HAL
open science

Evaluation de performance d'une ligne ferroviaire suburbaine partiellement équipée d'un automatisme CBTC

Juliette Pochet

▶ To cite this version:

Juliette Pochet. Evaluation de performance d'une ligne ferroviaire suburbaine partiellement équipée d'un automatisme CBTC. Automatique / Robotique. Université Paris Saclay, 2018. Français. NNT : . tel-01812510

HAL Id: tel-01812510
https://centralesupelec.hal.science/tel-01812510

Submitted on 11 Jun 2018

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

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

université PARIS-SACLAY

NNT : 2018SACLC005

CentraleSupélec

Evaluation de performance d'une ligne ferroviaire suburbaine partiellement équipée d'un automatisme CBTC

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à CentraleSupélec

École doctorale n°580 Sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC)
Spécialité de doctorat: Automatique

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 12 janvier 2018, par

Juliette POCHET

Composition du Jury :

Sihem Tebbani Professeur, CentraleSupelec (L2S)	Présidente
Joaquin Rodriguez Directeur de Recherche, IFSTTAR (ESTAS)	Rapporteur
François Delmotte Professeur, Université d'Artois	Rapporteur
Evguenia Dmitrieva Ingénieur, RATP	Examinatrice
Sylvain Baro Ingénieur, SNCF Réseau	Examinateur
Guillaume Sandou Professeur, CentraleSupelec (L2S)	Directeur de thèse

Thèse de doctorat

Table des matières

Introduction *11*

Chapitre 1 Système ferroviaire *16*

1.1 Signalisation ferroviaire **17**

1.1.1 Signalisation ferroviaire classique 17

1.1.2 Système « CBTC » 31

1.2 Exploitation ferroviaire **37**

1.2.1 Généralités 37

1.2.2 Exploitation en zone dense 39

1.2.3 Exploitation d'une ligne ferroviaire équipée d'un automatisme CBTC 45

1.3 Cas d'étude : le projet NExTEO **46**

1.3.1 Exploitation « en doigts de la main » 47

1.3.2 Modes de conduite des trains 48

1.3.3 Supervision et régulation du trafic 49

1.4 Conclusion **50**

Chapitre 2 Description d'un problème de régulation *52*

2.1 Modélisation du trafic ferroviaire **53**

2.1.1 Représentation de l'infrastructure 53

2.1.2 Mouvement des circulations 57

2.1.3 Contrôle, commande, supervision 63

2.2 Formulation d'un problème de régulation **68**

2.2.1 Données du plan de transport 69

2.2.2 Modélisation par graphe des alternatives 70

2.2.3 Modélisation mathématique du problème de régulation 72

2.3 Résolution d'un programme mathématique **75**

2.3.1 Résolution exacte ou approchée 76

2.3.2 Méthodes heuristiques pour l'optimisation combinatoire 76

2.3.3 Optimisation multi-objectif 78

2.4 Stratégie de régulation sur un réseau ferroviaire **81**

2.4.1 Introduction 81

2.4.2 Organisation de la décision 82

2.4.3 Stratégies de régulation 84

2.5 Conclusion **98**

Chapitre 3 Supervision d'une ligne suburbaine équipée d'un automatisme CBTC *100*

3.1 Architecture de la supervision **102**

3.2 Fonctions de la supervision **104**

3.2.1 Suivi des circulations 104
3.2.2 Mise en œuvre du plan de transport 105
3.2.3 Gestion des gares et des garages 107
3.2.4 Calcul des itinéraires 109
3.2.5 Régulation des trains automatiques 110
3.3 Formulation du problème de régulation 114
3.3.1 Notations 115
3.3.2 Variables 117
3.3.3 Données 118
3.3.4 Contraintes 121
3.3.5 Indicateurs 124
3.3.6 Synthèse du problème 124
3.4 Résolution du problème de régulation 125
3.4.1 Choix de la méthode 125
3.4.2 Résolution par algorithme génétique 128
3.5 Conclusion 140
Chapitre 4 Simulateur d'exploitation SIMONE 142
4.1 Architecture du simulateur 143
4.2 Acteurs du système ferroviaire simulé 144
4.2.1 Agent de conduite 145
4.2.2 Voie 145
4.2.3 Train 146
4.2.4 Système CBTC 148
4.2.5 Signalisation classique 152
4.3 Simulation et validation 157
4.3.1 Plan de voie 157
4.3.2 IHM 158
4.3.3 Scénarios 158
4.3.4 Injection de perturbation 159
4.3.5 Exemples 161
4.4 Conclusion 164
Chapitre 5 Cas d'étude : évaluation de performance sur le périmètre NExTEO …165
5.1 Système simulé 165
5.1.1 Topologie 165
5.1.2 Plan de transport 166
5.1.3 Perturbations 166
5.1.4 Fonctions de régulation 167
5.1.5 Paramétrage 167
5.2 Evaluation de la régulation 169
5.2.1 Performance face à des perturbations ordinaires 169

5.2.2 Influence de l'horizon de commande 183
5.2.3 Reproductibilité des résultats..... 186
5.2.4 Temps de calcul 187
5.2.5 Synthèse 188

Conclusion générale et perspectives..... 190

Travaux cités 195

Table des figures

Figure 1 : Aiguilles conjuguées (en rouge) 19

Figure 2 : Détection des trains par circuits de voie 20

Figure 3 : Blocks automatiques lumineux (BAL) à 3 indications 21

Figure 4 : Définition d'un itinéraire ferroviaire et de ses caractéristiques.... 23

Figure 5 : Conditions de désactivation d'un transit correspondant à un aiguillage - Cas du transit amont inactif..... 28

Figure 6 : Conditions de désactivation d'un transit correspondant à une aiguille - Cas de l'aiguille amont en position divergente..... 28

Figure 7 : Réduction de la longueur des cantons pour permettre un intervalle plus rapproché entre les trains 30

Figure 8 : Blocs fonctionnels d'un système CBTC..... 32

Figure 9 : Architecture classique d'un système CBTC 34

Figure 10 : Principe du cantonnement mobile..... 35

Figure 11 : Diagramme espace-temps pour 4 circulations desservant une gare 38

Figure 12 : Diagramme espace-temps d'une grille horaire réelle sur un logiciel SNCF 39

Figure 13 : Principe de la gestion des perturbations en zone dense 40

Figure 14 : Diagramme espace-temps représentant 2 trains se suivant en gare, sans alternat à gauche, avec alternat à droite..... 45

Figure 15 : Projet Nexteo, exploitation selon le principe de recouvrement . 47

Figure 16 : Types de trains pouvant circuler sur la ligne E équipée du système CBTC Nexteo 49

Figure 17 : Graphe des itinéraires (exemple) 54

Figure 18 : Graphe des ressources (exemple)..... 55

Figure 19 : Exemple d'illustration du graphe à nœuds doubles..... 56

Figure 20 : Construction de graphes microscopique et macroscopique à partir d'un plan de voie..... 57

Figure 21 : Evolution des coefficients de la RAV en fonction de la vitesse du train..... 59

Figure 22 : Types de mouvements composant la dynamique d'un train.....61

Figure 23 : Modélisation discrète du mouvement d'un train sur une section de son parcours.....62

Figure 24 : Représentation du temps d'allocation et de la distance minimale séparant deux trains sans arrêt pour un canton donné, d'après (Hansen et Pachl 2008).....67

Figure 25 : Représentation du temps d'allocation et de la distance minimale séparant deux trains avec arrêt pour un canton donné, d'après (Hansen et Pachl 2008).....67

Figure 26 : Comparaison des temps d'allocation pour du cantonnement fixe et du cantonnement mobile, d'après (Hansen et Pachl 2008) 68

Figure 27 : Graphe des alternatives extrait de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013).....70

Figure 28 : Graphe des alternatives comportant toutes les paires d'arcs possibles, extrait de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013).....71

Figure 29 : Graphe des alternatives après choix d'un arc par paire, extrait de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013) 71

Figure 30 : Représentation d'un individu selon la terminologie des algorithmes génétiques 77

Figure 31 : Représentation de trois individus sous forme de chromosome..78

Figure 32 : Evaluations mono-objectif et multi-objectif (minimisation) sur un cas mono variable 79

Figure 33 : Définitions de la surface de compromis, du point idéal et du point de nadir.....80

Figure 34 : Etude du rang de domination d'un ensemble de solutions.....80

Figure 35 : Principales fonctions et flux d'informations d'un module de supervision de trafic 82

Figure 36 : Diagramme fonctionnel de la supervision des circulations 103

Figure 37 : Définition d'un élément de sillon 104

Figure 38 : Consignes pour un train automatique sur un élément de sillon106

Figure 39 : Séquence fonctionnelle de la gestion des gares et garages.....109

Figure 40 : Séquence fonctionnelle déclenchée par l'occupation d'une zone de déclenchement.....110

Figure 41 : Structure de la régulation par commande prédictive basée sur un modèle de trafic 113

Figure 42 : Définitions du point-gare et du point en ligne dans la formulation du problème de régulation 114

Figure 43 : Principe de codage de l'algorithme génétique développé pour la régulation 129

Figure 44 : Opérateurs d'écriture des gènes intervenant lors du codage ou de la modification d'un gène 131

Figure 45 : Matrice des contraintes du problème de régulation en fonction des sillons 133

Figure 46 : Matrice des contraintes pour les variables de décision d'un sillon donné le long de son parcours 133

Figure 47 : Mise en œuvre des opérateurs dédiés à l'application des contraintes (en rouge) dans les structures de données 134

Figure 48 : Synthèse de la fonction de régulation du trafic par optimisation multi-objectif 140

Figure 49 : Paramétrage physique et dynamique du train utilisé dans SIMONE 147

Figure 50 : Paramétrage des durées caractéristiques des phases de freinage d'un train utilisé dans SIMONE 148

Figure 51 : Architecture logique de la fonction « délimiter et respecter le domaine de sécurité » dans SIMONE 150

Figure 52 : Paramétrage du CBTC Bord utilisé dans SIMONE 151

Figure 53 : Paramètres de simulation du CBTC dans SIMONE 152

Figure 54 : Définition du diagramme d'état utilisé dans le modèle de signalisation 154

Figure 55 : Structure du modèle de signalisation de l'outil SIMONE 154

Figure 56 : Classe Automate paramétrable pour l'implémentation des diagrammes d'états 155

Figure 57 : Diagramme de classe simplifié du modèle de signalisation de SIMONE 155

Figure 58 : Paramétrage de la signalisation utilisé dans SIMONE 157

Figure 59 : Plan de voie de l'infrastructure EOLE, restreint au domaine CBTC 158

Figure 60 : Profil d'altitude de l'infrastructure EOLE dans le domaine CBTC 158

Figure 61 : Vitesse, altitude et bilan d'énergie d'un train sur le domaine CBTC d'EOLE simulé avec SIMONE 161

Figure 62 : Positions des trains et occupation de la voie dans SIMONE ... 163

Figure 63 : Distance au point à protéger dans SIMONE 163

Figure 64 : Diagramme espace-temps du scénario A_60 vis-à-vis des marches de référence 171

Figure 65 : Diagramme espace-temps des scénarios A_60, A_120 et A_180 172

Figure 66 : Diagramme espace-temps du scénario B_60 vis-à-vis des marches de référence 173

Figure 67 : Diagramme espace-temps des scénarios B_60, B_120 et B_180 174

Figure 68 : Comparaison des régulations, indicateur de ponctualité, scénario A 177

Figure 69 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario A 177

Figure 70 : Comparaison des régulations, indicateur de ponctualité, scénario B 178

Figure 71 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario B 178

Figure 72 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur de ponctualité, scénario A 179

Figure 73 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur d'intervalle, scénario A 179

Figure 74 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur de ponctualité, scénario B 180

Figure 75 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur d'intervalle, scénario B 180

Figure 76 : Comparaison des régulations, avec initialisation sur une « bonne solution », indicateur de ponctualité, scénario B 181

Figure 77 : Comparaison des régulations, avec initialisation sur une « bonne solution », indicateur d'intervalle, scénario B 181

Figure 78 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario B + dispersion 182

Figure 79 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario B + dispersion 182

Figure 80 : Amélioration de l'indicateur de ponctualité par la régulation multi-objectif (stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B 184

Figure 81 : Amélioration de l'indicateur d'intervalle par la régulation multi-objectif (stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B 184

Figure 82 : Amélioration de l'indicateur de ponctualité par la régulation multi-objectif (marche et stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B 185

Figure 83 : Amélioration de l'indicateur d'intervalle par la régulation multi-objectif (marche et stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B 185

Figure 84 : Meilleure solution, solution moyenne, et écart-type obtenus par la régulation multi-objectif (stationnement et marche), scénario B 186

Figure 85 : Evolution du temps de calcul de l'optimisation multi-objectif (marche + stationnement) au fil de la simulation, en fonction de l'horizon de commande, scénario B_120 188

Liste des abbréviations

ATC	: automatic train control (anglais)
ATO	: automatic train operation (anglais)
ATP	: automatic train protection (anglais)
ATS	: automatic train supervision (anglais)
BAL	: block automatique lumineux
CBTC	: communication-based train control
CdV	: circuit de voie
CM	: conduite manuelle
CMC	: conduite manuelle contrôlée
CPA	: conduite en pilotage automatique
ERTMS	: european rail traffic management system (anglais)
FCFS	: first come first served (anglais)
FIFO	: first in first out (anglais)
KVB	: contrôle de vitesse par balises
KVBP	: contrôle de vitesse par balises pour les prolongements
MPC	: model predictive control (anglais)
RAV	: résistance à l'avancement
RER	: réseau express régional d'Ile-de-France
SNCF	: société nationale des chemins de fer
TCO	: tableau de contrôle optique
TER	: transport express régional
TGV	: train grande vitesse

ZAP : zone d’approche

ZDE : zone de déclenchement

ZEA : zone d’espacement automatique

Introduction

Par souci de simplicité, nous emploierons l'expression ligne ferroviaire pour faire référence aux lignes de trains lourds, par opposition aux lignes de métros ou de tramways, bien que ces modes de transport utilisent eux aussi un réseau ferré.

Contexte ferroviaire et problématiques générales en zone dense

L'exploitation ferroviaire considère le réseau ferroviaire comme un ensemble de ressources partagées. Elle doit gérer l'accès à ces ressources en toute sécurité, tout en répondant aux objectifs de débit et de qualité de service attendus par le système exploité. Afin d'assurer la sécurité des circulations et protéger l'accès des trains aux voies, alors que les distances d'arrêt sont bien plus élevées que les distances de visibilité, l'exploitation ferroviaire s'appuie sur la signalisation et sur la réglementation. Ainsi, performance de l'exploitation et maîtrise de la sécurité sont étroitement liées.

En zone dense, l'exploitation ferroviaire est caractérisée par des débits très élevés, se traduisant par des intervalles réduits entre les circulations. La gestion de l'exploitation, pilotée par des centres opérationnels, assure la mise en œuvre du plan de transport, la gestion du matériel et des conducteurs, et la gestion de l'information-voyageur. La région Ile-de-France possède un réseau de transport ferré caractérisé par une zone très dense, située principalement dans un rayon de 20 km autour du centre de Paris. Ce réseau est composé de lignes urbaines de métros et de tramways, et de lignes suburbaines de trains lourds. Les trains suburbains (Transilien et RER) parcourent de grandes distances, et ont des fréquences hétérogènes de passage le long des lignes, avec des débits très élevés dans la

zone dense. Leur infrastructure peut dans cette zone être partagée avec des trains appartenant à des entités différentes (TGV, trains de fret…).

Les choix d'infrastructures et d'organisation qui ont été faits dans le passé pour les lignes suburbaines, privilégiant la capacité plutôt que la robustesse, ont conduit à atteindre la capacité maximale de ces lignes alors que le système doit actuellement accueillir un volume de passagers en forte croissance (3 % de voyageurs supplémentaires par an sur le réseau SNCF). L'exploitation ferroviaire doit en permanence s'adapter, notamment en ce qui concerne le débit des lignes et le temps de parcours. La signalisation et le pilotage manuel sont parmi les principaux facteurs limitants. L'exploitation doit en outre gérer des aléas très fréquents, sachant que des perturbations même minimes peuvent rapidement avoir des complications importantes en zone dense : propagation des retards sur différentes lignes, augmentation du nombre de voyageurs en attente sur les quais, augmentation du temps d'échange voyageurs. Certaines lignes partageant des portions de voie constituent, par ailleurs, des zones critiques.

Des modifications de l'infrastructure ferroviaire permettent de gagner en capacité et en robustesse. Mais elles demandent des investissements très élevés, et les capacités supplémentaires ainsi acquises sont généralement rapidement absorbées.

Intérêt des systèmes CBTC

La croissance actuelle du trafic ferroviaire en zone dense est difficilement compatible avec les modes d'exploitation classiques. Dans ce contexte, les systèmes de pilotage automatique présentent de nombreux avantages. Ils permettent la transmission d'information en temps réel, la réalisation d'arrêt très précis, la réalisation d'une conduite homogène entre les circulations, la réalisation d'intervalles très faibles entre les trains et donc une amélioration significative des performances, ceci avec une grande adaptabilité aux différents types de matériel roulant et d'infrastructure. Les systèmes de pilotage automatique permettent en outre la réduction des coûts d'exploitation, de maintenance et de dépense d'énergie.

Les systèmes dits « CBTC » (Communication Based Train Control) correspondent à la génération d'automatismes la plus récente. Ils sont capables de mettre en œuvre un pilotage automatique grâce à une localisation précise des trains, indépendamment de tout dispositif fixe de détection. Un système CBTC déployé sur une ligne s'interface avec la signalisation ferroviaire préexistante, le matériel roulant, le contrôle-commande de la traction, et le personnel. En plus des fonctions de localisation et de pilotage automatique, un système CBTC peut inclure un module de supervision de la ligne en charge d'adapter la marche des trains en fonction des objectifs d'exploitation et des aléas, améliorant ainsi la robustesse du trafic.

Les systèmes CBTC ont été initialement implémentés sur des systèmes de métros, dont le principal objectif d'exploitation est de maintenir un intervalle court et régulier entre les trains, auquel s'ajoute souvent un objectif énergétique pour optimiser la capacité de récupération de la ligne. Plus récemment, des projets d'implémentation de systèmes CBTC sur des lignes ferroviaires suburbaines ont vu le jour dans de grandes villes européennes. Ainsi, en Ile-de-France, SNCF doit mettre en service à partir de 2020 le système CBTC appelé « NExTEO » sur la ligne Eole (prolongement de la ligne E du RER).

Le déploiement d'un système CBTC sur une ligne ferroviaire suburbaine nécessite une réelle adaptation de ses fonctions et de ses automatismes. En particulier, les fonctions de supervision et de régulation doivent être adaptées aux modes d'exploitation ferroviaires en zone dense : réseau complexe et ouvert à des circulations externes à la ligne; objectif d'exploitation cherchant à privilégier la ponctualité plutôt que l'intervalle, sachant qu'en zone dense, cet objectif trouve vite ses limites face aux perturbations très fréquentes, et au volume de passagers transporté.

Face au problème de régulation, la recherche opérationnelle a produit un certain nombre de méthodes permettant de répondre aux perturbations. Ces méthodes ont été conçues en adéquation avec les objectifs et les contraintes du système réel. Dans le secteur métro, où les systèmes d'exploitation avancés sont déjà très présents, les méthodes de régulation ont été développées selon des niveaux très fins de modélisation et de commande de la marche des véhicules. Dans le secteur ferroviaire, elles sont généralement développées selon des niveaux de modélisation et de décision plutôt macroscopiques. Le déploiement de systèmes CBTC pour l'exploitation optimisée de lignes ferroviaires suburbaines implique un changement significatif des modes d'exploitation. L'adaptation des fonctions de supervision et régulation demeure de ce fait un objectif majeur. En tirant profit de l'état de l'art et des avancées faites dans les deux secteurs, cette adaptation doit concilier les principes d'exploitation ferroviaire et l'exigence de la zone dense. Elle doit également tenir compte de la complexité fonctionnelle du système CBTC et de ses interactions avec son environnement.

Principales contributions de la thèse

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE entre SNCF Réseau (Ingénierie et Projet / Département Système ferroviaire) et le Laboratoire des Signaux et des Systèmes de CentraleSupélec. S'appuyant sur les problématiques décrites précédemment, ils cherchent à contribuer à l'adaptation des fonctions de supervision et régulation des systèmes CBTC pour l'exploitation de lignes ferroviaires suburbaines, avec comme cas d'étude le système ferroviaire correspondant au système d'exploitation NExTEO.

La thèse s'articule autour des axes de recherche suivants :

- modéliser et simuler de façon réaliste, du point de vue fonctionnel et dynamique, un système ferroviaire équipé d'un automatisme CBTC;

- concevoir des fonctions de supervision et de régulation modulaires pour un système CBTC opérant, potentiellement de façon partielle, une ligne ferroviaire ;

- évaluer les stratégies de régulation ferroviaires actuelles, et les stratégies de régulations CBTC développées.

Organisation du manuscrit

Le mémoire s'articule de la manière suivante.

- Le Chapitre 1 présente le fonctionnement général, mais non exhaustif, d'un système ferroviaire, et plus particulièrement le lien étroit qui lie la signalisation et l'exploitation ferroviaire. Le but est de fournir les clés de compréhension nécessaires à la suite du mémoire. Le système ferroviaire correspondant au système d'exploitation NExTEO est décrit dans ce chapitre.

- Le Chapitre 2 propose un état de l'art des principaux modèles utilisés pour modéliser un système ferroviaire, et des principales stratégies de régulation développées, notamment dans les secteurs du ferroviaire lourd et du métro.

- Le Chapitre 3 présente d'une part l'architecture fonctionnelle du module de supervision et d'autre part la méthode de régulation conçus dans le cadre des travaux de thèse. Ces fonctions ont été construites pour pouvoir être intégrées à un système CBTC standard et sont adaptées aux spécificités de l'exploitation ferroviaire en zone dense.

- Le Chapitre 4 présente l'outil de simulation SNCF nommé « SIMONE ». Cet outil vise à simuler l'exploitation ferroviaire dans le cadre de scénarios complexes pouvant inclure des trains équipés d'un système CBTC, et des trains non-équipés. La participation aux phases de spécification, de conception, et d'implémentation de l'outil SIMONE a fait partie intégrante des activités de thèse et elle a apporté une vision « système » nécessaire à la compréhension du problème étudié.

- Enfin, le Chapitre 5 rapporte l'ensemble des résultats obtenus par simulation sur l'outil SIMONE. Les tests effectués ont principalement visé à évaluer les

performances des fonctions de supervision et de régulation proposées sur des scénarios de perturbations ordinaires mais conséquentes, avec un plan de transport de taille limitée.

Le manuscrit se termine par des perspectives de recherche intéressantes.

Publications

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont donné lieu aux communications suivantes.

Conférences internationales avec actes

(Pochet, Baro et Sandou 2016) Juliette Pochet, Sylvain Baro, Guillaume Sandou. Supervision and rescheduling of a mixed CBTC traffic on a suburban railway line. *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT 2016)*, Aug 2016, Birmingham, United Kingdom.

(Pochet, Baro et Sandou 2017) Juliette Pochet, Sylvain Baro, Guillaume Sandou. Automatic Train Supervision for a CBTC Suburban Railway Line Using Multiobjective Optimization. *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2017)*, Oct 2017, Yokohama, Japan.

Communication sans acte

Juliette Pochet. Performance et résilience d'une ligne RER équipée d'un automatisme CBTC. *DigiCosme Spring School 2016 on Hybrid Systems*, Mai 2017, Palaiseau, France

Articles en préparation

Article de journal en préparation « Automatic Train supervision for a CBTC Suburban Line partially equipped with a CBTC System »

Revue Générale de Chemins de Fer (RGCF) en préparation « Etude de performance d'une ligne ferroviaire suburbaine équipée d'un automatisme CBTC »

Présentations internes SNCF

Présentation des travaux à Patrick Jeantet, PDG de SNCF Réseau, 22/03/2017

Challenge Ma thèse en 180 Secondes « MT180 »

Journées doctorales de la SNCF

Chapitre 1

Système ferroviaire

Un système ferroviaire est composé de ressources d'infrastructure, de ressources humaines et de ressources matérielles. L'ensemble des ressources d'infrastructures ferroviaires compose le réseau ferroviaire. Une circulation ferroviaire est l'association d'un matériel roulant et d'une mission. L'accès des circulations aux ressources d'infrastructure est administré par le gestionnaire d'infrastructure. L'exploitation ferroviaire a pour rôle de mettre en œuvre le plan de transport construit à partir des allocations de ressources. En cas de dérive de la grille horaire vis-à-vis du plan de transport, l'exploitation est chargée de limiter l'impact de cette dérive et de maintenir des performances satisfaisantes, en accord avec les objectifs et les contraintes du système ferroviaire.

Les infrastructures ferroviaires comprennent la voie ferrée (51 000 km en France dont 30 000 km en service), les ouvrages d'art, le réseau électrique, le réseau de communication et de télécommunication et le système de signalisation ferroviaire. Ce dernier a un impact majeur sur les performances du système ferroviaire. Sa compréhension est nécessaire pour les études de performance du système.

Dans la première partie de ce chapitre nous détaillons le fonctionnement de la signalisation ferroviaire. Nous présenterons ensuite les grands principes de l'exploitation ferroviaire.

1.1 Signalisation ferroviaire

La signalisation ferroviaire contrôle et commande l'évolution de la voie pour l'aiguillage des trains, ainsi que l'évolution des trains sur la voie. La capacité théorique d'une infrastructure ferroviaire est directement liée à son système de signalisation.

La sécurité des circulations est la première priorité d'un système ferroviaire. On identifie cinq grandes problématiques de sécurité, principalement gérées par la signalisation ferroviaire :

- la protection d'un train contre un autre le suivant sur la même voie ;
- la protection d'un train contre un train convergent ;
- la protection d'un train contre une autre circulation venant en sens inverse sur une voie unique ou banalisée ;
- le déraillement, par exemple par excès de vitesse ou suite à la manœuvre d'un appareil de voie au passage d'un train ;
- la sécurité de croisement des routes et des voies ferrées.

Lorsque toutes les conditions de sécurité sont vérifiées, le système ferroviaire cherche ensuite à assurer la fluidité du trafic et le respect des horaires et des débits. Les choix techniques et les caractéristiques des systèmes composant la signalisation ont un impact direct sur les performances du système ferroviaire.

Nous décrivons dans la suite deux systèmes de signalisation existants : le système de signalisation ferroviaire classique du Réseau Ferré National (RFN) français et le système dit « CBTC » (Communication Based Train Control). Ces deux types de systèmes peuvent être déployés seuls sur un réseau ferroviaire. Ils peuvent également coexister et s'interfacer dans certaines applications.

1.1.1 Signalisation ferroviaire classique

Nous décrivons ici les principaux équipements et mécanismes de la signalisation ferroviaire classique française, permettant de comprendre son fonctionnement global. Pour plus d'informations, le lecteur intéressé peut se référer à (Schön, et al. 2013) et (Retiveau 1987).

La signalisation répond à deux grands besoins : assurer la sécurité en parant les risques ferroviaires, et fluidifier le trafic. Pour cela, la signalisation porte plusieurs fonctions essentielles :

- la détection des trains ;
- l'espacement des trains ;
- l'établissement des itinéraires ;
- l'enclenchement des équipements ;
- et le contrôle de vitesse.

Ces fonctions sont détaillées dans la suite de ce chapitre.

1.1.1.1 Équipements

Signaux lumineux latéraux

Les signaux lumineux latéraux sont disposés le long de la voie pour transmettre des informations aux agents de conduite. Ils composent la « signalisation latérale ». La signalisation latérale comporte deux principaux types de signaux : les signaux de sécurité appelés « Carré » et les signaux d'espacement.

Un signal Carré permet de protéger les appareils de voie ou certaines parties de voie. Il est positionné en amont de la zone à protéger. Lorsque le signal Carré est « ouvert », le train est autorisé à franchir le signal. Lorsque le Carré est « fermé », le train doit s'arrêter en amont du signal.

Pour gérer l'espacement des trains de même sens, les sections de lignes sont divisées en cantons et les signaux d'espacement sont utilisés pour gérer l'accès aux cantons. Le block automatique lumineux est un système de signaux d'espacement largement déployé sur le Réseau Ferré National (voir. 1.1.1.2).

Circuits de voie

Le circuit de voie (CdV) est un circuit électrique situé sur la voie. Il est utilisé pour la détection des circulations. La ligne de transport entre le générateur et le récepteur est constituée par les deux files de rails de roulement. Ces deux files sont isolées l'une par rapport à l'autre. Lorsqu'une circulation se trouve sur le circuit de voie, les essieux

établissent une liaison électrique de faible impédance entre les rails. L'alimentation insuffisante du relais entraîne alors sa désexcitation.

Appareils de voie

Les appareils de voies, plus communément appelés aiguillages, permettent au train de circuler d'une voie à une autre, ou sur une voie qui en croise une autre. Ils peuvent aussi assurer une fonction de protection vis-à-vis d'itinéraires incompatibles.

Les manœuvres des appareils de voie sont réalisées depuis les postes d'aiguillage ou les postes de commande. Lorsqu'un appareil de voie est manœuvré, il est nécessaire de contrôler que l'aiguillage est bien dans la position commandée, afin de garantir la sécurité de la circulation qui va l'emprunter. L'intervalle entre la lame d'aiguille et le rail doit être inférieur à 6 mm pour que la position de l'aiguille soit détectée. Lorsqu'une aiguille est correctement positionnée et contrôlée, il faut ensuite la verrouiller afin de garantir son immobilité lors du passage des circulations. Ce verrouillage est réalisé par les enclenchements (voir. 1.1.1.2).

Certains appareils de voie sont dits conjugués. Deux aiguilles conjuguées sont contraintes de coordonner leurs déplacements. Sur la Figure 1, les aiguilles 1 et 2 sont conjuguées. Si l'une des deux aiguilles est manœuvrée vers la position droite, l'autre aiguille sera automatiquement manœuvrée vers la position droite. Il en est de même pour la position gauche.

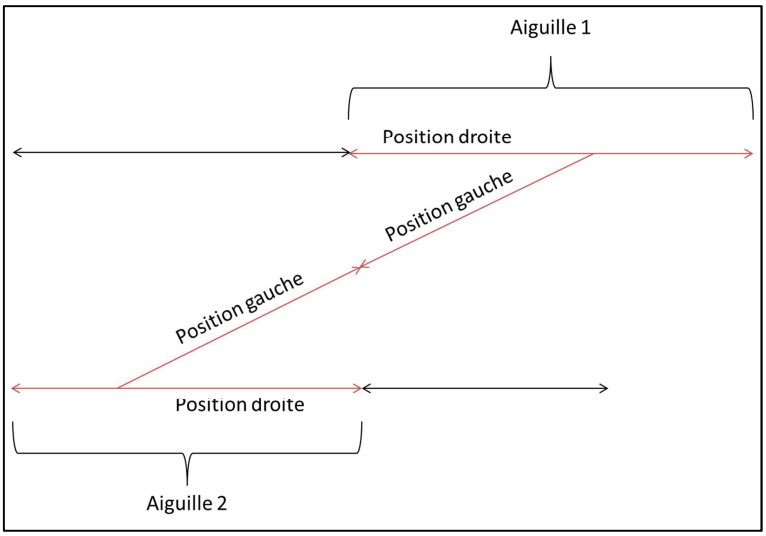

Figure 1 : Aiguilles conjuguées (en rouge)

1.1.1.2 Fonctions

Détection des trains

La détection des trains sur la voie se fait au moyen de circuits de voie. Un circuit de voie (CdV) permet de détecter automatiquement la présence ou l'absence d'un train sur une portion de voie déterminée. L'état non excité du récepteur indique l'occupation de la voie. L'état excité indique l'absence de train sur la voie. Ainsi en cas de coupure d'alimentation, l'état du récepteur produit le même effet qu'une occupation de voie, ce qui garantit la sécurité de fonctionnement du récepteur.

Les circuits de voie sont installés tout au long de la voie. Au niveau d'un aiguillage, un circuit de voie doit couvrir l'ensemble de l'appareil de voie (voir Figure 2), de la pointe au talon. Pour permettre le bon fonctionnement des circuits de voie, il est nécessaire de les séparer électriquement à l'aide de joints isolants. La portion de voie couverte par un circuit de voie, délimitée par deux joints isolants, est appelée un canton. La détection des trains s'effectue donc canton par canton (voir Figure 2).

L'occupation des cantons est une information essentielle pour le bon fonctionnement du système ferroviaire. Cette information est exploitée pour l'espacement des trains (cantonnement fixe), pour l'établissement des itinéraires, pour les enclenchements ou encore pour la détection de rail cassé. L'occupation des cantons est également affichée sur le tableau de contrôle optique (TCO) d'un poste d'aiguillage. La longueur des cantons sur une voie détermine la précision de la localisation des trains sur cette voie. Elle dépend des besoins de la ligne (espacement des trains, vitesse) et peut varier de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres (voire quelques dizaines de kilomètres sur des installations anciennes). Plus les cantons d'une ligne sont longs, plus l'espacement entre les trains sera important, et plus la vitesse autorisée pourra être élevée.

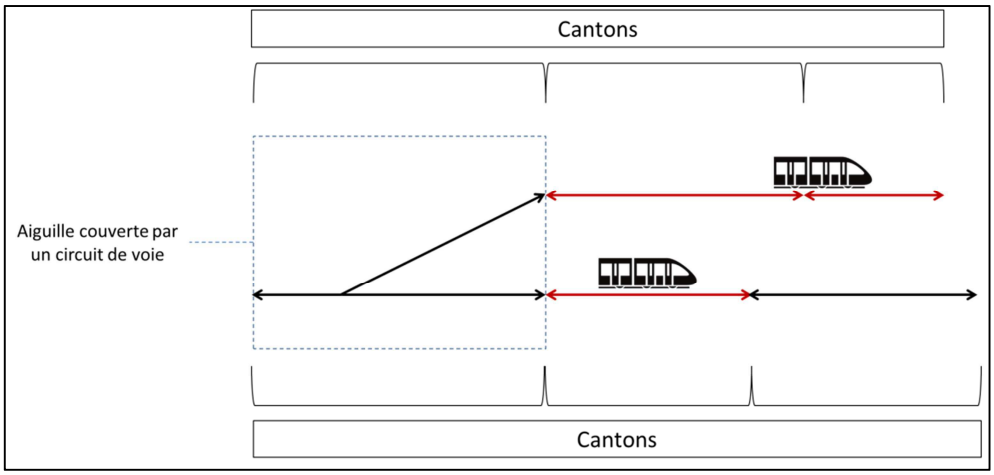

Figure 2 : Détection des trains par circuits de voie

Espacement des trains

Les circulations ferroviaires sont caractérisées par des distances d'arrêt élevées (de l'ordre de 700 m pour un train type Transilien roulant à 120 km/h dans les meilleures conditions de freinage). La distance de visibilité d'un conducteur est plus courte que la distance d'arrêt du train. Il serait inacceptable de faire rouler les trains en marche à vue (vitesse inférieure à 30 km/h pour laquelle la distance d'arrêt est inférieure à la distance de visibilité). L'espacement des trains est donc assuré par la signalisation ferroviaire, sur la base de l'information d'occupation des cantons.

En signalisation classique, des installations au sol gèrent la distance entre les trains successifs pour éviter tout risque de rattrapage. Des signaux sont présentés au train, ils indiquent au conducteur la conduite à tenir et assurent qu'il y ait toujours une distance telle que le train puisse s'arrêter en toute sécurité si le train précédent est arrêté.

L'espacement basé sur la distance consiste en diviser la voie en cantons (ou blocks) dans chacun desquels n'est admis normalement qu'un seul train. Chaque canton comporte un signal d'arrêt lorsque le canton est occupé. Dans certains cas, la pénétration d'une circulation dans un canton occupé est autorisée en obéissant à quelques règles de précautions spécifiques. On parle alors de cantonnement permissif. La gestion de ces blocks est réalisée de façon automatique sur les installations de signalisation modernes. Ces dernières permettent de commander automatiquement les signaux de protection des cantons suite à la détection des trains et de leur intégrité.

En France, de nombreuses lignes sont équipées de blocks automatiques lumineux (BAL) permissifs à cantons courts (de l'ordre de 1,5 km, au maximum 3 km). Sur la majorité de ces lignes, le BAL est au minimum à trois indications (voir Figure 3) : le sémaphore (rouge) lorsque le canton est occupé, l'avertissement (jaune) lorsque le canton est libre mais que le suivant affiche un sémaphore, et la voie libre (vert) lorsque le canton est libre et que le canton suivant est à voie libre ou à l'avertissement. Lorsque le sémaphore (rouge) est présenté, le train doit marquer un arrêt avant de pouvoir reprendre sa marche à vitesse réduite, en « marche à vue » (30 km/h). Pour les lignes où la vitesse est supérieure à 160 km/h, un feu clignotant annonçant un avertissement au prochain signal est ajouté aux indications présentées.

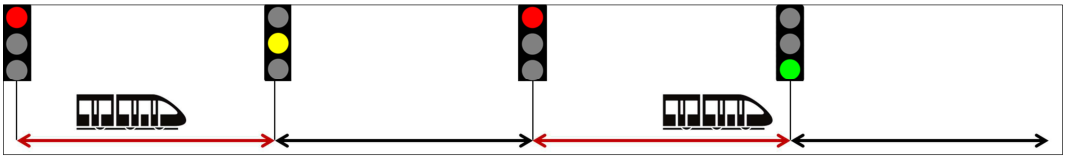

Figure 3 : Blocks automatiques lumineux (BAL) à 3 indications

Généralement, la longueur d'un canton ne peut être inférieure à la distance d'arrêt. Certaines sections de lignes très denses peuvent être équipées de cantons plus courts. Dans ce cas, le feu clignotant est également utilisé. La longueur d'un canton est alors d'environ la moitié de la distance d'arrêt.

Il est important de ne pas confondre les signaux d'espacement, et en particulier le sémaphore, avec le signal Carré. Le signal Carré est un signal de protection qui ne peut en aucun cas être franchi. Les signaux d'espacement permettent de s'affranchir de la distance de visibilité du conducteur et de maintenir un intervalle adapté entre les trains. Un sémaphore peut être franchi, après arrêt, sous certaines conditions.

Etablissement des itinéraires

Définition d'un itinéraire

Un itinéraire est une section de voie entre deux signaux Carrés successifs. Il peut comporter des aiguilles qui devront être positionnées correctement et verrouillées dans la position requise pour permettre le passage d'une circulation. Il peut également comporter des aiguilles dites de protection et des aiguilles conjuguées. Ces aiguilles ne sont pas parcourues par l'itinéraire mais devront néanmoins être positionnées correctement et verrouillées dans la position requise pour permettre le passage d'une circulation en toute sécurité. Le Carré origine autorise l'entrée d'une circulation sur un itinéraire lorsque l'itinéraire est formé et que toutes les conditions de sécurité sont réunies. Lorsque le Carré origine s'ouvre, on dit que l'itinéraire est établi.

Tout itinéraire est caractérisé par :

- un carré origine (et donc un sens de circulation) ;
- un ensemble de circuits de voie qui couvrent son parcours ;
- une zone d'approche ;
- une zone d'espacement automatique ;
- une zone de déclenchement ;
- un ensemble d'itinéraires incompatibles ;
- une pédale de destruction automatique ;
- un contrôle de passage des trains ;

- possiblement des aiguilles parcourues, pour lesquelles est définie une position requise ;

- possiblement des aiguilles non parcourues (de protection ou conjuguées), pour lesquelles est définie une position requise.

L'ensemble des itinéraires incompatibles d'un itinéraire i est composé de :

- tout itinéraire ayant un ou plusieurs circuits de voie en commun avec l'itinéraire i (notamment les itinéraires de sens inverse) ;

- tout itinéraire requérant une position d'aiguille (parcourue ou non parcourue) incompatible avec les positions requises par l'itinéraire i.

Les différentes zones d'un itinéraire citées ci-dessus sont définies dans la suite.

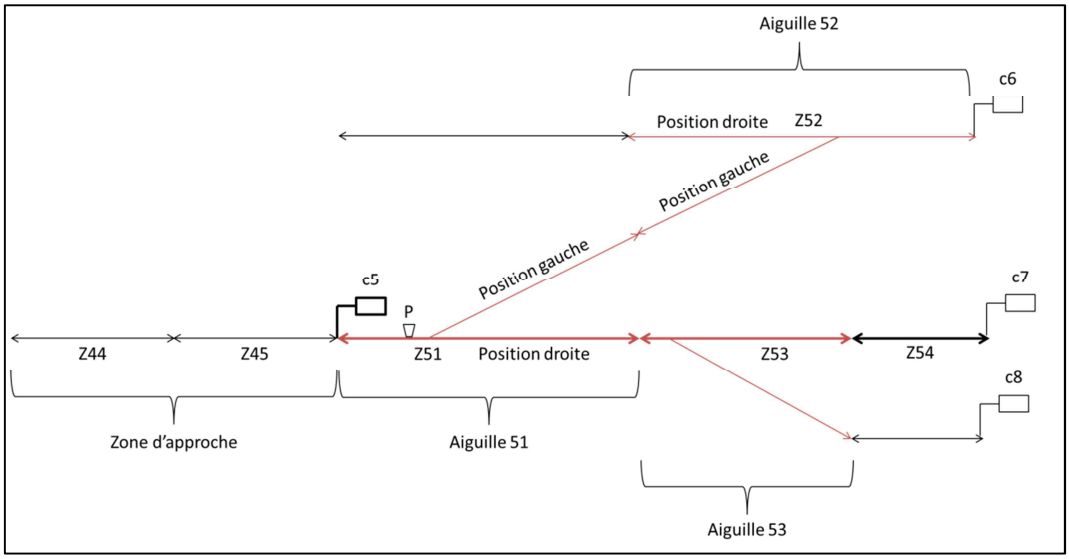

Figure 4 : Définition d'un itinéraire ferroviaire et de ses caractéristiques

La Figure 4 illustre la notion d'itinéraire ferroviaire. Un canton y est représenté par un segment fléché à ses extrémités, ou par une paire de segments dans le cas d'un canton incluant une aiguille (en rouge). L'aiguille 52 est conjuguée à l'aiguille 51. L'itinéraire c5-c7, tracé en gras, est caractérisé par :

- son Carré origine c5 ;

- l'ensemble des cantons composant son parcours {Z51, Z53, Z54} ;

- la zone d'approche {Z44, Z45} ;

- la zone d'espacement automatique {Z51} ;

- la zone de déclenchement non représentée sur la figure ;
- l'ensemble des itinéraires incompatibles, dont {c5-c6, c5-c8} représentés sur la figure ;
- la pédale de destruction P située sur Z51 ;
- un contrôle de passage du train non représenté sur la figure ;
- l'ensemble d'aiguilles parcourues et leurs positions requises {Aiguille 51 : position droite, Aiguille 53 : position gauche} ;
- l'ensemble d'aiguilles non parcourues et leurs positions requises {Aiguille 52 : position droite}.

Zones d'itinéraire

Nous définissons ici les zones caractérisant un itinéraire.

Zone de déclenchement (ZDE)

La zone de déclenchement est associée à un signal origine d'itinéraire (matérialisée par un signal Carré). Elle est située en amont de cette origine. Lorsqu'un train pénètre dans la zone de déclenchement, la signalisation commande l'itinéraire alloué au train occupant la zone et correspondant au signal origine considéré.

Zone d'approche (ZAP)

La zone d'approche est associée à une origine d'itinéraire (matérialisée par un signal Carré). Elle débute en principe 500 m en amont d'un signal origine d'itinéraire et se termine au niveau de cette origine. Elle représente la zone dans laquelle un train ne serait pas capable de s'arrêter normalement si le signal Carré venait à se fermer. S'il est nécessaire de fermer le Carré origine alors qu'un train se situe déjà dans la zone d'approche, alors l'enclenchement d'approche garantit l'entrée en sécurité du train dans l'itinéraire, malgré la fermeture du signal de protection.

Zone d'espacement automatique (ZEA)

La zone d'espacement automatique est associée à une origine d'itinéraire (matérialisée par un signal Carré). Elle contient toutes les zones élémentaires se situant entre la zone contenant le Carré origine et la zone contenant la pédale de destruction automatique incluses. Lorsque la zone d'espacement automatique est occupée, le Carré associé est fermé ; cette zone assure ainsi l'espacement minimal entre les trains.

Séquence d'établissement d'un itinéraire

Une circulation peut emprunter un itinéraire seulement si celui-ci est établi. La séquence d'établissement d'un itinéraire peut être décrite en cinq étapes :

Commande de l'itinéraire

L'itinéraire est commandé automatiquement lorsque la circulation occupe la zone de déclenchement correspondante.

Préparation de l'itinéraire

Les appareils de voies sont commandés vers la position requise par l'itinéraire commandé. Les aiguilles se positionnent en conséquence. L'itinéraire est alors « préparé ».

Formation de l'itinéraire

Le contrôle des appareils de voies est valide, les enclenchements de l'itinéraire sont activés. L'itinéraire est alors « formé ».

Établissement de l'itinéraire

L'itinéraire peut être ouvert dans le respect des conditions de sécurité. L'ouverture du signal de protection (Carré origine) de l'itinéraire est commandée, le signal devient permissif. L'itinéraire est alors « établi ».

Destruction de l'itinéraire

Un itinéraire peut être commandé en « tracé permanent ». Dans ce cas, il se maintiendra une fois le train passé et ne sera détruit que lorsque le train aura complètement quitté les zones composant l'itinéraire. Un itinéraire peut également être commandé en « destruction automatique ». Dans ce cas, l'itinéraire sera détruit par le passage du train sur une pédale de destruction automatique, généralement située au début de l'itinéraire. Lorsque l'itinéraire est « détruit », il est possible de commander un itinéraire incompatible avec celui-ci. La destruction d'un itinéraire autorise uniquement la commande d'un nouvel itinéraire, les étapes suivantes (préparation, formation, établissement) permettant d'établir le nouvel itinéraire ne seront déclenchées que lorsque les conditions correspondantes sont vérifiées. En d'autres termes, la destruction d'un itinéraire seule ne permet pas de libérer les enclenchements. Ces derniers seront libérés au plus tôt, dans le respect des conditions de sécurité. Une fois l'itinéraire détruit, la libération des CdV de transit permettra de déplacer les aiguilles (selon le principe du transit souple défini dans la suite) ce qui permettra de préparer, former, et établir le nouvel itinéraire.

Il est aussi possible de commander la destruction d'itinéraire sans que celui-ci ait été parcouru. On parle alors de destruction manuelle.

Enclenchement

Les problématiques de sécurité ferroviaire ont d'abord été gérées par la mise en place d'une réglementation à laquelle sont ensuite venus s'ajouter des enclenchements.

Les enclenchements sont des réalisations physiques d'incompatibilités entre ressources partagées par plusieurs itinéraires. Ils interdisent la manœuvre des signaux, des appareils de voies et des automatismes dans des conditions incompatibles avec la sécurité des circulations, puis sont libérés au plus tôt, dans le respect des conditions de sécurité.

Les enclenchements peuvent être mécaniques, électriques ou informatiques. Ils agissent généralement, soit par immobilisation d'un organe de commande (levier), soit par coupure de circuit de commande de façon à provoquer la fermeture d'un signal ou à empêcher son ouverture ou interdire la manœuvre d'une aiguille. Ils peuvent être intégrés dans un système automatique fonctionnant sans intervention humaine. Dans le cadre des travaux présentés, il est considéré que tous les enclenchements sont automatiques.

Ainsi, les enclenchements assurent un grand nombre de fonctions permettant une exploitation ferroviaire efficace et facilitent l'application de consignes devenues inapplicables dans les postes de signalisation modernes en raison de l'importance des installations, de la multiplicité des mouvements et des nombreuses tâches qui en résultent pour les aiguilleurs. Il est nécessaire de définir les incompatibilités entre ressources assurant la sécurité des circulations, à partir du plan de voie et du programme d'exploitation tout en minimisant les contraintes sur l'exploitation.

Les enclenchements peuvent être classés en deux catégories :

- les enclenchements liés au passage des circulations ;
- les enclenchements entre appareils.

Il existe de nombreux types d'enclenchement, dont certains sont spécifiques à des configurations ou des modes d'exploitation particuliers. Nous nous limitons ici à la description des principaux enclenchements implémentés sur le Réseau Ferré National. Pour plus d'informations sur l'ensemble des enclenchements existant sur le RFN, le lecteur intéressé peut se référer à (Retiveau 1987).

Enclenchement d'approche

Un train situé dans la zone d'approche d'un itinéraire ne serait potentiellement pas capable de s'arrêter normalement si le signal Carré, origine de l'itinéraire, venait à se fermer devant lui. Dans certaines situations particulières, il peut être nécessaire de fermer un signal Carré alors qu'un train se situe dans la zone d'approche. L'enclenchement d'approche permet de

gérer ce genre de situations en toute sécurité. Il assure que lorsque la zone d'approche est occupée, il est impossible de détruire directement l'itinéraire (ce qui implique la fermeture du Carré). Il est cependant possible de commander la fermeture du Carré. L'itinéraire ne peut alors être détruit que par une procédure impliquant une temporisation entre la fermeture du Carré et la destruction de l'itinéraire. Ainsi, la ZAP permet d'empêcher la destruction d'un itinéraire lorsqu'un train approche de son origine. Si un signal Carré fermé lui est présenté dans cette zone, l'enclenchement permet de garantir que le train pourra entrer en toute sécurité sur l'itinéraire s'il n'est pas capable de s'arrêter avant le signal. On s'assure ainsi qu'aucun mouvement d'aiguille ne sera autorisé lors du passage du train sur l'itinéraire.

L'enclenchement d'approche est libéré automatiquement :

- lorsque la zone d'approche n'est pas occupée ;
- lorsque la zone d'approche est occupée, si le canton aval est occupé, ou si le Carré est fermé automatiquement (par un autre évènement entrainant sa fermeture).

Enclenchement des aiguillages

Enclenchement par zone

L'enclenchement d'un aiguillage par zone consiste à l'immobiliser pendant l'occupation de la zone élémentaire couvrant cet aiguillage.

Enclenchement par transit

Chaque zone d'aiguillage est associée à un transit. L'enclenchement de transit assure qu'un aiguillage est immobilisé tant que le transit correspondant est actif. L'activation d'un transit s'effectue lors de la formation d'un itinéraire incluant le transit. La désactivation d'un transit s'effectue lorsque les conditions suivantes sont vérifiées :

- l'itinéraire n'est ni établi, ni formé ;
- la zone (c'est-à-dire le circuit de voie) correspondant au transit est libre ;
- le transit amont est lui-même inactif, ou toute aiguille couverte par le transit amont est en position de divergence vis-à-vis du transit actif.

L'enclenchement de transit permet de réaliser le « transit souple ».

Transit souple

En transit souple, les aiguillages sont libérés au fur et à mesure de l'évolution du train sur l'itinéraire. Le transit souple permet donc de libérer les aiguillages au plus tôt, dans le respect des conditions de sécurité, permettant ainsi de préparer au plus tôt un itinéraire pour le train suivant, au fur et à mesure de l'avancée du train précédent. Une fois l'itinéraire suivant complètement préparé, il pourra être formé puis établi afin d'autoriser la circulation du train suivant.

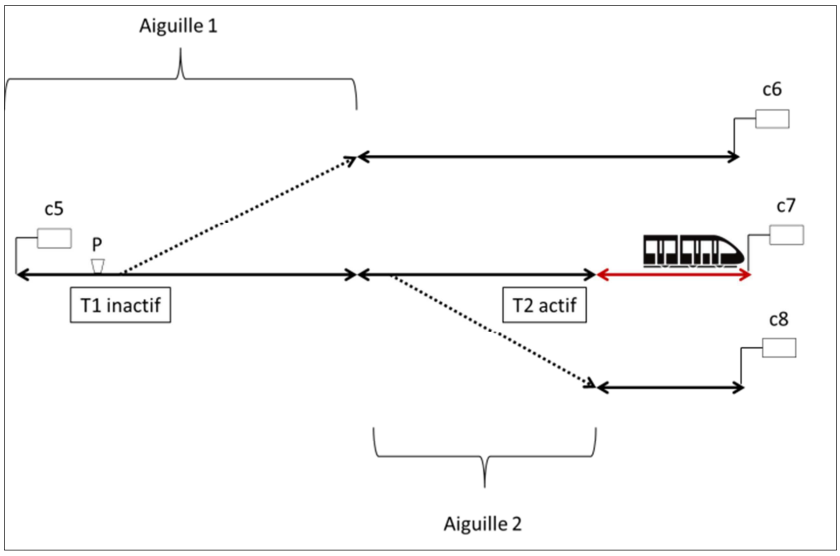

Figure 5 : Conditions de désactivation d'un transit correspondant à un aiguillage - Cas du transit amont inactif

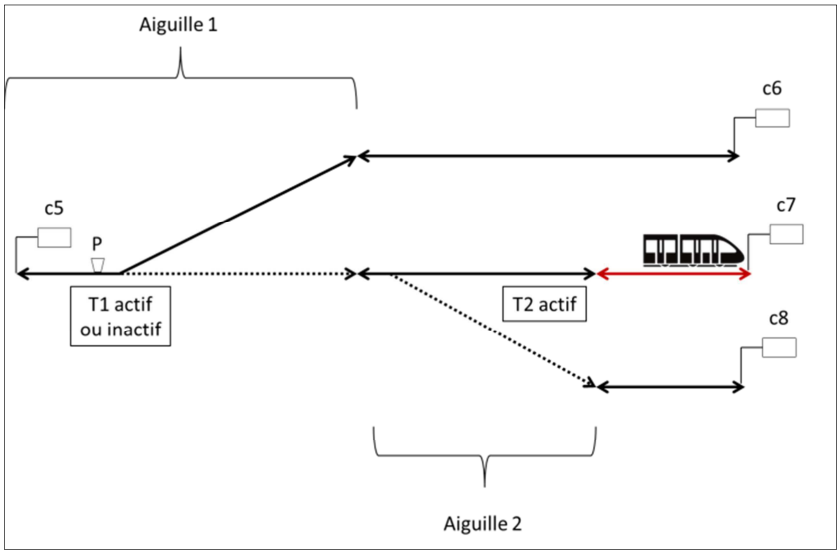

Figure 6 : Conditions de désactivation d'un transit correspondant à une aiguille - Cas de l'aiguille amont en position divergente

Sur la Figure 5 et la Figure 6, un circuit de voie (CdV) est représenté par un segment (une paire de segments dans le cas d'un CdV correspondant à une aiguille) fléché à ses

extrémités. Le train représenté emprunte l'itinéraire c5-c7, et occupe la dernière zone de l'itinéraire (zone occupée en rouge). Cette zone ne correspond à aucune aiguille. L'itinéraire c5-c7 comporte deux aiguilles, l'aiguille 1 et l'aiguille 2, comportant chacune un transit, respectivement T1 et T2. L'itinéraire c5-c7 a été détruit lors du passage du train sur la pédale P en début d'itinéraire. Sur la Figure 5, les conditions permettant la désactivation de T2 sont vérifiées : l'itinéraire est détruit, la zone correspondant à l'aiguille est libre (zone libre en noir). L'aiguille amont (aiguille 1) est dans une position convergente vis-à-vis de l'aiguille 2, mais le transit amont T1 est inactif. Le transit T1 a été précédemment désactivé car il répondait aux mêmes conditions. Le transit T2 va donc passer à l'état inactif. Sur la Figure 6, les conditions permettant la désactivation de T2 sont vérifiées : l'itinéraire est détruit, la zone correspondant à l'aiguille est libre (zone libre en noir). L'aiguille amont (aiguille 1) est dans une position divergente vis-à-vis de l'aiguille 2. Quel que soit l'état du transit T1, le transit T2 va passer à l'état inactif. La Figure 6 peut représenter le cas suivant : suite à la désactivation du transit T2 dans la configuration de la Figure 5, l'itinéraire c5-c6 a été commandé pour le train suivant (l'itinéraire c5-c7 étant détruit). L'aiguille 1 s'est déplacée lors de la préparation de l'itinéraire c5-c6 dès la libération du transit T1. Les enclenchements ont été mis en œuvre lors de la formation de l'itinéraire c5-c6. On a donc l'aiguille 1 dans une position divergente vis-à-vis de l'aiguille 2, et le transit T1 est actif. Finalement, l'itinéraire c5-c6 peut être établi, le train suivant peut circuler alors que le train représenté n'a pas encore dégagé l'itinéraire c5-c7.

La libération des transits au fur et à mesure constitue le transit souple et permet de libérer les aiguillages au plus tôt, dans le respect des conditions de sécurité, afin d'établir dès que possible les itinéraires pour les trains suivants.

Enclenchement de sens

L'enclenchement de sens interdit à deux circulations de sens contraire l'accès à une même portion de voie. Il intervient directement au niveau de la commande des signaux Carré : il interdit l'ouverture simultanée de deux signaux Carré, origines de deux itinéraires partageant une même portion de voie. Ainsi, l'enclenchement de sens n'interdit pas la préparation et la formation d'un itinéraire si les conditions de sécurité associées sont vérifiées.

Contrôle de vitesse

Le contrôle de vitesse est réalisé sur ligne classique par un système appelé KVB (Contrôle de vitesse par balises). Le KVB contrôle automatiquement la vitesse des circulations et le franchissement des signaux fermés. Il comprend des balises, positionnées au sol entre les rails, et qui transmettent un ensemble d'informations au système embarqué lors du passage d'un train. Ces informations comprennent des caractéristiques locales de la voie, ainsi que

l'état et la position des signaux. A partir de ces données, le système embarqué construit une première courbe d'alerte correspondant à la vitesse limite autorisée, et une seconde courbe de contrôle correspondant à la vitesse au-delà de laquelle le freinage de service ne permet plus de ramener la vitesse du train à une valeur acceptable. Lorsque la vitesse du train dépasse la première courbe de vitesse, le KVB émet un signal indiquant au conducteur qu'il est en survitesse et qu'il doit au plus tôt ramener sa vitesse à une valeur autorisée. Le dépassement de la deuxième courbe entraîne le déclenchement automatique du freinage d'urgence du train. Le contrôle de vitesse réalisé par le KVB est continu entre deux balises, les données utilisées sont mises à jour au passage des balises.

1.1.1.3 Signalisation ferroviaire classique en zone dense

En zone dense, la signalisation ferroviaire est adaptée aux besoins de l'exploitation. Une réduction de la longueur des cantons de block automatiques permet aux trains de circuler à intervalles plus rapprochés (voir Figure 7). La longueur des cantons dépend :

- du débit à obtenir sur la ligne ;
- de la vitesse des circulations et de leur qualité de freinage ;
- du profil de la ligne.

Néanmoins, une réduction de la longueur des cantons implique une réduction de la vitesse de ligne ; en effet, les distances d'arrêt, directement liées à la distance à la fin du canton, sont également réduites.

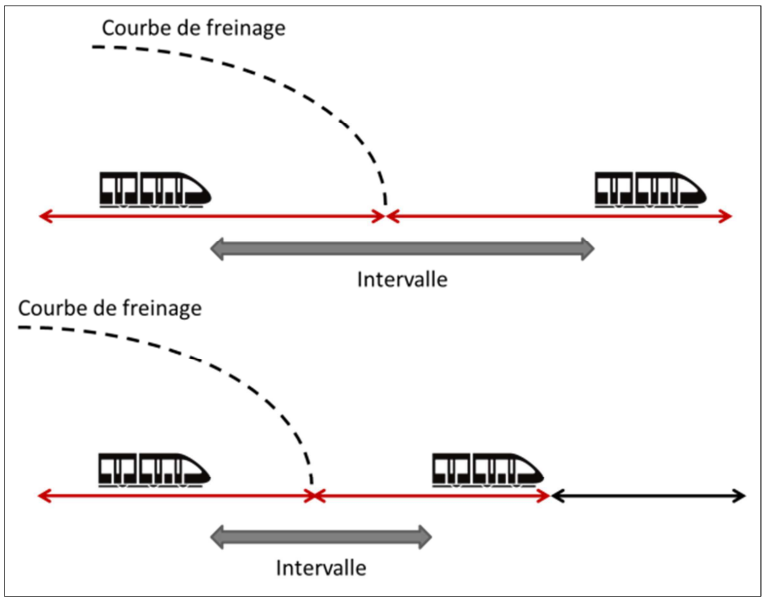

Figure 7 : Réduction de la longueur des cantons pour permettre un intervalle plus rapproché entre les trains

Le système de contrôle de vitesse KVB a également été adapté à la zone dense. Dans le système KVB, la transmission de données s'effectue ponctuellement lors du passage du train sur une balise. En zone dense, l'état des signaux évolue plus rapidement car le trafic est plus dense, et les cantons plus courts. Afin de ne pas pénaliser la vitesse du train lorsque cela n'est pas nécessaire, il faut que la transmission de données s'effectue en continu pour prendre en compte l'état réel des signaux. L'adaptation du système KVB est nommée KVBP (Contrôle de Vitesse par Balises pour les Prolongements). La transmission des données du sol vers le bord s'effectue en continu, par un courant codé circulant sur les rails. Le système KVBP permet donc aux trains de circuler à intervalle plus rapproché en appliquant un contrôle de vitesse construit à partir de l'état réel des signaux.

1.1.2 Système « CBTC »

Les systèmes CBTC (Communication-Based Train Control) correspondent à la nouvelle génération d'automatismes pour le contrôle-commande des trains. Le fonctionnement d'un système CBTC s'appuie sur une communication continue entre chaque train (équipements dits « bord »), et des équipements fixes (équipements dits « sol »). La communication continue s'effectue par un canal de communication bord-sol continu, bidirectionnel, et à haut débit. Elle permet la transmission d'informations du bord au sol et du sol au bord. La caractéristique principale du système CBTC est de se baser sur une localisation continue des trains, indépendamment de tout dispositif fixe de détection matérielle, pour réaliser le contrôle-commande des trains.

1.1.2.1 Localisation et vitesse

Le fonctionnement du système CBTC est basé sur la détermination de la localisation et de la vitesse des trains, indépendamment des équipements de voie utilisés dans la signalisation classique (notamment des circuits de voie). Le système CBTC attribue la responsabilité de localiser le train au système embarqué du train lui-même. La vitesse et la localisation des trains sont déterminées grâce à une combinaison de systèmes de mesures. Une balise constitue un point de référence fixe positionné au niveau des rails. Lorsqu'un train passe au-dessus d'une balise, l'information de localisation est transmise au système embarqué. Entre les balises, la localisation et la vitesse sont estimées en continu par le système d'odométrie embarqué. Les erreurs d'estimation sont corrigées au passage de la balise suivante.

La localisation embarquée permet un niveau de précision plus élevé. Ce niveau de précision est critique pour la sécurité et le bon fonctionnement du système. Le standard IEEE (IEEE Standard 1474.1 2004) recommande une précision comprise entre 5 et 10 m. On peut noter

ici que des systèmes de géolocalisation de type GPS (Global Positionning System) ne sont pas compatibles avec les exigences de sécurité et fonctionnelles du système CBTC.

1.1.2.2 Composants

Un système CBTC est composé de trois grands blocs fonctionnels (voir Figure 8) : la protection des trains (ATP pour Automatic Train Protection), le pilotage automatique (ATO pour Automatique Train Operation) et la supervision des trains (ATS pour Automatic Train Supervision). Les fonctions du système sont réparties entre des calculateurs embarqués (à bord des trains), et des calculateurs fixes (au bord de la voie ou dans des locaux techniques).

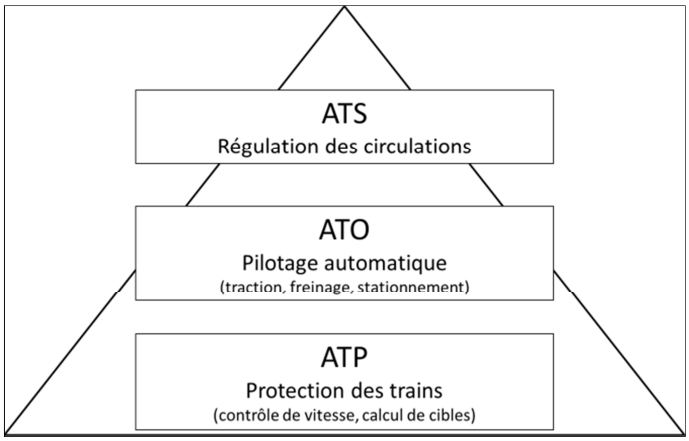

Figure 8 : Blocs fonctionnels d'un système CBTC

Protection automatique des trains (Automatic Train Protection ou « ATP »)

La protection automatique des trains (ATP) est le sous-système qui garantit la sécurité des trains. Les fonctions du module ATP sont réparties entre des équipements au sol et des équipements embarqués. Les fonctions de protection sont généralement la protection anticollision, la protection contre la survitesse, le contrôle des portes, la gestion de l'évacuation, la gestion des communications avec les trains. La finalité de la protection automatique est d'élaborer une enveloppe de sécurité dans laquelle le train peut évoluer. Cette enveloppe de sécurité est constituée du domaine de marche et de la vitesse maximale autorisés. Le domaine de marche autorisé détermine la zone où le train peut circuler en toute sécurité. Il est la base de la protection anticollision. La fin du domaine de marche, aussi appelé « point à protéger », est la combinaison des contraintes d'espacement vis-à-vis du train aval et des contraintes de protection des itinéraires (respect des signaux Carrés).

Conduite automatique des trains (Automatic Train Operation ou « ATO »)

La conduite automatique (ATO) est un sous-système non sécuritaire opérant le train en pilotage automatique. Les fonctions du module ATO sont réparties entre des équipements au sol et des équipements embarqués. La conduite automatique regroupe l'ensemble des fonctions qui permettent de se substituer totalement ou partiellement à l'agent de conduite : la commande de traction, la commande de freinage, l'asservissement de la conduite, la commande des portes, la commande de la destination, la commande du temps de stationnement. Ces fonctions, non sécuritaires, ne peuvent être mises en œuvre que dans l'enveloppe de sécurité définie par la protection automatique. Par ailleurs, la conduite automatique peut proposer différents modes de conduite en fonction des conditions d'exploitation.

Supervision automatiques des trains (Automatic Train Supervision ou « ATS »)

La supervision automatique (ATS) est un système non-sécuritaire qui orchestre les opérations d'exploitation. Le module ATS peut être absent du système CBTC selon les projets. Lorsque la supervision automatique est présente, ses fonctions sont portées par des équipements au sol uniquement. Grâce à la connaissance globale de la localisation des trains, l'ATS adresse des commandes de régulation pour ajuster les services et les performances du système de transport en temps réel. L'ATS prend donc des décisions en temps réel pour répondre aux objectifs d'exploitation en situation nominale, ou pour résorber une situation perturbée.

Contrôle automatique des trains (Automatic Train Control ou « ATC »)

Le contrôle automatique des trains est un ensemble de sous-systèmes qui regroupe une partie ou la totalité des trois blocs fonctionnels ATP, ATO, ATS selon l'architecture du système développé. L'ATC inclut à minima la protection automatique des trains (ATP).

Le fonctionnement de l'ATC est fortement dépendant du système de communication du CBTC. Chaque train envoie en continu sa localisation, sa vitesse et son mode de conduite aux équipements fixes ATC-Sol. A partir des informations envoyées par tous les trains, l'ATC-Sol calcule pour chaque train son enveloppe de sécurité, c'est-à-dire sa vitesse maximale et son domaine de marche autorisés. L'ATC-Sol envoie ces informations aux équipements embarqués du train (ATC-Bord). A partir de ces informations, l'ATC-Bord calcule la vitesse cible du train qui respecte l'enveloppe de sécurité transmise.

Communication

Le système CBTC intègre un système de communication continue radio sur lequel s'appuient les principales fonctionnalités des modules ATP, ATO, et ATS (voir Figure 9). En particulier, la fonction de localisation est portée par le système embarqué du train. La localisation calculée est ensuite transmise aux équipements au sol grâce au canal de communication. L'intervalle entre les trains étant très réduit, il est essentiel qu'un train envoie sa localisation et qu'il reçoive son domaine de marche et sa vitesse autorisés à temps. Des erreurs survenant sur le canal de communication aboutissent à des erreurs (retard ou pertes) de transmissions des informations. Pour prévenir tout risque inacceptable, on attribue une durée de vie aux informations à communiquer. Lorsqu'une information doit être utilisée alors qu'elle est expirée, le système déclenche un freinage d'urgence.

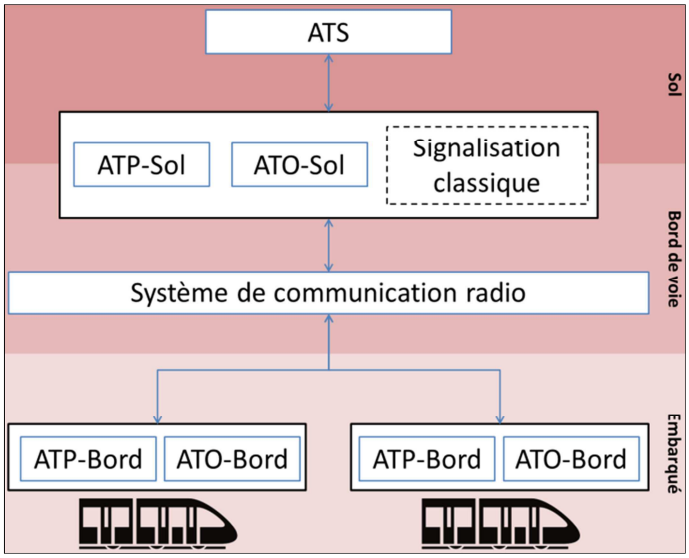

Figure 9 : Architecture classique d'un système CBTC

1.1.2.3 Cantonnement virtuel, mobile et déformable

Sur une ligne équipée d'un système CBTC, la localisation des trains est déterminée indépendamment de l'état des circuits de voie. L'espacement des trains se base sur l'information de localisation continue. Le bloc automatique lumineux n'est ainsi plus utilisé. En d'autres termes, il n'y a aucune matérialisation physique des cantons, ce système est qualifié de « canton virtuel ».

Le module de protection des trains ATP calcule l'enveloppe de sécurité pour chaque train à partir de la localisation du train précédent et de l'état de la signalisation (en particulier des signaux Carrés). La localisation du train précédent permet de calculer la limite du domaine de marche autorisé. Cette limite est constamment mise à jour. Finalement, le domaine de marche autorisé caractérise le canton sur lequel le train est autorisé à circuler, et celui-ci

évolue en continu sur le plan de voie. On parle de « canton mobile ». Par rapport à la signalisation latérale d'espacement (block automatique lumineux), le cantonnement mobile permet d'ajuster au plus près l'espacement entre les trains : la cible limitant le domaine de marche du train se situe au plus près de la queue du train aval, et non plus en amont du signal d'espacement aval (voir Figure 10).

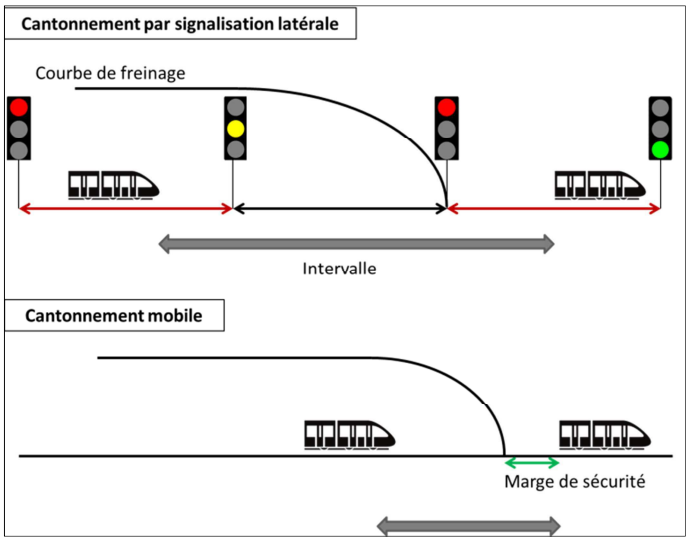

Figure 10 : Principe du cantonnement mobile

Les caractéristiques géométriques de l'enveloppe de sécurité du train ne sont pas prédéfinies à l'avance, elles varient en fonction de l'incertitude de localisation, de la déclivité de la voie, de la vitesse des trains et des caractéristiques spécifiques de chaque train (notamment ses capacités de freinage). Les caractéristiques géométriques de l'enveloppe de sécurité s'adaptent donc constamment aux conditions réelles et aux performances dynamiques de chaque train. Le canton est ajusté dynamiquement, il est qualifié de « canton déformable ». Par exemple, un train peut avoir des performances de freinage moindres, ou peut se situer sur une zone identifiée à adhérence réduite. Dans ce cas, le module ATP doit en tenir compte lors de son calcul de vitesse limite autorisée.

1.1.2.4 Différents types de système CBTC

La norme IEC (IEC 62290-1 2006) définit les différents degrés d'automatisation des systèmes de contrôle-commande des transports guidés urbains. Un système CBTC se situe généralement entre les niveaux 2 et 4.

- Niveau 0 : l'exploitation des trains se fait en marche à vue, le conducteur est pleinement responsable de la conduite. Le système peut inclure des aiguillages et une signalisation restreinte contrôlés par le système. Ce niveau d'automatisation correspond généralement au système de tramway.

- Niveau 1 : ce niveau correspond à une exploitation non automatique, le conducteur commande l'accélération et le freinage du véhicule à partir de l'observation de la voie, de la signalisation latérale et de la signalisation en cabine. Le système de contrôle-commande supervise les activités du conducteur, notamment la vitesse du véhicule et le respect de la signalisation, en continu ou ponctuellement. Le personnel d'exploitation est responsable du départ en sécurité au niveau des stations, notamment de la fermeture des portes. Ce niveau d'automatisation correspond au mode d'exploitation des métros et trains non automatiques.

- Niveau 2 : ce niveau correspond à une exploitation semi-automatique avec agent de conduite. La vitesse est surveillée en continu par le système. L'accélération et le freinage sont commandés automatiquement. Le personnel d'exploitation est responsable du départ en sécurité de la station.

- Niveau 3 : ce niveau correspond à une exploitation sans conducteur mais avec personnel d'exploitation à bord. Le départ en sécurité peut être automatique ou de la responsabilité du personnel d'exploitation (ce qui facilite la gestion de l'évacuation et permet d'opérer la ligne en mode manuel si besoin).

- Niveau 4 : ce niveau correspond à une exploitation sans personnel. Le départ en sécurité est automatique, le système doit inclure un système de protection quai/voie et être capable de détecter et de gérer les situations dangereuses (par exemple grâce à l'installation de portes palières sur les quais).

On peut distinguer trois configurations types pour les systèmes CBTC. Elles définissent le périmètre fonctionnel du système :

- la configuration minimale est composée de la protection automatique seule ;

- la configuration de base est composée de la protection automatique et de quelques fonctions de conduite automatique et/ou de supervision automatique ;

- la configuration complète est composée de la protection automatique, la conduite automatique et la supervision automatique.

Selon les projets, un système CBTC peut inclure une signalisation interne, le système CBTC est alors le seul système de signalisation opéré sur la ligne. Un système CBTC peut également s'interfacer et coopérer avec une signalisation préexistante. Dans ce cas, la signalisation a généralement la responsabilité de :

- la protection des trains non équipés du système CBTC ;

- la protection des trains en dehors de la zone couverte par le CBTC ;
- l'acquisition de la localisation secondaire par son système de détection des trains (les circuits de voies pour la signalisation classique) ;
- la gestion des signaux lumineux latéraux.

La coopération du système CBTC et du système de signalisation dépend de leurs périmètres respectifs. On peut par exemple citer l'annulation des signaux d'espacement lorsque le train est en conduite automatique, afin que la conduite automatique soit cohérente avec les informations présentées à l'agent de conduite. Les signaux Carrés doivent être strictement respectés par le système CBTC et ne sont donc pas annulés.

Chaque système CBTC est unique dans son périmètre fonctionnel, ses modes d'exploitation et ses interfaces avec les composants du système ferroviaire.

1.2 Exploitation ferroviaire

1.2.1 Généralités

Un réseau ferroviaire est constitué d'un ensemble de lignes qui partagent des ressources telles que les itinéraires et les équipements au sol. L'exploitation ferroviaire vise à maintenir le meilleur débit possible en gérant le partage de ces ressources et les éventuels conflits. La modernisation des outils d'exploitation a conduit à une centralisation de l'exploitation dans des postes de commande centralisés. Le personnel y dirige les circulations afin de répondre aux objectifs d'exploitation. Les trains doivent circuler selon les horaires du plan de transport. En cas de déviation, des conflits peuvent apparaître. Il est alors nécessaire d'ordonnancer les circulations et de leur attribuer des itinéraires adéquats, tout en évitant un arrêt non prévu.

La maîtrise de la sécurité et la performance de l'exploitation ferroviaire sont étroitement liées. L'exploitation doit maintenir des débits de plus en plus élevés tout en respectant les installations et les réglementations assurant la sécurité. Elle doit par exemple prendre en compte les temps d'établissement et de destruction des itinéraire, l'espacement des trains ou encore les limites de vitesse.

La planification de l'exploitation s'effectue en amont des opérations, elle correspond à la phase de construction de l'ensemble des horaires des circulations (aussi appelé « grille horaire »). La planification est fortement liée aux phases de routage (qui consiste à affecter les voies aux différentes circulations), de gestion du matériel (qui consiste à établir des plannings de roulements du matériel roulant), la gestion des maintenances (qui consiste à

planifier les retours aux dépôts du matériel roulant), et la gestion des agents (qui consiste à affecter des personnels aux circulations et à la maintenance). Finalement, la conception du plan de transport est réalisée en prenant en compte les moyens disponibles en régime nominal : moyens de l'infrastructure, moyens matériels, moyens humains.

Une grille horaire est constituée de sillons. Un sillon est un créneau précis d'autorisation de circulation sur un parcours donné pour un train donné. Un sillon peut être représenté par une liste de points de passage. On associe à chaque point un horaire d'arrivée et un horaire de départ. Les sillons sont alloués aux trains, et les ordres de passage aux points de croisement sont établis. La grille horaire est généralement représentée par des diagrammes espace-temps (Hansen et Pachl 2008). Ces diagrammes permettent de visualiser le mouvement des trains le long de leurs sillons. La Figure 11 présente un exemple simple de diagramme espace-temps. On peut y suivre le déplacement de 4 circulations successives évoluant dans la même direction, et desservant une gare (stationnement) sur leur parcours. La Figure 12 présente un diagramme espace-temps d'une grille horaire réelle issu d'un logiciel SNCF pour le tracé des horaires.

Lors de la phase opérationnelle, un aléa peut entrainer une réduction des moyens disponibles (par exemple une panne) ou une dégradation localisée de la grille horaire (par exemple un sur-stationnement lié au blocage des portes par les voyageurs). Un aléa provoque ainsi une dégradation du plan de transport, potentiellement jusqu'à l'impossibilité de sa mise en œuvre. La gestion opérationnelle des circulations en temps réel s'appuie sur des actions de régulation du trafic ferroviaire pour répondre le plus efficacement possible aux perturbations survenues dans le trafic. On parle aussi de re-planification.

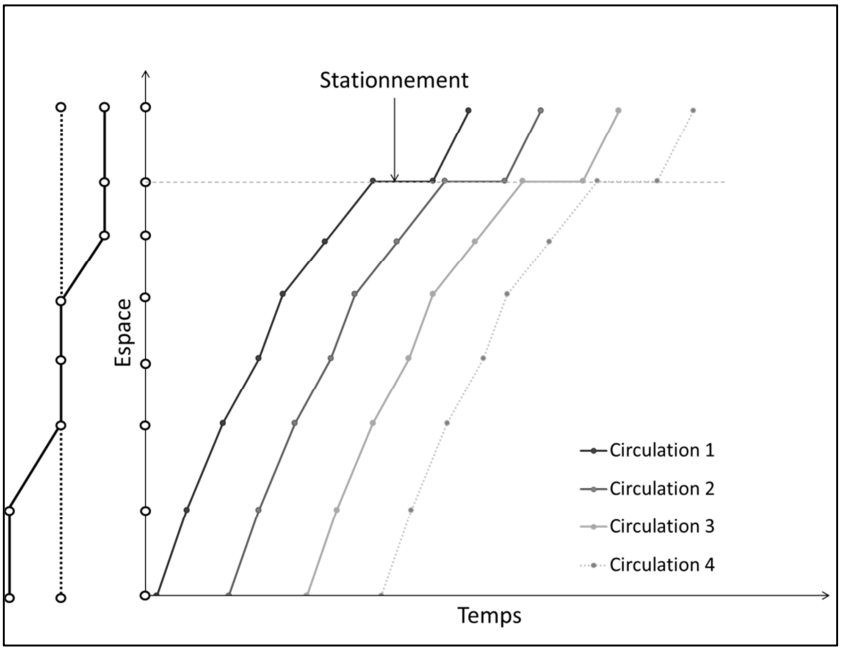

Figure 11 : Diagramme espace-temps pour 4 circulations desservant une gare

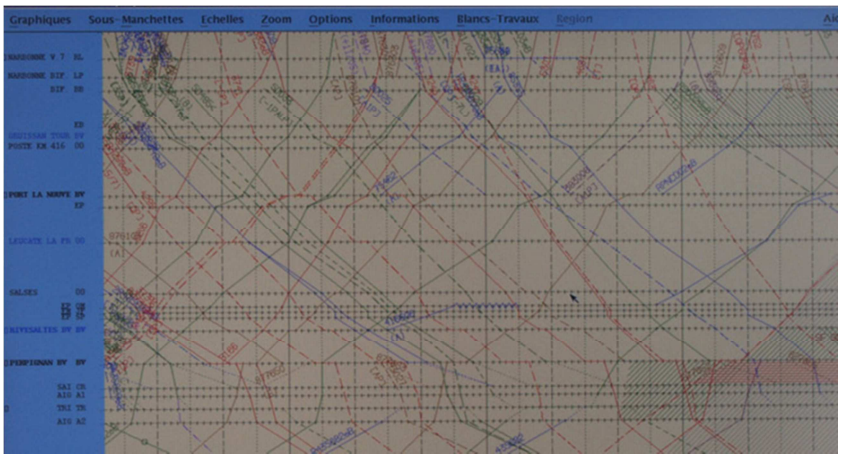

Figure 12 : Diagramme espace-temps d'une grille horaire réelle sur un logiciel SNCF

1.2.2 Exploitation en zone dense

En zone dense, une ligne ferroviaire est dimensionnée en matière de capacité du matériel roulant et de fréquence (c'est-à-dire d'intervalle entre les trains). La fréquence de passages est limitée par le système de signalisation ferroviaire et ses caractéristiques locales. La capacité du matériel roulant est limitée par la longueur des gares, la largeur des quais, ou encore le nombre de niveaux des trains. La capacité du matériel roulant doit aussi être rattachée à son ergonomie pour les phases d'échange voyageur, liée entre autres au nombre de portes ou au nombre de niveaux.

En zone dense, la planification de l'exploitation et en particulier la construction des horaires est réalisée à l'aide de logiciels de simulation qui permettent d'estimer précisément les sillons en prenant en compte les caractéristiques spécifiques de la signalisation et du matériel. Les horaires théoriques fournis aux acteurs de l'exploitation présentent une précision de la déca-seconde sur les horaires de départ et d'arrivée. Les simulations permettent de déterminer le positionnement optimal des marges d'exploitation. La collecte de données et la simulation de ces données permettent d'identifier des points d'amélioration possible, tels que des modifications du système de signalisation ou des temps de stationnement standards.

La gestion opérationnelle de l'exploitation en zone dense est pilotée par des centres opérationnels qui assurent la gestion du plan de transport, la gestion du matériel et des conducteurs, et la gestion de l'information-voyageur. Lorsque les trains sont exploités à intervalle rapproché, un aléa peut rapidement engendrer des complications sur le réseau : retards d'autres trains, augmentation du nombre de voyageurs en attente sur les quais, augmentation du temps d'échange voyageurs. Il est donc nécessaire de résorber les perturbations au plus vite. Les régulateurs du centre opérationnel prennent des décisions pour adapter le plan de transport et maintenir un service cohérent entre les besoins des voyageurs et les circulations (infrastructure, matériel, agents). Lorsque cela est possible, le

plan de transport est maintenu et des adaptations de régulation (modification des temps de stationnement, suppression de desserte ou de trains, changement d'itinéraire…) sont mises en œuvre. Lors d'une perturbation majeure, par exemple lorsqu'une ressource essentielle n'est plus disponible, les régulateurs mettent en œuvre un scénario de recouvrement prédéfini correspondant à une perturbation identifiée (voir Figure 13).

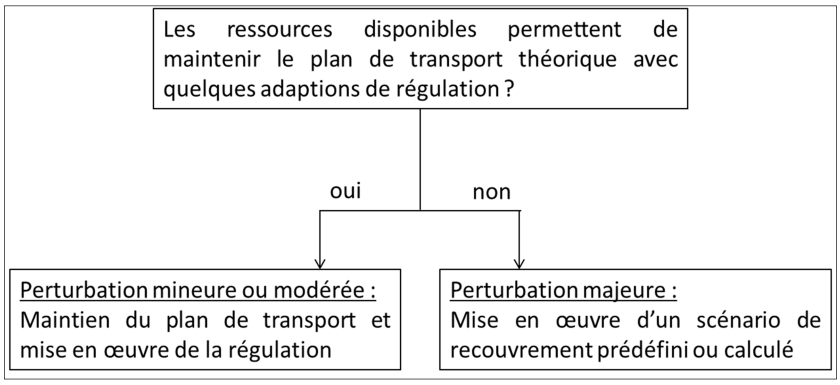

Figure 13 : Principe de la gestion des perturbations en zone dense

1.2.2.1 Indicateurs d'exploitation

Différents indicateurs peuvent être retenus pour analyser la fluidité du trafic et la qualité de service d'une ligne ferroviaire. En zone dense, il est intéressant de pouvoir mesurer l'évolution de ces indicateurs en temps réel afin d'être capable de détecter une dérive et de réagir en conséquence.

Le débit de la ligne traduit généralement la fréquence d'accès d'un train à une ressource, une gare par exemple. La notion de débit peut être remplacée par celle d'intervalle (Schön, et al. 2013). Plusieurs définitions de l'intervalle peuvent être retenues. L'intervalle dynamique est le temps écoulé entre le départ d'un train quittant une gare et l'arrivée dans la même gare du train suivant. L'intervalle dynamique traduit la performance de la signalisation. L'intervalle théorique est le temps écoulé entre deux départs de trains successifs à une même gare, cette définition intègre le temps d'échange voyageurs en tenant compte de sa valeur maximum. Pour mesurer la performance de l'exploitation, on ajoute à l'intervalle théorique une marge de régulation pour obtenir l'intervalle pratique. La marge de régulation peut être proportionnelle à l'occurrence des conflits dans l'accès aux ressources du réseau (Schön, et al. 2013).

La ponctualité est un indicateur adapté lorsqu'on cherche à respecter des horaires théoriques. La ponctualité d'une circulation correspond à l'écart entre les horaires réels de la circulation et les horaires théoriques du plan de transport. L'indicateur de ponctualité peut être ramené à une mesure du retard par voyageur, afin de mieux traduire la satisfaction client.

La vitesse d'une ligne est mesurée par sa vitesse commerciale. La vitesse commerciale est la vitesse moyenne établie comme étant le ratio entre la distance qui sépare deux points et le temps moyen nécessaire pour les relier en tenant compte de tous les arrêts, même ceux qui ne se justifient pas par des besoins d'exploitation. La vitesse commerciale tient donc compte des performances du matériel roulant, de l'efficacité des procédures d'exploitation et des perturbations.

D'autres indicateurs d'exploitation peuvent être construits en fonction des particularités et des objectifs du système de transport étudié : le temps de sur-stationnement des trains en gare, le temps d'attente des voyageurs en gare, le temps de trajet des voyageurs, le nombre de passagers transportés…

1.2.2.2 Exploitation ferroviaire de type urbain

L'exploitation de type urbain s'effectue sur des systèmes de type métro ou tramway. Le plus souvent, une ligne de métro constitue un système fermé, exploité de manière indépendante. Une ligne de métro comporte généralement une double voie, les stations comportent deux quais (un par voie et par sens de circulation) ou un quai central. Il existe cependant des variantes dont l'exploitation est plus compliquée. On peut par exemple citer les lignes comportant des embranchements, les lignes mêlant circulations omnibus et circulations express ou encore les lignes non fermées.

La performance de l'exploitation d'un système de type urbain est généralement mesurée en nombre de trains (ou de passagers) par heure et par sens. Elle est caractérisée par l'intervalle entre deux départs de trains successifs. Plus l'intervalle théorique est faible, plus la capacité de la ligne est élevée. Lors de l'exploitation, on cherche à maintenir un intervalle opérationnel régulier, le plus proche possible de l'intervalle pratique. C'est la régulation « à l'intervalle ». On cherche à assurer un passage régulier des circulations dans les zones denses pour désengorger les quais. On ne cherche pas à suivre les horaires théoriques. Pour évaluer la qualité de service, on préfère mesurer le temps d'attente du voyageur sur le quai, au-delà d'un temps d'attente jugé acceptable. Alternativement, on mesure le temps de parcours réel pour le comparer au temps de parcours théorique.

Sur un système du type urbain, le recouvrement d'un retard consiste en réduire l'intervalle trop important qui se crée devant le train en retard. Trois types de stratégies peuvent être mis en œuvre (Schön, et al. 2013).

- La stratégie dite défensive consiste à ralentir les trains en aval du train en retard pour combler l'intervalle. Cette stratégie est dite « exploitation à l'intervalle ». C'est la stratégie appliquée par exemple dans le métro parisien.

- La stratégie dite offensive consiste à supprimer des arrêts à la rame retardée. C'est la stratégie appliquée par exemple dans les métros New Yorkais.

- Une stratégie bien plus radicale consiste à injecter un nouveau train dans le trafic.

1.2.2.3 Exploitation ferroviaire de type suburbain

Contexte Francilien

La région Île-de-France représente 40 % du trafic ferroviaire assuré sur 10 % du réseau ferré national. On y observe une grande diversité de services et de matériels qui cohabitent : entre autres Transilien, TER, TGV, Intercités, trains spéciaux, trains de fret.

Le réseau d'Ile de France est composé de lignes ferroviaire urbaines (métros, tramways), et de lignes ferroviaires suburbaines. Les zones dites denses et très denses se situent dans une zone de 20 km de rayon autour du centre de Paris. Il y a deux types de lignes suburbaines, elles composent le réseau Transilien : les lignes appelées RER (Réseau Express Régional) desservent la région parisienne et traversent Paris de part en part. Elles sont au nombre de cinq (lignes A, B, C, D, E). Leur longueur est comprise entre 50 et 200 km. Les lignes Transilien desservent la région parisienne et aboutissent dans les grandes gares parisiennes. Elles sont au nombre de neuf. Leur longueur est comprise entre 30 et 250 km.

Le système de transport suburbain doit transporter chaque jour un large volume de passagers, et ce trafic est en forte croissance. Entre 2003 et 2013, le nombre de voyageurs composant le trafic Transilien a augmenté de 30 % sur un réseau quasi-constant. Le défi de l'exploitation suburbaine en zone dense porte sur :

- le débit, actuellement limité par la signalisation latérale (block automatique lumineux) ;

- le temps de parcours, qui doit rester satisfaisant pour les voyageurs malgré le débit élevé ;

- la qualité de service, et notamment la gestion des aléas (Deau 2015).

Les trains suburbains circulant en zone dense viennent de l'extérieur de Paris et ont pu parcourir de grandes distances. Ils sont régulièrement retardés avant même d'arriver en zone dense. A l'approche et dans les gares parisiennes, il est nécessaire de gérer un trafic très dense dans un espace limité. Aussi, les gares parisiennes et certaines gares de banlieues sont des nœuds très importants en matière de gestion des circulations mais aussi d'affluence-voyageurs. Par exemple, cinq lignes suburbaines convergent vers Gare du

Nord, chaque voie y supporte entre 210 et 250 trains par jour ouvrable. Les choix d'organisation et d'infrastructures qui ont été faits en leur temps conditionnent aujourd'hui les règles d'exploitation (Verchère 2014).

Le choix de privilégier la capacité plutôt que la robustesse a conduit à approcher la capacité maximale des lignes suburbaines. Aussi, certaines lignes ne sont pas étanches aux perturbations survenues sur d'autres lignes. Par exemple, les lignes B et D empruntent la même voie entre Châtelet-Les Halles et Gare du Nord, à hauteur de 32 trains en circulation par heures de pointe. Dans cette zone particulièrement dense, la fluidité des circulations est très sensible à la moindre perturbation, même de l'ordre de la seconde. La maîtrise du temps de stationnement des trains à quai est, par exemple, un paramètre clé de la fluidité des circulations.

Les modifications de l'infrastructure permettant de gagner en capacité et en robustesse nécessitent des investissements très importants. Souvent les capacités supplémentaires sont aussitôt absorbées car les nouvelles infrastructures attirent des clients supplémentaires.

Ligne ferroviaire de type suburbain

Une ligne de transport suburbain est caractérisée par une répartition hétérogène des circulations. Dans les zones peu urbanisées de grande banlieue, c'est-à-dire aux extrémités des lignes de RER, le volume de voyageurs est relativement faible. La fréquence de passage des trains y est basse, en particulier en heures creuses (jusqu'à un train par demi-heure ou un train par heure). A l'inverse, en zone dense, c'est-à-dire sur la zone centrale des lignes de RER, les usagers utilisent le RER comme ils utiliseraient le métro, et les volumes à transporter sont très importants. La fréquence de passage des trains y est élevée (environ un train toutes les trois minutes). En heure de pointe, l'intervalle entre les trains peut être très proche de l'intervalle minimum permis par la signalisation ferroviaire. Les marges d'exploitation sont alors très limitées, il devient difficile de contenir l'impact d'un retard léger, tant le système se rapproche de sa capacité maximale.

En zone peu dense, il est important de respecter les horaires annoncés. Il faut privilégier une « exploitation à l'horaire », c'est le mode d'exploitation traditionnel du train, très bien adapté à ce type de zone. A l'inverse, en zone dense, le mode d'exploitation le plus adapté serait l'exploitation « à l'intervalle » qui cherche à maintenir un intervalle rapproché et régulier entre les trains, quelque soient les incidents qui écartent les horaires des valeurs prévues. Lorsque les horaires s'écartent du plan de transport théorique, l'exploitation à l'intervalle et l'exploitation à l'horaire ne sont plus compatibles, il devient compliqué de concilier les besoins des voyageurs de la zone centrale et ceux des voyageurs des zones périphériques. Les règles de gestion opérationnelle, qui privilégie la régulation « à

l'horaire », ne sont pas toujours adaptées pour gérer les zones denses et montrent rapidement leurs limites.

La robustesse du plan de transport face aux situations très perturbées peut être améliorée par la construction de scénarios de recouvrement performants qui sont appliqués en cas d'incidents majeurs. Un scénario de recouvrement consiste généralement en un plan de transport préconstruit (horaires, matériel, agent) correspondant à un type d'incident identifié. Dans certains cas, un scénario de recouvrement peut également consister en un report de la clientèle sur d'autres modes de transport. Plus généralement, un scénario doit toujours tenir compte de la capacité à informer les voyageurs sur la solution qui doit être appliquée. Les scénarios de recouvrement ne sont généralement pas adaptés pour gérer les perturbations mineures et modérées, quotidiennes sur le réseau Francilien.

Au-delà des méthodes de régulation, la robustesse du plan de transport peut être améliorée au moyen d'investissements importants : alternats, voie extérieure, garages, matériel roulant de réserve. Un alternat est une voie additionnelle permettant de répartir deux trains qui se suivent sur deux voies différentes. Ainsi, lorsqu'un train approche une gare, il peut y entrer pour entamer son échange voyageur tandis que le train précédent est toujours arrêté sur l'autre voie, ou quitte la gare. Un alternat permet donc d'augmenter le débit d'une gare, en y réduisant l'espacement minimal des trains (voir Figure 14). Avec un alternat, l'espacement minimal n'est plus lié à la succession de deux trains à un même quai, mais au temps d'établissement de l'itinéraire entre l'itinéraire du premier train et l'itinéraire du deuxième train.

La solution de l'alternat n'est pas toujours possible; dans ce cas une autre solution consiste à mettre en place des « régulateurs de flux » qui encouragent les voyageurs attendant sur le quai à ne pas gêner la descente du train, et qui limitent l'accès au train lorsque celui-ci est sur le point de partir.

Enfin, la capacité et la robustesse d'une ligne ferroviaire peuvent être améliorées par le déploiement de système appliquant de nouveaux principes d'exploitation. Le système CBTC (voir 1.1.2) est un système de contrôle-commande automatique des trains. Il peut également inclure un système de supervision et régulation automatique. Le CBTC permet des gains significatifs quant à la capacité et la régularité, sans modification coûteuse de l'infrastructure.

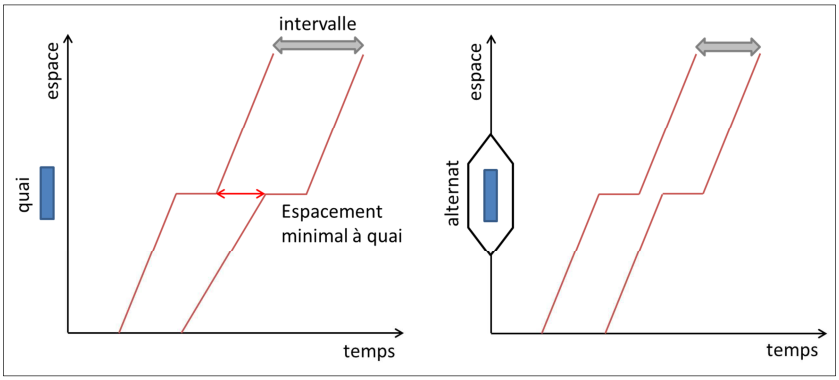

Figure 14 : Diagramme espace-temps représentant 2 trains se suivant en gare, sans alternat à gauche, avec alternat à droite

1.2.3 Exploitation d'une ligne ferroviaire équipée d'un automatisme CBTC

Le déploiement d'un automatisme CBTC sur une ligne ferroviaire permet d'augmenter la capacité de transport de l'infrastructure, d'optimiser l'exploitation des trains en matière de régularité et de consommation d'énergie, et d'améliorer la supervision et la régulation du réseau grâce au module ATS. Le système CBTC déployé sur une infrastructure préexistante permet de réaliser une transition entre les anciens principes d'exploitation (notamment le block automatique lumineux) et les nouveaux principes d'exploitation propres au système CBTC.

1.2.3.1 Ligne de métro équipée d'un système CBTC

Les systèmes CBTC ont été en premier lieu développés pour les systèmes ferroviaires de type urbain : métros, métros aériens. Ils ont été très largement déployés à travers le monde. Les systèmes équipant des lignes urbaines sont le plus souvent composés d'un module ATP et d'un module ATO.

Les lignes équipées constituent généralement des systèmes fermés exploités de manière indépendante. Seuls les trains appartenant à la ligne y circulent. Le plan de voie comporte, la plupart du temps, une double voie traversant des stations. En situation nominale, tous les trains sont équipés du système CBTC. Ils sont communicants et transmettent leur localisation via le système de localisation. Ils sont le plus souvent pilotés automatiquement. Dans certains cas, plusieurs modes de conduite peuvent coexister. Dans le cas des métros CBTC sans conducteur, des portes palières sont installées sur les quais afin de garantir le départ en sécurité. Ces portes palières permettent également une meilleure maîtrise du temps de stationnement.

Sur les lignes de type urbain, le système CBTC permet de réduire significativement l'intervalle entre les trains. Le débit est augmenté et la régularité améliorée.

1.2.3.2 Ligne suburbaine équipée d'un système CBTC

Dans un futur proche, certaines lignes ferroviaires de type suburbain vont être équipées de systèmes CBTC. Ce type de ligne présente des particularités qui doivent être prises en considération dans la conception des systèmes censés les équiper :

- un plan de voie plus complexe avec des alternats, des convergences ;
- une longueur de ligne plus importante ;
- un réseau constituant un système ouvert, sur lequel des trains d'autres lignes peuvent circuler en situation nominale ;
- des besoins différents : ponctualité en zone peu dense, intervalle en zone dense ;
- des perturbations nombreuses et quotidiennes.

Le déploiement d'un système CBTC sur une ligne de type suburbain nécessite des adaptations importantes des fonctionnalités, en particulier de la supervision et de la régulation.

En Europe, il existe actuellement trois projets intégrant un système CBTC sur des lignes suburbaines (Deau 2015).

- Le projet NExTEO prévoit le déploiement d'un système CBTC sur la ligne du RER E (prolongée à l'ouest). Cette ligne comporte un tronçon central avec un débit élevé et des branches est et ouest avec un débit plus limité. Seul le tronçon central doit être équipé. Les transitions entre le système du tronçon central et les systèmes des branches seront assurées de façon dynamique.
- À Copenhague, un système CBTC doit être déployé sur un réseau suburbain (S-Bane) de 180 km environ. L'infrastructure de cette ligne est quasiment isolée du réseau danois.
- À Londres, le projet Crossrail prévoit le déploiement d'un système CBTC et présente des similitudes importantes avec le projet NExTEO (tronçon central équipé, transitions dynamiques).

1.3 Cas d'étude : le projet NExTEO

Le projet NExTEO prévoit le déploiement d'un système CBTC sur le tronçon central de la ligne du RER E (prolongée à l'ouest dans le cadre du projet Eole). Le tronçon équipé s'étend de Nanterre-la-Folie à Rosa Parks inclus (voir Figure 15). La transition entre le

système CBTC et la signalisation latérale s'effectue de façon dynamique à l'entrée et à la sortie du domaine couvert par le système CBTC. Le projet NExTEO constitue le cas d'étude des travaux présentés.

Le système CBTC NExTEO doit permettre d'assurer les performances attendues quant au débit et au temps de parcours. Il inclut une protection automatique des trains (ATP), un pilotage automatique ou assisté des trains (ATO) et une supervision automatique des circulations (ATS). Afin d'assurer une plus grande robustesse d'exploitation, la ligne sera exploitée selon le principe de recouvrement pour permettre de gérer les branches est et ouest de façon indépendante. Cette stratégie est qualifiée d'exploitation « en doigts de la main ». Sur le tronçon central, le service comportera entre 22 et 28 trains par heure et par sens.

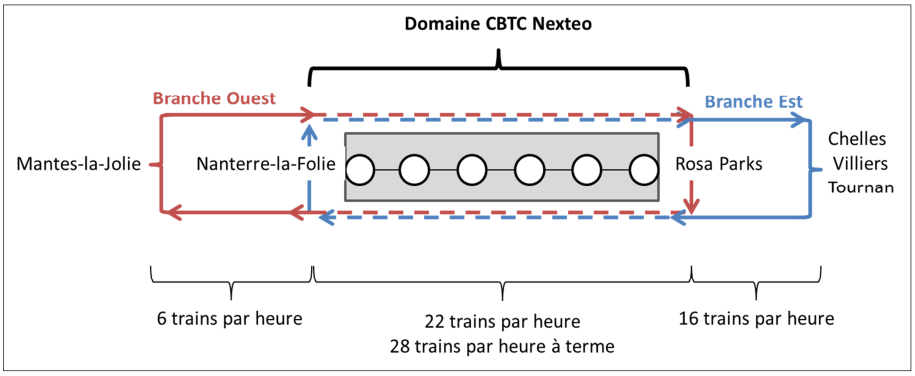

Figure 15 : Projet Nexteo, exploitation selon le principe de recouvrement

1.3.1 Exploitation « en doigts de la main »

Organiser une exploitation « en doigts de la main », selon le principe de recouvrement, permet de limiter le parcours d'un train à une seule branche de la ligne en plus de la zone centrale. Le trafic sur la zone centrale est donc plus dense que sur les branches. Cette stratégie d'exploitation nécessite de pouvoir disposer de gares en limite de la zone centrale pouvant constituer des terminus (origine et destination) et des zones de retournement. Ces gares de terminus doivent également avoir une capacité de garage importante pour pouvoir garer des rames.

L'exploitation en doigts de la main est un schéma opposé à l'exploitation des circulations de bout en bout de la ligne. Elle permet de limiter la propagation des perturbations d'une branche à l'autre en assurant une certaine indépendance entre ces dernières. Cependant, cette stratégie empêche tout trajet direct de banlieue à banlieue via Paris. On constate que ce type de flux reste généralement faible.

La future ligne du RER E sera exploitée selon le principe de recouvrement (voir Figure 15). Le domaine CBTC NExTEO inclut les zones de retournements en arrière gare de Nanterre-la-Folie et Rosa Parks. Le système NExTEO doit donc être capable de gérer automatiquement les retournements des trains (changement de cabine, changement de direction).

1.3.2 Modes de conduite des trains

Le système NExTEO doit offrir deux modes de conduite assistée (uniquement pour les trains équipés). Le mode de conduite en pilotage automatique (CPA) est le mode nominal. Dans ce mode, la traction et le freinage sont assurés par le système CBTC (et plus particulièrement par l'ATO). Le mode de conduite manuelle contrôlée (CMC) peut être utilisé dans certaines circonstances, par exemple en situation dégradée. Dans ce mode, la traction et le freinage sont assurés par le conducteur en respectant des consignes affichées en cabine. Dans les modes de conduite CPA et CMC, les trains sont communicants, c'est-à-dire qu'ils transmettent leur localisation via le système de communication du système CBTC. La signalisation latérale est éteinte pour permettre une bonne ergonomie de conduite. La protection automatique du CBTC assure le contrôle de vitesse.

Un train équipé du système NExTEO et communicant peut également être opéré en conduite manuelle classique (CM), par exemple en cas de dysfonctionnement des fonctions de conduite. Dans ce cas, la localisation des trains est effectuée par communication CBTC puisque le train est communicant. La conduite est entièrement de la responsabilité de l'agent de conduite.

Des trains non équipés d'un système CBTC (ou dont le système de communication CBTC n'est pas fonctionnel) peuvent également circuler sur la voie, y compris en situation nominale (non dégradée). Une ligne suburbaine est un système ouvert dans lequel des circulations n'appartenant pas à la ligne sont susceptibles d'entrer. Ces trains, n'étant pas équipés (ou dont le système de communication n'est pas fonctionnel) sont donc non communicants. Ils ne transmettent pas leur localisation. Ils sont détectés et localisés par le système de signalisation classique, par l'intermédiaire des circuits de voie. Ces trains sont opérés en conduite manuelle (CM) classique et doivent obéir à la signalisation lumineuse latérale et à son cantonnement fixe. Le système CBTC NExTEO acquiert l'état des circuits de voie transmis par le système de signalisation et inclut les trains non-communicants (sur la base des circuits de voie occupés) dans ses fonctions de suivi des trains.

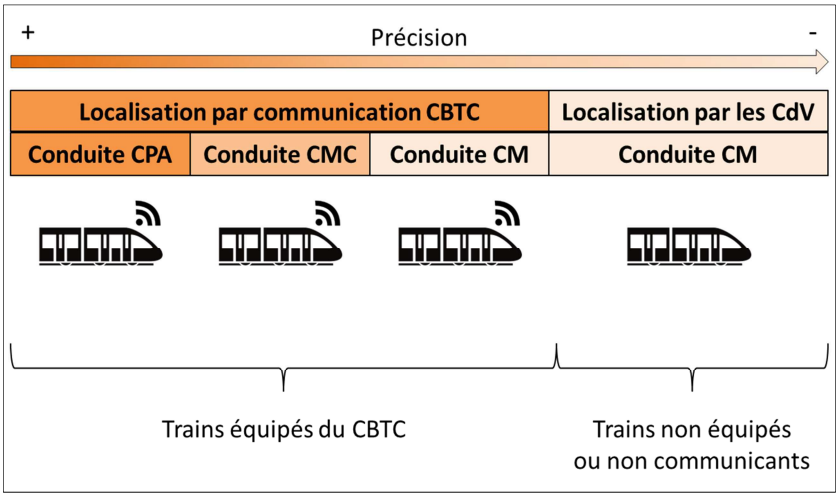

Figure 16 : Types de trains pouvant circuler sur la ligne E équipée du système CBTC Nexteo

Le système CBTC NExTEO doit donc gérer plusieurs types de trains, dont les modes de localisation et de conduite présentent des niveaux de précisions très différents (voir Figure 16). Concernant la localisation, deux types d'information doivent être traités pour réaliser la supervision des trains : la localisation CBTC pour les trains communicants, et l'état des circuits de voie pour tous les trains et en particulier les trains non communicants. Concernant la conduite, seuls les trains communicants en mode CPA seront pilotés automatiquement en suivant précisément les consignes de vitesse. Concernant la régulation, seuls les trains communicants pourront recevoir des consignes permettant d'adapter en temps réel les performances. L'application de ces consignes dépend du périmètre de chaque mode de conduite. Le mode CPA applique automatiquement les consignes reçues en les intégrant dans le pilotage automatique.

1.3.3 Supervision et régulation du trafic

La supervision automatique (ATS) de NExTEO dispose pour chaque train des horaires théoriques et des marches et temps de stationnement prévus. Elle acquiert constamment la position réelle des trains sur le domaine NExTEO. L'ATS peut également recevoir des données des agents d'exploitation via une interface.

A partir de ces informations, le module ATS comporte trois niveaux de régulation. Ces niveaux de régulation s'appliquent dans le domaine CBTC seulement :

- adaptation des temps de parcours et de stationnement pour gérer les petites perturbations ;
- gestion des convergences pour déterminer l'ordre de passage en cas de conflit à une convergence ;

- mise en place de service partiel en cas de perturbation majeure et d'interruption.

Le module ATS définit les consignes de temps de stationnement et de marche (ou temps de parcours). Les trains communicants, en mode de conduite automatique (CPA), appliquent ces consignes par l'intermédiaire du module de conduite automatique ATO. Les conducteurs des trains qui ne sont pas en mode de conduite automatique pourront être informés du temps de stationnement défini par l'ATS. Les objectifs principaux de la régulation du module ATS sont : respecter la ponctualité des circulations à la sortie du domaine CBTC, fluidifier le trafic en maintenant un intervalle régulier entre les trains dans le domaine CBTC. Les objectifs secondaires de la régulation sont : économiser l'énergie en favorisant les marches économiques, limiter la sollicitation du matériel et de la voie (Deau 2015). La conception de l'ATS NExTEO doit donc adapter les stratégies de régulation aux besoins de l'exploitation d'une ligne suburbaine. Ces stratégies doivent également tenir compte des différents types de trains cohabitant dans le domaine CBTC.

En plus de ses fonctions de régulation, le module de supervision ATS doit assurer le contrôle-commande des installations de signalisation ferroviaire classique. L'ensemble des commandes issues de l'ATS est envoyé aux postes de signalisation. Ces postes vérifient qu'une action commandée par l'ATS peut être appliquée en toute sécurité puis, le cas échéant, elle commande les composants de la signalisation en conséquence. En retour, l'ATS acquiert l'état de la signalisation (état des circuits de voie, états des itinéraires, états des aiguilles…).

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la notion de système ferroviaire. Nous avons en particulier présenté la signalisation ferroviaire classique qui conditionne les performances d'un système ferroviaire. Nous avons également présenté une nouvelle génération de système de contrôle-commande appelé système CBTC. Cette technologie, déjà très présente sur les systèmes de type métro, construit une localisation précise et continue des trains sur la voie, indépendamment de la signalisation classique, et met en œuvre un pilotage automatique des trains. Le système CBTC permet ainsi de gagner en capacité sur une infrastructure ferroviaire existante.

L'exploitation ferroviaire a pour rôle de mettre en œuvre le plan de transport et d'assurer la performance et la robustesse du système. Nous avons vu que les modes d'exploitation sont étroitement liés à l'infrastructure ferroviaire et aux systèmes de signalisation opérés. Le projet NExTEO prévoit le déploiement d'un système CBTC sur une ligne ferroviaire suburbaine existante. Cette rencontre entre le système CBTC et le système ferroviaire (par opposition au métro) doit engendrer des adaptations importantes dans les pratiques

d’exploitation ferroviaire, ainsi que dans la conception du système CBTC. En particulier, les fonctions de supervision et de régulation du système CBTC doivent être repensées.

Dans le chapitre suivant, nous étudions les différents outils permettant de décrire un problème de régulation. Ce problème doit pouvoir retranscrire l’état perturbé du système ferroviaire, les variables de décisions de l’exploitation, les objectifs de l’exploitation et les contraintes à respecter.

Chapitre 2

Description d'un problème de régulation

L'exploitation ferroviaire s'appuie sur la régulation des circulations en temps réel pour maintenir le trafic le plus proche possible de la table horaire de référence. Dans le contexte ferroviaire, la régulation consiste généralement en un ensemble de règles d'exploitation construites sur l'expertise métier. Elles expriment notamment les priorités à appliquer en cas de conflits entre deux circulations, par exemple :

- la priorité chronologique (appelée « premier arrivé premier servi », ou FIFO, ou FCFS), qui donne l'avantage à la circulation arrivant le plus tôt sur la zone de conflit ;

- la priorité liée à la ponctualité, qui privilégie les trains à l'heure, ou au contraire les trains retardés ;

- la priorité par type de circulation (voyageurs / fret, grande ligne / ligne classique, international / national...).

Une revue des différentes règles de priorité appliquées à travers l'Europe est proposée dans (Europe Rail Net 2012).

En zone dense, un système de règles ne suffit généralement pas à exprimer les objectifs de l'exploitation. Il est alors nécessaire de décrire un problème de régulation.

Un problème de régulation retranscrit l'accès des circulations aux ressources de l'infrastructure. Il exprime l'état (potentiellement perturbé) du trafic ferroviaire. Pour décrire un problème de régulation, il est important de se questionner sur le périmètre du problème et sur le niveau de précision souhaité. De ces facteurs va dépendre le choix des modèles des différentes entités du système ferroviaire. La formulation du problème doit exposer, le plus clairement et le plus efficacement possible, les variables de décisions, les objectifs et les contraintes du système.

Nous présentons dans ce chapitre les principaux outils permettant de décrire l'infrastructure, le mouvement des circulations et les systèmes de contrôle-commande. Ces outils permettent de composer un modèle du système ferroviaire.

Nous présentons ensuite des méthodes permettant de formuler aisément un problème de régulation à partir de la modélisation construite. Nous introduisons également quelques méthodes de résolution applicables au problème de régulation. Nous nous intéressons en particulier à l'optimisation multi-objectif.

Enfin, nous passons en revue quelques approches intéressantes du problème de régulation rencontrées dans la littérature.

2.1 Modélisation du trafic ferroviaire

Le trafic ferroviaire consiste en un ensemble de circulations évoluant sur une infrastructure donnée. Le mouvement des trains est coordonné pour des raisons de sécurité et de performance. Cette coordination s'effectue au travers de la signalisation et de la régulation. Pour analyser le trafic ferroviaire sur un réseau, une représentation de l'infrastructure doit être construite, et la dynamique des trains sur cette infrastructure doit être modélisée. Le niveau de description de l'infrastructure et de la dynamique des trains doit être déterminé en fonction des besoins de l'étude menée. Les mécanismes de coordination des circulations, exécutés notamment par les systèmes de signalisation, doivent être pris en compte, quel que soit la finesse des modèles. Dans cette partie, nous décrivons différents outils de modélisation permettant de décrire une infrastructure ferroviaire, la dynamique des trains, et la coordination du mouvement des trains, selon différents niveaux de détails.

2.1.1 Représentation de l'infrastructure

La représentation de l'infrastructure inclut à minima une représentation de la voie, c'est-à-dire de l'infrastructure civile. La topologie de la voie constitue le squelette de l'infrastructure ferroviaire. Elle sert généralement de base pour la construction de modèles dynamiques du système ferroviaire.

Pour représenter la topologie de la voie, il est courant de construire un graphe. Un graphe est composé de nœuds et d'arcs qui correspondent à des éléments de l'infrastructure. Il peut être facilement adapté à la complexité du plan de voie considéré et au niveau de détail souhaité. Un plan de voie varie grandement d'un réseau à l'autre :

- un réseau peut être composé d'une ou de plusieurs lignes ;
- une ligne peut comporter une ou plusieurs voies ;
- une voie peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle.

Pour obtenir une représentation plus complète de l'infrastructure ferroviaire, le modèle de voie peut être enrichi par une description d'autres éléments caractéristiques tels que l'infrastructure électrique, les systèmes de signalisation, ou les systèmes de communication. Ces composants de l'infrastructure, cartographiés le long de la voie, sont alors transposés sur le graphe de voie.

Nous décrivons dans les sections suivantes les différents types de graphes permettant de représenter la topologie d'une infrastructure de transport.

2.1.1.1 Construction d'un graphe

Graphe des itinéraires

Le graphe d'itinéraires représente les différents chemins possibles sur un réseau de transport. Il retranscrit le schéma de base de l'infrastructure. Un nœud y représente un lieu du réseau et un arc est un déplacement entre deux nœuds. Une séquence de nœuds caractérise alors les différentes étapes du parcours d'une circulation sur le réseau. La Figure 17 représente un exemple d'infrastructure modélisée par un graphe des itinéraires.

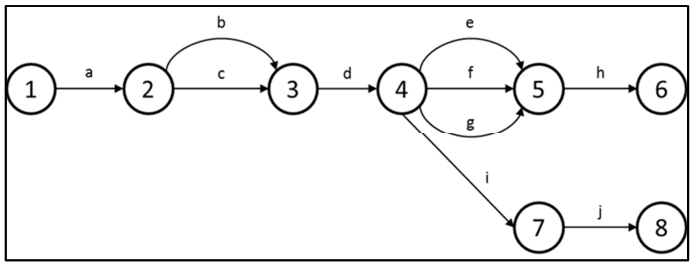

Figure 17 : Graphe des itinéraires (exemple)

Les arcs du graphe peuvent être pondérés pour caractériser un déplacement entre deux lieux (longueur, temps de parcours…).

Graphe des ressources

A partir du graphe des itinéraires, on peut dériver un graphe de ressources du réseau. Les nœuds représentent les itinéraires et les points terminaux du réseau (aux extrémités du graphe). Les arcs sont les transitions à valider pour permettre le mouvement du train d'un itinéraire à un autre. Ce type de graphe offre une représentation moins naturelle, mais permet de limiter le nombre d'arcs entre deux nœuds par rapport aux graphes des itinéraires. Cela peut faciliter l'analyse ou résolution d'un problème. La Figure 18 représente le graphe des ressources correspondant au graphe des itinéraires de la Figure 17.

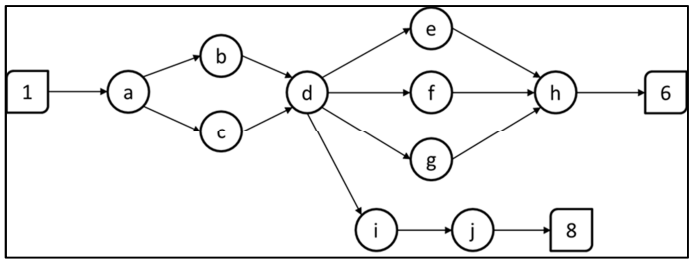

Figure 18 : Graphe des ressources (exemple)

Graphe topologique

Ce type de graphe permet de représenter le schéma de la voie ainsi que ses propriétés. Il correspond à une généralisation du graphe des itinéraires. Les arcs représentent des sections de voies, ils sont caractérisés par une longueur et possiblement d'autres propriétés. Les nœuds sont les limites entre les sections. Le graphe topologique offre une grande liberté de modélisation. Les sections de voies considérées peuvent être courtes (par exemple un canton ou une portion de canton) ou longues (par exemple, une portion de lignes incluant des stations mineures), et le niveau de granularité des sections considérées peut varier au sein même du graphe.

Le graphe topologique est particulièrement adapté pour construire précisément le squelette de l'infrastructure. A partir de ce squelette, on peut positionner les composants de l'infrastructure que l'on souhaite inclure dans le modèle. Par exemple, la voie peut être découpée en segments de telle sorte que l'on puisse positionner sur les nœuds du graphe des équipements de signalisation (signaux, balises…). Le découpage de la voie peut également correspondre à des sections ayant des propriétés particulières (vitesse autorisée, pente, électrification…). Cette propriété devient alors une caractéristique de l'arc, au même titre que sa longueur.

Graphe topologique à nœuds doubles

Dans (Caimi 2009), l'auteur décrit un graphe dans lequel chaque nœud est en fait une paire de nœuds associés, formant ainsi un double nœud. Ce type de graphe est une variante du graphe topologique. On considère qu'il est interdit de passer par un nœud sans passer par son associé, le nœud double doit être franchi complètement. Cette règle permet de distinguer les parcours autorisés et les parcours interdits. L'exemple présenté dans (Caimi 2009), reproduit sur la Figure 19, illustre cette particularité : la règle du double nœud permet d'interdire le parcours du nœud 4 vers le nœud 3, puisque le nœud 2 ne serait alors pas complètement franchi.

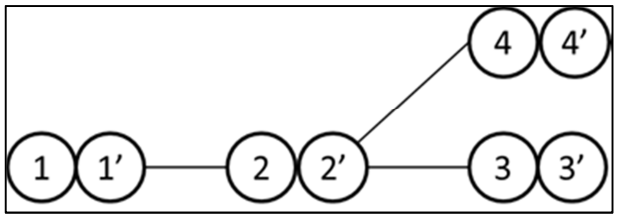

Figure 19 : Exemple d'illustration du graphe à nœuds doubles

Le graphe topologique à nœuds doubles est notamment utilisé dans l'outil de planification et de simulation OpenTrack (OpenTrack - Railway Simulation s.d.).

2.1.1.2 Représentation macroscopique / microscopique

La représentation d'une infrastructure peut se faire selon différents niveaux de détails. L'utilisation d'un graphe topologique permet notamment une grande liberté dans la description des caractéristiques de l'infrastructure considérée.

La représentation macroscopique d'une infrastructure est basée sur un graphe qui présente un certain niveau d'abstraction. On y représente seulement les stations principales et des portions de ligne les liant (incluant potentiellement des stations mineures). Ainsi la topologie de la voie n'est pas représentée de façon exhaustive. Les nœuds d'un graphe macroscopique constituent les seuls lieux sur lesquels on s'intéresse à l'interaction entre les circulations, en entrée et en sortie du lieu (quel que soit le type de graphe). Par exemple, une gare composée de plusieurs quais peut être assimilée à une unité de lieu. Une infrastructure pourra ainsi être représentée avec un nombre relativement limité d'arcs et de nœuds. La taille du problème formulé sera donc elle-même relativement limitée. La représentation macroscopique de l'infrastructure est particulièrement adaptée lorsque l'on cherche à évaluer rapidement une situation ou une décision de haut niveau. Elle est également utilisée pour la planification à long terme.

Une représentation microscopique est caractérisée par une granularité plus fine. Le graphe décrit précisément la topologie de la voie et intègre des informations telles que la position des signaux, le découpage des cantons, les courbes ou les pentes. Il est également envisageable d'intégrer des arcs de longueur nulle pour certains besoins de modélisation (Hansen et Pachl 2008). Le graphe de voie microscopique est indispensable pour les applications de précision telles que la construction de table horaire microscopique, le calcul de temps de parcours et l'étude de performance d'une ligne. Par exemple, dans une modélisation microscopique pour une application en cantonnement fixe, le graphe devrait à minima représenter tous les cantons.

Les représentations macroscopique et microscopique sont finalement différents niveaux de détails d'une même infrastructure (voir Figure 20). Elles répondent à des contraintes et à des besoins différents. Ces représentations peuvent coexister grâce à des relations de correspondance ou d'agrégation entre les ressources de l'une et de l'autre.

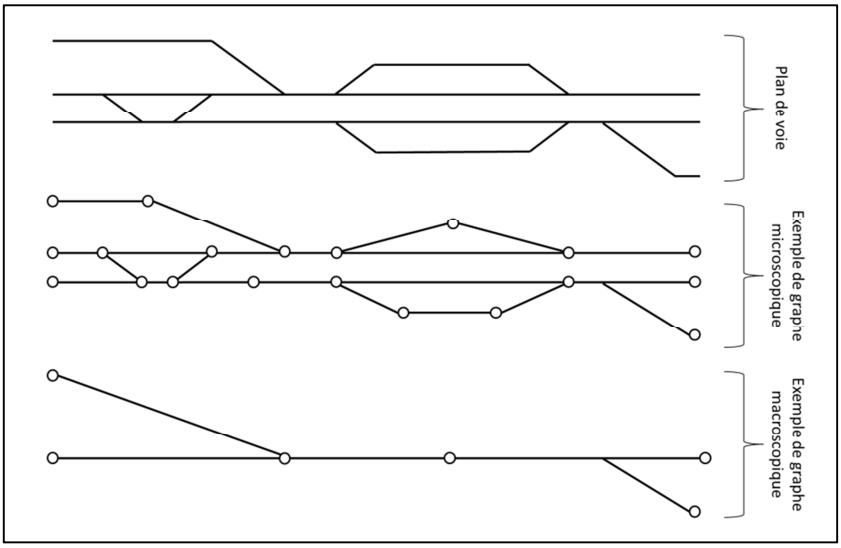

Figure 20 : Construction de graphes microscopique et macroscopique à partir d'un plan de voie

2.1.2 Mouvement des circulations

La modélisation du trafic ferroviaire nécessite une description du mouvement des trains sur l'infrastructure considérée. Selon le niveau de précision souhaité, le mouvement d'un train peut être considéré comme l'évolution continue d'un mobile sur l'infrastructure ou comme un ensemble d'évènements discrets se produisant successivement en des lieux de l'infrastructure.

2.1.2.1 Modélisation continue

La modélisation continue du mouvement d'un train cherche à retranscrire précisément son comportement dynamique au long de son parcours. Elle est nécessaire pour des applications de précisions telles que la simulation de la marche des trains pour le calcul des temps de parcours sur une infrastructure donnée. Ces simulations sont généralement réalisées selon plusieurs configurations en matière de caractéristiques du matériel roulant, de missions ou encore de conditions météorologiques. L'estimation précise des temps de parcours des circulations permet l'analyse de la capacité d'une infrastructure (Brenna, et al. 2016), (Ding, et al. 2010) et la construction de tables horaires.

Dynamique du train

La dynamique d'un train caractérise son déplacement le long de la voie. Elle dépend principalement :

- de la capacité de traction et de freinage ;
- du contact roue/rail ;
- des caractéristiques du parcours emprunté (courbe, pente, longueur) ;
- des caractéristiques du matériel roulant (masse statique, masses tournantes, longueur, résistance à l'avancement).

La dynamique d'un train est définie par l'équation fondamentale de la dynamique sur l'axe de la voie :

$$\sum \vec{F} = m.\vec{\gamma} \qquad (2.1)$$

où :

- $\vec{F}$ est une force s'appliquant sur le train : effort de traction, résistance du matériel, effort de ligne ;
- m est la masse inertielle du train, $m = k.m_s$ avec m_s la masse statique du train, et k le coefficient majorant traduisant l'inertie des masses tournantes du train.

Effort de traction-freinage

L'effort de traction-freinage F_{TF} permet de commander le mouvement du train sur la voie pour réaliser la mission de la circulation tout en respectant les restrictions présentes sur le parcours emprunté (limite de vitesses, signaux).

L'effort de traction-freinage effectivement fourni par une motrice dépend :

- de la capacité de traction de la motrice ;
- du rendement de transmission interne ;
- de la capacité de freinage du matériel ;
- du coefficient d'adhérence μ entre les roues et le rail.

L'effort de traction est appliqué par l'intermédiaire du contact roue/rail. Le coefficient d'adhérence μ entre la roue et le rail est une grandeur sans dimension qui dépend de la vitesse courante du train. Il permet de définir l'effort maximal transmissible. Si l'effort de traction fourni par la motrice est supérieur à l'effort maximal transmissible, le phénomène de patinage apparaît : l'effort maximal transmissible est le produit du coefficient d'adhérence μ et du poids s'appliquant sur la roue. Pour un train, l'effort maximal de traction est :

$$F_T^{max} = \mu . m_s . g \qquad (2.2)$$

avec g la constante de gravité, $g = 9{,}81\ m.s^{-2}$.

Résistance à l'avancement

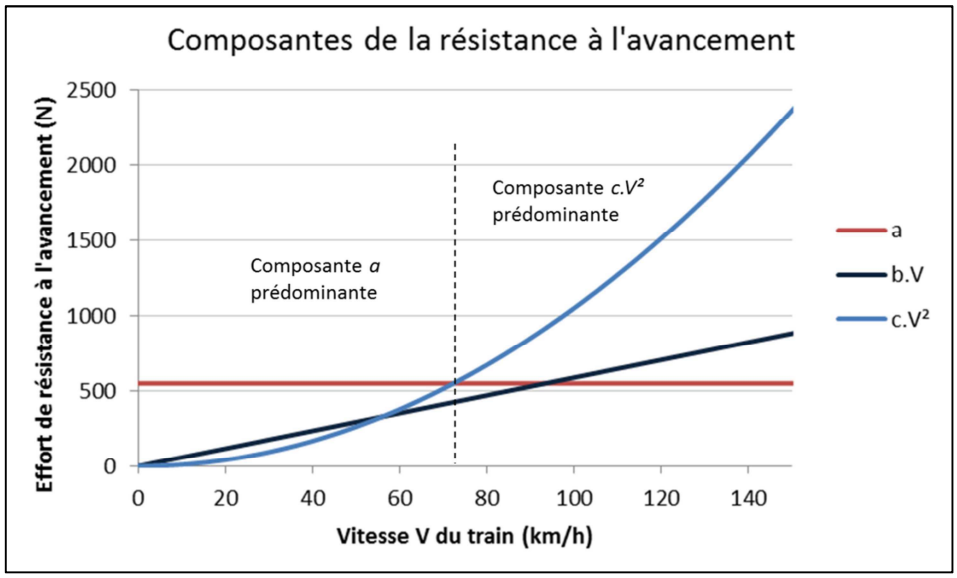

Figure 21 : Evolution des coefficients de la RAV en fonction de la vitesse du train

La résistance à l'avancement d'un matériel roulant peut être exprimée en fonction de la vitesse v du train par la modélisation suivante :

$$RAV = a + b.v + c.v^2 \qquad (2.3)$$

où les coefficients a, b, c dépendent des caractéristiques techniques du matériel et de la vitesse du vent. Ils permettent d'exprimer respectivement la force résistante au roulement, la force de friction, et la force aérodynamique. La Figure 21 illustre l'importance de ces composantes dans la résistance à l'avancement en fonction de la vitesse du train.

Effort de ligne

L'effort de ligne est composé de :

- la force résultante de la force de pesanteur liée à la pente de la voie F_p ;
- la force liée à la courbure F_c de la voie.

Une voie ferroviaire est généralement caractérisée par une pente α très faible. La force liée à la pente est généralement exprimée par :

$$F_P = g.m.sin(\alpha) \approx g.m.tan(\alpha) \qquad (2.4)$$

La force liée à la courbe de la voie est généralement exprimée par :

$$F_C = g.m.\frac{0{,}8}{\rho} \qquad (2.5)$$

avec $\rho[m]$ le rayon de courbure de la voie.

Profil de vitesse

Graphiquement, la représentation continue du mouvement continu d'un train sur une voie correspond généralement à son profil de vitesse. Le profil de vitesse est une courbe dont l'abscisse représente la position du train sur une section de voie linéaire, et dont l'ordonnée représente la vitesse du train à la position correspondante. Le profil de vitesse d'un train est généralement découpé en phases dynamiques. Les quatre types de mouvements identifiés sont :

- l'accélération : sans dénivelé, elle correspond à un effort de traction positif et une accélération positive ;
- la croisière : sans dénivelé, elle correspond à un effort de traction positif faible et une accélération nulle ;

- la marche sur l'erre : sans dénivelé, elle correspond à un effort de traction nul et une accélération négative ;

- le freinage : sans dénivelé, il correspond à un effort de traction négatif et une accélération négative.

Ces quatre phases dynamiques sont illustrées sur la Figure 22.

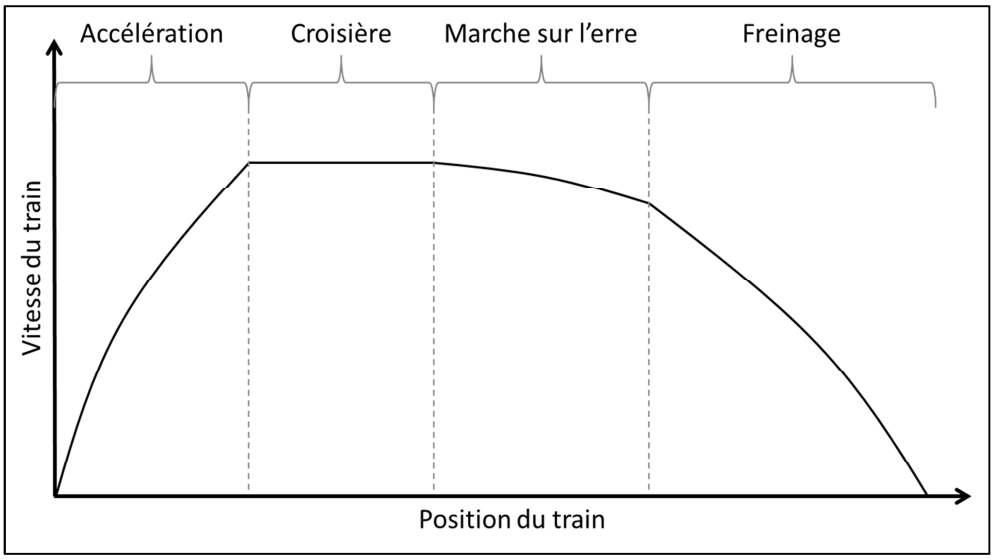

Figure 22 : Types de mouvements composant la dynamique d'un train

2.1.2.2 Modélisation discrète

La modélisation du mouvement d'un train sur la voie peut être amplement simplifiée lorsque l'application ne nécessite pas une connaissance précise de la dynamique du train. On représente alors le mouvement du train par un ensemble d'évènements se produisant successivement sur la voie. Cette modélisation discrète du mouvement d'un train se base sur une représentation discrète de la voie (voir 2.1.1.1). Le mouvement du train est caractérisé par les dates d'arrivée et/ou de départ du train sur les nœuds du graphe de voie (voir Figure 23). Par convention, ces dates correspondent généralement aux dates associées à l'avant du train. Il est à noter que la finesse de la granularité d'une modélisation discrète du mouvement des trains correspond au mieux à celle du graphe de voie associé.

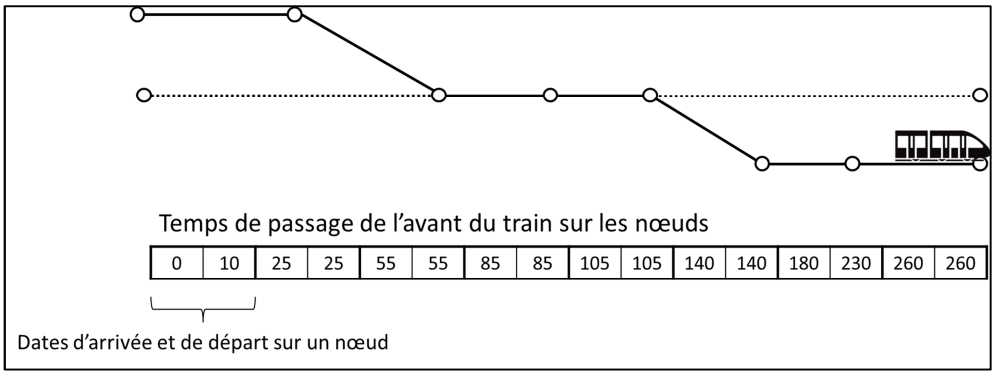

Figure 23 : Modélisation discrète du mouvement d'un train sur une section de son parcours

Dans une représentation discrète, la dynamique du train peut être résumée par la séquence de nœuds empruntés et par les temps d'occupation des nœuds et des arcs du graphe. Si les nœuds d'un graphe représentent des lieux, et les arcs représentent des sections de voies (cas du graphe topologique), alors les temps d'occupation d'un arc et d'un nœud sont respectivement le temps de parcours de la section de voie correspondante et le temps de traversée du lieu correspondant (par exemple une gare). Le temps de traversée peut inclure un temps de stationnement du train dans le cas d'une desserte.

La représentation discrète du mouvement d'un train entre deux nœuds ne permet pas de conclure sur sa faisabilité. Si l'on souhaite limiter le risque d'infaisabilité, il est nécessaire d'exprimer des contraintes sur les horaires des circulations. Ces contraintes peuvent être exprimées sous la forme d'un temps d'occupation minimal qui correspond au temps de parcours minimal d'un arc et au temps de traversée minimal d'un nœud :

$$d_{t,e} - a_{t,e} > o_{t,e}^{min} \qquad (2.6)$$

où :

- $a_{t,e}$ et $d_{t,e}$ sont respectivement les dates d'arrivée et de départ du train t sur l'élément e (arc ou nœud) du graphe de voie ;
- $o_{t,e}^{min}$ est le temps d'occupation minimum du train t sur l'élément e.

La grille horaire d'un plan de transport est une modélisation discrète du mouvement des trains. Le diagramme espace-temps correspond à la représentation graphique d'une grille horaire, il s'agit donc également d'une représentation discrète de la dynamique des circulations (voir Figure 11). Plus généralement, les données permettant de construire une représentation discrète du mouvement des trains sont calculées soit à partir d'une représentation continue, soit à partir d'une représentation discrète plus fine (par exemple des données mesurées).

2.1.3 Contrôle, commande, supervision

Le mouvement des circulations sur l'infrastructure est conditionné, d'une part, par la signalisation ferroviaire, principale garante de la sécurité sur le réseau, et, d'autre part, par la régulation qui supervise et adapte le parcours des trains en temps réel. Dans une modélisation du trafic, les fonctions de contrôle, commande et supervision de l'infrastructure et des circulations, exécutées par la signalisation et la régulation, doivent être retranscrites.

L'infrastructure, les circulations, la signalisation et la régulation composent les éléments essentiels d'un système de transport. Chaque composant est caractérisé par son comportement et ses interactions avec le système. Chaque composant peut être décrit par un modèle particulier. Pour modéliser le comportement du système global, il sera alors intéressant de s'appuyer sur une structure de plus haut niveau, permettant de retranscrire la configuration complexe du système et l'interaction entre les différents sous-modèles.

2.1.3.1 Modélisation multi-agent

L'approche multi-agent offre une vision conceptuelle de la structure d'un système. Un modèle multi-agent est composé de plusieurs agents (entités) interagissant entre eux dans un système et un environnement communs. Chaque agent est caractérisé par son niveau de connaissance, son niveau de prise de décision, et son niveau d'action. Cette approche permet de modéliser aisément un système de taille importante et comportant des interactions fortes.

Les systèmes multi-agent sont particulièrement adaptés pour la conception et l'analyse des systèmes de transport. En effet, un système de transport est géographiquement distribué. Il est composé de sous-systèmes répartis dans l'espace et qui évoluent dans un environnement dynamique. Ces sous-systèmes sont en interaction les uns avec les autres. L'évolution d'un sous-système a une répercussion directe sur l'évolution des autres sous-systèmes. Ainsi, les systèmes multi-agent ont été appliqués pour différents modes de transport, dont le trafic ferroviaire. Les applications ont principalement porté sur : l'architecture des systèmes de gestion de trafic (de type signalisation ou supervision) et la modélisation de l'organisation globale d'un système de transport pour la simulation. Nous citons ici quelques exemples d'applications intégrant un système de contrôle-commande ou de supervision, dans le but de donner un aperçu de la maniabilité de la modélisation par système multi-agent. Pour plus d'informations, le lecteur peut se référer à (Chen et Cheng 2010) qui propose une revue approfondie des applications de la modélisation multi-agent au domaine des transports.

(Verma et Pattanaik 2015) propose une modélisation multi-agent pour un système de pilotage automatique des trains (CBTC) intégré à un trafic mixte sur le réseau ferroviaire

indien. Les principaux agents sont les contrôleurs de zone, les contrôleurs de station, le système de contrôle au sol et les systèmes de contrôle à bord des trains. (Wenjun et Duowang 2011) propose une architecture multi-agent générique pour un système de signalisation ferroviaire. Les différents agents (signal, aiguillage, zone…) sont liés par des relations hiérarchiques ou de coopération. (Chabrol et Sarramia 2001) propose une modélisation d'un système de signalisation pour la gestion du trafic automobile urbain. L'approche multi-agent permet de décrire le processus décisionnel entre différents agents coordinateurs de zone dans le but d'éviter les phénomènes de congestion sur le périmètre étudié. (Dresner et Stone 2004) propose un système de réservation pour la traversée d'intersections routières en zone urbaine. Ce système est dédié à un trafic de voitures autonomes. Chaque voiture constitue un agent complètement autonome, capable de communiquer avec le système de réservation et de fournir différentes informations le concernant (heure d'arrivée prévue, vitesse, destination…). L'agent constituant le système de réservation accepte ou refuse les requêtes reçues de la part des agents-voitures. Dans (Balbo 2000), l'auteur conçoit un système de régulation du trafic de bus basé sur l'interaction entre des agents « arrêt » et des agents « bus ». Cet ensemble d'agents peut être complété par des agents additionnels, créés et détruits dynamiquement, en charge de gérer les incidents intervenant sur le réseau.

La conception multi-agent permet de structurer l'organisation d'un système complexe. Chaque agent peut par ailleurs porter un modèle indépendant décrivant son état et son comportement dynamique. La structure multi-agent permet finalement d'interconnecter ces modèles selon différents niveaux d'autonomie, de collaboration et de réactivité (Chen et Cheng 2010).

2.1.3.2 Modèle de signalisation orienté composant

La signalisation rassemble de nombreux composants qui interagissent selon une logique complexe. Certaines applications cherchant à modéliser un trafic ferroviaire requièrent de retranscrire cette logique dans leur modèle. En particulier, la modélisation de la logique de la signalisation est nécessaire pour :

- acquérir l'état des composants de signalisation à un instant donné ;
- valider formellement les mécanismes de signalisation ;
- dimensionner une installation de signalisation ;
- évaluer précisément la capacité d'une infrastructure ;
- calculer précisément une grille horaire.

Pour retranscrire la logique de signalisation dans un modèle, il est pertinent de décrire chaque composant et ses interactions avec son environnement. A notre connaissance, relativement peu de modèles orientés composant ont été proposés dans la littérature.

Parmi les modèles publiés, le principal outil de modélisation utilisé est le réseau de Pétri. Les réseaux de Pétri (Reisig 2013) forment un outil de modélisation graphique riche et maniable pour les systèmes à événements discrets. Un réseau de Pétri classique comporte deux types de nœuds en nombre finis : les places et les transitions. L'évolution de l'état du réseau de Pétri s'appuie sur une fonction de marquage par jeton : une transition est validée si toutes ses places en entrée ont au moins un jeton, et le marquage résultant est obtenu en retirant un jeton de chacune des places d'entrée et en ajoutant un jeton à chacune des places de sortie. La précision de la modélisation par réseaux de Pétri s'affine au détriment de la taille du modèle. Certaines extensions ont permis de faciliter leur usage et de réduire la taille des modèles. On peut citer en particulier les réseaux de Pétri colorés qui proposent une différenciation des jetons en leur associant une couleur. Chaque jeton peut aussi être porteur d'informations complémentaires. Enfin, les réseaux de Pétri temporels permettent de spécifier un système dans lequel le temps (ou une autre grandeur continue et quantifiable) est un paramètre explicite.

Dans (Giua et Seatzu 2008), les auteurs proposent un modèle dynamique de l'infrastructure ferroviaire incluant les voies, les équipements de signalisation, les stations (ensemble de voies et d'équipements) et la protection des trains. L'objectif à terme est d'utiliser ce modèle pour mettre en œuvre des décisions de régulation dans un environnement ferroviaire simulé.

Dans (Lalouette, et al. 2010), un modèle du système de signalisation ERTMS (ERTMS 2016) sur le réseau français est construit à partir de réseaux de Pétri colorés. Les gares, les cantons, les aiguilles, le block automatique lumineux (BAL), le contrôle de vitesse par balise (KVB) et les fonctionnalités spécifiques d'ERTMS ont été modélisés indépendamment, en tant que composant de la signalisation. Un modèle global permet d'orchestrer ces composants selon les principes de fonctionnement du système ERTMS et du système de signalisation ferroviaire français. Le modèle de signalisation ainsi construit est utilisé pour des analyses de sûreté de fonctionnement. Des incidents types sont directement injectés au niveau des composants.

Les diagrammes d'état ont également été utilisés pour modéliser la signalisation ferroviaire à partir de ses composants (Hei, et al. 2013), (Yoon, Kim et Kim 2008).

2.1.3.3 Modèle de signalisation basé sur les temps d'allocation (blocking time model)

La modélisation de la signalisation ferroviaire basée composant demande une compréhension approfondie des mécanismes mis en jeu, et un niveau de détail élevé. La taille du modèle résultant est souvent importante et ne convient pas à certaines applications telles que les applications en temps réel. La signalisation ferroviaire peut être représentée plus directement par les conséquences qu'elle implique sur un trafic, sans détailler les mécanismes qui génèrent cet impact. On peut alors utiliser le modèle du temps d'allocation (blocking time model) (Hansen et Pachl 2008). Ce modèle attribue à chaque train un temps d'allocation sur chaque canton qu'il parcourt.

Le temps d'allocation est la durée totale attribuée au mouvement d'un train sur une section, pendant laquelle cette section est indisponible pour les autres trains. Le temps d'allocation démarre lorsque le train est explicitement autorisé à entrer sur la section. Sur une infrastructure avec signalisation latérale, cela correspond à l'instant où le signal Carré correspondant à la section s'ouvre. Le temps d'allocation prend fin lorsque la section est disponible pour une autre circulation, c'est-à-dire lorsque le train a quitté la section et que la signalisation peut autoriser un autre train à entrer sur la section. Le temps d'allocation est donc nécessairement supérieur au temps d'occupation de la section par un train. Il synthétise tous les temps techniques qui caractérisent le passage d'un train sur un canton, de la préparation de l'itinéraire jusqu'à sa libération complète. Afin de construire un modèle de temps d'allocation correct, il est nécessaire de calculer les temps d'allocation à partir d'une modélisation précise du mouvement des trains sur une infrastructure comportant un modèle de signalisation détaillé. Le modèle du temps d'allocation est une vue macroscopique de l'impact de la signalisation sur les circulations.

Sur un système de signalisation classique avec cantonnement fixe (voir 1.1.1), le temps d'allocation correspond à la somme des durées suivantes :

- temps d'établissement de l'itinéraire ;
- durée de visibilité du signal ;
- durée d'approche du signal ;
- temps de parcours de la section ;
- durée de dégagement de la section ;
- durée de libération des enclenchements encore actifs.

Le temps d'allocation permet de déduire l'intervalle minimum au niveau du signal d'entrée du canton entre deux trains successifs. La Figure 24 et la Figure 25 représentent le temps

d'allocation et l'intervalle minimum entre deux trains au niveau d'un signal. Elles correspondent respectivement à un train meneur sans arrêt et avec arrêt. Ces figures sont extraites de (Hansen et Pachl 2008). En considérant le temps d'allocation d'un train sur tous les cantons qui composent une section de voie, on obtient de la même manière l'intervalle minimum entre ce train et un train suiveur sur la section de voie.

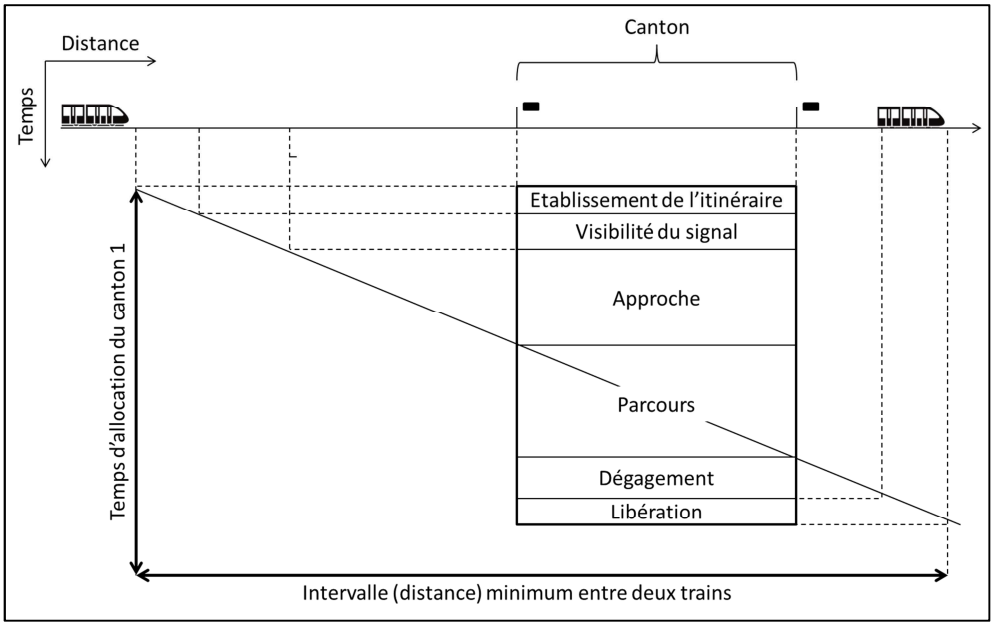

Figure 24 : Représentation du temps d'allocation et de la distance minimale séparant deux trains sans arrêt pour un canton donné, d'après (Hansen et Pachl 2008)

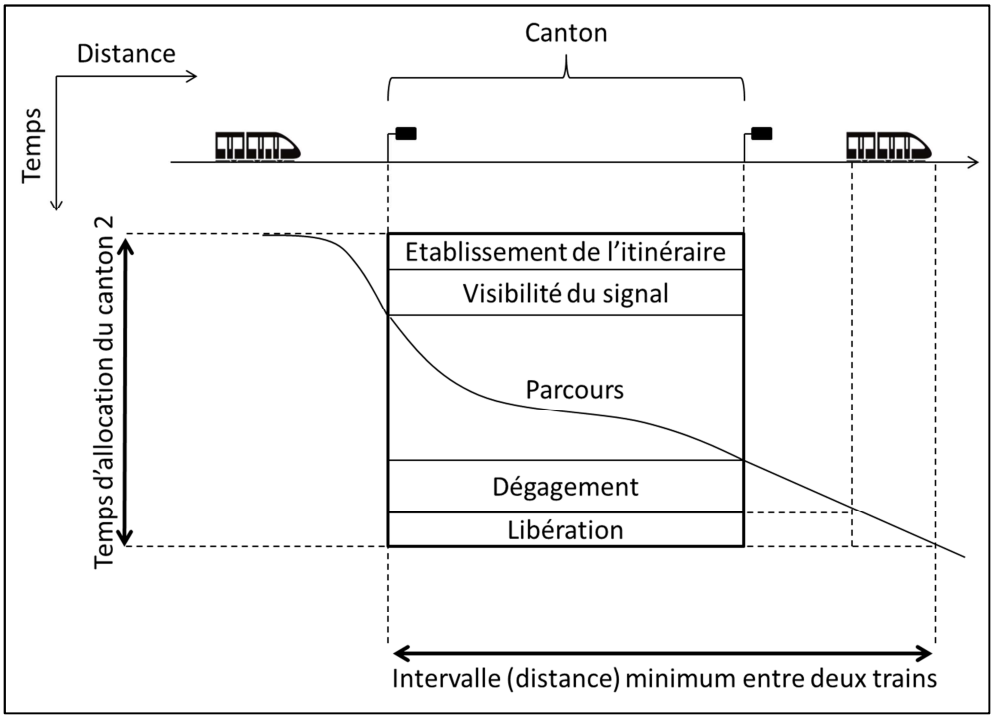

Figure 25 : Représentation du temps d'allocation et de la distance minimale séparant deux trains avec arrêt pour un canton donné, d'après (Hansen et Pachl 2008)

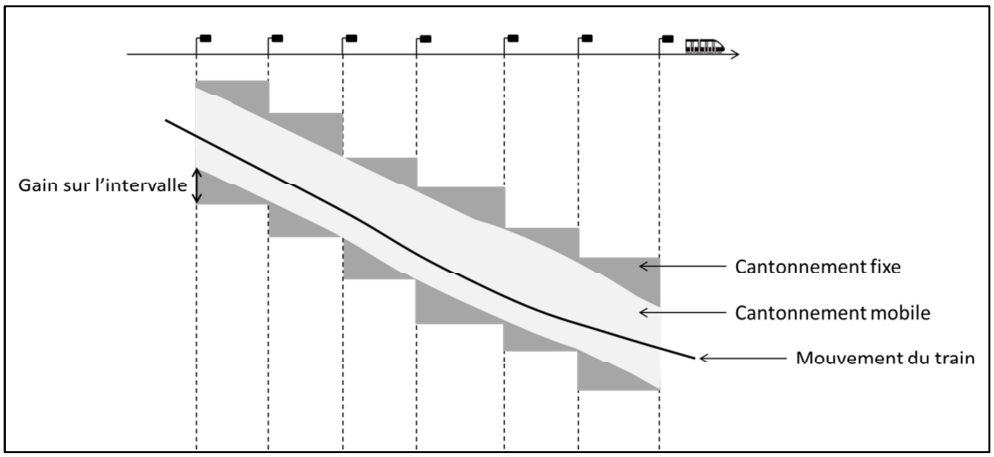

Figure 26 : Comparaison des temps d'allocation pour du cantonnement fixe et du cantonnement mobile, d'après (Hansen et Pachl 2008)

Le modèle du temps d'allocation peut également être adapté à une signalisation à cantonnement mobile (voir 1.1.2.3). Dans ce cas, le temps d'allocation correspond à la somme des durées suivantes :

- temps d'établissement de l'itinéraire ;
- temps de réaction du conducteur ou de l'automatisme de conduite ;
- durée d'approche du signal ;
- temps de cycle de localisation du train ;
- durée de dégagement de la section ;
- durée de libération des enclenchements encore actifs.

En cantonnement mobile, le temps d'allocation devient lui aussi « mobile». Il ne correspond plus à un temps fixe pendant lequel le canton est bloqué, mais à un intervalle de protection qui évolue en continu avec l'avancée du train (voir Figure 26).

2.2 Formulation d'un problème de régulation

Dans cette partie, nous allons nous intéresser au problème de régulation du trafic ferroviaire. La régulation consiste à intervenir sur le trafic en cas de perturbation afin de limiter ou résorber son impact. Elle correspond donc à une prise de décision pour répondre à un problème. Le problème que la régulation doit résoudre, appelé ici problème de régulation, correspond à une représentation de l'état perturbé du système. Ce problème est caractérisé par des variables de décisions, des contraintes, et des objectifs. La formulation du problème doit retranscrire ces caractéristiques. Pour cela, la formulation d'un problème

de régulation s'appuie sur une modélisation du trafic ferroviaire, à partir des outils de modélisation présentés précédemment dans ce chapitre.

2.2.1 Données du plan de transport

Le plan de transport constitue généralement une donnée d'entrée pour la formulation du problème de régulation. Les études portant plus spécifiquement sur la régulation du trafic utilisent les données de la grille horaire du plan de transport pour formuler le problème de régulation. Lorsqu'une étude s'intéresse aux perturbations majeures, aboutissant à un blocage des circulations, l'allocation des ressources humaines et matérielles composant le plan de transport doivent également être considérées dans la formulation du problème. On parle alors de problème de roulement plutôt que de problème de régulation.

La grille horaire d'un plan de transport peut être représentée comme une liste de points remarquables portant chacun une date d'arrivée et une date de départ. Selon les objectifs de l'étude, le niveau de détails du plan de transport peut être allégé (seule une partie des points remarquables est considérée) ou étoffé (des points remarquables sont ajoutés, sur la base d'informations complémentaires).

Lorsque l'on formule un problème de régulation, une approche classique consiste à décliner la grille horaire en trois instances.

- Le plan de transport de référence constitue le plan théorique initialement prévu. L'exploitation ferroviaire cherche généralement à rester au plus proche de ce plan.

- Le plan de transport recalculé constitue une mise à jour du plan de transport théorique à partir des évènements et des informations collectés en temps réel. La procédure de mise à jour du plan de transport peut varier d'une application à l'autre. On peut par exemple procéder ainsi : en cas d'avance d'une circulation sur un point remarquable, l'horaire effectivement mesuré est mis à jour mais les horaires suivants ne sont pas modifiés. En cas de retard d'une circulation sur un point remarquable, l'horaire effectivement mesuré est mis à jour, et les horaires des étapes suivantes sont également décalés. Il est également possible de recalculer plus finement le plan de transport grâce à la simulation du mouvement des trains sur un outil approprié.

- Le plan de transport simulé, initialisé sur le plan de transport recalculé, permet d'évaluer différentes solutions possibles lors de la résolution du problème de régulation (voir 2.2.2).

A partir du plan de transport de référence et du plan de transport recalculé, il est possible de retranscrire l'état perturbé du système et de mesurer l'écart de la situation courante avec les objectifs à atteindre.

2.2.2 Modélisation par graphe des alternatives

Le graphe des alternatives a été appliqué au transport ferroviaire pour modéliser l'ordonnancement des mouvements des trains sur la voie. Il constitue une extension de la représentation de l'infrastructure par graphe (voir 2.1.1.1), qui permet de formuler un problème de régulation à partir d'une représentation discrète du mouvement des trains (voir 2.1.2.2) et du modèle du temps d'allocation (voir 2.1.3.3). Le graphe des alternatives a été utilisé pour la construction de tables horaires, l'étude de conflit et la re-planification. Son principe est détaillé dans (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013).

Dans un graphe des alternatives, chaque nœud représente l'occupation d'une ressource (canton) par un train donné et les arcs représentent les transitions entre les nœuds. On peut donc distinguer deux types d'arcs : les arcs qui relient deux nœuds correspondant à un même train représentent les temps d'occupation des ressources par le train ; les arcs qui relient deux nœuds correspondant à une même ressource, mais à 2 trains différents, représentent l'espacement des trains occupant successivement cette ressource (selon le modèle du temps d'allocation). Si l'attribution des cantons aux trains n'est pas réalisée, les alternatives sont des pairs d'arcs. Une fois l'attribution réalisée, seul un arc par paire d'alternatives est retenu.

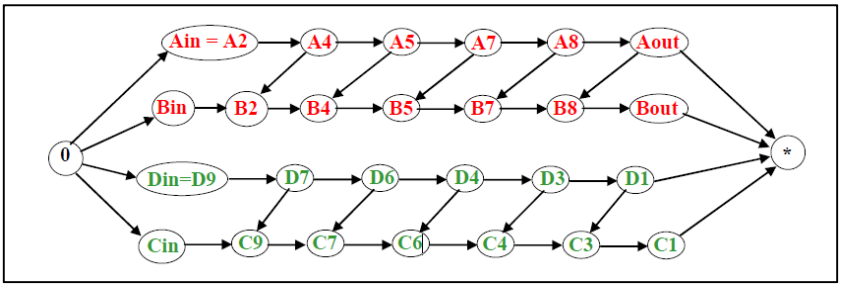

Figure 27 : Graphe des alternatives extrait de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013)

Sur la Figure 27, la Figure 28 et la Figure 29, extraites de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013), les lettres A, B, C et D représentent des trains. Les chiffres (de 1 à 9) représentent les cantons à emprunter. Sur la Figure 27, les trains A et B en rouge empruntent le même parcours. Le train A précède le train B sur ce parcours. Cet ordre, représenté par les flèches noires, est fixe. Les trains C et D en vert empruntent le même parcours. D précède C, et cet ordre est fixe. Le parcours rouge et le parcours vert comportent en commun les cantons 4 et 7. Il est nécessaire de déterminer l'ordre de passage des trains sur ces cantons. Pour cela, il

faut construire le graphe des alternatives comportant toutes les paires d'arcs possibles concernant l'ordonnancement des trains sur les cantons. Ces paires d'arcs sont représentées en couleur sur la Figure 28.

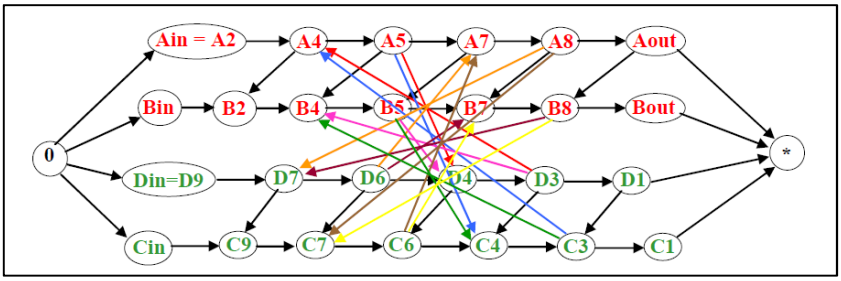

Figure 28 : Graphe des alternatives comportant toutes les paires d'arcs possibles, extrait de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013)

Parmi toutes les paires de couleur, il faut choisir un arc. Chaque choix d'arc, parmi une paire, correspond au choix d'un ordre de passage. L'ordonnancement des trains est complètement déterminé lorsqu'il ne reste qu'un arc par paire, comme c'est le cas sur la Figure 29.

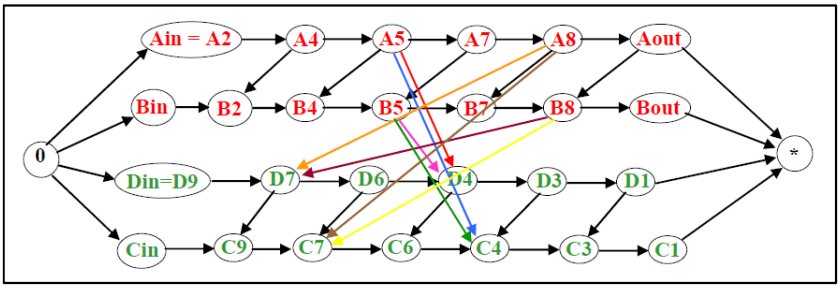

Figure 29 : Graphe des alternatives après choix d'un arc par paire, extrait de (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013)

Les dimensions du graphe augmentent rapidement avec la taille du problème : le nombre d'arcs augmente quadratiquement avec le nombre de trains (quatre trains A, B, C et D sur l'exemple présenté), et linéairement avec le nombre de ressources (neuf ressources sur l'exemple présenté). Le graphe des alternatives n'est donc généralement pas adapté à des problèmes de taille élevée.

Le graphe des alternatives est un outil de modélisation qui peut être réécrit sous la forme d'un programme linéaire mixte (voir 2.2.3.1). Chaque paire d'alternatives est alors traduite en une paire de contraintes à laquelle on associe une variable binaire traduisant le choix de l'alternative retenue.

2.2.3 Modélisation mathématique du problème de régulation

2.2.3.1 Généralités sur les modèles d'optimisation

La formulation algébrique d'un problème permet de le modéliser, puis de le résoudre. On parle alors de programmation mathématique. Le problème étudié est exprimé sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes, qui peut s'écrire de la façon suivante (Fouilhoux 2015) :

$$\begin{array}{lll} \textit{Maximiser} & f(x) & \\ \textit{avec} & g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m & \\ & x \in S & \end{array} \qquad (2.7)$$

où :

- le vecteur-solution x est composé de n variables ;
- l'ensemble $S \subset \mathbb{R}^n$ est l'espace des solutions ;
- la fonction $f : S \to \mathbb{R}$ est la fonction-objectif du problème ;
- les fonctions $g_i : S \to \mathbb{R},\ i = 1, \dots, m$, forment l'ensemble des m contraintes du problème.

Si l'ensemble S est continu, on parle de problème d'optimisation continu. Si l'ensemble S est discret, on parle de problème d'optimisation discret, ou entier. On parle de programmation mathématique mixte, si certaines composantes du vecteur x prennent leurs valeurs dans un ensemble discret et les autres dans un ensemble continu. Sur les cas d'application réels, les problèmes comportant des variables discrètes sont nombreux. La programmation mixte, ou entière, est très largement utilisée en pratique pour modéliser des problèmes théoriques ou expérimentaux.

Si la fonction-objectif f et les fonctions-contraintes $g_i,\ i = 1, \dots, m$ sont linéaires, on parle de programmation linéaire.

Un problème linéaire mixte peut s'écrire de la façon suivante (Fouilhoux 2015) :

$$\begin{array}{ll} \textit{Maximiser} & c_1^T x_1 + c_2^T x_2 \\ \textit{avec} & A_1 x_1 + A_2 x_2 + b \leq 0 \\ & x_1 \in \mathbb{R}^{n_1} \\ & x_2 \in \mathbb{Z}^{n_2} \end{array} \qquad (2.8)$$

où :

- x_1 correspond aux composantes continues du vecteur-solution,
- x_2 correspond aux composantes discrètes du vecteur-solution,
- c_1 et c_2 sont des vecteurs,
- A_1 et A_2 sont des matrices.

Pour plus d'informations sur la programmation mathématique pour l'optimisation, le lecteur intéressé peut se référer à (Fouilhoux 2015).

2.2.3.2 Formulation d'un problème de régulation

L'écriture sous forme de programme mixte ou entier est un outil de modélisation puissant et maniable qui a été largement utilisé pour l'étude de performance des systèmes ferroviaires. Outre sa maniabilité, le programme mathématique permet en particulier de prendre en compte la combinatoire importante du problème et les interconnections nombreuses du système ferroviaire. Le programme linéaire entier permet de concilier des variables entières, la linéarité des fonctions objectif, des contraintes de type inégalité. Cette formulation s'effectue facilement dans le contexte ferroviaire.

Les programmes mixtes décrivant un système ferroviaire se basent sur des variables continues ou discrètes qui représentent les dates des évènements de départ et d'arrivée des trains. Selon le modèle d'infrastructure choisi, les évènements d'arrivée et de départ correspondent à l'entrée et à la sortie des trains sur les segments (les points remarquables et les stations sont alors implicites), ou à l'entrée et à la sortie des trains sur les points et les stations (les segments sont alors implicites). Certains modèles sont complétés avec des variables discrètes binaires qui représentent par exemple l'ordre de passage des trains sur les segments ou sur les points remarquables, le choix d'itinéraire, ou encore la modification d'une opération prévue.

La fonction-objectif, souvent sous forme linéaire, exprime généralement une comparaison avec le plan de transport de référence (par exemple le plan de transport initial). Cette

comparaison peut s'effectuer sur un ou plusieurs critères comme nous le verrons par la suite.

Les fonctions-contraintes, souvent sous forme linéaire, permettent de garantir la cohérence des variables du vecteur-solution, et de retranscrire les contraintes du système ferroviaire réel.

Parmi les modèles linéaires mixtes publiés, le lecteur intéressé pourra se référer aux exemples suivants : (Gély 2011), (Andersson, Peterson et Törnquist Krasemann 2015), (Fushsberger 2012), (Acuna-Agost 2009), (Pellegrini, Marliere et Rodriguez 2012).

2.2.3.3 Contraintes sur le mouvement des circulations

Les modèles mathématiques sont exprimés à partir de variables représentant l'état du système étudié. Les contraintes exprimées dans ces modèles permettent de garantir la cohérence de certaines variables et de retranscrire les contraintes du système réel. Nous listons ici les principales contraintes couramment utilisées dans la littérature portant sur l'étude du trafic ferroviaire. Ces contraintes portent sur l'allocation des ressources aux circulations et sur la coordination du mouvement des circulations qui permettent de définir une grille horaire saine. La formulation de ces contraintes dépend directement de la formulation du problème et du choix des variables. Des contraintes supplémentaires, portant sur les ressources matérielles et humaines, sont ajoutées lorsque l'on cherche à formuler un problème de roulement.

Parmi les contraintes du problème de régulation, on trouve tout d'abord celles traduisant la faisabilité d'une opération. Ces contraintes doivent assurer :

- le respect de la vitesse maximale atteignable par une circulation (selon le type de matériel roulant) ;
- le temps de retournement minimal des trains (en gare ou en tiroir) ;
- la cohérence entre les séquences d'arrivée et de départ des trains (sur les nœuds ou sur les segments), et l'infrastructure (alternat permettant le dépassement, voie unique…) ;
- l'unicité de l'itinéraire choisi sur chaque portion de voie.

Le problème de régulation comporte également des contraintes qui traduisent l'impact des systèmes de signalisation ferroviaire. Ces systèmes de signalisation autorisent, limitent ou interdisent l'évolution des circulations sur la voie. Les contraintes liées à la signalisation permettent de retranscrire le modèle du temps d'allocation (voir 2.1.3.3). Elles doivent garantir le respect de :

- l'espacement minimal entre les trains ;
- la capacité maximale de chaque ressource (canton, gare) ;
- la vitesse maximale autorisée sur chaque portion de voie.

Ces contraintes liées à la signalisation s'expriment sous la forme d'un intervalle minimal entre deux évènements (arrivée ou départ). A cet intervalle minimal, on peut ajouter un intervalle tampon représentant une marge d'exploitation entre deux évènements. Cet intervalle tampon permet de garantir une grille horaire plus robuste, et, dans certaines situations, de compenser un léger retard.

Enfin, des contraintes supplémentaires peuvent retranscrire les règles d'exploitation usuelles appliquées dans le système ferroviaire étudié. Ces contraintes peuvent par exemple exprimer le respect :

- des restrictions sur les modifications d'itinéraire ou de quai ;
- de l'interdiction de départ avant l'horaire théorique ;
- du temps d'arrêt minimal des circulations lors de la desserte d'une gare ;
- du temps d'occupation maximal d'une ressource (canton, gare) ;
- des temps minimal et maximal de correspondance entre deux circulations.

2.3 Résolution d'un programme mathématique

La programmation mathématique est un outil de modélisation intéressant pour formuler un problème de régulation. Elle permet de formuler clairement les variables du système, ses objectifs et ses contraintes. L'écriture d'un problème mathématique permet en particulier de le résoudre facilement dans de nombreux cas, grâce à un vaste choix de méthodes, qui ont pour la plupart été développées, étudiées et appliquées dans divers contextes théoriques et industriels.

2.3.1 Résolution exacte ou approchée

La résolution d'un problème est dite exacte si elle garantit l'obtention d'une ou plusieurs solutions optimales. Dans de nombreux cas, la détermination d'une solution exacte prend du temps. Pour résoudre un problème d'optimisation issu d'une application de production industrielle, il est nécessaire de considérer le temps de calcul acceptable, l'intérêt opérationnel d'une résolution exacte, et les conditions pratiques (machine, puissance de calcul…). Dans bien des cas, on préfère privilégier une résolution approchée (ou méthode heuristique) : on souhaite un algorithme efficace, permettant de déterminer une « bonne solution » (potentiellement non-optimale) en un temps acceptable. Une « bonne solution » est une solution non triviale, de valeur supérieure à celle que produit la méthode de résolution préexistante (Fouilhoux 2015). La résolution approchée ne permet pas, en général, de garantir l'écart avec la valeur optimale. Par contre, le temps accordé à la résolution est maitrisé, ce qui s'avère souvent indispensable pour une application de production industrielle.

2.3.2 Méthodes heuristiques pour l'optimisation combinatoire

Les méthodes heuristiques doivent fournir des solutions réalisables, si possible de bonne qualité, en un temps acceptable selon le problème pratique étudié. Ce type de méthode est particulièrement employé pour les problèmes devant être résolus sur un intervalle de temps très court, ou en temps réel. Une heuristique peut être conçue spécifiquement pour un problème, à partir d'une idée, d'un savoir-faire ou d'une expertise. Des méthodes heuristiques ont également été conçues à partir de principes généraux dans le but d'être adaptées et appliquées à des problèmes divers. On les appelle méta-heuristiques (Fouilhoux 2015).

De nombreuses méthodes méta-heuristiques ont été développées, étudiées et appliquées à des cas concrets. On les regroupe principalement selon trois catégories :

- les méthodes gloutonnes : au fil des itérations, on fixe de façon définitive la valeur des variables. On ne remet pas en cause les choix précédents (les variables ont été « mangées »). La solution est donc construite de proche en proche ;

- les méthodes de recherche locale : à chaque itération, le choix de la solution se fait dans un ensemble localement proche de la solution retenue à la précédente itération. La détermination d'un bon voisinage et le choix d'une solution dans un voisinage sont donc des notions clés de ce type de méthodes ;

- les méthodes évolutives : ces algorithmes mettent en œuvre une évolution des solutions au cours de générations successives. On compose une population d'individus que l'on fait évoluer sur plusieurs générations grâce à des mécanismes d'évolution qui permettent d'éliminer certains individus et d'en construire des nouveaux.

Nous décrivons ici brièvement le principe d'une méthode d'optimisation heuristique appelée algorithme génétique. Cette méthode sera mise en œuvre par la suite (voir Chapitre 3). Les algorithmes génétiques font partie des méthodes largement utilisées pour des problèmes d'optimisation liés à des applications industrielles. Leur principe de fonctionnement est relativement intuitif et flexible.

Les algorithmes génétiques font partie des méthodes évolutives. Ils sont inspirés de l'évolution génétique du monde vivant : une population est composée d'individus, chacun est représenté par un chromosome. Ce chromosome est un codage sous forme d'une chaîne de gènes. La valeur effective d'un gène est un allèle. Autrement dit, un chromosome, un gène, et un allèle représentent respectivement, une solution, un attribut de la solution et la valeur de l'attribut (Fouilhoux 2015). La fonction d'évaluation des individus exprime leurs phénotypes, c'est-à-dire leur capacité à résoudre le problème. On parle aussi d'efficacité (voir Figure 30). La fonction d'évaluation peut être formulée sous des formes variées. En particulier, elle peut être indifféremment linéaire ou non linéaire.

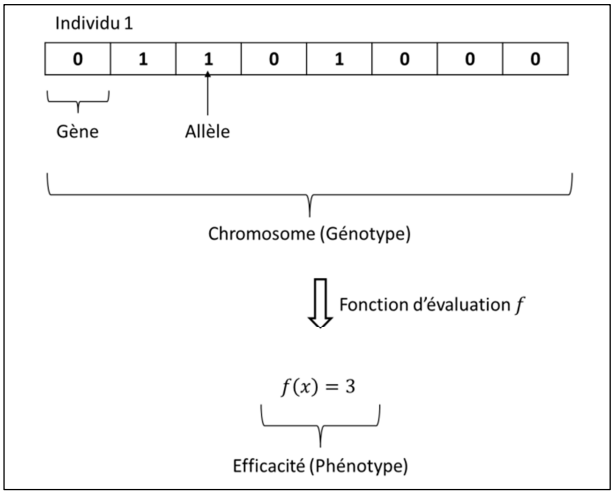

Figure 30 : Représentation d'un individu selon la terminologie des algorithmes génétiques

Sur la Figure 31, on représente trois individus, chacun représenté par un chromosome portant huit gènes. La valeur des allèles peut répondre à un codage binaire des variables d'optimisation. En pratique, il peut être intéressant qu'une petite variation dans le chromosome n'entraine pas une trop grande variation dans le phénotype. Le codage binaire n'est donc pas toujours adapté.

Individu 1							
0	1	1	0	1	0	0	0
Individu 2							
0	0	1	0	0	0	0	1
Individu 3							
0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 31 : Représentation de trois individus sous forme de chromosome

Les opérateurs d'évolution mis en œuvre agissent stochastiquement sur le chromosome des individus.

- La sélection consiste à prélever une partie des individus aléatoirement, en privilégiant les meilleurs individus au sens du problème d'optimisation.

- Le croisement consiste à construire un chromosome à partir des segments de chromosome de deux parents pour produire un nouvel individu enfant. Les individus produits par croisement sont des combinaisons de valeurs existantes. Par exemple, le croisement bipoint échange le segment de chromosome entre deux points choisis aléatoirement.

- La mutation consiste à modifier aléatoirement la valeur de un ou plusieurs gènes sur un chromosome. La mutation introduit de nouvelles valeurs.

L'algorithme génétique cherche à faire évoluer une population d'individus au fil des générations. Chaque génération subit des opérations de sélection, de mutation et de croisement puis aboutit à une nouvelle génération d'individus. Généralement, la probabilité d'occurrence des opérateurs de sélection et de croisement dépend de l'efficacité de l'individu. Plus un individu sera efficace dans la résolution du problème, plus les probabilités qu'il soit sélectionné et croisé sont élevées. La probabilité d'occurrence d'une mutation est la plupart du temps faible et indépendante de son efficacité.

2.3.3 Optimisation multi-objectif

Dans de nombreux cas, il peut s'avérer difficile de formuler une fonction d'évaluation qui exprime correctement les besoins motivant la résolution d'un problème. En particulier, sur des applications à des cas réels, il est fréquent de chercher à satisfaire plusieurs objectifs à la fois. Par exemple, dans de nombreux problèmes, on cherche à obtenir de bonnes performances tout en limitant la consommation de ressources (énergie par exemple). La résolution d'un problème selon plusieurs objectifs est appelée optimisation multi-objectif.

La résolution multi-objectif cherche à satisfaire au mieux les différents objectifs. Un problème multi-objectif a le plus souvent de nombreuses solutions. Cette multiplicité des solutions traduit le fait que les objectifs du problème sont discordants. Une solution maximise un certain nombre d'objectifs, tout en en dégradant potentiellement d'autres (voir Figure 32). Une solution consiste finalement en un compromis entre les objectifs.

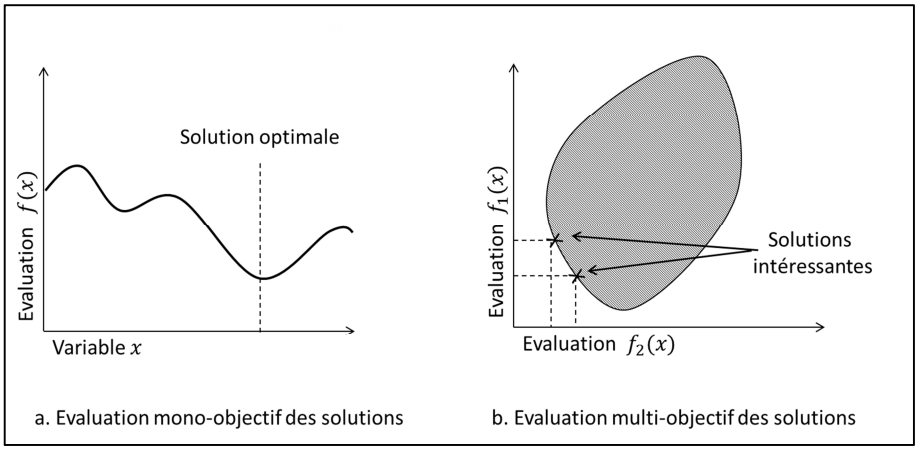

Figure 32 : Evaluations mono-objectif et multi-objectif (minimisation) sur un cas mono variable

Afin de pouvoir identifier les solutions intéressantes et les départager, il est nécessaire de définir une relation de dominance entre les solutions. Généralement, on dit qu'on vecteur x domine un vecteur x' si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- l'évaluation du vecteur x est égale ou meilleure que celle du vecteur x' sur tous les objectifs ;
- l'évaluation du vecteur x est meilleure que celle du vecteur x' sur au moins un objectif.

Cette relation de dominance permet de définir la notion d'optimalité dans la résolution multi-objectif : les solutions qui ne sont dominées par aucune autre sont appelées solutions optimales au sens de Pareto. L'ensemble des solutions optimales au sens de Pareto forme ce que l'on appelle la surface de compromis, ou front de Pareto. A partir de la surface de compromis, on peut définir deux points caractéristiques (voir Figure 33).

- Le point de « nadir » est le point correspondant aux pires valeurs de chaque fonction objectif sur la surface de compromis.
- Le point idéal est le point correspondant aux meilleures valeurs de chaque fonction objectif, évaluées sur l'ensemble des solutions.

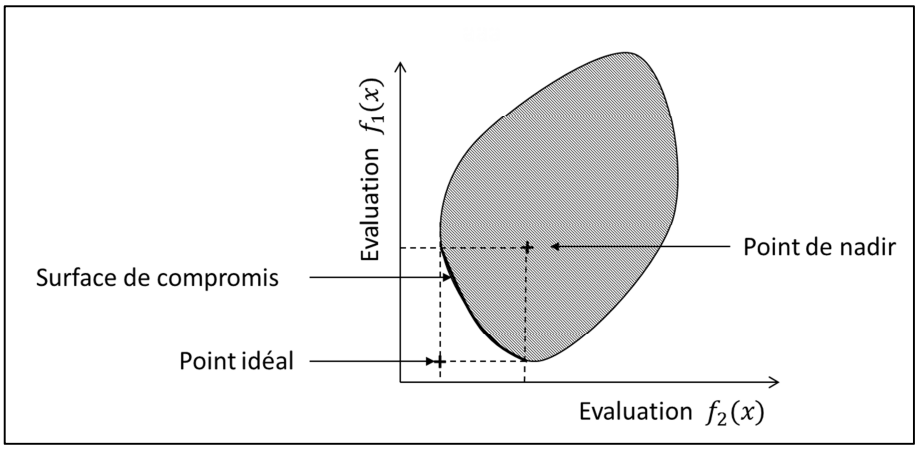

Figure 33 : Définitions de la surface de compromis, du point idéal et du point de nadir

La relation de dominance permet également de classer les solutions par rang de dominance (aussi appelé rang de Pareto). Les solutions optimales au sens de Pareto sont les solutions de rang 1. Pour obtenir les solutions de rang 2, on cherche les solutions non dominées dans l'ensemble des solutions étudiées auquel on a préalablement retiré les solutions de rang 1. On procède de la même manière pour les rangs suivants jusqu'à ce que l'ensemble des solutions étudiées soit vide. L'assignation du rang de dominance est illustrée par la Figure 34. Dans le tableau présenté, les solutions D et E ne sont dominées par aucune solution, et elles ne se dominent pas entre elles. Il s'agit des solutions optimales au sens de Pareto. On poursuit ensuite l'étude des rangs en considérant l'ensemble des solutions où l'on a retranché les solutions déjà assignées.

Solution	Evaluation de f_1	Evaluation de f_2	Rang de domination
A	2	3	3
B	1	3	2
C	2	1	2
D	2	0	1
E	1	2	1
F	3	2	3

Figure 34 : Etude du rang de domination d'un ensemble de solutions

Il est possible de définir des relations de dominance particulière, pour mieux tenir compte des particularités du problème étudié. Par exemple, on peut chercher à exprimer une préférence d'un objectif par rapport à un autre. Nous présentons quelques exemples de variantes de la relation de dominance au sens de Pareto définie précédemment.

- La dominance lexicographique est basée sur un classement des objectifs par ordre de préférence réalisé par l'utilisateur. La comparaison entre deux individus se fait par ordre de préférence des objectifs. Dès qu'une comparaison entre les valeurs de deux solutions sur un objectif résulte en une inégalité, on peut

conclure que la solution qui a remporté cette comparaison domine l'autre individu.

- La dominance extrême est basée sur l'attribution d'un poids à chaque objectif. Elle permet de ramener le problème multi-objectif à un problème mono-objectif. Une solution domine une autre solution si elle remporte la comparaison sur le monocritère résultant de l'agrégation des différents objectifs.

- La dominance maximale ne permet pas d'exprimer une préférence entre les objectifs. Une solution domine une autre solution si elle remporte la comparaison de la pire valeur de l'ensemble des objectifs de chacune. Cette relation de dominance amène donc à comparer les valeurs d'objectifs différents. Elle nécessite que les objectifs expriment des grandeurs homogènes.

Ces variantes de la relation de dominance permettent de définir sous différents angles l'optimalité dans une résolution multi-objectif. Pour plus de détails sur les différentes relations de dominance, le lecteur intéressé peut se référer à (Colette et Siarry 2011).

2.4 Stratégie de régulation sur un réseau ferroviaire

2.4.1 Introduction

Les outils de supervision de trafic en temps réel, existants ou présentés dans la littérature, sont définis comme des systèmes automatiques de support ou de pilotage pour la régulation. Ils sont déployés sur un réseau délimité, généralement une ligne unique ou une zone critique d'un réseau plus complexe (une gare ou une jonction par exemple). Les objectifs communs de ces outils sont de superviser automatiquement le trafic, et d'aider la prise de décisions, en matière de qualité et de rapidité, pour la régulation du trafic en temps réel.

Selon le périmètre couvert par la supervision, les principales fonctions à réaliser sont la mise en œuvre du plan de transport, la détection de perturbation, l'identification de perturbation, la régulation du trafic (voir Figure 35). En cas de dérive vis-à-vis du plan de transport théorique, la régulation doit prendre des décisions sur la base d'évènements prédits ou détectés, en vue du retour à la grille horaire théorique. Si ce rattrapage n'est pas possible, la régulation doit fournir un nouveau plan de transport ne comportant pas de conflit et répondant au mieux aux objectifs de l'exploitation.

Un système de supervision reçoit comme donnée d'entrée un plan de transport, généralement conçu en amont de l'exploitation. Il reçoit également, en temps réel, des informations sur l'état réel du trafic. Ces informations sont reçues de manière continue,

périodique ou évènementielle. Le plus souvent, elles consistent en des évènements d'arrivée et de départ des trains, en gare ou sur des points particuliers (par exemple des balises). La supervision peut aussi recevoir des informations relatives aux restrictions et aux interdictions à appliquer sur le réseau (limite temporaire de vitesse, ressource indisponible…), et dont elle doit tenir compte. En sortie, la supervision propose, au travers de ses fonctions de régulation, un nouveau plan de transport construit selon les objectifs de performance du système. On parle de re-planification. Dans certains cas, le système de supervision est également en charge de mettre en œuvre le plan de transport courant en commandant automatiquement les actions nécessaires aux différents acteurs concernés (opérateur de conduite, signalisation, voyageurs…).

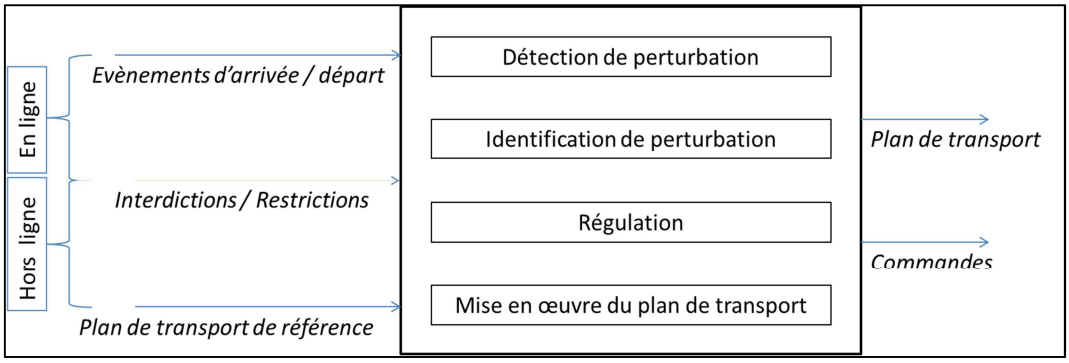

Figure 35 : Principales fonctions et flux d'informations d'un module de supervision de trafic

Les fonctions réalisées par la supervision s'appuient sur un modèle du système ferroviaire étudié qui permet de suivre son état au cours de l'exploitation. A partir du modèle, alimenté par les informations d'exploitation reçues en temps réel, les fonctions de supervision détectent les écarts au plan de transport théorique. Cette détection déclenche l'exécution des fonctions de prédiction, d'identification et de régulation.

2.4.2 Organisation de la décision

La régulation intègre un processus de prise de décision qui peut être conçu selon 2 grands types d'organisation.

Dans une approche centralisée, le problème à résoudre est traité en tant qu'instance unique. La taille du problème augmente donc rapidement avec la taille du réseau de transport. Les méthodes de résolution se trouvent vite limitées sur un réseau ferroviaire important, avec un modèle relativement précis. Cela est d'autant plus vrai si la prise de décision doit s'effectuer en un temps de calcul très réduit, pour proposer une solution en temps réel sur un réseau relativement dense.

Dans une approche distribuée, le problème est divisé en sous-problèmes traités parallèlement. Les sous-problèmes sont coordonnés dans un environnement coopératif, compétitif, ou hiérarchisé. Cette organisation peut s'avérer efficace pour gérer un réseau présentant une des caractéristiques suivantes : un réseau de transport de grande taille, des points critiques, ou des besoins spécifiques sur certaines zones. Généralement, un sous problème couvre une sous partie du réseau de transport, une jonction par exemple.

La principale difficulté de l'approche distribuée, vis-à-vis de celle centralisée, réside dans la coordination entre les solutions des sous problèmes vers une solution globalement faisable. En particulier, il est nécessaire d'exprimer des contraintes aux frontières de chaque sous problème pour vérifier la cohérence de la solution globale. Selon la méthode choisie, la coordination des solutions en une solution globale peut échouer. La conception d'un système distribué doit prendre en compte cette éventualité. Dans (Corman 2010), l'auteur étudie la décomposition d'un problème en sous problèmes, résolus localement puis coordonnés vers une solution globale faisable et optimale. Le cas d'étude présenté couvre une zone de 20 km qui comprend en son centre une gare complexe (20 quais). La distribution de la régulation s'effectue sur deux zones, leur frontière traverse chaque quai de la gare. La méthode distribuée est significativement plus rapide et affiche de meilleures performances de ponctualité. L'auteur conclut que la méthode de décomposition doit être adaptée au problème étudié. La distribution semble pertinente lorsque le réseau peut être découpé facilement, de façon à ce que le nombre de variables partagées soit faible. Il est également nécessaire que l'information alimentant le problème soit elle-même distribuée.

Dans (Kersbergen, van den Boom et De Schutter 2014), les auteurs proposent deux méthodes distribuées pour la régulation du trafic ferroviaire. La méthode 1 consiste en une distribution des variables de décision : chaque sous-problème considère le périmètre du problème global pour évaluer les différentes solutions possibles, mais n'est autorisé à modifier qu'une partie des variables de décision. La méthode 2 consiste en un découpage des variables de décision et du périmètre d'évaluation : chaque sous-problème correspond à un périmètre donné du problème global, ce périmètre délimite à la fois les variables de décision et la zone d'évaluation. Les stratégies sont testées sur de très nombreux scénarios. Quatre sous-problèmes sont formulés dans les approches distribuées. Il en résulte que les deux méthodes distribuées aboutissent à des solutions très satisfaisantes mais non-globalement optimales avec des temps de calcul bien inférieurs (39 fois plus courts en moyenne) à la méthode centralisée. La méthode 1 propose des solutions de meilleure qualité que la méthode 2 mais son temps de calcul est plus élevé (3 à 4 fois plus élevé en moyenne). Cette étude illustre bien le compromis réalisé entre méthodes distribuée et centralisée. La conception d'une méthode de régulation, et l'organisation sous-tendant la prise de décision dépendent des spécifications de temps de calcul et d'optimalité souhaités.

2.4.3 Stratégies de régulation

2.4.3.1 Objectifs de régulation

Les objectifs de régulation correspondent aux objectifs contractuels de l'exploitant, aux attentes des voyageurs et à la limitation des coûts commerciaux. Généralement, les objectifs de régulation sont exprimés sous forme de grandeurs que l'on cherche à minimiser (ou maximiser). Ces grandeurs sont les critères de décision sur lesquels se basent les fonctions de régulation. Nous citons ici les principaux critères de décision utilisés dans la littérature, ainsi que quelques exemples de travaux portant sur la gestion opérationnelle des circulations et utilisant ces critères. Il est à noter que la plupart des travaux considèrent plusieurs critères dans leurs processus de décision.

Critère de ponctualité

La ponctualité est un des objectifs principaux de la plupart des opérateurs ferroviaires. Il s'agit donc naturellement du critère le plus utilisé dans la littérature dédiée au transport ferroviaire (Gély 2011), (D'Ariano, D'Ariano, et al. 2013), (Andersson, Peterson et Törnquist Krasemann 2015), (Fushsberger 2012), (Corman 2010), (Fernandez Cardador, Cuadra Garcia et Garcia 1996), (De Schutter et van den Boom 2001). En pratique, ce critère est souvent exprimé à partir du retard vis-à-vis du plan de référence, mesuré sur les évènements d'arrivée et/ou de départ des circulations. Certaines études ne considèrent que les retards secondaires (c'est-à-dire les retards causés par un retard primaire lié à une perturbation) pour construire leurs critères. Le retard d'une circulation est généralement comptabilisé à son terminus. Il est également possible de le comptabiliser à chaque station desservie, ou sur certains points remarquables. Le critère de ponctualité exprime finalement le retard total ou le retard moyen des circulations que la régulation cherche à minimiser.

Dans le cas où l'on souhaite évaluer la ponctualité à chaque gare desservie, le critère de ponctualité peut être formulé ainsi :

$$C_p = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} max(0, (a_{t,s} - a^*_{t,s})) \qquad (2.9)$$

où :

- S est l'ensemble des stations considérées dans la zone de régulation (périmètre spatial) ;
- T_s est l'ensemble des trains desservant la station s dans l'horizon du problème de régulation (périmètre temporel) ;

- $a_{t,s}$ est la date d'arrivée recalculée (ou simulée) du train t à la station s ;
- $a^*_{t,s}$ est la date d'arrivée de référence du train t à la station s.

Si l'on préfère évaluer la ponctualité seulement aux terminus des circulations, le critère de ponctualité peut être formulé ainsi :

$$C_p = \sum_{t \in T} max(0, (a_{t,d} - a^*_{t,d})) \qquad (2.10)$$

où :

- T est l'ensemble des trains considérés dans le problème de régulation ;
- $a_{t,d}$ est la date d'arrivée recalculée du train t à sa station de destination d ;
- $a^*_{t,d}$ est la date d'arrivée de référence (ou théorique) du train t à sa station de destination d.

Pour orienter le critère de ponctualité vers le point de vue des voyageurs, on peut pondérer le retard de chaque circulation par le nombre de passagers à bord.

Alternativement, il est possible de définir un critère de ponctualité à partir du nombre de trains retardés au-delà d'un certain seuil (Iqbal, Grahn et Tornquist Krasemann 2013).

Critère de régularité de l'intervalle

L'exploitation des réseaux de type urbain (métros) préfère définir un critère de régularité de l'intervalle dans le but d'assurer des passages successifs réguliers aux stations. Dans le contexte d'une ligne urbaine, ce critère peut être défini à partir de l'écart entre les intervalles mesurés et l'intervalle de référence (Fernandez Cardador, Cuadra Garcia et Garcia 1996), (Van Breusegem, Campion et Bastin 1991), (Ning, et al. 2015). L'intervalle entre deux trains successifs peut être mesuré entre les deux évènements d'arrivée, ou entre les deux évènements de départs. Le critère de régularité de l'intervalle peut par exemple être formulé ainsi :

$$C_i = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} |i_{t,s} - I| \qquad (2.11)$$

où :

- S est l'ensemble des stations considérées dans la zone de régulation (périmètre spatial) ;

- T_s est l'ensemble des trains desservant la station s dans l'horizon du problème de régulation (périmètre temporel) ;

- $i_{t,s}$ est l'intervalle entre le train t et le train le précédant à la station s dans le plan de transport recalculé ;

- I est l'intervalle théorique souhaité sur le réseau.

Par ailleurs, le critère d'intervalle a été adapté à la régulation de réseaux multimodaux, afin de limiter l'attente des passagers entre deux modes de transport. Le critère de régularité de l'intervalle est, dans ce cas, défini à partir de l'expression du temps d'attente des passagers (Fayech Chaar 2003). Ce temps d'attente correspond à l'intervalle entre l'arrivée d'une circulation et le départ de la circulation précédente sur le nœud considéré. Le critère de régularité d'intervalle s'exprime alors souvent comme la somme (ou la moyenne) des temps d'attente à chaque station et pour chaque couple de circulations successives. Pour orienter le critère de régularité de l'intervalle selon le point de vue des voyageurs, on peut pondérer les temps d'attente pour chaque circulation par le nombre de passagers attendant sur les quais.

Critères de correspondance

L'exploitation de réseaux ferroviaires en zone peu ou moyennement dense ou de réseaux multimodaux peut nécessiter l'expression d'un critère de correspondance (De Schutter et van den Boom 2001), (Fayech Chaar 2003). Ce critère est également pertinent pour la supervision de gares complexes (Fushsberger 2012). Généralement, il est basé sur la somme (ou la moyenne) des temps de correspondance, éventuellement pondérés par le nombre de passagers concernés par les correspondances. Il peut alternativement être exprimé par un ensemble de variables binaires indiquant la possibilité ou l'impossibilité de maintenir une correspondance entre deux circulations. Le critère de correspondance peut, par exemple, être formulé ainsi :

$$C_c = \sum_{(t,t')\in C} c_{t,t'} \qquad (2.12)$$

où :

- T est l'ensemble des trains considérés dans le problème de régulation ;

- $C \subset T \times T$ est l'ensemble des couples de train (t, t') pour lesquels une correspondance est prévue dans le plan de référence ;

- $c_{t,t'}$ est une variable binaire représentant le maintien d'une correspondance dans le plan de transport recalculé ou simulé. Elle peut, par exemple, être égale à 1 si la correspondance est maintenue, et à 0 sinon.

Critère de temps de parcours

L'expression d'un critère de temps de parcours (du point de vue des passagers ou des circulations) permet de retranscrire plus directement les attentes des passagers, quel que soit le type de transport ou d'exploitation. Ce critère s'apparente au critère de ponctualité (Fayech Chaar 2003), mais s'affranchit de toute comparaison avec un plan de transport théorique. Il peut être exprimé comme la somme (ou la moyenne) des temps de parcours origine-destination des circulations.

$$C_{tp} = \sum_{t \in T} d_{t,o} - a_{t,d} \qquad (2.13)$$

où :

- T est l'ensemble des trains considérés dans le problème de régulation ;
- $a_{t,d}$ est la date d'arrivée recalculée du train t à sa station de destination d ;
- $d_{t,o}$ est la date de départ recalculée du train t à sa station d'origine o.

Le critère de temps de parcours peut également être exprimé comme la somme des temps de parcours des circulations sur chaque segment de leurs missions, pondérés par le nombre de passagers voyageant dans les circulations. Il peut alternativement être exprimé comme la somme (ou la moyenne) des temps de parcours des passagers.

Critère énergétique

En zone dense, la prise en compte d'un critère représentant la consommation d'énergie est particulièrement intéressante ; elle permet de réaliser des économies significatives. Le critère énergétique peut être pris en compte pour la construction du profil de vitesse d'un train (Fernández-Rodríguez, et al. 2015), (Xu, et al. 2014), (Chevrier 2010), ou pour la régulation d'une ligne (Fernandez Cardador, Cuadra Garcia et Garcia 1996), (Ning, et al. 2015), (Van Breusegem, Campion et Bastin 1991), (Sheu et Lin 2012).

Généralement, la consommation d'énergie est exprimée selon deux composantes : la composante principale est la consommation d'énergie liée au système de traction ; la composante secondaire correspond aux équipements auxiliaires et notamment à la

climatisation. L'énergie consommée par les systèmes de climatisation est considérée proportionnelle au nombre de passagers à bord.

2.4.3.2 Leviers de régulation

Une stratégie de régulation est un ensemble de méthodes de reconfiguration horaire et spatiale mises en œuvre durant la phase opérationnelle afin de répondre aux objectifs de performance de l'exploitation. Elle propose un plan de transport adapté, une re-planification de l'exploitation en fonction des aléas. Les approches sont variées, elles dépendent directement des caractéristiques du système régulé et de ses objectifs. Dans le Chapitre 1, nous avons exposé les différences entre les principes d'exploitation de système de métro et de système ferroviaire suburbain, deux types de système qui paraissent pourtant très semblables. Les principaux leviers de régulation, c'est-à-dire les actions que la régulation est autorisée à mettre en œuvre pour atteindre ses objectifs, sont les suivants :

- l'utilisation d'un parcours alternatif hors gare ;
- l'utilisation d'un parcours alternatif en gare ;
- la modification de l'ordre d'arrivée des circulations, sur un point de rencontre ou dans une gare ;
- la modification de l'ordre de départ des circulations en gare ;
- la modification du temps d'arrêt en gare ;
- la modification de la marche (c'est-à-dire du temps de parcours ou de la vitesse) ;
- la modification du service par ajout de desserte ;
- la modification du service par suppression de desserte ;
- l'annulation complète d'un service ;
- l'insertion d'une circulation de réserve dans le trafic.

Une stratégie peut autoriser la mise en œuvre de un ou plusieurs leviers de régulation. Cette autorisation peut varier en fonction des périodes de la journée d'exploitation.

2.4.3.3 Synthèse des travaux existants

Dans les études portant sur le trafic ferroviaire, les infrastructures étudiées vont de la ligne simple, au réseau multi-lignes. Les problématiques de conflits interviennent lorsque

l'infrastructure comporte plusieurs branches, ou lorsque différents types de service partagent des portions de l'infrastructure. Ces parties communes constituent des points de rencontre où les circulations sont ordonnancées. Lors de la détection d'un retard, le plan de marche théorique est perturbé. Cette perturbation risque d'impacter la marche d'autres circulations et des conflits sont susceptibles d'émerger aux points d'ordonnancement. Ainsi, les études de régulation ferroviaire abordent souvent le problème de régulation comme un problème d'ordonnancement aux jonctions. La régulation se base sur l'optimisation de l'ordre d'arrivée des circulations. Cette stratégie est parfois complétée par la modification d'itinéraire entre deux points de desserte. Un état de l'art assez complet est disponible dans (Törnquist 2005), il offre une vue synthétique des approches développées et de leur diversité.

Concernant la régulation de ligne de métro, l'infrastructure considérée est le plus souvent une ligne simple, et l'ordonnancement des circulations et la modification d'itinéraires ne sont pas applicables. La résolution du problème de régulation consiste, la plupart du temps, en l'adaptation des temps de parcours ou des temps de stationnement en temps réel dans le but de maintenir un intervalle régulier entre les métros.

Les études portant sur la gestion de réseaux de transports collectifs, et en particulier les réseaux multimodaux (bus, tram, métro…), n'abordent généralement pas la problématique du conflit entre les circulations. Elles considèrent des lignes empruntant des infrastructures indépendantes les unes des autres et cherchent à coordonner ces différents modes de transport. Cela permet de lever les contraintes liées aux conflits entre circulations. Les lignes sont liées par des points de connexions où les voyageurs peuvent effectuer des correspondances. Les principaux leviers d'action envisagés sont la modification de service et la modification des temps d'arrêt des circulations.

Les approches de régulation présentées ici sont regroupées par leviers d'action utilisés.

Ré-ordonnancement

Un réseau ferroviaire comporte des points de rencontre potentielle aux niveaux des aiguillages. La protection d'un train contre un train convergent fait partie des grandes problématiques ferroviaires. Cette protection est assurée par la signalisation. Un plan de transport sain est un plan de transport qui ne comporte pas de conflit et qui peut donc être appliqué tel quel. L'optimisation de l'ordre de passage est un levier courant de la planification et la re-planification ferroviaire. Dans le processus d'optimisation, il est essentiel de prendre en compte la problématique du conflit afin de produire un plan de transport sain.

Dans (Ho et Yeung 2001), les auteurs considèrent le problème de résolution de conflit au niveau d'une jonction unique par ré-ordonnancement et compare 3 méthodes heuristiques : l'algorithme génétique, le recuit simulé et la recherche tabou. La fonction-objectif est la somme des retards pondérés des trains après le passage de la jonction. Les poids représentent les priorités entre les différents services de trains.

Dans (Fan 2012), l'auteur met en œuvre et compare de nombreux algorithmes pour la recherche de la séquence de passage optimale à une jonction. Une méthode hybride est aussi proposée, elle est appliquée au problème d'ordonnancement multi-jonctions.

Le problème de gestion des circulations peut être identifié comme un problème de type « job shop » (Mascis et Pacciarelli 2002), un segment de voie correspondant à une machine, et un train correspondant à une tâche à effectuer sur une machine. Le problème s'appuie sur une modélisation par graphe des alternatives qui permet d'évaluer les alternatives individuelles et globales de la programmation des trains. Dans (Mascis, Pacciarelli et Pranzo 2008), cette formulation est appliquée dans le cadre du projet européen COMBINE portant sur l'automatisation de la régulation du trafic. Cette application est particulièrement intéressante car la modélisation par graphe des alternatives y est adaptée au cas du canton mobile en créant des segments de capacité supérieure à un. Lors de la détection d'un conflit, la résolution s'effectue sur une fenêtre temporelle donnée, limitant ainsi la taille du problème, par une approche heuristique centralisée : un algorithme glouton cherche un ordonnancement pour lequel le retard de chaque train à chaque station ne dépasse pas un certain seuil tout en minimisant l'augmentation du retard total. Puis, à partir de la solution trouvée, un profil de vitesse est construit en fonction des préférences de l'utilisateur. Si ce dernier souhaite privilégier la ponctualité, alors la date d'arrivée est fixée au centre de la fenêtre temporelle autorisée et la vitesse maximale autorisée est sélectionnée. Si l'utilisateur préfère privilégier une faible consommation énergétique, la date d'arrivée est fixée à la plus tardive de la fenêtre temporelle utilisée, et la vitesse minimale est sélectionnée. Cette adaptation des vitesses implique l'association d'une fenêtre temporelle à chaque mouvement de train. Elle ne participe pas directement au processus de décision pour la régulation, elle affine la décision en la positionnant dans la fenêtre temporelle construite. Cette méthode constitue une approche intéressante pour affiner une solution en fonction de critères additionnels mais n'exploite que partiellement le réglage de la marche des trains en temps réel. La méthode est testée sur une jonction empruntée par différents types de matériel et montre des résultats encourageants en ce qui concerne la ponctualité et l'économie d'énergie.

Le problème de régulation des trains sur un réseau peut s'avérer complexe, et sa résolution demande alors du temps. De nombreuses approches, et notamment celles précédemment citées, ont délimité leur étude à une jonction ou à une portion très restreinte du réseau.

L'objectif de ces approches est de cibler le ou les points critiques d'un réseau, et de proposer une solution locale ayant un impact global significatif. Le problème de régulation peut également être abordé de manière plus large. Dans (Wegele, Slovák et Schnieder 2008), les auteurs étudient le problème de ré-ordonnancement à plus grande échelle : 104 stations et jusqu'à 1000 trains par jour. Une approche distribuée de la régulation est mise en œuvre. Elle consiste à rechercher localement à chaque jonction l'ordre de passage local optimal, puis à construire une solution globale faisable. Le problème est formalisé à l'aide de réseaux de Pétri à partir desquels un algorithme de Branch and Bound détermine la solution globale. Cette solution est ensuite optimisée par un algorithme évolutionnaire.

Pour aborder le problème de régulation de manière globale tout en conservant une prise de décision centralisée, la modélisation et la résolution sous forme de programme linéaire mixte ont été largement utilisées. L'étude (Törnquist et Persson 2005) constitue une approche intéressante pour le ré-ordonnancement des trains. La résolution est divisée en deux étapes : tout d'abord une méthode heuristique (recherche tabou ou recuit simulé) détermine l'ordre de passage des trains, puis le programme linéaire projette l'impact des modifications et adapte les horaires de chaque train en conséquence. La fonction objectif exprime le retard total du système et pénalise les correspondances manquées.

Modification des itinéraires

Lorsque le périmètre spatial de la régulation est assez important, il est intéressant de permettre une modification en ligne des itinéraires prédéfinis afin d'exploiter davantage les capacités de l'infrastructure. La modification d'itinéraire peut être combinée avec d'autres leviers d'action. Dans la littérature, elle a notamment été combinée avec le ré-ordonnancement.

Dans (Törnquist et Persson 2007), un programme linéaire mixte est formulé de façon à prendre en compte les différents itinéraires possibles entre deux points remarquables sur un réseau ferroviaire régional. Pour la résolution du problème de régulation (effectuée par le logiciel CPLEX), différentes stratégies impliquant le ré-ordonnancement et le choix d'itinéraires sont testées sur un cas d'étude pertinent. L'objectif est de minimiser différents critères de ponctualité. L'étude montre que l'utilisation simultanée des deux leviers d'action n'est pas adaptée pour les problèmes couvrant un périmètre important. Elle suggère une limitation de l'usage des leviers d'action (par exemple une limitation du nombre de changements d'ordre autorisé) adaptée au problème étudié.

Dans (D'Ariano 2008), l'auteur présente un système d'aide à la décision (ROMA) dont l'objectif est de résorber les perturbations en minimisant la propagation des retards consécutifs. Lorsqu'un conflit est détecté, le système construit un nouveau plan de marche en deux phases : la première phase effectue la résolution des conflits : l'ordre des trains et

leurs itinéraires sont recalculés respectivement par un algorithme de Branch and Bound et un algorithme de recherche tabou, de manière centralisée (dans cette étape, les temps de parcours sont fixes). Puis, la solution est vérifiée en fonction des contraintes d'espacement (cantonnement fixe) et de la dynamique autorisée des trains : les marches des trains sont corrigées si besoin. L'objectif de cette étape est de rendre la solution faisable. La marche des trains ne constitue pas un levier d'action, la résolution du conflit se base sur des valeurs de temps de parcours fixes. Si la correction de la marche des trains ne permet pas de respecter les contraintes d'espacement, la méthode de résolution est appelée à nouveau dans un processus itératif. Le système est testé sur deux zones critiques du réseau néerlandais. La première est traversée par 27 trains par heure et par direction, elle comprend 16 quais et de nombreux points de conflits potentiels. La deuxième est traversée par 13 à 20 trains par heure et par direction et comprend 21 quais. Dans (Corman 2010), l'auteur poursuit les travaux précédents en les appliquant à des problèmes plus complexes et en améliorant le niveau de détail microscopique du modèle. De bons résultats sont obtenus par les méthodes de résolution de ROMA (Branch and Bound pour l'ordonnancement, et la recherche tabou pour la recherche d'itinéraire) : les solutions sont de meilleure qualité que celles obtenues avec des configurations très simples (FCFS pour l'ordonnancement, et l'emprunt systématique de l'itinéraire par défaut), et la résolution s'effectue avec des temps de calcul satisfaisants (inférieurs à la minute).

Dans (Fushsberger 2012), l'auteur applique le problème de régulation à la gestion des gares complexes. Les gares complexes sont des zones particulièrement denses et dans lesquelles se trouvent de nombreux aiguillages. Le choix des itinéraires en ligne est particulièrement adapté pour utiliser au mieux les ressources disponibles. Dans cette étude, le parcours d'un train est constitué d'un ensemble de portions de sillon. Une portion est constituée de l'itinéraire à emprunter sur la portion, d'une phase d'arrivée et d'une phase de départ de la portion. La phase d'arrivée est composée de la préparation de l'itinéraire, de l'approche du train, et du passage du train. La phase de départ est composée du passage du train et de la libération de l'itinéraire. Chacune de ces phases est représentée par une date de début et une date de fin. Le problème de régulation est formulé en programme linéaire mixte. La résolution construit, pour chaque train et pour chacune de ses portions, les phases d'arrivée et de départ du train. Pour cela, elle détermine les phases les plus appropriées parmi un ensemble de phases possibles (selon différents itinéraires et différents temps de décalage de la phase d'arrivée). Ces phases doivent respecter les contraintes d'exploitation tout en minimisant les retards générés et les connections manquées. La régulation est ensuite intégrée dans un contrôle prédictif basé sur un modèle (MPC), en boucle fermée. A une fréquence donnée (toutes les minutes au plus sur le cas d'application présenté) et sur un horizon temporel prédéfini (6 minutes pour le calcul d'itinéraire, et 20 minutes pour celui du planning), le modèle prédit, à partir de données mesurées, les mouvements des trains. Ces prédictions nourrissent le problème d'optimisation en charge de construire la solution à

mettre en œuvre. La régulation est évaluée sur une zone conséquente couvrant 6 km et comprenant 13 quais et de nombreux aiguillages.

Régulation par adaptation de la marche des trains

Lorsque le système ferroviaire étudié dispose d'un système de gestion du trafic avancé, il est possible d'utiliser la marche des trains (par l'intermédiaire du temps de parcours) comme levier d'action pour la régulation du trafic sur le réseau. L'adaptation de la marche des trains peut également consister en la construction du profil de vitesse d'un véhicule, pour un temps de parcours donné, afin d'améliorer des objectifs secondaires tels que le respect de la signalisation, la précision dans la mise en œuvre des consignes, ou la consommation d'énergie.

De manière générale, l'adaptation de la marche permet plus de flexibilité dans le processus de régulation. Contrairement aux autres leviers de décisions (ordonnancement, choix d'itinéraires et modification de service) pour lesquels un petit changement a un impact important sur le plan de transport, l'adaptation de la marche des trains peut permettre une régulation plus fine. La même remarque peut être formulée pour l'adaptation des temps de stationnement. Néanmoins, le temps de stationnement d'un véhicule est largement dépendant de l'échange-voyageurs, et peut s'avérer plus compliqué à maîtriser que le temps de parcours.

L'adaptation des marches est notamment très utilisée pour la régulation des lignes de métros et de tramways sur lesquelles les systèmes avancés de gestion du trafic sont largement déployés. A l'inverse, peu d'études considèrent l'adaptation de la marche comme levier d'action dans le domaine ferroviaire lourd.

Construction de la marche d'un train

En complément d'une stratégie de régulation du trafic, des méthodes de construction de la marche des trains (découpage du profil de vitesse et choix de la vitesse effective) sont développées. Ces méthodes sont notamment mises en œuvre pour adapter la conduite aux objectifs secondaires de l'exploitation. En particulier, la construction de la marche d'un train est pertinente pour adapter son profil de vitesse en vue de limiter sa consommation d'énergie ou d'éviter un arrêt non désiré (lié à la signalisation latérale ou au contrôle de vitesse, par exemple).

Dans (Albrecht, et al. 2006), les auteurs proposent une méthode de construction du profil de vitesse d'un train afin d'éviter les arrêts non désirés. Les arrêts non désirés sont les arrêts non commerciaux, commandés par la signalisation lorsque la ressource aval au signal n'est pas disponible.

Dans (Chevrier 2010), l'auteur présente une approche pour adapter la vitesse d'un train afin de limiter sa consommation d'énergie. Chaque section à parcourir, limitée par une vitesse maximum, est divisée en quatre étapes : l'accélération, la croisière, la marche sur l'erre (effort de traction nul) et le freinage (voir 2.1.2.1). L'optimisation est effectuée grâce à un algorithme génétique dont le chromosome se compose des vitesses correspondant aux étapes de conduite. En tenant compte des conditions aux limites des sections, cela revient en fait à optimiser un chromosome composé des trois vitesses délimitant les étapes. La fonction-objectif à minimiser porte deux critères : le temps de parcours et la consommation d'énergie. Le profil de vitesse est ensuite construit à partir des solutions proposées par l'optimisation. La méthode est appliquée à une jonction découpée en huit sections de longueurs très différentes, et sur laquelle passe un train. L'étude montre que des déviations de 5 % et 15 % par rapport au temps de parcours nominal sur deux sections permettent de réduire la consommation d'énergie respectivement de 25 % et 50 %.

Dans (Su, Gu et Wen 2014), les auteurs proposent une approche similaire pour limiter la consommation d'énergie en modifiant le profil de vitesse d'un train. La distance entre deux stations est découpée en sous segments. Pour chaque segment parcouru par le train, est défini un chromosome portant deux gènes : l'abscisse de début du segment et la stratégie à appliquer sur le segment. Quatre stratégies sont proposées : traction, croisière, marche sur l'erre et freinage. Là encore, les résultats encouragent l'allongement des temps de parcours pour réduire la consommation d'énergie.

Dans (Xu, et al. 2014), les auteurs développent une méthode d'amélioration de la performance individuelle des métros, c'est à dire de la performance du pilotage automatique. Cette performance est définie selon cinq critères : respect de la vitesse limite autorisée, précision de l'arrêt, ponctualité vis-à-vis de la consigne, confort de la conduite et énergie consommée par la conduite. La méthode proposée permet de construire une courbe de vitesse par tranches selon les 5 critères à respecter. L'étude compare les résultats à ceux obtenus par d'autres méthodes proposées dans la littérature. L'amélioration de la performance individuelle des véhicules aboutit à une plus grande précision dans la mise en œuvre des consignes de régulation, et donc finalement à une meilleure ponctualité à l'échelle de la ligne.

Régulation du trafic par adaptation de la marche

Dans (Bailly 1996), l'auteur propose une méthode pour commander les temps de parcours d'un métro automatisé sur une ligne unique grâce à un contrôleur flou, avec différents objectifs tels que la ponctualité et la régularité de l'intervalle de la ligne. Le contrôleur global rassemble un sous-contrôleur par rame évoluant sur la ligne. Chacun d'eux reçoit en entrée les retards mesurés de la rame concernée et des rames amont et aval, et produit en

sortie la modification du temps de parcours ou du temps d'arrêt à appliquer sur la portion de voie suivante ou à la station courante. A cette méthode de régulation est associée la possibilité d'injecter des trains dans le trafic (notamment pour permettre un service partiel imbriqué dans un service de ligne, mais cette décision n'est pas de la responsabilité du contrôleur développé). Afin d'éviter tout conflit, l'auteur définit une rame fictive immobile devenant la cible avale de la rame qui doit céder la priorité à l'intersection. Les priorités entre les rames sont imposées, la problématique de ré-ordonnancement n'est donc pas abordée.

Les auteurs de (De Schutter et van den Boom 2002) proposent une stratégie de régulation pour les réseaux de trains et de métros basée sur le contrôle prédictif (MPC). Les leviers d'actions utilisés sont la gestion des connections (maintien ou suppression) et l'adaptation des vitesses de marche. La régulation peut commander une vitesse de marche supérieure à la vitesse nominale (utilisée pour la construction du plan de transport) si besoin. Plusieurs variantes de la régulation sont testées sur un exemple, en particulier des stratégies basées sur : la gestion des connections seule, l'adaptation des vitesses seule, la combinaison entre gestion des connections et modification des vitesses. Alors que la gestion des connections seule présente des résultats peu satisfaisants, l'adaptation des vitesses, seule ou combinée à la gestion des connections, présente des résultats satisfaisants (proches de la solution optimale dans le premier cas, égaux à la solution optimale dans le second cas).

Dans (Li, et al. 2016), les auteurs présentent une stratégie de régulation robuste basée sur un contrôle prédictif pour une ligne de métro. Cette stratégie adapte des temps de parcours et d'arrêt dans l'objectif de minimiser la déviation par rapport au plan de transport théorique et de limiter l'amplitude de la commande à appliquer sur les trains. La formulation du problème intègre des incertitudes (uniformément réparties autour d'une valeur nominale) sur les flux de passagers, et sur les temps de parcours et de stationnement.

Dans (Ning, et al. 2015), les auteurs proposent une stratégie de régulation pour une ligne de métro. Cette stratégie calcule dans une première phase le temps d'arrivée optimal de chaque métro à sa prochaine station, afin que l'intervalle entre les véhicules soit au plus proche de l'intervalle nominal de la ligne. Dans une deuxième phase, la méthode de régulation construit pour chaque métro un profil de vitesse respectant l'heure d'arrivée précédemment déterminée, tout en essayant de réduire la consommation d'énergie du véhicule. Ainsi, la méthode présentée combine une régulation du trafic sur la ligne selon un objectif d'exploitation, avec une adaptation individuelle de la marche des métros selon un objectif de coût énergétique.

Régulation par modification des services

La modification du service des circulations correspond généralement à la modification d'une desserte, d'une partie de service (terminus déplacé en amont du terminus prévu), ou de la suppression d'un service complet. La modification du service peut permettre de résorber une perturbation importante dans un temps relativement court. Cependant, elle affecte négativement la perception de la qualité de service par les voyageurs.

Dans (Song 1998), l'auteur propose une régulation à l'intervalle pour une ligne de métro. Il s'agit d'une régulation locale au niveau d'un point critique de la ligne. Pour les cas de retard inférieur à vingt minutes ne pouvant pas être rattrapé, l'étude propose deux types de manœuvres : le demi-tour et le blocage de trains en station. L'auteur développe une méthode heuristique intéressante qui bloque un train au point clé si le suivant est en retard, sans toutefois dépasser l'intervalle critique avec le train ayant précédemment quitté le point clé.

Pour la régulation des transports multimodaux, l'auteur de (Fayech Chaar 2003) met en œuvre la modification du temps d'arrêt aux stations (considérée équivalente à la modification du temps de parcours) avec pour objectifs la régularité, la ponctualité et le respect des correspondances. La modification des dessertes est également intégrée à la stratégie. La résolution du problème est effectuée par un algorithme évolutionniste où chaque cellule du chromosome de régulation contient la durée d'arrêt prolongée et une variable binaire traduisant la desserte de la station.

Dans (Zidi 2007), l'auteur conçoit, pour un réseau multimodal, un régulateur hiérarchisant une liste de seize manœuvres prédéfinies (demi-tour, saut, injection d'une réserve…), à partir d'un vecteur décrivant la perturbation détectée. La phase de classification appliquée en temps réel est précédée d'une phase d'apprentissage en temps anticipé à partir d'un échantillon de vecteurs pour lesquels les décisions sont connues. Pour mettre en œuvre ces manœuvres, l'auteur intègre ensuite à son régulateur une fonction de recherche d'itinéraire (reconfiguration spatiale) résolue par un algorithme à fourmis minimisant la distance et le temps de parcours et maximisant le nombre de passagers transportés. Il intègre également une fonction de reconfiguration horaire basé sur un algorithme à fourmis. Pour chaque véhicule, les fourmis élisent à chaque station un arc fictif pondéré, dont le poids représente le temps de d'arrêt supplémentaire à appliquer à cette station. Cette résolution s'appuie sur des critères de régularité, de ponctualité et de respect des correspondances.

Dans (Ghaemi, Goverde et Cats 2016), les auteurs s'intéressent à la modification de service en cas de perturbation grave entrainant le blocage d'une ligne ferroviaire. La stratégie étudiée est celle de la mise en œuvre du demi-tour pour la reprise d'un service dans la direction opposée. Le problème est formulé par un programme linéaire mixte. Sa résolution

permet en particulier de déterminer la station où devrait s'effectuer un demi-tour, entre la localisation courante d'un train et la dernière station accessible avant le blocage. La méthode propose une solution macroscopique, dont la faisabilité doit être vérifiée et la mise en œuvre détaillée par ailleurs.

Bilan

Dans la littérature, les études relatives à la régulation ferroviaire utilisent en majorité des modèles et des méthodes de résolutions connus, dont les avantages et inconvénients ont été étudiés par ailleurs. Globalement, les problématiques de l'exploitation et des métiers liés à la régulation sont bien respectées. La formulation du problème de régulation est relativement homogène, y compris sur des cas d'application différents. Concernant la résolution du problème, de nombreuses études utilisent l'outil IBM Cplex qui propose une résolution exacte du problème d'optimisation ; cependant la résolution approchée est aussi largement étudiée. Seules certaines études s'attachent à étudier l'optimalité des solutions proposées afin de valider rigoureusement les performances de la méthode de résolution choisie.

Les stratégies conçues pour des systèmes ferroviaires lourds tendent à privilégier les décisions de haut niveau : l'ordonnancement des trains et la modification d'itinéraire. Les stratégies conçues pour les systèmes plus denses, tels que les systèmes de métros ou de tramways, s'orientent vers des décisions plus fines, agissant directement sur la marche et le stationnement des trains. Ceci est en accord avec les caractéristiques des systèmes de métros : leurs réseaux sont souvent moins complexes ; ils disposent d'une flotte de véhicules homogènes d'un point de vue fonctionnel et d'un point de vue matériel ; ils sont actuellement gérés par des systèmes de gestion avancés capables de mettre en œuvre des consignes fines. Au regard de la sensibilité des systèmes denses face à l'échange-voyageur et aux aléas, le réglage fin de la marche des circulations semble plus pertinent que le réglage des temps de stationnement.

Le choix de modélisation des travaux mentionnés sont directement liés au niveau de décision appliqué. Concernant les systèmes de métros, le niveau de modélisation correspond, dans le cas le moins fin, à la représentation de chaque gare et de chaque inter-gare, et, dans le cas le plus fin, à la découpe d'une inter-gare en différentes sections. Le premier cas correspond à la formulation de consignes de temps de stationnement et de temps de parcours pour la régulation de la ligne ; le second cas correspond à la construction ou au paramétrage d'un profil de vitesse en inter-gare pour répondre à des objectifs secondaires. Concernant les systèmes de trains lourds, le niveau de modélisation correspond le plus souvent à la représentation des cantons fixes en tant que ressource à capacité

unitaire. Cela permet un ordonnancement des trains, ou le calcul d'une table horaire au niveau des cantons.

Quelques études s'appliquent à expérimenter la stratégie développée sur des outils de simulation microscopique et sur des problèmes de taille réaliste vis-à-vis de l'application visée afin de démontrer la viabilité de leurs approches.

Si de nombreuses études portent sur les réseaux ferroviaires inter-villes, ou sur les lignes de métros, peu d'études sont applicables aux réseaux ferroviaires très denses, tels que les réseaux suburbains. Tout d'abord, les modélisations utilisées ne sont pas adaptées au principe du cantonnement mobile mis en œuvre par les systèmes CBTC. La modélisation d'un réseau ferroviaire suburbain équipé d'un automatisme CBTC gagnerait à s'affranchir du principe d'allocation de ressources à capacité unitaire souvent mis en œuvre dans le ferroviaire, mais peu pertinent dans le cas du cantonnement mobile. L'extension de ce principe vers un système de ressources à capacité non unitaire, utilisée par exemple dans le projet européen COMBINE, paraît bien adaptée et applicable à toute forme de graphe. Aussi, les stratégies de décision de haut niveau proposées pour les réseaux ferroviaires ne sont pas adaptées à des circulations roulant à intervalle très faible, propriété caractéristique de la zone dense. La conception d'une régulation dans le contexte étudié pourrait s'inspirer des approches développées pour les systèmes de métros en adaptant fréquemment la marche et le stationnement des circulations respectivement en inter-gare et en gare, tout en reformulant les contraintes ferroviaires pour les adapter au cantonnement mobile. Une modélisation représentant à minima les gares et les inter-gares semble donc nécessaire. Des points remarquables intermédiaires peuvent être ajoutés en inter-gare pour un niveau de décision plus fin sur les zones critiques. La gestion des alternats en gare doit également être intégrée au problème pour exploiter au mieux la capacité du réseau. La modélisation détaillée des gares, telle que développée dans (Fushsberger 2012) au niveau des cantons fixes, est adaptée à la gestion des mouvements de trains en gare complexe mais ne semble pas nécessaire pour un problème de régulation globale de la ligne. Alternativement, la capacité d'une gare pourrait être une représentation suffisante, à la manière des cantons à capacité non unitaire.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté les principaux outils permettant de décrire l'infrastructure, le mouvement des circulations et les systèmes de contrôle-commande selon différents niveaux de détails. Nous avons également exposé une formulation mathématique générique du problème de régulation qui exprime clairement les variables de décisions de la régulation, ainsi que les objectifs et les contraintes du système.

Cette formulation permet de considérer le problème de régulation comme un problème d'optimisation. L'approche multi-objectif permet de considérer différents critères pour retranscrire les attentes du système exploité. Des méthodes de résolution adaptées au problème de régulation ont été introduites. Nous avons en particulier présentés les algorithmes génétiques qui ont plusieurs avantages notables : efficacité, simplicité de mise en œuvre, adaptabilité à des fonctions de coûts variées, et maîtrise du temps de calcul. Ces algorithmes seront utilisés dans la suite des travaux.

La littérature a proposé un grand nombre d'approche du problème de régulation. Nous avons passé en revue principalement les approches du problème de régulation pour les transports collectifs. Il apparait une grande variété de stratégies, chacune tentant de prendre en compte les particularités du système étudié. Toutefois, la formulation du problème et les méthodes de résolution utilisées sont relativement similaires d'une étude à l'autre, et font appel à des outils bien connus. On note néanmoins une distinction assez nette entre les approches liées au monde du ferroviaire lourd et celles liées au monde du métro. Les premières mettent en œuvre une régulation de haut niveau sur des réseaux et des modes d'exploitation relativement complexes. Les secondes mettent en œuvre des régulations beaucoup plus fines, intégrées dans des outils de gestion avancés, sur des réseaux et des modes d'exploitation relativement simple. Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire visent à concevoir une méthode régulation à mi-chemin entre ces démarches. Elle devra concilier les pratiques d'exploitation du monde ferroviaire et les besoins de la zone dense, tout en s'intégrant dans le système CBTC en charge de la protection, de l'opération et de la supervision des trains.

Dans le chapitre suivant, nous proposons un module de supervision destiné à s'intégrer dans un système CBTC et à accueillir une méthode de régulation adaptée aux lignes ferroviaires suburbaines. Nous présentons en particulier son architecture et les fonctions qui le composent.

Chapitre 3

Supervision d'une ligne suburbaine équipée d'un automatisme CBTC

Actuellement, les systèmes ferroviaires suburbains nécessitent une plus grande capacité de transport en zone dense et une plus grande robustesse aux aléas inévitables. Sur les lignes de métros, les systèmes CBTC ont été largement déployés et permettent des gains significatifs en matière de capacité et de robustesse. Les stratégies de régulation sont basées sur le maintien d'un intervalle faible et homogène sur la ligne. Sur les systèmes ferroviaires, des outils d'aide à la décision ont été développés pour aider les agents régulateurs supervisant des réseaux complexes ou des zones critiques. Qu'il s'agisse de systèmes métros ou ferroviaires, les exploitants cherchent à améliorer les performances des systèmes à partir d'infrastructures préexistantes.

Le problème de régulation est de plus en plus étudié dans les milieux académiques et industriels. Nous avons vu au Chapitre 2 que ce problème a été traité, selon différentes approches, sur des lignes de métros, et sur des réseaux ferroviaires. Dans le premier cas, les méthodes de régulation, et notamment celles des systèmes CBTC, ajustent finement la marche et le stationnement des trains pour maintenir un intervalle régulier. Dans le second cas, les outils de gestion du trafic proposent des décisions de haut niveau tel que l'ordonnancement et la modification d'itinéraire.

Dans les années à venir, la technologie CBTC va être transposée à des systèmes ferroviaires suburbains. Des projets industriels sont actuellement en cours de développement (Londres,

Paris, Copenhague). Le déploiement d'un système CBTC sur une ligne ferroviaire nécessite une réelle adaptation de ses fonctions. En particulier, les fonctions de supervision et de régulation devront être ajustées aux modes d'exploitation particuliers des lignes suburbaines. On peut identifier trois différences principales entre un système de métros et un système ferroviaire suburbain.

- Une ligne ferroviaire est généralement caractérisée par un réseau plus complexe qu'une ligne de métro. Elle comprend des aiguillages permettant notamment d'offrir différents itinéraires alternatifs entre deux stations, et différents quais possibles en station.

- Une ligne ferroviaire est exploitée à l'horaire, contrairement à une ligne de métro qui est exploitée à l'intervalle. En zone dense, bien que l'exploitation ferroviaire vise la ponctualité des circulations, il est également nécessaire de maintenir un intervalle réduit et régulier entre les circulations afin d'absorber le débit important et permanent de voyageurs transitant à l'intérieur même de la zone dense.

- Contrairement à une ligne de métros, une ligne ferroviaire est un système ouvert. Les infrastructures associées à une ligne peuvent être empruntées par des circulations n'appartenant pas à la ligne, y compris en mode nominal d'exploitation. Une circulation non équipée d'un système CBTC est localisée uniquement par la signalisation classique, par l'intermédiaire des circuits de voie. Cette localisation est moins précise que la localisation CBTC, elle fournit une information segmentaire. De plus, les circulations non équipées, et les circulations équipées dont le pilotage automatique est désactivé, sont conduites manuellement, dans le respect de l'espacement par Block Automatique Lumineux. La conduite des trains non automatiques obéira donc à un cantonnement fixe et plus espacé. Elle sera aussi caractérisée par une forte dispersion sur les comportements de conduite vis-à-vis d'un pilotage automatique.

La supervision d'un système CBTC ferroviaire suburbain doit prendre en compte ces spécificités ferroviaires et mettre en œuvre une stratégie de régulation relativement fine adaptée à la zone dense. Dans ce chapitre, nous présentons le module de supervision développé pour une ligne de RER équipée d'un automatisme CBTC. Ce module doit en particulier accueillir la fonction de régulation automatique du trafic. Cette dernière est intégrée dans une structure de commande prédictive. Le calcul des consignes est basé sur une optimisation multi-objectif des variables de régulation.

3.1 Architecture de la supervision

La supervision de la ligne est en charge des fonctions suivantes :

- suivi des circulations sur la voie ;
- calcul des itinéraires ;
- mise en œuvre du plan de transport ;
- gestion de l'accès aux quais en gare et aux tiroirs en garage ;
- régulation du trafic en cas de perturbation.

Le diagramme fonctionnel de la supervision est présenté sur la Figure 36. Les cinq fonctions principales de la supervision y sont représentées, ainsi que les principaux flux de données.

On retrouve dans ce digramme une séquence de régulation classique : le suivi des trains permet de mettre à jour le plan de transport recalculé. On y détecte d'éventuelles perturbations et on exécute les fonctions de régulation pour proposer de nouvelles consignes. En revanche, la gestion des gares s'effectue indépendamment de la régulation.

Nous détaillons dans la partie suivante les différentes fonctions de la supervision.

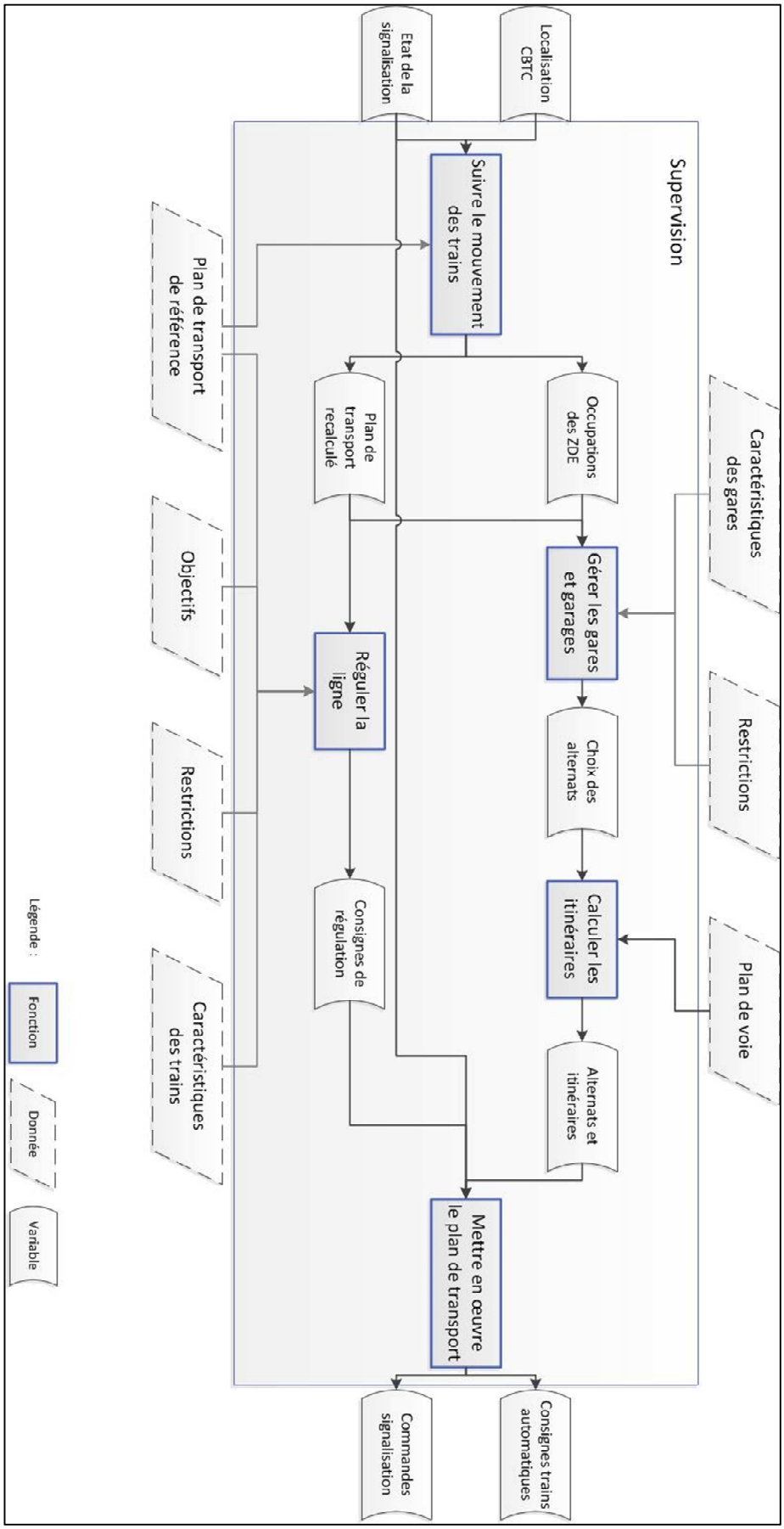

Figure 36 : Diagramme fonctionnel de la supervision des circulations

3.2 Fonctions de la supervision

3.2.1 Suivi des circulations

Le suivi des trains est réalisé à partir de la localisation CBTC des trains communicants et de l'état de la signalisation (en particulier de l'état des CdV). Il fournit deux types de données :

- l'occupation des zones de déclenchement ;
- la grille horaire recalculée.

La grille horaire recalculée est basée sur un ensemble de points remarquables. Chaque circulation est associée à une liste de points remarquables caractérisant son parcours. Ces points remarquables sont situés en gare, en garage, ou en ligne. A partir des points remarquables composant le sillon d'une circulation, on découpe ce sillon en éléments de sillon. Un élément de sillon est composé d'un point remarquable, et du parcours menant à ce point depuis le point précédent (voir Figure 37). Ainsi, un élément de sillon est principalement caractérisé par :

- un point remarquable ;
- des horaires d'arrivée et de départ de référence sur le point remarquable ;
- des horaires d'arrivée et de départ recalculés sur le point remarquable ;
- une marche appliquée sur le parcours menant au point remarquable ;
- un mode de desserte du point remarquable ;
- un temps de stationnement au point remarquable.

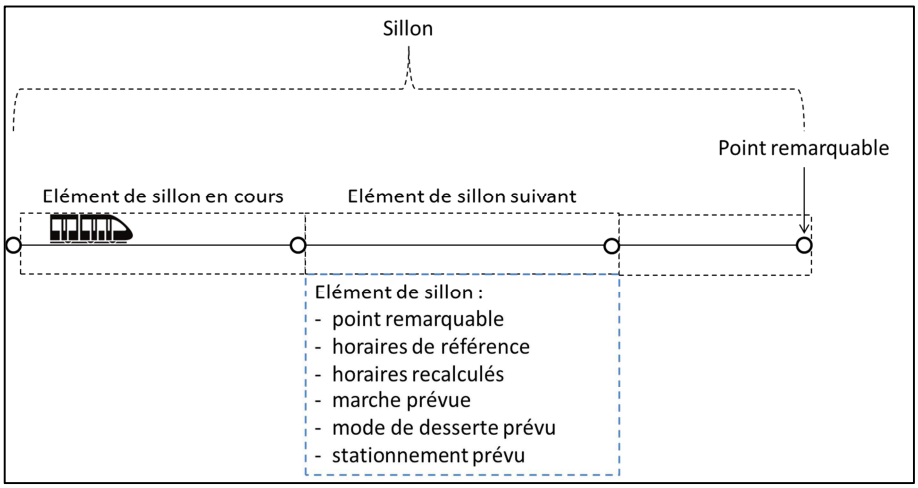

Figure 37 : Définition d'un élément de sillon

La fonction de suivi des trains met à jour la grille horaire recalculée en fonction de l'évolution des trains sur la voie. Lorsqu'elle détecte l'arrivée ou le départ d'un train sur un point remarquable, les horaires concernés sont mis à jour dans la grille horaire recalculée. Ils sont alors égaux aux dates mesurées. S'il existe un décalage entre la date mesurée et l'horaire de référence sur un point, les horaires des points remarquables suivants sont décalés de façon équivalente. Ainsi, le suivi des trains collecte les dates réelles d'arrivées et de départ des trains, et prédit les horaires futurs en fonction de l'écart entre les horaires réels et les horaires de référence. Cette prédiction simple est réalisée indépendamment pour chaque circulation, elle ne tient pas compte de l'interaction éventuelle entre les circulations par l'intermédiaire de la signalisation.

Pour les trains non communicants, le suivi est réalisé à partir de l'occupation des circuits de voie associés aux points remarquables et aux zones de déclenchement. La précision du suivi horaire est donc dépendante du découpage des circuits de voie et de la position des points remarquables. En particulier, le suivi détermine si un train est en gare à partir de l'état des circuits de voie inclus dans la gare. De même, il détermine si un train est à quai en fonction de l'occupation des circuits de voie correspondant au quai. Néanmoins, le suivi n'est pas capable de déterminer si un train non communicant est à l'arrêt.

Pour les trains communicants, le suivi se base sur la localisation CBTC, sur la vitesse du train (calculée par le système CBTC), et sur l'état des circuits de voie. Il détermine si un train est en gare, si un train est à quai, et si un train est à l'arrêt. Sur un point en ligne, la date d'arrivée du train correspond à sa date de passage de l'avant du train sur le point. La date de départ est égale à la date d'arrivée. Sur un point en gare ou en garage, la date d'arrivée du train correspond à la date à partir de laquelle le train est arrêté à quai. La date de départ correspond à la date où le train redémarre. Le suivi calcule également la date à laquelle l'arrière du train quitte un point remarquable (en ligne, en gare ou en garage).

Le suivi des circulations permet de retranscrire l'évolution réelle du trafic et de générer des déclencheurs pour les différentes fonctions de la supervision.

3.2.2 Mise en œuvre du plan de transport

La supervision est en charge de mettre en œuvre le plan de transport, c'est-à-dire de commander les actions nécessaires à son bon déroulé. La supervision doit ainsi transmettre aux trains automatiques des consignes relatives à leurs missions. Dans le cadre de ces travaux, le périmètre de la supervision comprend également la commande des itinéraires à la signalisation ferroviaire pour tous les trains évoluant sur la ligne, quel que soit leurs caractéristiques.

3.2.2.1 Consignes Train

Pour mettre en œuvre le plan de transport, la supervision envoie des consignes aux trains automatiques. Chaque ensemble de consignes correspond à un élément de sillon. Il est composé : du nom de l'élément de sillon associé, de la marche à appliquer, du mode de desserte à appliquer, du temps de stationnement à appliquer pour une desserte, du quai à emprunter si l'élément de sillon correspond à une gare ou à une zone de tiroir, et du point d'arrêt à cibler pour une desserte (voir Figure 38). Ces composantes peuvent correspondre à des valeurs prédéfinies ou à des valeurs calculées par les fonctions de la supervision. Un ensemble de consignes pour un élément de sillon est transmis au train lorsqu'il se situe sur l'élément de sillon précédent. Si les composantes de cet ensemble sont modifiées, il est transmis à nouveau et remplace les valeurs précédemment transmises.

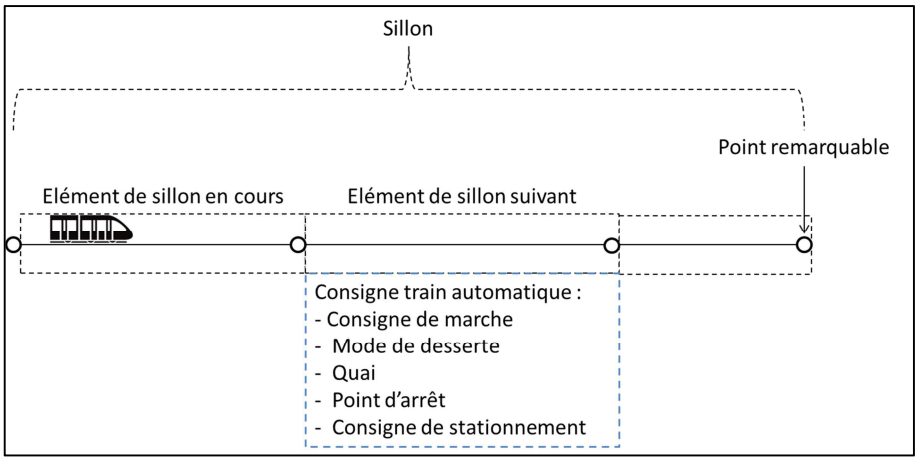

Figure 38 : Consignes pour un train automatique sur un élément de sillon

3.2.2.2 Consignes Signalisation

La supervision est en charge de commander les itinéraires pour tous les trains circulant dans son périmètre d'action, quelque soient leurs types. A partir du suivi des trains (CBTC et non CBTC), la supervision détecte l'occupation des zones de déclenchement et transmet à la signalisation la commande de l'itinéraire associé.

Dans une gare, les portions de voies associées aux quais correspondent généralement aux zones de déclenchement des itinéraires permettant de quitter le quai. Ainsi, lorsqu'un train arrive à quai, l'itinéraire de sortie de quai est commandé. Dans le cas où l'on souhaiterait modifier l'ordre de départ alors qu'un itinéraire a déjà été commandé, il faudrait réaliser une reprise d'itinéraire impliquant une procédure et une temporisation très pénalisantes. En zone dense, les aléas entrainant un sur-stationnement sont fréquents en gare, le changement d'ordre de départ peut s'avérer utile. La supervision développée inclut donc un mode de fonctionnement différent, adapté à la zone dense. Si un train arrive sur une zone de

déclenchement à quai et prévoit de desservir ce quai, on retarde la commande de l'itinéraire de sortie à l'aide d'un paramètre p^{cmd_iti}. La commande d'itinéraire est effectuée p^{cmd_iti} secondes avant la date de départ prévue. Dans tous les autres cas, l'itinéraire est commandé normalement, dès l'occupation de la zone de déclenchement par le train. Il est important de noter que tant que l'itinéraire n'est pas établi, le train n'est pas autorisé à quitter la gare. Le réglage du paramètre p^{cmd_iti} doit donc s'assurer qu'il ne cause pas l'augmentation du retard du train. La valeur choisie doit être supérieure au temps nécessaire à l'établissement de l'itinéraire à partir de l'instant où la commande est émise.

3.2.3 Gestion des gares et des garages

Dans la conception de la supervision, il a été choisi de distinguer la fonction de gestion des gares de la fonction de régulation. Ces fonctions sont exécutées indépendamment l'une de l'autre, de façon asynchrone. La régulation de la ligne vise à adapter le mouvement des trains en cas de situation perturbée. La gestion des gares et des garages a pour rôle d'attribuer un quai ou un tiroir à toute circulation approchant d'une gare. Elle considère pour cela un problème local dans la zone de contrôle correspondant à une gare ou un garage. La résolution du problème local attribue un quai à la circulation approchant. La gestion de la zone de contrôle se fait donc au fur et à mesure des arrivées. L'objectif est de pouvoir gérer au mieux les gares en situation nominale comme en situation dégradée, en attribuant un quai à une circulation, au plus tard, en fonction de l'état de la zone de contrôle.

Lorsqu'une circulation entre dans une zone de déclenchement, le calcul du quai est exécuté pour le prochain élément de sillon correspondant à une gare ou à un garage. Le choix du quai peut être mis à jour tout au long de la zone.

Si un train arrive sur une zone de déclenchement au niveau d'un quai desservi, on retarde le choix du quai suivant (dans la prochaine gare) à l'aide d'un paramètre p^{choix_quai}. Le choix du prochain quai est effectué p^{choix_quai} secondes avant la date de départ prévue au quai courant. Cette adaptation permet de prendre une décision au plus tard lorsqu'une circulation stationne à quai. Dans tous les autres cas, le choix du prochain quai s'effectue dès l'occupation de la zone de déclenchement par le train. Il est important de noter que tant que le choix du quai n'est pas effectué, le calcul d'itinéraire ne peut être lancé. De surcroît, la commande d'itinéraire ne peut être formulée. Ainsi, il est nécessaire de respecter $p^{choix_quai} \geq p^{cmd_iti}$ afin que la commande d'itinéraire ne soit pas retardée davantage.

Le choix du quai considère les caractéristiques de la gare, les éventuelles restrictions, et le plan de transport recalculé. Sur la base d'un système de pondération des quais, la fonction de gestion des gares choisit celui ayant la pondération la plus favorable et l'alloue à la

circulation approchant. Deux niveaux de pondération sont définis : la pondération d'exploitation et la pondération d'occupation.

3.2.3.1 Pondération liée aux règles d'exploitation

Les règles d'exploitation définissent généralement la répartition des circulations sur les quais d'une gare (ou sur les tiroirs d'un garage) en fonction de leurs sens de circulations et possiblement de leurs missions. On définit un système de pondération qui a pour but de retranscrire les règles usuelles d'exploitation. Il comprend trois niveaux de pondération pour les quais et tiroirs : privilégié, autorisé, et interdit.

Dans une gare ou un garage, on associe un poids aux différents quais pour chaque circulation en fonction de ses caractéristiques. Cette pondération permet de privilégier un quai pour un sens de circulation donné, une mission donnée, un mode de conduite donné ou tout autre critère caractéristique. Elle peut également autoriser l'utilisation d'un ou plusieurs quais alternatifs, dans le cas où le quai à privilégier serait occupé à l'approche du train. La pondération d'exploitation est incluse dans le paramétrage du plan de transport. Elle peut évoluer au cours d'une journée d'exploitation.

3.2.3.2 Pondération liée à l'occupation

A la pondération d'exploitation, on ajoute une pondération d'occupation. Cette pondération supplémentaire est calculée à partir de la grille horaire recalculée. La fonction de gestion considère l'occupation prévue des différents quais de la gare. On attribue une pondération défavorable aux quais qui sont estimés occupés au moment où la circulation doit arriver en gare, selon les horaires recalculés. Un quai est estimé occupé par une circulation bloquante si :

$$d_{c',q} + i_q^{quai} > a_{c,q}$$

où :

- $d_{c',q}$ est la date de départ prévue de la circulation bloquante c' au quai q ;
- $a_{c,q}$ est la date d'arrivée prévue de la circulation c approchant la gare ;
- i_q^{quai} est l'intervalle minimal séparant deux circulations sur un quai, au quai q.

Si tous les quais sont estimés occupés, on ne pénalise pas le quai se libérant en premier.

Finalement, le quai choisi pour la circulation approchant est celui ayant le poids le plus favorable, après application des poids d'exploitation et des poids d'occupation.

La séquence fonctionnelle de la gestion des gares et garages est résumée sur la Figure 39.

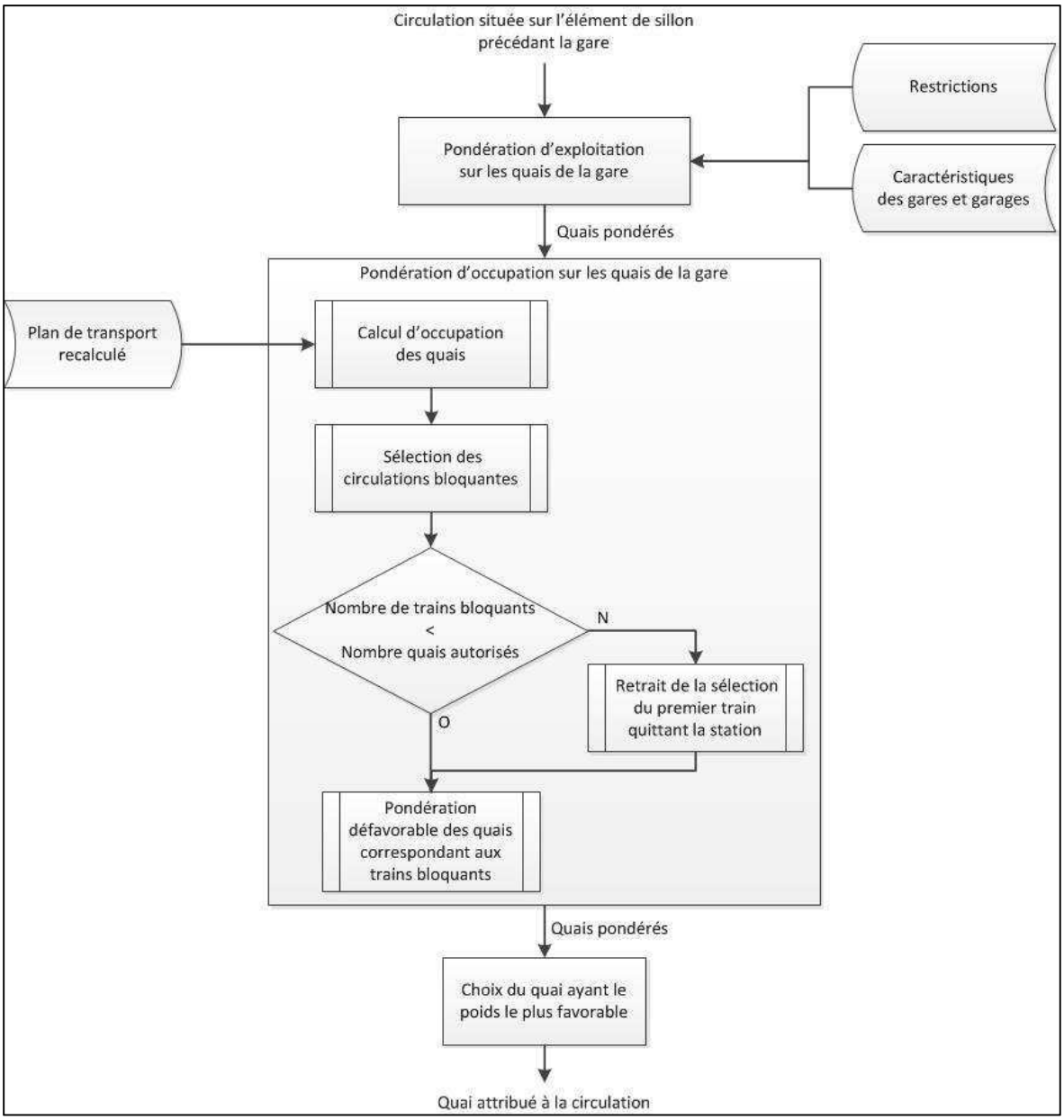

Figure 39 : Séquence fonctionnelle de la gestion des gares et garages

3.2.4 Calcul des itinéraires

Lorsqu'une circulation pénètre une zone de déclenchement, la supervision commande l'itinéraire du train correspondant. Comme précisé précédemment, cette commande peut être retardée lorsqu'un train est arrêté en gare pour permettre plus de flexibilité sur l'ordre de départ entre les trains. Dans tous les cas, lorsqu'une circulation pénètre une zone de déclenchement quelle qu'elle soit, la supervision doit calculer l'itinéraire à commander. Ce calcul consiste en la résolution d'un problème du plus court chemin avec l'algorithme de Dijkstra (Cormen, et al. 2001). Il est basé sur un graphe d'itinéraires dont les arcs sont

pondérés. Le sommet de départ du problème est l'itinéraire sur lequel se situe le train. Le sommet d'arrivée est l'itinéraire comprenant le nœud de l'élément sillon suivant. Si cet élément suivant est associée à une gare ou un garage, alors le sommet d'arrivée est l'itinéraire menant au quai choisi par la fonction de gestion des gares et garages. Le système de pondération des arcs reflète les règles usuelles d'exploitation qui privilégient des itinéraires en fonction du sens de circulation et de la mission des circulations. On ne définit pas de pondération liée à l'occupation des itinéraires car en mode nominal on souhaite que les itinéraires soit tracés uniquement sur la voie correspondant à la mission du train (les trains SNCF roulent à gauche). Une pondération liée à l'occupation pourrait être envisagée dans des travaux futurs pour gérer les cas de perturbations majeures. Une fois l'itinéraire calculé, il est commandé à la signalisation.

La Figure 40 résume la séquence fonctionnelle déclenchée par l'occupation d'une zone de déclenchement par une circulation. Cette séquence est applicable à tout type de train.

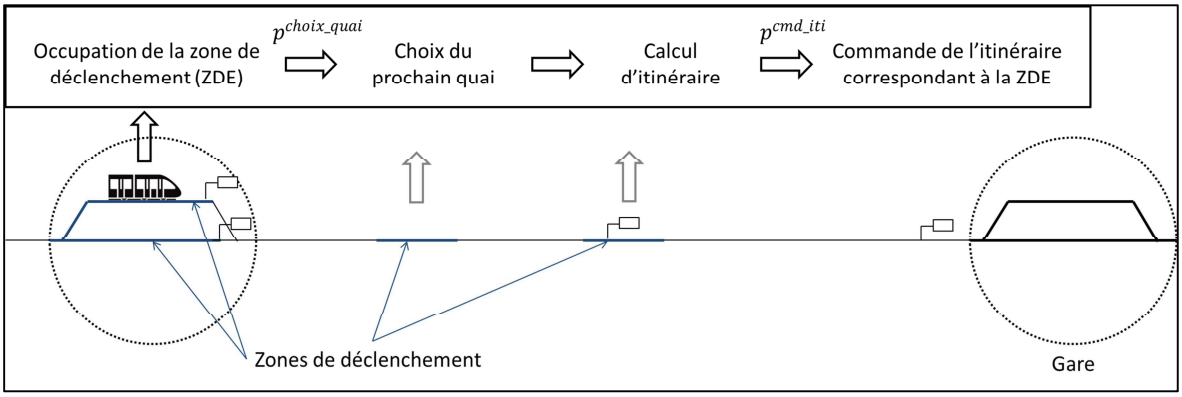

Figure 40 : Séquence fonctionnelle déclenchée par l'occupation d'une zone de déclenchement

3.2.5 Régulation des trains automatiques

En cas de situation perturbée, la fonction de régulation calcule des consignes de régulation pour les trains en pilotage automatique. Ces consignes correspondent à un nouveau plan de transport qui doit être appliqué par la supervision, en remplacement du plan de transport de référence. Le calcul de nouvelles consignes doit tenir compte des données disponibles, telles que le plan de référence, des objectifs de l'exploitation et les éventuelles restrictions (limitation temporaire de vitesse, ressource indisponible…). La régulation doit également tenir compte des caractéristiques des trains, en particulier de leurs modes de pilotage et de leurs marches automatiques prédéfinies (ou marches-types). Le module de supervision présenté dans ce chapitre intègre une fonction de régulation. Le périmètre fonctionnel de cette régulation peut inclure la modification de la marche des trains automatiques, du temps de stationnement des trains automatiques, et du mode de desserte des trains automatiques.

Une consigne de marche doit prendre la forme d'une marche prédéfinie du train (par exemple marche relâchée, marche nominale, marche tendue). Une consigne de stationnement doit prendre la forme d'un temps de stationnement. Une consigne de desserte est une variable booléenne traduisant le mode de desserte souhaité (desservi / non desservi).

3.2.5.1 Régulation individuelle des circulations

Dans une approche simple, il est possible de construire une régulation des trains basée sur la mesure de leur ponctualité individuelle le long de leur parcours. Lors du passage d'une circulation sur un point remarquable, si l'on constate un écart entre les dates d'arrivée ou de départ mesurées et le plan de référence, le mouvement de la circulation est ajusté.

On peut adapter le temps de stationnement en gare des circulations afin de respecter au mieux leurs dates de départs théoriques. Le temps de stationnement est réduit (jusqu'au stationnement minimum) de façon équivalente au retard mesuré sur la date d'arrivée en gare, ou augmenté si le train arrive en avance. Nous appelons cette stratégie : régulation individuelle des temps de stationnement.

En outre, il est également possible de modifier la marche des trains pour essayer de rattraper leurs retards ou de combler leurs avances. Si un train part en avance sur un point remarquable, on choisit une marche plus lente que la marche prévue sur l'élément de sillon suivant. Inversement si un train part en retard, on choisit une marche plus rapide. Nous appelons cette stratégie : régulation individuelle des marches. La modification des marches est a priori moins fine que la modification des temps de stationnement. En effet, elle se base sur un ensemble de marches-types prédéfinies et ne peut pas s'adapter exactement au retard mesuré. Cependant, une consigne de marche a l'avantage de ne pas être sensible à l'échange-voyageur, contrairement à une consigne de temps de stationnement.

Les régulations individuelles des temps de stationnement et des marches peuvent par ailleurs être combinées.

3.2.5.2 Régulation par commande prédictive

Afin de mieux prendre en compte l'impact d'une perturbation sur un réseau, il peut être nécessaire de mettre en œuvre une approche plus centralisée et globale de la régulation, capable d'évaluer une perturbation sur un horizon spatio-temporel et de prendre des décisions en conséquence. La commande prédictive basée modèle (ou plus simplement commande prédictive) est une technique de contrôle-commande qui s'appuie sur un modèle pour utiliser au mieux la connaissance du système dans le processus de pilotage. Cette approche consiste à calculer de façon répétée les commandes d'un système, en utilisant un modèle de ce système qui prédit son comportement futur. La commande prédictive est

particulièrement adaptée à la commande de systèmes dont on connait le comportement de référence à suivre. Elle a été appliquée avec succès à des problématiques industrielles complexes, caractérisées par un nombre de variables important et des perturbations nombreuses.

La commande prédictive est caractérisée par un horizon de prédiction (sur lequel est prédit le comportement du système) et un horizon de commande (sur lequel sont calculées les commandes du système). Ces horizons sont généralement de nature temporelle. Dans le module de supervision présenté, le mouvement des trains est décrit par des évènements discrets se produisant sur des points remarquables de la voie. Cette représentation est à la fois discrète du point de vue temporel et du point de vue spatial. Pour une circulation donnée, la représentation discrète de son mouvement ne correspond pas à un découpage selon un intervalle temporel régulier, elle correspond à un découpage en éléments de sillon liés à des points remarquables sur le parcours du train. L'approche par commande prédictive mise en œuvre dans la fonction de régulation est donc basée sur des horizons de prédiction et de commande de nature spatiale. Ces horizons sont définis par un nombre fini de points remarquables sur le parcours des trains.

La fonction de régulation est exécutée périodiquement, ou de façon évènementielle. La séquence de fonctionnement réalisée à chaque exécution est la suivante :

- prédiction du comportement du système sur un horizon fini N^P ;
- prise en compte du comportement de référence défini par le plan de transport de référence ;
- calcul en boucle ouverte des consignes de régulation à appliquer sur un horizon fini $N^R \leq N^P$;
- envoi des consignes aux circulations. Seules les consignes correspondant aux premiers éléments de l'horizon de commande sont appliquées par les circulations. Les autres consignes seront recalculées au cycle suivant.

Cette séquence est répétée à chaque cycle, pour former une structure de commande en boucle fermée (voir Figure 41). L'horizon de prédiction et l'horizon de commande se décalent au fur et à mesure des cycles de régulation. On parle d'horizon fuyant.

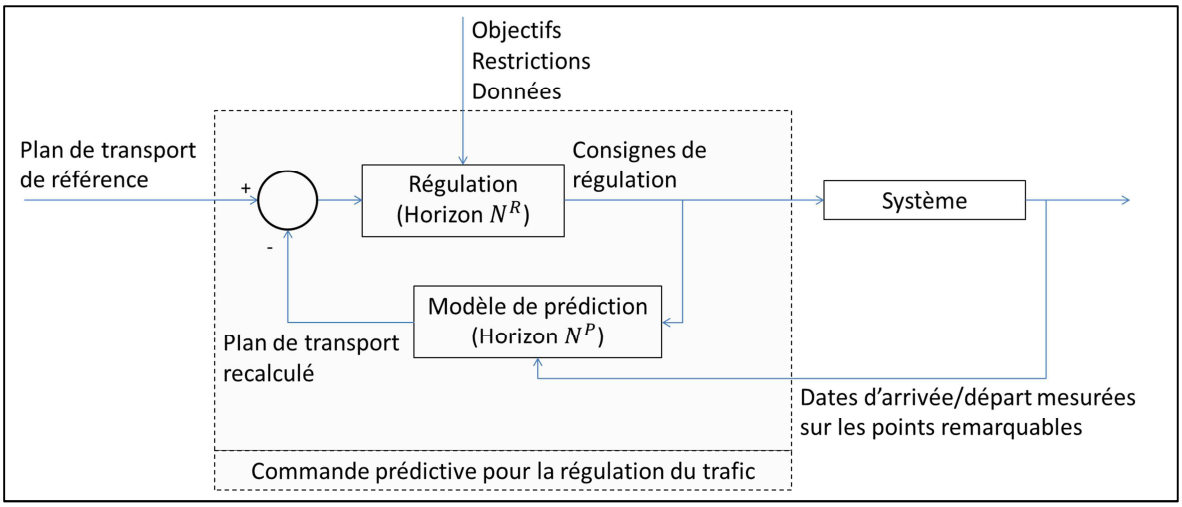

Figure 41 : Structure de la régulation par commande prédictive basée sur un modèle de trafic

Le modèle de prédiction est basé sur la grille horaire recalculée de la fonction de suivi des circulations. Dans cette grille horaire, le mouvement des trains est décrit par les horaires d'arrivée et de départ des trains sur les points remarquables composant leur parcours. Les points remarquables déjà parcourus par une circulation sont associés aux dates mesurées par le suivi des trains. Les points remarquables futurs sont associés aux horaires prédits d'arrivée et de départ. La prédiction des horaires futurs est réalisée par décalage équivalent à l'écart entre l'horaire de référence et l'horaire mesuré sur le dernier point parcouru. Ce modèle de prédiction simple ne tient pas compte de l'interaction entre les circulations. Les éventuels conflits devront être considérés lors du calcul des consignes de régulation. L'utilisation d'un modèle de prédiction intégrant une prise en compte de l'impact de la signalisation (classique et CBTC) sur les trains en fonction de leurs caractéristiques respectives serait significativement plus complexe et coûteuse en matière de temps de calcul.

La grille horaire recalculée couvre uniquement la zone supervisée de la ligne, c'est-à-dire la zone correspondant au domaine CBTC. Pour chaque circulation, l'horizon de prédiction est donc composé des points remarquables allant du premier point non parcouru au dernier point de la zone supervisée. La longueur de l'horizon de prédiction varie ainsi d'une circulation à l'autre, et diminue au fil du temps pour une circulation donnée.

Dans la suite, nous proposons une méthode de régulation en charge de calculer, de façon centralisée, des consignes à destination des trains automatique. Cette méthode doit être applicable à une ligne suburbaine constituée, à ses extrémités, de deux branches à densité de trafic faible, reliées par un tronçon central à densité élevée. Nous considérons également que la méthode doit être compatible avec une exploitation en doigts de la main impliquant le retournement de trains en fin de zone dense. Dans la partie suivante, nous détaillons la formulation du problème de régulation.

Nous avons précédemment présenté le choix de gérer les gares et les alternats indépendamment du problème de régulation. Cela doit nous permettre de formuler et résoudre le problème de régulation sans attribuer un quai aux circulations parcourant une gare. Cela permet, par ailleurs, une réduction du nombre de variables composant le problème.

3.3 Formulation du problème de régulation

Nous formulons le problème de régulation en programme à nombres entiers. Cette formulation s'appuie sur un ensemble de points remarquables de l'infrastructure. Une gare (ou un garage), pouvant possiblement comporter plusieurs quais, est agrégée en un point remarquable unique (voir Figure 42). Ce point-gare est caractérisé par une certaine capacité, correspondant au nombre de quais utilisables. Le périmètre couvert par le point-gare débute au niveau des signaux origines des itinéraires d'entrée en gare, et se termine au niveau des signaux origines des itinéraires de sortie de gare. Un point en ligne est un lieu ponctuel de la voie, hors gares et garages. Il peut notamment être positionné sur un point critique de la ligne tel qu'un signal Carré.

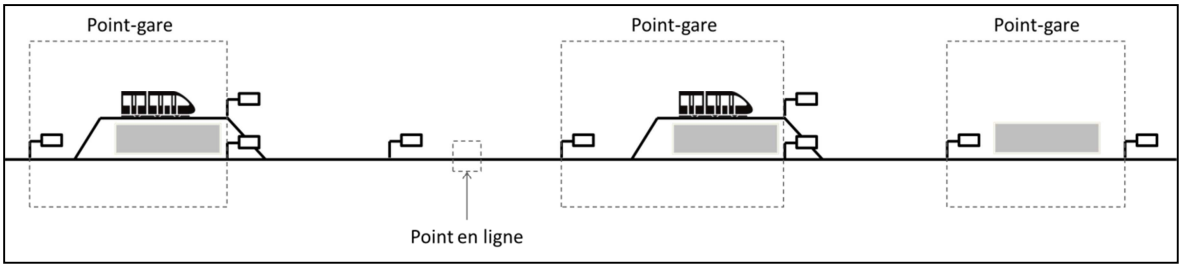

Figure 42 : Définitions du point-gare et du point en ligne dans la formulation du problème de régulation

Le mouvement d'une circulation sur la voie est défini par son sillon, qui est l'ensemble de ses horaires d'arrivée et de départ sur les points remarquables de son parcours. On reprend ici la définition d'un élément de sillon donnée dans le module de supervision. L'élément de sillon représente la portion de voie entre deux points remarquables successifs du parcours d'un train.

La méthode de régulation présentée est définie dans le périmètre de la zone couverte par le système CBTC. C'est sur ce périmètre que le problème de régulation est formulé et que les solutions sont évaluées. Cependant, afin de limiter la taille du problème, on définit pour chaque circulation un horizon de commande. Il s'agit de l'horizon sur lequel on formule des consignes de régulation. L'horizon de commande débute sur un point remarquable non

franchi par le train et se termine sur un point remarquable compris dans le périmètre de la régulation.

3.3.1 Notations

Nous utilisons dans la suite les notations suivantes :

$\prec$ est la relation de chronologie. Il s'agit de la relation binaire stricte, associée à la relation d'ordre $\preccurlyeq$. $r_1 \prec r_2$ signifie que la ressource r_1 est utilisée avant la ressource r_2, ou que l'événement r_1 se produit avant l'événement r_2.

$suiv(e, E)$ est l'élément suivant e sur l'ensemble ordonné E.

$prec(e, E)$ est l'élément précédant e sur l'ensemble ordonné E.

Réseau

G : ensemble des gares g ;

T : ensemble des zones de tiroir t ;

P : ensemble des points remarquables p ;

P^G : ensemble des points remarquables représentant une gare, $P^G \subseteq P$;

P^T : ensemble des points remarquables représentant un garage, ou zone de tiroirs, $P^T \subseteq P$;

P^L : ensemble des points remarquables en ligne, $P^L \subseteq P$;

Circulations

M : ensemble du matériel roulant composé des trains physiques (véhicules) m ;

C : ensemble des circulations c ;

$(C_m, \preccurlyeq)$: ensemble ordonné des circulations utilisant le matériel m. On l'appelle aussi roulement matériel ;

C^{PA} : ensemble des circulations en pilotage automatique, $C^{PA} \subseteq C$;

C^{CM} : ensemble des circulations en conduite manuelle, $C^{CM} \subseteq C$;

C^R : ensemble des circulations opérant un retournement en fin de mission, $C^R \subseteq C$;

Parcours des circulations

$(P_c, \preccurlyeq)$: ensemble ordonné des points remarquables $P_c \subseteq P$ empruntés par la circulation c ;

$P_c^G = P_c \cap P^G$;

$P_c^T = P_c \cap P^T$;

$P_c^L = P_c \cap P^L$;

po_c : point remarquable origine de la mission de la circulation c, il s'agit donc du premier élément de P_c ;

pd_c : point remarquable destination de la mission de la circulation c, il s'agit donc du dernier point-gare de P_c ;

pf_c : point remarquable de fin de mission de la circulation c, il s'agit donc du dernier élément de P_c. Par exemple, si une circulation doit se retourner en fin de mission, le point de fin de mission correspond au point-garage où le retournement est effectué ;

$(A_p, \preccurlyeq)$: ensemble des circulations $c \in C$ empruntant le point remarquable p, ordonné par date d'arrivée ;

$(D_p, \preccurlyeq)$: ensemble des circulations $c \in C$ empruntant le point remarquable p, ordonné par date de départ ;

Horizon de régulation

$P_c^{REG_M}$: ensemble des points remarquables empruntés par la circulation c sur lesquels on peut formuler une consigne de marche. Il s'agit de l'horizon de régulation de la marche de la circulation c ;

$P_c^{REG_S}$: ensemble des points remarquables empruntés par la circulation c sur lesquels on peut formuler une consigne de stationnement. Il s'agit de l'horizon de régulation du stationnement de la circulation c ;

$P_c^{REG_D}$: ensemble des points remarquables empruntés par la circulation c sur lesquels on peut formuler une consigne de desserte. Il s'agit de l'horizon de régulation de la desserte de la circulation c ;

P_c^{REG} : ensemble des point remarquables empruntés par la circulation c sur lesquels une consigne de régulation peut être formulée. Cet ensemble représente donc les points remarquables sur lesquels les horaires de la circulation peuvent être modifiés. $P_c^{REG} = P_c^{REG_M} \cup P_c^{REG_S} \cup P_c^{REG_D}$;

3.3.2 Variables

Les variables entières positives du problème décrivent le mouvement des trains le long de leurs sillons.

$a_{c,p}$: date d'arrivée de la circulation c au point p, $a_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$d_{c,p}$: date de départ de la circulation c au point p, $d_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$tp_{c,p}$: temps de parcours de la circulation c sur l'élément de sillon menant au point $p \in P_c$, $tp_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$ts_{c,p}$: temps de stationnement de la circulation c dans la gare correspondant au point-gare $p \in P^G \cap P_c$, $ts_{c,p} \in \mathbb{N}$;

tr_c : temps de retournement de la circulation c sur point remarquable de fin de mission p_c^f, $tr_c \in \mathbb{N}$;

On définit également les variables booléennes suivantes :

$\delta_{c,p}$: mode de desserte de la circulation c au point-gare $p \in P^G$;

$$\delta_{c,p} = \begin{cases} 1, & \text{si la circulation } c \text{ dessert la gare correspondant au point } p \in P^G \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les variables précédentes vérifient :

$$\begin{gathered} \forall c \in C, \qquad \forall p_i \in P_c, \qquad p_j = suiv(p_i, P_c), \\ tp_{c,p_j} = a_{c,p_j} - d_{c,p_i} \\ \delta_{c,p_j} . ts_{c,p_j} = (d_{c,p_j} - a_{c,p_j}) \\ \delta_{c,p_j} = 0 \iff ts_{c,p_j} = 0 \end{gathered} \tag{3.1}$$

et :

$$\begin{gathered} \forall c \in C, \qquad c_j = suiv(c_i, C_m), \\ tr_c = a_{c_j,po_c} - d_{c_i,pf_c} \end{gathered} \tag{3.2}$$

Le mouvement d'une circulation peut être représenté par les dates d'arrivée $a_{c,p}$ et de départ $d_{c,p}$ du train, ou par les temps de stationnement $ts_{c,p}$ et de parcours $tp_{c,p}$.

Dans le problème formulé, le mouvement de la circulation c est décrit par son sillon s_c :

$$s_c = \{(a_{c,p}, d_{c,p}), \forall p \in P_c\} \tag{3.3}$$

Les variables de décision du problème sont :

$$\forall c \in C^{PA}, \quad \forall p_i \in P_c^{REG_M}, \quad \forall p_j \in P_c^{REG_S}, \quad \forall p_k \in P_c^{REG_D},$$
$$tp_{c,p_i}, ts_{c,p_j}, \delta_{c,p_k} \tag{3.4}$$

3.3.3 Données

Données du plan de transport

i^o : intervalle-objectif souhaité sur la zone dense régulée ;

m_c : matériel roulant affecté à la circulation c ;

$a^*_{c,p}$: date d'arrivée de référence de la circulation c au point p, $a^*_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$d^*_{c,p}$: date de départ de référence de la circulation c au point p, $d^*_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$tp^*_{c,p}$: temps de parcours de référence de la circulation c sur l'élément de sillon menant au point $p \in P$, $tp^*_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$ts^*_{c,p}$: temps de stationnement de référence de la circulation c dans la gare correspondant au point $p \in P^G$, $ts^*_{c,p} \in \mathbb{N}$;

$\delta^*_{c,p}$: mode de desserte de référence de la circulation c dans la gare correspondant au point $p \in P^G$.

Les données précédentes vérifient :

$$\forall c \in C, \quad \forall p_i \in P_c, \quad p_j = suiv(p_i, P_c),$$
$$tp^*_{c,p_j} = a^*_{c,p_j} - d^*_{c,p_i} \tag{3.5}$$
$$ts^*_{c,p_i} = \delta^*_{c,p_i} . (d^*_{c,p_i} - a^*_{c,p_i})$$

Autres données

γ_p : capacité du point p.

Si p est un point en ligne $p \in P^L$, alors il représente un lieu ponctuel de la voie. Sa capacité est donc $\gamma_p = 1$. Si p est un point-gare ou un point-garage, $p \in P^G \cup P^T$, il est une ressource agrégée caractérisée par une capacité $\gamma_p \geq 1$. Cette capacité correspond au nombre de quais ou de tiroirs autorisés, c'est-à-dire au nombre de circulations pouvant occuper simultanément le point remarquable.

$tp_{c,p}^{min}$: temps de parcours minimum opérable par la circulation $c \in C$ sur l'élément de sillon menant au point $p \in P$. Cette grandeur dépend des caractéristiques du matériel roulant affecté à la circulation.

tr_c^{min} est le temps de retournement minimum opérable par une circulation. Ce temps de retournement correspond à la durée nécessaire au changement de cabine, pour l'opérateur de conduite et pour le système CBTC.

$\epsilon^{min}(c_i, c_j, p)$: espacement minimum opérable entre la circulation c_i et la circulation c_j sur le point remarquable p.

$\varepsilon^{min}(c_i, c_l, p)$: espacement minimum entre le départ du quai associé à la circulation c_l sur le point p et l'arrivée du train suivant c_i sur le même quai.

$tp_{c,p}^{lim}$: temps de parcours minimum respectant les limitations et restrictions de vitesse pour la circulation $c \in C$ sur l'élément de sillon menant au point $p \in P$. Les limitations et restrictions peuvent être différentes selon les types de circulation. En particulier, elles peuvent être différentes entre les trains en conduite manuelle et les trains en pilotage automatique.

$ts^{\min_\delta}$: temps de stationnement minimum qu'une circulation doit opérer sur une gare en amont d'une gare dont la desserte a été supprimée. Ce stationnement doit être opéré entre la prise de décision de la suppression de la desserte (et l'annonce aux voyageurs) et le passage dans la gare concernée.

$ts_{c,p}^{min}$: temps de stationnement minimum que doit respecter une circulation c lorsqu'elle dessert le point-gare p.

Précisions sur l'espacement minimum ϵ^{min}

La signalisation contraint l'intervalle minimum entre deux circulations par l'intermédiaire des signaux d'espacement, des signaux de protection et des fonctions de protection du système CBTC. Nous appelons ici intervalle minimum sur un point, la durée au bout de laquelle la signalisation autorise la circulation suiveuse à franchir le point. L'intervalle minimum dépend du type de cantonnement appliqué (fixe ou mobile).

- Le premier cas est l'intervalle entre deux trains communicants dont le suiveur est en pilotage automatique. Dans cette configuration, le cantonnement mobile est appliqué. L'occupation du circuit de voie suivant le point n'impacte pas l'autorisation de franchissement du point remarquable par le train suiveur. Il faut prévoir un intervalle correspondant à l'espacement minimum permis par le système CBTC. Le système CBTC réel applique un cantonnement mobile déformable, qui s'adapte aux performances des trains. Dans un souci de simplicité, on peut définir un intervalle minimum nominal qui prend en compte la vitesse nominale locale et les performances nominales des trains.

- Le second cas couvre toutes les autres configurations. L'autorisation d'entrée d'un train sur un circuit de voie dépend directement de l'occupation de ce dernier. L'occupation du canton suivant le point remarquable détermine donc l'autorisation de franchissement du signal pour le train suiveur. L'intervalle nécessaire pour éviter l'arrêt du train suiveur correspond au dégagement du canton suivant le point. L'intervalle considéré peut être défini en fonction de la vitesse nominale locale (potentiellement différente pour les trains automatiques et les trains manuels).

L'intervalle minimum dépend également du temps d'établissement des itinéraires. Si le point remarquable est associé à un signal de protection (signal Carré), une circulation ne peut franchir le point que si l'itinéraire est établi. L'intervalle minimum entre deux circulations doit donc également inclure le temps d'établissement de l'itinéraire du train suiveur. Ce temps d'établissement dépend, entre autres, du temps de libération des enclenchements par la première circulation, du temps de préparation du nouvel itinéraire et du temps de formation de celui-ci. Pour caractériser l'intervalle minimal lié à l'établissement des itinéraires, il est possible de considérer un temps d'établissement moyen pour un point donné, ou de distinguer le cas où les deux circulations empruntent le même itinéraire et le cas où les deux circulations n'empruntent pas le même itinéraire. Sur un point en ligne associé à un signal Carré, l'intervalle minimum est donc la valeur maximale entre l'intervalle minimum lié au cantonnement et l'intervalle minimum lié à la protection des itinéraires.

3.3.4 Contraintes

3.3.4.1 Contraintes de faisabilité

Temps de parcours minimum

La contrainte suivante exprime le temps de parcours minimal opérable par une circulation c sur les éléments composant son sillon.

$$\forall c \in C, \qquad \forall p \in P_c, \qquad tp_{c,p} \geq tp_{c,p}^{min} \tag{3.6}$$

avec : $tp_{c,p}^{min}$ une donnée du problème.

Temps de retournement minimum

La contrainte suivante exprime le temps de retournement minimal opérable par un matériel roulant.

$$\forall c \in C^R, \qquad tr_c \geq tr_c^{min} \tag{3.7}$$

avec : tr_c^{min} une donnée du problème.

Cohérence de l'ordre d'arrivée

La contrainte suivante exprime la cohérence de l'ordre d'arrivée des circulations sur un point remarquable.

$$\forall p \in P, \qquad \forall c_i \in D_p, \qquad c_j = suiv(c_i, D_p)$$
$$suiv(p, P_{c_i}) = suiv(p, P_{c_j}) \implies a_{c_i, suiv(p, P_{c_i})} < a_{c_j, suiv(p, P_{c_j})} \tag{3.8}$$

3.3.4.2 Contraintes de signalisation

Espacement

La contrainte suivante exprime l'intervalle minimum à maintenir entre deux circulations successives sur un point remarquable. Sur un point en ligne, les circulations ne marquent pas d'arrêt, leurs dates d'arrivée et de départ sont égales. Il suffit donc de contraindre les événements d'arrivée.

$$\forall p \in P^L, \qquad \forall c_i \in A_p, \qquad c_j = suiv(c_i, A_p\ ),$$
$$a_{c_j,p} - a_{c_i,p} \geq \epsilon^{min}(c_i, c_j, p) \tag{3.9}$$

avec : $\epsilon^{min}(c_i, c_j, p)$ une donnée du problème.

Sur un point-gare ou un point-garage, il est nécessaire de contraindre les arrivées successives et les départs successifs.

$$\forall p \in P^G \cup P^T, \qquad \forall c_i \in A_p, \qquad c_j = suiv(c_i, A_p\ ),$$
$$a_{c_j,p} - a_{c_i,p} \geq \epsilon^{min}(c_i, c_j, p) \tag{3.10}$$

$$\forall p \in P^G \cup P^T, \qquad \forall c_i \in D_p, \qquad c_j = suiv(c_i, D_p\ ),$$
$$d_{c_j,p} - d_{c_i,p} \geq \epsilon^{min}(c_i, c_j, p) \tag{3.11}$$

avec : $\epsilon^{min}(c_i, c_j, p)$ une donnée du problème.

Capacité d'une gare ou d'un garage

La contrainte suivante exprime la capacité maximale d'un point remarquable en gare ou en garage. La signalisation et le système CBTC empêchent toute entrée en gare si celle-ci est complètement occupée.

$$\forall p \in P^G \cup P^T, \qquad \forall c_i \in A_p,$$
$$a_{c_i,p} - d_{c_l,p} \geq \varepsilon^{min}(c_i, c_l, p) \tag{3.12}$$

avec : $c_l \in A_p$ la circulation qui limite l'entrée de la circulation c_i sur p.

En gare, cette circulation limitante correspond à la première circulation quittant la gare, parmi les arrivées précédant celle de c_i, et parmi les n_g départs précédant celui de c_i. En garage, cette circulation limitante correspond au premier train matériel quittant le garage, parmi les arrivées précédant celle de c_i, et parmi les n_g départs précédant celui de c_i. Il faut donc considérer la circulation à laquelle on affecte ce train après retournement dans le tiroir. n_g correspond au nombre de quais autorisés en gare g, c'est une donnée du problème. $\varepsilon^{min}(c_i, c_l, p)$ est également une donnée du problème et représente le temps nécessaire au dégagement du quai par c_l à partir de sa date de départ auquel on ajoute le temps que met c_i à atteindre son point d'arrêt d'exploitation à quai.

Limitation et restriction de vitesse

La contrainte suivante exprime la limite de vitesse autorisée par la signalisation et le système CBTC. Cette vitesse peut correspondre à la limitation permanente ou à une restriction temporaire. Elle dépend notamment du mode de pilotage de la circulation. Elle est exprimée par le temps de parcours de la circulation.

$$\forall c \in C, \qquad \forall p \in P_c, \\ tp_{c,p} \geq tp_{c,p}^{lim} \tag{3.13}$$

avec : $tp_{c,p}^{lim}$ une donnée du problème.

Finalement, si on considère les contraintes liées au temps de parcours minimum et à la limitation de vitesse, on obtient :

$$\forall c \in C, \qquad \forall p \in P_c, \\ tp_{c,p} \geq max\left(tp_{c,p}^{lim}, tp_{c,p}^{min}\right) \tag{3.14}$$

3.3.4.3 Règles d'exploitation

Echange-voyageur en amont d'une suppression de desserte

La contrainte suivante traduit une règle possible d'exploitation en cas de suppression d'une desserte. On considère qu'au moins une desserte, avec un temps de stationnement minimum imposé, doit être effectuée entre la position courante du train et une desserte supprimée.

$$\forall c \in C, \qquad \forall p_k \in P_c \cap P^G, \\ \delta_{c,p_k} = 0 \implies \sum_{p_i \in P_c}^{p_k} \delta_{c,p_i} . \alpha(ts_{c,p_i}, ts^{min_\delta}) \geq ts^{min_\delta} \tag{3.15}$$

avec :

$$\alpha : (x, y) \rightarrow \begin{cases} 1 \; si \; x \geq y \\ 0 \; sinon \end{cases}$$

et $ts^{\min_\delta}$ le temps de stationnement minimum à respecter avant une desserte supprimée.

Temps d'échange-voyageur minimum

La contrainte suivante traduit le temps de stationnement minimum à respecter à quai pour permettre un échange-voyageur satisfaisant.

$$\forall c \in C, \qquad \forall p \in P_c^G,$$
$$ts_{c,p} \geq ts_{c,p}^{min} \tag{3.16}$$

3.3.5 Indicateurs

Régularité de l'intervalle

L'indicateur I^I traduit la régularité de l'intervalle entre les circulations sur le périmètre de régulation. Le périmètre de régulation couvre une zone dense sur laquelle on souhaite maintenir un intervalle le plus régulier possible, pour permettre une grande capacité d'emport des voyageurs en transit court. L'indicateur d'intervalle, non linéaire, est défini par :

$$I^I = \sum_{p \in P} \sum_{c \in A_p} max\left(0, a_{suiv(c,A_p),p} - a_{c,p} - i^o\right) \tag{3.17}$$

Ponctualité

L'indicateur I^P traduit la ponctualité des circulations. Cette ponctualité est mesurée uniquement sur le point destination des circulations dans le périmètre de la régulation. En effet, on cherche à avoir des circulations les plus ponctuelles possibles en gare de destination ou en sortie du périmètre de régulation. La ponctualité des circulations à l'intérieur du périmètre de régulation n'est pas imposée. L'indicateur de ponctualité, non linéaire, est défini par :

$$I^P = \sum_{c \in C} max\left(0, a^*_{c,pd_c} - a_{c,pd_c}\right) \tag{3.18}$$

3.3.6 Synthèse du problème

Les variables de décision du problème sont :

$$\forall c \in C^{PA}, \qquad \forall p_i \in P_c^{REG_M}, \qquad \forall p_j \in P_c^{REG_S}, \qquad \forall p_k \in P_c^{REG_D},$$
$$tp_{c,p_i}, ts_{c,p_j}, \delta_{c,p_k} \tag{3.19}$$

On appelle a et d les vecteurs de longueur n dont les composantes sont respectivement les dates d'arrivée et de départ des circulations :

$$a = \left(a_{c,p}, \forall c \in C, \forall p \in P_c\right) \tag{3.20}$$

$$d = \left(d_{c,p}, \forall c \in C, \forall p \in P_c\right)$$

Les m contraintes exprimées ci-dessus peuvent être écrites sous la forme d'une fonction g_i telle que :

$$g_i(a,d) \leq 0, \qquad i \in [1,m] \tag{3.21}$$

Le vecteur f regroupe les q fonctions-objectif. Dans la formulation multi-objectif du problème présentée, nous choisissons la ponctualité et la régularité de l'intervalle comme objectifs de régulation :

$$f(a,d) = (f_i(a,d), i = 1..q) = (I^P, I^I), \qquad q = 2 \tag{3.22}$$

Le problème de régulation formulé dans ce chapitre est le suivant :

$$\begin{array}{lll} \textit{Minimiser} & f(a,d) & \\ \textit{avec} & g_i(a,d) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m & \\ & (a,d) \in \mathbb{N}^n \times \mathbb{N}^n & \end{array} \tag{3.23}$$

3.4 Résolution du problème de régulation

3.4.1 Choix de la méthode

Pour la résolution du problème de régulation, nous souhaitons utiliser un algorithme permettant de déterminer une bonne solution dans un temps raisonnable (quelques secondes). L'objectif de notre démarche est d'évaluer l'intérêt d'une méthode de régulation d'une ligne ferroviaire qui soit globale, multi-objectif, et adaptée aux problématiques nouvelles caractérisant les lignes suburbaines partiellement équipées d'un automatisme CBTC. Nous ne cherchons pas, dans ces travaux, à étudier l'optimalité de la solution, ni à comparer les performances de différents algorithmes de résolution. Cependant, ces axes de recherche constituent des perspectives particulièrement intéressantes pour des travaux futurs.

Les quatre critères de choix principaux de la méthode de résolution sont : efficacité, simplicité de mise en œuvre, maitrise du temps de calcul et adaptabilité à des problèmes de natures variées.

La méthode de résolution choisie doit proposer une bonne solution, de valeur supérieure à celle qu'un système préexistant ou qu'un agent humain pourrait fournir. Bien que

souhaitable, l'optimalité n'est pas nécessaire. Une méthode d'optimisation approchée est donc suffisante.

Nous cherchons à mettre en œuvre une méthode d'optimisation relativement intuitive et simple à manier. En particulier, il devrait être aisé de spécialiser le processus d'optimisation au problème étudié : on souhaiterait pouvoir y transposer des principes d'exploitation ainsi que des connaissances issues de l'expertise-métier de la régulation. On souhaiterait également pouvoir introduire des solutions construites par ailleurs, manuellement par exemple.

Le temps de calcul est un élément important de la performance d'une méthode de régulation en temps réel. Nous souhaitons dans cette étude pouvoir fixer un temps de calcul limite. Une bonne solution devrait donc être obtenue avec un temps de calcul acceptable dans les conditions qui sont celles des travaux menés (matériel, puissance de calcul, environnement de simulation…). Le temps de calcul jugé acceptable dans les travaux présentés ne correspond pas nécessairement au temps de calcul acceptable en exploitation réelle.

La méthode choisie doit permettre de résoudre des problèmes de natures différentes. La fonction-objectif définie précédemment comporte des composantes non linéaires. D'autres composantes de natures diverses pourraient être ajoutées dans des travaux futurs. Par ailleurs, la méthode choisie doit également permettre de manipuler facilement des variables de décision de natures différentes, ici des marches types des temps de stationnement et des modes de desserte.

On peut ajouter un critère supplémentaire qui pourrait s'avérer essentiel sur le problème étudié : il serait souhaitable que la méthode d'optimisation soit robuste aux erreurs d'évaluation. En effet, le modèle de trafic propose une projection simple et rapide en terme de temps de calcul, mais limitée, notamment en ce qui concerne l'impact des circulations sur leur voisinage. De plus, les trains manuels ont des comportements variés sur la voie, un écart vis-à-vis des prédictions semble inévitable. De façon plus générale, le trajet d'un train est soumis à de fréquentes dispersions en ce qui concerne les temps de stationnement (trains automatiques et manuels) et les temps de parcours (trains manuels).

Parmi les méthodes heuristiques cherchant à approcher au mieux les solutions optimales d'un problème multi-objectif, les méta-heuristiques génériques ont fait l'objet de nombreuses études, améliorations et applications (Hao, Galinier et Habib 1999). Les méthodes mettant en œuvre une population de solutions ont été reconnues comme particulièrement adaptées au cas multi-objectif : elles ne nécessitent généralement pas de réécriture du problème sous forme mono-objectif et permettent de considérer simultanément plusieurs candidats à la résolution. La population considérée est mise à jour

au cours du processus recherche en fonction de l'efficacité des individus mais aussi de phénomènes aléatoires L'adaptabilité des méthodes basées sur une population constituent un atout supplémentaire ayant contribué à renforcer l'intérêt des chercheurs mais aussi des ingénieurs. Les algorithmes évolutionnaires, et notamment les algorithmes génétiques, ont été largement utilisés dans le domaine multi-objectif et appliqués à des problèmes d'ingénierie variés (Marler et Arora 2004), (Bäck, Hoffmeister et Schewefel 1993). Les algorithmes basés sur l'intelligence en essaim tels que l'optimisation par essaims particulaires ou par colonies de fourmis sont des alternatives également reconnues (Selvi et Unmarani 2010). Les trois méthodes d'optimisation citées permettent de satisfaire les critères énoncés précédemment : elles ont été reconnues comme efficace pour l'optimisation multi-objectif basée sur les approches de Pareto ; leur implémentation et leur prise en main est relativement rapide et intuitive ; le temps de calcul alloué est facilement maitrisé et peut être amélioré grâce à la parallélisation intrinsèque des individus d'une population ; ces méthodes permettent de résoudre des problèmes de natures différentes, et acceptent notamment des objectifs non linéaires (tels que ceux définis dans la partie précédente, ou d'autres qui pourraient être ajoutées dans des travaux futurs). Bien que très similaires, chacune des méthodes citées présentent néanmoins des avantages et des inconvénients. Les algorithmes génétiques sont très flexibles et peuvent être implémentés selon de nombreuses approches (Fonseca et Fleming 1995) ; ils sont donc tout à fait adaptés pour la spécialisation de la résolution face au problème donné, notamment par l'intermédiaire des opérateurs génétiques. En outre, les algorithmes génétiques se basent sur une chaîne de caractères de taille fixe pouvant contenir des grandeurs de natures différentes. La manipulation de ces grandeurs selon leurs caractéristiques propres s'appuie sur une fonction de codage de l'information. Cette structure permet d'une part une intervention des opérateurs directement sur l'information portée et d'autre part de nombreux échanges d'information entre les individus d'une population. Par rapport aux algorithmes génétiques, les essaims particulaires ne permettent pas un tel partage d'information ni une telle capacité de spécialisation. En contrepartie, ils sont généralement plus rapides et leur prise en main peut s'avérer plus aisée grâce à l'absence d'opérateurs et donc au faible nombre de paramètres (Jones 2005). L'optimisation par colonies de fourmis met en œuvre un apprentissage permettant, tout comme les algorithmes génétiques, une forme de mémorisation à laquelle elle combine une approche de construction pas à pas. Elle est donc adaptée aux problèmes pour lesquels un mécanisme de construction peut être conçu (Alaya 2009) et est efficace dans la recherche d'une solution précise. Un atout important de cette méthode est la possibilité de résoudre un problème dynamique par modification du graphe parcouru par les fourmis. Toutefois, l'optimisation par colonies de fourmis s'avère, comme les algorithmes génétiques, coûteuse en termes de temps de calcul. Par ailleurs, il nous semble que le processus d'optimisation peut être difficile à analyser et à interpréter.

Dans le cadre des travaux présentés, notre choix s'est porté sur les algorithmes génétiques qui, malgré un temps de calcul important et un paramétrage souvent compliqué, répondent aux critères établis et permettent une implémentation flexible et hautement spécialisée ainsi qu'une résolution robuste aux erreurs d'évaluation. Nous décrivons dans la suite la méthode de résolution développée à partir d'un algorithme génétique.

3.4.2 Résolution par algorithme génétique

3.4.2.1 Chromosome et codage

Dans la méthode présentée, un chromosome est constitué d'un ensemble de portions. Chacune de ces portions correspond aux variables de décision d'un levier d'action, et est donc composée d'un ensemble de grandeurs homogènes. Les leviers d'action envisagés sont le temps de parcours, le temps de stationnement et le mode de desserte. Un chromosome est donc composé de une à trois portions, en fonction des leviers activés.

Chaque portion de chromosome est caractérisée par une liste ordonnée de variables de décision pour toutes les circulations commandables, c'est-à-dire en pilotage automatique, sur leurs horizons respectifs de régulation. Le chromosome contient ainsi l'ensemble des variables de décision du problème de régulation :

$$\forall c \in C^{PA}, \quad \forall p_i \in P_c^{REG_M}, \quad \forall p_j \in P_c^{REG_S}, \quad \forall p_k \in P_c^{REG_D}, \quad tp_{c,p_i}, ts_{c,p_j}, \delta_{c,p_k} \tag{3.24}$$

Chaque rang de la liste correspond à une circulation donnée et à un élément de sillon donné de son parcours. Pour garantir la cohérence du codage d'un chromosome, et donc le sens des informations qu'il porte, la correspondance entre l'index d'une liste et le couple circulation/point remarquable associé est référencée dans un dictionnaire de correspondance. On définit un dictionnaire par type de portion de chromosome (voir Figure 43). Les dictionnaires sont mémorisés au niveau du module de régulation et sont valables pour tous les chromosomes participant au processus d'optimisation ; ainsi toute manipulation d'une portion de chromosome fait appel au dictionnaire correspondant. Pour une clé correspondant à un index d'une portion de chromosome, le dictionnaire de correspondance permet de pointer la circulation et l'élément de sillon correspondants. Inversement, à partir d'une circulation et d'un de ses éléments de sillon, le dictionnaire permet de pointer la position correspondante sur une portion de chromosome. Ce processus de codage/décodage garantit l'intégrité des chromosomes.

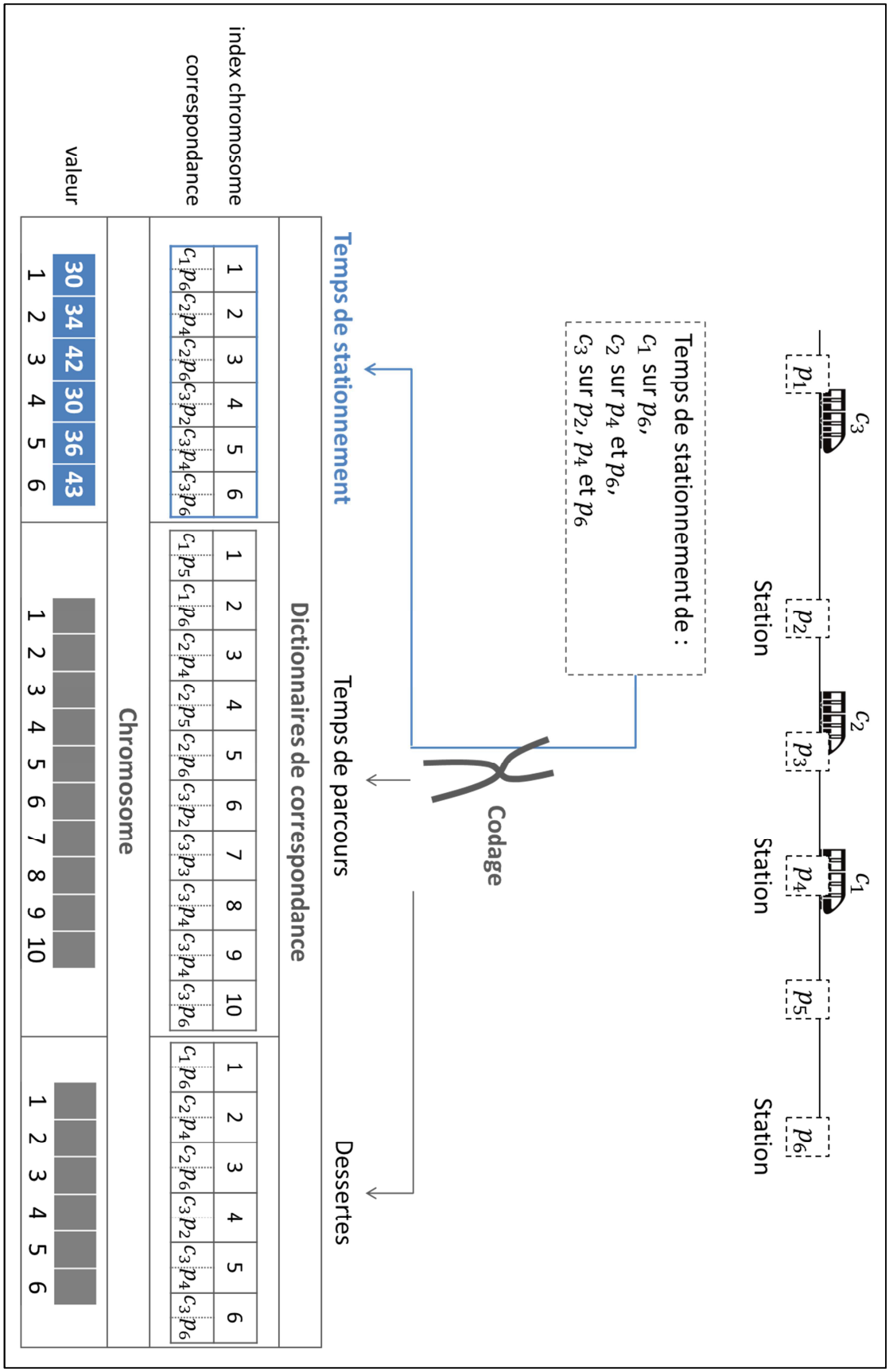

Figure 43 : Principe de codage de l'algorithme génétique développé pour la régulation

Durant le processus d'optimisation, le génome d'un chromosome est amené à être modifié. Afin de préserver l'intégrité du chromosome, toute modification est réalisée par un

opérateur d'écriture dédié. De façon similaire au dictionnaire de correspondance, on définit un opérateur d'écriture par type de portion de chromosome (Figure 44) : on obtient ainsi un opérateur d'écriture des temps de stationnement, un opérateur d'écriture des temps de parcours et un opérateur d'écriture des modes de desserte. Ces opérateurs constituent chacun une méthode de la portion de chromosome à laquelle ils sont associés. Ainsi, ils sont valables pour tous les chromosomes participant au processus d'optimisation. A partir de la position du gène à modifier, un opérateur d'écriture détermine grâce à la table de correspondance la circulation et l'élément de sillon associés. A partir de ces informations, il écrit le gène à modifier tout en veillant à respecter les contraintes qui lui sont attribuées. L'attribution des contraintes aux opérateurs est précisée dans 3.4.2.2.

Les principales fonctions impliquant le codage ou le décodage d'un chromosome sont :

- le codage d'une grille horaire ou d'un ensemble de consignes (réelles, de repli, aléatoires…) en chromosome. Cette fonction intervient sur le génome d'un chromosome, elle met donc en œuvre les opérateurs d'écriture dédiés en accord avec le dictionnaire de correspondance ;

- la simulation du chromosome : les informations contenues dans le chromosome sont décodées grâce au dictionnaire de correspondance, et écrites dans les consignes à simuler. Ces consignes sont appliquées sur la grille horaire recalculée pour évaluer leur impact. La simulation du chromosome permet d'estimer son efficacité ;

- l'application du chromosome : les informations contenues dans le chromosome sont décodées grâce au dictionnaire de correspondance, et écrites dans les consignes réelles qui doivent être envoyées aux circulations.

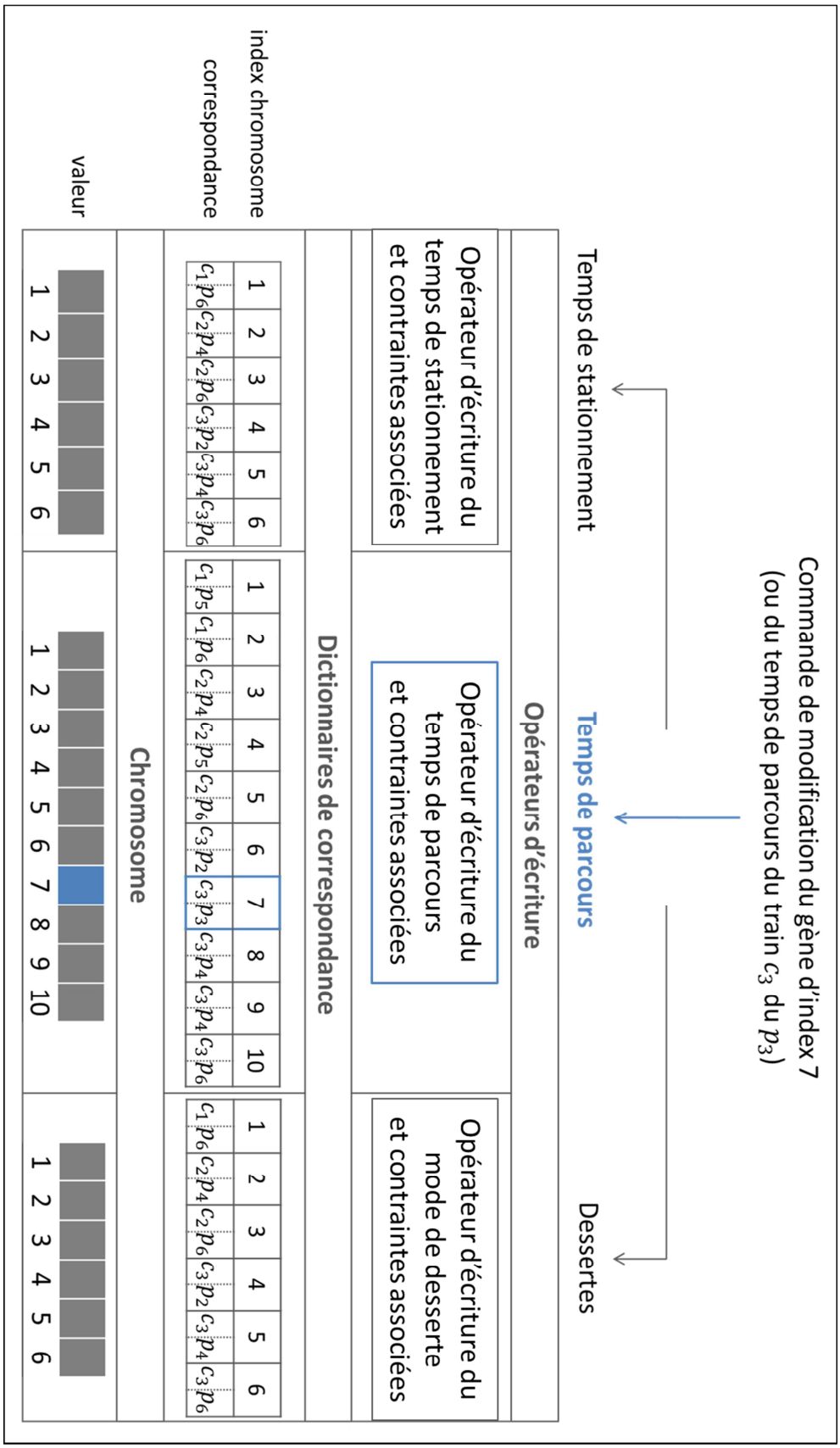

Figure 44 : Opérateurs d'écriture des gènes intervenant lors du codage ou de la modification d'un gène

3.4.2.2 Contraintes

Structure

Le problème de régulation formulé est caractérisé par de nombreuses contraintes. Ces contraintes doivent être intégrées dans l'algorithme génétique permettant de résoudre le problème.

Certaines contraintes s'appliquent indépendamment sur chacune des variables concernées. D'autres contraintes concernent plusieurs variables à la fois ; elles lient donc ces variables entre elles et peuvent ainsi s'avérer plus compliquées à mettre en œuvre. Nous appellerons ces contraintes des contraintes couplantes. Dans la suite, les relations de couplage entre les variables appartenant d'une part à des sillons distincts et d'autre part à un même sillon sont présentées.

Les sillons $s_c, c \in C$ sont les ensembles de variables décrivant le mouvement des circulations. La Figure 45 représente la matrice des contraintes du problème de régulation pour six sillons $s_c,\ c \in \{11, 12, 13, 14, 15, 21\}$. Les sillons 11 à 15 sont de même sens. Les sillons 11 et 21 sont de sens opposés et utilisent le même matériel m_1. Après retournement en fin de sillon 11, le matériel m_1 est affecté à la circulation 21. Chaque ligne de la matrice représente un type de contrainte du problème de régulation. Chaque colonne représente un sillon. Lorsqu'un type de contrainte s'applique aux variables d'un sillon, la case correspondante est coloriée. Les cases grises représentent les contraintes qui s'appliquent de façon indépendante d'un sillon à l'autre. Les cases rouges représentent un couplage entre les variables des sillons coloriés. D'après la Figure 45, les contraintes d'ordre d'arrivée, d'espacement et de capacité couplent les variables de plusieurs sillons. De plus, cette relation de couplage est une relation forte puisqu'elle intervient sur chaque point remarquable du périmètre de régulation. Concernant la contrainte de temps de retournement, la relation de couplage s'avère relativement faible : la contrainte lie seulement la date de fin d'un sillon et la date de début du sillon suivant utilisant le même matériel roulant. Son périmètre d'application est donc très limité, elle n'impacte pas directement les variables de décision. Enfin, les contraintes de temps de parcours, de temps de stationnement et de suppression de desserte ne sont pas couplantes entre les sillons. La Figure 46 présente la matrice de ces trois contraintes, pour un sillon donné, sur les étapes successives de son parcours. Les contraintes de temps de parcours et de temps de stationnement ne sont pas couplantes entre les variables d'un même sillon. Nous avons vu précédemment qu'elles ne couplaient pas non plus les variables de différents sillons. Ces contraintes seront donc relativement faciles à appliquer. La contrainte de suppression de desserte couple les variables de décision au sein d'un même sillon. Dans la pratique, ce couplage reste cependant limité : en cas d'une suppression de desserte affectée à une

variable de type δ, seules les variables de temps de stationnement ts et de mode de desserte δ des gares précédant la desserte supprimée sont concernées.

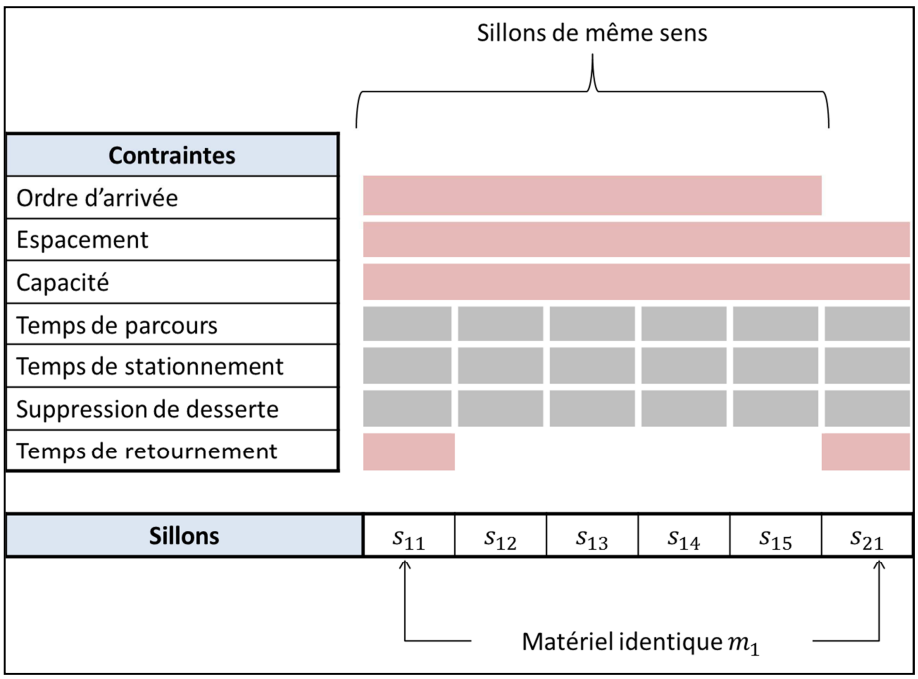

Figure 45 : Matrice des contraintes du problème de régulation en fonction des sillons

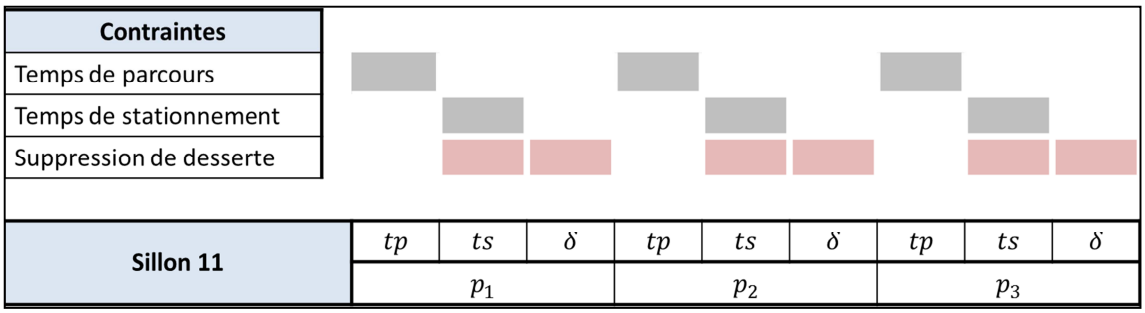

Figure 46 : Matrice des contraintes pour les variables de décision d'un sillon donné le long de son parcours

Application

Dans la résolution du problème de régulation, les contraintes non couplantes ou peu couplantes sont mises en œuvre directement dans la construction des données par l'intermédiaire d'opérateurs dédiés.

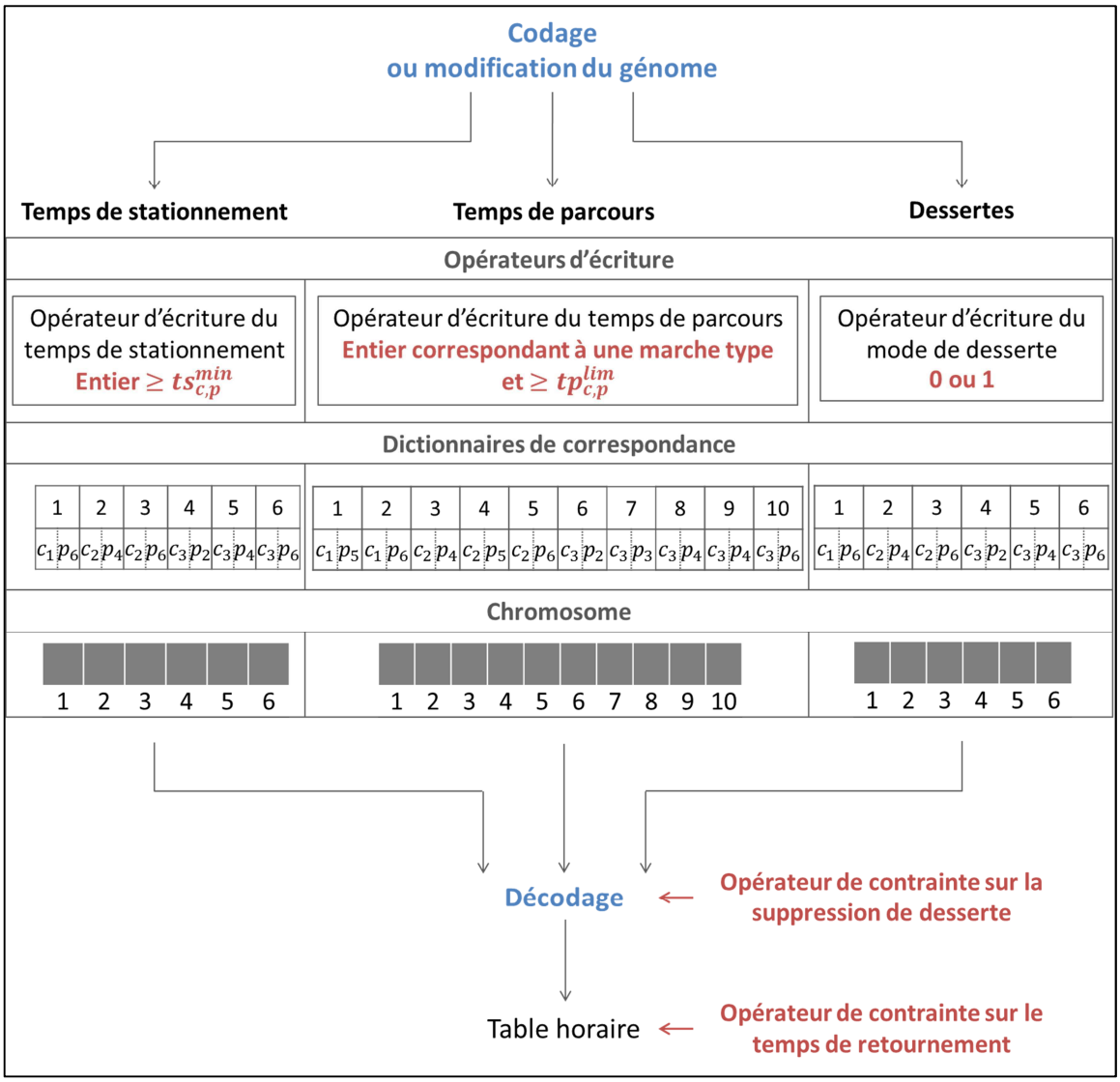

Figure 47 : Mise en œuvre des opérateurs dédiés à l'application des contraintes (en rouge) dans les structures de données

Les temps de parcours des circulations sont associés à des marches-types. Chaque circulation dispose d'un nombre fini de marches-types qu'elle est capable d'appliquer pour se mouvoir. Il s'agit d'une donnée du problème. De même, on considère que les temps de parcours correspondant aux différentes marches sur chaque élément de sillon du train sont connus. Le temps de parcours le plus faible sur un élément de sillon correspond au temps minimum opérable par la circulation. On considère également que le temps de parcours minimum respectant une limitation ou restriction de vitesse sur un élément est connu. Il peut, par exemple, être calculé approximativement par le ratio de la distance à parcourir et de la vitesse limite, ou plus précisément par simulation. Ainsi la contrainte sur le temps de parcours d'un train donné sur un élément de sillon donné est connue. Cette contrainte est appliquée directement sur la variable concernée lors de toute modification par l'intermédiaire de l'opérateur d'écriture des temps de parcours. La contrainte de temps de parcours est ainsi intégrée à l'opérateur d'écriture des temps de parcours.

Il en est de même pour la contrainte sur le temps de stationnement. On considère que le temps de stationnement minimum dans chaque gare est connu. Cette contrainte est appliquée directement sur la variable concernée lors de toute modification par l'intermédiaire de l'opérateur d'écriture des temps de stationnement auquel elle est intégrée.

La contrainte liée à la suppression de desserte couple certaines variables d'un même sillon. Lorsqu'une gare initialement desservie, devient non desservie d'après les informations portées par un chromosome, le respect de la contrainte liée à cette suppression de desserte est forcé par un opérateur dédié. Cet opérateur peut être amené à modifier une desserte de la circulation en amont de la desserte supprimée, mais aussi un temps de stationnement appliqué en amont de la suppression. L'action de l'opérateur concerne donc deux types de variables. Afin de mettre en œuvre simplement et efficacement la contrainte sur les dessertes, l'opérateur dédié intervient lors du décodage du chromosome (simulation ou application des consignes du chromosome) en modifiant les variables concernées d'une part sur le chromosome et d'autre part sur les consignes (simulées ou réelles) qui en découlent : lorsqu'une variable indique une suppression de desserte, les variables associées à la desserte de la gare amont sont modifiées en conséquence ; la desserte est forcée et/ou le temps de stationnement est allongé ; la table horaire est décalée en conséquence.

La contrainte sur le temps de retournement couple une variable pour chaque sillon utilisant un même matériel. Le respect de cette contrainte est forcé par un opérateur dédié qui décale le début d'un sillon en fonction de la fin du sillon précédent utilisant le même matériel. Afin de mettre en œuvre simplement et efficacement la contrainte sur les temps de retournement, l'opérateur dédié intervient lors du décodage du chromosome (simulation ou application des consignes du chromosome) en décalant les dates d'arrivée $a_{c,p}$ et de départ $d_{c,p}$ concernées. L'opérateur n'intervient donc pas sur le chromosome ou sur les consignes qui lui sont associées, mais sur l'interprétation du chromosome dans la table horaire via le processus de décodage.

La mise en œuvre des contraintes sur le temps de parcours, le temps de stationnement, le temps de retournement et la suppression des dessertes par des opérateurs dédiés est synthétisée sur la Figure 47.

Les contraintes liées à l'ordre d'arrivée, à l'espacement et à la capacité sur les points remarquables couplent de nombreuses variables entre les sillons. Elles sont de ce fait relativement compliquées à mettre en œuvre. L'utilisation d'opérateurs dédiés est d'une part non-triviale, d'autre part coûteuse en temps de calcul. On préfère introduire ces contraintes directement dans les fonctions de coûts du problème de régulation sous la forme d'une pénalité. Pour chaque fonction-objectif du problème de régulation, on définit la fonction :

$$F_i(a,d,\lambda) = f_i(a,d) + \sum_{j=1}^{m_c} \lambda_j g_j(a,d)\,, \qquad i = 1..q \tag{3.25}$$

avec : $m_c = 3,\ \lambda_j \in \mathbb{R}^+$,

et :

$$g_1(a,d) = \sum_{p\in P} \sum_{[c_i,c_j]\in D_p} \beta(c_i,c_j).max\left(0,\left(a_{c_i,suiv\left(p,P_{c_i}\right)} - a_{c_j,suiv\left(p,P_{c_j}\right)}\right)\right) \tag{3.26}$$

avec $\beta(c_i,c_j) = \begin{cases} 1 & si\ suiv(p,P_{c_i}) = suiv\left(p,P_{c_j}\right) \\ 0 & sinon \end{cases}$

$$\begin{aligned} g_2(a,d) = &\sum_{p\in P} \sum_{[c_i,c_j]\in A_p} max\left(0,\epsilon^{min}(c_i,c_j,p) - \left(a_{c_j,p} - a_{c_i,p}\right)\right) \\ &+ \sum_{p\in P^G\cup P^T} \sum_{[c_i,c_j]\in D_p} max\left(0,\epsilon^{min}(c_i,c_j,p) - \left(d_{c_j,p} - d_{c_i,p}\right)\right) \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$g_3(a,d) = \sum_{p\in P^G\cup P^T} \sum_{c_i\in A_p} max\left(0,\epsilon^{min}(c_i,c_l,p) - \left(a_{c_i,p} - d_{c_l,p}\right)\right) \tag{3.28}$$

avec : c_l la circulation limitant l'entrée en gare de c_i.

On appelle Π la pénalité impactant une fonction-objectif.

$$\Pi(a,d) = \sum_{j=1}^{m_c} \lambda_j g_j(a,d) \tag{3.29}$$

3.4.2.3 Évaluation

Les individus d'une population sont caractérisés par leur efficacité à résoudre le problème. Cette efficacité est traduite par deux grandeurs définies dans le problème de régulation : la ponctualité I^P et la régularité de l'intervalle I^I. Elle correspond aux deux fonctions objectif du problème de régulation. L'efficacité est impactée par des pénalités liées aux contraintes relaxées et introduites dans les fonctions-objectif. Un individu est donc caractérisé par :

- son efficacité de ponctualité $f_1(a,d) = I^P$;
- son efficacité de régularité de l'intervalle $f_2(a,d) = I^I$;
- la pénalité Π liée aux contraintes violées.

A chacune de ces composantes sont associées une valeur de normalisation η qui permet de calculer les efficacités pénalisées :

$$f_1^{\Pi}(a,d) = \frac{f_1(a,d)}{\eta_1} + \frac{\Pi(a,d)}{\eta_{\Pi}}$$
$$f_2^{\Pi}(a,d) = \frac{f_2(a,d)}{\eta_2} + \frac{\Pi(a,d)}{\eta_{\Pi}} \qquad (3.30)$$

A chacune des efficacités, on associe une pondération ω_i qui permet de calculer l'efficacité agrégée :

$$f^{\Pi}(a,d) = \sum_{i=1..q} \omega_i . f_i^{\Pi}(a,d) \qquad (3.31)$$

Cette efficacité agrégée offre une définition de la capacité d'un individu à résoudre un problème qui diffère de la dominance au sens de Pareto.

3.4.2.4 Opérateurs

Opérateurs de contraintes

L'algorithme génétique développé fait appel à trois types d'opérateurs de contraintes, introduits précédemment, pour satisfaire les contraintes qui ne sont pas exprimées sous forme de pénalité.

- Les opérateurs d'écriture d'un gène respectent les valeurs admissibles pour un gène donné, en accord avec la nature du gène considéré et les éventuelles contraintes associées.

- L'opérateur de respect du temps de retournement minimum est exécuté lors du décodage. Si la contrainte de temps de retournement minimum n'est pas vérifiée, l'opérateur décale la grille horaire résultant du chromosome en conséquence.

- L'opérateur de suppression de desserte impose les actions nécessaires au respect de la contrainte traduisant les règles d'exploitation en cas d'annulation de desserte (desserte et temps de stationnement en amont).

Sélection

Les opérateurs de sélection intégrés dans l'algorithme génétique développé sont :

- la sélection par rang de Pareto : les individus de meilleurs rangs sont sélectionnés ;

- la sélection par efficacité agrégée : les individus de meilleures efficacités agrégées sont sélectionnés ;

- la sélection par roulette selon le rang de Pareto : la probabilité de sélection d'un individu est inversement proportionnelle à son rang de Pareto ;

- la sélection aléatoire.

Ces opérateurs de sélection sont utilisés dans les différentes phases de l'évolution de la population (Figure 48). Ils interviennent pour sélectionner les individus à croiser, les individus à muter, les meilleurs individus à conserver, ainsi que la solution finalement retenue.

Mutation

L'opérateur de mutation modifie aléatoirement le gène d'un chromosome. Pour effectuer cette modification, la mutation fait appel à l'opérateur d'écriture d'un gène afin de respecter les propriétés du gène liées à sa nature et aux contraintes du problème.

Croisement

L'algorithme génétique intègre un opérateur de croisement à 2 points. Les croisements sont nécessairement réalisés entre des portions de chromosome de même nature, et entre des gènes de même indice, pour respecter les propriétés des gènes échangés.

3.4.2.5 Évolution

La population initiale est composée d'individus prédéfinis codés à partir d'une grille horaire ou d'un ensemble de consignes, et d'individus codés aléatoirement.

Chaque génération est composée d'un nombre fixé d'individus. Au sein d'une génération, on évalue tout d'abord l'efficacité de chaque individu : les variables de décisions sont simulées sur la grille horaire recalculée et les indicateurs de trafic sont calculés pour déterminer l'efficacité de l'individu. On applique ensuite une approche élitiste en sélectionnant et copiant un ou plusieurs des meilleurs chromosomes, en préparation de la génération suivante. Puis on effectue des croisements sur des individus sélectionnés parmi la génération courante, pour former des individus descendants pour la génération suivante. Ces individus descendants peuvent être touchés par des mutations aléatoires de leur génome. Les individus descendants, et les individus élites précédemment copiés composent la nouvelle génération. Au bout d'un certain nombre de générations, la solution proposée correspond au meilleur individu de la population.

La Figure 48 présente une synthèse de la fonction de régulation développée.

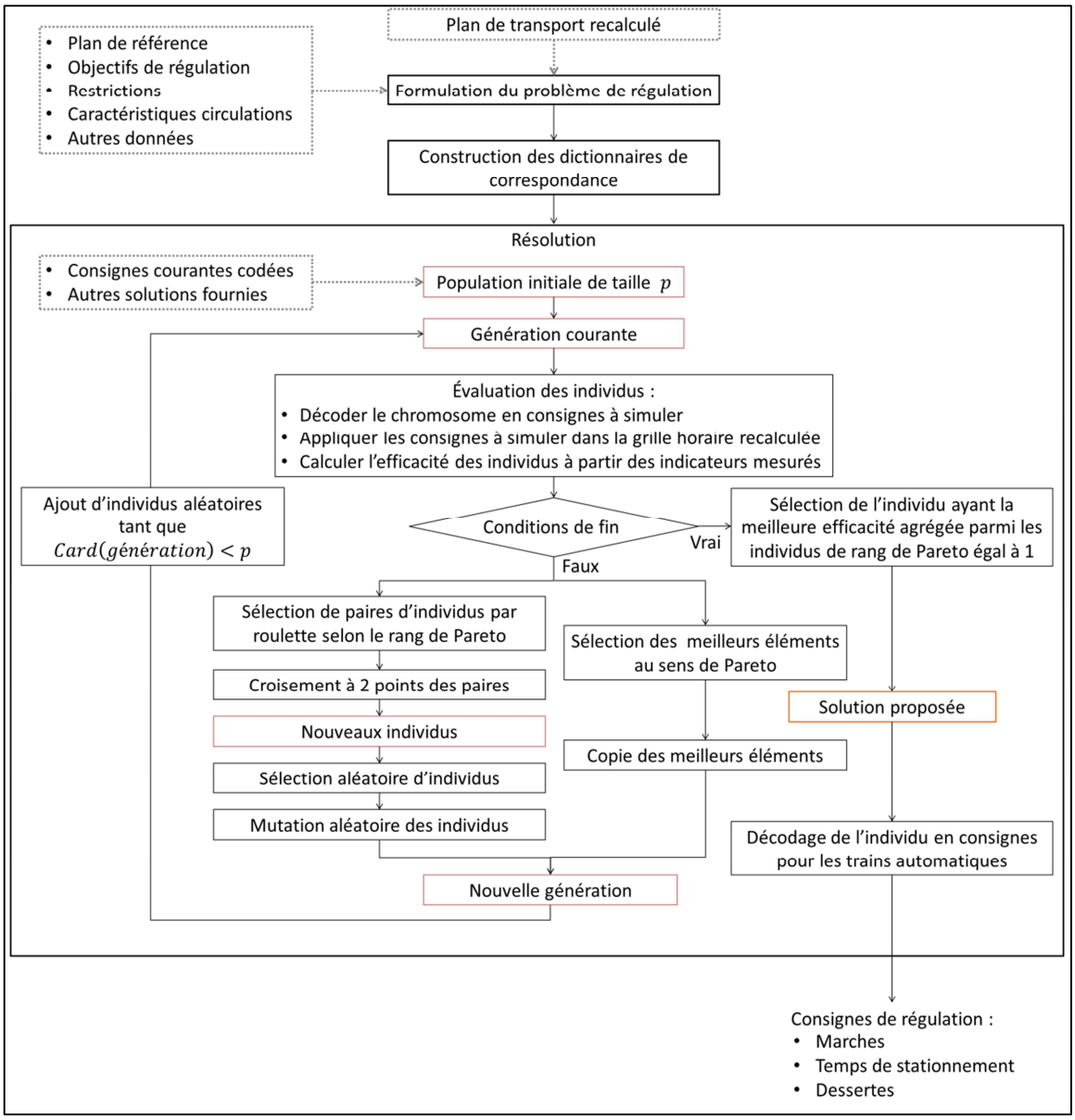

Figure 48 : Synthèse de la fonction de régulation du trafic par optimisation multi-objectif

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'architecture fonctionnelle du module de supervision conçu et implémenté dans le cadre des travaux de thèse. Ce module doit pouvoir s'intégrer dans le bloc ATS d'un système CBTC, et s'interfacer avec les autres sous-systèmes du CBTC (ATC bord et sol) et avec un système de signalisation classique. La mise en œuvre du plan de transport est réalisée au travers du suivi des trains (via la localisation CBTC et l'état des circuits de voie), du calcul et de la transmission de commandes d'itinéraire à destination de la signalisation, et du calcul et de la transmission de consignes à destination des trains CBTC en pilotage automatique. Afin d'appliquer le plan de transport en exploitant au mieux la capacité de l'infrastructure, le module de supervision est en charge

du choix des quais, des itinéraires et du calcul des consignes de régulation. Ces décisions s'effectuent en temps réel, au moment le plus opportun (en général au plus tard). La gestion des itinéraires et des quais a été décorrélée du problème de régulation afin de ne pas le surcharger. En toute situation, nominale ou perturbée, la supervision attribue au mieux les différentes ressources aux circulations en fonction des règles d'exploitation et de l'état courant du système. De son côté, la régulation est en charge d'adapter la mission et le mouvement des trains (marche et stationnement) en cas de perturbation entrainant une dérive du plan de transport. Deux structures de commande ont été intégrées dans la supervision :

- une commande évènementielle basée sur l'évaluation et la régulation individuelles d'une circulation ;

- et une commande périodique construite selon une structure de commande prédictive basée modèle, évaluant et régulant un ensemble de circulations.

Aussi, nous avons proposé une méthode de régulation intégrée dans la structure de commande prédictive. La résolution du problème de régulation est basée sur une optimisation multi-objectif des consignes. Cette optimisation est actuellement réalisée à l'aide d'algorithmes génétiques mêlant opérateurs standards et opérateurs spécifiques au problème étudié. Les opérateurs spécifiques au problème appliquent directement certaines contraintes du système dans la structure de données gérée par l'algorithme génétique.

Dans le chapitre suivant, nous présentons l'outil de simulation SIMONE développé au sein de SNCF. Cet outil microscopique a pour objectif de simuler précisément le fonctionnel et la dynamique d'un système ferroviaire intégrant un système de signalisation classique et/ou un système CBTC. Les besoins des travaux de thèse nous ont conduits à prendre part à la spécification, à la conception et à l'implémentation de l'outil SIMONE.

Chapitre 4

Simulateur d'exploitation SIMONE

Afin de tester les performances d'une stratégie de régulation en zone dense, il est nécessaire de s'équiper d'un outil de simulation microscopique adapté. Cet outil doit être réaliste du point de vue des performances du système. Plus précisément, il doit être réaliste du point de vue de la cinématique des circulations, et de l'impact de la signalisation et du système CBTC sur le comportement des trains. L'outil de simulation doit également être suffisamment performant pour simuler en un temps raisonnable une ligne complète avec l'ensemble de ses trains lors d'une journée d'exploitation. Le simulateur doit intégrer la dimension hybride du problème, avec des aspects continus liés en particulier à la cinématique du train et à la conduite (conducteur ou asservissement), et avec des aspects discrets complexes tels que la signalisation, le CBTC, l'apparition des pannes, etc. Le découpage entre la partie cinématique et la partie discrète devrait permettre une simulation simple, rapide en termes de temps de calcul et suffisamment générique et modulaire pour être facilement adaptable à d'autres réseaux et situations.

Durant les travaux de thèse, une équipe SNCF de quatre ingénieurs a mené le développement de l'outil de simulation SIMONE répondant à ces spécifications. L'outil SIMONE vise à simuler l'exploitation ferroviaire dans le cadre de scénarios complexes pouvant inclure des trains équipés d'un système CBTC, et des trains non-équipés. La version présentée ici correspond à une version intermédiaire, développée durant les trois années passées. Le développement de SIMONE doit se poursuivre sur les prochaines années afin d'intégrer l'ensemble des fonctions et des cas d'usage initialement prévus. Les

différentes limites de la version intermédiaire utilisée seront précisées par la suite. Les objectifs des travaux de thèse nous ont naturellement conduits à prendre part, avec l'équipe SNCF, à la spécification, à la conception et à l'implémentation de l'outil SIMONE. En particulier, le développement de l'ATS et de la signalisation ferroviaire dans SIMONE font partie intégrante des objectifs de la thèse. Ces activités de développement doivent nous permettre de nous appuyer sur un simulateur réaliste et complet.

4.1 Architecture du simulateur

L'outil SIMONE doit permettre d'évaluer la performance d'un système ferroviaire dans le cadre de scénarios complexes. Il est codé dans un langage haut niveau et flexible (Python) qui permet une architecture logicielle adaptée aux exigences décrites précédemment.

Le simulateur s'appuie sur une architecture multi-agent. Chaque objet élémentaire intervenant dans la simulation, et interagissant avec d'autres objets, est défini comme un acteur. Les acteurs implémentent un comportement en réaction à des déclencheurs. On peut définir trois types de déclencheurs :

- les déclencheurs cycliques, qui sont généralement utilisés pour faire évoluer périodiquement la dynamique des éléments composant le système ;
- les déclencheurs associés à une date absolue, qui doivent être pris en compte par le destinataire à la date renseignée ;
- les déclencheurs de type évènement, en général déclenchés par d'autres acteurs, qui doivent être pris en compte au plus tôt par le destinataire.

Deux principaux moyens de communication sont mis en place pour permettre l'échange d'information entre acteurs :

- la transmission périodique d'une variable d'un acteur vers un ensemble d'autres acteurs ;
- la transmission ponctuelle d'information d'un acteur vers un autre acteur.

La transmission périodique est utilisée pour les transmissions de suivis. La variable partagée est envoyée aux acteurs y ayant souscrit selon une période liée au canal de communication, et elle atteint l'acteur souscripteur après un retard paramétré.

La transmission ponctuelle d'information concerne plutôt les envois de commande ou encore les messages d'acquittement. Dans ce cas, l'information est transmise à l'acteur destinataire via un évènement retardé du temps nécessaire à la transmission du message.

L'architecture de SIMONE peut être décomposée en deux parties principales : la partie relevant du simulateur (moteur de simulation, interface, gestion des scénarios…) et la partie relevant du système simulé.

Le moteur de simulation est l'élément central de la structure de l'outil de simulation car il est en charge de l'écoulement du temps et des échanges de données. Il définit un séquenceur en charge de gérer l'écoulement du temps de simulation. Le séquenceur orchestre la simulation. Il connaît tous les acteurs de la simulation et est en charge de leur activation. Il est également responsable de la distribution des déclencheurs et coordonne ainsi l'exécution des comportements des acteurs. A ce titre, le séquenceur modélise également les systèmes de communication entre les différents éléments du système simulé. Les propriétés de la communication (la latence, par exemple) peuvent être paramétrées dans son système de messagerie.

Les principaux acteurs compris dans le système simulé par SIMONE sont :

- la voie ;
- les trains (matériel roulant) ;
- le système CBTC (Bord, Sol, ATS) ;
- la signalisation ferroviaire classique ;
- l'agent de conduite.

L'architecture des acteurs modélisés est conçue à partie de l'architecture des systèmes réels correspondants. Chaque système ou sous système est caractérisé par un périmètre fonctionnel réaliste. Les acteurs du système simulé sont décrits dans la partie suivante.

4.2 Acteurs du système ferroviaire simulé

Chaque acteur du système ferroviaire simulé peut être instancié une ou plusieurs fois dans la simulation, avec la possibilité d'avoir un paramétrage différent. Ainsi, chaque objet peut être individualisé si besoin.

4.2.1 Agent de conduite

L'agent de conduite exécute un pilotage manuel du train. L'acteur Agent de conduite doit principalement modéliser :

- le comportement de conduite de l'agent, c'est-à-dire sa manière de mettre en œuvre la traction et le freinage du train, en ligne ou en gare ;

- le comportement face à la signalisation ferroviaire, et plus particulièrement face au Block Automatique Lumineux (BAL). En particulier, on cherche à modéliser sa façon de réagir aux consignes et d'anticiper ces consignes en fonction de sa connaissance de la ligne.

Différentes sous-classes de l'acteur Agent de conduite doivent permettre de modéliser différents profils types de conducteur. Par exemple, on peut imaginer un profil correspondant à une conduite tendue mettant en œuvre des niveaux d'accélération et de freinage importants, et un profil correspondant à une conduite plus douce. La variété des comportements de conduite et des comportements face aux consignes de signalisation est un facteur significatif des performances d'un système ferroviaire.

L'acteur Agent de conduite n'est pas implémenté dans la version intermédiaire de l'outil SIMONE. L'acteur Agent de conduite sera développé et intégré dans une prochaine version de l'outil afin de permettre la simulation d'un trafic mixte. Le développement de l'acteur Agent de conduite devra être accompagné du développement de Block Automatique Lumineux (voir 1.1.1), en charge de communiquer visuellement les consignes au conducteur, dans l'acteur Signalisation ferroviaire (voir 4.2.5).

4.2.2 Voie

L'acteur Voie décrit l'infrastructure de transport. Cela comprend le réseau de rails, les aiguilles, les zones et leur occupation (notamment les CdV et les pédales) et l'électrification. Cet acteur a pour objectif de supporter la structure complète de la voie et de gérer sa mise à jour. Il gère également la cartographie représentant les positions des mobiles sur la voie.

La voie est modélisée sous la forme d'un graphe orienté constitué d'objets reliés entre eux par un chaînage. Les trois types d'objet pouvant être utilisés sont :

- le segment : il s'agit de l'élément de base du graphe. Un segment est orienté, et muni d'un chaînage amont, d'un chaînage aval et d'une longueur positive ;

- la fin de voie : il s'agit de l'objet permettant de terminer une voie (un heurtoir ou la fin de description de la voie). La fin de voie est munie uniquement d'un chaînage aval et est de longueur nulle ;

- l'aiguille : Cet élément est muni d'un chaînage amont, d'un chaînage aval droit, d'un chaînage aval gauche, d'une position (gauche, droite, indéterminée), et d'une longueur nulle.

A partir de ces différents types d'objet, la construction de la voie dans SIMONE se fait sur la base de la découpe de la voie réelle en circuit de voie (CdV) et des différents objets à positionner sur la voie. Les principaux paramètres définis le long de la voie sont la tension d'alimentation de la caténaire et la vitesse maximale autorisée sur la voie.

L'acteur Voie présenté dans cette partie correspond, a priori, à une version définitive.

4.2.3 Train

L'acteur Train décrit le fonctionnel lié au matériel roulant, en particulier la cinématique des trains et la modélisation de la chaîne de traction freinage. Il gère également le dispositif servant d'interface avec l'agent de conduite, ainsi que la sélection du mode (pilotage automatique / conduite manuelle) et du sens de circulation.

Dans le simulateur SIMONE, le train est modélisé en trois niveaux.

- La voiture supporte les propriétés telles que les masses, les positions des bogies, la présence d'une cabine de conduite.

- L'unité constitue un assemblage de voitures capable de rouler indépendamment. Elle est équipée ou non d'un CBTC.

- Le train est composé d'une ou plusieurs unités. Une de ses extrémités est définie comme cabine active. Son sens de déplacement correspond au déplacement physique du train sur la voie, indépendamment de la cabine active.

Un train ainsi constitué est principalement caractérisé par :

- sa cabine active ;

- sa longueur ;

- la position de ses bogies ;

- ses masses tournantes ;

- sa masse courante ;
- la position de son centre de gravité ;
- le nombre de voitures ;
- la répartition de son chargement dans les voitures ;
- sa cinématique propre.

La cinématique du train est basée sur la modélisation continue du mouvement d'un train sur la voie présentée dans la partie 2.1.2.1. Un exemple de paramètrage du train utilisé dans SIMONE est donné sur la Figure 49.

Caractéristiques du matériel	Valeur
Longueur d'un train	112 m
Longueur totale du train de type Unité Multiple	224 m
Nombre de voitures sur un train US	5
Masse pesante du train à vide	593 000 kg
Masse pesante du train à charge moyenne	676 500 kg
Masse pesante du train en charge maximale	760 000 kg
Masses tournantes (*masse équivalente aux inerties tournantes du train*)	32 022 kg
Caractéristiques dynamiques	**Valeur**
Vitesse maximale du train	140 km/h
Freinage de service (FS) sur le domaine CBTC	-0.842 m/s²
Freinage d'urgence garanti	-0.85 m/s²
Jerk maximal en traction	0.6 m/s³
Jerk minimal en freinage	-0.6 m/s³

Figure 49 : Paramétrage physique et dynamique du train utilisé dans SIMONE

Le freinage d'un train est modélisé par quatre phases successives :

- la coupure de traction : le train applique la dernière valeur consigne de traction ;
- la marche sur l'erre : le train n'est plus en traction mais n'a pas encore entamé son freinage ;
- l'établissement du freinage : le train entame son freinage et atteint au bout d'un certain temps le niveau de freinage nominal ;
- la relâche du frein : le train libère les freins.

Chacune de ces phases est définie par une durée caractéristique. Un exemple de paramétrage des durées caractéristiques des phases de freinage est donné sur la Figure 50.

Temps caractéristiques des phases de freinage	Valeurs
Temps de coupure traction	1.0 sec
Temps de marche sur l'erre	0.1 sec
Temps d'établissement du freinage	0.0 sec
Temps de relâche du frein	0.0 sec

Figure 50 : Paramétrage des durées caractéristiques des phases de freinage d'un train utilisé dans SIMONE

L'acteur Train présenté dans cette partie correspond à une version complète et aboutie. Certaines hypothèses pourront être affinées dans les prochaines versions de l'outil.

4.2.4 Système CBTC

La modélisation du système CBTC dans l'outil SIMONE est représentative de l'architecture et de l'allocation fonctionnelle d'un système réel. Le principal objectif de cette modélisation est d'être réaliste du point de vue des performances du système réel.

Le système peut être découpé en quatre sous-systèmes :

- l'ATC-bord ;
- l'ATC-sol ;
- l'ATS ;
- le système de communication.

Les trois premiers sous-systèmes sont modélisés explicitement dans SIMONE. Le dernier est modélisé à travers la transmission de données du séquenceur. Les retards de transmission d'un message sont paramétrés en fonction des caractéristiques du système de communication modélisé.

4.2.4.1 ATC

L'ATC-Sol, tel que défini dans l'outil, est en charge de :

- établir la cartographie d'occupation de la voie en fonction de la localisation CBTC des trains équipés et communicants, de l'état des CDV et des contrôles d'aiguilles ;

- délimiter le domaine de sécurité ; cette fonction détermine le point à protéger à partir de la condition la plus restrictive parmi la position des autres trains issue de la cartographie de la voie, les signaux Carrés, les conditions d'enclenchement de sens et les fins de voie. La limite du domaine de sécurité est transmise à l'ATC-Bord.

L'ATC-Bord, tel que défini dans l'outil, est en charge de :

- déterminer la position et la vitesse du train : cette fonction est en charge de calculer la position du train, la localisation de ses points caractéristiques (par exemple ses extrémités), sa vitesse, son sens de déplacement ;

- respecter le domaine de sécurité : cette fonction inclut la validation du domaine de sécurité transmis par le sol CBTC, et l'établissement d'un profil de vitesse limite le long du parcours du train ; elle fournit un point à protéger, un point d'arrêt fonctionnel, un profil de vitesse limite sous forme de paliers ;

- conduire le train : à partir du profil de vitesse limite, du point d'arrêt fonctionnel et du point à protéger, cette fonction détermine une consigne de vitesse ;

- gérer les modes de conduite du train : cette fonction détermine si le mode de conduite (pilotage automatique ou conduite manuelle) demandé est autorisé, et, le cas échéant, l'applique ;

- gérer le retournement : cette fonction définit la cabine active du train ;

- gérer la composition du train : cette fonction détermine la composition du train en fonction des unités qui le constituent.

La Figure 51 présente le diagramme (selon le formalisme Capella) d'architecture logique de la fonction « délimiter et respecter le domaine de sécurité » répartie entre l'ATC-Sol et l'ATC-Bord dans l'outil de simulation SIMONE. Cette architecture est réaliste vis-à-vis d'un système réel. La Figure 52 donne un exemple de paramétrage du CBTC Bord utilisé dans SIMONE. Ce dernier définit notamment la précision de la localisation calculée, les différentes marges permettant de définir le domaine de sécurité, et les grandeurs caractéristiques du pilotage automatique.

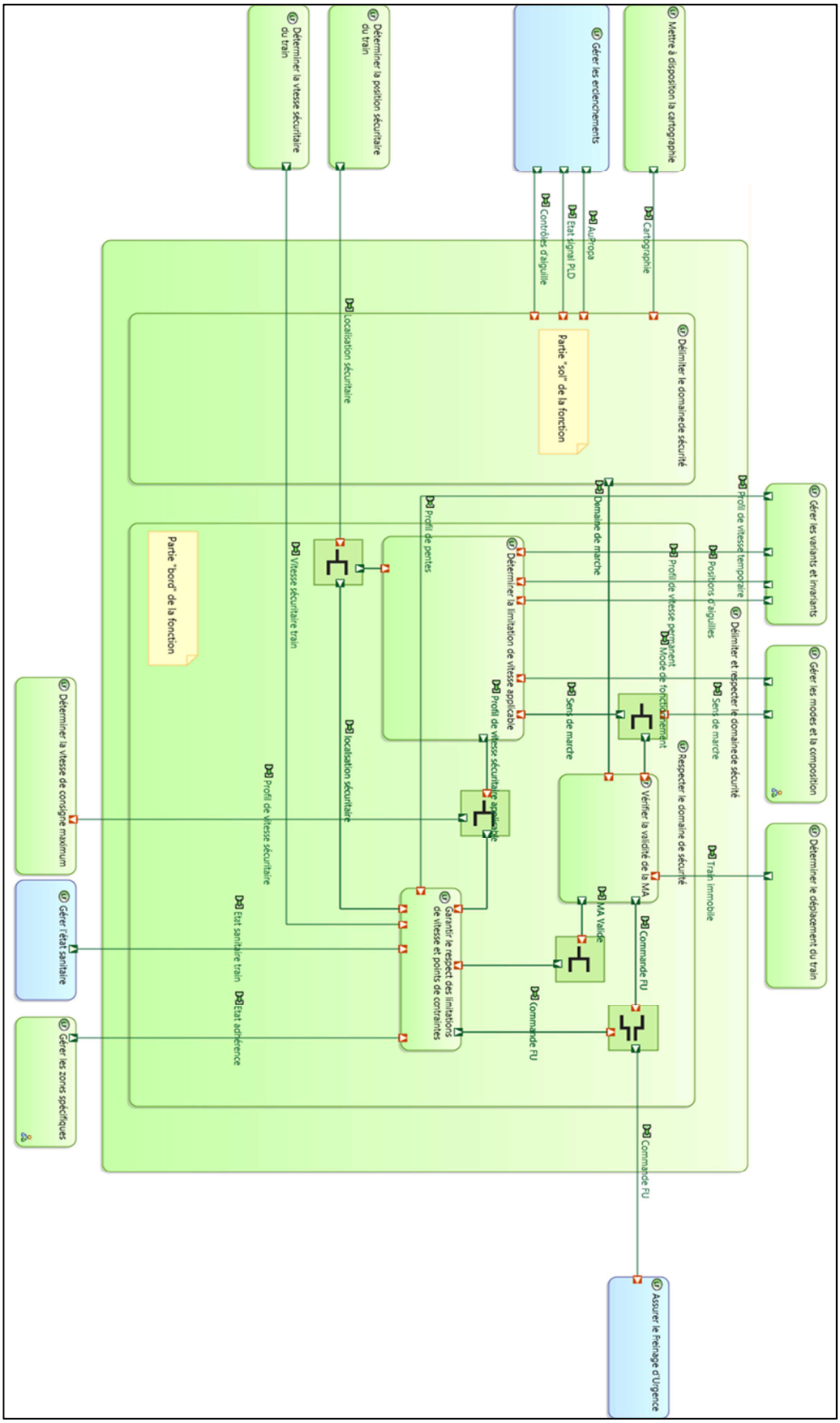

Figure 51 : Architecture logique de la fonction « délimiter et respecter le domaine de sécurité » dans SIMONE

Caractéristiques du CBTC Bord	Valeurs
Distance de recul	17 m
Précision odométrique	3%
Incertitude de vitesse sécuritaire	3%
Marge de pilotage	0.8 m/s
Marge d'arrêt	1 m
Vitesse de blocage des freins	0.2 m/s
Erreur de localisation proportionnelle à la vitesse	0.5 s/m
Erreur de localisation constante	3 m
Temps coupure traction	0.5 s
Temps sur l'erre	0.5 s
Gamma min garanti en freinage d'urgence (FU)	0.85 m/s²
Freinage de service (FS) sur domaine NExTEO	0.842 m/s²
Freinage de service (FS) hors domaine NExTEO	0.6 m/s²

Figure 52 : Paramétrage du CBTC Bord utilisé dans SIMONE

4.2.4.2 ATS

L'acteur ATS de SIMONE est en charge de :

- gérer les commandes provenant de l'interface ATS-opérateur ; ces commandes peuvent par exemple concerner une limitation temporaire de vitesse ou une interdiction d'itinéraire ;
- mettre à jour la table horaire recalculée ;
- calculer les consignes de régulation ; cette fonction peut être désactivée ;
- gérer les quais et les tiroirs ;
- transmettre les consignes aux trains en pilotage automatique ;
- commander les itinéraires ;
- commander les retournements.

Le module de supervision et la fonction de régulation, décrits au Chapitre 3, ont été intégrés à l'ATS implémenté dans l'outil SIMONE.

Les différents acteurs (ATC-Sol, ATC-Bord, et ATS) composant le système CBTC présentés dans cette partie correspondent, a priori, à des versions définitives du point de vue fonctionnel. Certains blocs fonctionnels pourraient être adaptés à l'avenir pour

correspondre aux choix de conception d'un système réel donné (les choix de conception varient d'un industriel à l'autre, ou encore d'une génération de système à l'autre).

La Figure 53 donne un exemple de paramétrage des temps caractéristiques de la simulation d'un système CBTC complet dans SIMONE. Ces temps caractéristiques définissent les temps de cycle des différents sous-systèmes et les temps de transmission / réception d'informations d'un système à l'autre.

Temps caractéristiques de simulation	Valeurs
Pas élémentaire de simulation	5 ms
Cycle de calcul de cinématique des trains	5 ms
Cycle de calcul de l'ATO (pilotage automatique)	50 ms
Cycle de calcul de l'ATC Bord	200 ms
Cycle de calcul de l'ATC Sol	360 ms
Délai de transmission des suivis issus de l'ATC Sol	1 sec
Délai de réception des états de CDV par l'ATC Sol	250 ms
Délai de réception des messages de l'ATC Bord par l'ATC Sol	75 ms
Cycle de calcul ATS	360 ms
Retard de transmission de l'ATS vers le Bord	75 ms

Figure 53 : Paramètres de simulation du CBTC dans SIMONE

4.2.5 Signalisation classique

L'outil SIMONE est un outil de simulation pour l'analyse de performance. Une analyse fine de la performance d'un système ferroviaire nécessite un modèle précis de la signalisation au regard de son impact sur les circulations. L'acteur Signalisation de SIMONE a pour périmètre fonctionnel l'établissement et la destruction des itinéraires, l'enclenchement des équipements, et l'espacement des trains par Block Automatique Lumineux. L'établissement et la destruction des itinéraires incluent le contrôle-commande des équipements.

Dans la version intermédiaire de SIMONE, le Block Automatique Lumineux n'est pas implémenté. Il le sera dans une prochaine version de l'outil (en lien avec l'acteur Agent de conduite).

Dans cette partie, nous présentons les principales caractéristiques et limites du modèle de signalisation en charge d'établir et de détruire les itinéraires. Pour des raisons de confidentialité, la description détaillée du modèle n'est pas présentée dans ce manuscrit.

La modélisation de la signalisation dans SIMONE est basée sur un ensemble de machines à états, permettant une représentation simple et lisible du fonctionnement dynamique du système, et une implémentation aisée. La définition des éléments d'une machine à états

utilisée pour construire le modèle de signalisation est représentée sur la Figure 54. La sémantique caractérisant la machine à états est précisée par la suite.

Le modèle de signalisation comporte à sa base des machines à états décrivant le comportement des équipements de signalisation. On définit une machine à états générique par type d'équipement modélisé. Chaque instance d'équipement modélisé correspond à une instance de la machine d'états correspondante. Ainsi, chaque équipement est individualisé, les temporisations associées aux transitions du diagramme peuvent être paramétrées selon ses caractéristiques dynamiques propres. De plus, le modèle de signalisation comprend des diagrammes d'états décrivant la logique d'établissement et de destruction des itinéraires. On définit une machine à états générique décrivant le comportement d'un itinéraire. Chaque itinéraire de la signalisation correspond à une instance de la machine à états décrivant le comportement d'un itinéraire. Ce choix de conception permet à la fois de décrire le comportement standard d'un itinéraire selon les différentes étapes qui permettent son établissement et sa destruction, et de paramétrer les temporisations de ses transitions selon les caractéristiques dynamiques propres de l'itinéraire modélisé. La structure du modèle de signalisation est illustrée par la Figure 55.

Dans l'outil SIMONE, les machines à états sont implémentées à l'aide d'automates paramétrables. L'évolution de ces automates est pilotée par le cœur de simulation de SIMONE, au cours des cycles de simulation. La classe *Automate_paramétrable* est définie sur la Figure 56. Les automates sont définis par un ensemble d'états et de transitions. Chaque transition est étiquetée par une condition, une action et une durée (pouvant être réduite à un cycle). Toutes les transitions d'un automate sont renseignées dans son attribut *transitions*.

La sémantique des automates est définie par les règles suivantes.

- Une transition est effectuée lorsque la condition est restée continument vraie depuis une durée définie.

- Si plusieurs transitions issues de l'état courant peuvent être déclenchées au même cycle, une seule d'entre elles sera déclenchée et il s'agira de la première transition valide.

- Au plus, une transition par cycle sera déclenchée pour un automate.

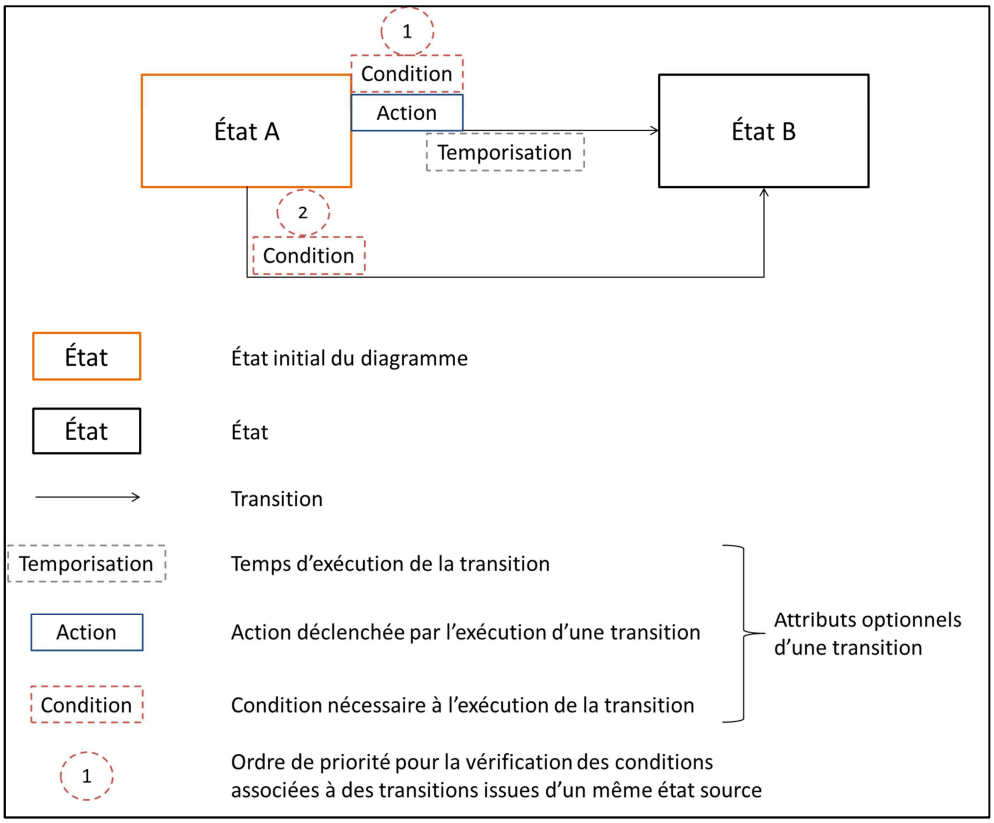

Figure 54 : Définition du diagramme d'état utilisé dans le modèle de signalisation

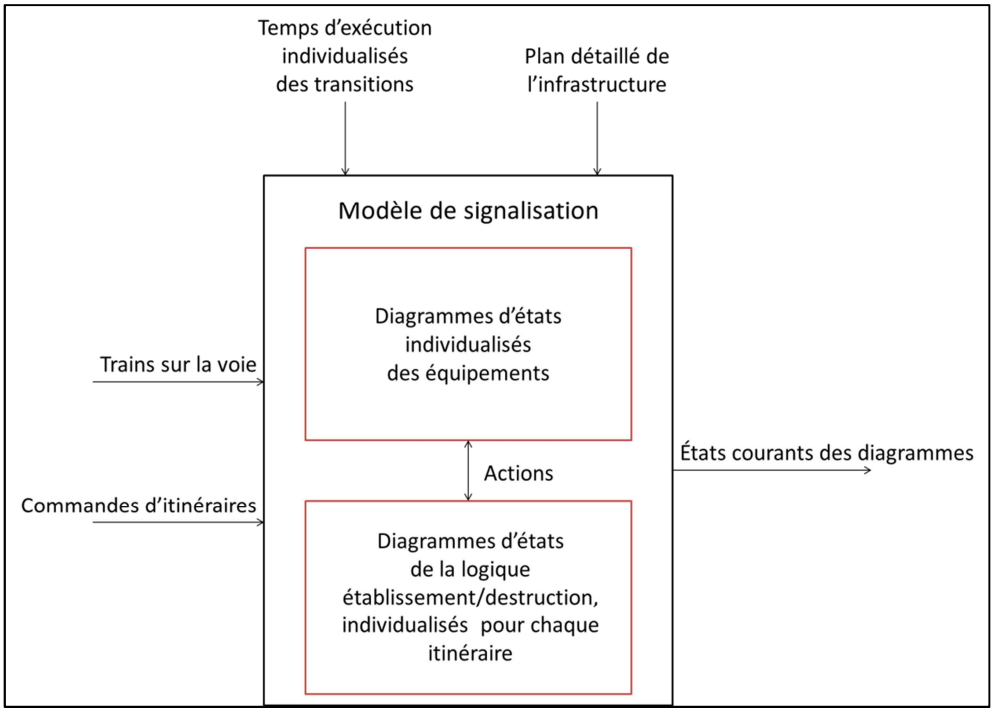

Figure 55 : Structure du modèle de signalisation de l'outil SIMONE

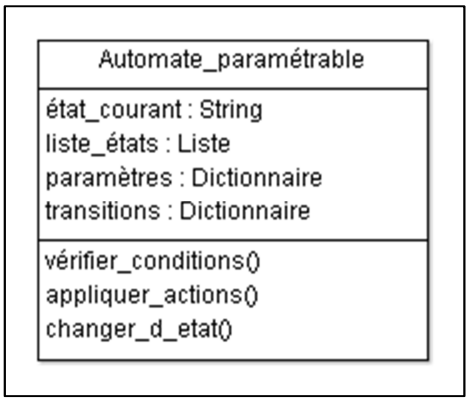

Figure 56 : Classe Automate paramétrable pour l'implémentation des diagrammes d'états

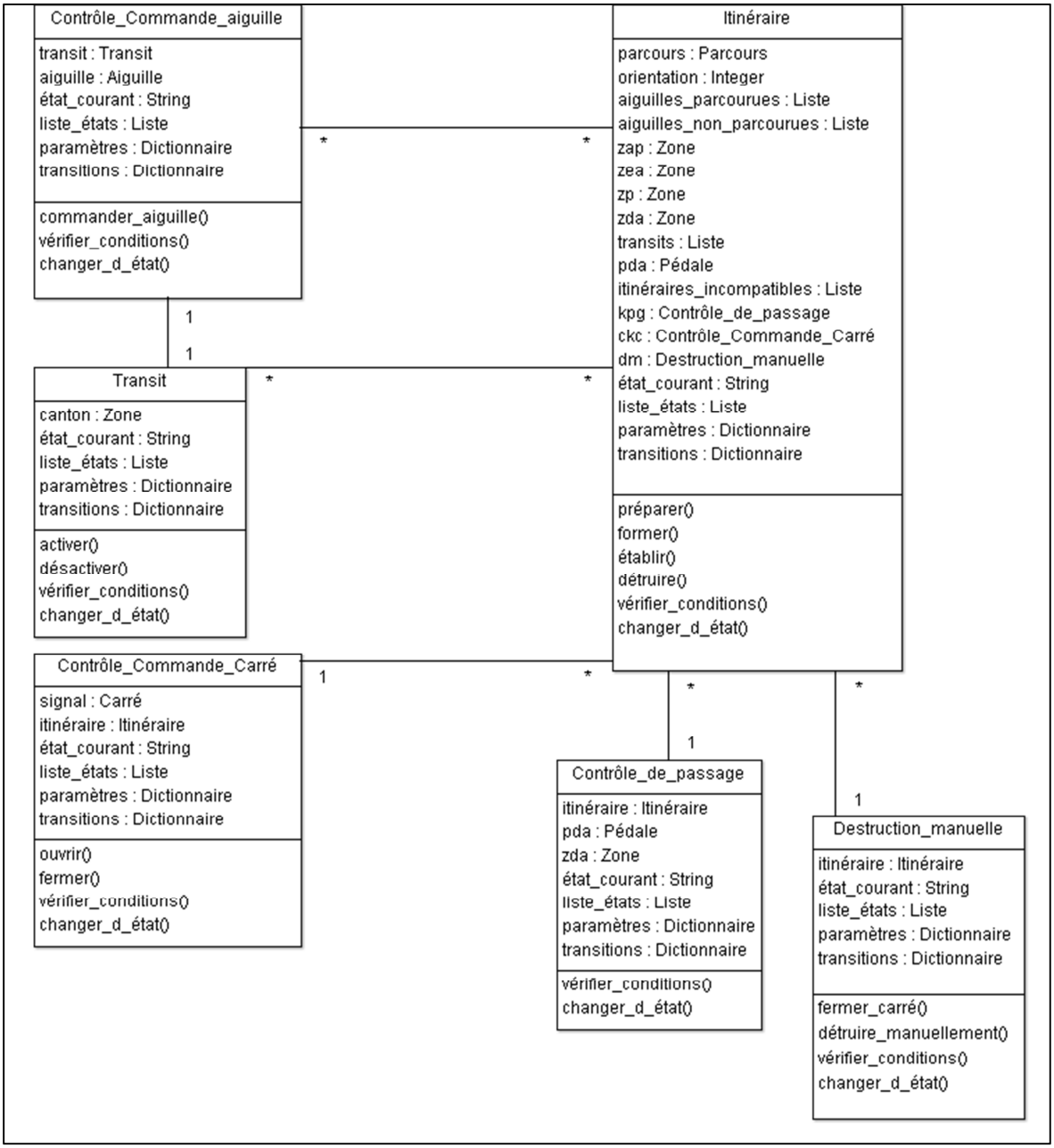

Figure 57 : Diagramme de classe simplifié du modèle de signalisation de SIMONE

Chaque type de diagramme d'état défini dans le modèle de signalisation est une sous-classe de *Automate_paramétrable*. Chaque objet de la signalisation modélisé dans SIMONE est une instance de la sous-classe correspondante. Les principales sous-classes définies dans SIMONE sont présentées sur la Figure 57. Seules les classes nécessaires à la compréhension générale du modèle sont présentées. De même, dans un souci de lisibilité, la Figure 57 ne présente pas de façon exhaustive les attributs et les méthodes des classes.

Le modèle de signalisation correspond à un acteur unique de l'outil de simulation. Il représente donc un poste de signalisation unique, relié à des équipements de signalisation standardisés sous forme d'automates. En réalité, sur une infrastructure donnée, il existe généralement plusieurs postes de signalisation, chacun est en charge d'une zone spatiale définie. Ces différents postes ont un comportement fonctionnel identique en ce qui concerne le périmètre de la modélisation pour l'outil SIMONE. Néanmoins, ces différents postes peuvent mettre en œuvre des technologies et des mécanismes différents pour exécuter leurs fonctions. Ces technologies et mécanismes divers résultent potentiellement en des temps d'exécution différents. De même, il existe plusieurs modèles d'équipements dont les temps caractéristiques peuvent varier de l'un à l'autre. La modélisation à poste unique proposée est suffisante pour reproduire le comportement fonctionnel du système de signalisation. Les variations sur les temps d'exécution, liées aux différentes technologies de poste et d'équipement, peuvent être modélisées par l'intermédiaire des temporisations associées aux transitions des diagrammes d'états. Ces temporisations sont renseignées dans l'attribut *paramètres* des automates du modèle. Un exemple de paramètrage des temporisations de la signalisation utilisé dans SIMONE est donné sur la Figure 58.

Paramètres généraux	Valeur
Cycle de calcul signalisation	250 ms
Délai de transmission suivi matériel	1 s
Paramètres du poste de signalisation (poste à relais ou poste automatique)	**Valeur**
Établissement et destruction automatique	
Temps préparation itinéraire *(à partir de l'instant où les conditions associées sont valides)*	100 ms
Temps formation itinéraire *(à partir de l'instant où les conditions associées sont valides)*	100 ms
Temps établissement itinéraire *(à partir de l'instant où les conditions associées sont valides)*	100 ms
Temps destruction itinéraire *(à partir de l'instant où les conditions associées sont valides)*	100 ms
Aiguilles et transits	
Délai avant commande d'aiguille	100 ms
Temps activation des transits	10 ms
Temps désactivation des transits	10 ms
Signaux Carré	
Temps d'ouverture carré	100 ms
Temps de fermeture carré	100 ms
Destruction manuelle	
Temps de destruction manuelle non temporisée)	100 ms
Temps de destruction manuelle temporisée	180 s
Zones	
Longueur ZAP (zone d'approche)	1000 m
Longueur ZDE (zone de déclenchement)	1000 m

Figure 58 : Paramétrage de la signalisation utilisé dans SIMONE

4.3 Simulation et validation

4.3.1 Plan de voie

Le plan de voie du tronçon central de la ligne EOLE (RER E à l'horizon 2023) a été retranscrit dans SIMONE pour instancier l'acteur Voie. Ce plan de voie (voir Figure 59 et Figure 60) s'étend sur environ 16 km, entre les gares de Nanterre-la-Folie (et ses garages) et Rosa Parks (et ses garages). Il constitue une description détaillée de l'infrastructure (y compris en gares et en tiroirs) dans le périmètre qui doit être couvert par le système CBTC NExTEO. La retranscription du plan de voie de l'infrastructure d'EOLE a notamment permis une première phase de validation de l'outil SIMONE, par comparaison des temps de parcours simulés avec des valeurs disponibles par ailleurs (mesures réelles et simulations sur d'autres outils). Cette validation préliminaire couvre le modèle de voie, le modèle de signalisation et le modèle de train.

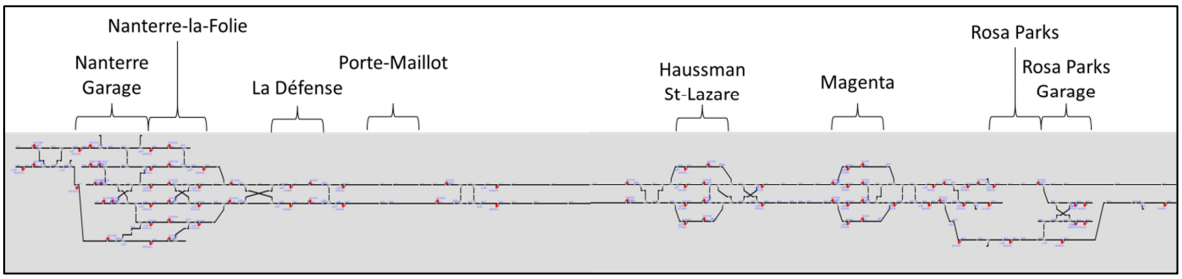

Figure 59 : Plan de voie de l'infrastructure EOLE, restreint au domaine CBTC

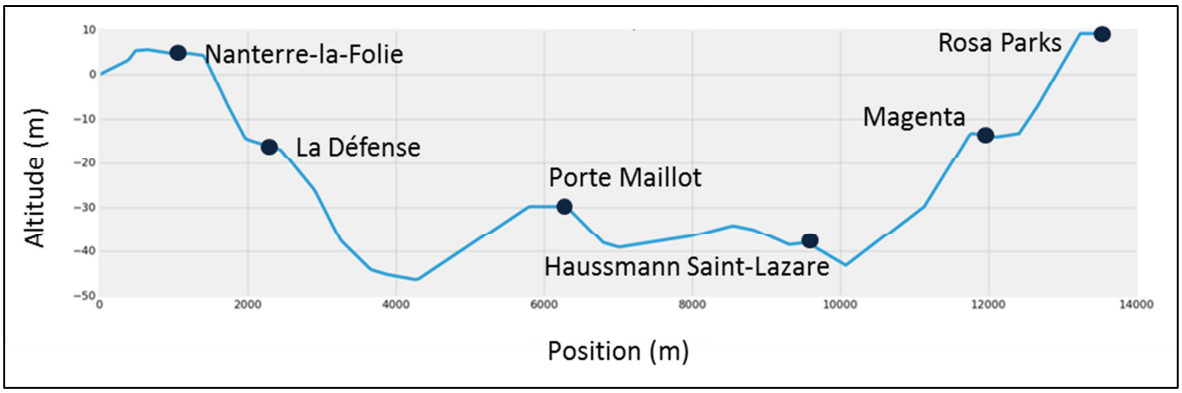

Figure 60 : Profil d'altitude de l'infrastructure EOLE dans le domaine CBTC

4.3.2 IHM

L'IHM de SIMONE permet de visualiser le Tableau de Contrôle Optique (TCO). Il est composé d'un panneau représentant la voie (en particulier les CdV, aiguilles et signaux). Les trains sont représentés avec leurs positions réelles. Pour les trains équipés du CBTC, leurs positions (arrière et avant externes), vitesses et points à protéger calculés par le système sont également représentés. L'IHM permet également d'afficher l'évolution des variables des objets de la simulation.

4.3.3 Scénarios

L'utilisation de l'outil SIMONE s'effectue par l'intermédiaire d'un scénario. Ce scénario contient toutes les informations nécessaires à une simulation : la description de l'infrastructure, les configurations des acteurs (signalisation, voie, matériels roulants, ATC des trains, ATS), et le plan de transport de référence. Le simulateur SIMONE charge le scénario, instancie et configure les acteurs nécessaires, puis simule leurs interactions jusqu'à un temps donné.

Dans la version courante de SIMONE, l'ensemble des scénarios intègre le plan de voie du tronçon central de la ligne EOLE. La configuration des autres acteurs est effectuée à partir de données standard des systèmes existants. Le plan de transport de référence inclut :

- les matériels roulants disponibles ;
- les sillons à opérer (listes de points remarquables et horaires de référence);
- le roulement (attribution de sillons aux matériels roulants) ;
- un système de pondération des quais en fonction de leur occupation ;
- pour chaque sillon, un système de pondération des quais représentant les règles d'exploitation auxquelles il est associé ;
- les points d'arrêt d'exploitation possibles dans chaque gare et chaque tiroir.

4.3.4 Injection de perturbation

Un système ferroviaire est soumis à des variations nombreuses et inévitables des temps de stationnement et des temps de parcours, vis-à-vis des temps de référence. Ces variations sont dues à des facteurs internes (conduite du train, performances du matériel, pannes, restrictions temporaires…) et externes (voyageurs, météo, végétation…) aux systèmes. Certains de ces facteurs sont liés à des évènements extraordinaires (par exemple un défaut d'isolement sur un circuit de voie), d'autres relèvent de phénomènes quotidiens. L'outil SIMONE permet l'injection de perturbations de types ordinaire et extraordinaire dans les scénarios simulés.

En zone dense, les principaux phénomènes quotidiens à l'origine des déviations sont la dispersion des comportements de conduite, et l'échange voyageurs. La maîtrise de ces phénomènes constitue une clé certaine pour l'amélioration de la performance d'une ligne (Hansen et Pachl 2008). La dispersion des comportements de conduite induit des déviations négatives ou positives des dates d'arrivée des circulations. Pour les trains équipés CBTC, le pilotage automatique permet d'éviter toute dispersion lors de l'application des consignes de conduite. L'outil SIMONE doit permettre de simuler, à terme, la circulation de trains en pilotage automatique et de trains en pilotage manuel. Lors de l'implémentation de la conduite manuelle dans les futures versions de l'outil, la dispersion des comportements face aux consignes devra être prise en compte dans le modèle. L'échange voyageur induit des déviations positives des dates de départ des circulations. Ces déviations sont notamment liées aux facteurs suivants : caractéristiques des véhicules, caractéristiques des quais, densité de voyageurs sur le quai, comportements des voyageurs (Elleuch, et al. 2017). La déviation positive induite par l'échange-voyageur dans une gare peut être définie par une

loi de probabilité de variables aléatoires positives. La distribution choisie peut prendre en compte les différents facteurs d'influence cités précédemment. Idéalement, le modèle de distribution devrait être construit et validé grâce à des données statistiques mesurées lors de l'exploitation. Dans la littérature, différentes approches ont été formulées pour construire des modèles de déviations aléatoires (notamment à partir de distributions log-normal, gamma ou encore Weibull) ; un état de l'art synthétique est proposé dans (Hansen et Pachl 2008). Dans la version actuelle de l'outil SIMONE, les déviations des temps de stationnement sont générées aléatoirement par des distributions log-normal et gamma. Ces distributions ne dépendent pas des facteurs d'influence précédemment décrits. Dans la version actuelle, elles sont simplement construites à partir du réglage de leurs paramètres caractéristiques pour obtenir des valeurs jugées réalistes.

Dans l'outil SIMONE, la modélisation du système ferroviaire respecte l'architecture du système réel. Ce choix de conception permet notamment d'injecter des perturbations de différentes natures et réalistes. Une perturbation peut s'appliquer sur une circulation ou sur l'infrastructure, par l'intermédiaire des actions suivantes :

- une restriction de vitesse sur la voie : cette action permet notamment de modéliser une zone de travaux ou une zone subissant une limitation temporaire ;

- une modification de la marche effectivement appliquée par le train vis-à-vis de la marche consigne (train en pilotage automatique) ou de la marche théorique (train en pilotage manuel) : cette action peut permettre de modéliser un niveau de performance dégradé du matériel roulant ou une conduite dégradée ;

- une modification du temps de stationnement effectivement appliqué par le train vis-à-vis du temps de stationnement consigne : cette action permet de modéliser un sur-stationnement à quai (lié à l'échange-voyageur ou à tout autre aléa d'exploitation) ou une panne de matériel roulant ;

- un blocage d'un automate dans un état donné : cette action permet de modéliser une panne de signalisation ;

- une modification des paramètres d'un automate (par exemple, d'un temps caractéristique) : cette action permet de modéliser un comportement dégradé d'un équipement de l'infrastructure.

L'injection de perturbations dans SIMONE est effectuée à l'aide de déclencheurs temporels ou conditionnels intervenant lors du jeu du scénario.

4.3.5 Exemples

La Figure 61 présente, de haut en bas, la vitesse, l'altitude et le « bilan d'énergie » d'un train en fonction de sa position sur un parcours allant de Nanterre-tiroirs à Rosa Parks. Ces données sont issues d'une simulation sur l'outil SIMONE. Sur le graphe vitesse-position, la courbe rouge représente les limitations de vitesse le long de la voie, la courbe orange représente le profil de vitesse sécuritaire (servant de référence au contrôle de vitesse KCV de l'ATC Bord), et la courbe bleue correspond au profil de vitesse réel du train (issu des équations cinématiques du mobile).

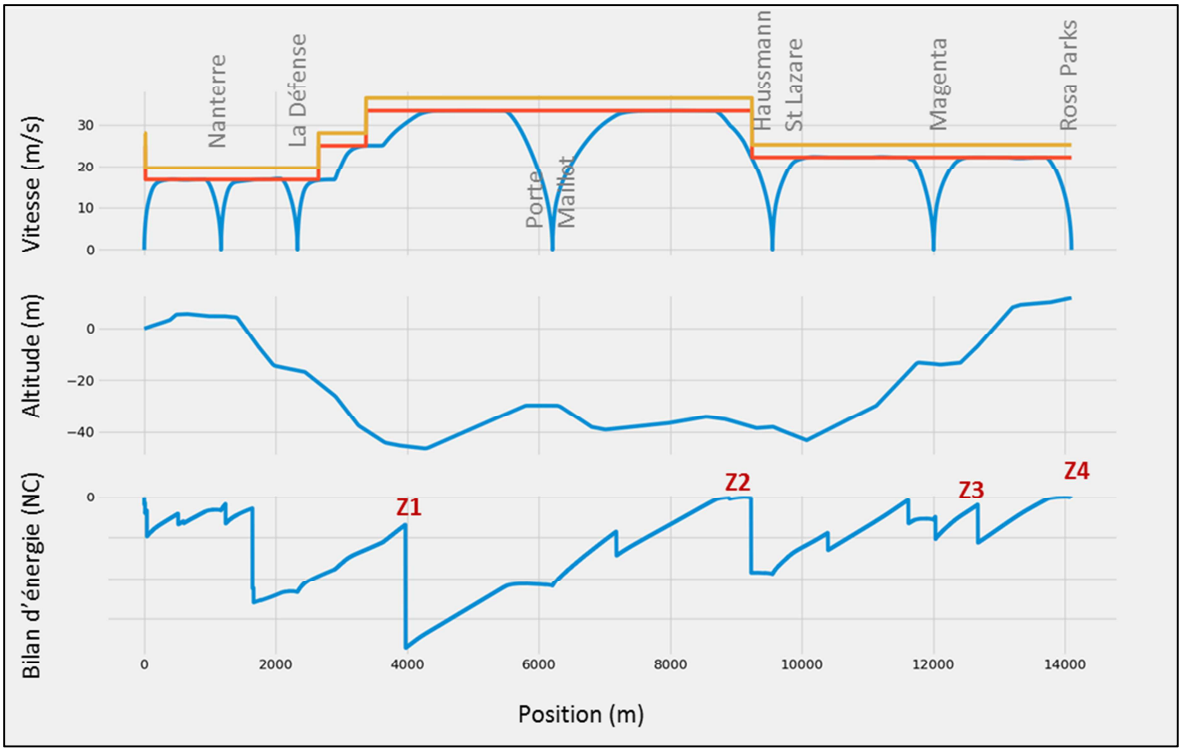

Figure 61 : Vitesse, altitude et bilan d'énergie d'un train sur le domaine CBTC d'EOLE simulé avec SIMONE

Concernant le bilan d'énergie, l'échelle, l'unité et l'expression du bilan sont volontairement non-communiquées (NC). Le graphe du bilan d'énergie constitue une illustration d'une méthode permettant à un automatisme de conduite de déterminer la capacité ou l'incapacité d'un train à respecter l'enveloppe de sécurité qui lui est associée. Le bilan d'énergie est utilisé au niveau du contrôle de vitesse (KCV) de l'ATC-Bord. Lorsque l'incapacité d'un train à s'arrêter avant un point à protéger par l'intermédiaire du freinage de service est détectée, l'ATC-Bord déclenche un freinage d'urgence capable de mettre en œuvre une décélération plus importante. Pour déterminer la capacité d'un train à respecter son enveloppe de sécurité, le bilan d'énergie prend en compte les énergies potentielle et cinétique du train, le travail fourni par la traction, ainsi que les capacités de freinage du train (c'est-à-dire le travail que les systèmes de freinage sont en mesure de fournir). Sur la

Figure 61, le bilan d'énergie doit être interprété ainsi : lorsque le bilan d'énergie devient positif, la capacité de freinage du train devient insuffisante pour respecter le point de contrainte considéré par le l'ATC-Bord (signal, train aval, limitation de vitesse…) ; le contrôle de vitesse (KCV) déclenche donc le freinage d'urgence. Il est à noter que les dessertes des gares sont associées à des points d'arrêts d'exploitation, non sécuritaires. La desserte d'une gare n'a donc pas d'influence sur l'enveloppe sécuritaire du train. En d'autres termes, le contrôle de vitesse KCV ne considère pas les points d'arrêt d'exploitation comme des points de contraintes sécuritaires.

Sur le graphe bilan d'énergie-position, l'indication Z1 pointe une variation brutale du bilan d'énergie qui s'éloigne du seuil 0. Cela correspond à l'ouverture du signal en aval du train, qui constituait jusque-là le point de contrainte considéré par l'ATC Bord. Le point à protéger est immédiatement propagé sur la voie jusqu'au prochain point de contrainte à respecter (prochain signal non ouvert, train, limitation de vitesse…). L'indication Z3 correspond, elle aussi, à une ouverture du signal aval au train, à un instant où le bilan d'énergie du train approchait le seuil critique.

L'indication Z2 pointe une phase de freinage du train afin de respecter son point à protéger. Le bilan d'énergie approche du seuil critique selon une courbe tangente, sans le dépasser. Le freinage d'urgence n'est ainsi pas déclenché. Cette phase de freinage traduit la performance de l'asservissement en vitesse du train. La capacité de l'asservissement à approcher le seuil critique sans le dépasser impacte la performance globale de la ligne de transport.

L'indication Z4 pointe la phase d'approche de la gare Rosa Parks par le train. Ce freinage est à la fois exécuté pour respecter le point d'arrêt d'exploitation, et pour respecter le point de contrainte (ici le signal fermé en sortie de quai). Ce dernier constitue le point à protéger considéré par le CBTC Bord, il constitue donc la contrainte sécuritaire considérée par le contrôle de vitesse. Le bilan d'énergie s'en trouve impacté.

La Figure 62 présente un diagramme espace-temps sur lequel les positions de deux trains, simulées dans SIMONE, sont représentées. Les positions des extrémités sécuritaires d'un train correspondent aux positions effectivement considérées par les fonctions sécuritaires qui interviennent dans le pilotage automatique du train. C'est à partir de cette information que seront appliquées les différentes marges intervenant dans les fonctions de pilotage. Les extrémités sécuritaires sont en écart avec les extrémités physiques d'un train en raison de l'erreur de localisation commise par le CBTC. Cette erreur est souvent caractérisée par une composante constante et une composante proportionnelle à la vitesse du train. On constate ainsi sur la figure que l'amplitude de l'erreur de localisation varie le long du parcours du train.

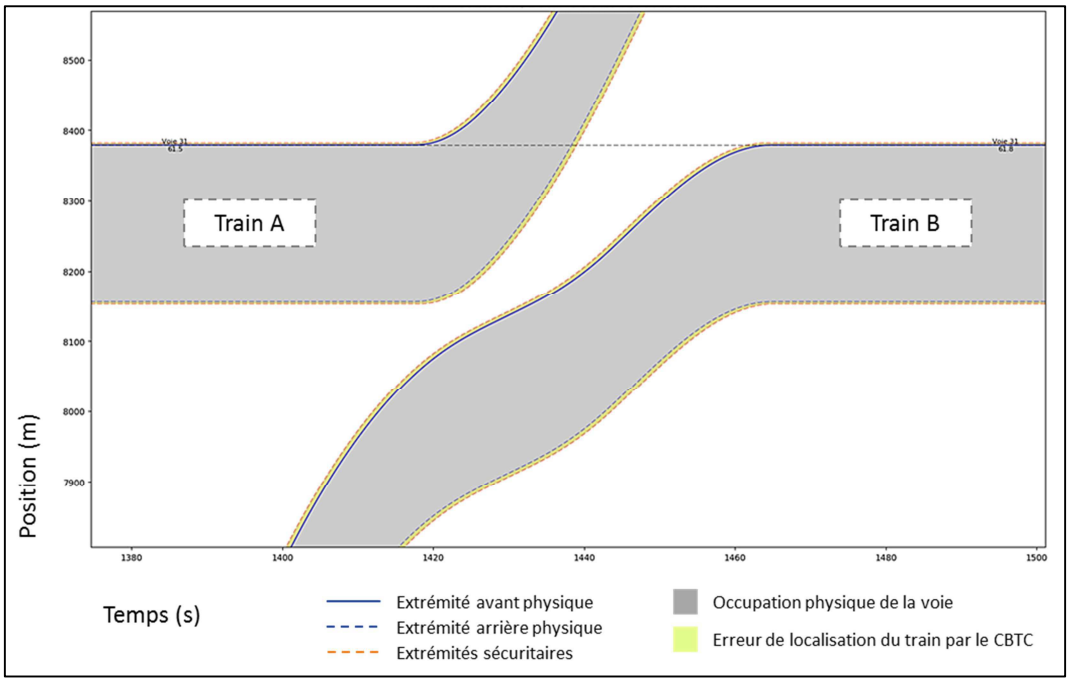

Figure 62 : Positions des trains et occupation de la voie dans SIMONE

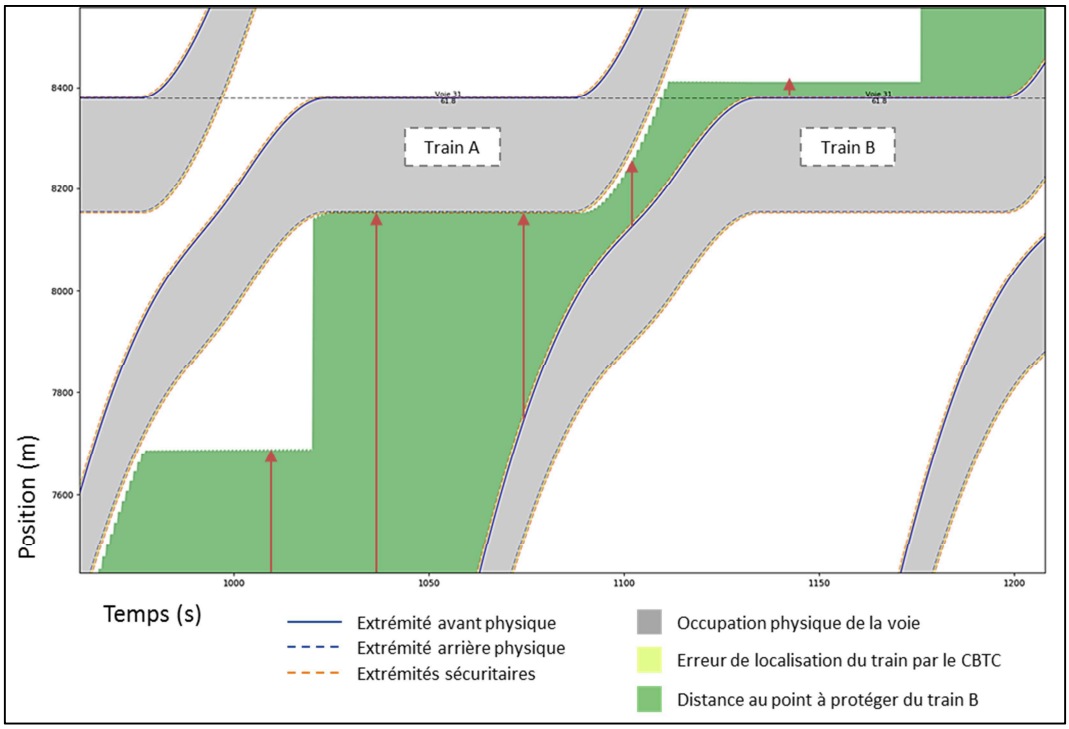

Figure 63 : Distance au point à protéger dans SIMONE

La distance du point à protéger est la distance qui sépare l'avant sécuritaire du train et le prochain point de contrainte sécuritaire à vitesse nulle. Le point à protéger correspond à l'arrière du train aval ou à un signal ordonnant un arrêt du train. La distance au point à protéger est représentée sur la Figure 63, pour un train B suivant un train A, évoluant dans l'outil de simulation SIMONE. Lorsque le train suivi est en mouvement, les dents de scie

font apparaitre le délai, intrinsèque au système CBTC, entre la création d'une cible et sa prise en compte par les fonctions sécuritaires du CBTC Bord.

Les différents exemples de simulation présentés dans cette partie permettent de visualiser l'impact de la signalisation ferroviaire classique et du pilotage automatique exécuté par le CBTC sur le parcours des trains. Ces exemples permettent également d'illustrer le niveau de modélisation microscopique caractérisant le simulateur SIMONE.

4.4 Conclusion

SIMONE est un outil de simulation développé au sein de l'équipe SNCF encadrant les travaux de thèse. Ce simulateur vise à simuler une exploitation ferroviaire intégrant un système de signalisation classique et/ou un système de signalisation CBTC. La simulation se veut réaliste du point de vue du comportement fonctionnel et dynamique du système. L'outil est conçu selon une structure multi-agent composée, entre autres, des acteurs Voie, Train, Agent de conduite, Signalisation et CBTC.

Le développement de l'outil SIMONE a été étroitement lié aux travaux de thèse. La participation aux différentes phases de conception du simulateur a apporté une vision « système » bénéfique pour la compréhension des enjeux de performance et de robustesse du trafic ferroviaire. Elle a abouti à l'intégration dans le simulateur de la stratégie de régulation développée au Chapitre 3.

Chapitre 5

Cas d'étude : évaluation de performance sur le périmètre NExTEO

Le système NExTEO constitue une des premières applications du système CBTC à une ligne ferroviaire (non métro) dans le monde. Le système CBTC NExTEO doit équiper le tronçon central de la ligne suburbaine Eole (actuel RER E). Ce tronçon central constitue le cadre d'application des travaux présentés.

Les simulations ont été réalisées sous Python 3.6. La machine utilisée a les caractéristiques suivantes :

- Processeur Intel® Core™ i7-6820HQ CPU, 2.70GHz ;
- RAM 8Go ;
- Système d'exploitation 64 bits.

5.1 Système simulé

5.1.1 Topologie

Le périmètre considéré dans les travaux de thèse correspond à la zone couverte par le système CBTC (environ 16 km), s'étendant de Nanterre-la-Folie à Rosa Parks, et incluant

également les garages dans lesquels les trains effectuent leur retournement (changement de cabine active). Le périmètre d'étude a été retranscrit dans l'outil de simulation SIMONE à partir de plans de voie réels fournis par SNCF. Une partie de ces plans de voie correspond à des plans prévisionnels d'infrastructure non-existante. Le périmètre modélisé comporte 192 circuits de voie, 83 aiguillages et 176 itinéraires, permettant aux circulations de traverser 6 gares comportant au total 20 quais et 6 tiroirs. Le graphe topologique modélisant cette infrastructure est composé de 465 arcs.

5.1.2 Plan de transport

Contrairement à la topologie de l'infrastructure, les plans de transport simulés ne sont pas issus de données réelles, le système NExTEO n'étant pas exploité à l'heure actuelle. Les plans de transports à simuler ont été définis selon les principaux objectifs d'exploitation prévus pour le futur système. Ils incluent la mission des circulations (points remarquables et dessertes prévues), et l'allocation du matériel roulant aux missions, en accord avec une exploitation en doigts de la main. Ils incluent également les temps de stationnement théorique ainsi que les pondérations pour le choix des itinéraires et le choix des quais/tiroirs. A partir de ces données structurantes, les horaires du plan de transport de référence sont calculés par simulation. Les trains sont espacés d'un intervalle initial d'environ 110s (tel que le prévoit le projet NExTEO) sur le tronçon central.

5.1.3 Perturbations

Les travaux présentés s'appliquent à des perturbations primaires d'ampleur limitée entrainant le retard de circulations au cours de leurs missions. Les perturbations secondaires, conséquences de la propagation d'une perturbation primaire sur le réseau, peuvent aboutir à une forte dégradation de la qualité de service. Les travaux présentés ne s'appliquent pas à des perturbations majeures entrainant une interruption partielle ou complète du service (par exemple, un quai ou une voie indisponible).

Dans les scénarios simulés, une perturbation est modélisée par le sur-stationnement d'un train à quai (dans une gare desservie). Son ampleur peut aller de quelques secondes à quelques minutes.

Une prédiction de la perturbation est formulée à partir d'une distribution normale et de la valeur effective du sur-stationnement. Cette prédiction peut être fournie ou non à la fonction de supervision, selon le paramétrage du simulateur.

5.1.4 Fonctions de régulation

Dans ce chapitre, deux types de régulation sont mis en œuvre et comparés :

- la régulation individuelle ;
- la régulation globale par optimisation multi-objectif présentée au Chapitre 3.

Pour chacune de ces méthodes de régulation, trois configurations de régulation sont définies selon les leviers de régulation :

- régulation des marches-types seulement ;
- régulation des temps de stationnement seulement ;
- régulation des marches-types et des temps de stationnement.

La régulation individuelle adapte la marche ou le stationnement de chaque train en fonction de son objectif de ponctualité. La consigne de stationnement en gare est déterminée à l'arrivée du train dans cette gare. La consigne de marche entre deux stations est déterminée lorsque le train démarre de la première station.

La régulation globale calcule les consignes de régulation des trains à intervalles réguliers grâce une à méthode d'optimisation multi-objectif. L'intervalle entre deux calculs est ici appelé pas de régulation. L'horizon sur lequel sont calculées les consignes de régulation est appelé horizon de commande.

5.1.5 Paramétrage

Dans ce paragraphe, le paramétrage utilisé pour les différentes simulations présentées dans la suite est décrit.

Pour la régulation des marches-types, on définit cinq types représentant les marches applicables par les modules ATC au bord de trains. Chaque marche-type correspond à un coefficient appliqué à la vitesse maximale du matériel pour obtenir la vitesse cible correspondante (sous contraintes de la signalisation). Les marches-types définies dans cette étude sont :

- la marche nominale (0.9);
- la marche tendue (0.95) ;
- la marche très tendue (1) ;

- la marche relâchée (0.8) ;
- la marche très relâchée (0.6).

Le temps de stationnement minimal est fixé à 20 secondes.

L'algorithme génétique utilisé pour l'optimisation multi-objectif des consignes de régulation est paramétré selon des valeurs standards :

- temps de calcul maximal (conditionnant le nombre de génération) : 5 secondes;
- nombre maximal de génération : 100 ;
- nombre d'individus par génération : 40 ;
- probabilité de croisement : 80 % ;
- probabilité de mutation : 8 % ;
- poids attribué à l'indicateur de ponctualité : 3 ;
- poids attribué à l'indicateur d'intervalle : 1 ;

Il est à noter que les poids attribués aux indicateurs interviennent uniquement dans le choix final d'une solution parmi les meilleurs individus au sens de Pareto proposés par le processus d'optimisation ayant atteint sa dernière génération.

La commande prédictive est caractérisée par son horizon de prédiction et son horizon de commande. L'horizon de prédiction couvre tout le parcours du train dans la zone CBTC. Pour chaque circulation, il comprend donc toutes les étapes à venir jusqu'à la fin de la zone de régulation. Le parcours des circulations étant composé de 6 étapes minimum (6 gares et potentiellement des étapes en tiroir en cas de retournement), la taille de l'horizon de prédiction de chaque circulation est au maximum de 6 étapes. Cet horizon est amené à diminuer au fur et à mesure du parcours du train puisqu'il est conditionné par le nombre d'étapes restantes.

L'horizon de commande comprend, pour chaque circulation, les étapes du parcours sur lesquelles on formule une consigne de régulation. La taille de l'horizon de commande est inférieure ou égale à celle de l'horizon de prédiction. Dans les simulations présentées dans la suite, la taille de l'horizon de commande est comprise entre 1 et 3. Tout comme pour l'horizon de prédiction, la taille de l'horizon de commande peut être amenée à diminuer au fur et à mesure du parcours du train.

Contrairement à la régulation individuelle qui est évènementielle, la régulation par commande prédictive est déclenchée cycliquement. Le pas de régulation est ici fixé à 30 secondes.

5.2 Evaluation de la régulation

5.2.1 Performance face à des perturbations ordinaires

Dans cette partie, on cherche à évaluer la capacité de la régulation à résoudre une situation perturbée dans laquelle les objectifs de ponctualité et de régularité deviennent incompatibles. On définit des scénarios dans lesquels une circulation sur-stationne à quai, provoquant ainsi des retards sur plusieurs circulations.

5.2.1.1 Scénarios de perturbation

On considère 4 trains matériels alloués chacun à 2 circulations (d'abord en sens Ouest-Est, puis en sens Est-Ouest après retournement). Chaque circulation est identifiée par un index. Dans un souci de simplicité, on considère que les index des circulations (c'est-à-dire les numéros attribués aux circulations) Ouest-Est sont impairs (ici index 51, 53, 55, 57 respectivement alloués aux trains A, B, C, D) et que les index des circulations Est-Ouest sont pairs (ici index 52, 54, 56, 58 respectivement alloués aux trains A, B, C, D). Le changement d'index s'effectue lors du retournement, c'est à dire lors du changement de cabine active (voir Figure 64). Ce système de parité ne correspond pas au système effectivement appliqué par SNCF.

Les 4 trains A, B, C, D, constituent le groupe de train sur lequel la régulation va être exécutée en cas de perturbation. Les scénarios de perturbation, applicables à différentes grilles horaires, décrivent les situations suivantes.

- Dans le scénario A, la circulation 51 sur-stationne à La Défense. Le temps de sur-stationnement est de 60 secondes, 120 secondes ou 180 secondes selon la version du scénario (les versions sont respectivement nommées A_60, A_120, A_180). Ce sur-stationnement entraine un retard de toutes les circulations incluses dans le scénario. Le diagramme espace-temps du scénario A_60 est présenté sur la Figure 64. On peut remarquer que la zone de retournement (tiroirs de Rosa Parks) constitue une zone critique, un « goulet d'étranglement » au niveau duquel le débit maximal est plus faible que sur le reste de la ligne. En sortie de la zone de retournement, l'intervalle entre les circulations est plus important, ce qui a pour conséquence de répercuter les retards des trains en aval sur les trains suiveurs qui restaient faiblement impactés jusqu'à la zone de

retournement. La Figure 65 représente le diagramme espace-temps des scénarios A_60, A_120 et A_180 superposés.

- Dans le scénario B, la circulation 53 sur-stationne à Haussmann Saint-Lazare. Le temps de sur-stationnement est de 60 secondes, 120 secondes ou 180 secondes selon la version du scénario (les versions sont respectivement nommées B_60, B_120, B_180). Ce sur-stationnement entraine le retard de la circulation 53 et des circulations suivantes (55, 57). Il entraine aussi une augmentation importante de l'intervalle entre la circulation 53 et la circulation aval 51. Ces conséquences se répercutent sur les missions allouées au matériel, après retournement des trains en tiroirs. La Figure 66 représente le diagramme espace-temps du scénario B_60 vis-à-vis des marches de référence. La Figure 67 représente le diagramme espace-temps des scénarios B_60, B_120 et B_180 superposés.

Les figures qui suivent consistent en des diagrammes espace-temps pour lesquels l'axe des abscisses représente la dimension spatiale et l'axe des ordonnées représente la dimension temporelle. Ces figures retracent donc le mouvement des trains sur la voie. La dimension spatiale correspond ici à l'avancement du train (grandeur croissante), et non à sa localisation. Ainsi lorsqu'un train est alloué à plusieurs missions (portant chacune un index dédié) entre lesquelles il doit réaliser un retournement, la dimension spatiale représente les allers-retours sur un linéaire « déplié ». Une même gare peut correspondre à plusieurs points le long de l'axe.

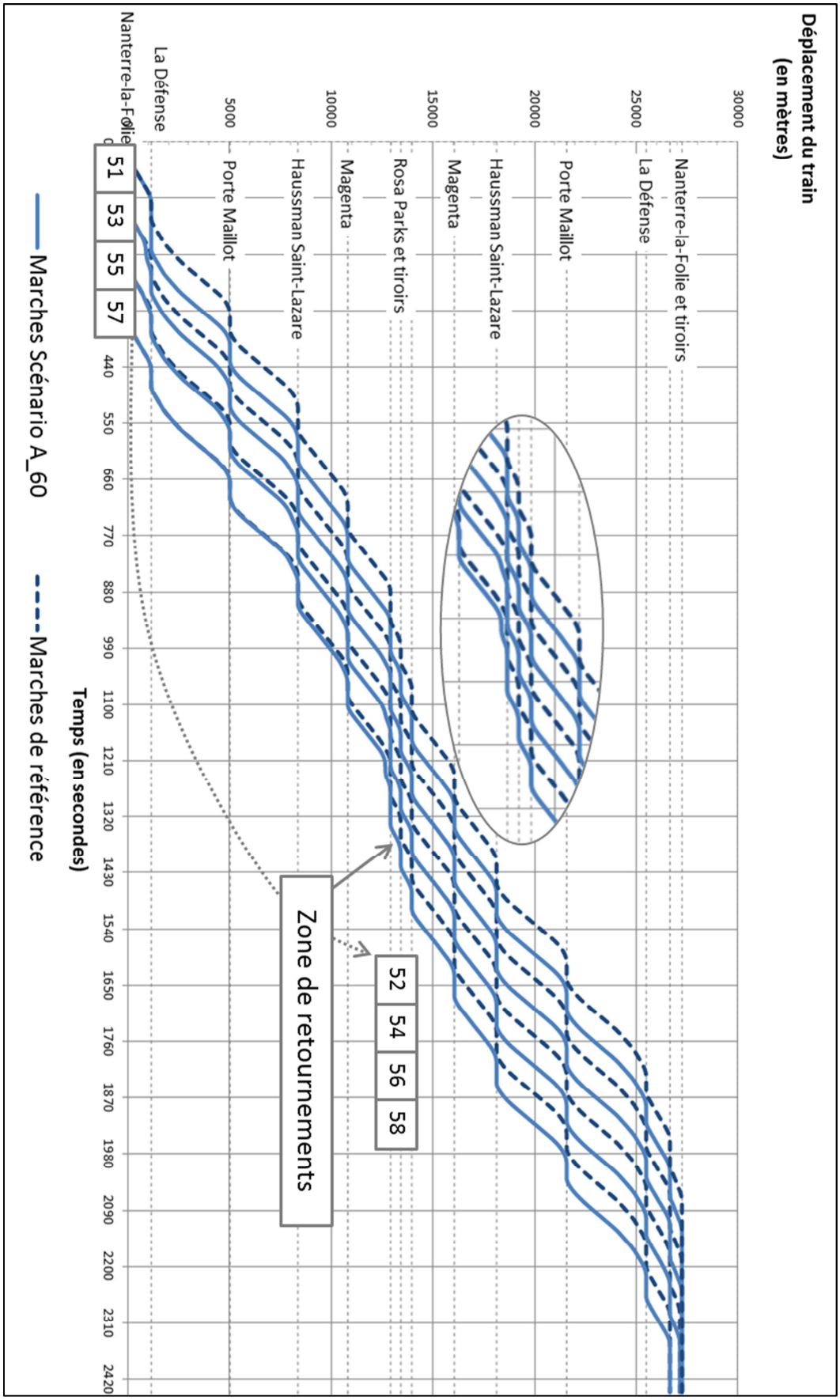

Figure 64 : Diagramme espace-temps du scénario A_60 vis-à-vis des marches de référence

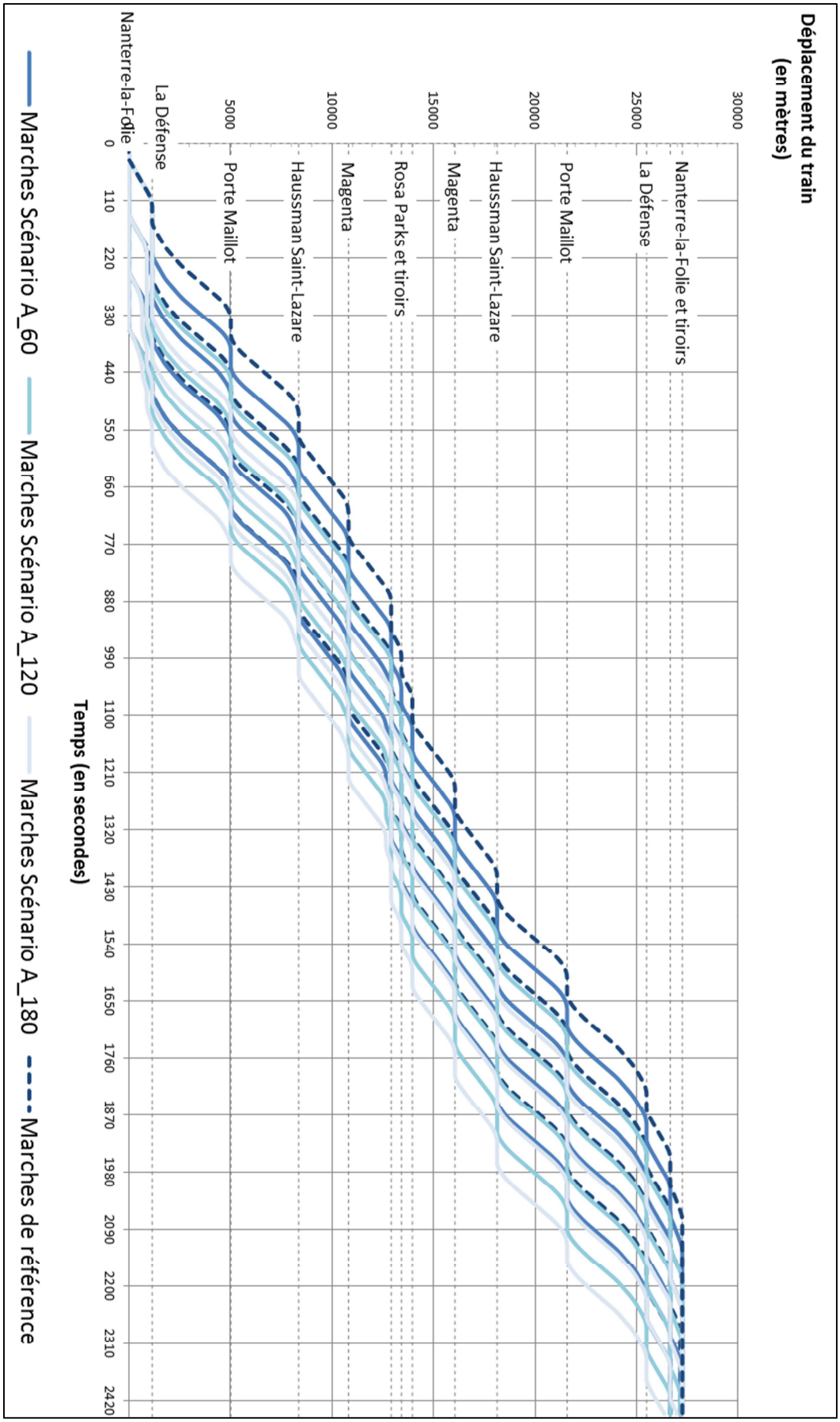

Figure 65 : Diagramme espace-temps des scénarios A_60, A_120 et A_180

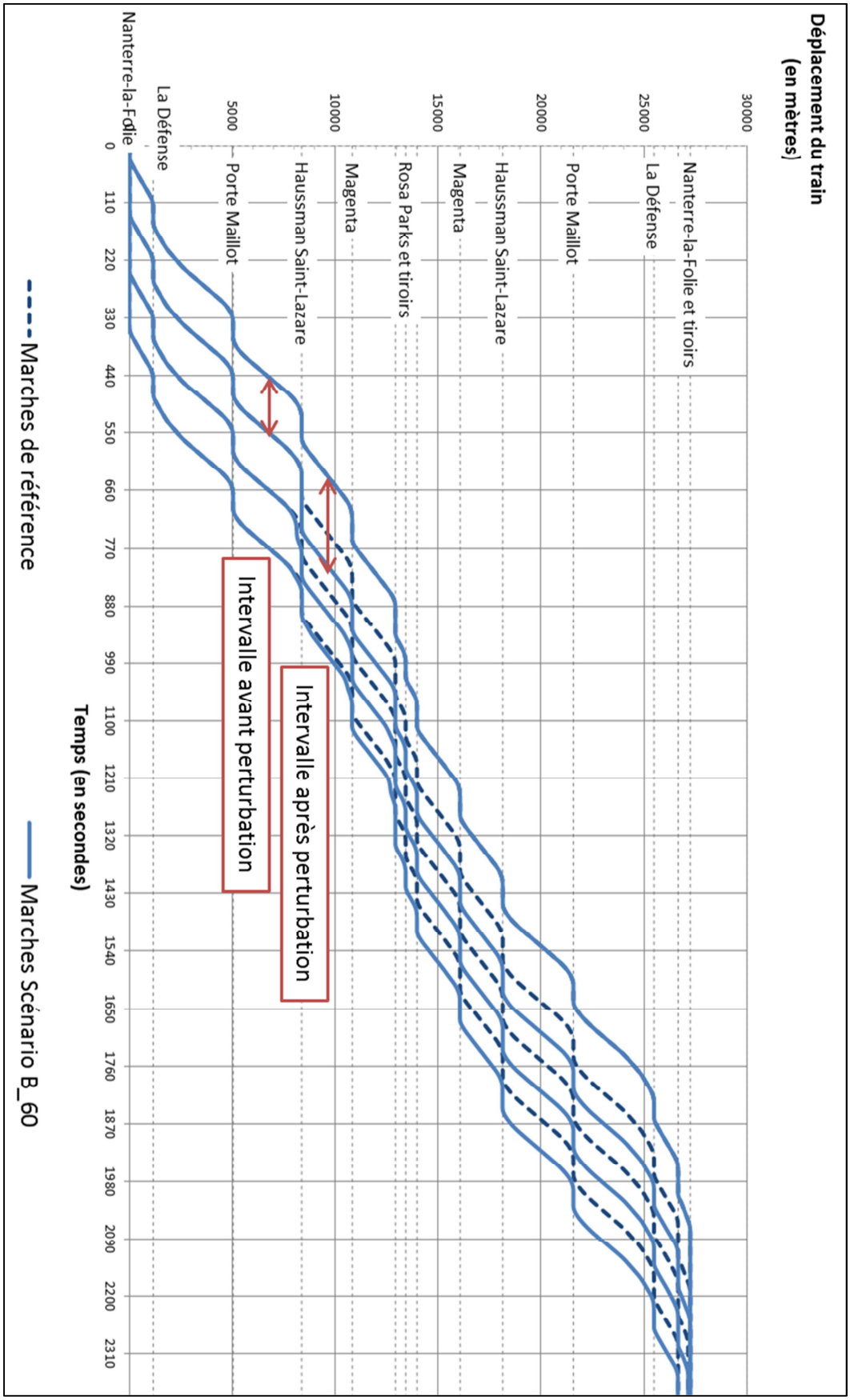

Figure 66 : Diagramme espace-temps du scénario B_60 vis-à-vis des marches de référence

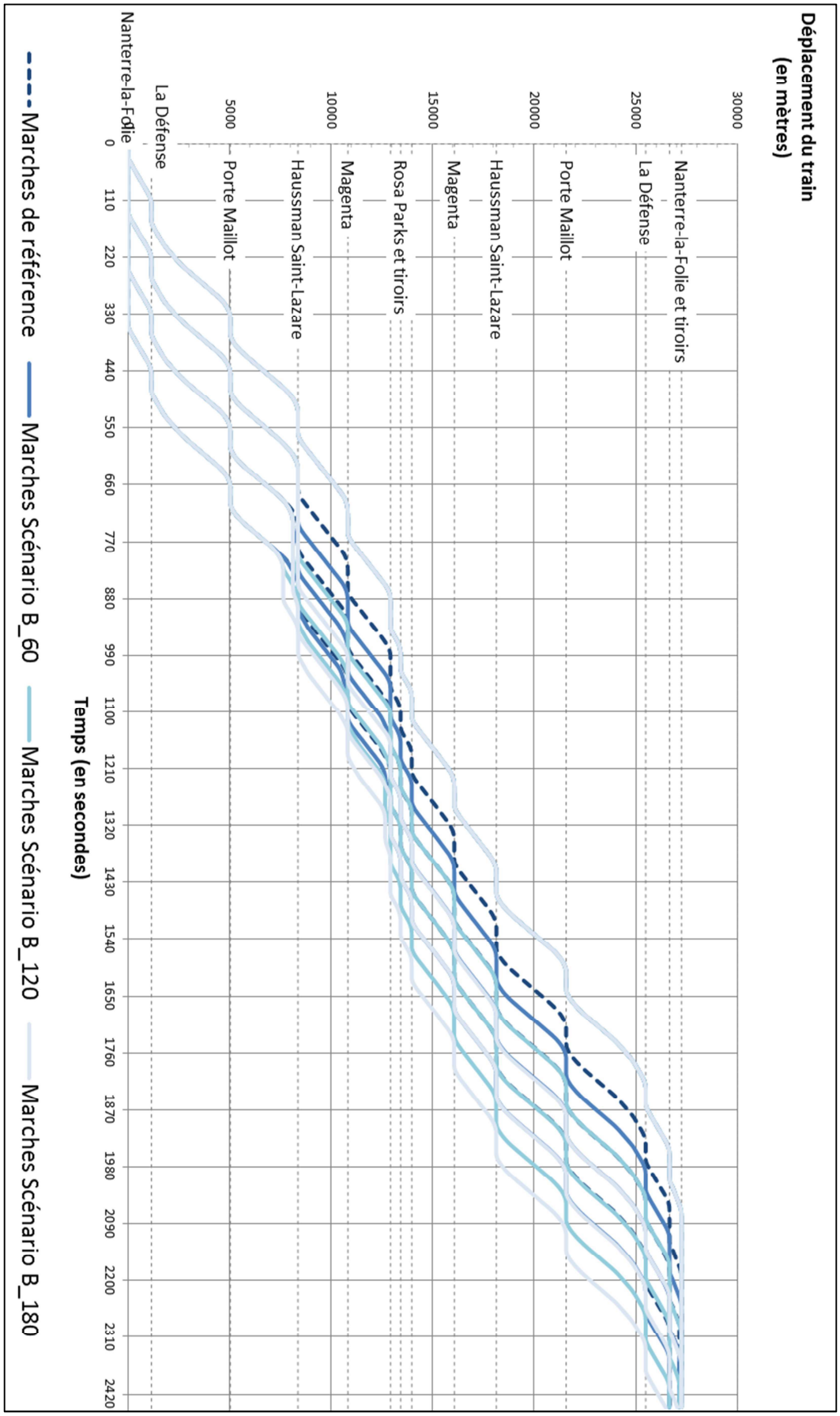

Figure 67 : Diagramme espace-temps des scénarios B_60, B_120 et B_180

Les scénarios présentés comportent 4 trains matériels pour lesquels des consignes doivent être formulées sur chacun de leurs horizons de commande. Lorsque deux leviers de régulation sont activés (modification des marches et des temps de stationnement), le nombre de variables de décision du problème correspond à la somme des horizons de commande de chacun des leviers, multipliée par le nombre de trains. Ainsi, pour un horizon de commande égale à 2 pour les marches et égal à 2 pour les stationnements, le problème de régulation comportera au plus 4 variables de décision par train, c'est-à-dire au plus 16 variables de décision au total.

5.2.1.2 Evaluation

La performance des différentes méthodes de régulation est évaluée selon l'amélioration des indicateurs de ponctualité vis-à-vis du même scénario sans régulation. Dans la formulation du problème de régulation proposée au Chapitre 3, on cherche à minimiser les indicateurs de ponctualité I^P et de régularité de l'intervalleI^I. De façon plus générale, lorsqu'on souhaite exprimer l'amélioration par une méthode de régulation r d'un indicateur I à minimiser, on peut exprimer cette amélioration par :

$$A(I_r) = 1 - \frac{I_r}{I_0} \qquad (5.1)$$

où :

- I_r est la valeur de l'indicateur I lorsqu'on applique la régulation r ;
- I_0 est la valeur de l'indicateur Iservant de référence à la comparaison. Cette valeur peut par exemple représenter la valeur de l'indicateur lorsque la perturbation a lieu mais qu'aucune régulation n'est appliquée.

Dans la suite, l'amélioration des indicateurs est exprimée en pourcentage pour une meilleure lisibilité. Une amélioration de 100 % d'un indicateur signifie que la régulation a permis d'effacer complètement l'impact de la perturbation sur le trafic. Une amélioration négative signifie que la régulation a dégradé l'indicateur vis-à-vis de l'impact seul de la perturbation.

5.2.1.3 Résultats

Dans ce paragraphe, nous présentons certains résultats obtenus par simulation de plans de transport incluant le déclenchement des scénarios A et B définis précédemment. Aucune prédiction quant à la nature ou à la durée de la perturbation n'est transmise à la supervision. Cette dernière perçoit la perturbation au travers de la localisation des trains et déclenche la régulation en conséquence.

Les figures qui suivent présentent l'amélioration moyenne des indicateurs de ponctualité et de régularité, sur les trois variantes des scénarios de perturbation A et B. Sur chacune de ces figures sont comparés les résultats obtenus par la méthode de régulation individuelle et par la méthode de régulation globale multi-objectif. Pour chacune de ces méthodes de régulation, différents leviers de régulation sont testés : la régulation des marches-types seulement, la régulation des temps de stationnement seulement, la régulation des marches-types et des temps de stationnement combinés.

La Figure 68 et la Figure 69 présentent respectivement l'amélioration moyenne des indicateurs de ponctualité et de régularité, sur les variantes A_60, A_120 et A_180 du scénario de perturbation A. A partir de ces résultats on constate tout d'abord que l'amélioration de l'indicateur de ponctualité semble antagoniste à l'amélioration de l'indicateur d'intervalle. En effet, sur la Figure 68 on constate une nette amélioration de l'indicateur de ponctualité par toutes les méthodes testées. Pour une amplitude de perturbation de 60 secondes, les retards primaires et secondaires sont complètement résorbés. En revanche, sur la Figure 69, l'indicateur d'intervalle est quasiment systématiquement dégradé par les méthodes de régulation testées. Aussi, on constate que la régulation du temps de stationnement permet d'atteindre, dans le cadre du paramétrage choisi, un meilleur niveau de ponctualité que la régulation des marches-types, ayant moins de flexibilité dans le choix des consignes. En contrepartie, la régulation des temps de stationnement dégrade davantage l'indicateur d'intervalle. La combinaison des leviers de stationnement et de marche permet naturellement d'atteindre des niveaux de performance plus élevées que les stratégies n'utilisant qu'un seul de ces leviers.

Le scénario A_60 correspond à une perturbation d'amplitude relativement limitée qui entraîne un retard total d'environ 220 secondes répartis sur 8 circulations. Les régulations individuelle et globale présentent des résultats équivalents sur ce scénario de perturbation. Il ne semble donc pas pertinent de mettre en œuvre une régulation globale et multi-objectif dans ce type de configuration. Dans le cas du scénario A_120 caractérisé par une perturbation d'amplitude plus importante, la régulation multi-objectif atteint, un niveau de ponctualité équivalent à la régulation individuelle, tout en améliorant significativement l'indicateur d'intervalle. Dans le cas du scénario A_180, caractérisé par une amplitude de perturbation élevée, lorsque seule l'adaptation de la marche est considérée, la régulation multi-objectif ne parvient pas à améliorer la solution proposée par la régulation individuelle. Dans les deux autres configurations, la régulation multi-objectif atteint un niveau de ponctualité légèrement en deçà de la régulation individuelle, mais propose néanmoins un bon compromis entre la ponctualité et l'intervalle.

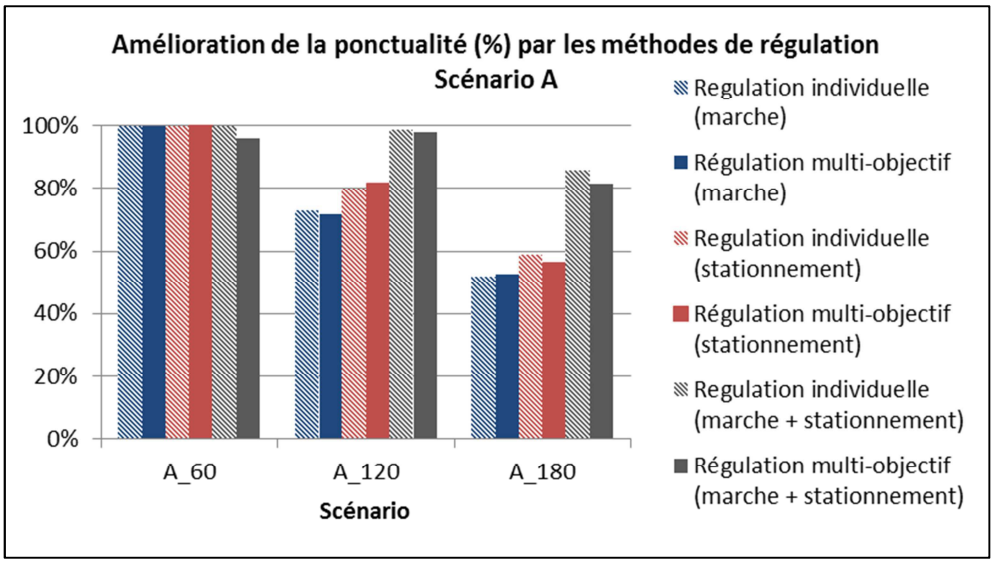

Figure 68 : Comparaison des régulations, indicateur de ponctualité, scénario A

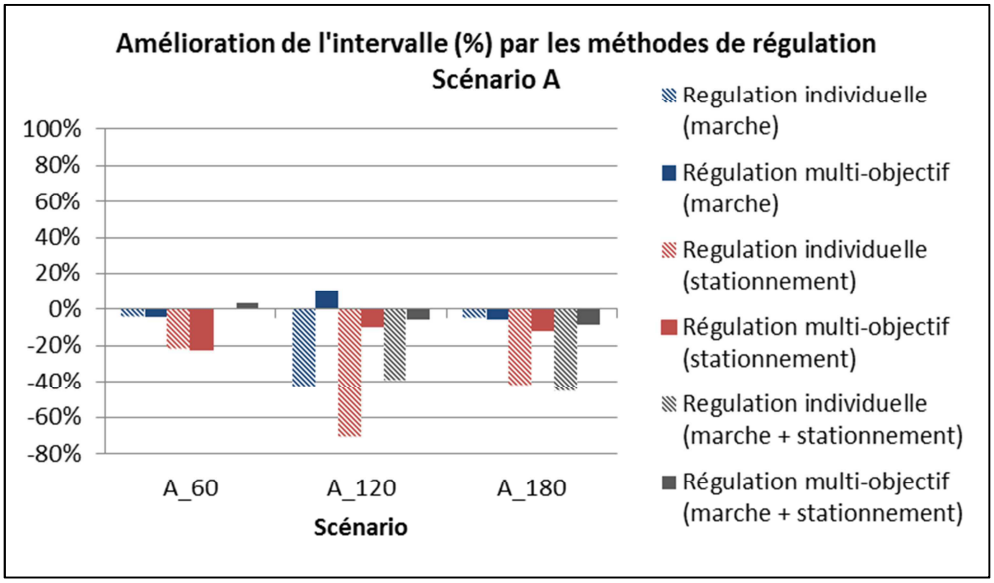

Figure 69 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario A

La Figure 70 et la Figure 71 présentent respectivement l'amélioration moyenne des indicateurs de ponctualité et de régularité, sur les variantes B_60, B_120, et B_180 scénario de perturbation B. Contrairement au scénario A, sur le scénario B l'amélioration de la ponctualité entraîne également l'amélioration de l'indicateur d'intervalle. Ceci est dû au fait que le groupe de trains régulés inclut le train directement aval à la perturbation. Ainsi l'amélioration de la ponctualité entraîne également la réduction de l'intervalle entre le train retardé et le train aval ; cet intervalle se rapproche de l'intervalle objectif. Le compromis ponctualité-intervalle, bien présent, prend simplement une forme différente. Par ailleurs, tout comme pour le scénario A, la régulation du temps de stationnement est d'une façon générale plus performante que la régulation des marches, dans le cadre du paramétrage

choisi. La combinaison des leviers de stationnement et de marche permet naturellement d'atteindre de meilleurs résultats que les stratégies à levier unique.

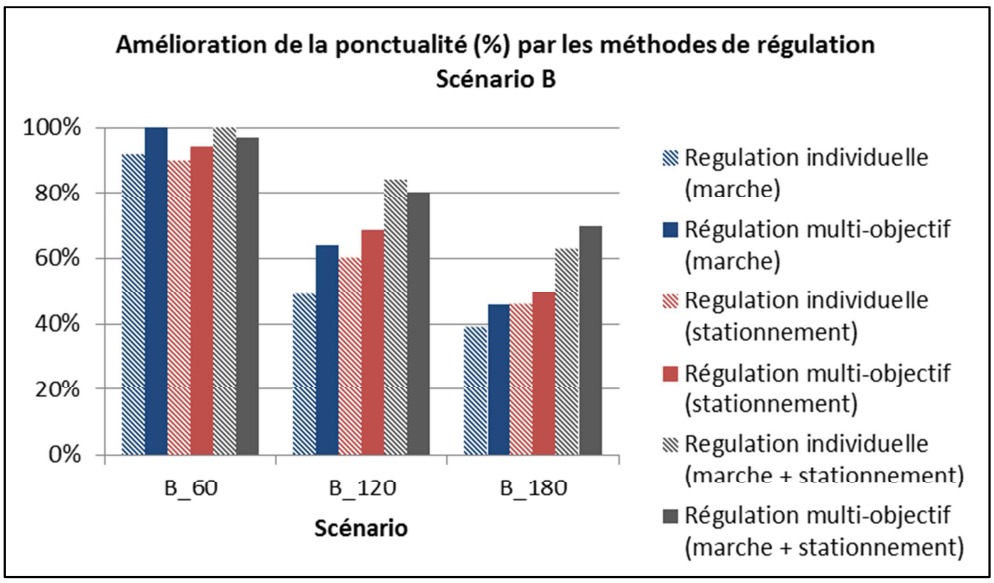

Figure 70 : Comparaison des régulations, indicateur de ponctualité, scénario B

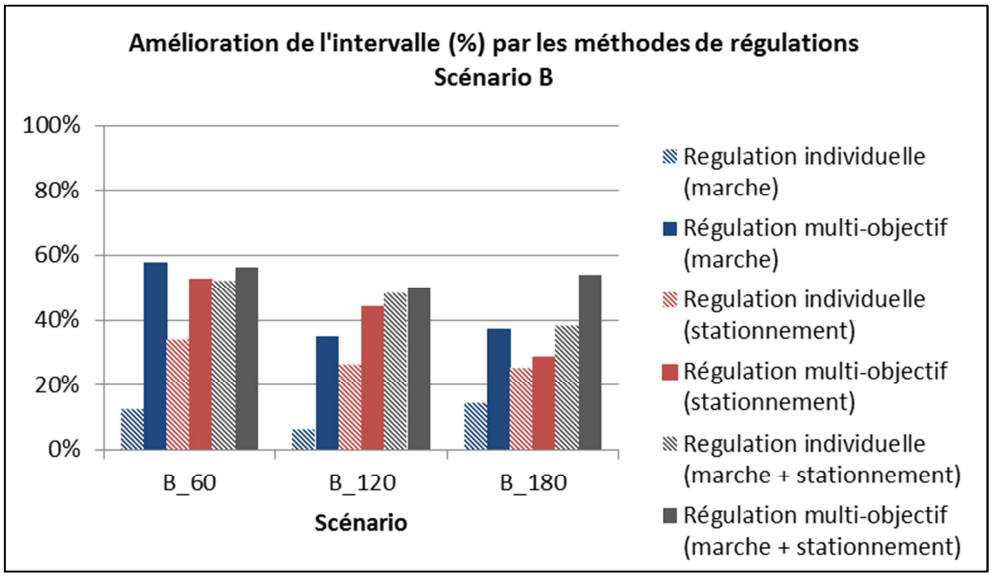

Figure 71 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario B

D'une façon générale, la régulation globale est plus performante que la régulation individuelle lorsqu'un seul levier est activé. Lorsque les leviers sont combinés, la régulation globale propose un bon compromis entre ponctualité et intervalle. Elle parvient à surpasser la régulation individuelle à amplitude élevée (B_180).

5.2.1.4 Initialisation sur une « bonne solution »

D'après les résultats précédents, la régulation individuelle et la régulation globale proposent de bonnes solutions face à une situation perturbée, la première seulement dans l'objectif de rattraper le retard mesuré, la seconde dans l'objectif de réduire les retards tout en trouvant un compromis sur la qualité de l'intervalle de ligne. Plutôt qu'un compromis, on souhaiterait que la régulation globale multi-objectif améliore la solution proposée par la régulation individuelle. Pour cela, à chaque pas de régulation, on intègre le jeu de consignes que proposerait la régulation individuelle dans la population initiale de l'algorithme génétique en charge de résoudre le problème de régulation multi-objectif.

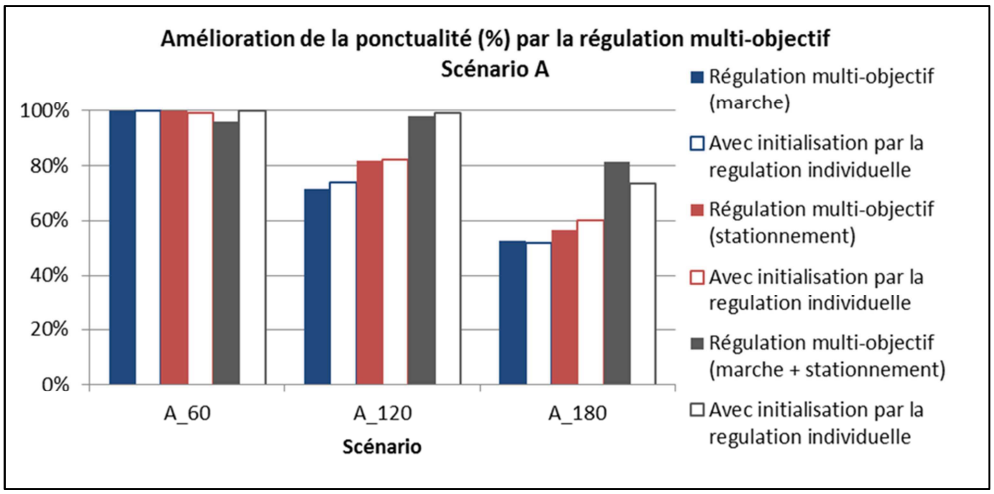

Figure 72 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur de ponctualité, scénario A

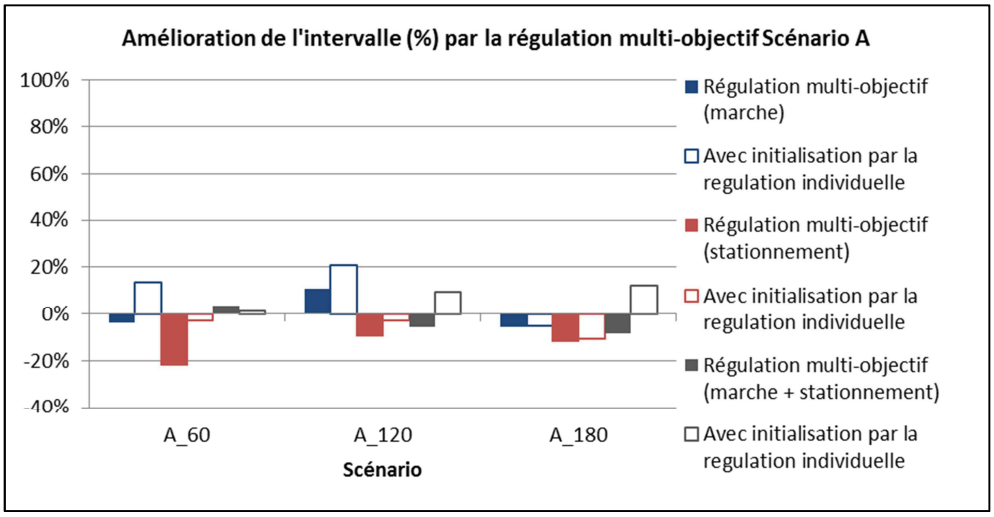

Figure 73 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur d'intervalle, scénario A

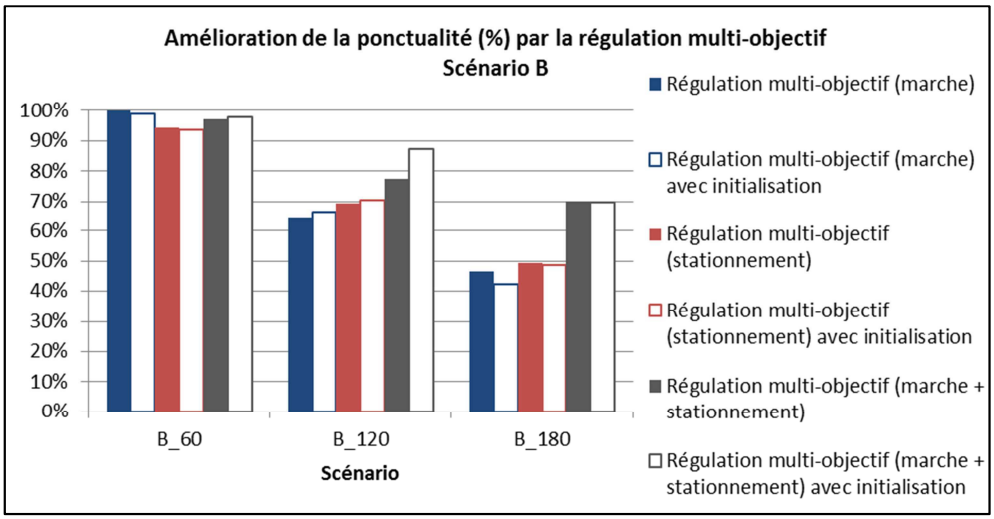

Figure 74 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur de ponctualité, scénario B

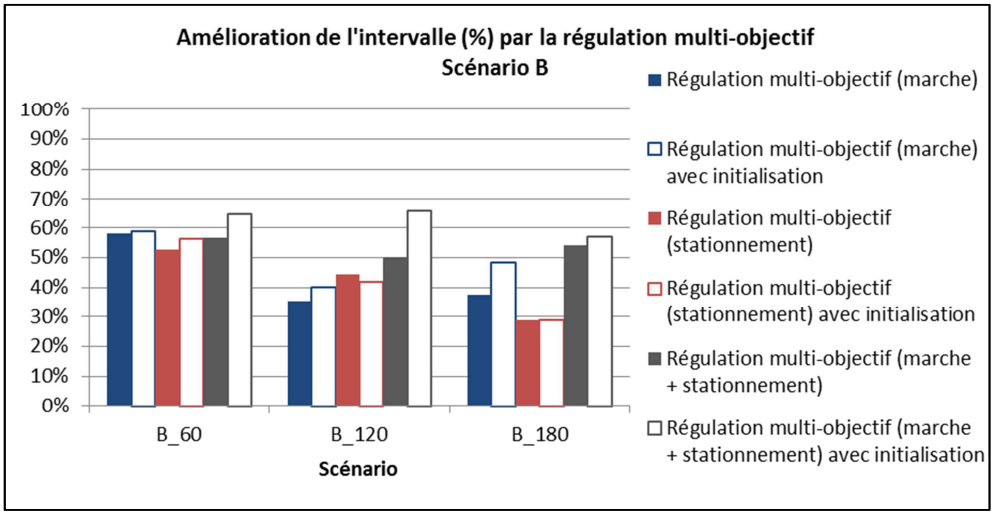

Figure 75 : Résultats de la régulation multi-objectif avec et sans initialisation par une « bonne solution », indicateur d'intervalle, scénario B

La Figure 72 et la Figure 73 présentent les performances de la régulation multi-objectif initialisée avec le jeu de consignes de la régulation individuelle mono-objectif, sur les scénarios A_60, A_120, A _180. La Figure 74 et la Figure 75 présentent les performances de la régulation multi-objectif initialisée avec le jeu de consignes de la régulation individuelle mono-objectif, sur les scénarios B_60, B_120, B _180. Pour ces deux ensembles de scénarios, on constate que l'initialisation du processus d'optimisation par le jeu de consigne correspondant à la régulation individuelle permet, de façon générale, une amélioration légère de la performance en terme de ponctualité, et une amélioration plus sensible de la performance en terme d'intervalle, en particulier sur les scénarios de type A. Néanmoins sur les perturbations de grande amplitude A_180 et B_180 pour lesquelles le compromis ponctualité-intervalle se fait plus fort, l'initialisation sur une solution orientée

ponctualité ne permet pas d'améliorer les solutions, elle ne fait qu'amener à un compromis différent entre ponctualité et régularité.

Sur les scénarios testés, fournir une « bonne solution » au départ de l'optimisation semble permettre de proposer une direction intéressante dans l'espace des solutions et d'aboutir dans la plupart des cas à de meilleures performances. A l'avenir, il faudra confirmer cette observation sur des scénarios plus complexes, pour lesquels l'initialisation pourraient seulement orienter le compromis plutôt que l'améliorer. Il serait également intéressant de pouvoir proposer plusieurs bonnes solutions, c'est-à-dire plusieurs directions-clés pour l'exploration de l'espace des solutions.

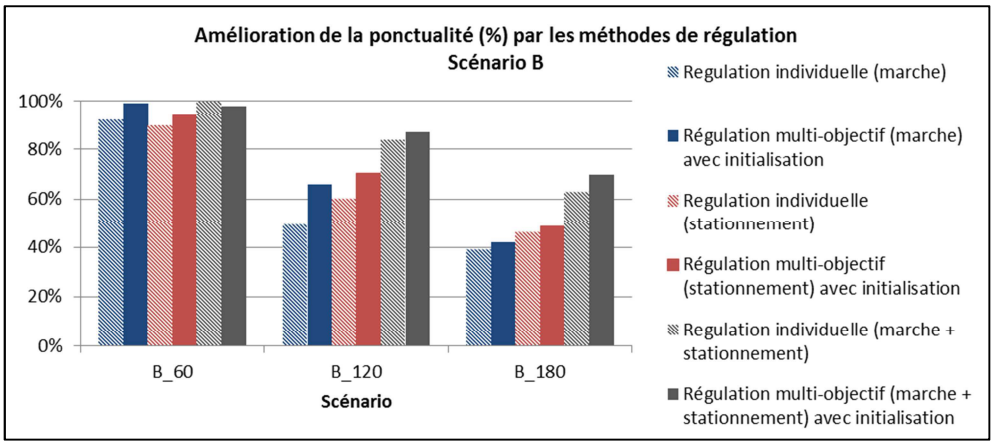

Figure 76 : Comparaison des régulations, avec initialisation sur une « bonne solution », indicateur de ponctualité, scénario B

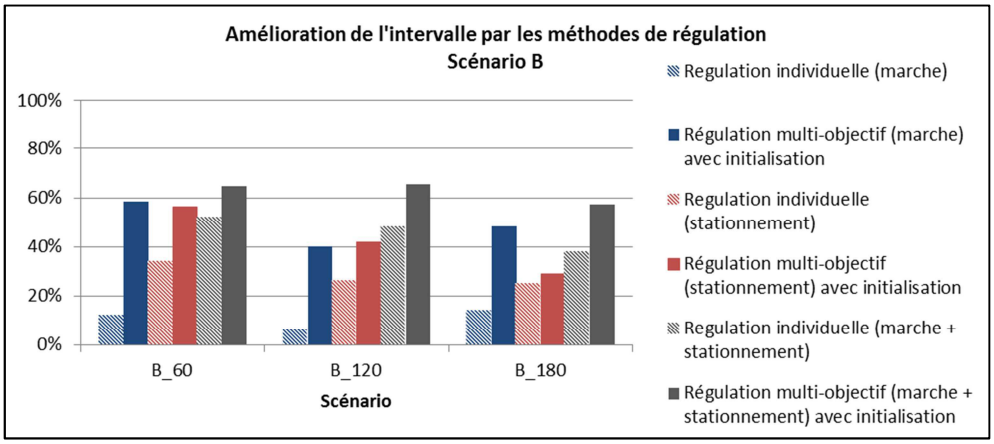

Figure 77 : Comparaison des régulations, avec initialisation sur une « bonne solution », indicateur d'intervalle, scénario B

La Figure 76 et la Figure 77 résument les résultats obtenus par la régulation multi-objectif initialisée avec une « bonne solution » et par la régulation individuelle, sur le scénario B. L'initialisation permet à la régulation multi-objectif d'atteindre de meilleurs indicateurs de

performances dans tous les cas (excepté un indicateur moyen de ponctualité légèrement en deçà pour la combinaison des leviers sur B_60).

5.2.1.5 Robustesse face à la dispersion des temps de stationnement

Les trains équipés de systèmes CBTC sont caractérisés par une grande précision dans la mise en œuvre des consignes de marche. En revanche, la mise en œuvre des consignes de stationnement restent impactées par la dispersion des temps d'arrêt liée à l'échange voyageur. Cette dispersion est liée à des facteurs très divers dont les principaux sont la fréquence de passage, le comportement des voyageurs, l'agencement du véhicule, et l'agencement du quai.

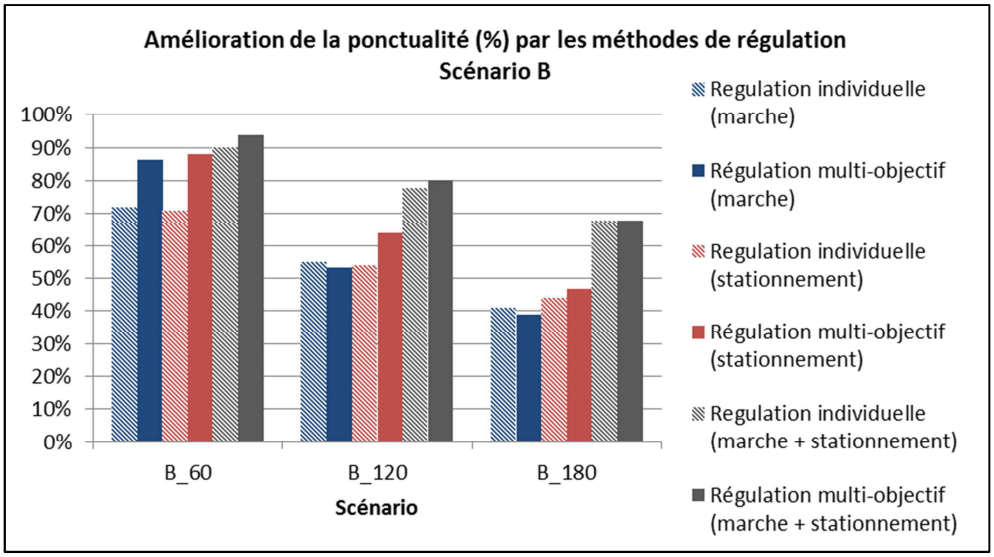

Figure 78 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario B + dispersion

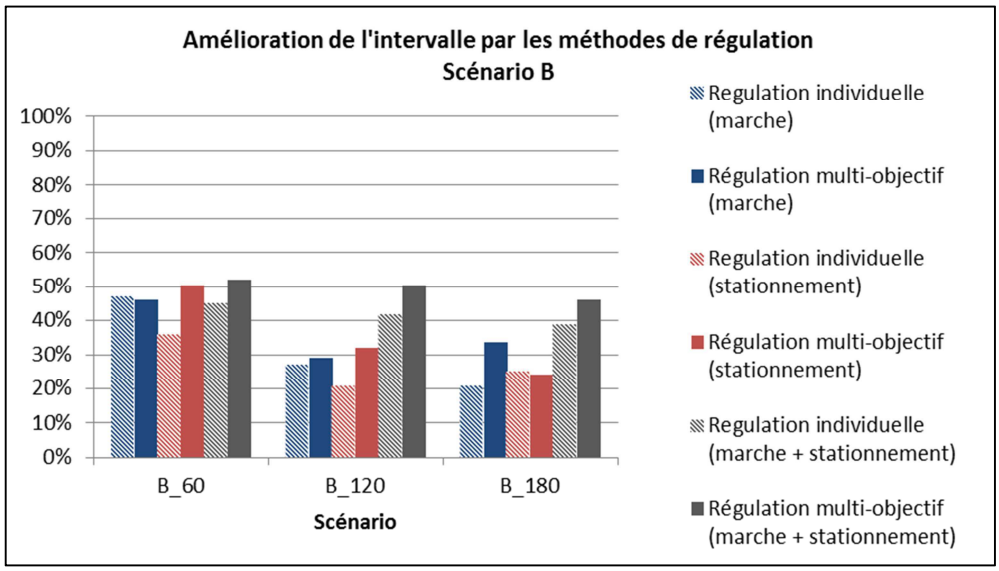

Figure 79 : Comparaison des régulations, indicateur d'intervalle, scénario B + dispersion

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats obtenus par les méthodes de régulation individuelle et globale sur une grille horaire impactée par le scénario de perturbation B, ainsi que par une dispersion des temps de stationnement vis-à-vis du temps de la consigne formulée par la régulation. Le temps de stationnement effectif du train est la somme de la consigne de stationnement et d'un sur-stationnement lié à l'échange-voyageur. L'ensemble des sur-stationnements à quai modélisant la dispersion liée à l'échange-voyageur est généré par une loi gamma dont le paramètre de forme est égal à 4 et le paramètre d'échelle est égal à 1. La moyenne des sur-stationnements générés est de 4 secondes, leur écart-type est de 2 secondes. La valeur maximale de l'ensemble est de 11 secondes.

La Figure 78 et la Figure 79 présentent les résultats obtenus par les méthodes de régulation individuelle et globale mettant en œuvre l'adaptation des marches-types et des temps de stationnement. La méthode globale multi-objectif permet d'atteindre une amélioration de la ponctualité équivalente ou supérieure à la méthode individuelle, notamment sur les perturbations de faibles amplitudes sur lesquelles elle ne parvenait pas à proposer une meilleure option dans les cas testés précédemment. Sur les scénarios d'amplitudes plus élevées, le gain apporté par la régulation multi-objectif est moins net que précédemment, en particulier lorsqu'un unique levier est activé, mais reste globalement intéressant.

5.2.2 Influence de l'horizon de commande

La méthode de régulation globale est basée une commande prédictive caractérisée par un horizon de commande. L'horizon de commande correspond au nombre de consignes calculées par train lors du processus d'optimisation, c'est-à-dire au nombre d'étapes du parcours de chaque train pour lesquelles on détermine une consigne. A chaque pas de régulation, la résolution du problème de régulation est exécutée, l'horizon de commande considéré débute alors à la prochaine étape du train. Au fur et à mesure de l'avancée du train, l'horizon de commande se déplace donc lui aussi le long du parcours. On parle d'horizon glissant. L'horizon de commande est néanmoins limité par le nombre d'étapes restantes sur le parcours (dans notre cas, le parcours du train est composé de 6 étapes en général). Dans ce paragraphe, nous étudions l'influence de l'horizon de commande sur les performances de la méthode de régulation globale multi-objectif. Afin d'évaluer l'impact de sa taille, elle a été paramétrée selon une valeur allant de 1 à 3.

La Figure 80 et la Figure 81 présente respectivement l'amélioration de l'indicateur de ponctualité et l'amélioration de l'indicateur de régularité sur une grille horaire soumise au scénario de perturbation B, en fonction de la taille de l'horizon de commande. Ces grandeurs correspondent aux résultats obtenus par la régulation globale multi-objectif, avec l'adaptation des temps de stationnement comme seul levier. Des résultats très similaires sont obtenus lorsque l'adaptation des marches constitue l'unique levier d'action de la

régulation. Pour chaque étape du parcours incluse dans l'horizon de commande, une consigne est calculée pour chacun des leviers activés.

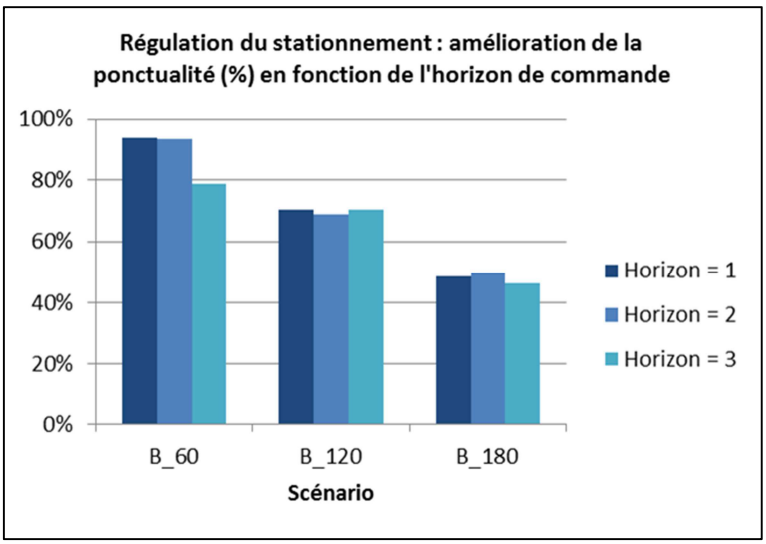

Figure 80 : Amélioration de l'indicateur de ponctualité par la régulation multi-objectif (stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B

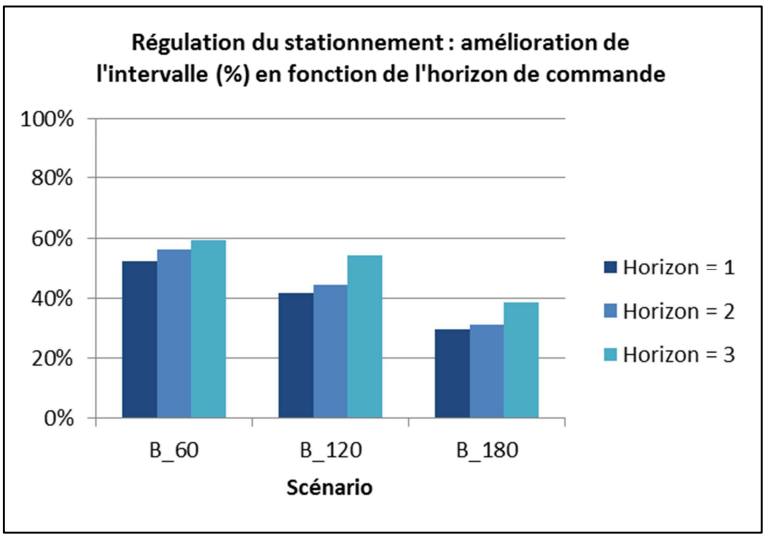

Figure 81 : Amélioration de l'indicateur d'intervalle par la régulation multi-objectif (stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B

Il apparaît nettement sur ces figures que plus l'horizon de commande est important, plus le compromis entre ponctualité et intervalle est favorable à ce dernier. Ce compromis en faveur de l'intervalle est donc synonyme d'une dégradation plus ou moins importante de l'indicateur de ponctualité, concurrent de l'indicateur d'intervalle. La réponse à formuler face à un indicateur de retard dégradé est directe et triviale. Une circulation ne peut être qu'en retard ou non en retard. Au contraire, améliorer un indicateur d'intervalle nécessite généralement une réponse globale, non immédiate, et formulable sous diverses solutions.

Lorsque l'horizon est faible, la marge de manœuvre de la régulation pour ajuster les consignes en fonction de l'intervalle est limitée. Au-delà d'un horizon de taille 3, les résultats deviennent instables au sens où ils varient grandement d'une instance de test à l'autre. La répétabilité des solutions se dégrade rapidement. Au vu de ces résultats, un horizon de taille 2 semble pertinent pour favoriser l'amélioration de l'intervalle, sans dégrader significativement la ponctualité.

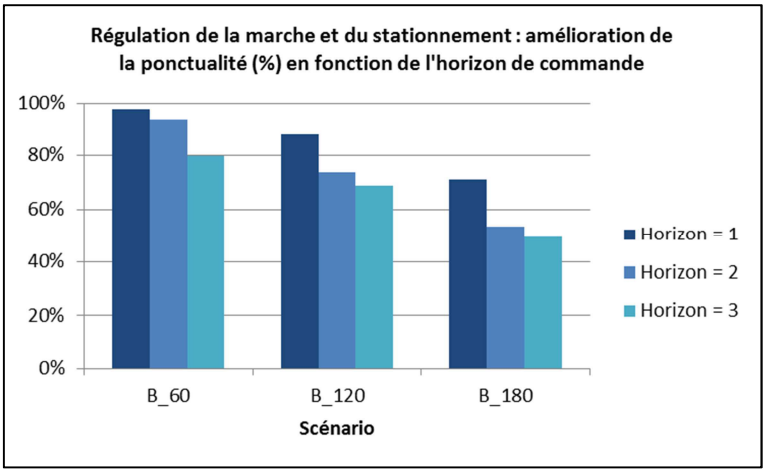

Figure 82 : Amélioration de l'indicateur de ponctualité par la régulation multi-objectif (marche et stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B

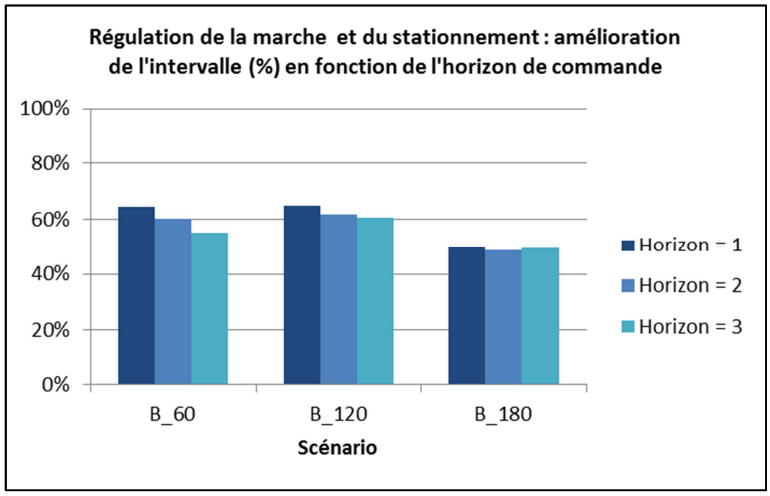

Figure 83 : Amélioration de l'indicateur d'intervalle par la régulation multi-objectif (marche et stationnement) en fonction de l'horizon de commande, scénario B

La Figure 82 et la Figure 83 présentent les mêmes grandeurs, obtenues sur une grille horaire soumise au scénario de perturbation B, lorsque les deux leviers d'action sont combinés. Dans ce cas, l'augmentation de la taille de l'horizon n'est plus en faveur de l'indicateur d'intervalle, et pénalise significativement la ponctualité. La combinaison des leviers permet une plus grande marge de manœuvre face à une perturbation, et le stationnement et la marche constituent des étapes successives du parcours d'un train. La

combinaison des leviers augmente donc d'elle-même l'horizon de commande total en additionnant en quelque sorte l'horizon de chacun des leviers. Ainsi, dans le cadre des scénarios simulés, il semble nécessaire de privilégier un horizon de commande de taille 1 lorsque différents leviers sont combinés.

5.2.3 Reproductibilité des résultats

Les algorithmes génétiques utilisent des techniques d'exploration stochastiques. Il est donc intéressant d'étudier la reproductibilité des résultats obtenus par la régulation multi-objectif, notamment en fonction de l'horizon de commande. La Figure 84 présente la meilleure solution, la moyenne des solutions et l'écart type obtenus par la régulation multi-objectif sur le scénario B, lorsque les deux leviers d'action sont combinés, avec un horizon de commande égal à 1 pour chacun des leviers.

Scenario	Solution	Ponctualité	Intervalle
B_60	Meilleure	100%	68%
	Moyenne	96%	63%
	Ecart-type	6%	4%
B_120	Meilleure	91%	77%
	Moyenne	87%	65%
	Ecart-type	3%	5%
B_180	Meilleure	71%	65%
	Moyenne	71%	52%
	Ecart-type	1%	6%

Figure 84 : Meilleure solution, solution moyenne, et écart-type obtenus par la régulation multi-objectif (stationnement et marche), scénario B

L'écart type des indicateurs de performances mesurés sur les simulations d'un même scénario est compris entre 1 % et 7 %. En ce qui concerne l'indicateur de ponctualité, l'écart type à tendance à être plus important sur les scénarios ayant une faible amplitude de perturbation. En effet, le moindre écart, même faible, sur la somme des retards mesurés a plus de poids relativement à la valeur de référence I_0 (voir 0). Par exemple, sur le scénario B_60, la meilleure valeur de l'indicateur de ponctualité correspond à la somme des retards de toutes les circulations égale à 0, c'est-à-dire à une amélioration de la ponctualité de 100 %. La pire valeur correspond à une somme des retards égale à 26 secondes, c'est-à-dire une amélioration de ponctualité égale à 84 %. Sur le scénario B_180, le même écart correspondrait à une différence de 4 % sur les améliorations d'indicateur.

En ce qui concerne l'indicateur d'intervalle, on observe un écart type relativement important (entre 4 % et 6 %). Ceci est, en partie, lié à la définition même de l'indicateur qui consiste en la somme des écarts à l'intervalle théorique (ou, de manière équivalente, à la moyenne de l'écart à l'intervalle théorique). Les variations de cet indicateur sont donc relativement plus importantes que celles d'un indicateur défini selon la somme des intervalles mesurés par exemple. Sur le scénario B_180, un écart de 6 % entre deux valeurs d'améliorations de l'intervalle équivaut à un écart de 2,3 secondes entre les deux valeurs de l'écart moyen mesuré vis-à-vis de l'intervalle théorique.

Par la suite, il serait probablement intéressant de définir un indicateur d'intervalle qui reflète mieux les attentes de l'exploitation et des usagers. On pourrait par exemple imaginer un indicateur d'intervalle qui, en plus ou à la place de l'intervalle train à train, considère l'intervalle mission à mission pour mieux prendre en compte les différents types de service : train express, train omnibus, service partiel. Alternativement, on pourrait, en heure de pointe notamment, construire l'indicateur d'intervalle uniquement sur les gares caractérisées par des volumes de voyageurs très importants.

La reproductibilité des résultats de la régulation est sensiblement meilleure pour une régulation mettant en œuvre un seul levier d'action. Pour une régulation par adaptation du stationnement des circulations, les écarts types mesurés sur les indicateurs de ponctualité et d'intervalle sont respectivement de : 3 % et 3 % sur B_60, 1 % et 3 % sur B_120, 1 % et 2 % sur B_180.

Finalement, l'utilisation de plusieurs leviers de régulation permet en toute logique d'atteindre de meilleurs niveaux de performances, mais implique, pour l'instant, une dégradation de la reproductibilité des résultats. Dans les travaux futurs, cette dégradation pourrait être corrigée par un meilleur paramétrage des algorithmes génétiques.

5.2.4 Temps de calcul

Le temps de calcul d'un algorithme génétique dépend essentiellement de la taille de la population (nombre d'individus composant une génération), du nombre de générations, et du temps de calcul de la fonction d'évaluation, appelée un grand nombre de fois au cours du processus. La Figure 85 présente l'évolution du temps de calcul nécessaire au processus d'optimisation des consignes de marche et de stationnement pendant le jeu du scénario B_120. L'axe des abscisses représente la date au cours de la simulation. L'axe des ordonnées présente à la fois la taille du chromosome à optimiser et le temps de calcul nécessaire au processus d'optimisation sur 30 générations. La taille du chromosome augmente au fur et à mesure que les trains entrent dans le périmètre de régulation ; elle diminue ensuite lorsque les trains approchent de leur phase de retournement ; elle augmente à nouveau lorsque les trains se voient attribuer une nouvelle mission après retournement ;

elle diminue finalement lorsque les trains terminent leur dernière mission. On constate, sans surprise, que l'horizon de commande (conditionnant la taille du chromosome) n'a aucune influence sensible sur le temps de calcul du processus d'optimisation. A taille de population et nombre de générations fixes (ici respectivement 40 et 30), le temps de calcul dépend uniquement de la fonction d'évaluation, et donc de l'horizon d'évaluation sur lequel elle est appliquée. Ici, l'horizon d'évaluation constitue, pour chaque train (associé à 2 missions), l'ensemble de son parcours dans la zone CBTC. A l'avenir, si une réduction du temps de calcul s'avérait nécessaire (au-delà de l'optimisation du code de la supervision et du simulateur SIMONE lui-même), une adaptation de la définition de l'horizon d'évaluation pourrait être considérée. Par exemple, il est envisageable d'évaluer l'intervalle uniquement sur un nombre limité d'étape du train définissant un horizon glissant. Il en est de même pour l'évaluation de la ponctualité.

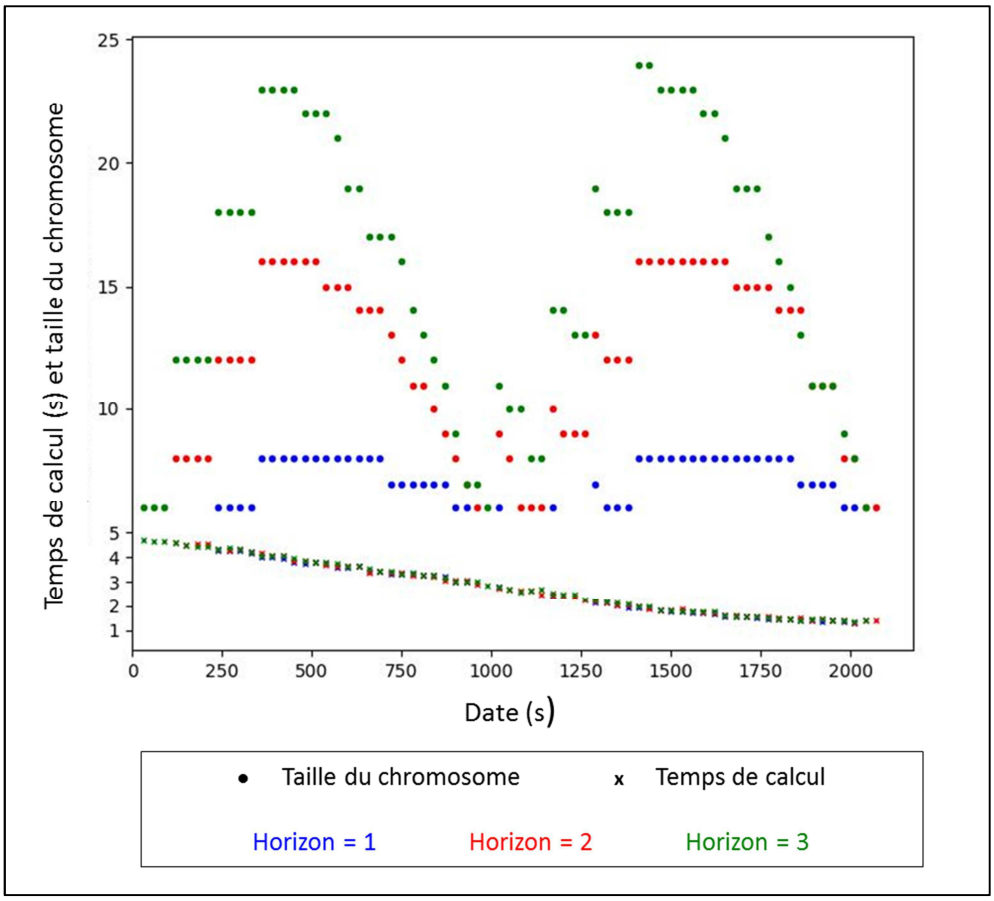

Figure 85 : Evolution du temps de calcul de l'optimisation multi-objectif (marche + stationnement) au fil de la simulation, en fonction de l'horizon de commande, scénario B_120

5.2.5 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons testé différentes méthodes de régulation et analysé leurs performances. Toutes les simulations ont été réalisées sur l'outil SIMONE, l'évaluation des

situations simulées présente donc un niveau de précision élevé vis-à-vis des conditions d'exploitation réelles. Afin d'évaluer la performance des méthodes de régulation présentées, différents scénarios décrivant des situations perturbées ordinaires, d'amplitudes plus ou moins importantes, ont été construits. Les grilles horaires impactées par les scénarios de perturbations ont préalablement été calculées par simulation. Ces grilles horaires décrivent la traversée de la zone CBTC (qui correspond ici à la zone de régulation), le retournement des trains en tiroir, puis la traversée de la zone CBTC dans la direction inverse. Les méthodes de régulation sont mises en œuvre sur un ensemble de 4 trains, correspondant à 8 circulations. Les méthodes dites individuelles cherchent à rattraper les retards primaires et secondaires générés par le scénario de perturbation appliqué. Elles ont été utilisées comme base de comparaison pour analyser les résultats obtenus par la régulation multi-objectif présentée au Chapitre 3. Les régulations multi-objectif présentent des résultats encourageants, y compris lorsque l'amplitude de la perturbation atteint des valeurs relativement importantes vis-à-vis de l'intervalle théorique entre les circulations ; ces résultats peuvent être améliorés en fournissant à l'initialisation du processus d'optimisation la solution mimant la mise en œuvre de la régulation individuelle. En toute logique, la méthode de régulation multi-objectif a un impact positif sur le compromis entre l'amélioration de la ponctualité et l'amélioration de l'intervalle. Néanmoins, la méthode est très sensible à l'horizon de commande choisi. Lorsqu'un seul levier d'action est utilisé, une augmentation de l'horizon de commande tend à améliorer l'intervalle, parfois au détriment de la ponctualité. En revanche, lorsque les leviers d'action sont combinés, l'horizon de commande devrait correspondre à une étape de parcours pour chacun des leviers activés, afin d'éviter une dégradation significative de la qualité des solutions.

Conclusion générale et perspectives

La croissance actuelle du trafic sur les lignes ferroviaires suburbaines conduit les exploitants à déployer des systèmes de contrôle-commande avancés des trains, tels que les systèmes CBTC jusque-là réservés aux systèmes de métro. L'adaptation des fonctions de supervision et régulation de ces systèmes, initialement conçus pour des systèmes de métro, est nécessaire pour permettre l'exploitation optimisée de lignes suburbaines, en adéquation avec ses objectifs et ses contraintes spécifiques. Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans cette démarche.

Conception d'un module de supervision du trafic

Les travaux ont tout d'abord contribué à la conception d'un module de supervision intégrable dans le bloc ATS d'un système CBTC standard. La supervision proposée s'interface avec le système de signalisation ferroviaire classique et avec les autres sous-systèmes du système CBTC, et en particulier avec les fonctions de pilotage automatique et de protection des trains. Les fonctions du module de supervision sont le suivi des trains CBTC et non CBTC, le calcul et la commande des itinéraires à destination de la signalisation, ainsi que le calcul et la commande des consignes à destination du pilotage automatique des trains CBTC. La supervision proposée présente la particularité de calculer en temps réel le quai de desserte et l'itinéraire des circulations le long de leurs parcours. Ce calcul est exécuté au plus tard, dans les zones de déclenchements, en fonction de l'occupation prévue des différentes ressources.

Modélisation et résolution du problème de régulation

Le module de supervision développé doit accueillir les fonctions de régulation du trafic en cas d'aléas. Nous avons proposé une méthode de régulation basée sur une stratégie de commande prédictive et sur une optimisation multi-objectif des consignes des trains automatiques.

Le problème de régulation est formulé par une programmation en nombres entiers qui permet de prendre en compte les spécificités du système étudié :

- la modélisation du réseau ferroviaire s'appuie sur un graphe topologique microscopique. Afin d'alléger cette représentation, les gares complexes sont agrégées en un unique nœud caractérisé par sa capacité d'accueil. La gestion des trains en gare peut ainsi être aisément décorrélée du problème de régulation, elle est gérée directement par le module de supervision ;

- la formulation multi-objectif du problème de régulation permet de retranscrire les objectifs particuliers des lignes ferroviaires suburbaines et le compromis souhaité entre ponctualité et intervalle ;

- la formulation des contraintes du problème tient compte de la mixité possible du trafic. L'espacement des trains et les restrictions portant sur leurs marches tiennent compte de leurs modes de localisation, de leurs modes de conduite et de leurs performances de traction et de freinage ;

- la formulation du problème prend en compte les étapes de retournements en tiroir pour lesquelles des contraintes particulières sont formulées.

La modélisation proposée se veut la plus générale possible. Elle pourra être adaptée par la suite pour la gestion de cas plus spécifiques, tels que la définition des priorités entre différents types de service (trains suburbains, trains spéciaux, trains de fret…).

La résolution du problème utilise une méthode d'optimisation approchée : les algorithmes génétiques. Ce type d'algorithme a été choisi pour son efficacité, la simplicité de mise en œuvre, la maitrise du temps de calcul, l'adaptabilité à des fonctions de coût variées. Les algorithmes développés dans la fonction de régulation permettent d'optimiser des grandeurs de natures différentes. Par ailleurs, ils mêlent des opérateurs standards et des opérateurs spécifiques au problème étudié. Ces derniers appliquent directement certaines contraintes du problème dans la structure de données gérée par l'algorithme. Les contraintes restantes sont exprimées sous forme de pénalité dans les fonctions-objectifs.

Dans le cadre des travaux présentés, nous n'avons pas cherché à étudier l'optimalité de la solution proposée par la méthode de régulation. Nous n'avons pas non plus cherché à comparer différentes méthodes de résolution approchée. Les travaux ont privilégié une approche « système » en étudiant d'une part le problème de régulation et d'autre part son intégration dans un module de supervision ATS puis dans un simulateur d'exploitation microscopique. Néanmoins, l'étude d'optimalité et la comparaison de méthode de résolution constituent des pistes de recherche et d'amélioration importantes en vue de consolider la méthode proposée.

Intégration dans un outil de simulation microscopique de l'exploitation ferroviaire

SIMONE est un outil SNCF qui permet de simuler une exploitation ferroviaire intégrant un système de signalisation classique et/ou un système de signalisation CBTC. Son développement a été réalisé au sein de l'équipe SNCF encadrant les travaux présentés, durant la période de thèse.

Le simulateur SIMONE est conçu selon une structure multi-agent composée, entre autres, des acteurs Voie, Train, Agent de conduite, Signalisation et CBTC. L'architecture fonctionnelle, le niveau de précision et les flux d'informations du modèle CBTC sont basés sur les spécifications d'un système réel. Les fonctions de supervision et de régulation développées dans le cadre des travaux de thèse ont été intégrées dans la partie ATS du modèle CBTC. Elles s'interfacent avec les autres sous-systèmes du modèle CBTC (ATC Bord et Sol) et avec le modèle de signalisation.

Le modèle de signalisation, également développé dans le cadre des travaux de thèse, s'appuie sur un ensemble de machines à états décrivant, d'une part, le comportement fonctionnel et dynamique des équipements composant la signalisation ferroviaire et, d'autre part, la logique des postes de signalisation en charge d'établir et de détruire les itinéraires et de mettre en œuvre les enclenchements. Le comportement dynamique d'un équipement ou d'une logique d'itinéraire peut être paramétré individuellement grâce à un jeu de temporisations intervenant dans la machine à états correspondante. La structure générale de ce modèle a été présentée dans ce mémoire, mais pour des raisons de confidentialité, la description détaillée des machines à états n'a pas été communiquée.

Le simulateur SIMONE a été confronté à de nombreux tests de validation fonctionnelle. De plus, le comportement dynamique des acteurs a été partiellement validé par comparaison de temps de parcours simulés sur SIMONE à des données réelles, et à des données issues d'autres outils de simulation.

La version actuelle de SIMONE présente une limite importante : l'acteur Agent de conduite et le Block Automatique Lumineux de la signalisation ferroviaire ne sont pas implémentés.

Il n'est donc actuellement pas possible de modéliser le comportement de conduite manuelle et la réaction du conducteur face au Block Automatique Lumineux, et de retranscrire la forte dispersion des comportements. Cette modélisation est un sujet complexe qui nécessite la contribution d'une expertise métier. Son implémentation dans une version future du simulateur constituera une évolution importante de celui-ci.

Le développement de l'outil SIMONE a été étroitement lié aux travaux de thèse. La participation à la conception du simulateur a permis d'apporter une vision et une compréhension globale du trafic ferroviaire.

Simulation : résultats et perspectives

L'outil de simulation SIMONE a permis de tester la méthode de régulation développée dans le cadre de ces travaux. Les scénarios simulés injectent des perturbations quotidiennes d'amplitude relativement importantes dans un trafic constitué de huit circulations équipées d'un système CBTC. Ces scénarios comprennent le retournement des trains en fin de mission. Afin d'évaluer la qualité des solutions proposées par la méthode de régulation multi-objectif, cette dernière a été comparée à une méthode de régulation classique adaptant individuellement la marche et le stationnement des trains en fonction de leurs retards propres. Pour chacune des méthodes de régulation, trois configurations ont été testées : la régulation par adaptation de la marche des trains seulement, la régulation par adaptation des temps de stationnement seulement, et la régulation par combinaison de ces deux leviers. Des résultats encourageants ont été obtenus avec les simulations : la méthode de régulation multi-objectif propose de bonnes solutions au problème, dans la majorité des cas meilleures que celles proposées par la régulation individuelle, et avec un temps de calcul satisfaisant. En toute logique, la régulation multi-objectif offre un meilleur compromis entre ponctualité et intervalle.

A la suite de ces simulations, plusieurs pistes intéressantes ont pu être identifiées pour les travaux futurs. Nous précisons ici les principales actions qui devraient être menées.

En premier lieu, il sera nécessaire de confronter les méthodes de régulation présentées à des cas de taille plus élevée (c'est-à-dire comportant plus de circulations). Les cas de tests devront peu à peu se rapprocher des grilles horaires réelles, sur une durée d'exploitation conséquente (par exemple, une période d'heure de pointe, ou une journée complète d'exploitation). Cela pourrait conduire à enrichir la régulation multi-objectif de mécanismes dédiés à la gestion de zones complexes, telles que les convergences entre les trains arrivant dans la zone CBTC en provenance de banlieue et les trains en provenance des tiroirs après retournement.

Dans les tests présentés précédemment, l'optimisation des consignes a considéré toutes les circulations présentes dans la zone de régulation. Dans les travaux futurs s'appuyant sur des plans de transport de taille élevée, il sera nécessaire de déterminer, parmi l'ensemble des circulations évoluant dans le périmètre CBTC, celles qui doivent être considérées dans le périmètre de l'optimisation des consignes. Il serait notamment intéressant de préciser si les circulations en aval de la perturbation doivent être considérées, et si oui dans quelle mesure.

La suite des travaux devra également tester, lorsque le simulateur SIMONE le permettra, la performance des méthodes de régulation lorsque le trafic inclut des trains non-CBTC non commandables par la régulation, et dont le comportement sur les voies est différent de celui des trains CBTC.

Enfin, il sera intéressant d'étudier la mise en œuvre de la modification de desserte. Ce type de régulation qui impacte grandement la qualité de service et sa perception par le voyageur, est un sujet complexe et n'est actuellement pas appliqué en cas de perturbation légère en zone dense. Il représente cependant un levier supplémentaire à optimiser.

Travaux cités

Acuna-Agost, Rodrigo. «Mathematical modeling and methods for rescheduling trains under disrupted operations.» Thèse de doctorat, 2009.

Alaya, Ines. *Optimisation multi-objectifs par colonies de fourmis : cas des problèmes de sac à dos.* Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1 et ENSI Tunis, 2009.

Albrecht, Thomas, Rob Goverde, V. A. Weeda, et J. van Luipen. «Reconstruction of train trajectories from track occupation data to determine the effects of a Driver Information System.» *Computers in Railways X. The Tenth International Conference.* Prague, Czech Republic, 2006.

Andersson, Emma, Anders Peterson, et Johanna Törnquist Krasemann. «Improved Railway Timetable Robustness for Reduced Traffic Delays – a MILP approach.» *6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis.* Tokyo, Japan, 2015.

Bäck, T., F. Hoffmeister, et H.P. Schewefel. *Applications of evolutionary algorithms.* Report of the System Analysis Research Group, University of Dortmund, 1993.

Bailly, Etienne. *Etude de la régulation des lignes de métro automatiques : approche par la logique floue.* Thèse de doctorat, Université Lille1, 1996.

Balbo, Flavien. *ESAC : un Modèle d'Interaction Multi-Agent Utilisant l'Environnement comme Support Actif de Communication. Application à la Gestion des Transports Urbains.* Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine, 2000.

Brenna, Morris, Federica Foiadelli, Michela Longo, Dario Zaninelli, Paolo Bellini, et Marco Sicurello. «Increasing of Subway Lines Capability through Moving Block Signaling Systems: Modeling and Simulation.» *AEIT International Annual Conference (AEIT).* Naples, Italy, 2016.

Caimi, Gabrio Curzio. *Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network.* Thèse de doctorat, ETH Zurich, 2009.

Chabrol, Michelle, et David Sarramia. «Modélisation orientée objets et multi-agents du système d'information des systèmes de trafic urbain.» *Revue des sciences et technologies de l'information*, 2001: vol. 6(2), pp. 121-150.

Chen, Bo, et Harry Cheng. «A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems.» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010: vol. 11(2), pp. 485-497.

Chevrier, Rémy. «An Evolutionary Multi-objective Approach for Speed Tuning Optimization with Energy Saving in Railway Management.» *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).* Funchal, Madeira Portugal, 2010.

Colette, Yann, et Patrick Siarry. *Optimisation multiobjectif.* Eyrolles, 2011.

Corman, Francesco. *Real-time Railway Traffic Management: dispatching in complex, large and busy railway networks.* Thèse de doctorat, TU Delft, 2010.

Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, et Clifford Stein. *Introduction to algorithms.* MIT Press, 2001.

D'Ariano, Andrea. *Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications.* Thèse de doctorat, TU Delft, 2008.

D'Ariano, Andrea, Paolo D'Ariano, Marcella Samà, et Dario Pacciarelli. *Real-time train scheduling: from theory to practice.* Technical report, Università degli Studi Roma Tre, 2013.

De Schutter, Bart, et Ton van den Boom. «Connection and Speed Control in Railway Systems - A Model Predictive Control Approach.» *Proceedings of the Sixth International Workshop on Discrete Event Systems.* Zaragoza, Spain, 2002.

—. «Model predictive control for railway networks.» *Proceedings of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.* Como, Italy, 2001.

Deau, Dominique. «Nexteo.» *Revue Générale des Chemins de Fer*, Mai 2015.

Ding, Yong, Yun Bai, Fangming Zhou, et Haidong Liu. «Simulation Algorithm for Multi-Train Movement with Fixed Automatic-Block System.» *Transportation of China (AFTC), 6th Advanced Forum on.* Beijing, 2010.

Dorigo, Marco, et Gianni Di Caro. «The ant colony optimization meta-heuristic.» Dans *New ideas in optimization*, pp. 11-32. McGraw-Hill, 1999.

Dresner, Kurt, et Peter Stone. «Multiagent Traffic Management: A Reservation-Based Intersection Control Mechanism.» *The Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems.* New York, USA, 2004.

Elleuch, Fatma, Stéphanie Donnet, Axel Buendia, et Charles Tijus. «Comment maîtriser le temps d'arrêt d'un train en gare?» *Revue générale des chemins de fer*, Février 2017: pp. 23-34.

ERTMS. «ERTMS/ETCS Functional Requirements Specification.» European Union Agency for Railways, Juin 2016.

Europe Rail Net. *Overview of priority rules in operation.* RNE, 2012.

Fan, Bo. *Railway traffic rescheduling approaches to minimise delays in disturbed conditions.* Thèse de doctorat, University of Birmingham, 2012.

Fayech Chaar, Besma. *Régulation des réseaux de transport multimodal: systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnistes.* Thèse de doctorat, Université Lille 1, 2003.

Fernandez Cardador, Antonio, Fernando Cuadra Garcia, et Alfonso Garcia. «SIRO: an optimal regulation system in an integrated control centre for metro lines.» *Proceedings of the 5th COMPRAIL Conference.* Berlin, Germany, 1996. vol. 2, pp. 299-308.

Fernández-Rodríguez, Adrián, Antonio Fernández Cardador, Asunción P. Cucala, María Domínguez, et Tad Gonsalves. «Design of Robust and Energy-Efficient ATO Speed Profiles of Metropolitan Lines Considering Train Load Variations and Delays.» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015: vol. 16(4), pp. 2061-2071.

Fonseca, Carlos, et Peter Fleming. «An overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization.» Dans *Evolutionary Computation*, vol. 3(1). IEEE, 1995.

Fouilhoux, Pierre. «Optimisation Combinatoire : Programmation Linéaire et Algorithmes.» *Université Pierre et Marie Curie.* 2015. www-desir.lip6.fr/~fouilhoux/documents/OptComb.pdf.

Fushsberger, Martin. *Algorithms for railway traffic management in complex central station areas.* Thèse de doctorat, ETH Zurich, 2012.

Gély, Laurent. *Modélisation et optimisation de la gestion opérationnelle des circulations en cas d'aléas.* Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2011.

Ghaemi, Nadjla, Rob Goverde, et Oded Cats. «Railway disruption timetable: Short-turnings in case of complete blockage.» *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT).* Birmingham, United Kingdom, 2016.

Giua, Alessandro, et Carla Seatzu. «Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets.» *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008: vol. 5(3), pp. 431-445.

Hansen, Ingo Arne, et Jörn Pachl. *Railway timetable & traffic.* Eurailpress, 2008.

Hao, Jin-Kao, Philippe Galinier, et Michel Habib. «Méthaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes.» *Revue d'Intelligence Artificielle*, 1999: vol. 13(2), pp. 283-324.

Hei, Xinhong, Kai Zhao, Weigang Ma, Guo Xie, et Lei Wang. «A Real-Time Model of Railway Interlocking System Based on UML Extension Mechanism.» *4th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS).* Beijing, China, 2013.

Ho, T.K., et T.H. Yeung. «Railway junction traffic control by heuristic methods.» *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2001: vol.148(1), pp. 77-84.

IEC 62290-1. «Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts.» pp. 16-18. IEC, 2006.

IEEE Standard 1474.1. *IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements.* 2004.

Iqbal, Syed Muhammad Zeeshan, Hakan Grahn, et Johanna Tornquist Krasemann. «Multi-Strategy Based Train Re-Scheduling During Railway Traffic Disturbances.» *Proceedings of 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis.* Copenhagen, Denmark, 2013.

Jones, Karl. «Comparison of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimisation.» *International Conference on Computer Systems and Technologies CompSysTech'2005.* Varna, Bulgarie, 2005.

Kersbergen, Bart, Ton van den Boom, et Bart De Schutter. «Distributed Model Predictive Control for Rescheduling of Railway Traffic.» *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).* Qingdao, China , 2014.

Lalouette, Jerome, Régis Caron, Francis Scherb, Nicolae Brinzei, Jean-François Aubry, et Olaf Malassé. «Evaluation des performances du système de signalisation ferroviaire européen superpose au système français, en présence de défaillances.» *17e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu'2010.* La Rochelle, France, 2010.

Li, Shukai, Bart De Schutter, Lixing Yang, et Ziyou Gao. «Robust Model Predictive Control for Train Regulation in Underground Railway Transportation.» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016: vol. 24(3), pp. 1075-1083.

Marler, R.T., et J.S. Arora. «Survey of multi-objective optimization methods for engineering.» *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004: vol. 26(6), pp. 369–395.

Mascis, Alessandro, Dario Pacciarelli, et Marco Pranzo. «Scheduling models for short-term railway traffic optimisation.» *Computer-aided Systems in Public Transport*, 2008: pp. 71-90.

Mascis, Alessandro, et Dario Pacciarelli. «Job shop scheduling with blocking and no-wait constraints.» *European Journal of Operational Research*, 2002: vol. 143(3), pp. 498-517.

Ning, Bin, Jing Xun, Shigen Gao, et Lingying Zhang. «An Integrated Control Model for Headway Regulation and Energy Saving in Urban Rail Transit.» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015: vol. 16(3), pp. 1469-1478.

OpenTrack - Railway Simulation. s.d. www.opentrack.ch/.

Pellegrini, Paola, Gregory Marliere, et Joaquin Rodriguez. «Real time railway trafic management modeling track-circuits.» *ATMOS, 12th Workshop on Algorithmic*

Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems. Ljubljana, Slovenia, 2012.

Pochet, Juliette, Sylvain Baro, et Guillaume Sandou. «Automatic Train Supervision for a CBTC Suburban Railway Line Using Multi-Objective Optimization.» *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2017).* Yokohama, 2017.

—. «Supervision and rescheduling of a mixed CBTC traffic on a suburban railway line.» *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT 2016).* Birmingham, 2016.

Reisig, Wolfgang. *Understanding Petri Nets.* Springer, 2013.

Retiveau, Roger. *La signalisation ferroviaire.* Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1987.

Schön, Walter, Guy Laurraufie, Gilbert Moëns, et Jacques Poré. *Signalisation et automatisme ferroviaire.* La Vie du Rail, 2013.

Selvi, V., et R. Unmarani. «Comparative Analysis of Ant Colony and Particle Swarm Optimization Techniques.» *International Journal of Computer Applications*, 2010: vol. 5(4).

Sheu, Jih-Wen, et Wei-Song Lin. «Energy-Saving Automatic Train Regulation Using Dual Heuristic Programming.» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012: vol. 61(4), pp. 1503-1514.

Song, Wei. *Real Time Dispatching Control In Transit Systems.* Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1998.

Su, Ruidan, Qianrong Gu, et Tao Wen. «Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm.» *Journal of Applied Mathematics*, 2014: vol. 2014, ID 507308.

Törnquist, Johanna. «Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching : A review of models and algorithms.» *ATMOS2005, 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways.* Palma de Mallorca, Spain, 2005.

Törnquist, Johanna, et Jan Persson. «N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances.» *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007: vol. 41(3), pp. 342-362.

—. «Train Traffic Deviation Handling Using Tabu Search and Simulated Annealing.» *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '05).* Big Island, Hawaii USA, 2005.

Van Breusegem, V., G. Campion, et G. Bastin. «Traffic Modeling and State Feedback Control for Metro Lines.» *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991: vol. 6(7), pp. 770-784.

Verchère, Pierre Marie. «Les principes d'exploitation du réseau ferré dans les zones dense d'Île-de-France.» *Revue Générale des Chemins de Fer*, Avril 2014: pp. 15-24.

Verma, Anshul, et K.K. Pattanaik. «Multi-Agent Communication Based Train Control System for Indian Railways: The Structural Design.» *Journal of Modern Transportation*, 2015: vol. 23(4), pp. 272–286.

Wegele, Stefan, Roman Slovák, et Eckehard Schnieder. «Automatic dispatching of train operations using a hybrid optimisation method.» *Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research.* Seoul, Korea, 2008.

Wenjun, Wei, et Fan Duowang. «Study on Multi-Agent Railway Signal Control System.» *Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2011 IEEE International Conference on.* Kunming, China, 2011.

Xu, Yanping, Xia Zhao, Lin Wang, Xun Liu, et Qiongyan Zhang. «Optimal Control of Automatic Train Operation Based on Multi-scale Dynamic Programming.» *33rd Chinese Control Conference (CCC).* Nanjing, China, 2014.

Yoon, Yong-Ki, Won-You Kim, et Yong-Kyu Kim. «The assessment of interlocking control algorithm developed by Rhapsody.» *8th World Congress on Railway Research.* Seoul, Korea, 2008.

Zidi, Salah. *SARR : Système d'aide à la régulation et à la reconfiguration des réseaux de transport multimodal.* Thèse de doctorat, Université Lille 1, 2007.

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC)

Titre : Evaluation de performance d'une ligne ferroviaire suburbaine partiellement équipée d'un automatisme CBTC

Mots clés : régulation, ferroviaire, CBTC, algorithme génétique

Résumé : En zone dense, la croissance actuelle du trafic sur les lignes ferroviaires suburbaines conduit les exploitants à déployer des systèmes de contrôle-commande avancés des trains, tels que les systèmes dits « CBTC » (Communication Based Train Control) jusque-là réservés aux systèmes de métro. Les systèmes CBTC mettent en œuvre un pilotage automatique des trains et permettent une amélioration significative des performances. Par ailleurs, ils peuvent inclure un module de supervision de la ligne en charge de réguler la marche des trains en cas d'aléa, améliorant ainsi la robustesse du trafic. En tirant profit de l'état de l'art dans le secteur métro et dans le secteur ferroviaire lourd, les travaux présentés dans ce manuscrit cherchent à contribuer à l'adaptation des fonctions de régulation des systèmes CBTC pour l'exploitation de lignes ferroviaires suburbaines.

L'approche du problème débute par la construction de l'architecture fonctionnelle d'un module de supervision pour un système CBTC standard. Nous proposons ensuite une méthode de régulation basée sur une stratégie de commande prédictive et sur une optimisation multi-objectif des consignes des trains automatiques. L'outil SNCF nommé SIMONE, et développé en collaboration avec les travaux de thèse, a permis d'évaluer les performances de l'approche proposée et de la comparer à une méthode de régulation individuelle basée sur une heuristique simple. La régulation multi-objectif développée propose de bonnes solutions au problème, dans la majorité des cas plus satisfaisantes que celles proposées par la régulation individuelle. Le manuscrit se termine par des perspectives de recherche intéressantes.

Title : Performance of a suburban railway line partially equipped with a CBTC system

Keywords : rescheduling, railway, CBTC, genetic algorithm

Abstract : In high-density area, the demand for railway transportation is continuously increasing. Operating companies turn to new intelligent signaling and control systems, such as Communication Based Train Control (CBTC) to operate trains in automatic pilot and increase the line capacity without expensive modification of infrastructures. CBTC systems can also include a supervision module in charge of adapting train behavior according to operating objectives and to disturbances, increasing line robustness. Making the most of the state-of-the-art regarding subway and railway systems, the presented work intend to contribute to the design of supervision and rescheduling functions of CBTC systems operating suburban railway systems.

Our approach starts by designing a supervision module for a standard CBTC system. Then, we propose a rescheduling method based on a model predictive control approach and a multi-objective optimization of automatic train commands. A simulation tool (SIMONE) was developed by SNCF in association with the presented work to evaluate the proposed approach on disturbed scenarios and to compare its performances with an individual heuristic strategy. The proposed multi-objective method provides good solutions to the rescheduling problem and over-performs the individual strategy. We conclude with interesting perspectives for future work.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France