts.

1.3.4 Approches de prise en compte des incertitudes

L'intégration des incertitudes dans la prise de décision revient à ajouter des objectifs de robustesse aux objectifs de performance des solutions. On peut distinguer dans un processus deux phases selon l'horizon temporel :

- une phase de conception, où l'on dispose uniquement de connaissances théoriques sur les incertitudes basées sur les estimations et les connaissances antérieures.
- une phase d'exploitation, où l'on connaît le contexte réel et l'on dispose de connaissances plus précises sur les données incertaines en phase de conception.

Ainsi, trouver des réponses techniques pour faire face aux incertitudes peut se faire par différentes approches, en fonction de la phase du processus où l'on décide de les traiter. Différentes classifications des approches de résolution existent dans la littérature, nous retenons celle de [Roy, 2007] qui les répartit en approches *proactives*, *réactives* et *proactives-réactives*.

Approches proactives

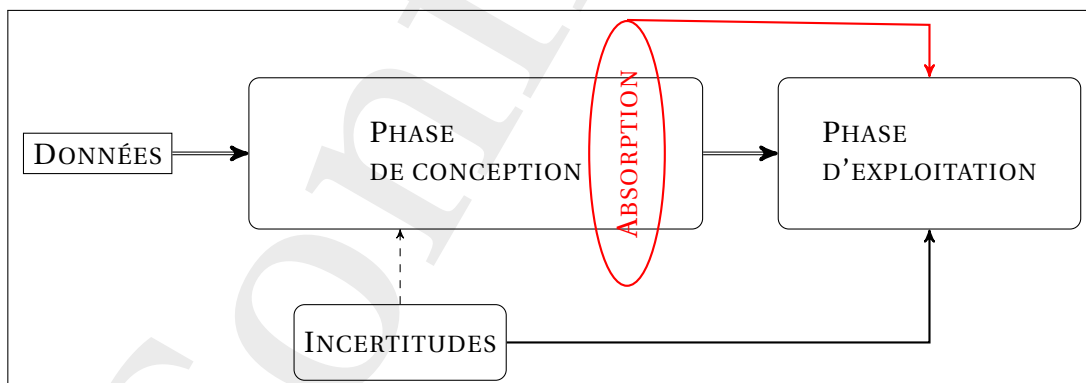


FIGURE 1.6 – Représentation d'une approche proactive dans un processus de décision.

Les approches proactives consistent à intégrer les incertitudes en phase de conception. Cela signifie que, d'une part, la connaissance des incertitudes est limitée, mais leur modélisation est possible, et d'autre part que la solution ne nécessite pas d'intervention en temps réel (i.e. en phase d'exploitation). On cherche ainsi une solution capable d'absorber les effets des incertitudes (Figure 1.6).

Ces approches sont efficaces face aux incertitudes dont les effets sur la solution sont limités, et consistent le plus généralement à accorder des suppléments de temps et/ou de ressources, et peuvent donc entraîner une sous-exploitation des ressources ou une sous-productivité du système. Lorsque les incertitudes ne sont pas faciles à modéliser, ou que leur impact ne peut pas être absorbé en phase de conception, il est nécessaire d'intervenir en phase d'exploitation, par le biais des approches réactives.

Approches réactives

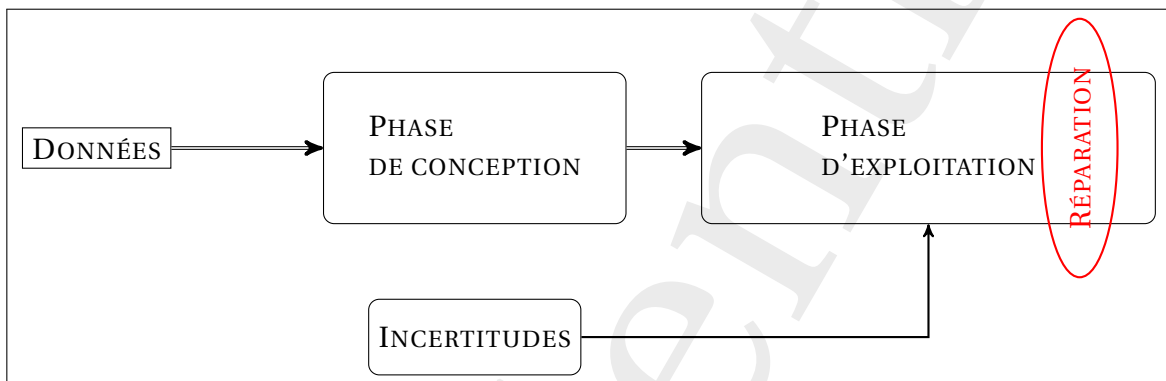


FIGURE 1.7 – Représentation d'une approche réactive dans un processus de décision.

Les approches réactives sont situées en phase d'exploitation et ont pour objectif de réparer l'impact des incertitudes sur la solution en un temps limité. Ces approches permettent de gérer en temps réel les incertitudes ayant un impact important sur le système, et dont la prise en compte en phase de conception est trop complexe (Figure 1.7).

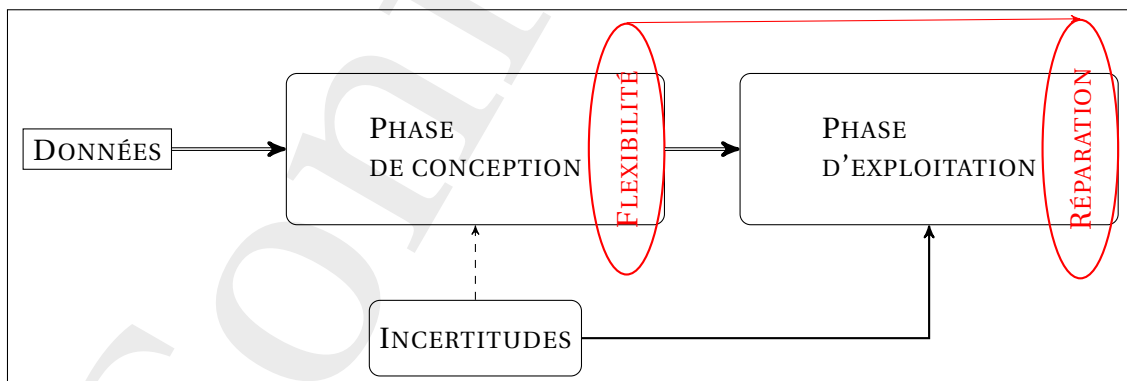


FIGURE 1.8 – Représentation d'une approche proactive-réactive dans un processus de décision.

Approches proactives-réactives

Les approches proactives-réactives consistent dans un premier temps à considérer les incertitudes en phase de conception, sans objectif d'absorption totale de leurs impacts

sur la solution. Cette catégorie d'approche repose sur le choix, en phase de conception, de règles et de politiques à appliquer en phase d'exploitation, en profitant de la flexibilité accordée en conception (Figure 1.8).

Choix des approches

Le choix de l'approche dépend des incertitudes considérés ainsi que des objectifs fixés :

- les approches proactives sont adaptées pour faire face aux incertitudes aux effets limités dans un objectif d'absorption ou de résilience.
- les approches réactives sont utiles pour face aux effets importants des incertitudes si l'on peut limiter le problème pour obtenir des solutions rapides (objectif de réparabilité),
- les approches proactives-réactives offrent un compromis entre les deux premières approches en combinant une flexibilité sur les ressources ou les opérations et des règles de réparation en phase d'exploitation. Ces approche peuvent s'adapter à l'ensemble des directions d'objectifs de robustesse présentés (absorption, résilience et réparabilité).

Le cadre d'intégration des incertitudes dans la planification que nous avons présenté permet d'identifier les différentes composantes nécessaires. Ces composantes sont interdépendantes : les incertitudes considérées et leurs effets influencent les objectifs de robustesse et les stratégies employées. Dans le transport ferroviaire, les retards primaires sont presque inévitables. Leur propagation sur le plan de transport est quant à elle contrôlable (en théorie) par une gestion optimale des interactions entre les ressources.

1.4 Impact de la planification séquentielle des ressources sur la robustesse

Les effets des incertitudes sur les plans de transport sont les retards primaires et secondaires. Plus précisément, les retards primaires sont dus aux décisions stratégiques ainsi qu'aux éléments aléatoires, et les retards secondaires sont dus au partage des ressources (infrastructure, engins et agents) par les trains. Un processus de planification séquentiel au niveau tactique ne considère pas les interactions entre les ressources planifiés, augmentant ainsi le risque de propagation des retards primaires.

Nous partons de l'hypothèse qu'il serait très coûteux d'essayer d'éliminer toute source

de retards primaires du système. Cela implique en effet des investissements importants sur les ressources ferroviaires et une adaptation de la planification au niveau stratégique. La minimisation de la propagation des retards revient à modifier la planification des ressources du niveau tactique jusqu'au niveau de la gestion en temps réel. Cette idée se confirme dans la littérature (nous détaillons dans le chapitre 2) où une grande partie des travaux sur la robustesse ferroviaire se concentre sur la minimisation de la propagation des retards (du moins au niveau Européen).

Néanmoins, en raison du caractère séquentiel du processus de planification des ressources, la prise en compte des objectifs de robustesse se concentre sur une seule ressource à la fois. La motivation principale de notre travail émane de l'idée que la robustesse telle que nous la définissons (minimisation de la propagation) dépend fortement de l'interaction des ressources, et doit par conséquent faire partie d'un processus de planification intégrée des ressources.

Nous illustrons cette hypothèse par l'exemple présenté dans la figure 4.1. Nous définissons dans cet exemple la circulation des trains T_i avec $i \in 1, \dots, 5$ entre trois gares sur une courte période. Nous définissons chaque train comme un couple composé de l'engin et de l'agent de conduite qui lui sont affectés (e, a) comme suit (Figure 1.9a) :

$$T_1 = (e_1, a_1)$$

$$T_2 = (e_2, a_2)$$

$$T_3 = (e_1, a_2)$$

$$T_4 = (e_2, a_1)$$

$$T_5 = (e_3, a_3)$$

Lorsqu'un retard primaire touche le train T_2 , tous les trains suivants dans le plan subissent un retard secondaire de la manière suivante (Figure 1.9b) :

- T_3 : l'agent a_2 a été touché par le retard primaire et doit respecter un temps de pause minimal entre deux tâches,
- T_4 : l'engin e_2 a été touché par le retard primaire et doit respecter un temps de retournement minimal entre deux tâches,
- T_5 : l'infrastructure allouée a été occupé plus longtemps par T_4 et les trains doivent respecter une distance minimale de sécurité.

Le premier constat de cet exemple est que l'étude des effets des incertitudes et donc l'évaluation de la robustesse pour une seule ressource donne une information incomplète. Il est ainsi plus complet de mesurer la propagation sur les plannings des trois ressources.

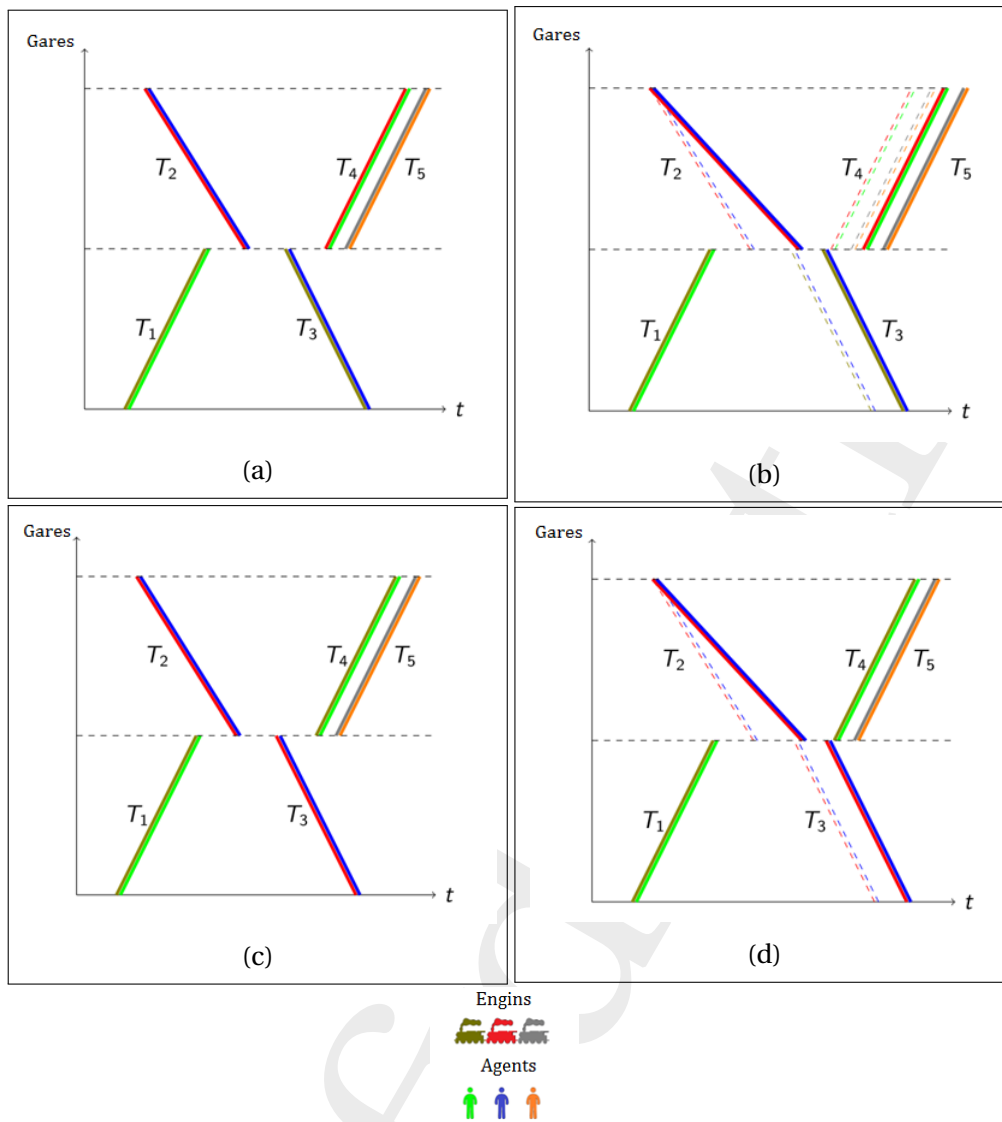


FIGURE 1.9 – Exemple illustrant l'impact de l'intégration des ressources sur la robustesse

D'un autre coté, si l'on s'intéresse aux possibilités d'amélioration de la robustesse, une planification simultanée des ressources peut permettre une réduction significative de la propagation. Par exemple, si l'on changeait l'affectation des ressources de notre exemple de manière à maintenir les ressources e_2 et a_2 ensemble (Figure 1.9c), le même retard primaire de T_2 ne se propage que sur T_3 et pas les autres trains (Figure 1.9d).

Cet exemple sommaire illustre notre motivation à examiner l'impact de l'intégration des ressources sur la robustesse des plans de transport. Plusieurs questions doivent être alors considérées :

1. Quels retards éventuels considérer dans notre étude ?
2. Comment définir la robustesse d'un plan de transport, et surtout comment la quantifier ?

3. Comment gérer la complexité de l'intégration des trois ressources critiques ?

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les concepts généraux indispensables à la compréhension de notre travail. Nous avons détaillé dans un premier temps les processus de planification des ressources ferroviaires critiques. Leur utilisation est régie par des contraintes de capacités et de fonctionnement à différents horizons temporels.

Le processus présenté est communément rencontré dans la littérature, et est quasiment toujours modélisé de manière déterministe. Cela signifie que la planification suppose une connaissance complète du système et de son fonctionnement. Or, plusieurs sources d'incertitudes peuvent perturber la production d'un plan de transport et engendrer des effets souvent quantifiés en termes de retards. Nous avons présenté une approche d'intégration des incertitudes et leurs effets, afin d'explicitier les définitions associées aux retards ferroviaires ainsi que les différentes possibilités de traitement.

Plusieurs travaux dans la littérature s'intéressent à la robustesse dans la planification d'une seule ressource. Cela est justifié par le processus séquentiel classique et la complexité de chaque sous problème. Néanmoins, la propagation des retards dépend entièrement des plannings des ressources. Nous sommes convaincus de l'impact positif de l'intégration des ressources sur la robustesse des plans de transport.

Nous présentons dans le prochain chapitre les différentes approches d'évaluation et d'optimisation de la robustesse pour les différentes ressources principalement au niveau tactique. Chaque étude présente une approche adaptée à la définition précise de robustesse adoptée, et leur revue a pour objectif de guider notre choix de méthodologie. Nous présentons les approches selon les points de vue choisis (opérateur ou passager) en distinguant les différents objectifs présentés (absorption, réparabilité et résilience).

Confidentiel

Chapitre 2

Revue de littérature sur la robustesse des transports ferroviaires

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	Évaluation de la robustesse ferroviaire	30
2.2.1	Identification des retards primaires	30
2.2.2	Indicateurs de robustesse	31
2.2.3	Méthodes d'évaluation de la robustesse	34
2.3	Optimisation de la robustesse ferroviaire	35
2.3.1	Objectifs de robustesse	35
2.3.2	Stratégies d'amélioration de la robustesse dans le transport ferroviaire	40
2.4	Conclusion	44

2.1 Introduction

La présentation du contexte ferroviaire démontre l'intérêt de la robustesse à la fois pour les passagers et pour les opérateurs. Cet intérêt se retrouve dans la littérature, où la recherche de la robustesse dans la planification des ressources ferroviaires attire de plus en plus de chercheurs. Nous concentrons notre revue de littérature sur les études réalisées au niveau tactique et en temps réel. Notre problème se situe en effet au niveau tactique de la planification des ressources, et la gestion en temps réel permet de comprendre les effets des retards sur les ressources.

En raison du processus séquentiel commun, la majorité des études présentées porte sur la planification robuste d'une seule ressource à la fois.

Nous nous inspirons dans la classification de la littérature du schéma d'intégration des incertitudes ([McManus and Hastings, 2006]) présenté dans le chapitre 1. Nous présentons premièrement les études liées à l'évaluation de la robustesse ferroviaire. Cela inclut des exemples de stratégies d'identification des incertitudes dans le transport ferroviaire, ainsi que de leurs effets sur les plans de transport. Bien que ces effets soient toujours liés à une notion de déviations du plan de transport planifié, les différentes métriques permettent de distinguer les points de vue des opérateurs et des passagers, et refléter les effets locaux ou globaux des retards.

Ensuite, nous identifions dans la littérature les études visant à améliorer la robustesse des plans de transport. Nous détaillons les différents objectifs de robustesse présentés dans [Bourez et al., 2007a] : l'absorption, la réparabilité et la résilience ; et précisons, pour chaque direction, les différentes définitions de la robustesse adoptées par les auteurs et leurs liens avec les caractéristiques des plans de transport. Enfin, nous présentons les différentes stratégies pour atteindre les objectifs de robustesse. Ces approches sont proactives, réactives ou proactives-réactives.

2.2 Évaluation de la robustesse ferroviaire

L'évaluation de la robustesse d'un plan de transport consiste à quantifier l'impact d'un scénario donné de retards primaires sur le plan de transport. Cela signifie qu'il faut définir les trois notions suivantes : d'abord identifier le(s) scénario(s) de retards primaires sous lesquels l'on cherche à évaluer le plan, ensuite définir les métriques qui quantifient la robustesse. Nous les appelons indicateurs de robustesse dans la suite de ce manuscrit. Enfin, choisir la méthode de calcul des indicateurs de robustesse.

2.2.1 Identification des retards primaires

Les sources d'incertitudes internes et externes du système sont nombreuses et en partie incontrôlables (Voir chapitre 1). Ces incertitudes ont pour effets des retards primaires qui affectent les trains et se propagent sur le reste du système, engendrant ainsi des retards secondaires. L'identification des scénarios de retards primaires signifie comprendre quand et où ce retard se produit, et quelle est sa durée.

En cas de disponibilité de données sur les retards réels enregistrés, l'identification des

retards primaires et leur distribution est une tâche difficile. En effet, les données enregistrent les variations entre le plan de transport planifié et réalisé. Dans la mesure où un train peut être touché par un retard primaire, secondaire ou les deux à la fois, il est difficile d'identifier le pourcentage réel des retards primaires. En cas d'absence ou de manque de données réelles, il est nécessaire d'estimer la distribution des retards primaires.

Une des premières études visant à estimer la distribution des retards dans le transport ferroviaire est présenté dans [Schwanhäusser, 1974]. L'auteur conclut que la distribution des retards mesurés à l'arrivée des trains suit une loi exponentielle négative où les retards de grande ampleur se produisent avec une probabilité inférieure à celle des petits et moyens retards. Cette conclusion est confirmée par [Goverde et al., 2001] et [Yuan, 2006]. Afin de mieux capturer les retards au départ du train comme à son arrivée, d'autres lois ont été utilisées dans la littérature comme la loi Weibull, la loi gamma et la loi lognormale ([Higgins and Kozan, 1998], [Bruinsma et al., 1998] et [Yuan, 2006]).

2.2.2 Indicateurs de robustesse

Les variations des plans de transport entre la conception et l'exploitation peuvent être mesurées selon plusieurs indicateurs de robustesse. Le choix de ces indicateurs dépend de leur calculabilité et des objectifs de robustesse fixés. Une des premières distinctions observées dans la littérature est le positionnement du point de vue des coûts de production (opérateur) ou du point de vue de l'utilisateur (passager). Dans le premier cas, les indicateurs doivent refléter les déviations de la planification des différentes ressources. De manière générale, les études rencontrées dans la littérature se concentrent sur les déviations d'une seule ressource. Cela est dû à la décomposition séquentielle de la planification des ressources dans les niveaux de décision. Il est également possible de distinguer, du point de vue de l'opérateur, les retards primaires des secondaires. Cela permet de quantifier les pourcentages des différentes sources (aléatoires ou décisionnelles, par exemple).

Dans le cas où l'on considère le point de vue des passagers, les indicateurs de robustesse se concentrent sur les trajets des passagers et non sur le système. La décomposition de leurs parcours dans le système ferroviaire (trajet et attente, par exemple) permet de mesurer l'impact des retards sur la qualité du service.

Point de vue de l'opérateur

La mesure la plus utilisée pour quantifier la robustesse est la ponctualité. Un train est dit ponctuel si ses horaires théoriques sont respectés, ou si la déviation des horaires est

inférieure à un seuil prédéfini [Vromans et al., 2006]. La ponctualité peut être calculée au départ ou l'arrivée du train et est souvent utilisée par les opérateurs (et les acteurs ferroviaires) comme mesure de la robustesse du transport ferroviaire.

Une autre idée pour capturer les déviations d'un plan de transport est de mesurer les retards cumulés sur une période donnée selon différentes métriques (somme et moyenne par exemple) ([Nielsen et al., 2007] [Tréfond, 2014]). Cet indicateur offre une idée du comportement du plan de transport face aux retards sans distinguer les retards primaires des secondaires. Cela peut poser un problème lors de l'évaluation d'un plan de transport dans le sens où l'on ne distingue pas les retards dus aux caractéristiques du plan évalué. Ainsi, dans [Vromans et al., 2006], la robustesse est quantifiée en mesurant (entre autre) la somme des retards secondaires constatés suite à des retards primaires. Un indicateur complémentaire utilisé dans [Salido et al., 2012] est le pourcentage des retards primaires absorbés. La robustesse d'un plan de transport est ainsi mesurée par sa capacité à subir des retards primaires jusqu'à un seuil défini sans engendrer de retards secondaires.

La quantification de la robustesse peut également s'exprimer en terme de sa propagation dans le temps. Ainsi, [Tréfond, 2014] mesure le temps de retour à la normale, défini par la différence entre l'instant d'occurrence d'un retard primaire et le moment de sortie du système du dernier train affecté par le retard primaire ou un retard secondaire engendré. Dans la même idée, [Salido et al., 2012] mesure la capacité d'un plan de transport à revenir à la circulation planifiée en un temps inférieur au seuil défini. Dans [Vromans et al., 2006], le temps et les efforts nécessaires pour revenir à une situation normale mesurent la stabilité d'un plan de transport.

Point de vue des passagers

D'un point de vue économique, chaque individu dispose de ressources limitées en temps et en argent dont il cherche à optimiser l'allocation. Le transport est un produit de consommation intermédiaire, les passagers cherchent par conséquent à gagner du temps sur les déplacements afin de le dépenser dans d'autres activités (travail ou loisir). Ainsi, les passagers associent une utilité à chaque option de déplacement disponible (mode, heure, trajet, etc.) et choisissent l'option qui maximise l'utilité.

Le trajet tel qu'il est vécu par le passager ne se limite pas au temps passé dans le train, mais regroupe différents types de temps selon les étapes de ses déplacements dans le système ferroviaire. La compréhension de la perception par les passagers de ces différentes composantes repose sur la monétarisation du temps, définie par le revenu sacrifié dans une activité par unité de temps ([Becker, 1965]). La valeur du temps de transport dépend

théoriquement de facteurs individuels socio-économiques tels que le revenu, la catégorie socio-professionnelle ou le motif de déplacement [Crozet, 2005].

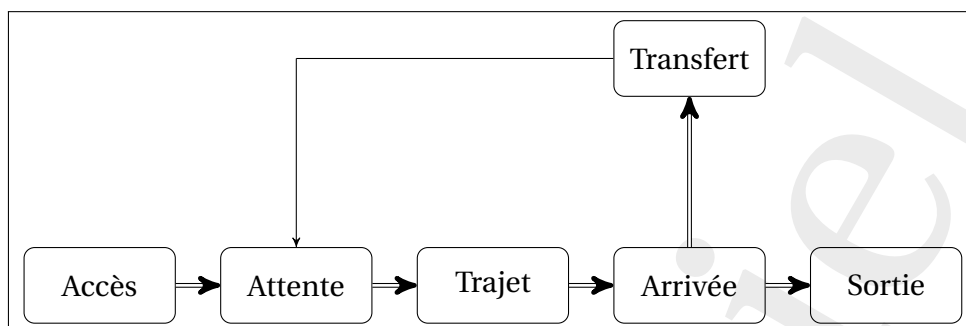


FIGURE 2.1 – Étapes de déplacements dans le système ferroviaire.

La décomposition présentée dans le schéma 2.1 est particulièrement importante dans le contexte incertain des systèmes ferroviaires. En effet, en cas de retards, les passagers les perçoivent différemment en fonction de la partie de leur trajet affectée. Par exemple, les valeurs du temps associées montrent que les variations des temps d’attente sont plus importantes du point de vue des passagers que les déviations des temps de trajet ([Bruinsma et al., 1998]).

[van Oort et al., 2011] présente les correspondances entre les variations du plan de transport telles qu’elles sont vues par les opérateurs et les passagers (Tableau 2.1). Ainsi, un retard au départ d’un train augmente le temps d’attente des passagers, et un retard en marche engendre un prolongement des temps de trajet et d’attente en cas de correspondance. Enfin, l’annulation d’un train augmente le temps d’attente des passagers selon la fréquence de la ligne.

Opérateur	Passager
Variation des heures de départ	Temps d’attente
Variation du temps de marche	Temps de trajet et temps d’attente
Annulation de train	Temps d’attente

TABLEAU 2.1 – Relation entre les variations telles que vu par l’opérateur et par le passager .

Naturellement, plusieurs indicateurs basés sur les variations des différents temps de trajets existent dans la littérature. Dans [Barrena et al., 2013], la robustesse d’un plan de transport est mesurée par la déviation du temps d’attente moyen des passagers. [Vans-teenwegen and Van Oudheusden, 2007] détaillent le temps d’attente des passagers répartis en trois catégories :

- passagers qui ont une correspondance avec un autre train,
- passagers qui restent dans le train,
- passagers qui arrivent à destination.

Le temps de trajet est un indicateur considéré dans [Dewilde et al., 2011] [Sels et al., 2013] et le temps de transfert dans [Liebchen et al., 2010] [Takeuchi et al., 2006].

La ponctualité vue par les passagers inclut les déviations positives et négatives des horaires. En effet, un train ayant un retard négatif au départ (départ avant l'heure prévue) engendrera des temps d'attente prolongés pour les passagers qui le ratent. D'autre part, les conducteurs ont tendance à accélérer à la fin des lignes ([Smits, 2009]). Par conséquent, un train ponctuel au départ peut arriver avec un retard négatif à la fin de la ligne, diminuant la ponctualité du point de vue des passagers. [Barron et al., 2013] mesurent pour chaque perturbation le nombre total des passagers affectés ainsi que le retard moyen de tous les passagers.

2.2.3 Méthodes d'évaluation de la robustesse

Les exemples d'indicateurs de robustesse présentés se basent sur les déviations du plan de transport. Ils peuvent être mesurés à l'aide de méthodes analytiques ou de modèles de simulation. Une méthode analytique permet d'évaluer la performance d'un plan de transport face à des perturbations en identifiant le changement de caractéristiques prédéfinies. La littérature ferroviaire montre un intérêt pour l'algèbre max_plus ([Goverde, 1999] [Hansen and Pachel, 2008]) et des modèles de files d'attente ([Huisman et al., 2002] [Higgins and Kozan, 1998]).

Les modèles de simulation offrent l'avantage de représenter les aléas assez aisément. [Vromans et al., 2006] utilise le simulateur SIMONE (Simulation Model for Networks) développé par [Middelkoop and Bouwman, 2001] pour le réseau néerlandais, et [Salido et al., 2012] l'outil MOM (Optimized Railway Timetables) développé pour le réseau espagnol. Ces simulateurs introduisent des scénarios de retards primaires dans une grille horaire existante afin d'en quantifier la propagation.

Afin d'évaluer la robustesse de roulements d'engins, [Nielsen et al., 2007] mesure les retards propagés et les retards cumulés, et [Tréfond, 2014] évalue pour le réseau français l'impact des retards sur la planification des engins.

Bien que les études citées traitent différentes ressources (infrastructure et engins), les indicateurs de robustesse mesurés sont tous liés aux décalages de la grille horaire. En effet, si un train est retardé à cause de son engin ou agent de conduite, ses horaires sont décalés et les exemples d'indicateurs présentés permettent de capturer ce décalage. Néanmoins, en mesurant uniquement les décalages de la planification de l'infrastructure, les indicateurs ne permettent pas d'identifier la ressource "responsable" du retard et donc de repérer les points fragiles des planifications des ressources.

La phase d'évaluation permet de valider les décisions de planification visant à améliorer la robustesse et de comparer plusieurs solutions sous des scénarios de retards. Cette phase est alors complémentaire à la phase d'optimisation où plusieurs stratégies peuvent permettre d'atteindre différents objectifs.

2.3 Optimisation de la robustesse ferroviaire

L'amélioration de la robustesse des plans de transport consiste à définir des objectifs de robustesse et les stratégies pour les atteindre. Les objectifs de robustesse définissent le comportement souhaité d'un plan de transport face à des perturbations. Nous avons présenté dans le chapitre 1 trois directions pour le choix des objectifs : absorption, réparabilité et résilience. Pour atteindre l'un de ces objectif, il est nécessaire d'identifier la ou les caractéristique(s) qui impacte(nt) le plus l'objectif de robustesse. Ensuite, il faut définir une méthodologie d'optimisation des caractéristiques choisies afin d'améliorer l'absorption, réparabilité ou résilience du plan de transport.

Nous rappelons que le processus de planification est habituellement séquentiel et se concentre sur une seule ressource à la fois. Cela signifie que, dans la recherche de robustesse, les caractéristiques choisies et qui influencent le comportement du plan de transport sont souvent associées à une seule ressource.

2.3.1 Objectifs de robustesse

Objectifs d'absorption

La première direction lors du choix des objectifs de robustesse est l'absorption des retards primaires. Dans [Goverde, 2005], la robustesse est définie comme la capacité à faire face à une certaine quantité de retards sans intervention sur le trafic. Cette notion signifie que le plan de transport est capable, par ses caractéristiques de construction, d'empêcher la propagation d'un retard entre les trains.

Afin de mieux saisir les objectifs d'absorption dans un plan de transport, nous répertorions dans cette partie les caractéristiques des planifications des différentes ressources qui permettent l'absorption des retards. Ces caractéristiques permettent d'augmenter les marges ou de synchroniser l'utilisation des ressources. Cela signifie qu'un plan robuste en absorption peut sous-utiliser ses ressources par rapport à un plan non robuste. Nous tentons de présenter les compromis trouvés entre l'utilisation de ces différentes marges

et la productivité du système ferroviaire.

Marges de l'infrastructure ferroviaire

Les objectifs d'absorption des grilles horaires sont basés sur l'insertion de marges afin d'absorber les petits retards et en empêcher la propagation. Ces marges peuvent être insérées aux temps de marche des trains (Figure 2.2b), aux temps d'arrêts et de manœuvres des trains en gares (Figure 2.2c) ou aux espacements entre les trains (Figure 2.2d) ([De-wilde et al., 2011]).

Un choix judicieux des marges de marche permet aux petits retards d'être absorbés entre deux stations. Quantitativement, ces marges doivent être assez petites pour réduire le temps d'occupation des quais en gare, et assez grandes pour absorber les retards et assurer les correspondances des ressources. [Salido et al., 2012] étudient l'impact des marges de marches sur la propagation des retards et proposent des stratégies d'homogénéisation de leur répartition. [Goverde, 1999] cherche à répartir les marges de marche pour améliorer la ponctualité du plan, et [Vansteenwegen and Van Oudheusden, 2007] pour minimiser le temps d'attente des passagers. En plus de leurs durées, l'emplacement des marges de marche sur le trajet du train joue également un rôle dans la robustesse des grilles horaires ([Kroon et al., 2007]).

Les temps d'arrêt en gare doivent être assez grands pour permettre les manœuvres, les montées et descentes des passagers et l'absorption des petits retards ; et doivent être assez petits pour minimiser le temps d'attente des passagers et le temps d'occupation des quais en station. [Takeuchi et al., 2006] en évaluent l'impact sur la satisfaction des passagers et [Cacchiani et al., 2012] sur le profit des solutions.

Les espacements entre les trains préviennent de la propagation des retards sur les trains suivants (notamment les trains les plus rapides) ([Yuan and Hansen, 2008]). Dans [Vromans et al., 2006], deux indicateurs basés sur les espacements entre deux gares et les espacements à l'arrivée permettent de mesurer l'hétérogénéité de l'infrastructure (différence de temps de marche sur une même section de réseau). L'auteur propose plusieurs stratégies pour homogénéiser le trafic, par exemple d'homogénéiser la vitesse des trains sur un même ligne pour optimiser la répartition des espacements et réduire la propagation des retards.

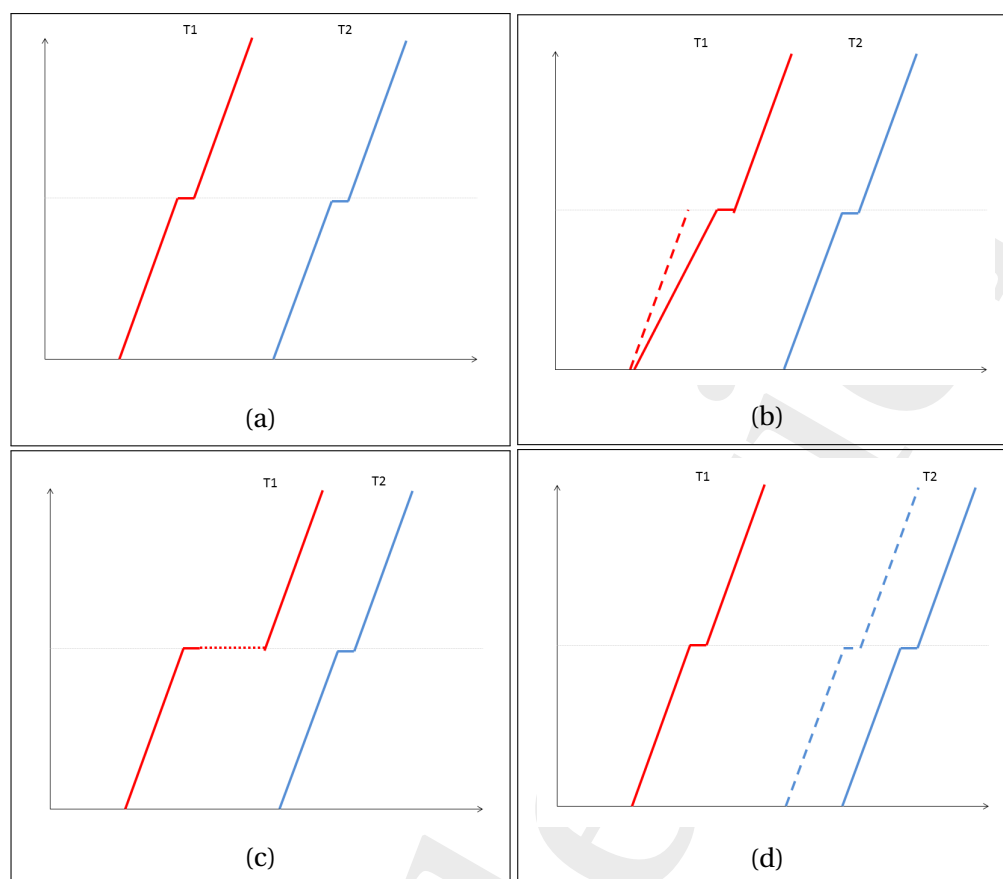


FIGURE 2.2 – Illustration des différentes marges d'un train dans la grille horaire

Marges des engins

Au niveau tactique, l'objectif du problème de planification des engins est d'optimiser l'utilisation des engins disponibles afin de couvrir la grille horaire établie. Plusieurs décisions influencent la capacité d'absorption des engins :

- Le temps de retournement est le temps entre deux trains consécutifs couverts par un même engin. [Nielsen et al., 2007] illustre la différence entre des temps de retournement courts (Figure 2.3a) et des temps de retournement longs (Figure 2.3b). Ces derniers permettent d'absorber un retard primaire sans le propager (via l'engin) aux trains suivants ([Tréfond, 2014]). Néanmoins, l'augmentation des temps de retournements peut impliquer un besoin d'engins supplémentaires et donc des sur-coûts de production.
- Les engins sont souvent recomposés (couplés ou découplés) afin d'assurer l'accueil des passagers. Le nombre de recompositions d'un engin sur une période donnée augmente le risque de propagation des retards ([Cacchiani et al., 2008]) et réduit les marges d'arrêt dans les grille horaires ([Nielsen, 2011]). Minimiser ce nombre peut néanmoins augmenter le nombre d'engins nécessaires à la couverture de la

demande des passagers.

- Les trajets à vide permettent de repositionner les engins afin d'assurer la couverture des trains suivants. [Cadarso and Marín, 2011] pénalisent la planification des trajets à vide pendant les heures de pointe, afin de minimiser la propagation des retards sur des trains commerciaux.

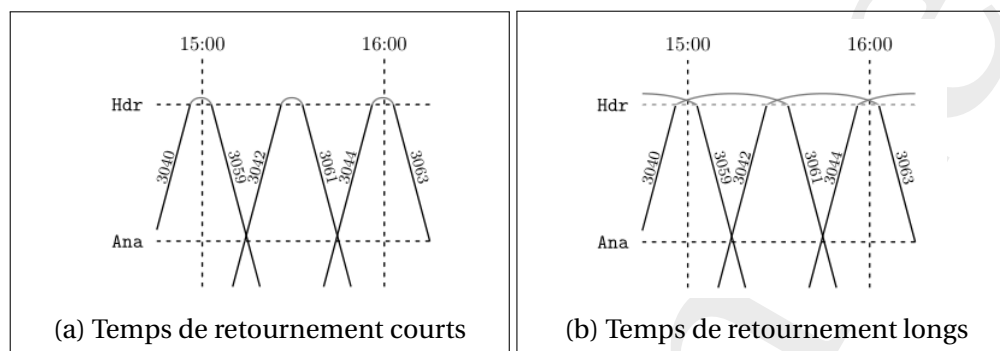


FIGURE 2.3 – Illustration des temps de retournement par [Nielsen et al., 2007]

Marges des agents de conduite

Aux niveaux tactique et opérationnel, les décisions portent sur l'utilisation des agents de conduite en établissant des emplois du temps qui couvrent la grille horaire et minimisent les coûts de production. La ressource agents de conduite est globalement la moins traitée dans la littérature ferroviaire car elle dépend fortement des décisions prises pour l'infrastructure et les engins.

Lorsqu'un agent de conduite est affecté à deux trains consécutifs, la différence entre l'heure d'arrivée du premier et l'heure du départ du second doit permettre le transfert de l'agent de conduite. Augmenter le temps de transfert des agents permet de réduire la propagation des retards et même d'en réduire l'occurrence ([Tan, 2007]). Cela implique néanmoins que les emplois du temps établis sont sous-productifs et que plus d'agents pourraient être utilisés.

Synchronisation des ressources

Dans le processus séquentiel habituel, la planification des agents de conduite est la dernière étape du niveau tactique. Naturellement, certaines caractéristiques d'absorption sont liées aux ressources engins et infrastructure. [Kroon and Fischetti, 2001] proposent de répartir les trains en séries connectant directement et régulièrement deux points du réseau. La planification des roulements d'agents se fait alors de manière à minimiser le

changement de série pour un agent. En d'autres termes, l'agent est poussé à suivre la série afin de minimiser la propagation des retards entre deux séries. [Nielsen et al., 2007] proposent de maintenir les agents de conduite et les engins ensemble le plus longtemps possible, afin de minimiser la propagation via les deux ressources.

Les objectifs d'absorption des différentes ressources impliquent l'intervention sur certaines caractéristiques de leurs planifications pour absorber les retards primaires. Néanmoins, il n'est pas raisonnable de supposer qu'un plan de transport peut absorber des retards de grande ampleur. Ces derniers exigent une intervention en temps réel en cas de perturbations selon des stratégies de réparation adaptées.

Objectifs de réparabilité

L'idée de base des objectifs de robustesse est de définir des caractéristiques de planification qui facilitent la réparation d'un plan de transport perturbé. Ces objectifs se basent sur de simples stratégies de réparation en temps réel prises en compte en conception. Les stratégies de réparation en temps réel concernent les trains (annulation ou décalage, par exemple) ou les ressources associées (échange d'engins ou d'agents, par exemple).

Pour les grilles horaires, [Liebchen et al., 2009] définit la robustesse de réparabilité comme la capacité de la solution à rester faisable ou facilement réparable quand elle est soumise à un ensemble limité de perturbations. Les auteurs définissent le prix de la réparabilité comme le nombre de changements nécessaires pour réparer une grille horaire, et choisissent la solution qui minimise ce prix.

Pour la réparabilité des roulements d'engins, [Bourez et al., 2007b] maximisent la possibilité d'échange entre les engins en cas de perturbations. Pour les agents de conduite, les échanges d'emplois du temps peuvent prévenir la propagation sur les trains suivants ([Flier et al., 2009]). Enfin, [Nielsen, 2011] propose, pour les engins et agents de conduite, de placer des ressources de remplacement à des points stratégiques afin de faciliter la réparation dans les points critiques du réseau.

Objectifs de résilience

Les objectifs de résilience visent à minimiser la propagation des retards dans l'espace par la création d'un effet boule de neige. Ainsi, sous un scénario de retards primaires donné, un plan de transport est résilient si le temps de retour à la normale est en dessous d'un seuil fixé ([Vromans et al., 2006]).

Dans la planification de l'infrastructure, [Salido et al., 2012] comparent la robustesse des grilles horaires en fonction du temps de retour à la normale, et [Goverde and Odijk, 2002] définissent une grille horaire comme robuste si les retards produits dans une période $[t, t + n_1]$ ne se propagent pas sur la période $[t + n_1, t + n_2]$.

[Tréfond, 2014] opte pour un objectif de résilience dans l'élaboration des roulements d'engins. Selon [Nielsen, 2011], les roulements d'engins sont souvent basés sur les lignes afin de limiter la propagation. La limitation du périmètre d'affectation des ressources peut aussi s'appliquer aux agents de conduite.

2.3.2 Stratégies d'amélioration de la robustesse dans le transport ferroviaire

Approches proactives

Les approches proactives impliquent que, d'une part, la connaissance des incertitudes est limitée, mais leur modélisation est possible, et d'autre part, aucune intervention en temps réel n'est planifiée en amont. Une approche proactive peut avoir des objectifs d'absorption ou de résilience.

La première idée dans cette direction est de démarrer par la planification existante d'une ressource sans objectif de robustesse et d'en changer certaines caractéristiques (voir la section 2.3.1) pour en améliorer la robustesse ([Vromans et al., 2006] pour les grilles horaires, et [Tréfond, 2014] pour les engins). Ces caractéristiques donnent une idée a priori de la robustesse d'une ressource, mais une étape d'évaluation est souvent nécessaire pour réellement quantifier la robustesse.

D'autres méthodes ont été utilisées dans l'élaboration proactive de planifications robustes des ressources. Nous en détaillons les exemples suivants :

Optimisation par simulation

Pour l'élaboration de grilles horaires robustes, [Kroon et al., 2007] présentent un modèle d'optimisation stochastique qui a pour objectif de minimiser le retard moyen pondéré des trains, et un modèle de simulation qui intègre un scénario de retards aléatoires. L'évaluation de la robustesse se fait pendant la phase de conception afin de guider la conception en minimisant des variables dites de recours. Ces variables représentent les changements nécessaires pour rétablir la faisabilité de la solution. L'objectif d'absorption

est ici exprimé par l'insertion de marges de marche et d'arrêt. En sortie de l'approche, la solution obtenue est la grille horaire qui absorbe le plus de retards en cas d'occurrence de retards selon les scénarios testés.

Cette approche demande un long temps de calcul dans la mesure où, à chaque itération, les retards primaires sont introduits dans les contraintes du modèle d'optimisation. Ainsi, pour chaque retard primaire δ d'un scénario w , la grille horaire doit rester réalisable (respecter les horaires et l'ordre des trains). Dans [Kroon et al., 2007], les auteurs réduisent le temps de calcul en démarrant d'une grille horaire existante et en améliorant son absorption des retards selon le même schéma optimisation-simulation.

Dans [Fischetti et al., 2009], cette approche est appelée *fat approach* et les auteurs en propose une version *slim*. Dans cette dernière, les auteurs aboutissent à des solutions comparables en robustesse à la version classique mais avec des temps de calcul inférieurs. Le concept de cette approche est de prendre en compte les capacités d'absorption "naturelles" des grilles horaires. Ainsi, pour le retard primaire δ du scénario w , la grille horaire doit rester réalisable pour un retard $\delta - m$ où m est la marge du train affecté. Sans démarrer d'une grille horaire existante, le modèle respecte néanmoins l'ordre des trains.

Light robustness

L'approche *light robustness* a été introduite par [Fischetti and Monaci, 2009] et est une approche hybride entre l'optimisation stochastique et l'optimisation robuste. L'idée de l'optimisation robuste est d'élaborer des solutions réalisables au pire cas de perturbations ([Soyster, 1973]). Cette approche est assez conservatrice dans le sens où la robustesse a un coût très élevé. [Bertsimas and Sim, 2004] définissent la notion de prix de la robustesse comme le nombre maximal de changements autorisés aux solutions nominales. Cela signifie que la solution doit rester réalisable si les variations subies sont dans un espace prédéfini.

L'approche *light robustness* modélise le problème de grilles horaires selon le modèle de [Bertsimas and Sim, 2004] en autorisant une détérioration limitée de la solution nominale. L'idée des variables de recours dans l'optimisation stochastique est reprise pour assurer la faisabilité des solutions, mais ces variables sont remplacées par des variables d'écart qui autorisent localement la violation des objectifs de robustesse.

[Fischetti et al., 2009] présente une comparaison de l'approche *light robustness* et de l'optimisation stochastique appliquée à l'élaboration des grilles horaires. Les résultats obtenus par *light robustness* présentent un avantage en temps de calcul par rapport à la version de [Kroon et al., 2007] et des résultats de robustesse similaires.

Méthodes bi-objectifs

Les différents objectifs de robustesse, que ce soient l'absorption, la réparabilité ou la résilience, impliquent une solution plus coûteuse qu'une solution non robuste. L'optimisation multi-objectif vise à améliorer plusieurs objectifs contradictoires dans le but de trouver la solution la plus équilibrée.

Dans [Schobel and Kratz, 2009], le problème de grilles horaires est résolu selon deux objectifs :

1. Minimiser le temps d'attente des passagers.
2. Maximiser la robustesse d'absorption de la grille horaire.

Une grille horaire robuste en absorption contient par définition des marges temporelles permettant l'absorption de petits retards primaires, prolongeant ainsi le temps d'attente des passagers. Le second objectif peut s'adapter, selon les auteurs, à une variété d'objectifs décrits dans la section précédente. Dans [Schobel and Kratz, 2009], la robustesse d'une grille horaire est défini comme étant le retard primaire maximal sans correspondances ratées par les passagers. Dans une direction similaire, [Cacchiani et al., 2012] présentent une approche Lagrangienne où la robustesse est amélioré au fil des itérations, en relâchant certains objectifs de production.

Approches proactives-réactives

Ces approches consistent à introduire de la flexibilité dans la planification des ressources pour faciliter, en temps réel, les stratégies de réparation de la circulation.

Ainsi, dans [D'Ariano et al., 2007], les horaires de départ et d'arrivée des trains sont remplacés par des fenêtres de temps, et un ordonnancement provisoire des trains est proposé en phase de conception. La grille horaire élaborée est ainsi flexible et les règles de réparation sont simples (décaler un train ou autoriser des dépassements). [Barrena et al., 2013] identifient en conception les trains critiques, dont l'annulation réduirait le temps d'attente moyen des passagers. Pour les ressources engins et agents de conduite, la flexibilité se traduit par l'augmentation du nombre de ressources pouvant couvrir un train. Cette flexibilité améliore les possibilités d'échange entre les ressources en cas de perturbations ([Bourez et al., 2007b] et [Flier et al., 2009]).

Une autre approche est présentée dans [Liebchen et al., 2009] (*Recoverable robustness*). Le cadre général combine un modèle d'optimisation stochastique à des règles de gestions simples en temps réel. Cette approche nécessite trois définitions :

- Une solution initiale x

- Un ensemble de scénarios de retards W
- Un ensemble de règles de gestion R

Une solution x est dite robuste en réparation si l'ensemble R permet de retrouver la solution initiale en cas d'occurrence de retards inclus dans W . Cette approche a été appliquée dans l'élaboration des grilles horaires ([Liebchen et al., 2010] et [Cicerone et al., 2008]) et des roulements d'engins ([Cacchiani et al., 2008]).

Approches réactives

L'objectif des approches réactives est d'élaborer un plan de transport adapté au contexte de circulation avec une connaissance complète des retards primaires.

Dans [Vieira et al., 1999], les stratégies de réparation du système ferroviaire sont réparties de la manière suivante :

- Méthodes de décalage : l'ordre des trains et les ressources affectées ne changent pas, seuls les horaires de départ et d'arrivée sont décalés. Ces méthodes ont l'avantage de garder la structure de la solution de référence, mais augmentent le risque de propagation notamment en cas de grandes perturbations.
- Méthodes de réparation partielle : elles consistent à recalculer la solution du sous-problème choisi, en autorisant tous les changements d'ordres ou d'affectation des ressources. Elles permettent d'isoler l'impact des retards primaires et en empêcher la propagation sur le réseau. Néanmoins, il est souvent difficile de déterminer pertinemment le sous-problème à recalculer.
- Méthodes de réparation totale : il s'agit de recalculer l'ensemble du plan de transport, selon le contexte qui suit l'occurrence d'un aléa. Les solutions obtenues sont naturellement meilleures que les deux familles de méthodes précédentes, mais cette méthode est plus difficile à mettre en œuvre. Le problème principal de ces approches réside dans la limitation de la réparation dans le temps et dans l'espace, induite par les temps de calcul nécessaires à la re-planification totale.

La stratégie de décalage est testée dans [Hofman and Madsen, 2005] pour les grilles horaires, et dans [Veelenturf et al., 2012] pour la re-planification simultanée des trains et des agents de conduites. Notons qu'il n'est pas possible de décaler une ressource engin ou agent de conduite sans décaler les horaires trains.

Dans les stratégies de réparation partielle, la difficulté réside dans le choix de l'horizon et des décisions de re-planification. Pour les grilles horaires, [Törnquist, 2007] autorise des changements limités de l'ordre des passages des trains. [Acuña-Agost, 2009] reprend cette idée en introduisant une estimation de probabilité d'occurrence d'un re-

tard, afin de réduire l'espace de recherche de la solution réparée. Dans [Schöbel, 2007], la re-planification consiste à décider si, en situation perturbée, un train attend en station ou non afin de minimiser les correspondances manquées par les passagers.

La re-planification des engins de conduite est traitée dans [Nielsen, 2011] sur un horizon glissant (les n engins suivants) en minimisant les recompositions d'engins et les déviations de la solution initiale. [Kroon et al., 2015] considèrent le flux des passagers en adaptant la série matériel de l'engin en cas de grande affluence. [Cadarso and Marín, 2011] considère ce même objectif en intégrant la re-planification des trains et des engins. Enfin, la re-planification des agents de conduite consiste à échanger des emplois du temps ou faire appel aux agents de réserve ([Huisman, 2007]).

Ces exemples d'études permettent d'illustrer les approches réactives et quelques concepts associés. Nous référons le lecteur à la synthèse réalisée par [Cacchiani et al., 2014] pour une revue plus développée.

2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude de la littérature portant sur la planification robuste des ressources ferroviaires. Plusieurs définitions de la robustesse sont utilisées et induisent des objectifs et approches adaptées.

Cette revue de littérature nous permet de comprendre, pour chaque ressource, les différentes possibilités d'intégration des objectifs de robustesse face aux retards. Dans la mesure où nous cherchons à élaborer une approche de planification intégrée des ressources, nous nous inspirons de plusieurs études et adaptons nos objectifs, définitions et stratégies pour avoir une vue globale du plan de transport.

Nous présentons dans le prochain chapitre notre approche globale d'intégration des incertitudes dans la planification des ressources ferroviaires, en précisant :

- Les incertitudes considérées : quelle(s) distribution(s) de retards primaires ?
- L'évaluation des effets des incertitudes : quelle méthode pour évaluer la robustesse ? Quels indicateurs ?
- L'objectif de robustesse choisi.
- L'approche générale d'optimisation de la robustesse des plans de transport.

Chapitre 3

Approche générale et modèle de données

Sommaire

3.1	Introduction	45
3.2	Schéma général de notre approche	46
3.2.1	Phase d'évaluation de la robustesse par simulation	47
3.2.2	Phase d'optimisation intégrée et robuste	48
3.3	Modèle général des données	50
3.3.1	Modèle d'optimisation	51
3.3.2	Modèle de simulation	52
3.4	Conclusion	53

3.1 Introduction

Nous cherchons dans ce travail à élaborer des plans de transport robustes en intégrant la planification des trois ressources critiques. Les difficultés principales de notre approche sont les suivantes :

- Comment considérer les retards éventuels que peut subir un plan de transport ?
- Comment définir la robustesse d'un plan de transport, et quelles mesures pour la quantifier ?
- Comment intégrer la planification des trois ressources critiques et en gérer la complexité ?

Il existe plusieurs méthodes pour répondre aux questions posées, et le choix dépend fortement des données et des outils existants (Voir chapitre 2). La définition de la robustesse

tesse se base également sur les ressources considérées et le niveau décisionnel. Nous présentons dans cette section nos choix de réponses et ainsi les hypothèses principales de notre approche.

Nous optons dans le travail présenté pour une approche proactive qui intègre les trois ressources critiques dans des objectifs de robustesse. Notre approche comporte deux phases : une phase d'optimisation de la planification et une phase d'évaluation par simulation. Dans la première, nous cherchons à élaborer simultanément les planifications des ressources engins et agents de conduite, en autorisant des décalages horaires limités dans une grille horaire existante. Dans la seconde phase, nous définissons des indicateurs de robustesse pour quantifier la propagation des retards sur les trois ressources.

Nous présentons dans ce chapitre les hypothèses et définitions liées à l'approche choisie. Nous détaillons le processus de cette dernière et les liens entre les deux phases. Chacune nécessite des données d'entrées différentes et nous présentons le schéma général des données de l'approche.

3.2 Schéma général de notre approche

Nous partons de l'hypothèse qu'il serait trop complexe d'essayer d'éliminer toutes les sources de retards dans le transport ferroviaire. D'une part, ce type d'approche doit être appliqué au niveau stratégique de la planification (Voir le chapitre 1), or nous situons notre approche au niveau tactique. D'autre part, une partie des retards primaires est entièrement aléatoire (météo, par exemple) et est très complexe à traiter.

Nous définissons alors la robustesse des plans de transport comme suit :

Définition 2. *Un plan de transport est dit robuste si, en cas d'occurrence de retards primaires de durée limitée, il minimise la propagation dans le temps et dans l'espace sans intervention en temps réel.*

Cette définition signifie que nous avons un objectif d'absorption des retards et par conséquent une approche proactive. Ces approches nécessitent une méthode d'évaluation du comportement du plan de transport en temps réel afin de mesurer l'impact des décisions en phase de conception. Nous optons pour une évaluation de la robustesse par simulation à événements discrets. Cela signifie dans notre approche la définition de deux catégories de mesures : des critères de robustesse et des indicateurs de robustesse. Ainsi, en phase de planification, les critères représentent les caractéristiques d'un plan de transport qui définissent dans notre approche un plan de transport robuste. Ces critères sont

les objectifs du modèle d'optimisation dans le sens où nous cherchons à élaborer les plans de transport selon ces critères. Nous résumons l'approche générale et ses deux phases (planification et évaluation) dans la figure 3.1

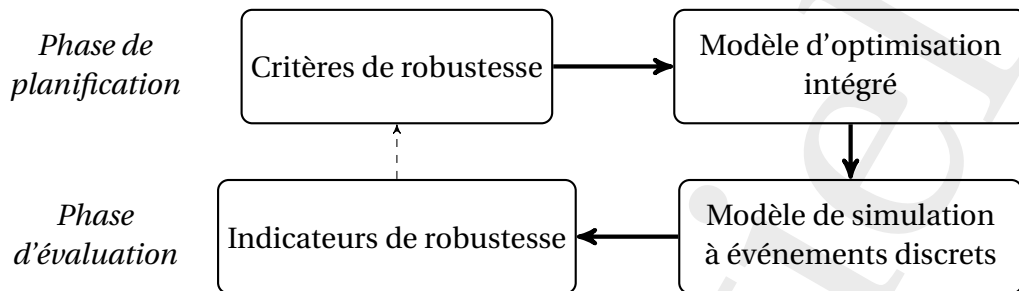


FIGURE 3.1 – Schéma général de notre approche

Nous présentons dans cette partie l'ensemble des hypothèses et définitions que nous choisissons dans le cadre de l'intégration de la robustesse dans la planification intégrée des ressources.

3.2.1 Phase d'évaluation de la robustesse par simulation

En phase d'évaluation, le modèle de simulation permet de reproduire la circulation des trains lorsque des scénarios de retards primaires sont introduits. Nous mesurons des indicateurs de robustesse qui quantifient la propagation des retards dans le plan de transport. Ces mesures permettent de comparer et évaluer les plans de transport selon différentes métriques et d'ajuster les décisions de planification.

La propagation des retards résulte entièrement du partage des ressources infrastructure, engins et agents de conduite entre les trains. Dans la mesure où nous évaluons la planification des trois ressources simultanément, les objectifs du modèle de simulation sont :

- Évaluer la performance globale du plan de transport face à un scénario de retards.
- Quantifier la propagation des retards dans les plans de transport selon des métriques adaptées.
- Identifier la ressource responsable de chaque propagation et ainsi les points de fragilité du plan de transport.
- Mesurer l'impact d'un scénario de retards primaires sur les utilisateurs ferroviaires.

Nous calculons plusieurs métriques pour chaque famille d'indicateurs de manière à avoir la vision la plus complète possible des mécanismes de propagation. Certains de ces

indicateurs sont connus et communément utilisés par les opérateurs et les académiques (la ponctualité, par exemple), pendant que d'autres sont adaptés à notre approche de planification intégrée des ressources (les sources de propagations, par exemple).

L'identification de la distribution des retards dans un plan transport est une étape importante dans l'évaluation de sa robustesse. La probabilité d'occurrence et la durée des retards primaires varient naturellement dans le temps (heures de pointe, par exemple) et dans l'espace (gares centrales, par exemple). L'identification d'une distribution permet néanmoins de remplacer un manque de connaissances sur les retards réels. Principalement, la distinction entre les retards primaires et secondaires dans des données brutes est une tâche difficile.

Nous choisissons de tester deux familles de scénarios de retards qui reflètent à la fois nos connaissances de la réalité et nos objectifs de simulation.

La première est une distribution basée sur des données internes de SNCF. Ce scénario reflète théoriquement l'ensemble des retards primaires connus par un plan de transport sur une durée définie. Il est issu de données brutes sur la circulation des trains desquelles nous extrayons un scénario discret de retards primaires. Ainsi, pour chaque plan de transport, le scénario présente la probabilité des trains d'être affectés d'un retard primaire d'une durée incluse dans un intervalle discret (par exemple, 20% des trains sont touchés d'un retard primaire de 2 à 5 minutes). La durée exacte du retard est ensuite choisie uniformément dans l'intervalle donné.

La seconde famille de scénarios consiste à cibler par un retard primaire un train ou une ressource précise. Cela permet d'identifier les mécanismes du processus responsables de l'effet boule de neige de la propagation. Cette famille de scénarios permet également de tester des retards d'une ampleur plus importante, ce qui permet d'identifier les capacités d'absorption d'un ou plusieurs endroits du plan de transport.

3.2.2 Phase d'optimisation intégrée et robuste

Notre objectif de robustesse est un objectif d'absorption. Cela signifie que nous devons identifier les caractéristiques dans la planification simultanée des trois ressources qui permettent d'atteindre cet objectif.

Nous nous inspirons de la revue de littérature sur les objectifs de robustesse présentée dans le chapitre 2 et basons nos critères de robustesse sur les idées suivantes :

Hypothèse 1. *Un train est moins susceptible d'être affecté par un retard secondaire si ses ressources peuvent absorber les retards primaires. Cela signifie que plus les marges des res-*

sources affectées sont grandes, plus le train est robuste. La marge d'une ressource est définie comme son temps de disponibilité (en minutes) avant le départ du train. On définit alors un train critique comme un train dont la marge est inférieure à un seuil prédéfini.

Hypothèse 2. *Plus les ressources engins et agents de conduite sont maintenues ensemble, plus le plan de transport est robuste. Contrairement à l'hypothèse précédente, cette idée n'a pas pour objectif d'absorber les retards, mais plutôt de minimiser le nombre de trains affectés par les retards secondaires.*

Nous définissons alors un plan de transport robuste en absorption comme un plan qui maximise les marges des trains et leur répartition (afin d'éliminer les trains critiques) et qui minimise les changements d'engins et d'agents de conduite.

Notre choix d'intégrer les ressources part de l'hypothèse suivante :

Hypothèse 3. *Dans la mesure où la propagation des retards est entièrement due au partage des ressources entre les trains, une approche qui intègre ces ressources (en planification et en évaluation) aboutira à de meilleurs résultats qu'un processus séquentiel.*

Les problèmes de planification de chacune des ressources infrastructure, engins et agents de conduite sont complexes. Cela est dû aux contraintes associées à chaque ressource et explique le processus de planification séquentiel communément adopté (Voir le chapitre 1). Intégrer les trois ressources en augmente alors significativement la complexité.

Le modèle d'optimisation doit décider simultanément de l'utilisation des trois ressources tout en visant les critères de robustesse définis. Afin de contourner la complexité du problème intégré, nous prenons l'ensemble des décisions suivantes :

1. L'intégration de l'infrastructure est faite sous forme de décalages limités que nous autorisons dans le modèle d'optimisation. Cela signifie que nous partons d'une grille horaire existante (liste de trains à couvrir) et décalons les horaires des trains de l'ordre de quelques minutes si cela améliore nos objectifs de robustesse. Cette idée s'inspire d'un travail antérieur au sein de SNCF ainsi que de l'étude présentée dans [Mercier and Soumis, 2007]
2. Nous optons pour une approche en deux phases qui permet de séparer les contraintes de la planification des objectifs de robustesse. Cela consiste à générer un ensemble de plannings engins et agents réalisables et d'en sélectionner ensuite la combinaison qui optimise les critères de robustesse. En plus de réduire la complexité du problème, le choix de cette approche est également dû à l'existence au sein

de SNCF de deux outils permettant la génération de solutions engins et solutions agents de conduite réalisables. Notre modèle d'optimisation se focalise alors sur la sélection de la solution la plus robuste selon les critères choisis, sans se préoccuper des contraintes de production du plan de transport.

Nous résumons la phase de planification dans le processus illustré par la figure 3.2. Nous partons ainsi d'une grille horaire existante qui représente une liste de trains à produire sur une période définie. Nous utilisons ensuite des outils internes afin de générer des plannings réalisables pour les engins et pour les agents de conduite. Enfin, nous sélectionnons parmi les plannings générés la combinaison qui optimise le mieux les critères de robustesse choisis, en autorisant si nécessaire un décalage limité des horaires des trains.

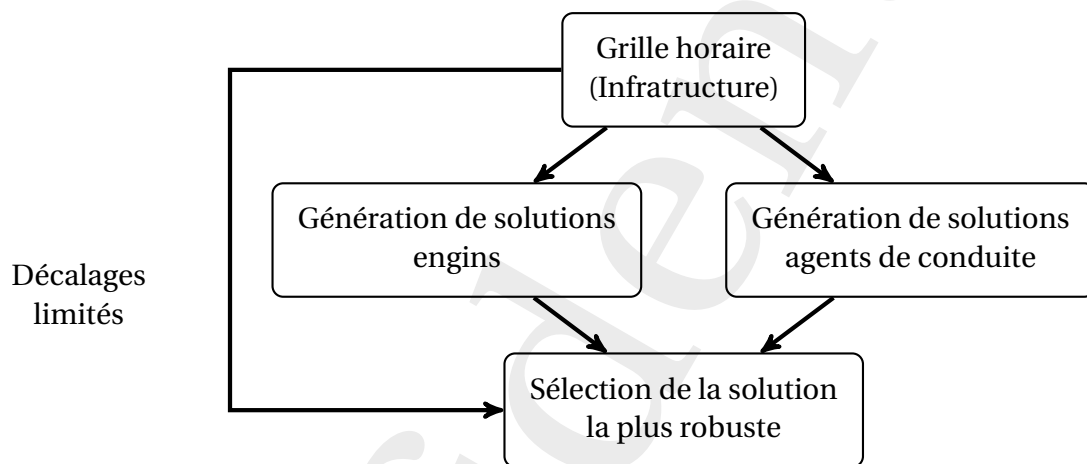


FIGURE 3.2 – Schéma de la phase de planification

3.3 Modèle général des données

L'approche pour laquelle nous avons opté est composée d'une phase de planification et d'une phase d'évaluation. Cette séparation permet d'intégrer les retards a posteriori dans un modèle de simulation à événements discrets, sans s'en préoccuper dans le modèle d'optimisation. La difficulté principale de cette séparation est la nécessité d'acquérir les données pour chacune des phases : les informations nécessaires diffèrent dans leur échelle de temps entre l'optimisation (niveau tactique) et la simulation (temps réel).

Nous présentons dans cette partie le schéma général des données de notre approche, illustré par la figure 3.3. Nous présentons sommairement les entrées et sorties de chaque phase ainsi que les liens entre les deux phases. Les détails des modèles d'optimisation et de simulations sont présentés dans la suite du manuscrit.

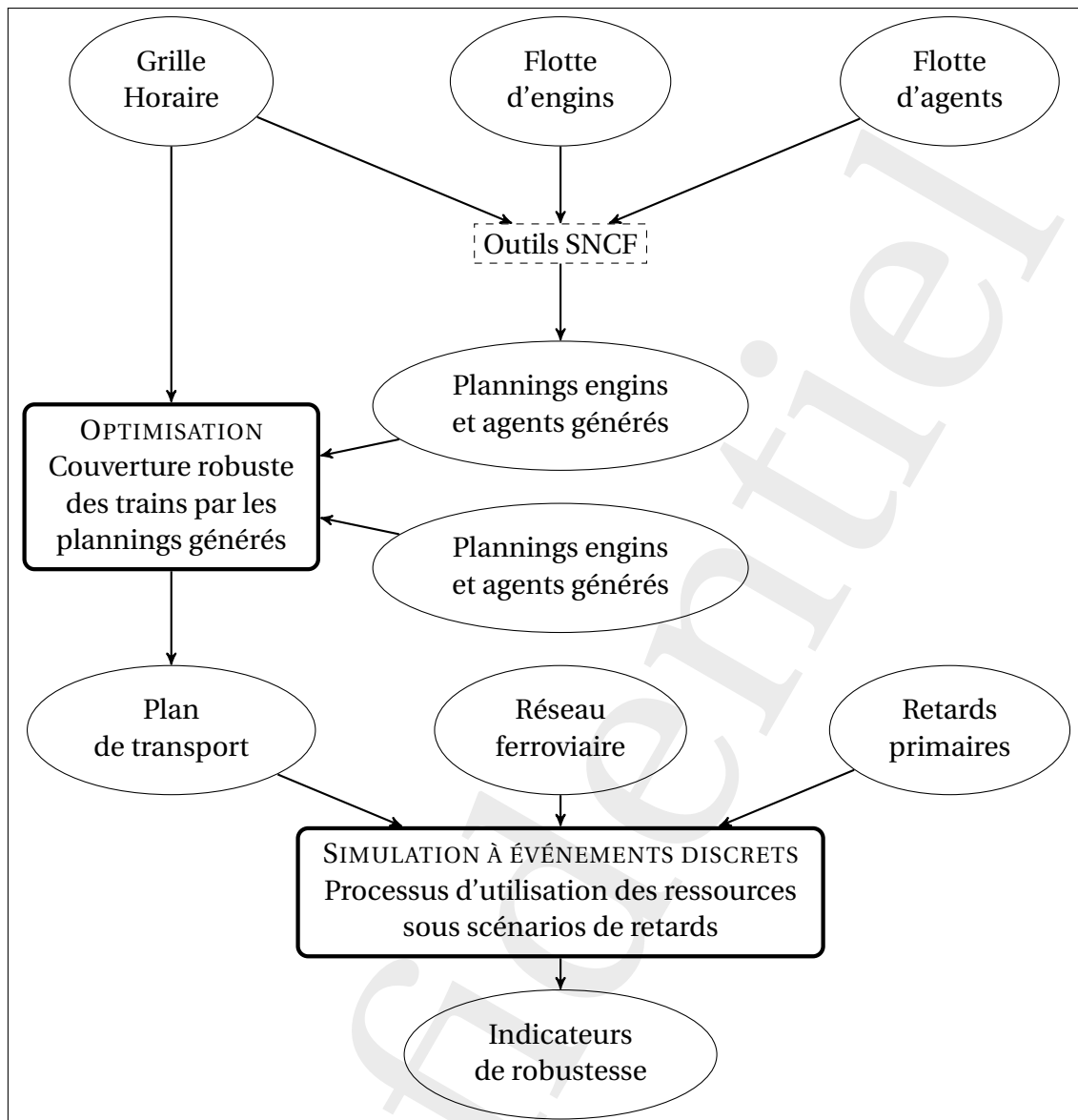


FIGURE 3.3 – Synthèse de l'approche générale et modèle de données

3.3.1 Modèle d'optimisation

Le processus démarre avec une grille horaire existante qui définit l'utilisation de l'infrastructure sur une période donnée. Chaque train de cette grille doit être couvert dans le modèle d'optimisation par (au moins) un engin et un agent de conduite. Nous disposons d'une flotte limitée d'engins répartie en plusieurs séries matérielles. Les engins d'une même série ont la même capacité d'accueil en passagers et sont interchangeables. Nous disposons également de ressources humaines limitées réparties en roulements. Rappelons qu'un roulement d'agents est défini par un dépôt (gare de résidence) et un ensemble de connaissances techniques. Les agents d'un même roulement sont alors qualifiés pour conduire les mêmes séries matérielles et sont interchangeables.

De plus, pour chaque train à couvrir, nous connaissons la demande en passagers associée. Cette information contrôle le choix de la série matériel affectée au train ainsi que le nombre d'engins nécessaires à la couverture. Nous connaissons également les capacités de la flotte d'engins et des roulements d'agents. Il faut trouver une solution qui respecte à la fois la demande et les capacités, avec des objectifs de robustesse.

Nous nous basons sur l'intégration des ressources en optimisation pour obtenir un plan de transport qui maximise les marges des ressources ferroviaires et minimise les changements engins/agents de conduite. Nous profitons également des décalages limités des horaires trains afin d'optimiser les distributions des marges limitées. De plus, certaines affectations de ressources sont impossibles pour des contraintes spatio-temporelles. Décaler l'horaire d'un train peut permettre de maintenir les ressources engins et agents de conduite associées.

En sortie du modèle d'optimisation, nous disposons de la planification des ressources engins et agents sur un horizon donné, et de la grille horaire est ajustée aux décalages horaires décidés. Bien que les critères de robustesse soient mesurables, ils ne permettent pas de visualiser le comportement de la solution face aux retards. Nous utilisons alors la solution obtenue comme entrée du modèle de simulation à événements discrets afin de mesurer des indicateurs de robustesse a posteriori.

3.3.2 Modèle de simulation

La simulation à événements discrets inclut trois concepts :

1. Les entités : ce sont les trains qui se déplacent dans le processus de circulation en utilisant les différentes ressources.
2. Les événements : ils représentent les étapes du système où un changement d'état se produit. Nous définissons un événement comme un point du processus où un train saisie ou relâche une ressource. Cela s'applique aux engins et agents de conduite, mais aussi aux quais de gares et aux voies.
3. L'heure de simulation : elle représente l'échelle propre au modèle indépendamment de l'heure réelle.

Ainsi, en plus du plan de transport obtenu en phase d'optimisation, nous avons besoin du détail de l'infrastructure sur laquelle les trains circulent, ainsi que d'une modélisation réaliste de la circulation des trains et l'utilisation des ressources.

Nous modélisons l'infrastructure ferroviaire comme un graphe où les sommets représentent les gares, et les arcs les voies les reliant (Figure 4.2). Les gares ferroviaires sont

caractérisées par une capacité définie par le nombre de quais. Les arcs de voies sont également caractérisés par une capacité définissant le nombre de trains pouvant se trouver sur un point du réseau au même moment. Le trajet d'un train commence et se termine à une gare en alternant les sections de voies et les gares intermédiaires (dessertes commerciales).

L'utilisation de l'infrastructure par un train est dynamique au cours de son trajet. Cela signifie que plusieurs événements sont engendrés dans la circulation d'un train, dans la mesure où il saisit et relâche plusieurs quais de gares et plusieurs sections de voies pendant son déplacement. Cela peut s'appliquer également aux engins dans le sens où des engins peuvent être couplés ou découplés dans des gares intermédiaires (jamais sur les voies). Néanmoins, au moins un engin et un conducteur sont associés à chaque train du début à la fin de son trajet.

3.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'approche de planification intégrée et robuste que nous avons choisi d'étudier. Cette approche est composée d'une phase de planification des ressources critiques (optimisation) et une phase d'évaluation de la robustesse des plans de transport (simulation). Ces deux phases nécessitent différentes données en raison de leur différence temporelle. Nous avons présenté un modèle général des données, en explicitant les entrées et sorties de chaque bloc et les interactions entre les deux phases.

Nous détaillons dans les chapitres suivants la modélisation des deux phases de notre approche. Nous testons sur des instances expérimentales la validité des deux modèles ainsi que leurs limites.

Confidentiel

Chapitre 4

Évaluation de la robustesse des plans de transport par simulation

Sommaire

4.1	Introduction	55
4.2	Simulation à événements discrets	56
4.3	Objectifs de la simulation et indicateurs de robustesse	58
4.3.1	Indicateurs de performance du système	59
4.3.2	Indicateurs de propagation des retards	60
4.4	Modélisation du système ferroviaire	61
4.4.1	Modélisation des ressources ferroviaires	62
4.4.2	Modélisation de la circulation des trains	63
4.5	Construction, validation et vérification du modèle	68
4.5.1	Implémentation du modèle et instance expérimentale	68
4.5.2	Vérification du modèle	69
4.5.3	Validation du modèle	70
4.6	Conclusion	72

4.1 Introduction

La phase d'évaluation de notre approche a pour objectif de quantifier la robustesse d'un plan de transport selon des indicateurs prédéfinis. Nous choisissons un modèle de simulation à événements discrets qui nous permet de maîtriser les aspects stochastiques étudiés. Ainsi, à partir d'un plan de transport, nous mesurons l'impact de distributions

de retards primaires sur les différentes ressources. Le modèle de simulation a pour objectif final de valider les décisions de planification que nous détaillons dans la suite du manuscrit.

La simulation est un outil qui permet de reproduire un système réel à coût réduit afin d'en tester la performance. Il est difficile néanmoins de reproduire parfaitement un système et des approximations aboutissent nécessairement à un équilibre entre le coût de la simulation et son niveau de détail.

Nous présentons dans ce chapitre le modèle de simulation à événement discret élaboré et les étapes de sa réalisation. Ce modèle est la première contribution de cette thèse dans la mesure où ce modèle est, à notre connaissance, le premier permettant de quantifier la propagation des retards sur les trois ressources ferroviaires. Nous avons présenté dans le chapitre 2 des exemples d'études qui visent à mesurer uniquement les décalages de la grille horaire (infrastructure) selon différentes métriques. Nous cherchons par cette innovation à détecter les interactions fragiles entre les ressources partagées par les trains.

Par conséquent, nous modélisons dans cette phase les trois ressources critiques et leur utilisation en phase d'exécution par les trains. Nous formulons un ensemble de règles de circulation afin de reproduire le plus fidèlement possible la circulation réelle. Nous validons ensuite l'ensemble des hypothèses liées à la modélisation sur une instance expérimentale. Cela a pour objectif de rectifier la modélisation et éventuellement les entrées du modèle afin que ce dernier soit exploitable et ses résultats analysables.

4.2 Simulation à événements discrets

L'évaluation de la robustesse d'un plan de transport peut être réalisée par un modèle de simulation ou par une méthode analytique. La simulation offre des avantages nécessaires dans notre approche, parmi lesquels nous pouvons citer :

- Le temps est explicitement pris en compte.
- Les interactions dans un processus sont facilement modélisées.
- Les aléas sont facilement représentés.

La simulation est un outil qui permet de reproduire un système réel afin de varier son comportement de manière peu coûteuse. En effet, notre évaluation de la robustesse des systèmes ferroviaires (et des décisions de planification) ne pourrait être réalisée sur la circulation réelle des trains. La modélisation d'un système permet ainsi de le remplacer par un modèle qui en mime le comportement le plus fidèlement possible. La simulation offre un modèle comportemental (What if?) et n'a pas pour objectif (en général) de résoudre

les problèmes liés aux systèmes complexes. Elle a alors pour but de simuler des décisions et en comprendre l'impact sur la performance globale du système.

Les modèles de simulation sont utilisés depuis les années 1950 dans plusieurs domaines d'application et leur évolution suit celle de la technologie informatique ([Robinson, 2005]). Un processus de simulation suit plusieurs étapes qui ont pour objectif d'aboutir à une représentation du système réel tout en gérant sa complexité ([Kelton and Law, 2000]). Cette dernière est issue d'un grand nombre de processus et de leurs interactions, d'un éventuel manque d'informations ou de données ainsi que des aléas du système.

Dans un premier temps, il faut définir les objectifs de la simulation (*Pourquoi simuler le système ?*). Cela revient à identifier les comportements ou les interactions que nous cherchons à évaluer sous des conditions prédéfinies. Ensuite, il faut modéliser de manière détaillée le système à simuler (*Comment fonctionne le système ?*). Cette étape dépend fortement d'une bonne connaissance du système (ses composantes et leurs interactions) ainsi que des données disponibles. Le manque de connaissances ou de données est contourné par des approximations et hypothèses de modélisation de manière à équilibrer la précision du modèle et son coût.

Enfin, une fois le modèle implémenté, il faut vérifier et valider le modèle (*Est-ce le bon système ? Est-ce qu'il est bien construit ?*). L'implémentation du modèle dépend du choix de l'outil et langage de simulation. Une bonne connaissance de ces derniers permet d'identifier facilement les dysfonctionnements liés à l'implémentation du modèle ([Schriber and Brunner, 2000]). La validation du modèle implémenté est une étape primordiale dans la simulation des systèmes ([Sargent, 2010]). Elle permet de vérifier la correspondance du modèle conceptuel et de ses hypothèses au système réel, ainsi que la validation de son comportement et la logique de ses sorties.

La simulation à événements discrets est le type de simulation le plus utilisé dans l'industrie. Il permet de modéliser un système complexe comme un enchaînement d'événements prédéfinis dont l'occurrence provoque des changements d'état des entités des processus. Le concept d'entités permet de définir les objets actifs qui interagissent et utilisent les ressources du système. Le temps de simulation s'écoule instantanément entre deux événements consécutifs.

Nous choisissons la simulation à événements discrets pour plusieurs raisons. Premièrement, la circulation ferroviaire est facilement modélisée avec des événements discrets. D'un point de vue macroscopique, un événement peut être l'entrée ou la sortie d'une entité (train) du système. Plus précisément, un train nécessite plusieurs ressources tout au long de sa présence dans le système. Nous définissons alors comme événement toute étape du déplacement à laquelle le train réclame ou relâche une ressource (section d'in-

frastructure, engin ou agent).

Deuxièmement, la simulation à événements discrets permet de maîtriser les aspects stochastiques du système et ainsi d'en évaluer la performance sous différents scénarios d'aléas. Notre choix de séparer l'approche en phase d'évaluation et phase de planification repose sur le souhait d'élaborer des plans de transport robuste sous différents scénarios d'aléas. La simulation à événements discrets permet d'évaluer les plans transport sans se limiter à une seule distribution de retards primaires.

Nous présentons dans la suite nos objectifs de simulation et les indicateurs de robustesse que nous cherchons à mesurer. Nous nous inspirons dans le choix des indicateurs de la revue de littérature présentée dans le chapitre 2. Cette revue présente des indicateurs basés sur les décalages horaires des trains et donc uniquement sur l'infrastructure. Nous définissons alors de nouveaux indicateurs qui permettent de mesurer les décalages des engins et des agents, afin de mieux identifier les points de fragilité de leurs planifications ainsi que leurs interactions.

4.3 Objectifs de la simulation et indicateurs de robustesse

L'occurrence de retards primaires dans le système ferroviaire est quasiment inévitable : leurs sources varient et sont plus ou moins contrôlables. Lorsqu'un retard primaire est observé sur un train, les ressources associées peuvent le propager sur les trains suivants si leur planification n'en permet pas l'absorption (Voir le chapitre 1).

Nous définissons dans notre travail un plan de transport robuste comme un planning qui minimise la propagation de retards primaires dans le temps et dans l'espace. Cette propagation résulte entièrement du partage des ressources infrastructure, engins et agents de conduite entre les trains. Le modèle de simulation a alors pour objectifs de :

- Quantifier la robustesse des plans de transport selon des métriques adaptées.
- Identifier la ressource responsable de chaque propagation et ainsi les points de fragilité du plan de transport.

Le premier objectif revient à définir des indicateurs qui quantifient l'impact d'un retard primaire sur les autres trains. La simulation nous permet en effet de contrôler les scénarios de retards primaires et pouvoir distinguer ainsi les déviations du plan de transport dues aux retards secondaires. Le second objectif implique une modélisation détaillée de l'utilisation des trois ressources critiques. Le modèle de simulation doit capturer la disponibilité des ressources à toutes les étapes du processus.

Nous choisissons de présenter les indicateurs de robustesse calculés par le modèle en

deux catégories. La première catégorie reflète la performance du système ferroviaire pour un scénario de retard primaire donné. Les mesures de cette catégorie quantifient la déviation globale entre le plan de transport théorique et simulé sans distinguer les types de retards ou les ressources impliquées. La seconde regroupe les indicateurs de propagation des retards primaires dans le temps et l'espace, en identifiant la ressource responsable. Ce sont les indicateurs de cette catégorie qui nous permettent d'identifier les points (décisions) critiques sur les interactions des ressources dans le plan de transport.

4.3.1 Indicateurs de performance du système

Nous groupons dans cette catégorie les indicateurs de robustesse qui reflètent la performance du plan de transport pour un scénario de retards primaires donné.

Une des mesures les plus utilisées dans la littérature et par les opérateurs ferroviaires est la ponctualité. Un train est dit ponctuel si ses horaires théoriques sont respectés, ou si la déviation des horaires est inférieure à un seuil prédéfini. La ponctualité peut être calculée au départ ou l'arrivée du train, et les retards considérés peuvent être positifs ou négatifs (les trains partants ou arrivant avant l'heure théorique).

La ponctualité d'un plan de transport représente alors le pourcentage des trains ponctuels dans le plan de transport réalisé. Cette notion ne distingue pas les retards primaires des retards secondaires dans la mesure où elle doit refléter le système dans sa globalité. Nous considérons pour cet indicateur les retards positifs et négatifs (trains arrivés ou partis en avance). Cette distinction est importante pour les passagers (Voir le chapitre 2) car les retards négatifs prolongent les temps d'attente pour les correspondances. Notons que nous ne calculons pas d'indicateurs de robustesse qui reflètent la perception des passagers dans ce manuscrit par manque de connaissances. Le modèle de simulation est néanmoins adapté à de futures améliorations.

Le second indicateur que nous choisissons d'utiliser est le temps de retour à la normale. Cela revient à mesurer la durée totale des perturbations dans le système dû à un retard primaire identifié (la différence entre la date d'occurrence du retard primaire et la date de sortie du système du dernier train affecté par un retard secondaire). Cet indicateur permet de quantifier l'effet boule de neige dans le temps et est souvent utilisé par les opérateurs ferroviaires. La table 4.1 résume les définitions des deux indicateurs de performance du système.

	Indicateur	Définition
Ponctualité au départ	<i>ponc_dep</i>	Pourcentage de trains ponctuels au départ
Ponctualité à l'arrivée	<i>ponc_arr</i>	Pourcentage de trains ponctuels à l'arrivée
Retour à la normale (en minutes)	<i>retour_norm</i>	Durée totale des perturbations après un retard primaire

TABLEAU 4.1 – Indicateurs de performance du système

4.3.2 Indicateurs de propagation des retards

Un train est affecté d'un retard secondaire lorsqu'au moins une de ses ressources n'est pas disponible à cause d'un train le précédant sur le plan de transport. L'utilisation des ressources critiques par le train ne se fait pas de manière synchronisée. Par exemple, les engins et les conducteurs peuvent être affectés à un train sur toute sa route, alors que l'utilisation de l'infrastructure est dynamique. Le modèle enregistre alors le décalage dû à un retard secondaire à chaque étape du processus où le train réclame une de ses ressources et que cette dernière n'est pas disponible.

Un train peut néanmoins être affecté des deux types de retards à la fois (primaire et secondaire). La maîtrise des scénarios des retards primaires permet alors de les distinguer et de mesurer ainsi avec précision la propagation.

Nous choisissons de mesurer, pour un scénario de retards primaires donné, le total et la moyenne des retards secondaires, ainsi que le plus grand retard secondaire observé. Nous enregistrons également le pourcentage des trains affectés par la propagation. Cela nous permet de quantifier l'impact dans l'espace du scénario de retards primaires. De plus, à chaque propagation, nous identifions la ou les ressource(s) indisponible(s) à cause d'un train précédent. Nous résumons les indicateurs de propagation des retards dans la table 6.7.

Les deux catégories d'indicateurs de robustesse présentées reflètent nos objectifs d'évaluation des plans de transport. Le choix de ces indicateurs guide la modélisation du système ferroviaire. Cette étape consiste à traduire l'utilisation et le partage des ressources par les entités.

Famille	Indicateur	Définition
Quantification de la propagation	<i>%_secondary</i>	Pourcentage de trains touchés par un retard secondaire
	<i>total_secondary</i>	Total des retards secondaires (en minutes)
	<i>mean_secondary</i>	Moyenne des retards secondaires (en minutes)
	<i>max_secondary</i>	Plus grand retard secondaire
Source de la propagation	<i>busy_gare</i>	Propagation à cause d'une gare saturée
	<i>busy_voie</i>	Propagation à cause d'une section de voie
	<i>busy_engin</i>	Propagation à cause d'un engin
	<i>busy_agent</i>	Propagation à cause d'un agent

TABLEAU 4.2 – Indicateurs des retards secondaires et les sources de propagation

4.4 Modélisation du système ferroviaire

Une des hypothèses principale de notre travail est la suivante : l'intégration des ressources critiques dans la planification et l'évaluation de la robustesse en améliore les objectifs. Si l'on reprend l'exemple présenté dans le chapitre 1 (figure 4.1), la propagation des retards se fait sur les trois ressources critiques (engins, agents de conduite et infrastructure). Ne pas considérer une des ressources diminue alors nos connaissances sur la robustesse réelle du plan de transport.

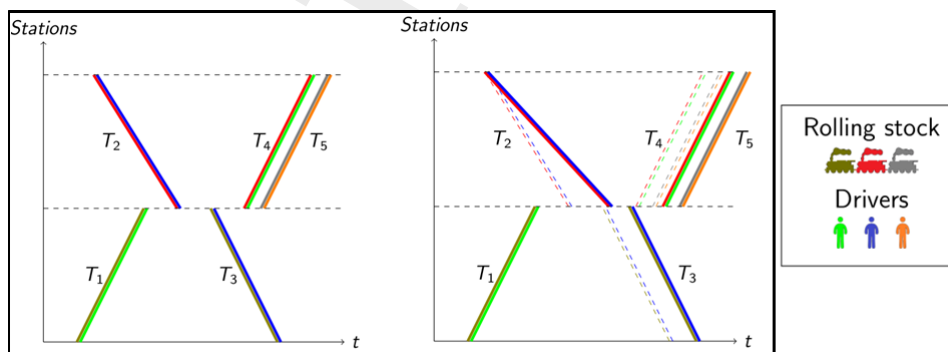


FIGURE 4.1 – Exemple illustrant l'intérêt de l'intégration des ressources dans l'évaluation de robustesse

Nous modélisons alors les trois ressources critiques ainsi que le processus de leur utilisation par les trains. La circulation de ces derniers suit des règles opérationnelles et réglementaires que nous tentons de refléter le plus fidèlement possible.

4.4.1 Modélisation des ressources ferroviaires

Nous modélisons l'infrastructure ferroviaire comme un graphe $\mathcal{G} = (V, E)$ où les sommets représentent les gares, et les arcs les voies les reliant (Figure 4.2). Les gares ferroviaires sont définies par une capacité définie par le nombre de quais. Ces capacités permettent d'observer des structures "Hub&Spoke" où certaines gares représentent des points de connections centrales de plusieurs gares. Ces gares sont les plus fréquentées du réseau en termes de passage de trains et de passagers, et leur capacité d'accueil est adaptée au trafic ferroviaire.

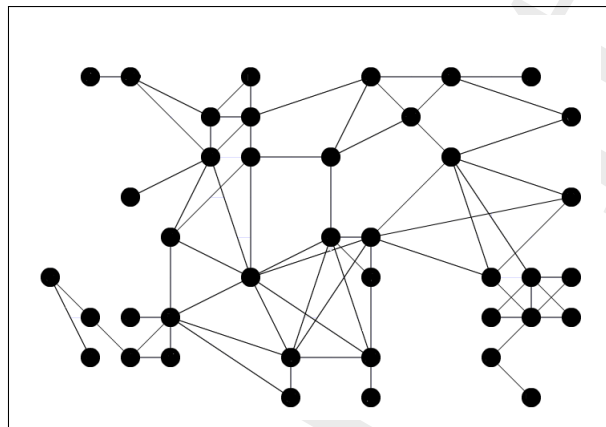


FIGURE 4.2 – Représentation macroscopique d'une section du réseau ferroviaire

Les arcs de voies sont également caractérisés par une capacité définissant le nombre de trains pouvant se trouver sur un point du réseau au même moment.

De plus, les voies sont définies par la distance séparant les deux gares reliées. Pour des raisons de sécurité, un espacement minimal est imposé entre deux trains successifs afin de permettre toute manœuvre de freinage et d'accélération. Dans la réalité, les voies sont divisées en sous-sections par les feux de signalisation (Figure 4.3). La règle de sécurité exige alors qu'au moins une sous-section reste inoccupée entre deux trains successifs. Dans la mesure où nous ne disposons pas des emplacements exacts des feux de signalisations, nous décidons de découper virtuellement les voies en sous-voies de longueur fixe de manière à autoriser un seul train par section. Nous choisissons également d'allouer une capacité fixe à l'ensemble du réseau ($cap = 2$) signifiant qu'un seul train est autorisé sur la voie dans chaque direction.

La flotte des engins ferroviaires est hétérogène et limitée. Dans la mesure où l'objectif de notre modèle est de simuler un plan de transport existant, certaines caractéristiques telles que la vitesse ou la compatibilité avec les voies sont déductibles du plan de transport et ne sont donc pas considérées dans notre modélisation. Nous distinguons néanmoins deux types d'engins en fonction de leur fonctionnement : les engins régionaux et

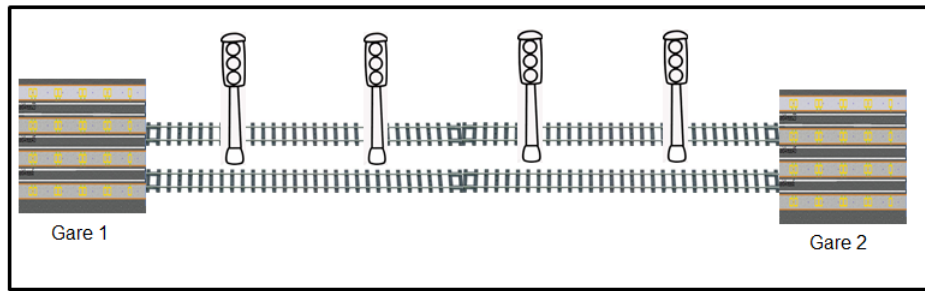


FIGURE 4.3 – Représentation des voies entre deux gares

les engins à grande vitesse. Nous décidons également d'ajouter l'attribut capacité d'accueil en passagers que nous estimons important pour refléter l'impact des retards sur les passagers.

De manière similaire aux engins, les agents de conduite sont affectés aux trains dans notre plan de transport. Nous n'autorisons pas au modèle de changer la planification en cours de simulation, et définissons par conséquent les agents par un identifiant.

Les ressources critiques modélisées et leurs attributs sont résumés dans la figure 4.4. La circulation des trains dépend de la disponibilité de ces ressources dans le temps et l'espace à chaque étape du processus. Cela signifie que lorsqu'un train est touché par un retard primaire, l'ensemble des ressources qui lui sont associées sont occupées plus longtemps que planifiées. Ainsi, les trains suivants nécessitant ces ressources sont affectés par des retards secondaires.

Nous détaillons dans la suite notre modélisation de la circulation des trains. Ce processus dépend fortement du partage des ressources infrastructure, engins et agents de conduite. L'ensemble des approximations que nous présentons a pour objectif de nous rapprocher le plus possible de la propagation des retards telle qu'elle se produit en réalité.

4.4.2 Modélisation de la circulation des trains

La circulation des trains suit un processus de déplacements sur le réseau ferroviaire en utilisant les engins et agents de conduite. Ce processus a pour objectif de réaliser un ensemble de trains définis par le plan de transport afin de couvrir la demande des passagers.

Nous avons évoqué précédemment la difficulté de modéliser parfaitement un système complexe. Les approximations et relaxations que nous adoptons doivent permettre néan-

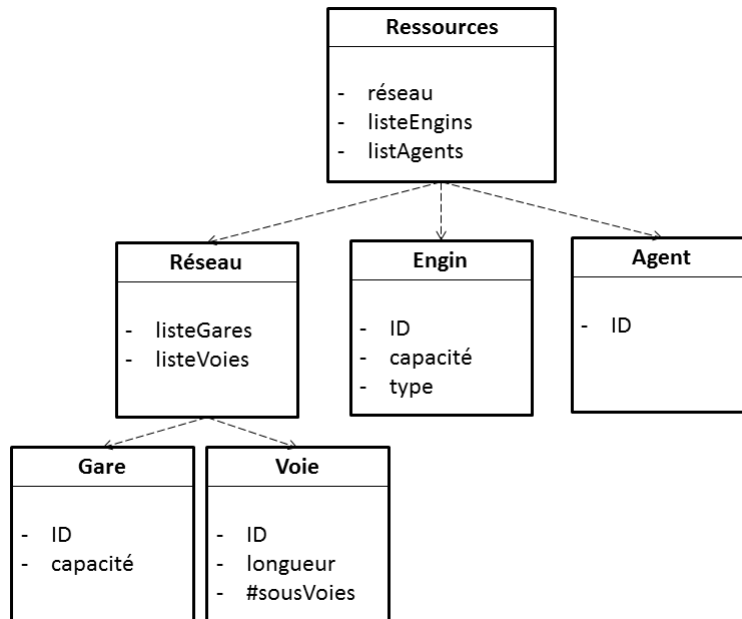


FIGURE 4.4 – Synthèse de la modélisation des ressources ferroviaires et leurs attributs

moins une représentation réaliste de la circulation du point de vue du métier et assister ainsi efficacement la prise de décision.

Nous présentons dans cette section la formalisation des plans de transport que nous simulons, en précisant les définitions des entités (trains) et les attributs retenus. Nous détaillons ensuite le processus de circulation d'un train et les étapes d'utilisation des différentes ressources. La propagation des retards est néanmoins causée uniquement par les interactions entre les trains. Par conséquent, les événements que nous définissons comme les moments du processus où un train réclame une ressource, permettent de saisir les conflits de partage des ressources.

Modélisation d'un plan de transport

Un plan de transport définit la liste des trains devant être produits sur une période donnée pour couvrir la demande des passagers. Un train est un service qui doit relier deux gares principales à des horaires prédéfinis. Souvent, le train réalise des dessertes commerciales dans des gares intermédiaires à des horaires fixés également. Ces dessertes déterminent la route du train, cela signifie que deux gares principales peuvent être reliées par plusieurs routes en fonction des gares intermédiaires.

La production d'un train nécessite un engin ou plusieurs selon les besoins d'accueil des passagers ou de repositionnement des engins, ainsi qu'un agent de conduite qualifié. Ce dernier est affecté au train sur l'ensemble de la route, alors que certains des engins

tractés peuvent être découplés en desserte les rendant ainsi disponibles pour les trains suivants.

Le plan de transport résumé dans la figure 4.5 est réalisable : chaque train dispose des ressources nécessaires à sa circulation aux différentes étapes du processus. Cela signifie qu'il n'y a pas de conflits sur l'utilisation des ressources partagées. Les retards primaires causent des conflits entre les trains en prolongeant l'utilisation des ressources. Nous détaillons dans la suite la modélisation du processus de circulation d'un seul train, ensuite nous présentons les interactions entre les trains. Notre modélisation permet de détecter, lorsque des retards primaires arrivent, les différents conflits du plan de transport et leurs causes.

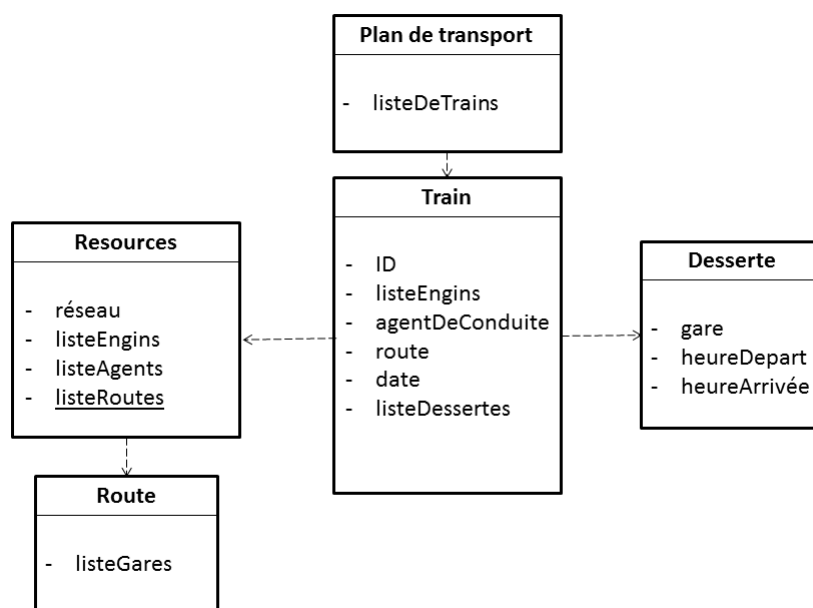


FIGURE 4.5 – Modélisation d'un plan de transport

Modélisation de la circulation des trains

Le train est associé à au moins un agent de conduite et un engin du début à la fin de sa route. La production d'un train exige par conséquent la disponibilité des deux ressources avant l'heure de départ du train. De plus, l'engin doit être présent au quai de départ afin de permettre la montée des passagers à bord. Nous ne considérons pas une affectation nominative du quai aux gares d'arrêt, et vérifions que la capacité de la gare n'est pas saturée.

Une fois l'ensemble des ressources disponibles, le train démarre sa route en alternant la circulation sur les voies et les arrêts en gares. Chaque section du réseau est définie par

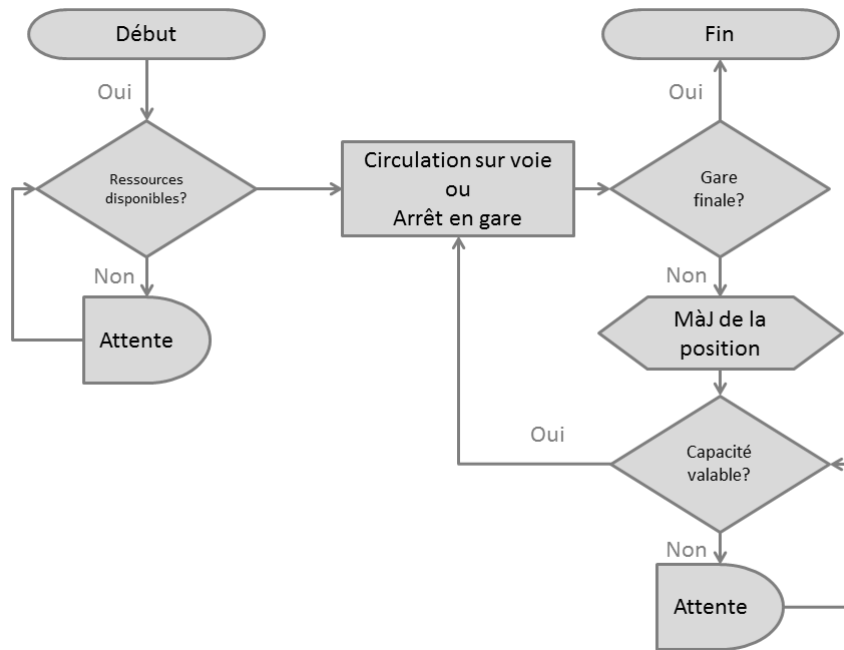


FIGURE 4.6 – Processus de circulation d'un train

une capacité, et le processus en vérifie le respect à chaque étape du déplacement.

La route du train est terminée une fois ce dernier entré dans sa gare finale. Les ressources sont alors à nouveau disponibles pour les trains suivants. Nous accordons aux ressources engins et agents de conduite un temps minimal entre deux trains successifs afin de permettre les manœuvres et les déplacements en gare.

Le processus de circulation d'un train (Figure 4.6) contient deux blocs "Attente" où les entités (trains) attendent que les ressources occupées redeviennent disponibles. Ces blocs sont inutiles en situations non perturbées, dans la mesure où le plan de transport est élaboré sans conflits. Ils ont alors pour objectif de détecter et enregistrer la ressource indisponible partagée entre les trains. Ainsi le premier bloc détecte l'indisponibilité de l'agent de conduite, engin et d'un quai dans la gare de départ du train. Le second bloc permet d'enregistrer l'indisponibilité d'un quai dans les gares suivantes, ainsi que l'impossibilité de rentrer dans sur section de voie. Néanmoins, les voies sont décomposées en un ensemble de sous-voies telles qu'un seul train puisse s'y trouver à un instant donné. Le second bloc "Attente" permet de propager le retard uniquement lorsque la première sous-voie est indisponible. Nous adaptons alors la modélisation du processus de circulation en détaillant le parcours et comportement du train entre deux gares successives (Figure 4.7).

Ainsi, entre deux gares, un train est obligé de s'arrêter au feu de signalisation en rai-

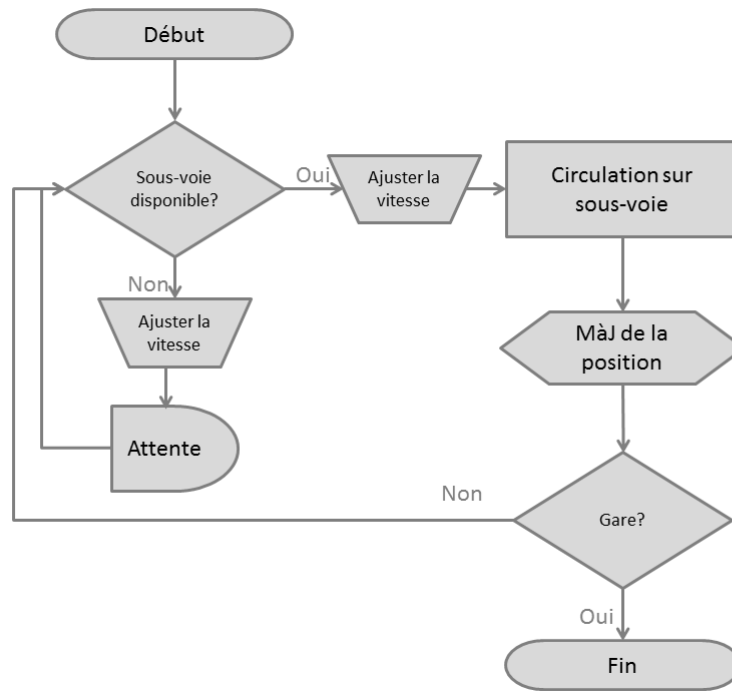


FIGURE 4.7 – Processus de circulation d’un train entre deux gares successives

son de la présence d’un autre train le devançant sur la voie. Ces arrêts ne sont pas planifiés dans le plan de transport et sont alors, en plus du temps d’attente de la libération de la sous-voie, des mesures des retards propagés sur les voies. Nous capturons cette propagation en pénalisant la durée de trajet du train à chaque fois que ce dernier doit ralentir pour s’arrêter ou accélérer pour redémarrer après un arrêt.

Le processus détaillé que nous avons présenté est conçu de manière à mesurer, aux différentes étapes, la propagation des retards primaires. Ces derniers sont causés par différentes sources (météo ou pannes, par exemple) et leur ampleur peut varier significativement.

Afin de pouvoir exploiter le modèle de simulation et les indicateurs mesurés, il est nécessaire de valider sa modélisation et son implémentation. Cela signifie de vérifier que l’ensemble des hypothèses présentées ci-dessus, que ce soit sur les ressources ou leur utilisation, traduisent la circulation ferroviaire réelle. D’autre part, nous devons nous assurer que la propagation des retards telle qu’elle est capturée par le modèle est logique et reflète le plus fidèlement possible la réalité.

4.5 Construction, validation et vérification du modèle

Le modèle de simulation mime le comportement du système ferroviaire et doit permettre la prise de décision dont dépendent les objectifs de simulation choisis. Nous cherchons dans ce travail à évaluer fidèlement le comportement d'un plan de transport face aux variations dues aux différents retards.

Une fois le modèle implémenté, deux étapes visent à tester la fiabilité du modèle construit :

1. Vérification du modèle : Est-ce-que le modèle implémenté correspond au modèle conceptuel et à ses hypothèses ?
2. Validation du modèle : Est-ce-que le comportement du modèle est une représentation fidèle de la réalité ?

Dans notre modèle, la vérification consiste à vérifier le bon comportement des entités (trains) et leur utilisation des ressources. C'est à dire que les trains saisissent et relâchent les ressources associées selon le plan de transport simulé. De plus, lorsqu'une ressource est indisponible, il faut s'assurer que le train ne puisse circuler avant sa libération. Cette étape a pour objectif de détecter les problèmes de programmation et les corriger avant de questionner la pertinence des hypothèses de modélisation. Nous présentons les étapes de vérification de notre modèle sous forme de scénarios de tests sans détailler l'ensemble des défauts repérés et corrigés lors de cette étape.

L'étape de validation vise à tester l'ensemble des hypothèses de modélisation et la logique de la sortie du modèle. Cela signifie de valider par un plan d'expérience complet que les retards propagés dans le plan de transport dépendent des retards primaires introduits, et ressemblent à une propagation réelle.

4.5.1 Implémentation du modèle et instance expérimentale

Le modèle de simulation à événements discrets a été implémenté en JAVA dans l'outil AnyLogic 7.1. Cet outil a été choisi car il offre la possibilité de mixer plusieurs types de simulation dans le même modèle ainsi qu'une grande flexibilité d'implémentation. En effet, bien que l'outil offre des bibliothèques d'objets fonctionnels, nous choisissons de créer des objets pour nos ressources et entités pour une maîtrise complète du processus.

Nous utilisons dans les différents tests de validation une instance expérimentale que nous résumons dans la table [4.3](#).

Ressources	Nombre de gares	203
	Nombre de routes	29
	Nombre de voies	225
	Nombre de sous-voies	2619
	Nombre d'engins	51
	Nombre d'agents de conduite	225
Circulation	Nombre de trains	1327
	Horizon temporel	7 jours

TABLEAU 4.3 – Instance expérimentale pour la validation du modèle de simulation

Cette instance correspond à la circulation de trains régionaux sur une semaine de base (hors vacances et jours fériés) d'une région Française. Elle comporte 58 gares avec des capacités allant d'un seul quai à 11. Les gares sont reliées par 425 tronçons (voies) que nous avons décomposés en 3287 sous-voies. Les trains peuvent circuler sur 133 routes reliant deux gares principales et desservant des gares intermédiaires.

4.5.2 Vérification du modèle

La première étape du test du modèle de simulation consiste à vérifier que le modèle implémenté reflète le modèle conceptuel élaboré. Nous décomposons, altérons et traçons les données d'entrées et les déplacements des entités selon l'approche suivante :

Le test unitaire :

Nous nous assurons du bon fonctionnement de chaque composante du modèle. Nous traçons ainsi le déplacement d'une seule entité train sur une sous-section du réseau composée de deux gares et une voie les reliant. Le test consiste à vérifier le respect des horaires (les différents temps de tâches), des distances et la bonne mise à jour de l'état des ressources (occupé ou disponible).

Le test d'intégration :

Cette étape consiste à regrouper des composantes unitaires liées entre elle et valider la communication entre elles. Par exemple, si un train utilise une ressource à l'instant t , le modèle ne peut pas faire circuler une autre entité avec cette même ressource au même moment.

Le test des enchaînements :

Ce test consiste vérifier le bon enchaînement des composantes du modèle, ainsi que la lecture des données et l'écriture des sorties. Ainsi, pour l'instance complète du tableau 4.3, nous vérifions la construction du réseau complet et des ressources disponibles ainsi que la circulation de tous les trains. Cette étape a pour but de détecter les défauts liés aux différentes combinaisons du plan de transport, notamment le partage des ressources par l'ensemble des trains.

4.5.3 Validation du modèle

L'objectif principal de notre modèle de simulation est de quantifier la propagation des retards dans le plan de transport. L'étape de validation du modèle revient à introduire des retards primaires dans le plan de transport et tracer leur propagation dans le système.

Nous démarrons cette étape en introduisant un seul retard qui cible soit une ressource soit une entité. Par exemple, nous ciblons une section du réseau, y introduisons un retard et vérifions que tous les trains censés y circuler sont également retardés. Un autre exemple est de cibler un train, lui affecter un retard primaire et valider la propagation sur les ressources associées. Ces tests permettent de vérifier le bon fonctionnement des blocs "Attente" présentés dans les schémas 4.6 et 4.7.

Nous testons ensuite plusieurs distributions de retards primaires représentées dans la figure 4.8. Chaque scénario définit la probabilité d'occurrence d'un retard primaire ainsi que sa durée. Par exemple, pour le scénario 1, 70% des trains ne sont affectés par aucun retard primaire, 20% d'un retard inférieur à 5 minutes et ainsi de suite. La durée exacte du retard primaire est ensuite choisie uniformément dans l'intervalle défini.

Le premier scénario est extrait de données réelles enregistrées au sein de SNCF et sera utilisé dans les expérimentations finales. Ce scénario est le plus réaliste de nos expérimentations et décrit principalement des petits retards primaires et plus rarement de moyens et gros retards. Nous choisissons de créer les scénarios 2 et 3 afin d'en valider l'impact sur la propagation en variant les probabilités des différentes strates de retards. Ainsi, le scénario 2 est caractérisé par des retards moyens plus fréquents et le scénario 3 par des retards de grandes ampleurs. Nous cherchons à valider le lien entre retards primaires et secondaires et ainsi les hypothèses de propagation modélisées.

Nous présentons les indicateurs mesurés pour l'instance expérimentale (Table 4.3) dans le tableau 4.4.

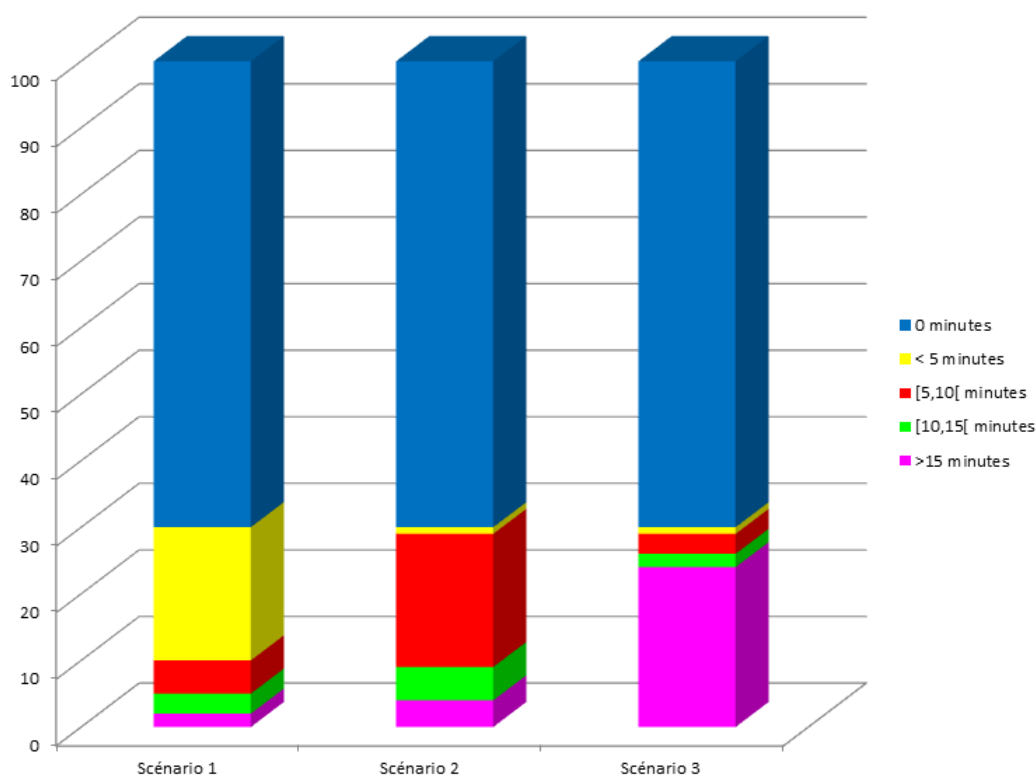


FIGURE 4.8 – Scénarios de retards primaires testés

Famille	Indicateur	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Indicateurs système	<i>ponc_dep</i>	99.24 %	98.63 %	95.15 %
	<i>ponc_arr</i>	88.34 %	76.41 %	67.9 %
Quantification de la propagation	<i>%_secondary</i>	1.98 %	3.17 %	10.54 %
	<i>total_secondary</i>	160.75	247.89	861.11
	<i>mean_secondary</i>	5.83	5.8	6.15
	<i>max_secondary</i>	13.75	14.74	18.53
Source de la propagation	<i>busy_gare</i>	0.76 %	1.4 %	0.75 %
	<i>busy_voie</i>	43.42 %	40.68 %	33.7 %
	<i>busy_engin</i>	25.33 %	28.35%	29.27%
	<i>busy_agent</i>	30.47 %	29.53 %	36.5%

TABLEAU 4.4 – Indicateurs de robustesse pour l'instance présentée dans la table 4.3

Les indicateurs du système sont les pourcentages de ponctualité au départ et l'arrivée des trains. Les deux indicateurs suivent l'augmentation des retards entre les scénarios. Cela est d'autant plus visible sur la ponctualité à l'arrivée dans la mesure où nous avons décidé, dans ces tests, d'injecter tous les retards primaires après le départ du train.

Les indicateurs de propagation mesurent à la fois le pourcentage de trains touchés par un retard secondaire et les retards secondaires cumulés du plan de transport. De même

que les indicateurs système, nous observons une augmentation de la propagation en augmentant l'ampleur des retards primaires. La moyenne des retards secondaires restent relativement stables entre les scénarios, et le retard secondaire maximal augmente légèrement.

Les ressources critiques sont responsables de la propagation des retards. Nous vérifions dans ces tests que cette responsabilité est logiquement répartie entre les ressources en mesurant les indicateurs de source de propagation.

4.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la phase d'évaluation de la robustesse des plans de transport par simulation. Nous avons choisi la simulation à événements discrets qui nous permet de reproduire la circulation des trains et d'y introduire des scénarios de perturbations.

Notre objectif principal est de quantifier la propagation des retards sur les trois ressources critiques : infrastructure, engins et agents de conduite. Nous modélisons ainsi les trois ressources et leur utilisation dynamique par les trains planifiés. Nous mesurons plusieurs familles d'indicateurs de robustesse selon différentes métriques pour plusieurs distributions de retards primaires. Nous avons validé le modèle de simulation implémenté sur une instance expérimentale afin d'identifier l'impact des hypothèses de modélisation formulées.

Le modèle de simulation présenté nous permet à présent de quantifier la robustesse d'un plan de transport et d'identifier les interactions critiques des ressources. De plus, ce modèle nous permet de comparer plusieurs plans de transport selon leur niveau de robustesse. Cela nous permet de valider la phase d'optimisation qui se déroule au niveau tactique, que ce soit le choix des critères de robustesse ou la pertinence des décisions.

Nous détaillons dans le prochain chapitre la phase de planification formulée comme un Programme Linéaire en Nombres Entiers. Le modèle d'optimisation a pour objectif d'élaborer un plan de transport robuste en intégrant la planification des trois ressources ferroviaires. Un fois ce modèle vérifié et l'ensemble de ses hypothèses validées, nous testons l'approche complète optimisation-simulation sur des données réelles.

Chapitre 5

Optimisation intégrée et robuste des ressources ferroviaires

Sommaire

5.1	Introduction	73
5.2	Phase de génération : L'existant à SNCF	77
5.2.1	Génération des lignes de roulements des engins	78
5.2.2	Génération des emplois du temps des agents de conduite	80
5.2.3	Synthèse de la phase de génération	82
5.3	Phase de sélection : Modèle mathématique	83
5.3.1	Critères de robustesse	84
5.3.2	Notations	86
5.3.3	Modèle mathématique	88
5.4	Méthode de résolution	93
5.4.1	Solution initiale	94
5.4.2	L'ensemble des voisinages	95
5.5	Conclusion	96

5.1 Introduction

L'objectif de la phase de planification est de proposer une modélisation mathématique qui permet d'élaborer un plan de transport intégré et robuste des ressources ferroviaires. Notre hypothèse principale est la suivante : l'intégration des ressources dans le processus de planification aboutira à une solution plus robuste que celle obtenue par un processus séquentiel. En effet, les trains partagent ces ressources critiques et les retards

primaires se propagent sur leurs planifications. Nous intégrons ainsi la planification des engins ferroviaires et des agents de conduite, en autorisant des décalages limités sur les horaires de départ des trains. Ces décalages permettent d'intégrer l'infrastructure dans la planification sans remettre en question les décisions stratégiques ([Mercier and Soumis, 2007]).

L'intégration des ressources implique la considération simultanée des contraintes associées aux deux ressources ferroviaires (Voir le chapitre 1). D'une part, les engins disponibles sont limités et hétérogènes. Leur planification doit par conséquent respecter la capacité de la flotte ainsi que la compatibilité des engins avec les différentes sections du réseau. De plus, les engins affectés à un train doivent en couvrir la demande en passagers. D'autre part, la réglementation de travail des agents de conduite est stricte afin de répondre aux exigences de sécurité. Ces contraintes s'ajoutent aux contraintes de production pour l'élaboration d'emplois du temps d'agents de conduite. Nous obtenons alors un problème très complexe auquel il faut intégrer la notion de robustesse.

Dans la mesure où nous travaillons au niveau tactique, nous nous concentrons sur la réduction des retards secondaires et non les retards primaires. Nous définissons alors un plan de transport robuste comme un plan qui permet de minimiser la propagation sur le réseau et dans le temps de retards primaires.

Nous devons par conséquent répondre aux questions suivantes :

1. Comment gérer la complexité engendrée par l'intégration des ressources ?
2. Quel choix de critères de robustesse permettrait de minimiser la propagation des retards sur l'ensemble des ressources ?

Nous choisissons une approche d'optimisation en deux phases, génération puis sélection, afin de décomposer le problème tout en intégrant les ressources. En effet, cette approche permet de gérer les contraintes de production dans la phase de génération et de considérer des objectifs de robustesse dans la phase de sélection. Ainsi nous générons d'abord, pour chaque ressource, des ensembles de planifications réalisables sous forme de séquences de trains à couvrir. Ensuite nous sélectionnons parmi ces séquences la combinaison qui optimise le mieux les critères de robustesse.

Dans la phase de génération, nous utilisons deux outils existant à SNCF *PRESTO* et *PLAISANCE* qui permettent d'élaborer des lignes de roulement d'engins jour et des emplois du temps d'agents respectivement. Ils ont pour objectif de minimiser les coûts de production tout en assurant la couverture de la demande des passagers en trains. Nous obtenons alors des séquences respectant l'ensemble des contraintes de production.

La phase de sélection est formulée comme un Programme Linéaire en Nombres En-

tiers où l'on doit simultanément :

- Sélectionner les lignes de roulement d'engins jour dans l'ensemble généré.
- Sélectionner les emplois du temps d'agents de conduite dans l'ensemble généré.
- Décaler les horaires de départ des trains si cela améliore la robustesse du plan de transport.

La sélection simultanée des séquences d'activité des engins et des agents de conduite doit couvrir l'ensemble des trains planifiés tout en respectant les capacités en ressources. De plus, les ressources doivent être compatibles entre elles afin d'être associées à un train. En addition, les lignes de roulement et les emplois du temps générés sont basés sur une liste de trains avec des horaires définis. L'autorisation de décalages horaires, bien que très limitée, ne doit pas violer les contraintes de circulation (spatio-temporelles, par exemple).

Les critères de robustesse que nous choisissons sont inspirés de la littérature, de l'expertise du métier ainsi que des expérimentations réalisées par simulation. Nous basons alors le choix de la sélection sur les deux idées suivantes, introduites au chapitre 3 et que nous rappelons :

Hypothèse 1.

Un train est moins susceptible d'être affecté par un retard secondaire si ses ressources peuvent absorber les retards primaires. Cela signifie que plus les marges des ressources affectées sont grandes, plus le train est robuste. La marge d'une ressource est définie comme son temps de disponibilité (en minutes) avant le départ du train.

Hypothèse 2.

Plus les ressources engins et agents de conduite sont maintenues ensemble, plus le plan de transport est robuste. En effet, nous avons illustré par simulation la propagation des retards sur les ressources affectées à un train. Contrairement à l'hypothèse précédente, cette idée n'a pas pour objectif d'absorber les retards, mais plutôt de minimiser le nombre de trains affectés par les retards secondaires.

Nous nous baserons ainsi sur la sélection simultanée pour obtenir un plan de transport qui maximise les marges des ressources ferroviaires et minimise les changements engins/agents de conduite. L'idée des décalages limités des horaires trains permet, a priori, d'améliorer les deux critères de robustesse. D'une part, les marges du plan de transport

sont limitées et les décalages permettent d'en optimiser la distribution. D'autre part, certaines affectations de ressources sont impossibles pour des raisons spatio-temporelles. Décaler l'horaire d'un train permettrait de maintenir les ressources engins et agents de conduite associées. Néanmoins, les décalages horaires augmentent la complexité du problème dans la mesure où l'on remplace un train par un minimum de deux trains théoriques.

Pour synthétiser notre démarche, nous avons opté pour une approche en deux phases, génération puis sélection, pour élaborer des plans de transport ferroviaire. Nous nous basons en phase de génération sur deux outils SNCF qui fournissent des lignes de roulement d'engins jour et des emplois du temps d'agents de conduite. Ensuite, en phase de sélection, nous formulons un PLNE pour sélectionner simultanément la combinaison de planings qui composent le plan de transport le plus robuste tout en autorisant un décalage horaire limité des trains. Nous définissons un plan de transport robuste comme un plan qui minimise la propagation des retards, et choisissons par conséquent des critères de robustesse adaptés (Figure 5.1).

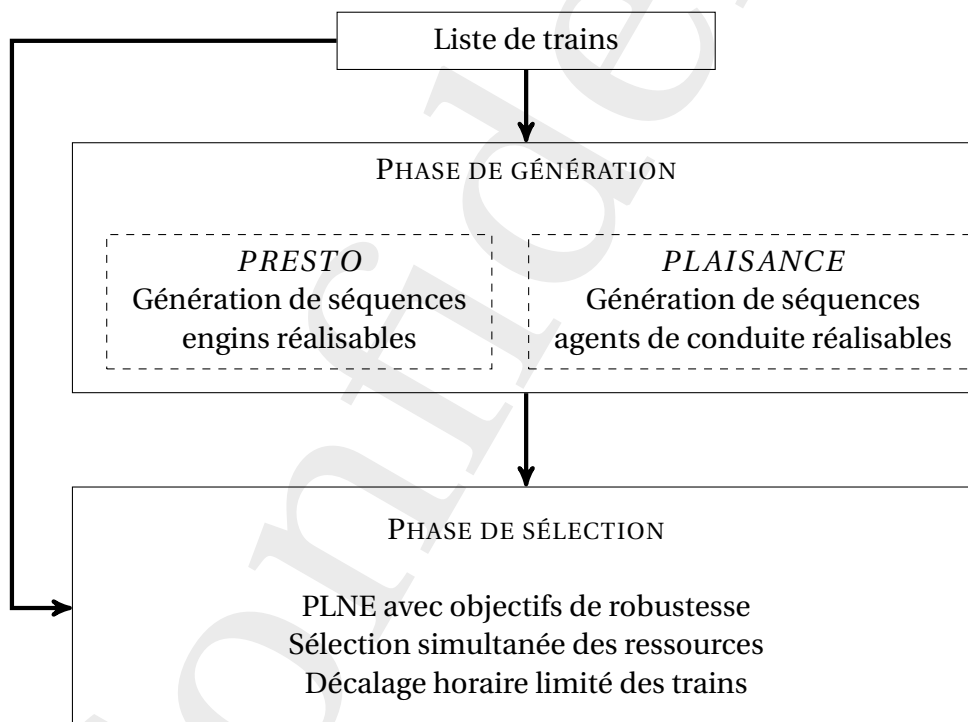


FIGURE 5.1 – Approche d'optimisation (génération et sélection) avec décalages horaires limités

L'approche choisie permet de séparer la gestion des contraintes de production et les objectifs de robustesse. La phase de sélection peut être alors vue comme un module complémentaire qui permet de choisir la combinaison de lignes de roulements et d'emplois du temps la plus robuste. Cela signifie que le modèle mathématique que nous présentons dans ce chapitre reste valable du moment que l'on sait générer des solutions réalisables pour chacune des ressources engins et agents.

Le chapitre est composé des sections suivantes :

- Section 5.2 : Nous présentons les différentes étapes de la phase de génération de notre approche. Cette phase est basée sur un outil de planification des engins et un outil de planification des agents de conduite. Nous ne rentrons pas dans les détails de leurs fonctionnements et nous concentrons sur les entrées et sorties nécessaires pour la phase de sélection.
- Section 5.3 : Nous présentons la modélisation mathématique de la phase de sélection. Nous détaillons d’abord la formulation des critères de robustesses basés sur les hypothèses 1 et 2, et détaillons ensuite l’ensemble des contraintes associées à cette phase.

5.2 Phase de génération : L'existant à SNCF

La phase de génération doit répondre aux différents besoins de production en proposant un choix de sélection réalisable. Cela signifie que les sorties de cette phase devront respecter l’ensemble des contraintes de production des ressources considérées. Nous nous concentrons dans cette phase sur les ressources engins et agents de conduite, dans la mesure où l’infrastructure est intégrée en phase de sélection par des décalages limités (nous partons d’une grille horaire existante).

Nous avons présenté de manière détaillée les différents problèmes de planification des ressources dans le chapitre 1. Au niveau tactique, une solution du problème de planification des engins ferroviaires est un ensemble de roulements d’engins. Un roulement est composé de plusieurs lignes de roulements définies par des séquences d’activité et inactivité sur une durée définie. Une ligne de roulement n’est pas affectée nominativement et est générique pour un ensemble d’engins aux mêmes caractéristiques techniques. L’enchaînement des lignes de roulements en roulements d’engins permet d’assurer la rotation du matériel sur plusieurs semaines.

Nous choisissons d’ignorer la notion de roulement et assurons une cyclicité hebdomadaire des engins dans la phase de sélection. Nous ignorons également les contraintes de maintenance et retenons la définition suivante :

Définition 3. *La génération des lignes de roulement d’engins jour consiste à élaborer des lignes de roulements réalisables sur une journée. Ces lignes couvrent les trains de la grille horaire et respectent les contraintes spatio-temporelles.*

Concernant les agents de conduite, le problème de planification au niveau tactique consiste à élaborer des emplois du temps définis comme une séquence d’activités (conduite

ou déplacement) et inactivités (repos) sur une ou deux journées. Habituellement, ce problème est résolu après l'obtention d'une solution au problème d'engins. L'objectif du problème revient alors à affecter des agents de conduites adaptés aux lignes de roulement d'engins jour. Chaque emploi du temps est ensuite affecté à un roulement d'agents défini comme un ensemble d'agents partageant les mêmes compétences techniques et affectés à la même gare de résidence.

Nous tentons dans notre approche de minimiser le caractère séquentiel du processus et ignorons par conséquent les lignes de roulement d'engins jour obtenus. Ainsi, nous présentons la définition suivante :

Définition 4. *La génération des emplois du temps d'agents de conduite consiste à élaborer des emplois du temps réalisables sur une ou deux journées affectés à un roulement d'agents. Ces emplois du temps couvrent l'ensemble des trains (et non des engins) tout en respectant les contraintes capacités des roulements d'agents et la réglementation du travail.*

À SNCF, deux outils de planification pour les problèmes engins et agents de conduite sont utilisés : l'outil *PRESTO* permet de générer des roulements d'engins ferroviaires optimisés au sens de plusieurs coûts de production, et l'outil *PLAISANCE* permet d'élaborer des emplois du temps réalisables et optimisés pour les agents de conduite. Néanmoins, les deux outils ont été développés pour élaborer des solutions pour chaque ressource dans un processus séquentiel.

Nous présentons dans cette section l'ensemble des données nécessaires à leur utilisation. Nous précisons ensuite les catégories de contraintes couvertes par les outils, et que nous n'aurons pas à considérer par conséquent en phase de sélection. Enfin, nous présentons pour chaque outil la formulation des sorties retenues et qui serviront d'entrées pour le modèle de sélection.

5.2.1 Génération des lignes de roulements des engins

L'outil de planification engins *PRESTO* est basé sur un Programme Linéaire en Nombres Entiers qui fournit des roulements d'engins optimisés. Nous décrivons les données d'entrée et de sortie de *PRESTO* que nous utiliserons en phase de sélection et énumérons les catégories de contraintes couvertes par les lignes de roulement générées, et qui ne seront par conséquent pas considérées en sélection.

Données d'entrée *PRESTO*

PRESTO vise à couvrir une liste de trains commerciaux T^C avec des engins. La planification est réalisée sur une période définie (ensemble de jours D) et une section du réseau délimitée par un ensemble de gares S . Pour chaque train à couvrir, nous connaissons la demande en passagers associée dem_t . Notons K l'ensemble des séries de matériel définies par leur capacité d'accueil des passagers (cap_k) et leur flotte d'engins ($KCap_k$). Nous synthétisons ces notations dans la table 5.1.

TABLEAU 5.1 – Données d'entrée de *PRESTO*

T^C	Liste des trains commerciaux
D	Ensemble des jours
S	Ensemble des gares
dem_t	Demande en passagers du train $t \in T^C$
K	Ensemble des séries de matériel
cap_k	Capacité d'accueil d'un engin de type $k \in K$
$KCap_k$	Nombre d'engins disponibles pour la série matériel $k \in K$

Objectifs et contraintes de *PRESTO*

PRESTO vise à optimiser les coûts des différentes utilisations des engins et gère les catégories de contraintes suivantes :

- Contraintes de couverture : elles assurent que les trains sont couverts par des engins en nombre suffisant.
- Contraintes de capacité : elles limitent le nombre d'engins utilisés par série de matériel.
- Contraintes spatio-temporelles : cette famille peut être vue comme des contraintes de conservation des flots. Un engin ne peut ainsi être affecté à un train que s'il est disponible à la gare de départ avant l'heure du départ du train.

Données de sortie *PRESTO*

PRESTO génère un ensemble de lignes de roulement Ω^C . Rappelons qu'une ligne de roulement $i \in \Omega^C$ est une séquence d'activité et d'inactivité d'un engin sur une journée. Nous notons D_i la journée associée à la ligne de roulement i . Chaque ligne est définie par une gare d'origine et une gare de destination ($orig_i$ et $dest_i$), correspondant respectivement à la gare de départ du premier train de la ligne et à la gare de destination du dernier

train. Au niveau de décision tactique dans lequel nous travaillons, les lignes de roulement ne sont pas affectées à un engin particulier mais à une série de matériel que nous notons K_i . Le choix de l'engin est fait au niveau opérationnel.

Considérant la flotte limitée en engins et la demande en passagers asymétrique, *PRESTO* autorise dans les lignes de roulements des trajets de repositionnement des engins. Ces trains dits à vide et notés T^W ne transportent pas de passagers et n'ont pas pour objectif de couvrir la demande. Une ligne de roulement $i \in \Omega^C$ est alors définie comme une séquence composée de trains commerciaux $comm_i$ et de trains à vide $vide_i$. Nous synthétisons ces notations dans la table 5.2.

L'introduction des trains à vide impose une séquentialité dans la phase de génération. En effet, un train à vide nécessite d'engager un agent de conduite pour le couvrir. L'outil que nous utiliserons pour la génération des emplois du temps des agents devra par conséquent prendre en entrée la liste des trains à vide générée par *PRESTO*.

La multifonctionnalité de l'outil permet de construire différentes séquences d'activités des engins en fonction des objectifs et contraintes choisies. Néanmoins, *PRESTO* est développé pour proposer la meilleure solution trouvée. Or, nous avons besoin de plusieurs séquences afin de les combiner en phase de sélection. Nous obtenons ces différentes solutions en variant les coûts des différentes utilisations des engins.

TABLEAU 5.2 – Données de sortie de *PRESTO*

Ω^C	Ensemble des lignes de roulements générées
T^W	Ensemble des trains à vide
D_i	Jour d'activité de la ligne $i \in \Omega^C$
$orig_i$	Gare d'origine de la ligne de roulement $i \in \Omega^C$
$dest_i$	Gare de destination de la ligne de roulement $i \in \Omega^C$
K_i	Série de matériel associée à la ligne $i \in \Omega^C$
$comm_i$	Ensemble des trains commerciaux de la ligne $i \in \Omega^C$
$vide_i$	Ensemble des trains à vide de la ligne $i \in \Omega^C$

5.2.2 Génération des emplois du temps des agents de conduite

PLAISANCE génère des emplois du temps des agents de conduite ([Chevalier et al., 2015]). L'approche d'optimisation adoptée est réalisée sur un horizon d'une semaine. Rappelons quelques définitions associées au problème de planification des agents :

- Journée de service : définit une séquence de tâches pour un agent de conduite sur une journée. Une tâche peut être un train en conduite ou un train en voiture (l'agent est repositionné via un trajet comme passager).

- Emploi du temps : est composé d'une ou deux journées de service. Dans le premier cas, cela signifie que l'agent démarre et termine sa journée à sa gare de résidence. Dans le second cas, l'agent a dû passer une nuit à une gare différente de sa résidence et rentre obligatoirement à sa résidence le lendemain.
- Roulement d'agents : définit un ensemble d'agents de conduite partageant la même gare de résidence et les mêmes connaissances techniques. Chaque emploi du temps est affecté à un roulement d'agents au niveau tactique, et l'affectation nominative est décidée au niveau opérationnel.

Données d'entrée de *PLAISANCE*

PLAISANCE prend en entrée la solution de la planification engins fournie par *PRESTO*. Notre vision intégrée de l'approche vise à minimiser la séquentialité entre les ressources et ainsi leur interdépendances. Nous modifions alors la phase de génération de façon à ce qu'elle prenne en entrée les listes de trains commerciaux et des trains à vide T^C et T^W (circulant les jours D entre les gares S) sans considérer les lignes de roulements établies. L'ensemble des roulements d'agents R et leur capacité $RCap_r$ est également connu.

TABLEAU 5.3 – Données d'entrée de *PLAISANCE*

T^C	Liste des trains commerciaux
T^W	Liste des trains à vide
R	Ensemble des roulements des agents
$RCap_r$	Capacité en agents du roulement $r \in R$
D	Ensemble des jours
S	Ensemble des gares

Objectifs et contraintes de *PLAISANCE*

Dans la phase de génération de *PLAISANCE*, les emplois du temps sont construits de manière itérative avec des fonctions de contrôle qui permettent de maîtriser la combinatoire sous-jacente.

Les contraintes couvertes par *PLAISANCE* sont divisées en trois catégories :

- Contraintes réglementaires : cette famille groupe les contraintes des conditions de travail des agents de conduite (repos et temps de travail, par exemple).
- Contraintes de couverture : à chaque train doit être affecté un agent de conduite.
- Contraintes de capacité : les emplois du temps générés doivent être affectés à des roulements d'agent sans en dépasser la capacité.

Données de sortie *PLAISANCE*

PLAISANCE génère un ensemble d'emploi du temps Ω^D . Nous connaissons pour chaque emploi du temps le(s) jour(s) d'activité D_j ainsi que le roulement d'agent associé R_j . Nous distinguons également dans chaque emploi du temps les trains réalisés en conduite $conduite_j$ des trains effectués en voiture $voiture_j$.

TABLEAU 5.4 – Données de sortie de *PLAISANCE*

Ω^D	Ensemble des emplois du temps générés
D_j	Jours d'activité de l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
R_j	Roulement agent associé à l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
$conduite_j$	Trains commerciaux de l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
$voiture_j$	Trains affectés en voiture à l'emploi du temps $j \in \Omega^D$

5.2.3 Synthèse de la phase de génération

L'objectif de la phase de génération est de profiter des outils existant à SNCF pour nous défaire d'une grande partie des contraintes associées aux ressources. Ainsi, du côté engins, nous obtenons grâce à l'outil *PRESTO* des lignes de roulements réglementaires ainsi que les trains à vide pour le repositionnement des engins. Ces derniers complètent la liste des trains traités par *PLAISANCE* afin d'obtenir des emplois du temps agents de conduite réalisables. Les emplois du temps couvrent un ou deux jours de circulation et sont affectés à des roulements d'engins (Figure 5.2).

Nous utiliserons par conséquent les sorties de ces deux outils comme entrées de la phase de sélection. Il s'agira alors de choisir parmi les séquences d'activité des deux ressources simultanément de manière à élaborer le plan de transport le plus robuste. Nous définissons dans la prochaine section les différents critères de robustesse que nous choisissons, ainsi que la modélisation mathématique de la phase de sélection.

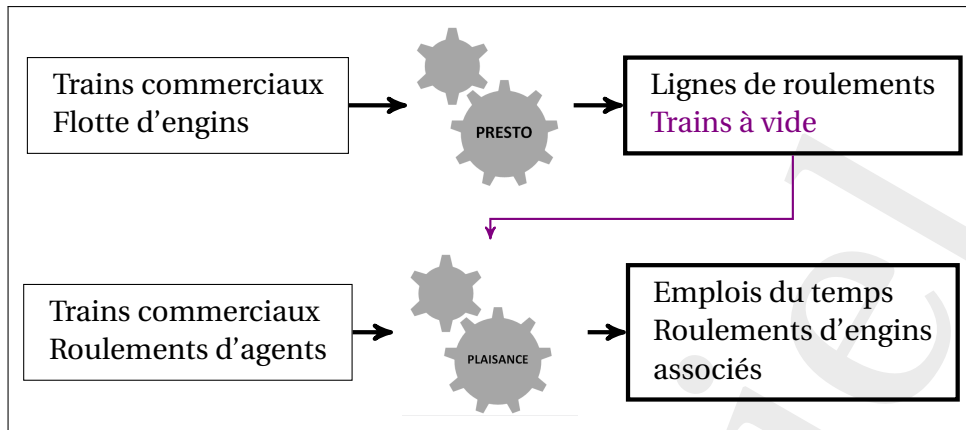


FIGURE 5.2 – Schéma de synthèse de l'utilisation des outils *PRESTO* et *PLAISANCE* en phase de génération

5.3 Phase de sélection : Modèle mathématique

La phase de sélection de notre approche consiste à répondre aux objectifs de robustesse dans la mesure où nous avons gérés les besoins de production dans la phase de génération. Cela revient à définir des critères pour définir un plan de transport au niveau tactique qui assurent qu'il sera robuste face aux retards au niveau opérationnel. En effet, nous avons choisi une approche proactive pour la recherche de la robustesse des ressources ferroviaires. Cela signifie que nous ne préoccuons pas des réparations en temps réel lorsque des retards primaires se produisent (annulation ou décalages des trains, par exemple).

Les critères que nous choisissons doivent par conséquent définir un plan de transport dont toutes les ressources sont capables d'absorber des petits retards primaires. Nous re-prenons ainsi une des idées de critères les plus rencontrées dans la littérature : les marges temporelles ([Dewilde et al., 2011] [Goverde, 1999] [Yuan and Hansen, 2008]). Nous avons présentés dans le chapitre 2 les trois types de marges temporelles exploitées dans la recherche de robustesse :

- Marges de marche (Buffer times) : ce sont des suppléments de temps accordés aux temps de trajet des trains qui permettent d'absorber les retards primaires entre deux gares. Quantitativement, ces marges doivent être assez petites pour réduire le temps d'attente du train, et assez grandes pour absorber les retards et assurer les correspondances des ressources.
- Marges de manœuvres (Dwell times) : les temps d'arrêt en station doivent être assez grands pour permettre les manœuvres et les montées/descentes des passagers. L'introduction de marges permet d'absorber les petits retards mais ils doivent être assez petits pour minimiser le temps d'attente des passagers et le temps d'occupa-

tion des quais en gare.

- Marges d'espacements (Headways) : ce sont des suppléments de temps introduits entre deux trains consécutifs. L'introduction de marges prévient de la propagation des retards sur les trains suivants.

L'ensemble de ces marges temporelles a été utilisé pour l'élaboration des grilles horaires au niveau stratégique. Notre démarche se situe au niveau tactique et part d'une grille horaire établie. Cela signifie que nous ne pouvons pas modifier radicalement la structure de la grille horaire. Ainsi nous éliminons les marges de marche et de manœuvres dont l'introduction remettrait en cause la structure des trains et par conséquent les lignes de roulement et emplois du temps générés dans la phase précédente. Nous retenons l'idée des marges d'espacement qui s'adapte à l'idée des décalages limités autorisés. Ces marges, telles qu'elles sont définies, représentent l'espacement entre les trains dans la grille horaire et donc sur l'infrastructure (gares et voies). Nous modifions alors cette définition afin de l'adapter au processus de planification intégrée : une marge d'espacement d'un train est égale au minimum des marges d'espacements sur toutes les ressources. Par conséquent, la marge d'un train dépend à la fois de l'engin et de l'agent de conduite qui lui sont affectés.

Une deuxième idée de critère de robustesse a été retenue dans notre approche et a été inspirée par la littérature et l'expertise du métier. Elle consiste à synchroniser les ressources afin de les maintenir le plus longtemps possible ensemble ([Kroon and Fischetti, 2001] [Nielsen et al., 2007]). Cela signifie que lorsqu'un engin et un agent de conduite sont affectés à un train, nous favoriserons leur affectation simultanée sur le train suivant. Bien que cette idée ne corresponde pas à une absorption temporelle des retards primaires, elle permet d'en minimiser la propagation dans l'espace et ainsi le nombre de trains retardés.

Ces deux critères sont la base des fonctions objectif du modèle mathématique que nous présentons dans cette partie. Ce modèle est un Programme Linéaire en Nombres Entiers où l'on sélectionne simultanément les lignes de roulement et emplois du temps qui composent le plan de transport le plus robuste. Ce plan doit couvrir l'ensemble des trains par les deux ressources en respectant les capacités en ressources et les compatibilités entre elles. De plus, nous autorisons dans notre modèle des décalages limités sur les horaires de départ des trains. Le choix du décalage devra améliorer les critères de robustesse sans nuire à la faisabilité des lignes de roulement et emplois du temps générés.

5.3.1 Critères de robustesse

Après une revue de littérature sur la recherche de la robustesse dans la planification ferroviaire (Voir le chapitre 2), il semble difficile de formuler une définition précise de

la robustesse. Dans les différents travaux, le concept de la robustesse est représenté par différents critères qui s'adaptent à la ressource traitée et au niveau décisionnel.

Notre problème se situe au niveau tactique et nous traitons simultanément les trois ressources critiques. Cela implique que notre choix de critères de robustesse doit refléter notre définition d'un plan de transport global robuste. Nous cherchons par conséquent à nous inspirer des critères rencontrés dans la littérature et à les ajuster à la planification multi-ressources.

La première idée que nous retenons est l'introduction de marges d'espacements dans les grilles horaires. Cette idée consiste à distribuer des suppléments entre les trains successifs sur la section du réseau. Ainsi, en cas d'occurrence de petits retards primaires, le train est capable de les absorber et ne pas en propager les effets. Néanmoins, un train ne peut être produit que lorsque les deux ressources (engin(s) et agent) sont disponibles. Cela signifie que la marge d'espacement réelle dont dispose un train est égale à la marge minimale de ces deux ressources. Nous retenons donc notre première famille de critères basée sur la définition suivante :

Définition 5. *La marge d'un train est définie comme le minimum des marges des ressources engins et agent avant le départ du train. Plus cette marge est grande, plus le train peut absorber des retards primaires.*

Pendant la phase de sélection, nous choisissons simultanément pour chaque train la ligne de roulement $i \in \Omega^C$ et l'emploi du temps $j \in \Omega^D$. Ce choix se fera alors de manière à maximiser la marge des trains telle que nous l'avons définie. Néanmoins, la capacité du réseau ferroviaire étant limitée, les marges dont on dispose le sont également. Notre avantage principal sur ce point est le décalage limité des horaires des trains que nous autorisons. Cela nous permettra de distribuer les marges de manière à éviter des points de fragilité dans le plan de transport.

La seconde idée sur laquelle nous nous basons dans la sélection est de maintenir les ressources engins et agents associées le plus longtemps possible. Cette idée a été rencontrée dans la littérature et également utilisée par SNCF dans l'outil de planification des agents *PLAISANCE*. En effet, une des contraintes de production de l'outil consiste à minimiser le nombre de changement d'engins pour un agent. Cette contrainte ne pouvait être maintenue dans notre phase de génération dans la mesure où nous ne considérons pas les lignes de roulement d'engins jour comme entrée de l'outil. Nous choisissons alors de remplacer cette contrainte par un critère de robustesse qui fait partie des objectifs de la sélection.

Notons que les deux familles de critères que nous choisissons ont pour objectif de

prévenir l'apparition de retards secondaires en cas de retards primaires. Ces idées sont adaptées au niveau décisionnel dans lequel nous travaillons et se concentrent sur les interactions entre les ressources critiques. Nous présentons ensuite les notations supplémentaires nécessaires pour la phase de sélection, et détaillons le modèle mathématique qui a pour objectif d'optimiser nos deux familles de critères de robustesse.

5.3.2 Notations

A ce niveau de l'approche, nous disposons de deux ensembles de lignes de roulement et emplois du temps réalisables pour les ressources engins et agents. Nous nous assurons que ces ensembles contiennent une solution de référence séquentielle et optimisée au sens des coûts. Cette phase de sélection a trois objectifs :

1. Sélectionner simultanément les lignes de roulement $i \in \Omega^C$ et les emplois du temps $j \in \Omega^D$ pour couvrir tous les trains. Cela implique d'introduire une notation coupante $Comp_{i,j}$ qui est égale à 1 si la ligne i et l'emploi du temps j sont compatibles, 0 sinon. Cela permet d'assurer que les agents ne sont associés qu'aux engins adaptés.
2. Décaler les horaires des trains si cela permet d'en améliorer la robustesse. Notons que les ensembles Ω^C et Ω^D ont été générés en se basant sur les horaires théoriques des trains. Nous devons par conséquent nous assurer que les décalages autorisés ne nuisent pas à la faisabilité des lignes de roulements et des emplois du temps. Notons Δ les décalages possibles (en entier positif ou négatif) tel que $0 \in \Delta$. Nous enregistrons dans l'ensemble $I_{i,l,\delta}$ les décalages interdits pour le train en position $l + 1$ de la ligne $i \in \Omega^C$ si le train en position l est décalé de $\delta \in \Delta$ minutes. De la même manière, notons l'ensemble $J_{j,l,\delta}$ les décalages interdits pour le train en position $l + 1$ de l'emploi du temps $j \in \Omega^D$ si le train en position l est décalé de $\delta \in \Delta$ minutes. Ces deux ensembles peuvent être calculés de manière à maintenir un espacement minimal entre deux trains successifs sur une ligne de roulement ou un emploi du temps, par exemple. Ces ensembles peuvent également permettre de contrôler les décalages en en interdisant, par exemple, pendant les heures de pointes ou pour certains trains.
3. La sélection est faite selon des objectifs basés sur les critères de robustesse présentés. Nous ajoutons deux notations nécessaires à calculer les marges des ressources d'un train avant son départ : $TT_{t,i}$ pour la ligne de roulement $i \in \Omega^C$ et $ST_{t,j}$ pour l'emploi du temps $j \in \Omega^D$. $TT_{t,i}$ (resp. $ST_{t,j}$) est égal à la durée de disponibilité de

l'engin (resp. l'agent de conduite) associé à la ligne i (resp. j) avant le départ du train t .

Nous synthétisons l'ensemble des notations dans la table suivante.

TRAINS	
T^C	Ensemble des trains commerciaux
T^W	Ensemble des trains à vide
dep_t	Heure de départ théorique du train $t \in T^C \cup T^W$
dem_t	Demande en passagers du train $t \in T^C \cup T^W$
$D = 1, \dots, d_{max}$	Ensemble des jours de la planification
S	Ensemble des gares desservies par les trains $T^C \cup T^W$
LIGNES DE ROULEMENTS	
Ω^C	Ensemble des lignes de roulements générées par <i>PRESTO</i>
D_i	Jour d'activité de la ligne $i \in \Omega^C$
$orig_i$	Gare d'origine de la ligne de roulement $i \in \Omega^C$
$dest_i$	Gare de destination de la ligne de roulement $i \in \Omega^C$
K	Ensemble des séries matériel
K_i	Série de matériel associée à la ligne $i \in \Omega^C$
$KCap_k$	Nombre d'engins disponibles pour la série matériel $k \in K$
cap_k	Capacité d'accueil en passagers d'un engin de type $k \in K$
$comm_i$	Ensemble des trains commerciaux de la ligne $i \in \Omega^C$
$vide_i$	Ensemble des trains à vide de la ligne $i \in \Omega^C$
EMPLOIS DU TEMPS	
Ω^D	Ensemble des emplois du temps générés par <i>PLAISANCE</i>

D_j	Jour(s) d'activité de l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
$conduite_j$	Trains commerciaux de l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
$voiture_j$	Trains affectés en voiture à l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
R	Ensemble des roulements d'agents
R_j	Roulement d'agents associé à l'emploi du temps $j \in \Omega^D$

NOTATIONS COUPLANTES

$Comp_{i,j}$	Compatibilité entre la ligne de roulement $i \in \Omega^C$ et l'emploi du temps $j \in \Omega^D$
--------------	--

NOTATIONS DE DÉCALAGES

Δ	Décalages possibles tel que $0 \in \Delta \subset \mathbb{N}$
$I_{i,l,\delta}$	Décalages interdits pour le train en position $l + 1$ de la ligne $i \in \Omega^C$ si le train en position l est décalé de δ minutes ($l \in \mathbb{N}^*$)
$J_{j,l,\delta}$	Décalages interdits pour le train en position $l + 1$ de l'emploi du temps $j \in \Omega^D$ si le train en position l est décalé de δ minutes ($l \in \mathbb{N}^*$)

NOTATIONS DE MARGES

$TT_{t,i}$	Marge dans la ligne de roulement $i \in \Omega^C$ avant le départ du train $t \in T^C \cup T^W$
$ST_{t,j}$	Marge dans l'emploi du temps $j \in \Omega^D$ avant le départ du train $t \in T^C \cup T^W$

5.3.3 Modèle mathématique

Le modèle que nous présentons est un Programme Linéaire en Nombres Entiers qui a pour objectif de fournir un plan de transport robuste des ressources critiques dans le sens des critères suivants :

- Maximiser les marges des trains définies comme le minimum des marges de l'engin et

de l'agent associé. De plus, le plan de transport devrait éviter des situations critiques où les marges sont trop réduites.

- Minimiser le changement des ressources engins/agents de conduite. Cela revient à maintenir l'affectation simultanée des deux ressources le plus longtemps possible.

Dans la mesure où de nombreuses contraintes habituellement associées aux différents problèmes de planification des ressources sont traitées dans la phase de génération, le modèle aura pour contraintes les familles suivantes :

- Contraintes de couverture : cette catégorie permettra de couvrir les trains à la fois par des engins et des agents de conduite.
- Contraintes de capacité : elles ont pour objectif d'assurer le respect des capacités en ressources. Rappelons que la capacité en engins et en agents est variable et est indexée sur les jours.
- Contraintes de compatibilité : ces contraintes couplantes assurent que les ressources affectées à un train sont compatibles entre elles. Cela signifie que l'agent a été formé à la conduite de la série matériel sélectionnée.
- Contraintes de décalages : cette famille permet de contrôler les décalages autorisés des horaires des trains afin de maintenir la faisabilité des lignes de roulement et emplois du temps générés.

La décision dans la phase de sélection porte sur les trois variables :

- $X_i \in \{0, 1\} = 1$ si la ligne de roulement $i \in \Omega^C$ est sélectionné, 0 sinon.
- $Y_j \in \{0, 1\} = 1$ si l'emploi du temps $j \in \Omega^D$ est sélectionné, 0 sinon.
- $\Lambda_{t,\delta} \in \{0, 1\} = 1$ si le train $t \in T^C \cup T^W$ est décalé de $\delta \in \Delta$ minutes, 0 sinon.

Afin de calculer les objectifs basés sur les critères de robustesse, nous introduisons les variables intermédiaires suivantes :

- $RS_j \in \mathbb{N}$ = Nombre de lignes de roulement associées à l'emploi du temps $j \in \Omega^D$.
- $M_t \in \mathbb{N}$ = Marge du train $t \in T^C \cup T^W$.

Nous formulons le programme linéaire de la phase de sélection de notre approche de la manière suivante :

$$\min z_1 = \sum_{j \in \Omega^D} RS_j$$

$$\max z_2 = \frac{\sum_{t \in T^C} M_t}{|T|}$$

$$\max z_3 = \bar{M}$$

$$\sum_{i \in \Omega^C: t \in comm_i} cap_{K_i} X_i \geq dem_t \quad \forall t \in T^C \quad (5.1)$$

$$\sum_{i \in \Omega^C: t \in comm_i} X_i \leq Engins_{max} \quad \forall t \in T^C \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in \Omega^C: K_i=k, D_i=d} X_i \leq KCap_k \quad \forall k \in K, d \in D \quad (5.3)$$

$$\sum_{d'=0}^{d-1} \sum_{i \in \Omega^C: K_i=k, dest_i=s, d_i=d'} X_i + \sum_{i \in \Omega^C: K_i=k, dest_i=s, d_i=d_{max}} X_i \geq \sum_{d'=0}^d \sum_{i \in \Omega^C: K_i=k, orig_i=s, d_i=d'} X_i \quad \forall k \in K, s \in S, d \in D \quad (5.4)$$

$$\sum_{j \in \Omega^D: t \in conduite_j} Y_j \geq 1 \quad \forall t \in T^C \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in \Omega^D: R_j=r} Y_j \leq RCap_r \quad \forall r \in R \quad (5.6)$$

$$X_i \leq \sum_{j \in \Omega^D: t \in conduite_j} Comp_{i,j} Y_j \quad \forall i \in \Omega^C, t \in comm_i \cup vide_i \quad (5.7)$$

$$\sum_{i \in \Omega^C: t \in vide_i} X_i \leq Engins_{max} \sum_{j \in \Omega^D: t \in conduite_j} Y_j \quad \forall t \in T^W \quad (5.8)$$

$$\sum_{j \in \Omega^D: t \in conduite_j \cup voiture_j} Y_j \leq Adc_{max}^W \sum_{i \in \Omega^C: t \in vide_i} X_i \quad \forall t \in T^W \quad (5.9)$$

$$\sum_{\delta \in \Delta} \Lambda_{t,\delta} = 1 \quad \forall t \in T^C \cup T^W \quad (5.10)$$

$$X_i + \Lambda_{i_l,\delta} + \sum_{\delta' \in I_{i,l,\delta}} \Lambda_{i_{l+1},\delta'} \leq 2 \quad \forall i \in \Omega^C, \delta \in \Delta, l \in 1, \dots, |i| - 1 \quad (5.11)$$

$$Y_j + \Lambda_{j_l,\delta} + \sum_{\delta' \in J_{j,l,\delta}} \Lambda_{j_{l+1},\delta'} \leq 2 \quad \forall j \in \Omega^D, \delta \in \Delta,$$

$$l \in 1, \dots, |j| - 1 \quad (5.12)$$

$$\sum_{i \in \Omega^C: \exists t \in i_n j} X_i \leq RS_j + \sum_{t \in \text{conduite}_j} \frac{dem_t}{\min_{k \in K} cap_k} \times (1 - Y_j) \quad \forall j \in \Omega^D \quad (5.13)$$

$$M_{i_l} \leq TT_{i_l, i} + d_{i_l} \times (1 - X_i) - \sum_{\delta \in \Delta} \delta \Lambda_{i_{l-1}, \delta} + \sum_{\delta \in \Delta} \delta \Lambda_{i_l, \delta} \quad \forall i \in \Omega^C, l \in 2, \dots, |i| \quad (5.14)$$

$$M_{j_l} \leq ST_{j_l, j} + d_{j_l} \times (1 - \sum_{r \in R} Y_j) - \sum_{\delta \in \Delta} \delta \Lambda_{j_{l-1}, \delta} + \sum_{\delta \in \Delta} \delta \Lambda_{j_l, \delta} \quad \forall j \in \Omega^D, l \in 2, \dots, |j| \quad (5.15)$$

$$M_t \leq dep_t \quad \forall t \in T^C \cup T^W \quad (5.16)$$

$$\bar{M} \leq M_t \quad \forall t \in T^C \cup T^W \quad (5.17)$$

$$X_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \Omega^C \quad (5.18)$$

$$Y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \Omega^D \quad (5.19)$$

$$\Lambda_{t, \delta} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T^C \cup T^W, \delta \in \Delta \quad (5.20)$$

$$M_t \in \mathbb{N} \quad \forall t \in T^C \cup T^W \quad (5.21)$$

$$RS_j \in \mathbb{N} \quad \forall j \in \Omega^D \quad (5.22)$$

Les contraintes formulées peuvent être réparties en plusieurs catégories :

Contraintes sur les engins

La contrainte (5.1) assure que tous les trains commerciaux sont affectés à un nombre d'engins suffisant pour couvrir la demande des passagers. Ce nombre dépend de la capa-

acité de la série matériel associée à la ligne de roulement. La contrainte (5.2) impose l'affectation d'un nombre d'engins ne dépassant une borne prédéfinie $Engins_{max} \in \mathbb{N}$. Le respect de la capacité de la flotte d'engins est assuré par la contrainte (5.3). La contrainte (5.4) est une contrainte de conservation des flots d'engins. Elle permet de vérifier que les engins partant d'une gare sont disponibles à cette gare. Ce qui signifie que soit ils y sont depuis le premier jour de la planification, soit sont arrivés entre le premier jour et le jour traité.

Contraintes sur les agents

La contrainte de couverture (5.5) assure qu'au moins un agent est affecté en conduite à un train. La contrainte (5.6) permet de vérifier la capacité des roulements d'agents le jour $d \in D$.

Contrainte de compatibilité

La contrainte (5.7) assure la compatibilité des ressources engins et agents sélectionnés pour couvrir un train $t \in T^C \cup T^W$

Contraintes sur les trains à vide

Les trains à vide sont créés en phase de génération pour les besoins de repositionnement des engins. Si une ligne de roulement est sélectionnée et qu'elle contient un train à vide, la contrainte (5.8) permet d'assurer qu'une journée de service contenant le train à vide en conduite est sélectionnée. Réciproquement, lorsqu'un train à vide fait partie d'un emploi du temps sélectionné (que ce soit en conduite ou en voiture), une ligne de roulement qui contient le train doit être sélectionnée (5.9). Nous introduisons la notation $Adc_{max}^W \in \mathbb{N}$ qui définit une borne sur le nombre d'agents affectés à un train à vide.

Contraintes de décalages

La contrainte (5.10) assure l'unicité de l'heure de départ réelle du train. Rappelons que $0 \in \Delta$ et par conséquent $\Lambda_{t,0} = 1$ signifie que l'heure de départ du train n'a pas été décalée. Les contraintes (5.11) et (5.12) interdisent les décalages qui rendent les lignes de roulements et les emplois du temps irréalisables. L'utilisation des ensembles $I_{i,l,\delta}$ et $J_{j,l,\delta}$ permettent cette vérification deux trains à deux : pour un train t , les décalages interdits

dépendent du décalage du train précédent sur la ligne de roulement et du décalage du train précédent sur l'emploi du temps.

Contraintes pour calculer l'objectif

Enfin, les contraintes (5.13) jusqu'à (5.17) permettent de calculer les variables de décisions RS_j et M_t .

Les fonctions objectif que nous testerons ensuite sont des combinaisons des trois objectifs formulés dans le modèle :

- * Minimiser les changements de ressources,
- * Maximiser la moyenne des marges des trains,
- * Maximiser la marge minimale.

L'association de la marge moyenne et de la marge minimal permet d'assurer un équilibre de la distribution des marges en évitant des écarts importants.

5.4 Méthode de résolution

Nous optons pour une méthode de recherche locale pour résoudre le modèle de sélection. Un algorithme de recherche locale commence à partir d'une solution initiale et tente continuellement de trouver de meilleures solutions dans un "voisinage" défini [Aarts and Lenstra, 1997]. Si une meilleure solution est trouvée (au sens d'une fonction objectif définie), elle remplace la solution courante et la recherche continue. Sinon, l'algorithme renvoie la solution courante dite alors optimum local. La notion du voisinage dans la recherche locale définit un ensemble de solutions "proches" d'une solution donnée. Un voisinage permet ainsi de lier entre elles les solutions de l'espace de recherche. Un voisinage est défini par un opérateur : un ensemble d'applications ou mouvements entre deux solutions.

Pour échapper à un optimum local, plusieurs possibilités peuvent être envisagées. Nous citons :

- Changer de voisinage pour explorer un nouveau sous-ensemble de solutions (Variable Neighborhood Descent ou Variable Neighborhood Search, par exemple).
- Accepter des mouvements vers des solutions de moindre qualité (Par exemple le recuit simulé).

Nous basons notre algorithme sur la succession de trois voisinages $\mathcal{V} = \nu_1, \nu_2, \nu_3$ basés sur la libération de variables de décision du modèle. Les trois voisinages prennent pour

paramètres un jour d et un entier m_d proportionnel à la marge minimale du jour d . Le principe pour chaque voisinage est de décomposer la résolution par jour en libérant les variables associées aux trains les plus critiques de la solution courante. Nous utilisons un voisinage aléatoire v_{rand} pour échapper aux optimums locaux. L'algorithme de recherche locale est alors formulé de la manière suivante :

Algorithm 1 Algorithme de recherche locale

```

1:  $s \leftarrow$  Une solution initiale
2:  $i \leftarrow 1$ 
3: while Temps de calcul  $< T_{max}$  do
4:   Calculer  $m_d$ 
5:    $s' \leftarrow$  Meilleure solution dans le voisinage  $v_i(d, m_d)$ 
6:   if  $f(s') > f(s)$  then
7:      $s \leftarrow s'$ 
8:      $i \leftarrow 1$ 
9:   else
10:    if  $i < 3$  then
11:       $i \leftarrow i + 1$ 
12:    else
13:      if  $d < 7$  then
14:         $d \leftarrow d + 1$ 
15:      else
16:         $d \leftarrow 1$ 
17:      end if
18:       $i \leftarrow 1$ 
19:    end if
20:  end if
21:  if  $s$  est un optimum local au sens des voisinages  $V = v_1, v_2, v_3$  then
22:     $s \leftarrow$  Meilleure solution dans le voisinage  $v_{rand}$ 
23:     $i \leftarrow 1$ 
24:     $d \leftarrow 1$ 
25:  end if
26: end while

```

5.4.1 Solution initiale

Nous obtenons la solution initiale en utilisant de manière séquentielle les deux outils PRESTO et PLAISANCE présentés dans la section 5.3. Cette solution est réalisable et optimale au sens des fonctions de coûts des deux outils. Par conséquent, cette solution sert à la fois de solution initiale pour l'algorithme et de solution de référence pour les coûts de production.

5.4.2 L'ensemble des voisinages

Nous basons nos voisinages sur les variables de décisions du PLNE : variables de sélection des lignes de roulement ($x_i, \forall i \in \Omega^C$) et des journées de service ($y_j, \forall j \in \Omega^D$), et les variables de décalage des horaires des trains ($\Lambda_{t,\delta}, \forall t \in T, \delta \in \Delta$). Nous itérons sur une succession de trois voisinages dans l'ordre suivant :

Voisinage de sélection (v_1)

Ce premier voisinage prend pour paramètres un jour d et un entier m . Le déplacement entre deux solutions s et s' dans le voisinage de sélection consiste aux opérations suivantes :

- Fixer toutes les variables de sélection x_i et y_j de la solution s si la ligne de roulement i ou la journée de service j couvre un jour $d' \neq d$.
- Fixer toutes les variables de sélection x_i et y_j de la solution s si la ligne de roulement i ou la journée de service j couvre le jour d et que les marges des trains couverts par i et j sont supérieures à l'entier m .
- Fixer toutes les variables de décalage de la solution s .

Ce voisinage permet de trouver la sélection optimale pour le jour d en libérant les variables associées aux trains critiques (sous le seuil de marges défini par m).

Voisinage de décalage (v_2)

Le second voisinage prend également pour paramètres un jour d et un entier m . Le déplacement entre deux solutions s et s' dans le voisinage de sélection consiste aux opérations suivantes :

- Fixer toutes les variables de sélection x_i et y_j de la solution s .
- Fixer toutes les variables de décalage $\Lambda_{t,\delta}$ de la solution s si le train t circule un jour $d' \neq d$.
- Fixer toutes les variables de décalage $\Lambda_{t,\delta}$ de la solution s si le train t circule le jour d et que sa marge est supérieure au seuil m .

Ce voisinage permet de trouver les décalages optimaux pour le jour d en fixant l'ensemble des variables de sélection.

Voisinage mixte (v_3)

Ce voisinage couple les deux premiers voisinages et prend pour paramètres un jour d et un entier $m' < m$. Il a pour objectif de permettre de libérer à la fois les variables de sélections et de décalages pour un sous-ensemble de trains critiques. Le déplacement entre deux solutions s et s' dans le voisinage de sélection consiste aux opérations suivantes :

- Fixer toutes les variables de sélection x_i et y_j de la solution s si la ligne de roulement i ou la journée de service j couvre un jour $d' \neq d$.
- Fixer toutes les variables de décalage $\Lambda_{t,\delta}$ de la solution s si le train t circule un jour $d' \neq d$.
- Fixer toutes les variables de sélection x_i et y_j de la solution s si la ligne de roulement i ou la journée de service j couvre le jour d et que les marges des trains couverts par i et j sont supérieures à l'entier m' .
- Fixer toutes les variables de décalage $\Lambda_{t,\delta}$ de la solution s si le train t circule le jour d et que sa marge est supérieure au seuil m' .

Voisinage aléatoire (v_{rand})

Lorsque l'algorithme stagne sur plusieurs itérations, nous devons échapper à l'optimum local. Le voisinage v_{rand} prend pour paramètre un jour d et consiste à libérer aléatoirement des variables de sélection et des variables de décalages du jour d .

5.5 Conclusion

Ce chapitre présente une approche d'optimisation intégrée et robuste des ressources ferroviaires basée sur une formulation en deux phases : la génération de plusieurs sous ensembles de solution, et la sélection de la combinaison la plus robuste. Cette approche a pour objectif d'élaborer un plan de transport qui minimise la propagation des retards primaires sur la planification de chaque ressource. Notre choix s'explique par la complexité des problèmes de planification des engins et des agents de conduite à laquelle nous ajoutons des décalages horaires limités des trains. Ainsi, nous décomposons le problème global de manière à traiter les besoins de production en phase de génération et à viser les objectifs de robustesse dans la phase de sélection.

La phase de génération est basée sur deux outils de planification SNCF qui permettent d'élaborer des lignes de roulements d'engins et des emplois du temps des agents de conduite.

Ces séquences d'activité et d'inactivité couvrent la demande des passagers en train tout en respectant les différentes contraintes de production. Les outils ont néanmoins été développés dans un processus séquentiel et leur utilisation implique l'introduction de changements mineurs.

La phase de sélection est basée sur un PLNE qui a pour objectif de choisir, parmi les ensembles générés, les lignes de roulement et emplois du temps qui composent le plan de transport le plus robuste. Nous définissons alors deux familles de critères de robustesse basées sur les marges temporelles et les changements des ressources. L'amélioration de ces critères est facilitée par la possibilité de décaler le départ des trains. Il faut néanmoins s'assurer que les décalages introduits ne nuisent pas à la faisabilité des ensembles générés. Le PLNE est ensuite résolu par un algorithme de recherche locale dont les voisinages sont basés sur la défixation d'un sous-ensemble de variables de décision du modèle. Globalement, le modèle mathématique de sélection robuste permet la transition d'une planification séquentielle avec des objectifs de production à une planification intégrée et robuste. L'approche peut alors être utilisée dès que l'on dispose d'outils de planification des ressources capables de traiter les contraintes de production.

Confidentiel

Chapitre 6

Expérimentations et résultats numériques

Sommaire

6.1	Introduction	99
6.2	Modèle d'optimisation : expérimentations et résultats	100
6.2.1	Instances expérimentales	100
6.2.2	Résolution exacte et recherche locale	101
6.2.3	Contrôle des coûts de production	107
6.2.4	Conclusions sur les résultats d'optimisation	109
6.3	Évaluation par simulation des plans de transport optimisés	109
6.3.1	Performance du système	111
6.3.2	Propagation des retards	112
6.3.3	Sources de propagation	113
6.3.4	Conclusion sur les résultats d'évaluation	114
6.4	Conclusion	116

6.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une approche d'optimisation pour aboutir à des plans de transport ferroviaires intégrés et robustes. Afin de valider les différents choix (critères de robustesse, décalages) et leurs impacts sur les indicateurs mesurés, nous présentons dans ce chapitre un ensemble d'expérimentations basées sur des données réelles.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats obtenus par le modèle d'optimisation intégrée et robuste. Les solutions obtenues sont ensuite simulées à l'aide du modèle de simulation (présenté dans le chapitre 4) avec des scénarios de retards aléatoires afin de quantifier leur propagation sur les trains.

6.2 Modèle d'optimisation : expérimentations et résultats

6.2.1 Instances expérimentales

Nous utilisons dans les expérimentations présentées dans ce chapitre une instance réelle correspondant à la circulation de trains régionaux (TER) dans une région française. Cette instance représente les besoins de circulation de 1317 trains commerciaux sur un horizon d'une semaine. Nous connaissons pour chaque train l'estimation de la demande en passagers, ses horaires de départ et d'arrivée et ses gares d'origine et de destination.

La phase de génération de notre approche permet de générer des lignes de roulement d'engins via l'outil *PRESTO*, et des emplois du temps pour les agents via l'outil *PLAISANCE*. Ces séquences générées couvrent les trains commerciaux selon des objectifs de coûts en respectant les contraintes de production. La taille des ensembles générés, ainsi que les décalages horaires autorisés, déterminent la taille du problème traité.

TABLEAU 6.1 – Informations communes à toutes les instances expérimentales

Nombre de trains commerciaux	$ T^C $	1317
Nombre de trains à vide	$ T^W $	27
Nombre de lignes de roulements	$ \Omega^C $	1585

Pour l'instance traitée, nous maîtrisons le nombre de lignes de roulement d'engins générés et considérons un ratio de 5 lignes de roulement par train. Cela signifie qu'en phase de sélection, le modèle choisit la ligne de roulement engin jour couvrant un train parmi 5 possibilités. D'autre part, nous utilisons différents jeux de paramétrage pour *PLAISANCE* afin de construire plusieurs instances expérimentales en fonction du nombre d'emplois du temps générés et des décalages autorisés. Nous résumons les caractéristiques communes des instances dans le tableau 6.1 et les instances dans le tableau 6.2. $[ExDy]$ signifie que le nombre d'emplois du temps (E) est de l'ordre de $1000x$ et le nombre de décalages autorisés est égal à y .

Les décalages autorisés sont choisis de manière à permettre l'amélioration des marges et ainsi de la robustesse de transport. Ils doivent être suffisamment petits pour ne pas nuire à la faisabilité des lignes de roulement et des journées de service générées. Nous

	[E15D1]	[E15D3]	[E15D5]	[E10D1]	[E10D3]	[E10D5]	[E5D1]	[E5D3]	[E5D5]
$ \Omega^D $	15524	15524	15524	10590	10590	10590	5414	5414	5414
$ \Delta $	1	3	5	1	3	5	1	3	5

TABLEAU 6.2 – Instances expérimentales en fonction du nombre d’emplois du temps et de décalages autorisés.

présentons dans le tableau 6.3 les valeurs choisies pour les expérimentations présentées dans ce chapitre. Rappelons que la taille minimale de l’ensemble de décalages Δ est 1 ($\Delta = \{0\}$, signifiant que les horaires des trains ne peuvent pas être décalés).

TABLEAU 6.3 – Valeurs des décalages autorisés sur les horaires des trains

Nombre de décalages	Valeur des décalages (en minutes)
$ \Delta = 1$	$\Delta = \{0\}$
$ \Delta = 3$	$\Delta = \{-2, 0, 2\}$
$ \Delta = 5$	$\Delta = \{-4, -2, 0, 2, 4\}$

Afin de mieux représenter la taille des problèmes associés à chaque instance, nous présentons pour chacune le nombre de variables et de contraintes dans la figure 6.1. Ces courbes montrent que la taille du modèle dépend principalement de la phase de génération.

6.2.2 Résolution exacte et recherche locale

Nous utilisons pour la résolution des différentes instances le solveur IBM ILOG Cplex 12.6 avec les paramètres par défaut. Nous fixons une limite de temps de calcul à 1h pour toutes les expérimentations. Les tests sont réalisés sur un ordinateur avec un processeur Intel Core i7 2.90GHZ et 4Go de mémoire vive.

Nous considérons les critères sous forme de la somme pondérée suivante :

$$\max z = \alpha_1 \bar{M} + \alpha_2 \frac{\sum_{t \in T^C} M_t}{|T|} - \alpha_3 \sum_{j \in \Omega^C} RS_j \quad (6.1)$$

avec $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$. Nous avons pris en compte l’échelle de valeur des critères dans le choix des α_i et utilisons les mêmes valeurs pour toutes les expérimentations réalisées. Nous privilégions ainsi la famille des critères des marges (deux premiers termes, définis comme le minimum des marges des engins et des agents avant chaque train), par rapport à la synchronisation des ressources (troisième terme). En donnant la priorité à la maximisation de la marge minimale du plan de transport (premier terme), nous tentons

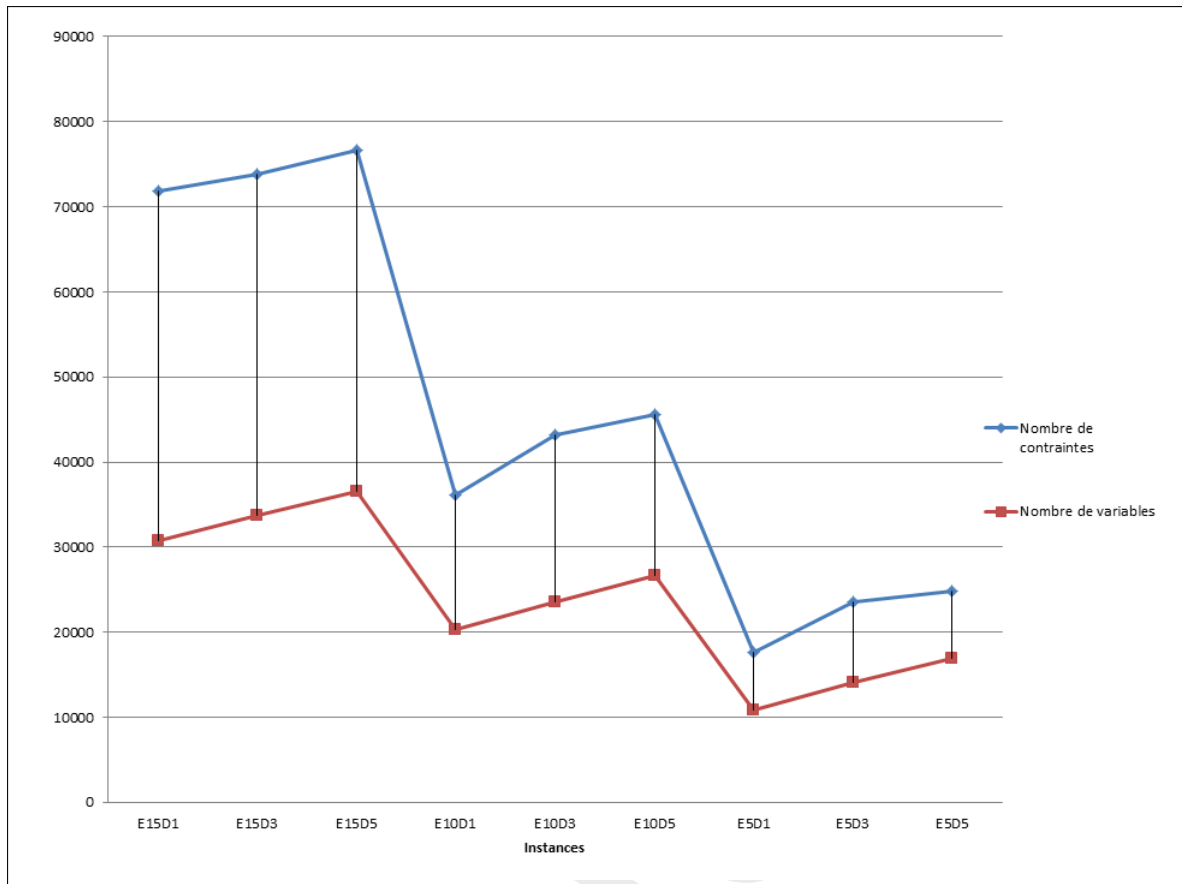


FIGURE 6.1 – Nombre de variables et de contraintes des modèles associés aux instances.

d'éliminer dans la mesure du possible les trains critiques dont les ressources augmentent le risque de propagation des retards.

Les expérimentations que nous présentons dans cette partie visent à évaluer les possibilités d'une résolution exacte (modèle (5.1)-(5.22) avec l'objectif (6.1)), puis à comparer les résultats d'une résolution exacte et les résultats obtenus par l'algorithme de recherche locale. Ce dernier démarre à partir d'une solution initiale générée par les outils *PRESTO* et *PLAISANCE* utilisés séquentiellement. Cette solution est réalisable, optimisée au sens des coûts de production mais pas au sens de la robustesse. Cette solution, la même pour toutes les instances, fait office de solution de référence. Son coût selon la fonction objectif (6.1) est calculé a posteriori et sa valeur est de 4111,98.

Nous présentons dans le tableau 6.4 les valeurs de la fonction objectif (6.1) pour chaque instance et chaque méthode de résolution, ainsi que le gap entre la valeur obtenue et la valeur de la solution de référence. Nous indiquons dans la dernière colonne le nombre d'itérations effectuées par l'algorithme de recherche locale.

Nous analysons les résultats obtenus avec chaque méthode de résolution, en identifiant l'impact de la taille de l'instance et les décalages sur la valeur de la fonction objectif.

TABLEAU 6.4 – Valeur de l’objectif du modèle d’optimisation pour la résolution exacte et pour l’algorithme de recherche locale

Instance	Cplex (1h)	Gap	Recherche locale (1h)	Gap	Itérations
[E15D1]	-272641,01	-6730,41%	4408,09	+7,2%	21
[E15D3]	5594,3	+36,05%	7398,3	+79,92%	14
[E15D5]	394,18	-90,41%	5435,67	+32,19%	21
[E10D1]	-170067,08	-4235,89%	4389,7	+6,75%	56
[E10D3]	3464,27	-15,75%	7380,88	+79,5%	42
[E10D5]	4564,99	+11,02%	5386,64	+31%	49
[E5D1]	-71490,03	-1839,57%	4239,94	+3,11%	231
[E5D3]	5695,67	+38,51%	7241,96	+76,11%	168
[E5D5]	-76556,83	-1961,8%	5258	+27,87%	259

Résolution exacte

L’observation principale issue des résultats de la résolution exacte est que la limite de temps de calcul (1h) ne permet pas d’avoir des solutions de bonne qualité pour la majorité des instances. Nous détaillons l’analyse de ces résultats pour chaque ensemble de décalages autorisés.

- $|\Delta| = 1$: Les instances [E15D1], [E10D1] et [E5D1] (où les décalages sont interdits) donnent des solutions très éloignées de la solution de référence. Les grandes valeurs négatives signifient que beaucoup de lignes de roulement d’engins sont associées aux emplois du temps, et l’interdiction des décalages ne permet pas d’améliorer les marges dans le temps de calcul. Nous remarquons également que le gap entre les valeurs de l’objectif des trois instances et la solution de référence est proportionnel à la taille de l’instance.
- $|\Delta| = 3$: Cet ensemble de décalages donne les meilleures solutions en résolution exacte. La solution obtenue par Cplex (1h) pour l’instance [E10D3] est relativement proche de la solution de référence, et les solutions obtenues pour les instances [E15D3] et [E5D3] l’améliorent. Cela signifie que les valeurs de décalages autorisés permettent d’améliorer les marges, critères prioritaires de la fonction objectif (6.1). Notons qu’aucune proportionnalité entre la taille de l’instance et le gap ne peut être déduite pour cet ensemble de décalages.
- $|\Delta| = 5$: Ce choix de décalage donne des résultats de moins bonne qualité que $|\Delta| = 3$ et même $|\Delta| = 1$ pour une instance. Le nombre de variables engendrées pour les instances [E15D5], [E10D5] et [E5D5] rend l’exploration de l’arbre de recherche difficile en un temps limité.

Recherche locale

L'algorithme de recherche locale démarre à partir de la solution de référence utilisée pour le calcul du gap. Pour toutes les instances, les solutions améliorent la valeur de l'objectif. Nous analysons ici l'impact de la taille de l'instance et des décalages autorisés sur l'amélioration de la solution de référence.

- $|\Delta| = 1$: Les instances [E15D1], [E10D1] et [E5D1] améliorent de manière limitée la solution de référence (de 3 à 7%). Inversement à la résolution exacte, nous remarquons que plus la taille de l'instance augmente plus la solution est améliorée. Nous remarquons que l'instance [E5D1] donne la moins bonne solution de la catégorie où $|\Delta| = 1$ bien que le nombre d'itérations est largement supérieur aux deux autres instances.
- $|\Delta| = 3$: De même que pour la résolution exacte, cet ensemble de décalages aboutit aux meilleurs résultats pour l'algorithme de recherche. Une amélioration significative de l'objectif ($>76\%$) est observée pour les trois instances [E15D3], [E10D3] et [E5D3]. De même que pour le groupe d'instances où $|\Delta| = 1$, l'amélioration et le nombre d'itérations sont proportionnels à la taille de l'instance.
- $|\Delta| = 5$: Les instances [E15D5], [E10D5] et [E5D5] aboutissent à des solutions qui améliorent la solution de référence de plus de 30% en moyenne. Néanmoins ces solutions sont de moins bonne qualité que le groupe d'instance $|\Delta| = 3$ indépendamment du nombre d'itérations. Enfin, pour toutes les instances résolues avec l'algorithme de recherche locale, plus la taille de l'instance augmente plus la solution est améliorée.

Afin de mieux analyser ces observations, nous représentons dans la figure 6.2 les variations des trois critères de robustesse pour la résolution par recherche locale de chaque instance par rapport à la solution de référence.

Le critère de marge minimale est amélioré pour toutes les instances où les décalages horaires sont autorisés. Nous remarquons que, pour cet ensemble d'instances, l'algorithme améliore ce critère plus facilement lorsque $|\Delta| = 3$ que lorsque $|\Delta| = 5$. Une explication possible pour ces résultats est la configuration de la décomposition de la résolution dans les différents voisinages. Les valeurs obtenues pour la marge minimale expliquent les valeurs de la fonction objectif présentées dans le tableau 6.4, dans la mesure où ce critère est prioritaire dans la fonction objectif (6.1).

La moyenne des marges est améliorée pour l'ensemble des instances et augmente en fonction des décalages horaires. Nous remarquons également des paliers de variations en fonction de la taille des instances. Ces variations sont dues à la limitation du choix des

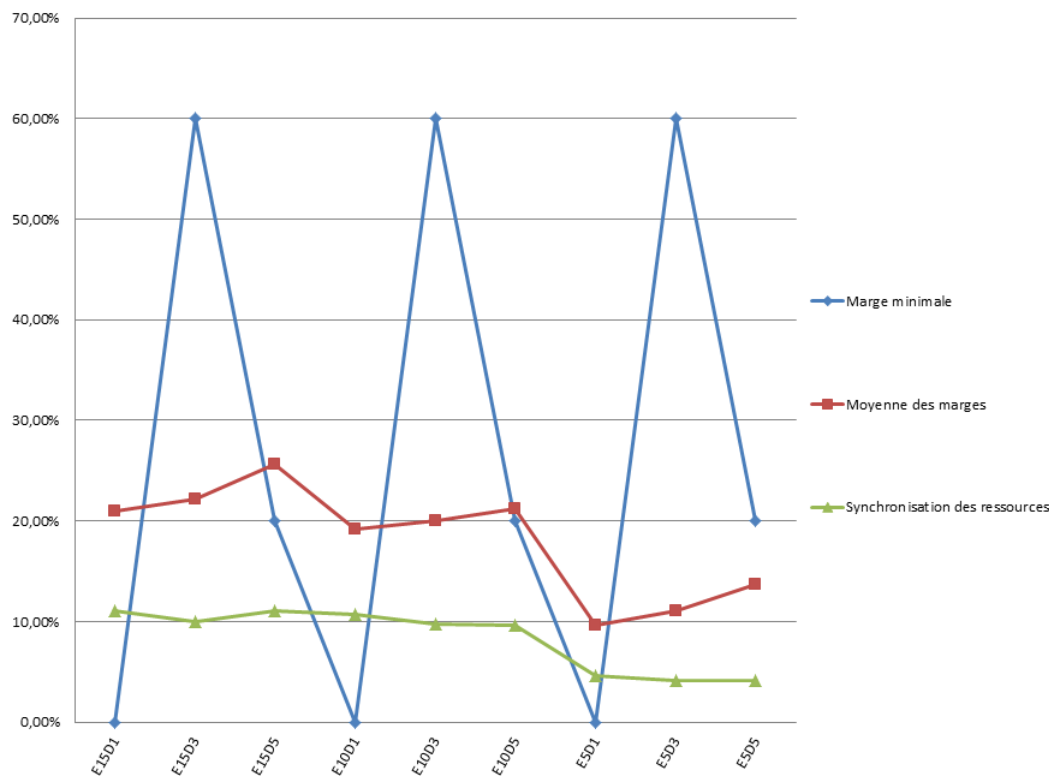


FIGURE 6.2 – Variations des critères de robustesse par rapport à la solution de référence

emplois du temps des agents et sont très visibles pour les instances *E5*. Enfin, le critère de synchronisation des ressources est également amélioré pour l'ensemble des instances. Nous remarquons que cette amélioration n'est pas influencée par les décalages autorisés car ce critère est le moins prioritaire de la fonction objectif (6.1). Nous observons également des paliers de variations en fonction de la taille des instances.

Analyse commune

Le modèle d'optimisation testé n'impose aucune limite de ressources à utiliser pour couvrir les trains. Cela explique d'une part les grandes valeurs négatives en résolution exacte dues au nombre de lignes de roulement d'engins supplémentaires associées aux emplois du temps. D'autre part, cela participe à l'amélioration très significative de la solution de référence avec la recherche locale. Nous représentons dans les figures 6.3 et 6.4 le pourcentage de lignes de roulements d'engins et d'emplois de temps d'agents supplémentaires par rapport à la solution de référence.

Les instances testées par les deux méthodes de résolution aboutissent à des solutions nécessitant plus de lignes de roulement et d'emplois du temps que la solution de référence. Pour les lignes de roulements d'engins, nous observons une augmentation allant

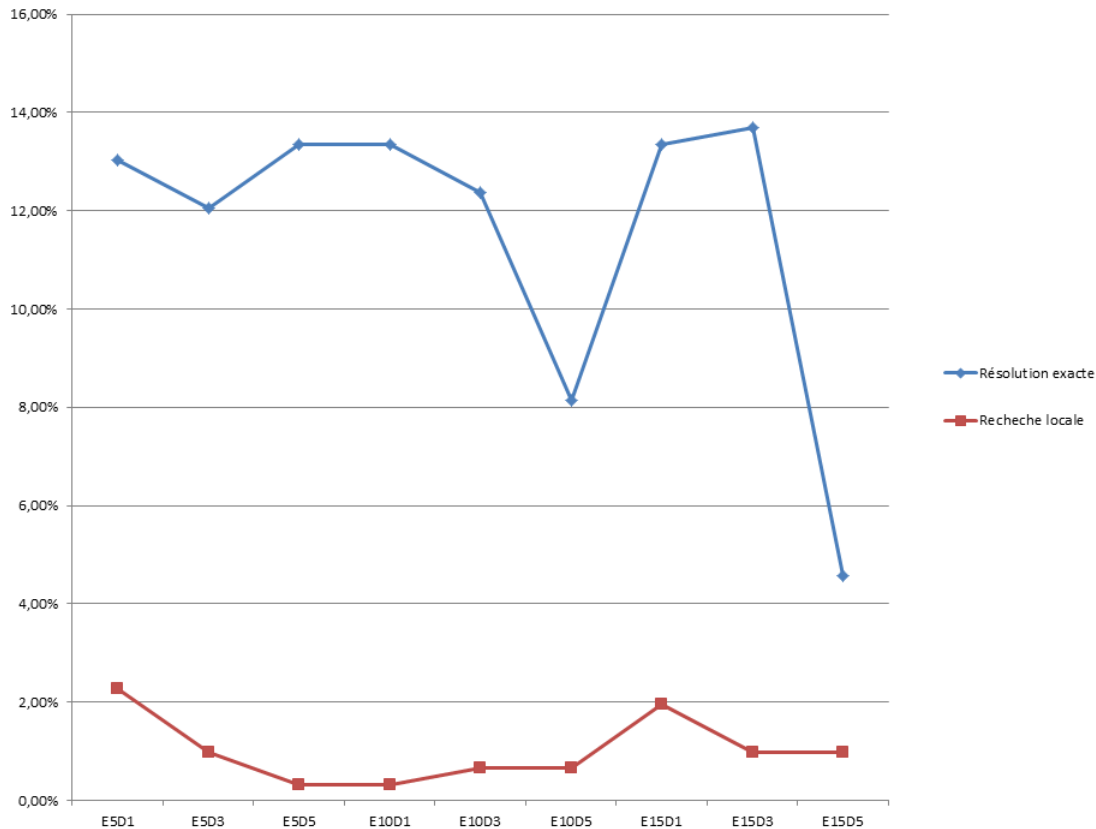


FIGURE 6.3 – Pourcentage de lignes de roulements d’engins supplémentaires

jusqu’à 14% pour la résolution exacte et jusqu’à 2% pour l’algorithme de recherche locale. L’augmentation du nombre d’emplois du temps d’agents est plus importante ; elle s’élève à plus de 27% pour la résolution exacte et plus de 10% pour l’algorithme de recherche locale. La différence entre les ressources engins et agents s’explique par le choix du critère de synchronisation. Nous minimisons en effet dans la fonction objectif le nombre d’engins conduits par les agents.

Rappelons que les lignes de roulement et les emplois du temps sont des séquences de trains affectés aux engins et aux agents respectivement. Par conséquent, les pourcentages exprimés dans les figures 6.3 et 6.4 portent sur les séquences et non les ressources. Prenons l’exemple de la solution de l’instance [E15D3] obtenue par résolution exacte. L’augmentation de 13.68% de lignes de roulement journalière correspond à 42 lignes de roulements supplémentaires et donc au moins 6 engins supplémentaires. Pour les agents, l’augmentation de 15.6% correspond à 71 emplois du temps et donc au moins 30 agents.

Nous décidons pour la suite des expérimentations de contrôler le nombre de lignes de roulements d’engins jour et d’emplois du temps d’agents supplémentaires autorisés. Notre objectif est de proposer différentes solutions à des coûts variables afin d’avoir le choix du compromis le plus pertinent entre la robustesse des plans de transport et leur

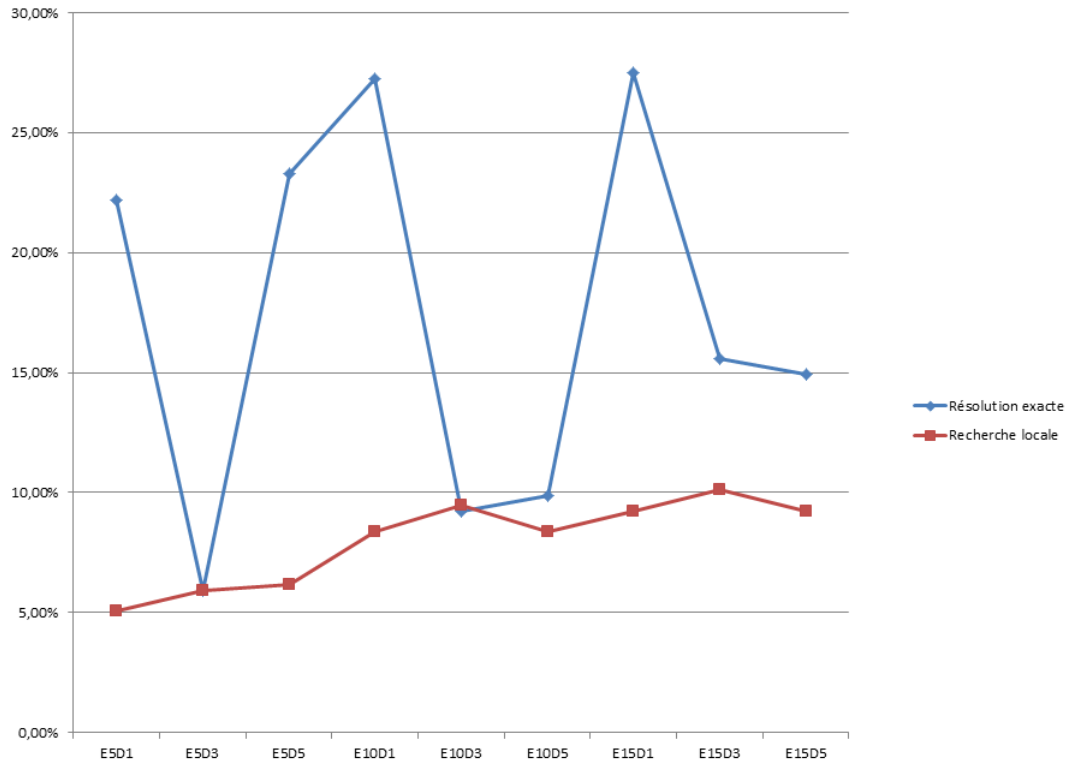


FIGURE 6.4 – Pourcentage d’emplois du temps d’agents supplémentaires par rapport à la solution de référence

coût de production.

6.2.3 Contrôle des coûts de production

Afin d’introduire un contrôle des coûts, nous décidons de borner le nombre de lignes de roulement et d’emplois du temps supplémentaires par rapport à la solution de référence. Nous introduisons alors les notations suivantes :

Ω_{ref}^C : Ensemble des lignes de roulements de la solution de référence ($\Omega_{ref}^C \subset \Omega^C$).

Ω_{ref}^D : Ensemble d’emplois du temps de la solution de référence ($\Omega_{ref}^D \subset \Omega^D$).

r^C : Pourcentage de lignes de roulements supplémentaires autorisées par rapport à la solution de référence.

r^D : Pourcentage d’emplois du temps supplémentaires autorisés par rapport à la solution de référence.

Nous intégrons dans le modèle mathématique les deux familles de contraintes suivantes :

$$\sum_{i \in \Omega^C} x_i \leq (1 + r^C) \left| \Omega_{ref}^C \right| \quad (6.2)$$

$$\sum_{j \in \Omega^D} y_j \leq (1 + r^D) \left| \Omega_{ref}^D \right| \quad (6.3)$$

Nous présentons dans le tableau 6.5 les résultats obtenus avec la résolution exacte et la recherche locale pour les instances [E10D1] et [E10D3]. Nous testons trois valeurs pour r^C et r^D (0%, 2% et 5%), et rappelons également dans le tableau les valeurs obtenues sans contraintes de contrôle des coûts.

TABLEAU 6.5 – Résultats obtenus avec les contraintes de contrôle des coûts

[E10D1]				
	Cplex (1h)	Gap	Recherche locale (1h)	Gap
$r^C = r^D = 0\%$	3770,04	-8,32%	4290,69	+4,35%
$r^C = r^D = 2\%$	3707,33	-9,84%	4330,76	+5,32%
$r^C = r^D = 5\%$	3628,66	-11,75%	4367,58	+6,22%
$r^C = r^D = \infty$	-170067,08	-4235,8%	4389,7	+6,75%

[E10D3]				
	Cplex (1h)	Gap	Recherche locale (1h)	Gap
$r^C = r^D = 0\%$	-56799,38	-1481,31%	7297,11	+77,46%
$r^C = r^D = 2\%$	3702,77	-9,95%	7340,47	+78,51%
$r^C = r^D = 5\%$	3545,89	-13,77%	7372,7	+79,30%
$r^C = r^D = \infty$	3464,27	-15,75%	7380,88	+79,5%

Globalement, la performance de la résolution exacte s'améliore en bornant les ressources. À l'exception d'une instance, les résultats obtenus s'approchent de la solution de référence entre 8 et 15% pour la même durée de calcul (1h). Nous remarquons également que plus r^C et r^D sont grands plus le gap augmente avec la solution de référence.

Pour l'algorithme de recherche locale, les résultats dépassent la solution de référence mais s'approchent également des solutions non-bornées (entre -0,5% et -2,4% pour l'instance [E10D1] et -0,2% et -2% pour l'instance [E10D3]). De plus, contrairement à la résolution exacte, plus r^C et r^D sont grands plus la solution est améliorée.

Nous remarquons néanmoins que les contraintes de contrôle influence peu la solution obtenue. Cela signifie, qu'à coût égal, la solution obtenue avec l'algorithme est très proche en robustesse d'une solution 5% plus coûteuse. Cela s'explique par la structure de la fonction objectif. En effet, la solution non bornée utilise plus de lignes de roulement et

emplois du temps. Cela augmente les critères associés aux marges et le critère de synchronisation des ressources. En limitant les ressources, les valeurs des deux critères diminuent proportionnellement et leur différence est par conséquent presque constante.

6.2.4 Conclusions sur les résultats d'optimisation

Nous avons présenté dans cette partie plusieurs expérimentations et les résultats obtenus pour le modèle d'optimisation intégré et robuste. Nous avons utilisé dans ces tests plusieurs instances issues de données de circulation réelle de trains régionaux français. L'analyse des résultats obtenus nous permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Les décalages autorisés dans le modèle sont la composante clé de notre modèle. Un choix judicieux de l'ensemble des décalages et son cardinal permet d'optimiser significativement les critères de robustesse.
2. A priori, les contraintes de contrôle des coûts que nous avons ajoutées n'influencent pas significativement la qualité des résultats. Cela signifie qu'il est possible d'améliorer la robustesse à coûts constants, mais cela laisse aussi supposer que le prix de la robustesse devient ensuite très élevé. Nos algorithmes ne permettent en effet pas d'améliorer d'avantage la robustesse même avec une augmentation significative des coûts de production.
3. L'algorithme de recherche locale développé permet d'obtenir des solutions de bonne qualité en comparaison de la résolution exacte en un temps de calcul raisonnable. Le choix des voisinages et la solution de référence décomposent de manière efficace l'espace de recherche.

Ces conclusions sont prometteuses, principalement le rapport entre la robustesse et les coûts de production. Elles reposent néanmoins sur l'hypothèse que l'optimisation des critères de robustesse améliore les indicateurs de robustesse. Pour le confirmer, la robustesse des solutions obtenues doit être quantifiée en simulant leur réalisation.

6.3 Évaluation par simulation des plans de transport optimisés

Cette phase des expérimentations a pour objectif de valider l'impact réel des critères de robustesse sur la propagation des retards primaires. Nous utilisons alors le modèle à

événements discrets développé pour soumettre les solutions obtenues en phase d'optimisation à des scénarios de retards aléatoires et en mesurer la performance. Dans cette partie, nous décidons d'ignorer les solutions obtenues par résolution exacte, souvent de mauvaise qualité par rapport à la solution de référence. De plus, nous nous concentrons sur deux instances : [E10D1] et [E10D3]. Nous renommons nos instances en ajoutant la valeur de r exprimée en pourcentage donnant ainsi, par exemple, [E10D3_2%] pour $r^C = r^D = 2\%$.

Nous réutilisons le scénario de retard primaire extrait de données réelles enregistrées au sein de SNCF et présenté au chapitre 4. Ce scénario est caractérisé par des petits retards primaires principalement et plus rarement de moyens et gros retards. Ces retards sont introduits sur un pourcentage fixe de trains choisis aléatoirement (Figure 6.5). Ces retards sont toujours introduits sur la marche des trains, c'est à dire après leur départ. Nous discutons les résultats obtenus par famille d'indicateurs de robustesse et comparons les résultats obtenus à la solution de référence.

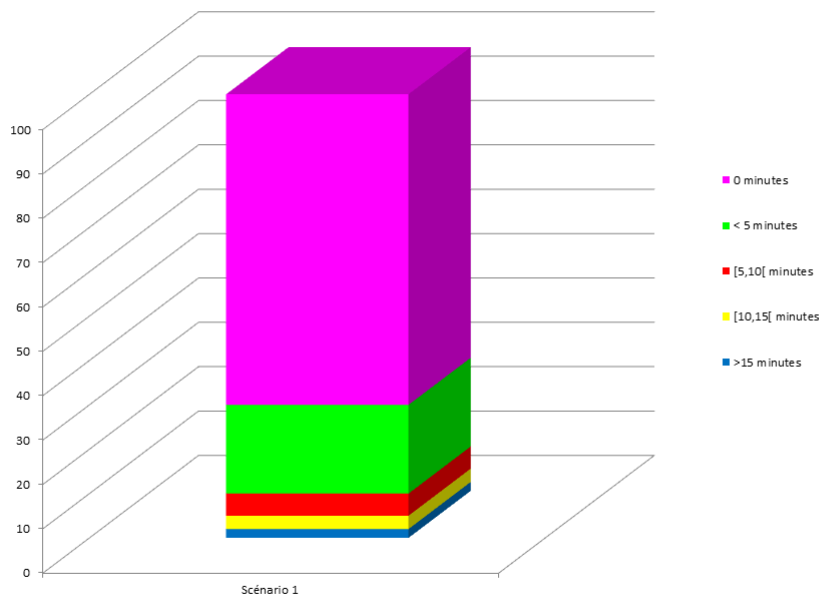


FIGURE 6.5 – Scénario de retards primaires utilisé dans le modèle de simulation

Nous utilisons dans les tests d'évaluation le même matériel informatique que pendant la phase d'optimisation. Un *run* du modèle avec l'outil AnyLogic 7.1 prend moins d'une seconde et les résultats présentés sont moyennés sur 30 runs.

6.3.1 Performance du système

Les indicateurs de performance du système mesurés sont le pourcentage de trains ponctuels au départ et à l'arrivée. Nous présentons les résultats obtenus dans le tableau 6.6 et rappelons les valeurs obtenues pour la solution de référence. Nous représentons dans la figure 6.6 le pourcentage d'amélioration des indicateurs issus des différentes instances optimisées par rapport à la solution de référence.

TABEAU 6.6 – Pourcentages des trains ponctuels au départ et à l'arrivée

Instance	Ponctualité au départ	Ponctualité à l'arrivée
[E10D1_0%]	99,34%	88,58%
[E10D1_2%]	99,55%	89,66%
[E10D1_5%]	99,45%	89,07%
[E10D3_0%]	99,42%	89,27%
[E10D3_2%]	99,43%	89,02%
[E10D3_5%]	99,43%	88,56%
Sol_{ref}	99,24%	88,34%

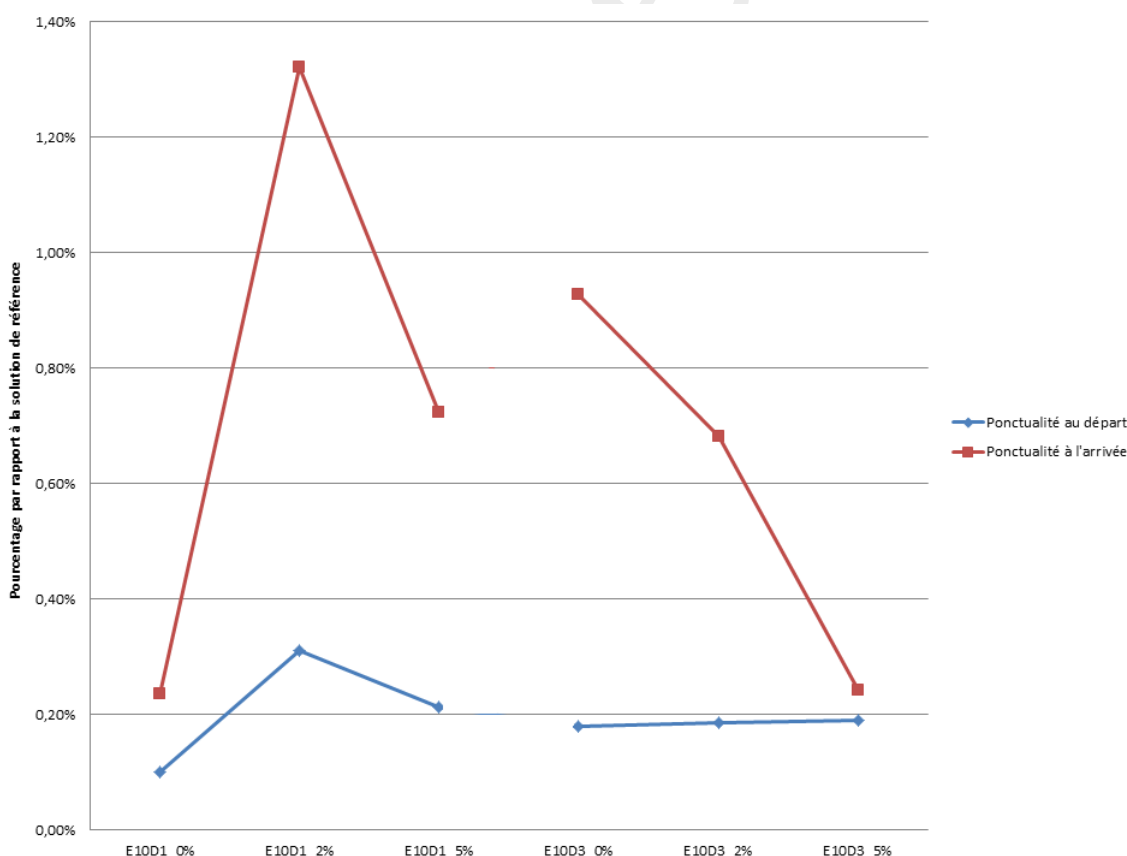


FIGURE 6.6 – Amélioration de la ponctualité au départ et à l'arrivée par rapport à la solution de référence

Nous remarquons premièrement que ces indicateurs sont améliorés pour l'ensemble

des instances testées. Ces indicateurs ne différencient pas les retards primaires et secondaires. L'amélioration porte principalement sur les retards secondaires dans la mesure où le même scénario est utilisé pour la solution de référence et les solutions optimisées. La différence entre la ponctualité au départ et la ponctualité à l'arrivée est due à la décision d'injecter les retards après le départ du train.

Pour les instances sans décalage ($[E10D1_0\%]$, $[E10D1_2\%]$ et $[E10D1_5\%]$), il est difficile de déduire l'impact du pourcentage de ressources supplémentaires sur les indicateurs de ponctualité. Lorsque les décalages sont autorisés, augmenter la valeur de r^C et r^D diminue l'amélioration de ces critères. D'autre part, à coût égal ($r^C = r^D = 0\%$), l'introduction des décalages permet d'améliorer la ponctualité du système. Pour $r^C = r^D > 0\%$, l'introduction des décalages réduit l'amélioration de la ponctualité.

6.3.2 Propagation des retards

Les indicateurs de propagation mesurent le nombre trains touchés par un retard secondaire, ainsi que les durées moyennes et maximales des retards secondaires (Tableau 6.7). Nous représentons l'amélioration de ces indicateurs par rapport à la solution de référence dans les figures 6.8 et 6.7.

TABLEAU 6.7 – Pourcentages des trains ponctuels au départ et à l'arrivée

Instance	Nombre de trains	Retards secondaires cumulés	Retard moyen	Retard maximal
$[E10D1_0\%]$	22,6	149,4	6,54	14,38
$[E10D1_2\%]$	16,65	100,35	6,18	12,1
$[E10D1_5\%]$	19	115,81	5,97	11,55
$[E10D3_0\%]$	18,26	125,20	6,71	13,18
$[E10D3_2\%]$	19,6	116,56	5,87	12,13
$[E10D3_5\%]$	21,55	128,29	5,8	13,14
Sol_{ref}	26,25	160,76	5,84	13,75

Le nombre de trains touchés par des retards secondaires a diminué, pour toutes les instances testées, par rapport à la solution de référence. La réduction de la propagation est supérieure à 13% pour toutes les instances et atteint même 36.59% pour l'instance $[E10D1_2\%]$. La courbe de cet indicateur correspond parfaitement à celle de la ponctualité à l'arrivée (Figure 6.6). Par conséquent, les mêmes observations sur l'impact des décalages et le pourcentage de ressources supplémentaires s'appliquent à l'indicateur de trains touchés par des retards secondaires.

La durée moyenne des retards secondaires a augmenté pour la majorité des instances

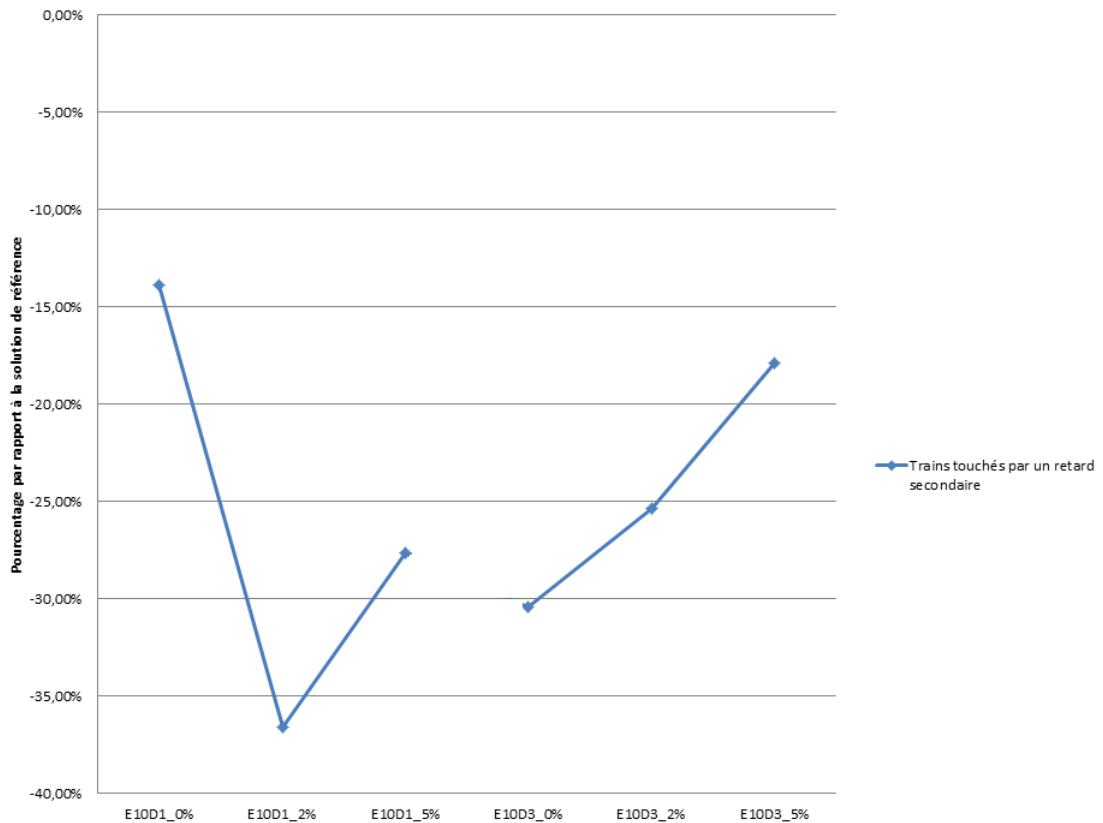


FIGURE 6.7 – Pourcentage des trains touchés par un retard secondaire par rapport à la solution de référence

testées. Cette augmentation correspond à des valeurs inférieures à 1 minute. Nous remarquons que plus le pourcentage de ressources supplémentaires est élevé, moins on détériore (voire on améliore) la moyenne des retards secondaires. D'autre part, l'impact des décalages dépend fortement du pourcentage de ressources supplémentaires : les décalages détériorent la moyenne lorsque $r^C = r^D = 0\%$, et l'améliorent sinon.

Inversement, le retard secondaire maximal enregistré a diminué pour la majorité des instances (toutes sauf [E10D1_0%]) de l'ordre de 30 secondes à 2 minutes. Nous observons pour cet indicateur que l'impact du pourcentage de ressources supplémentaires n'est visible que lorsque les décalages sont interdits. D'autre part, les décalages horaires améliorent cet indicateur lorsque $r^C = r^D = 0\%$, le détériorent sinon.

6.3.3 Sources de propagation

Dans cette partie nous nous intéressons aux indicateurs de sources de propagation (ressources responsables). Nous représentons d'abord pour chaque instance les pourcentages de responsabilité de chaque ressource dans la propagation (Figure 6.9).

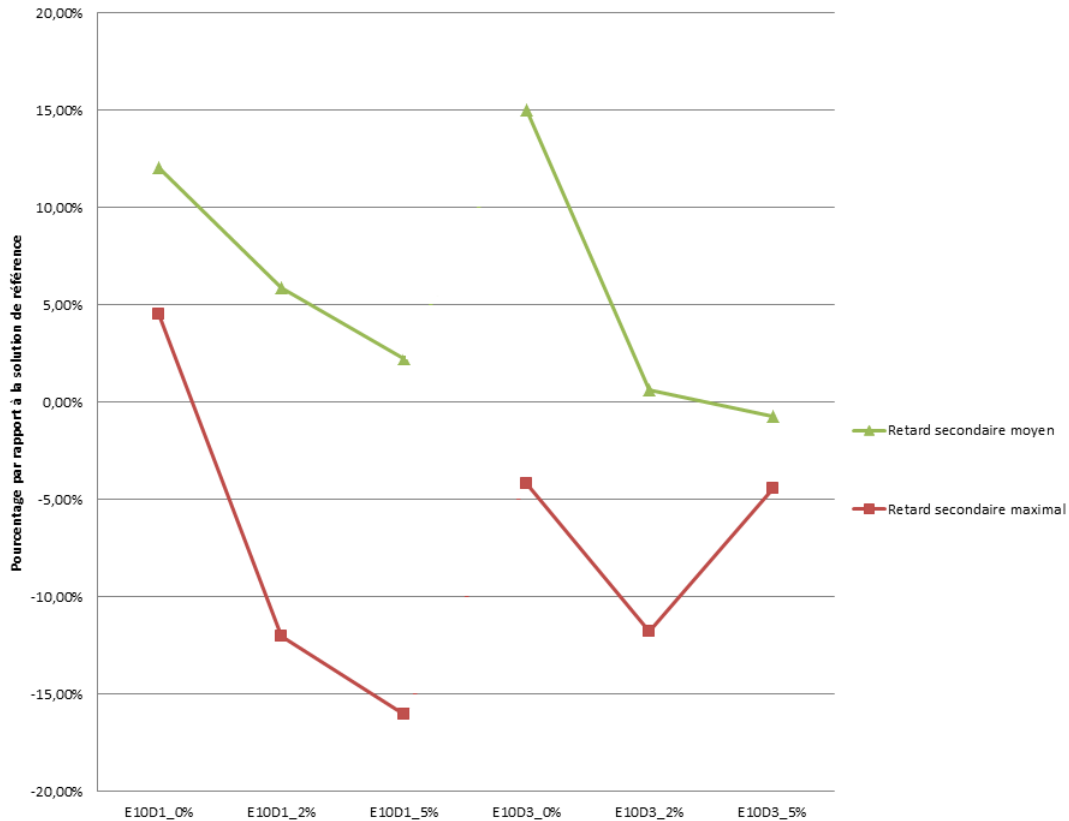


FIGURE 6.8 – Retard secondaire moyen et maximal par rapport à la solution de référence

Lorsque les décalages sont interdits, la responsabilité des ressources dans la propagation est équilibrée. L'impact du pourcentage de ressources supplémentaires est assez faible : légère baisse de la propagation à cause des agents et légère hausse du côté engins. En revanche, lorsque les décalages sont autorisés, plus le pourcentage de ressources supplémentaires augmente plus la responsabilité des engins et des agents diminue. Nous observons également une hausse de la propagation due aux gares sur toutes les instances décalées. Cela explique alors la différence des indicateurs de performance et de propagation entre les instances décalées et non décalées. En effet, les décalages permettent de maximiser la marge des ressources engins et agents et éliminer une partie des retards propagés. Néanmoins l'autorisation de plus de ressources utilisées ($r^C = r^D > 0\%$) peut engendrer des conflits sur l'utilisation du réseau (notamment les gares), créant ainsi d'autres retards secondaires.

6.3.4 Conclusion sur les résultats d'évaluation

Nous avons présenté dans cette partie les résultats de l'évaluation de la robustesse des solutions obtenues en phase d'optimisation. Le modèle de simulation développé au

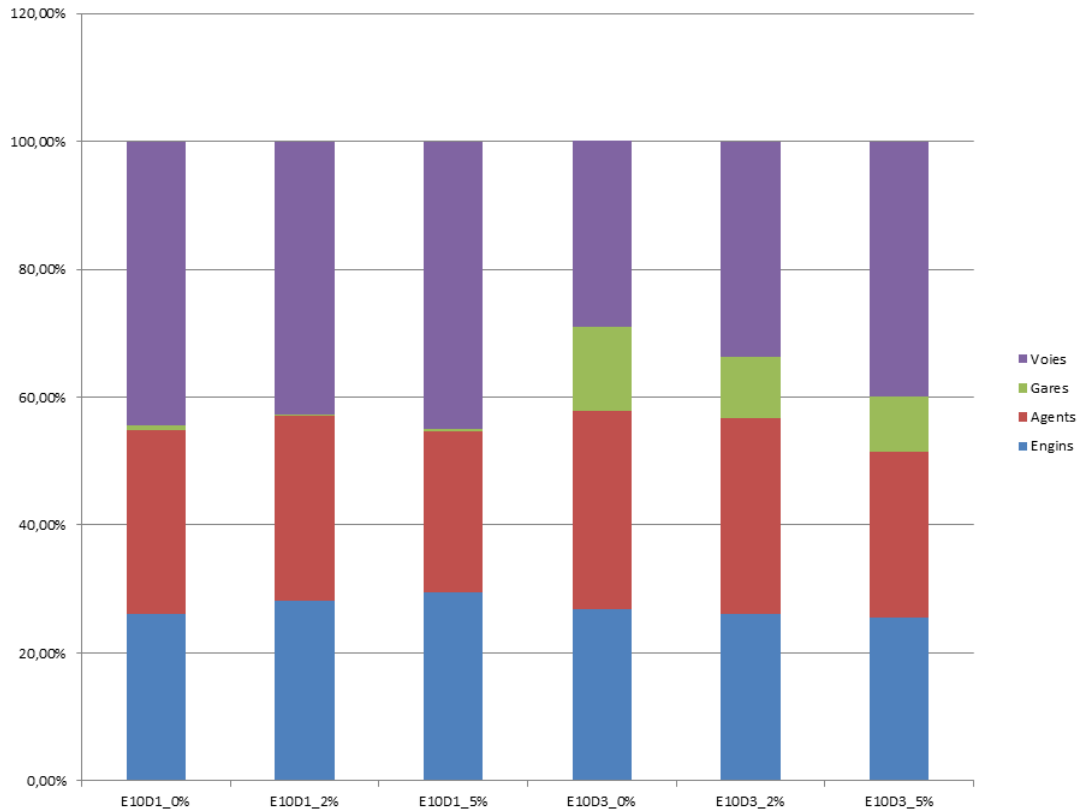


FIGURE 6.9 – Responsabilité des ressources dans la propagation des retards

cours de ce projet permet de mesurer plusieurs familles d'indicateurs pour quantifier la performance du système face à un scénario de retard ainsi que la propagation des retards primaires. Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont prometteurs et nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- La simulation tend à confirmer que la fonction objectif (6.1) reflète bien la robustesse des solutions. L'approche permet en effet d'améliorer la performance des plans de transport pour toutes les instances testées. Cette amélioration est due à une baisse significative du nombre de trains propageant un retard. La durée moyenne des retards secondaires a quant à elle augmenté de manière négligeable par rapport à la solution de référence.
- L'autorisation de décalages permet d'améliorer la robustesse en utilisant le même nombre de ressources que la solution de référence. En effet, les décalages ont pour objectif de maximiser les marges des ressources engins et agents et ainsi de réduire la propagation via ces ressources. Nous avons observé néanmoins que l'ajout de ressources supplémentaires peut engendrer des conflits sur l'utilisation de l'infrastructure.
- Une solution plus coûteuse n'est pas forcément plus robuste. À l'instar des déca-

lages horaires, l'autorisation de ressources supplémentaires peut engendrer la propagation des retards sur l'infrastructure.

Néanmoins, compte tenu de la variabilité de la densité de la circulation des trains dans le temps et l'espace, certains intervalles de confiances peuvent rendre difficile l'interprétation des résultats. Des expérimentations avec un plus grand nombre de répliques sont nécessaires pour confirmer ces conclusions.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé l'approche d'optimisation et simulation présentée dans les chapitres précédents. Nous avons utilisé pour ces expérimentations des instances issues de données réelles de circulation de trains régionaux français.

L'algorithme de recherche locale développé permet de résoudre (heuristiquement) le modèle d'optimisation en un temps de calcul raisonnable. Les solutions obtenues améliorent significativement la solution de référence au sens des critères de robustesse. Cette amélioration se reflète lors de l'évaluation des solutions par le modèle de simulation. Nous enregistrons une réduction de la propagation des retards primaires sur les autres trains pour toutes les instances testées.

L'introduction des décalages horaires dans le modèle d'optimisation a un impact primordial sur la qualité de la solution, notamment sur les critères de marges. Nous avons ajouté dans le modèle un contrôle sur le nombre de lignes de roulement engins jour et d'emplois du temps utilisés en introduisant des contraintes au modèle mathématique. Les solutions obtenues montrent que l'autorisation de ressources supplémentaires n'impacte pas significativement la qualité des solutions. Cela signifie, qu'à coût égal et en autorisant les décalages, la solution est quasiment aussi robuste (a priori) qu'avec 2 ou 5% de ressources en plus.

En simulant les plans de transport obtenus par le modèle d'optimisation, nous avons pu identifier de manière plus fine l'impact des décalages et du pourcentage de ressources supplémentaires sur la robustesse des solutions. L'autorisation de ressources supplémentaires dans un plan de transport en augmente la robustesse tant que l'infrastructure ne sature pas. Dans ce dernier cas, cela engendre une propagation sur les gares et les voies.

Conclusion générale et perspectives

Nous avons présenté dans ces travaux une approche pour aboutir à une planification robuste et intégrée des ressources ferroviaires (infrastructure, engins et agents de conduite). Nous avons détaillé les deux contributions principales de cette thèse :

1. Un modèle de simulation à événements discrets qui permet d'évaluer la robustesse d'un plan de transport selon plusieurs indicateurs. La modélisation choisie permet de capturer la ressource responsable de la propagation des retards et identifier ainsi les endroits critiques des plans de transport.
2. Un modèle d'optimisation qui intègre la planification tactique des trois ressources ferroviaires. Ce modèle a pour objectif d'optimiser des critères de robustesse adaptés aux trois ressources qui permettent a priori d'améliorer la robustesse des plans de transport.

Nous résumons dans la suite, pour chaque modèle, les conclusions tirées des différentes expérimentations réalisées ainsi que les directions révélées pour les futurs travaux.

Évaluation de la robustesse des plans de transport par simulation

Nous avons réalisé un modèle de simulation à événements discrets afin de quantifier la robustesse d'un plan de transport soumis à des scénarios de retards primaires. La modélisation de la circulation ferroviaire se base sur un ensemble de définitions que l'on répartit en trois points :

- La modélisation des trois ressources ferroviaires nécessaires à la circulation des trains : l'infrastructure, composée de gares et de voies, les engins et les agents de conduite.

- La modélisation de la circulation d'un train définie par l'utilisation dynamique des trois ressources ferroviaires tout au long du trajet.
- La modélisation de la circulation de plusieurs trains afin de gérer le partage des ressources entre les différents trains.

Le modèle permet alors de mesurer plusieurs familles d'indicateurs selon différentes métriques dont nous avons présenté des exemples dans ce manuscrit. L'innovation principale de ce modèle est de quantifier la propagation des retards par les trois ressources simultanément. Cela signifie que nous pouvons identifier les affectations de ressources les plus critiques dans un plan de transport en cas de retards. Nous mesurons de plus des indicateurs de robustesse usuellement utilisés par les opérateurs ferroviaires et les académiques afin d'évaluer la performance globale du système.

Le modèle de simulation répond aux objectifs de notre projet mais comporte, comme tout modèle, plusieurs approximations afin de proportionner le temps d'implémentation et les objectifs de simulation. Différentes améliorations peuvent être apportées en modélisant plus finement la circulation des trains et les ressources ferroviaires. Aussi, notre modélisation offre plusieurs pistes d'améliorations, dont nous citons les exemples suivants :

Exploitation du modèle et des indicateurs Le modèle réalisé permet d'évaluer la robustesse des plans de transport mais peut avoir différentes utilisations. Par exemple, la modélisation de l'infrastructure nous a permis de tester des scénarios où les retards primaires affectent des sections de l'infrastructure au lieu de toucher des trains. Ce scénario correspond parfaitement à une situation de travaux à planifier sur les gares ou les sections de voies. Ainsi, le modèle peut évaluer l'impact de ces travaux sur le plan de transport et ainsi faciliter la réparation de la planification des trains.

D'autre part, le modèle permet de tracer et enregistrer finement le déplacement de chaque train. Nous pouvons actuellement mesurer les retards pris par les trains à chaque étape du déplacement et de l'utilisation des ressources. Par exemple, nous avons présenté des indicateurs de ponctualité au départ et à l'arrivée des trains. Nous pouvons mesurer également ces indicateurs à chaque gare de desserte commerciale du train. Ces indicateurs n'étaient pas pertinents dans le cadre de notre travail dans la mesure où les engins et les agents de conduite sont rarement changés lors d'une desserte. Néanmoins, avec des données réalistes sur les déplacements des passagers, des indicateurs sur les retards des passagers et les correspondances manquées peuvent être extraits des indicateurs mesurés. Un post-traitement des données collectées par le modèle de simulation permettrait ainsi d'exploiter la même modélisation pour évaluer des indicateurs sur les passagers.

Modélisation multi-agents des passagers Un des avantages de l'outil choisi (AnyLogic) pour le modèle de simulation est la possibilité de combiner plusieurs types de simulations dans un même modèle. Nous pouvons ainsi envisager l'ajout d'un modèle multi-agents pour représenter les déplacements des passagers. Un modèle multi-agents considère des entités (passagers) autonomes ou du moins partiellement en définissant différents comportements ou états selon l'environnement.

Dans le cadre du projet SCRIPT, une enquête a été réalisée auprès d'utilisateurs du système ferroviaire afin de comprendre leurs comportements face aux retards des trains. L'intégration de ces informations dans notre modèle à événements discrets permettrait non seulement de mesurer les retards des passagers, mais également de quantifier leur satisfaction et ainsi la qualité du service proposé.

Règles de gestion en temps réel Pour le moment, la modélisation permet d'évaluer la robustesse de la circulation mais n'offre pas de possibilité d'action en temps réel. Ainsi l'intégration d'une gestion en temps réel lors d'une situation perturbée permettrait d'évaluer différentes décisions réactives. Ces décisions peuvent porter sur les trains (décalage ou suppression en cas de retard important, par exemple) ou sur les ressources (échange de ressources ou utilisation des ressources de réserve, par exemple).

Planification intégrée et robuste des ressources ferroviaires

Nous avons présenté une approche d'optimisation au niveau tactique pour planifier simultanément les trois ressources ferroviaires. Les objectifs du modèle sont basés sur des critères pour améliorer a priori la robustesse des plans de transport.

Les difficultés principales de cette idée sont :

- Le choix de critères adaptés à la planification intégrée. Cela signifie que les critères doivent porter sur l'identification des interactions clés des ressources pour couvrir un train. Nous avons choisi de définir deux familles de critères : la première qui porte sur la marge des trains définie comme le minimum des marges des ressources associées, et la seconde sur la synchronisation des ressources (garder les engins et les agents de conduite ensemble).
- La gestion de la complexité engendrée par l'intégration des ressources ferroviaires. Nous avons opté pour une approche en deux phases :
 - Une phase de génération des lignes de roulement des engins et des journées de service des agents. Cette phase est réalisée à l'aide d'outils existant à SNCF

- Une phase de sélection de la combinaison des solutions la plus robuste au sens des critères de robustesse. Cette phase consiste en un programme linéaire en nombres entiers résolu à l'aide d'un algorithme de recherche locale.

Les premières expérimentations ont permis de valider la performance de l'algorithme de recherche développé pour résoudre le modèle. Nous avons observé une amélioration significative des critères de robustesse a priori tout en limitant les surcoûts de production engendrés. La simulation des solutions obtenues tend à confirmer la pertinence des critères de robustesse sur les indicateurs de robustesse lorsque les solutions sont soumises à des scénarios de retards primaires. Nous observons en effet une réduction de la propagation des retards pour les solutions intégrées et robustes.

Ces expérimentations ont également permis de révéler plusieurs directions d'amélioration de l'approche proposée. Nous citons les exemples suivants :

Perspectives sur le schéma général La séparation de l'approche en deux phases (génération et sélection) permet de maîtriser la complexité engendrée par l'intégration des trois ressources ferroviaires. Néanmoins, le caractère séquentiel de l'approche limite l'amélioration des critères de robustesse. Une communication dynamique entre les deux phases permettrait de générer graduellement des lignes de roulements et des journées de services adaptées à la fois aux décalages autorisés et aux objectifs fixés. Une méthode de génération de colonnes semblerait par exemple indiquée pour cela.

Critères de robustesse Nous avons choisi de définir la marge d'un train comme le minimum des marges des engins et agents associés. Cette idée permet de réduire la propagation sur ces deux ressources mais peut engendrer sur certaines instances des conflits sur l'utilisation de l'infrastructure. Une piste d'amélioration est de redéfinir la marge comme le minimum des marges des engins, agents et infrastructure. Nous pourrions par exemple intégrer les idées de marges horaires rencontrées dans la littérature (espacements ou marge d'arrêt).

Optimisation multi-objectif Nous avons choisi des critères de robustesse inspirés de la littérature et adaptés à une approche intégrée des ressources. Néanmoins, ces critères se concentrent sur la robustesse des solutions sans intégrer les coûts de production. Pendant les expérimentations présentées, nous avons intégré des contraintes supplémentaires sur les ressources supplémentaires autorisées. Une approche d'optimisation multi-objectif offrirait une meilleure maîtrise du compromis entre la robustesse et les coûts de production. Cette réflexion induit une réflexion sur l'algorithme de résolution du modèle. Nous

avons présenté un algorithme de recherche locale basé principalement sur les critères de robustesse qui devrait par conséquent, a minima, intégrer la notion des coûts.

Approche proactive-réactive Nous avons évoqué dans les perspectives du modèle de simulation d'intégrer des règles de gestion en temps réel. Cette idée peut être complétée par l'intégration d'une notion de flexibilité dans le modèle d'optimisation. Cela transforme l'approche de proactive à proactive-réactive pour intégrer ainsi les niveaux de décisions tactique et temps réel.

L'idée de flexibilité est d'autant plus favorisée par la phase de génération de l'approche. Le modèle de sélection aboutirait, par exemple, à un plan de transport "titulaire" ainsi qu'une liste de modifications (échange des lignes de roulements et journées de service par exemple) en cas de retards.

Perspective commune aux deux modèles

Notre dernière direction pour de futurs travaux concerne la communication entre les deux modèles. Nous avons opté pour une communication unilatérale où le modèle de simulation évalue les solutions du modèle d'optimisation. Il serait intéressant d'intégrer les deux modèles en utilisant le modèle de simulation pour guider le modèle d'optimisation au fil des itérations, par exemple en décidant des variables de décision fixées au fil des itérations.

Les solutions ainsi obtenues seraient robustes à la fois au sens des critères de robustesse et au sens des indicateurs de robustesse. Cette idée permettrait d'intégrer une vision supplémentaire de la robustesse dans le sens où des distributions stochastiques participent au choix de la solution.

Confidentiel

Bibliographie

- [Aarts and Lenstra, 1997] Aarts, E. and Lenstra, J. (1997). *Local Search in Combinatorial Optimization*. Princeton University Press. [93](#)
- [Abril et al., 2008] Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M., Tormos, P., and Lova, A. (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*. [18](#)
- [Acuña-Agost, 2009] Acuña-Agost, R. (2009). *Mathematical modeling and methods for rescheduling trains under disrupted operations*. These. Thèse Informatique, Université d'Avignon. [10](#), [43](#)
- [Barrena et al., 2013] Barrena, E., De-Los-Santos, A., Mesa, J. A., and Perea, F. (2013). Analyzing connectivity in collective transportation line networks by means of hypergraphs. *The European Physical Journal Special Topics*, 215(1) :93–108. [33](#), [42](#)
- [Barron et al., 2013] Barron, A., Melo, P. C., Cohen, J. M., and Anderson, R. (2013). Passenger-focused management approach to measurement of train delay impacts. In *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, number 13-3345. [34](#)
- [Becker, 1965] Becker, G. S. (1965). A theory of the allocation of time. *The economic journal*, 75(299) :493–517. [32](#)
- [Bertsimas and Sim, 2004] Bertsimas, D. and Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1) :35–53. [41](#)
- [Beyer and Sendhoff, 2007] Beyer, H.-G. and Sendhoff, B. (2007). Robust optimization—a comprehensive survey. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 196(33) :3190–3218. [17](#)
- [Bidault and Jallageas, 2002] Bidault, J. and Jallageas, M. (2002). *Transport public de voyageurs. Qualité de service, La norme NF EN 13816*. AFNOR pratique. Afnor. [8](#)
- [Bourez et al., 2007a] Bourez, G., Almeida, D. D., Marcos, N., and Weber, C. (2007a). A contribution to the critical analysis and evaluation of existing methods for railway resource (re)scheduling. Technical report, Technical report 055, ARRIVAL project. [21](#), [30](#)

- [Bourez et al., 2007b] Bourez, G., Almeida, D. D., Marcos, N., and Weber, C. (2007b). A contribution to the critical analysis and evaluation of existing methods for railway resource (re)scheduling. Technical report, ARRIVAL Project. 39, 42
- [Bruinsma et al., 1998] Bruinsma, F., Rietveld, P., Van Vuuren, D., and Institute, T. (1998). *Unreliability in Public Transport Chains*. Discussion paper. Tinbergen Institute. 31, 33
- [Cacchiani et al., 2012] Cacchiani, V., Caprara, A., and Fischetti, M. (2012). A lagrangian heuristic for robustness, with an application to train timetabling. *Transportation Science*, 46(1) :124–133. 36, 42
- [Cacchiani et al., 2008] Cacchiani, V., Caprara, A., Galli, L., Kroon, L., Maróti, G., and Toth, P. (2008). Recoverable robustness for railway rolling stock planning. *ATMOS 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl Seminar proceedings, 2008.*, 46(2) :217–232. 37, 43
- [Cacchiani et al., 2014] Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelen-turf, L., and Wagenaar, J. (2014). An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research Part B : Methodological*, 63 :15–37. 44
- [Cadarso and Marín, 2011] Cadarso, L. and Marín, Á. (2011). Robust rolling stock in rapid transit networks. *Computers & Operations Research*, 38(8) :1131–1142. 38, 44
- [Caprara et al., 2007] Caprara, A., Kroon, L. G., Monaci, M., Peeters, M., and Toth, P. (2007). Passenger railway optimization. In Barnhart, C. and Laporte, G., editors, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, volume 14, chapter 3, pages 129–187. Elsevier. 10
- [Chevalier et al., 2015] Chevalier, G., Froger, A., Guyon, O., and Pinson, E. (2015). PLAISANCE : A tool for scheduling trains drivers for French railways. In *Conference on Advanced Systems in Public Transport (CASPT 2015)*, Rotterdam, Netherlands. 80
- [Cicerone et al., 2008] Cicerone, S., Stefano, G. D., and Schachtebeck, M. (2008). Dynamic algorithms for recoverable robustness problems. In *ATMOS 2008 - 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl Seminar proceedings, 2008.* 43
- [Cordeau et al., 2001] Cordeau, J.-F., Stojkovic, G., Soumis, F., and Desrosiers, J. (2001). Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling. *Transportation Science*, 35(4) :375–388. 16
- [Crozet, 2005] Crozet, Y. (2005). Time and passenger transport. In *ECMT (Ed.) = CEMT. Round Table 127 = Table ronde 127 - Time and Transport = Le temps et les transports*, pages pp. 25–65 (English language) – pp. 33–40 (version française), Paris, France. OECD = OCDE. 33

- [D'Ariano et al., 2007] D'Ariano, A., Pacciarelli, D., and Pranzo, M. (2007). A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. *European Journal of Operational Research*, 183(2) :643–657. [42](#)
- [Dauzère-Pérès et al., 2015] Dauzère-Pérès, S., Almeida, D. D., Guyon, O., and Benhizia, F. (2015). A lagrangian heuristic framework for a real-life integrated planning problem of railway transportation resources. *Transportation Research Part B : Methodological*, 74 :138 – 150. [iii](#), [14](#), [15](#)
- [Dewilde et al., 2011] Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., and Vansteenwegen, P. (2011). Defining robustness of a railway timetable. In *25th Annual Conference of the Belgian Operations Research Society, Abstracts*, pages 108–109. [34](#), [36](#), [83](#)
- [Fischetti and Monaci, 2009] Fischetti, M. and Monaci, M. (2009). *Robust and Online Large-Scale Optimization : Models and Techniques for Transportation Systems*, chapter Light Robustness, pages 61–84. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [41](#)
- [Fischetti et al., 2009] Fischetti, M., Salvagnin, D., and Zanette, A. (2009). Fast approaches to improve the robustness of a railway timetable. *Transportation Science*, 43(3) :321–335. [41](#)
- [Flier et al., 2009] Flier, H., Gaurav, A., and Nunkesser, M. (2009). Combinational aspects of move up crews. In *Operations Research Proceedings 2008*, pages 569–574. Springer. [39](#), [42](#)
- [Freling et al., 2003] Freling, R., Huisman, D., and Wagelmans, A. P. M. (2003). Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling. *J. of Scheduling*, 6(1) :63–85. [15](#)
- [Goverde, 2005] Goverde, R. (2005). *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology. [35](#)
- [Goverde et al., 2001] Goverde, R., Hooghiemstra, G., and Lopuhaä, H. (2001). *Statistical Analysis of Train Traffic : The Eindhoven Case*. TRAIL studies in transportation science series. IOS Press, Incorporated. [31](#)
- [Goverde, 1999] Goverde, R. M. (1999). Improving punctuality and transfer reliability by railway timetable optimization. In *Five Years Crossroads of Theory and Practice. Proceedings 5th TRAIL Annual Congress*, number P99/5. [34](#), [36](#), [83](#)
- [Goverde and Odijk, 2002] Goverde, R. M. and Odijk, M. A. (2002). Performance evaluation of network timetables using PETER. *Computers in Railways*, 8 :731–740. [40](#)
- [Haase et al., 2001] Haase, K., Desaulniers, G., and Desrosiers, J. (2001). Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation Science*, 35(3) :286–303. [15](#)
- [Hansen and Pachl, 2008] Hansen, I. A. and Pachl, J. (2008). *Railway Timetable & Traffic : Analysis - Modelling - Simulation*. Hestra-Verlag. [18](#), [34](#)

- [Higgins and Kozan, 1998] Higgins, A. and Kozan, E. (1998). Modeling train delays in urban networks. *Transportation Science*, 32(4) :346–357. [31](#), [34](#)
- [Hofman and Madsen, 2005] Hofman, M. A. and Madsen, L. F. (2005). *Robustness in train scheduling*. PhD thesis, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark. [43](#)
- [Huisman, 2007] Huisman, D. (2007). A column generation approach for the rail crew re-scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 180(1) :163 – 173. [44](#)
- [Huisman et al., 2005] Huisman, D., Freling, R., and Wagelmans, A. P. M. (2005). Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling. *Transportation Science*, 39(4) :491–502. [10](#), [15](#)
- [Huisman et al., 2002] Huisman, T., Boucherie, R. J., and van Dijk, N. M. (2002). A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the netherlands. *European Journal of Operational Research*, 142(1) :30 – 51. [34](#)
- [Kano et al., 1984] Kano, N., Seraku, N., Takahashi, E., and Tsuji, S. (1984). Attractive quality and must-be quality. *The Journal of the Japanese Society for Quality Control*, 14(2) :39–48. [8](#)
- [Kelton and Law, 2000] Kelton, W. D. and Law, A. M. (2000). *Simulation modeling and analysis*. McGraw Hill Boston. [57](#)
- [Kroon and Fischetti, 2001] Kroon, L. and Fischetti, M. (2001). *Crew scheduling for Netherlands railways "destination : customer"*. Springer. [38](#), [84](#)
- [Kroon et al., 2015] Kroon, L., Maróti, G., and Nielsen, L. (2015). Rescheduling of railway rolling stock with dynamic passenger flows. *Transportation Science*, 49(2) :165–184. [44](#)
- [Kroon et al., 2007] Kroon, L. G., Dekker, R., and Vromans, M. J. C. M. (2007). *Algorithmic Methods for Railway Optimization : International Dagstuhl Workshop, Dagstuhl Castle, Germany, June 20-25, 2004, 4th International Workshop, ATMOS 2004, Bergen, Norway, September 16-17, 2004, Revised Selected Papers*, chapter Cyclic Railway Timetabling : A Stochastic Optimization Approach, pages 41–66. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [36](#), [40](#), [41](#)
- [Liebchen et al., 2009] Liebchen, C., Lübbecke, M., Möhring, R., and Stiller, S. (2009). The concept of recoverable robustness, linear programming recovery, and railway applications. In Ahuja, R., Möhring, R., and Zaroliagis, C., editors, *Robust and Online Large-Scale Optimization*, volume 5868 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–27. Springer Berlin Heidelberg. [39](#), [42](#)
- [Liebchen et al., 2010] Liebchen, C., Schachtebeck, M., Schöbel, A., Stiller, S., and Prigge, A. (2010). Computing delay resistant railway timetables. *Computers & Operations Research*, 37(5) :857–868. [34](#), [43](#)

- [Lohatepanont and Barnhart, 2012] Lohatepanont, M. and Barnhart, C. (2012). Airline schedule planning : Integrated models and algorithms for schedule design and fleet assignment. *Transportation Science*, 38(1) :19–32. [16](#)
- [McManus and Hastings, 2006] McManus, H. and Hastings, D. (2006). A framework for understanding uncertainty and its mitigation and exploitation in complex systems. *Engineering Management Review, IEEE*, 34(3) :81–81. [iii](#), [17](#), [30](#)
- [Mercier et al., 2005] Mercier, A., Cordeau, J.-F., and Soumisa, F. (2005). A computational study of benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem. *Comput. Oper. Res.*, 32(6) :1451–1476. [16](#)
- [Mercier and Soumis, 2007] Mercier, A. and Soumis, F. (2007). An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Comput. Oper. Res.*, 34(8) :2251–2265. [16](#), [49](#), [74](#)
- [Middelkoop and Bouwman, 2001] Middelkoop, D. and Bouwman, M. (2001). Simone : Large scale train network simulations. In *Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter*, volume 2, pages 1042–1047 vol.2. [34](#)
- [Nielsen et al., 2007] Nielsen, L., Kroon, L., and Maróti, G. (2007). Absorption robustness of railway resource schedules. Technical report, Technical report 113, ARRIVAL project FP6-02135-2. [iii](#), [32](#), [34](#), [37](#), [38](#), [39](#), [84](#)
- [Nielsen, 2011] Nielsen, L. K. (2011). *Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways : Applications in short-term planning and in disruption management*. Erasmus University Rotterdam. [37](#), [39](#), [40](#), [44](#)
- [Olsson and Haugland, 2004] Olsson, N. O. and Haugland, H. (2004). Influencing factors on train punctuality - results from some norwegian studies. *Transport Policy*, 11(4) :387–397. [18](#)
- [Robinson, 2005] Robinson, S. (2005). Discrete-event simulation : From the pioneers to the present, what next? *The Journal of the Operational Research Society*, 56(6) :619–629. [57](#)
- [Roy, 2007] Roy, B. (2007). *Annales du LAMSADE*, volume 7, chapter La robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision : Une préoccupation multi facettes, pages 209–235. [17](#), [22](#)
- [Salido et al., 2012] Salido, M. A., Barber, F., and Ingolotti, L. (2012). Robustness for a single railway line : Analytical and simulation methods. *Expert Syst. Appl.*, 39(18) :13305–13327. [32](#), [34](#), [36](#), [40](#)
- [Sargent, 2010] Sargent, R. (2010). Verification and validation of simulation models. In *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter*, pages 166–183. [57](#)
- [Schöbel, 2007] Schöbel, A. (2007). Integer programming approaches for solving the delay management problem. In Geraets, F., Kroon, L., Schoebel, A., Wagner, D., and Zaro-

- liagis, C., editors, *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, volume 4359 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 145–170. Springer Berlin Heidelberg. [44](#)
- [Schobel and Kratz, 2009] Schobel, A. and Kratz, A. (2009). A bicriteria approach for robust timetabling. In Ahuja, R., Möhring, R., and Zaroliagis, C., editors, *Robust and Online Large-Scale Optimization*, volume 5868 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 119–144. Springer Berlin Heidelberg. [42](#)
- [Schriber and Brunner, 2000] Schriber, T. J. and Brunner, D. T. (2000). Inside simulation software : inside discrete-event simulation software : how it works and why it matters. In *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation, WSC 2000, Wyndham Palace Resort & Spa, Orlando, FL, USA, December 10-13, 2000*, pages 90–100. [57](#)
- [Schwanhäusser, 1974] Schwanhäusser, W. (1974). *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. Phd thesis, Institut Technique Rheinischen-Westfälische Aachen. [31](#)
- [Sels et al., 2013] Sels, P., Dewilde, T., Cattrysse, D., and Vansteenwegen, P. (2013). Expected passenger travel time as objective function for train schedule optimization. In *Proceedings of 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (IAROR) : RailCopenhagen2013, May*, pages 13–15. [34](#)
- [Smits, 2009] Smits, J. (2009). Improving punctuality by adjusting timetable design. Master’s thesis, Erasmus University of Rotterdam. Master thesis. [34](#)
- [Soyster, 1973] Soyster, A. L. (1973). Technical note—convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations research*, 21(5) :1154–1157. [41](#)
- [Takeuchi et al., 2006] Takeuchi, Y., Hirai, C., and Tomii, N. (2006). Robustness indices based on passengers’ utilities. *WCRR2006, Montreal*. [34](#), [36](#)
- [Tan, 2007] Tan, C. (2007). Developing a measure for robustness for crew schedules of Netherlands Railways. Master’s thesis, Erasmus University of Rotterdam. In Dutch. [38](#)
- [Törnquist, 2007] Törnquist, J. (2007). Railway traffic disturbance management - an experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 41(3) :249–266. [43](#)
- [Tréfond, 2014] Tréfond, S. (2014). *Planification robuste des roulements d’engins dans le domaine ferroviaire*. PhD thesis, Conservatoire National des Arts et Métiers / CNAM Paris (laboratoire) et de Centre d’étude et De Recherche en Informatique et Communication / CEDRIC (laboratoire), Paris. [32](#), [34](#), [37](#), [40](#)
- [van Oort et al., 2011] van Oort, N., Netherlands Research School for Transport, I., and Logistics (2011). *Service Reliability and Urban Public Transport Design*. TRAIL thesis series. Netherlands TRAIL Research School. [8](#), [33](#)

- [Vansteenwegen and Van Oudheusden, 2007] Vansteenwegen, P. and Van Oudheusden, D. (2007). Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(4) :478–492. [33](#), [36](#)
- [Veelenturf et al., 2012] Veelenturf, L. P., Potthoff, D., Huisman, D., and Kroon, L. G. (2012). Railway crew rescheduling with retiming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1) :95 – 110. Special issue on Optimization in Public Transport+ISTT2011Special issue on Optimization in Public Transport+International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT), Berkeley, California, July 18–20, 2011. [43](#)
- [Vieira et al., 1999] Vieira, L. E., Neto, E., and Bessa, F. G. (1999). Railway dispatch planning and control in fuzzy information processing society. *Operations research*, 43(2) :134–138. [43](#)
- [Vromans et al., 2006] Vromans, M. J., Dekker, R., and Kroon, L. G. (2006). Reliability and heterogeneity of railway services. *European Journal of Operational Research*, 172(2) :647–665. [32](#), [34](#), [36](#), [39](#), [40](#)
- [Weide et al., 2010] Weide, O., Ryan, D., and Ehrgott, M. (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. *Comput. Oper. Res.*, 37(5) :833–844. [16](#)
- [Yan and Tseng, 2002] Yan, S. and Tseng, C.-H. (2002). A passenger demand model for airline flight scheduling and fleet routing. *Comput. Oper. Res.*, 29(11) :1559–1581. [16](#)
- [Yuan, 2006] Yuan, J. (2006). *Stochastic Modelling of Train Delays and Delay Propagation in Stations*. Phd thesis, Delft University. [31](#)
- [Yuan and Hansen, 2008] Yuan, J. and Hansen, I. (2008). Closed form expressions of optimal buffer times between scheduled trains at railway bottlenecks. In *Intelligent Transportation Systems, 2008. ITSC 2008. 11th International IEEE Conference on*, pages 675–680. [36](#), [83](#)