



# Résilience de bout en bout pour la (re)conception d'un système de transport

Kpotissan Adjetey-Bahun

## ► To cite this version:

Kpotissan Adjetey-Bahun. Résilience de bout en bout pour la (re)conception d'un système de transport. Recherche opérationnelle [math.OC]. Université de Technologie de Troyes, 2016. Français. NNT : 2016TROY0012 . tel-03361815

**HAL Id: tel-03361815**

**<https://theses.hal.science/tel-03361815>**

Submitted on 1 Oct 2021

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

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

Thèse  
de doctorat  
de l'UTT

**Kpotissan ADJETEY-BAHUN**

# Résilience de bout en bout pour la (re)conception d'un système de transport



**Spécialité :**  
Optimisation et Sûreté des Systèmes

2016TROY0012

Année 2016



**utt**  
université de technologie  
Troyes

---

---

# THESE

*pour l'obtention du grade de*

**DOCTEUR de l'UNIVERSITE  
DE TECHNOLOGIE DE TROYES  
Spécialité : OPTIMISATION ET SURETE DES SYSTEMES**

*présentée et soutenue par*

**Kpotissan ADJETEY-BAHUN**

*le 30 mai 2016*

---

---

**Résilience de bout en bout pour la (re)conception  
d'un système de transport**

---

---

## JURY

|                    |                                 |                    |
|--------------------|---------------------------------|--------------------|
| M. N.-E. EL FAOUZI | DIRECTEUR DE RECHERCHE IFSTTAR  | Président          |
| Mme A. AVENEL      | INGENIEURE RATP                 | Examineur          |
| M. B. BIRREGAH     | PROFESSEUR ASSISTANT UTT        | Directeur de thèse |
| M. É. CHÂTELET     | PROFESSEUR DES UNIVERSITES      | Directeur de thèse |
| M. A. EL MOUDNI    | PROFESSEUR DES UNIVERSITES      | Rapporteur         |
| M. E.-M. EL-KOURSI | DIRECTEUR DE RECHERCHE IFSTTAR  | Examineur          |
| M. F. VANDERHAEGEN | PROFESSEUR DES UNIVERSITES      | Rapporteur         |
| M. E. ZIO          | PROFESSEUR ECOLE CENTRALE PARIS | Examineur          |



# Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Babiga Birregah et à Eric Châtelet, mes directeurs de thèse pour leur encadrement et leurs conseils tout au long de ces trois années de thèse. Je remercie également Jean-Luc Planchet, mon responsable scientifique à la RATP pour l'expertise métier qu'il a apportée au travail réalisé. Ils ont fait preuve, tous les trois, de grandes qualités humaines et professionnelles.

J'adresse également ma plus sincère reconnaissance à Frédéric Vanderhaegen et à Abdellah El-Moudni qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ces travaux, et je tiens à leur exprimer ma plus profonde gratitude pour l'attention qu'ils y ont portée. Je remercie tout autant les autres membres du jury, Nour-Eddin EL FAOUZI, Enrico Zio, El-Miloudi El-Koursi, et Paul Théron. Je sais par avance que leurs commentaires et remarques seront constructifs.

Cette thèse a été réalisée au sein de l'unité Sécurité, Télésupervision et Information Voyageurs (STIV) du département Maîtrise d'Ouvrage des Projets (MOP) de la RATP, dans le cadre d'une convention CIFRE. Elle est faite en collaboration avec le Laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes (LM2S) de l'Université de Technologie de Troyes (UTT). C'est l'occasion de remercier Alice Avenel de m'avoir accueilli au sein de l'unité STIV. Je remercie l'ensemble de l'unité STIV qui m'a fait un excellent accueil et au sein de laquelle il a été fort agréable de travailler. Je n'oublie pas Edgar Laurens-Fonseca, Jean Caire et Julian Pepinster pour leurs contributions à ces travaux de thèse. Je remercie également l'ensemble des membres du LM2S que j'ai côtoyés pendant cette thèse.

Mes derniers remerciements vont à mes parents, mes frères et sœurs. Je ne les remercierai jamais assez pour tous les sacrifices consentis à mon égard tout au long de ma vie. S'il y a une personne pour qui ces trois années n'ont pas été faciles, c'est bien Raïssa, ma femme, qui a eu à me supporter pendant tout ce temps. Un grand merci à elle de tout mon cœur pour son amour, sa compréhension et sa patience. Enfin, je remercie Sika, notre fille, pour la joie qu'elle nous apporte.



# Résumé

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse consistent à développer un modèle permettant d'évaluer et d'améliorer la résilience d'un système de transport ferroviaire de masse.

L'état de l'art des approches de quantification de la résilience a montré leurs limites quant à leur adéquation au système de transport ferroviaire de masse. Le système modélisé dans le cadre de cette étude se compose des quatre sous-systèmes respectivement de transport, d'énergie, de télécommunication et d'organisation. La caractérisation et la modélisation des interdépendances intra et inter sous-systèmes conduisent à mieux comprendre et étudier ce type de système. Des indicateurs de performance adaptés à ce système (le nombre de passagers arrivés à destination, le retard cumulé et la charge des passagers) permettent de quantifier la performance puis la résilience du système. Une application de ce modèle est proposée sur le réseau de transport ferroviaire de Paris. Par la suite, la modélisation des perturbations et des plans de gestion de crise ont permis d'évaluer l'impact/l'efficacité de ces plans de gestion pour les améliorer. A partir de ce modèle, un simulateur a été développé, et une procédure de mise en place d'une démarche de résilience de bout en bout dans un système de transport ferroviaire de masse est proposée. Les conditions d'exploitation sont intégrées dans les indicateurs topologiques des systèmes de transport – que l'on trouve dans la littérature – via le modèle. Les indicateurs de résilience ainsi obtenus se montrent plus pertinents que ces indicateurs topologiques usuels.

**Mots-clés :** résilience (psychologie), transports ferroviaires, gestion des crises, simulation par ordinateur



# Abstract

This thesis aims to develop a model that assesses and improves the resilience of mass railway transportation system.

A state of the art on resilience quantification approaches in sociotechnical systems reveals some limitations relative to their adequacy to the mass railway transportation systems. The model developed in this work is helping to give some answers to these limitations. We identify and develop four interrelated subsystems : transportation, power, telecommunication and organization subsystems. We also characterized and modeled these subsystems' interdependencies. This allows us to get insight into the system holistically. We also propose and quantify some performance indicators of this system. These performance indicators are used afterwards to quantify the resilience of the system. The number of passengers that reach their destination station, passenger delay and passenger load are performance indicators used in this work. The model is applied to the Paris mass railway transportation system. After modeling perturbations, we also assess the extent to which some crisis management plans are taken into account in the model. Then, a simulator has been developed, and an approach that aims to implement an end-to-end resilient system is proposed.

Operating conditions of railway transportation system are incorporated into topological indicators of transportation systems – found in the literature – through the model. This allows us to show the relevance of these operating-conditions dependent indicators relative to the usual topological indicators of the studied network.

**keywords** : resilience (personality trait), railroads, crisis management, computer simulation



# Table des matières

|                                                                                                                                     |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Remerciements</b>                                                                                                                | <b>i</b>    |
| <b>Résumé</b>                                                                                                                       | <b>iii</b>  |
| <b>Abstract</b>                                                                                                                     | <b>v</b>    |
| <b>Table des matières</b>                                                                                                           | <b>x</b>    |
| <b>Liste des figures</b>                                                                                                            | <b>xii</b>  |
| <b>Liste des tableaux</b>                                                                                                           | <b>xiv</b>  |
| <b>Liste des algorithmes</b>                                                                                                        | <b>xv</b>   |
| <b>Définitions et acronymes</b>                                                                                                     | <b>xvii</b> |
| <b>1 Introduction générale</b>                                                                                                      | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivation . . . . .                                                                                                            | 1           |
| 1.2 Les objectifs de la thèse . . . . .                                                                                             | 4           |
| 1.2.1 Identifier des indicateurs pertinents pour la quantification de la résilience<br>d'un système de transport de masse . . . . . | 4           |
| 1.2.2 Construire un modèle d'évaluation de la résilience du système de transport .                                                  | 5           |
| 1.2.3 Proposer une procédure de mise en place d'une démarche de résilience . . . .                                                  | 5           |
| 1.3 Les hypothèses . . . . .                                                                                                        | 6           |
| 1.3.1 Le réseau étudié et son environnement . . . . .                                                                               | 6           |
| 1.3.2 Les données du modèle proposé . . . . .                                                                                       | 7           |
| 1.3.3 Les conditions d'application des travaux de la thèse . . . . .                                                                | 7           |

|          |                                                                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4      | Organisation de la thèse . . . . .                                                                         | 7         |
| <b>2</b> | <b>La résilience des systèmes sociotechniques : état de l'art</b>                                          | <b>9</b>  |
| 2.1      | Introduction . . . . .                                                                                     | 9         |
| 2.2      | Définition de la résilience . . . . .                                                                      | 11        |
| 2.2.1    | Systèmes sociotechniques . . . . .                                                                         | 11        |
| 2.2.2    | Notion d'interdépendances . . . . .                                                                        | 12        |
| 2.2.3    | Définitions de la résilience des systèmes autres que les systèmes sociotechniques                          | 14        |
| 2.2.4    | Définitions de la résilience des systèmes sociotechniques . . . . .                                        | 14        |
| 2.3      | Modèles qualitatifs de la résilience . . . . .                                                             | 18        |
| 2.4      | Modèles quantitatifs de la résilience . . . . .                                                            | 19        |
| 2.4.1    | Quantification de la résilience . . . . .                                                                  | 20        |
| 2.4.2    | Cas particulier des systèmes de transport . . . . .                                                        | 27        |
| 2.5      | Contribution des travaux de cette thèse à la résilience des systèmes de transport de masse . . . . .       | 34        |
| 2.6      | Conclusion . . . . .                                                                                       | 36        |
| <b>3</b> | <b>Proposition d'un modèle de quantification de la résilience dans les systèmes ferroviaires de masse</b>  | <b>37</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .                                                                                     | 37        |
| 3.2      | Revue des modèles de simulation des systèmes ferroviaires et des perturbations dans ces systèmes . . . . . | 38        |
| 3.2.1    | NEMO : Network Evaluation MOdel . . . . .                                                                  | 38        |
| 3.2.2    | SIMONE : SIMulation of Model NEtwork . . . . .                                                             | 40        |
| 3.2.3    | OpenTrack . . . . .                                                                                        | 41        |
| 3.2.4    | Limites des modèles de simulation des systèmes ferroviaires présentés . . . .                              | 42        |
| 3.3      | Caractérisation de la performance d'un système de transport ferroviaire de masse . .                       | 43        |
| 3.4      | Indicateurs de performance utilisés . . . . .                                                              | 44        |
| 3.4.1    | Le nombre de passagers arrivés à destination . . . . .                                                     | 45        |
| 3.4.2    | Le retard total accumulé par l'ensemble des passagers . . . . .                                            | 45        |
| 3.4.3    | La charge de passagers à une station à un instant donné . . . . .                                          | 45        |
| 3.5      | Description du système et des sous-systèmes du modèle proposé . . . . .                                    | 46        |

|          |                                                                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.1    | Vue globale du modèle proposé . . . . .                                                                               | 46        |
| 3.5.2    | Sous-système de transport . . . . .                                                                                   | 47        |
| 3.5.3    | Sous-système d'énergie . . . . .                                                                                      | 51        |
| 3.5.4    | Sous-système d'organisation . . . . .                                                                                 | 53        |
| 3.5.5    | Sous-système de télécommunication . . . . .                                                                           | 55        |
| 3.6      | Interdépendances entre les sous-systèmes . . . . .                                                                    | 57        |
| 3.6.1    | Le sous-système de transport . . . . .                                                                                | 58        |
| 3.6.2    | Le sous-système d'énergie . . . . .                                                                                   | 59        |
| 3.6.3    | Le sous-système de télécommunication . . . . .                                                                        | 60        |
| 3.6.4    | Le sous-système d'organisation . . . . .                                                                              | 60        |
| 3.7      | Modélisation formelle des sous-systèmes et des interdépendances inter et intra sous-systèmes . . . . .                | 61        |
| 3.7.1    | Modélisation du sous-système de transport . . . . .                                                                   | 61        |
| 3.7.2    | Modélisation du sous-système d'énergie . . . . .                                                                      | 72        |
| 3.7.3    | Modélisation des sous-systèmes de télécommunication et d'organisation . . .                                           | 75        |
| 3.8      | Modélisation des perturbations et des plans de gestion de crise . . . . .                                             | 76        |
| 3.9      | Conclusion . . . . .                                                                                                  | 79        |
| <b>4</b> | <b>Evaluation des indicateurs de résilience d'un système de transport ferroviaire</b>                                 | <b>81</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .                                                                                                | 81        |
| 4.2      | La base de données TJRF . . . . .                                                                                     | 81        |
| 4.2.1    | La présentation de l'enquête TJRF . . . . .                                                                           | 82        |
| 4.2.2    | La méthodologie utilisée . . . . .                                                                                    | 83        |
| 4.3      | Description de l'application implémentant le modèle . . . . .                                                         | 84        |
| 4.3.1    | La base de données du modèle . . . . .                                                                                | 85        |
| 4.3.2    | Description des fonctionnalités de l'application . . . . .                                                            | 87        |
| 4.3.3    | Validation du modèle sur le réseau étudié . . . . .                                                                   | 89        |
| 4.4      | Les résultats sur un scénario : la défaillance d'un poste de redressement . . . . .                                   | 96        |
| 4.4.1    | Impact d'une perturbation sur les indicateurs de performance du système . .                                           | 96        |
| 4.4.2    | Impact des plans de gestion de crise sur les indicateurs de performance du système pendant une perturbation . . . . . | 100       |

|          |                                                                                                                  |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5      | Classement des stations du réseau selon l'impact de leur défaillance sur les indicateurs de résilience . . . . . | 104        |
| 4.6      | Proposition d'une démarche d'évaluation et de maintien d'un niveau de résilience du système . . . . .            | 106        |
| 4.7      | Discussions sur le modèle proposé et ses limites . . . . .                                                       | 108        |
| 4.8      | Conclusion . . . . .                                                                                             | 109        |
| <b>5</b> | <b>Intégration des conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques</b>                               | <b>111</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .                                                                                           | 111        |
| 5.2      | Définition des graphes dynamiques et des indicateurs topologiques de performances correspondants . . . . .       | 112        |
| 5.2.1    | La définition d'un graphe dynamique . . . . .                                                                    | 112        |
| 5.2.2    | Adaptation des graphes dynamiques aux réseaux de transport ferroviaire de masse . . . . .                        | 113        |
| 5.2.3    | La notion du plus court chemin dans les graphes dynamiques . . . . .                                             | 115        |
| 5.2.4    | La centralité d'intermédiarité (betweenness centrality) . . . . .                                                | 116        |
| 5.2.5    | Le plus court chemin moyen . . . . .                                                                             | 116        |
| 5.3      | Intégration des conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques des graphes dynamiques . . . . .     | 117        |
| 5.4      | Application au réseau ferroviaire de Paris . . . . .                                                             | 119        |
| 5.4.1    | Les caractéristiques statiques du réseau . . . . .                                                               | 120        |
| 5.4.2    | Les caractéristiques dynamiques du réseau . . . . .                                                              | 124        |
| 5.5      | Conclusion . . . . .                                                                                             | 127        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion générale</b>                                                                                       | <b>129</b> |
| 6.1      | Rappel des objectifs de cette thèse . . . . .                                                                    | 129        |
| 6.2      | Bilan des travaux effectués dans cette étude . . . . .                                                           | 129        |
| 6.3      | Les limites et les perspectives de l'approche proposée . . . . .                                                 | 130        |
|          | <b>Bibliographie</b>                                                                                             | <b>132</b> |

# Table des figures

|      |                                                                                                                                                        |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Les relations liant les mesures de sécurité/sûreté d'un système et les capacités d'un système résilient. . . . .                                       | 10 |
| 2.2  | Conceptualisation d'un système sociotechnique. Source : [28] (modifié). . . . .                                                                        | 12 |
| 2.3  | Mesure de la résilience - définition conceptuelle. Source [29] modifié . . . . .                                                                       | 16 |
| 2.4  | Définition conceptuelle de la résilience selon [19] . . . . .                                                                                          | 18 |
| 2.5  | Mesure de la résilience - définition conceptuelle, [16] . . . . .                                                                                      | 21 |
| 2.6  | Paramètres d'évaluation de la résilience de [54] . . . . .                                                                                             | 23 |
| 2.7  | Un exemple de graphe invariant d'échelle : Le réseau parisien de transport ferroviaire de masse. Les nœuds rouges sont les nœuds d'attraction. . . . . | 30 |
| 2.8  | Modélisation multi-couches des systèmes de transport dans [47, 48] . . . . .                                                                           | 33 |
| 2.9  | Interdépendances entre ces variables agissant sur la résilience des systèmes de transport [97] . . . . .                                               | 34 |
| 3.1  | Différences entre les modèles microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques [96] .                                                                   | 39 |
| 3.2  | Les différents modules de NEMO [110] . . . . .                                                                                                         | 40 |
| 3.3  | Les différents modules de SIMONE [82] . . . . .                                                                                                        | 41 |
| 3.4  | L'architecture du modèle OpenTrack [91] . . . . .                                                                                                      | 42 |
| 3.5  | Vue globale du système de transport ferroviaire proposé. . . . .                                                                                       | 47 |
| 3.6  | Acheminement de l'énergie électrique dans le réseau. . . . .                                                                                           | 51 |
| 3.7  | Alimentation des PRs par les PHTs. . . . .                                                                                                             | 52 |
| 3.8  | L'organisation dans le modèle. . . . .                                                                                                                 | 53 |
| 3.9  | Les interactions entre les acteurs. . . . .                                                                                                            | 54 |
| 3.10 | Le sous-système télécommunication pour une ligne de Métro/RER. . . . .                                                                                 | 56 |
| 3.11 | Les interactions entre les acteurs. . . . .                                                                                                            | 77 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1  | Le schéma relationnel de la base de données associée à l'application. . . . .                                                                                                                                                      | 86  |
| 4.2  | L'interface graphique de l'application. . . . .                                                                                                                                                                                    | 90  |
| 4.3  | Le réseau étudié. . . . .                                                                                                                                                                                                          | 91  |
| 4.4  | La charge moyenne des passagers dans le réseau au cours du temps. . . . .                                                                                                                                                          | 92  |
| 4.5  | L'écart type de la charge des passagers dans le réseau au cours du temps. . . . .                                                                                                                                                  | 93  |
| 4.6  | La courbe de convergence de l'écart type maximal obtenu au cours du temps ( $\max_t \sigma(t)$ )<br>en faisant varier le nombre de simulations de quatre à vingt. . . . .                                                          | 93  |
| 4.7  | La courbe de convergence du pourcentage de l'écart type maximal par rapport à la<br>charge moyenne des passagers. . . . .                                                                                                          | 93  |
| 4.8  | La charge moyenne des passagers par ligne au cours du temps. . . . .                                                                                                                                                               | 94  |
| 4.9  | La charge des passagers au cours du temps sur la ligne impactée. . . . .                                                                                                                                                           | 99  |
| 4.10 | Le retard cumulé des passagers au cours du temps sur la ligne impactée. . . . .                                                                                                                                                    | 99  |
| 4.11 | Absorption - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée. . . .                                                                                                                                               | 101 |
| 4.12 | Adaptation - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée. . . .                                                                                                                                               | 102 |
| 4.13 | Rapidité - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée. . . . .                                                                                                                                               | 102 |
| 4.14 | Relation entre $\min_t \{P_L(t)\}$ et $R_{P_L}$ lorsque le temps de réparation augmente. . . . .                                                                                                                                   | 103 |
| 4.15 | Combinaison des capacités d'absorption ( $\beta=30$ mn), d'adaptation et de rapidité<br>(temps de réparation = 90 mn) - la charge des passagers au cours du temps sur la<br>ligne perturbée. . . . .                               | 104 |
| 4.16 | Cartographie des stations les plus sensibles du réseau. . . . .                                                                                                                                                                    | 106 |
| 4.17 | Procédure de mise en place d'une démarche de résilience de bout en bout. . . . .                                                                                                                                                   | 107 |
| 5.1  | Fonction représentant le poids de l'arc $(v, v') \in A_{train}$ au cours du temps : $t_i, \forall i \in$<br>$\{1, \dots, 6\}$ représente la date de départ de chaque train du nœud $v$ au nœud $v'$ . . . .                        | 118 |
| 5.2  | Test montrant que le réseau étudié est un graphe invariant d'échelle : l'histogramme<br>correspondant aux fréquences des degrés des nœuds et la courbe (rouge) représente<br>la fonction $P(x)$ avec $\gamma = 2.424344$ . . . . . | 122 |

# Liste des tableaux

|      |                                                                                                                                                                  |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.1  | Catégorisation des évènements redoutés dans un système de transport ferroviaire de masse . . . . .                                                               | 3   |
| 3.1  | Les modules élémentaires du module Simulation Library de SIMONE . . . . .                                                                                        | 42  |
| 3.2  | Les fonctionnalités des modèles de simulation des systèmes ferroviaires . . . . .                                                                                | 43  |
| 3.3  | Les fonctionnalités des modèles de simulation des systèmes ferroviaires . . . . .                                                                                | 46  |
| 3.4  | Les relations entre les composantes d'une station et les sous-fonctions . . . . .                                                                                | 48  |
| 3.5  | Les relations entre les composantes d'une voie de chemin de fer et les sous-fonctions . . . . .                                                                  | 49  |
| 3.6  | Les relations entre les serveurs/trains et les sous-fonctions . . . . .                                                                                          | 50  |
| 3.7  | Les relations entre les composantes du sous-système d'énergie et les sous-fonctions . . . . .                                                                    | 53  |
| 3.8  | Les relations entre les composantes du sous-système organisation et les sous-fonctions . . . . .                                                                 | 55  |
| 3.9  | Les relations entre les composantes du sous-système télécommunication et les sous-fonctions . . . . .                                                            | 57  |
| 3.10 | L'influence des composantes du sous-système de transport sur les autres sous-systèmes . . . . .                                                                  | 59  |
| 3.11 | L'influence des composantes du sous-système d'énergie sur les autres sous-systèmes . . . . .                                                                     | 60  |
| 3.12 | L'influence des composantes du sous-système de télécommunication sur les autres sous-systèmes . . . . .                                                          | 60  |
| 3.13 | L'influence des composantes du sous-système d'organisation sur les autres sous-systèmes . . . . .                                                                | 61  |
| 4.1  | TJRF : les entrants par ligne . . . . .                                                                                                                          | 95  |
| 4.2  | Le plus grand écart type obtenu par ligne sur la durée de la simulation et son pourcentage par rapport à la charge moyenne des passagers correspondante. . . . . | 96  |
| 4.3  | Les différents scénarios simulés. . . . .                                                                                                                        | 97  |
| 4.4  | Les valeurs de $R_{P_L}$ pour les scénarios considérés . . . . .                                                                                                 | 100 |

|     |                                                                                                                                       |     |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5 | Les valeurs de $R_{P_L}$ pour différents plans de gestion de perturbation. . . . .                                                    | 104 |
| 4.6 | Classement des stations selon l'impact de leur défaillance sur $R_{P_L}$ . . . . .                                                    | 105 |
| 5.1 | Classement des stations les plus sensibles aux perturbations par rapport aux indicateurs topologiques dans le réseau étudié . . . . . | 124 |
| 5.2 | Classement des stations du réseau selon leur pertinence par rapport aux indicateurs dynamiques. . . . .                               | 125 |
| 5.3 | Comparaison des différentes approches de classification des composantes . . . . .                                                     | 126 |

# Liste des Algorithmes

|   |                                                                                   |     |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Classification des composantes d'un système . . . . .                             | 26  |
| 2 | Algorithme de simulation d'un système de transport ferroviaire de masse . . . . . | 71  |
| 3 | Le pseudo-code correspondant à l'équation 3.7 . . . . .                           | 73  |
| 4 | Procédure en cas de défaillance d'un PR . . . . .                                 | 78  |
| 5 | Algorithme du plus court chemin dans les graphes dynamiques . . . . .             | 120 |



# Définitions et acronymes

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>CBTC</b>           | Communications-Based Train Control. Le système CBTC est un système de contrôle de vitesse et de pilotage automatique des transports urbains. Son fonctionnement est basé sur l'espace-ment des trains, sur leur localisation indépendamment de tout dispositif fixe de détection matérielle des trains (circuits de voie, compteurs d'essieux, feux de signalisation, etc.) | 43, 53                                |
| <b>crise</b>          | Un événement imprévu ou une situation qui menace ou impacte sérieusement le fonctionnement ou la viabilité du système de transport ou encore l'image d'un opérateur de transport public et qui nécessite une réponse coordonnée plus large que celle relative à un incident.                                                                                                | 5, 16, 17, 19, 20, 22, 24, 35, 37, 53 |
| <b>gares/stations</b> | Une station est communément associée à une ligne de métro alors qu'une gare est associée à une ligne RER ou à une grande ligne. Dans ce document, par abus de langage, une gare sera aussi appelée station.                                                                                                                                                                 | 48, 52                                |
| <b>incident</b>       | Il est utilisé comme thème générique pour englober les circonstances relatives aux questions de sécurité/sûreté dans le système de transport étudié.                                                                                                                                                                                                                        | 13, 15, 20, 77                        |
| <b>interstation</b>   | Portion de ligne de métro/RER comprise entre deux stations.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 100                                   |
| <b>NRBC</b>           | NRBC: Nucléaires, Radiologiques, Biologiques, Chimiques.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 7, 26                                 |
| <b>PCC</b>            | Poste de Commande Centralisé. Il est constitué du chef de régulation et de tous les agents qui l'assistent. Pour mener à bien leurs missions, ces agents disposent des outils permettant de réguler le trafic et de gérer les incidents sur la ligne gérée par ce PCC (TCO, postes opérateurs, etc.).                                                                       | 50–52, 54, 56                         |

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>PEF</b>          | Poste d'Éclairage-Force. Les PEFs alimentent les installations et équipements électriques des tunnels et station du métro ainsi que les ateliers et bâtiments administratifs. Nécessaire au confort des usagers et des agents, des groupes électrogènes sont là en cas de panne d'un PEF. | 51–53, 87                                   |
| <b>perturbation</b> | Ce thème est utilisé dans ce document pour désigner les événements qui empêchent le bon fonctionnement du système étudié.                                                                                                                                                                 | 1, 7–10, 12, 15, 26, 31, 40, 45, 48, 54, 65 |
| <b>PG</b>           | Permanence Générale. La permanence générale (PG) est l'endroit où les décisions stratégiques pour l'opérateur de transport se prennent en cas de graves perturbations du système de transport.                                                                                            | 54                                          |
| <b>PHT</b>          | Poste de Haute Tension. Les PHTs reçoivent le courant du réseau externe et le transforme puis le distribue aux PRs et aux PEFs.                                                                                                                                                           | 51, 52, 87                                  |
| <b>PR</b>           | Poste de Redressement. La fourniture de l'énergie de traction du réseau Métro - RER est assurée par des PRs. Ces postes abaissent le courant alternatif reçu et le redressent en courant continu adapté au fonctionnement des trains.                                                     | 51, 52                                      |
| <b>RATP</b>         | RATP: Régie Autonome des Transports Parisiens. C'est l'un des opérateurs de transport assurant l'exploitation d'une partie des transports en commun de Paris et de sa banlieue.                                                                                                           | 4, 6, 81, 89                                |
| <b>RER</b>          | RER: Réseau Express Régional. C'est un réseau ferré de transport en commun desservant une/des région(s) fortement urbanisée(s).                                                                                                                                                           | 1, 4, 6, 89, 94                             |
| <b>SF1</b>          | Une des sous-fonctions d'un système de transport ferroviaire définies dans notre modèle: la sous-fonction conduite/mouvement et sécurité des trains                                                                                                                                       | 44, 50                                      |
| <b>SF2</b>          | Une des sous-fonctions d'un système de transport ferroviaire définies dans notre modèle: la sous-fonction supervision/gestion du trafic                                                                                                                                                   | 44, 50                                      |

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |           |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SF3</b>   | Une des sous-fonctions d'un système de transport ferroviaire définies dans notre modèle: la sous-fonction gestion des passagers                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 44, 50    |
| <b>SF4</b>   | Une des sous-fonctions d'un système de transport ferroviaire définies dans notre modèle: la sous-fonction disponibilité du réseau                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 44        |
| <b>SGDSN</b> | SGDSN: Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale. Il traite de l'ensemble des questions stratégiques de défense et de sécurité, qu'il s'agisse de la programmation militaire, de la politique de dissuasion, de la programmation de sécurité intérieure concourant à la sécurité nationale, de la sécurité économique et énergétique, de la lutte contre le terrorisme ou de la planification des réponses aux crises. | 4         |
| <b>SNCF</b>  | SNCF: Société Nationale des Chemins de Fer français. C'est l'un des opérateurs de transport assurant l'exploitation d'une partie des transports en commun de Paris et de sa banlieue. Elle exploite aussi le réseau de chemin de fer liant les grandes villes de toute la France.                                                                                                                                                          | 6, 84, 89 |
| <b>TCO</b>   | Tableau de Contrôle Optique. Au PCC, le TCO représente les trains en déplacement sous forme de représentation graphique du réseau.).                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 50, 56    |
| <b>TETRA</b> | Terrestrial Trunked Radio. Le TETRA est un système de radio numérique mobile professionnel bi-directionnel (comme des talkie-walkies évolués), spécialement conçu pour des services officiels tels que services de secours, forces de polices, ambulances et pompiers, services de transport public et pour l'armée.                                                                                                                       | 56        |
| <b>TJRF</b>  | Trafic Journalier du Réseau Ferré. C'est une base de données conçue sur la base d'enquêtes réalisées sur le réseau ferré RATP (métro et RER). Ces enquêtes permettent de connaître avec précision, l'ensemble des déplacements effectués par les passagers sur ce réseau.                                                                                                                                                                  | 81        |



# Chapitre 1

## Introduction générale

### 1.1 Motivation

Afin d'offrir des services vitaux aux populations (améliorer la qualité de vie de ces dernières, assurer le développement économique de la société, etc.), nos sociétés dépendent de plus en plus des infrastructures critiques. On peut citer en exemples d'infrastructures critiques les systèmes d'énergie, de transport, d'acheminement d'eau potable, de santé, etc. Pour assurer ces performances, les infrastructures critiques sont de plus en plus complexes et interdépendantes. Cela rend difficile la gestion des graves perturbations qui peuvent survenir dans nos sociétés et donc atteindre ces infrastructures [95, 24].

Concernant les systèmes de transport qui nous intéressent particulièrement dans cette étude, les exemples de graves perturbations ne manquent pas. On note des accidents liés aussi bien aux erreurs humaines qu'aux actes de malveillance. Concernant les accidents liés aux erreurs humaines, on peut citer :

- la collision entre deux trains de banlieue, le 27 juin 1988, dans la gare souterraine de Paris-Lyon (communément appelée Gare de Lyon, à Paris) faisant 56 morts et 56 blessés. L'un des trains a été aiguillé par mégarde sur une voie occupée par un autre train qui aurait dû être parti depuis plus de 5 minutes.
- le 28 avril 2008 à Zibo, en Chine, une collision entre deux trains provoquée par un déraillement de l'un d'entre eux cause la mort de 70 personnes et en blesse plus de 400. L'excès de vitesse a été considéré comme la cause directe de cette catastrophe ferroviaire.

Quant aux actes de malveillance, on peut citer :

- la série d'attentats terroristes que le réseau ferroviaire de Paris a connu en 1995. Le 25 juillet 1995 vers 17h30, une bombe placée sous une banquette explose dans une voiture de la ligne B du RER, à la station Saint-Michel, faisant 8 morts et 150 blessés. Le 17 octobre 1995 à 7h06, une bonbonne de gaz explose dans une voiture de la ligne C du RER, à la station Musée d'Orsay faisant 26 blessés.
- des explosions de bombes, quasi simultanément le 11 Mars 2004 entre 7h39 et 7h42, dans

quatre différents trains à Madrid, en Espagne. Cette attaque terroriste est l'une des plus meurtrières en Europe ces dernières années car les trains impliqués dans ces explosions se trouvaient dans différentes stations du centre-ville de Madrid et en heure de pointe. Cette attaque a fait 191 morts et plus de 2000 blessés [43].

- le 7 juillet 2005, quatre explosions touchent les transports publics de Londres, faisant 56 morts et 700 blessés. Trois de ces explosions ont eu lieu dans le métro londonien et une dans un bus.

Ces accidents ferroviaires et actes terroristes montrent à quel point les systèmes de transport de masse sont vulnérables. Les événements redoutés pour les systèmes de transport de masse ne se limitent pas seulement aux actes terroristes, de malveillance ou aux erreurs humaines. Les catastrophes naturelles représentent aussi une source de graves perturbations auxquelles les systèmes de transport de masse doivent faire face. Concernant le réseau de transport aérien mondial, l'éruption volcanique de 2010 en Islande illustre parfaitement l'impact d'une catastrophe naturelle sur ce réseau de transport de masse. En effet, une vingtaine de pays ont été affectés par l'éruption alors même qu'initialement, seule une petite partie de l'Europe a été touchée par les cendres volcaniques. Par un simple effet cascade, le réseau de transport aérien mondial fut perturbé et l'ampleur spatiale des conséquences dépasse largement celle de l'évènement initial.

On peut aussi citer dans les catastrophes naturelles qui menacent les systèmes de transport de masse à Paris, l'inondation causée par une éventuelle crue de la Seine à laquelle les opérateurs de transport se préparent activement.

Les événements redoutés dans un système de transport ferroviaire de masse, dont on vient de citer quelques exemples, peuvent être catégorisés comme dans la Tableau 1.1. On verra dans la section 3.6, les événements considérés dans cette étude et comment ces événements sont pris en compte.

|                           |                             |                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Criminalité et incivilité | Agression sur des personnes | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vols</li> <li>• Violence en groupe</li> <li>• Viols</li> <li>• Harcèlement sexuel</li> <li>• Kidnapping</li> <li>• fusiades</li> </ul> |
|                           | Infraction contre des biens | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vandalisme</li> <li>• Tag, graffiti</li> <li>• Vol de câbles</li> <li>• Sabotage</li> <li>• Incendie</li> </ul>                        |

|                       |                          |                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | Cyber attaque            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cyber attaque sur les SI</li> <li>• Intrusion dans un local SI</li> <li>• Piratage d'un compte utilisateur</li> <li>• Diffusion d'un virus</li> </ul>               |
|                       | Autres                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Traversée des rails</li> <li>• Présence de personnes sur les voies</li> <li>• Suicide</li> <li>• Présence de personnes sur les voies ou dans les espaces</li> </ul> |
| Terrorisme            | Explosion                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• dans une station</li> <li>• dans un train</li> </ul>                                                                                                                |
|                       | Attaque NRBC             |                                                                                                                                                                                                              |
|                       | Cyber attaque            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• attaque sur les SI et les systèmes de signalisation</li> <li>• destruction d'un local SI</li> </ul>                                                                 |
|                       | Sabotage                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• sabotage des voies afin d'occasionner des déraillements ou des collisions des trains</li> <li>• sabotage des ponts et tunnels</li> </ul>                            |
| Catastrophe naturelle | Inondation               |                                                                                                                                                                                                              |
|                       | Chute abondante de neige |                                                                                                                                                                                                              |
|                       | Tempête                  |                                                                                                                                                                                                              |
| Erreur humaine        | Vitesse excessive        |                                                                                                                                                                                                              |
|                       | Défaut de maintenance    |                                                                                                                                                                                                              |
|                       | Incendie                 |                                                                                                                                                                                                              |
|                       | Erreur d'aiguillage      |                                                                                                                                                                                                              |

TABLE 1.1 – Catégorisation des événements redoutés dans un système de transport ferroviaire de masse

De nos jours lorsque ces graves perturbations se présentent, la population dans les sociétés occidentales se repose essentiellement sur les pouvoirs publics afin que ces derniers mettent en place des mesures efficaces pour leur protection et pour venir à bout de ces perturbations. En France

par exemple on a entre autres le Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN) qui se charge de ces problématiques. Ou encore, le Centre Interministériel de Crise (CIC) de Beauvau qui est l'outil de gestion interministérielle des crises, placé sous l'autorité du ministre de l'intérieur. Ce regard de bienveillance que doivent avoir les autorités publiques sur leur population se traduit dans les missions des opérateurs de transport public par la nécessité d'implémenter les mesures de sécurité et de réduire les périodes de perturbations dans leur système.

C'est pour atteindre ces objectifs que la RATP met en place, entre autres, des projets de recherche visant à comprendre le mieux possible son système de transport face à ces graves perturbations. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans ces projets de recherche. Cette thèse a pour objet de modéliser le système de transport ferroviaire de masse dans le but de quantifier la résilience de ce dernier. La résilience d'un système est sa capacité à retrouver, après une perturbation, un état de performance comparable à celui d'avant la perturbation. Nous reviendrons plus en détail sur la définition de la résilience dans la section 2.2 de ce document. Les objectifs détaillés de la thèse sont décrits dans la section qui suit.

## 1.2 Les objectifs de la thèse

Les travaux présentés dans ce document ont pour objectif de développer une méthode permettant de comprendre le fonctionnement d'un système de transport ferroviaire de masse. Cela afin que, lorsqu'une perturbation survient, le système puisse mobiliser au mieux ses ressources internes et externes pour gérer cette perturbation et retrouver le plus rapidement possible une performance proche de celle d'avant la perturbation. Dans le contexte de cette étude, améliorer un système de transport ferroviaire de masse consiste à identifier et à caractériser des composantes du système autour desquelles une attention particulière doit être portée avant, pendant et après la perturbation. Il est à noter ici que selon le type de perturbation considéré, les composantes à identifier et caractériser peuvent changer. Les composantes en question sont : les stations, les lignes de métro ou RER, les composantes du système d'énergie, de télécommunication, etc. Ces travaux se feront en plusieurs étapes et sous forme d'objectifs présentées dans cette section.

### 1.2.1 Identifier des indicateurs pertinents pour la quantification de la résilience d'un système de transport de masse

La littérature regorge d'indicateurs permettant de quantifier ou de qualifier la résilience des systèmes. Il s'agit ici de proposer une vue d'ensemble d'indicateurs (statiques et dynamiques) et de modèles quantitatifs/qualitatifs de la résilience adaptés au cas d'un système de transport. L'influence de chaque sous-système de composantes et/ou d'acteurs impliqués dans la construction de chaque indicateur devra être identifiée. Les interdépendances entre ces différents indicateurs seront explicitées de façon à avoir une vision systémique et opérationnelle du niveau de la résilience du système de transport.

### 1.2.2 Construire un modèle d'évaluation de la résilience du système de transport

La seconde partie de la thèse consiste à proposer un modèle d'évaluation de la résilience du système de transport ferroviaire de masse. Le modèle proposé doit permettre, d'une part, d'évaluer (qualitativement et/ou quantitativement) le niveau de résilience d'un système de transport ferroviaire de masse par rapport à une perturbation. Il pourra aussi évaluer l'impact de différentes procédures de gestion de perturbation sur ce système. Il s'agit dans un premier temps de proposer une représentation par couches (sous-systèmes) des différents éléments constitutifs d'un système de transport ferroviaire de masse (structures, organisations, réseaux, etc.). Ensuite, une approche qui consiste à caractériser et modéliser les interdépendances (échange, influence, etc.) inter et intra sous-systèmes sera développée. L'objectif est alors de proposer une approche globale pour construire une démarche d'évaluation de la résilience par le suivi des interfaces inter sous-systèmes. L'idée est ici de rendre opérationnelles les décisions stratégiques en matière de résilience.

D'autre part, on explicitera comment ces différentes procédures de gestion de perturbation influencent le niveau de résilience du point de vue des performances du système sous les contraintes de sûreté/sécurité intrinsèque du système.

### 1.2.3 Proposer une procédure de mise en place d'une démarche de résilience

Dans ce troisième volet des objectifs de la thèse, il s'agit de proposer une procédure de mise en place d'une démarche de « résilience de bout en bout » dans un système de transport ferroviaire de masse qui tient compte aussi bien des perturbations courantes (pouvant impacter plusieurs sous-systèmes) que des situations de crises exceptionnelles. La résilience de bout en bout d'un système consiste, pour une perturbation donnée, à :

- déterminer, mobiliser et mettre en place des solutions nécessaires pour atteindre un niveau de résilience désiré (allocation de résilience) ;
- mettre en place des procédures pour maintenir ce niveau de résilience tout au long de la vie du système.

La procédure qui en découle doit être capable d'intégrer plusieurs scénarios et surtout servir comme support d'aide à la décision pour l'allocation de résilience. Cette allocation devra donc permettre de choisir par exemple, la répartition des moyens matériels de surveillance et de secours, mais aussi humains, en situation normale ou en cas de perturbation. La possibilité d'une analyse dynamique permet d'étudier l'évolution de ces répartitions, qui dans les situations critiques, se traduit par exemple par des reconfigurations et/ou réorganisations rapides à des instants qu'il convient de définir.

Pour atteindre ces objectifs, des hypothèses sont faites sur le modèle proposé, les données utilisées et le réseau étudié dans le cadre de cette thèse. Ces hypothèses sont présentées dans la section 1.3

## 1.3 Les hypothèses

Dans cette section les hypothèses faites dans le cadre de ces travaux de thèse sont présentées. Il n'est présenté ici que les hypothèses les plus générales. Les détails sur ces hypothèses et d'autres hypothèses plus spécifiques sur le modèle et ses données d'entrée seront présentés dans la suite de ce document, plus précisément dans les section 3.5 à 3.8.

### 1.3.1 Le réseau étudié et son environnement

Le réseau étudié dans le cadre de cette thèse est une partie du réseau de transport de Paris. C'est la partie exploitée par la RATP. Ce réseau est constitué de seize (16) lignes de métro et de deux (2) lignes RER. Ces lignes sont souvent connectées avec d'autres lignes exploitées par d'autres opérateurs de transport : la SNCF principalement. Dans ce cas, les passagers venant de ces lignes sont considérés dans cette étude comme venant de l'environnement du système étudié.

Sur les lignes RER du réseau étudié, des parties de ces lignes sont exploitées par la SNCF. Ces parties de ligne ne seront pas considérées dans cette étude et les passagers venant de ces parties seront considérés comme venant de l'environnement du système. Par exemple la partie du RER B du réseau de transport de Paris se trouvant au nord de la GARE DU NORD est exploitée par la SNCF. Par conséquent, les passagers venant du nord de Paris et qui arrivent à la GARE DU NORD par le RER B seront considérés comme venant de l'environnement du système (c.-à-d. venant de l'extérieur du système).

Le réseau de bus n'est pas non plus pris en compte. Néanmoins, le modèle développé dans le cadre de cette étude permet de faire intervenir les bus en cas de perturbation pour contourner la zone de perturbation. On peut donc, dans le modèle, ramener des passagers d'une station à une autre par bus ou autres moyens de transport comme le tramway, etc. Dans ce cas le temps de parcours entre les stations concernées et la capacité de ces moyens de transport sont estimés.

L'environnement du système est aussi constitué de la voirie menant aux différentes stations du réseau et qui permet donc aux passagers de rentrer dans le système.

Généralement dans un système de transport de masse, une partie des espaces dans les stations est occupée par des commerces et des services de proximité. Pour faciliter le quotidien des voyageurs, la RATP a adopté une politique visant à développer les commerces et les services de proximité dans ses espaces. Presse, supérette, restauration rapide, prêt-à-porter, fleuriste, etc. plus de 500 commerces jalonnent les espaces du Métro et du RER du réseau étudié. En tant qu'entreprise de service, la RATP veille au développement de ceux-ci et à leur adaptation au fil du temps en fonction des besoins des voyageurs.

Dans cette étude, on ne considère pas ces commerces et services de proximité. On ne considère pas non plus les employés qui travaillent dans ces commerces et services de proximité.

### 1.3.2 Les données du modèle proposé

Le modèle développé dans ce document est basé entre autres sur le flux des passagers dans le réseau. Concernant les passagers, le modèle n'est pas basé sur les données exactes du flux des passagers dans le réseau car les lois informatique et libertés<sup>1</sup> sur la protection des données personnelles interdit de tracer les personnes dans les lieux publics. Il est donc impossible d'avoir des informations sur le trajet exact de chaque passager dans le réseau et donc sur le flux des passagers. Pour contourner cet obstacle, il est utilisé dans ces travaux de thèse les données sur les passagers basées sur une enquête auprès d'un échantillon de passagers du réseau étudié.

### 1.3.3 Les conditions d'application des travaux de la thèse

Bien souvent lors d'une perturbation dans un système de transport public, c'est l'opérateur de transport qui exploite le réseau concerné qui gère la perturbation. Il peut arriver, lors des perturbations les plus graves comme une attaque NRBC ou une explosion, que les autorités publiques prennent la main sur la gestion de la perturbation. Dans ce cas, les décisions concernant la gestion de la perturbation viennent des autorités publiques qui peuvent décider d'arrêter le trafic sur tout le réseau pendant une longue durée. Ces conditions (lorsque les autorités publiques prennent la main sur la gestion de la perturbation) sortent du cadre d'application des travaux présentés dans ce document.

## 1.4 Organisation de la thèse

Le chapitre 2 présente les différentes définitions du concept de la résilience dans la littérature. On aborde aussi dans ce chapitre, les différentes approches de quantification de la résilience aussi bien des systèmes sociotechniques d'une manière générale que des systèmes de transport de manière particulière. Cet état de l'art a permis d'identifier des limites des approches de quantification de la résilience. Les limites identifiées dans le chapitre 2 sont prises en compte, dans la mesure du possible, dans le modèle de quantification de la résilience des systèmes de transport ferroviaire de masse développé dans cette étude.

Dans le chapitre 3, le modèle de quantification de la résilience des systèmes de transport ferroviaire de masse est présenté. Dans un premier temps, une revue des modèles de simulation des systèmes ferroviaires et des perturbations dans ces systèmes est présentée. Cette revue permet d'avoir une idée de la manière dont les systèmes de transport ferroviaire se modélisent dans la littérature. Cela permet aussi de pouvoir comparer le modèle proposé dans le cadre des travaux présentés dans ce document avec ces modèles que l'on trouve dans la littérature. Dans un second temps, il est présenté le modèle proposé dans le cadre de nos travaux. La modélisation des perturbations puis des plans de gestion de crise sur le modèle permettent par la suite de voir l'amélioration qu'apportent les différents plans de gestion de crise sur le système et par conséquent sur la résilience de ce système.

---

1. Les lois Informatique et libertés sont des lois destinées à garantir la protection de la vie privée des citoyens face aux moyens de traitement automatisés de données numériques. Pour plus d'informations : le site de la loi

Le modèle proposé et décrit dans le chapitre 3 est appliqué, dans le chapitre 4, au réseau de transport ferroviaire de masse de Paris. Cette application a permis non seulement de valider le modèle proposé, mais aussi de comprendre le comportement du réseau de transport ferroviaire de Paris face à une perturbation. Une démarche permettant de concevoir un système résilient de bout en bout est par la suite proposée. Cette démarche utilise naturellement le modèle proposé dans le cadre de cette étude.

Avec le modèle proposé dans le chapitre 3 et son implémentation dans le chapitre 4 sur le réseau de transport ferroviaire de Paris, il est possible d’avoir les conditions d’exploitation de ce réseau aussi bien en temps normal qu’en période de perturbation. Ces conditions d’exploitation sont utilisées dans le chapitre 5 pour améliorer les indicateurs topologiques de résilience que l’on trouve dans la littérature.

On termine ce document par des conclusions et des perspectives de ces travaux de thèse. On y présente tout d’abord le bilan global des contributions des travaux réalisés, puis une discussion de leurs limites et enfin une liste de perspectives de ces travaux de thèse.

## Chapitre 2

# La résilience des systèmes sociotechniques : état de l’art

### 2.1 Introduction

Nos sociétés dépendent de plus en plus des infrastructures critiques. Une infrastructure est dite critique lorsque son indisponibilité a un impact négatif considérable sur le bien-être, la santé, la sécurité/sûreté et l’économie de la région dans laquelle cette infrastructure se trouve [103, 102, 73]. Ces infrastructures sont de nos jours de plus en plus complexes et interdépendantes. Cela fait qu’une perturbation dans l’une de ces infrastructures devient difficile à maîtriser et peut vite se propager sur d’autres infrastructures du fait de leurs interdépendances. Les systèmes d’énergie, de télécommunication, de transport sont des exemples d’infrastructures critiques [102, 121, 77].

Ces infrastructures critiques sont souvent perturbées par des événements de type catastrophes naturelles, actes de malveillance, erreurs humaines, etc. Concernant les infrastructures de transport, nous avons encore à l’esprit les attentats de Madrid en 2004, de Londres en 2005 ou encore les attentats terroristes de Bombay en novembre 2008. Cette attirance des terroristes pour les systèmes de transport de masse est due non seulement au nombre important de victimes causées par ces attentats mais aussi aux conséquences sociales, économiques et politiques que peuvent causer ces attentats. De plus, les caractéristiques des systèmes de transport de masse sont telles que :

- ils sont accessibles à tout le monde ;
- ils ont plusieurs points d’entrée et de sortie ;
- ils sont interconnectés et multimodaux.

Ces caractéristiques augmentent la vulnérabilité des systèmes de transport de masse et les rendent donc attractifs aux terroristes.

Afin de protéger ces infrastructures contre les menaces qui pèsent sur ces dernières, beaucoup d’études ont été menées sur l’analyse de risque des systèmes sociotechniques. Il existe plusieurs approches d’analyse de risque. Une de ces approches est celle proposée par Kaplan [74] : l’évaluation de la probabilité d’occurrence d’un événement indésirable, l’exposition et la vulnérabilité de l’infra-

structure à cet évènement. La plupart des approches que l'on trouve dans la littérature procèdent par l'évaluation de la probabilité et/ou fréquence d'occurrence de la menace. Cela constitue une grande difficulté lorsque l'on veut analyser les évènements rares avec de graves conséquences sur le système étudié. Ces évènements étant rares, il est difficile d'estimer la loi de probabilité de ces évènements. De plus, du fait de la multitude de menaces qui pèsent sur ces infrastructures critiques, il est impossible de mettre en place des mesures de protection de ces infrastructures critiques contre chacune de ces menaces ou d'éviter que ces menaces deviennent effectives.

Il est donc important de comprendre comment pendant une perturbation, le système peut mobiliser ses ressources internes et externes afin de garantir une certaine continuité d'activité. C'est ainsi que le concept de la résilience a été introduit non seulement pour mesurer la capacité du système à atténuer (absorption) les conséquences de la perturbation sur le système et à s'adapter face à un environnement changeant introduit par la perturbation (adaptation) mais aussi sa capacité à retrouver un état de fonctionnement acceptable en un temps raisonnable (rapidité) [16, 29, 61]. Le concept de la résilience consiste à préparer le système à d'éventuelles perturbations comme si ces perturbations étaient inévitables. Cela requiert une évaluation régulière des procédures de gestion du système, des mesures de sécurité/sûreté, de l'analyse des risques et des mesures de protection du système contre ces risques, etc. La Figure 2.1 décrit les relations qui lient les mesures de sécurité/sûreté d'un système et les capacités d'un système résilient. Par rapport aux mesures de sécurité/sûreté d'un système, le concept de la résilience peut être vu comme [66] un concept consistant à comprendre comment venir à bout des perturbations, comment les gestionnaires de crise apprennent, s'adaptent en créant un environnement de sécurité/sûreté dans ce système perturbé. Les mesures de sécurité/sûreté d'un système considérées sont celles définies dans [21] : Anticipation, Protection, Détection.

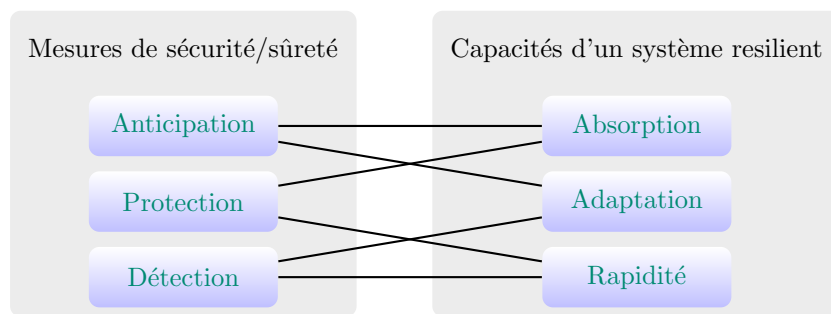


FIGURE 2.1 – Les relations liant les mesures de sécurité/sûreté d'un système et les capacités d'un système résilient.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. La section 2.2 présente quelques définitions de la résilience que l'on peut trouver dans la littérature. Elle met aussi l'accent sur les différences qui existent sur la notion de la résilience selon le domaine scientifique. La section 2.3 présente quelques modèles qualitatifs de la résilience. Ensuite, des modèles quantitatifs de la résilience sont présentés dans la section 2.4. A partir des limites des modèles présentés dans les sections 2.3 et 2.4, la contribution des travaux de cette thèse aux modèles quantitatifs/qualitatifs de la résilience est

décrite dans la section 2.5. La section 2.6 conclut ce chapitre.

## 2.2 Définition de la résilience

### 2.2.1 Systèmes sociotechniques

Un système sociotechnique est un ensemble de sous-systèmes en interaction. Comme son nom l'indique, dans un système sociotechnique, les sous-systèmes qui le composent peuvent être regroupés en deux catégories :

- **sociale et humaine**

Cela regroupe les "acteurs" et la "structure". Les "acteurs" représentent l'ensemble des personnes coopérant pour faire fonctionner le système, y compris les ressources humaines externes au système mobilisées pour gérer une perturbation lorsque le système est perturbé. Ces personnes sont considérées dans le système à travers leur compétence et leur savoir-faire. Quant à la "structure", elle correspond à l'organisation, plus particulièrement la hiérarchisation dans l'organisation. On inclut aussi dans la "structure" des procédures de gestion du système, la réglementation, l'environnement juridique autour du système, etc.

- **technique**

Cela regroupe la technologie et les tâches. La technologie est l'ensemble des moyens techniques mis à la disposition des acteurs afin d'effectuer dans les meilleures conditions leurs tâches. Dans un système de transport ferroviaire par exemple, le système permettant de produire et d'acheminer dans les caténaires du courant électrique adapté à la circulation des trains est un sous-système technique du système de transport ferroviaire. On peut aussi inclure dans la couche technique d'un système de transport ferroviaire le système de télécommunication qui permet entre autres au contrôleur du trafic ferroviaire de contrôler un train en communiquant avec le conducteur du train ou en commandant à distance les appareils de voie comme les aiguilles afin de changer la direction d'un train [114].

Ces sous-systèmes sont en interdépendance non déterministe dans un contexte organisationnel. Cette manière de voir les systèmes industriels a été introduite en 1977 par Bostrom et Heinen [28] et décrite dans la Figure 2.2.

A l'intérieur de chaque sous-système, les éléments interagissent aussi entre eux. L'intérêt de voir les systèmes comme un ensemble de sous-systèmes, sociaux et techniques, en interaction permet de saisir les relations qui lient les composantes du système. Dans la section 2.2.2, quelques modélisations de l'interdépendance des systèmes sont présentées.

Le système de transport de masse qui nous intéresse dans cette étude est un système sociotechnique. Sa modélisation est décrite dans le chapitre 3 de ce document.

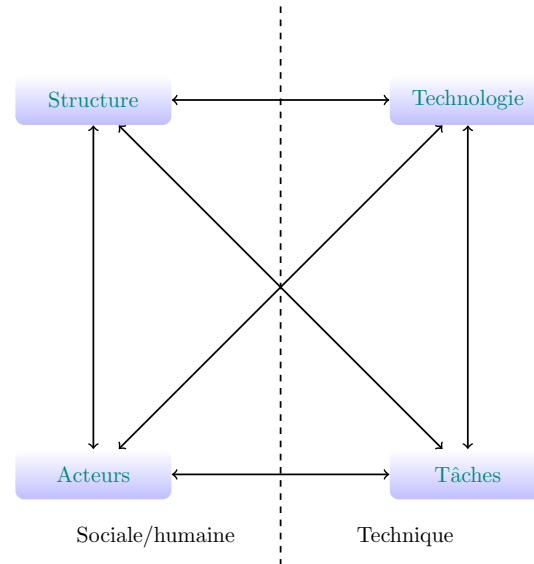


FIGURE 2.2 – Conceptualisation d'un système sociotechnique. Source : [28] (modifié).

### 2.2.2 Notion d'interdépendances

La complexité des infrastructures et la dépendance/interdépendance de plus en plus croissante entre ces infrastructures rendent complexes les perturbations qui se produisent dans ces infrastructures. La forte interdépendance des infrastructures entraîne bien souvent la propagation des perturbations d'une infrastructure à l'autre. Pour mieux maîtriser ces perturbations, il est important de comprendre les interdépendances qui lient ces différentes infrastructures.

On trouve dans la littérature différentes approches permettant de classifier les types d'interdépendances. Rinaldi et al. définissent quatre types d'interdépendances entre les infrastructures ou les composantes d'une même infrastructure [103, 102] :

- Interdépendance physique  
Deux infrastructures sont en interdépendance physique si l'une des infrastructures a besoin de la production de l'autre infrastructure pour fonctionner.
- Cyber interdépendance  
La cyber interdépendance est semblable à l'interdépendance physique. La différence réside au niveau des échanges entre les infrastructures. Dans le cas de la cyber interdépendance ce sont des données informatiques qui sont échangées.
- Interdépendance géographique  
Cette interdépendance concerne des infrastructures qui sont proches géographiquement de telle sorte qu'une perturbation (un incendie, une explosion, etc.) dans une des infrastructures peut impacter les autres.
- Interdépendance logique  
Il y a une interdépendance logique entre deux infrastructures si l'état de l'une a une influence

sur l'état de l'autre à travers un mécanisme qui n'est pas physique, cyber ou géographique. Prenons pour exemple de cette interdépendance deux réseaux de transport : le réseau ferroviaire et le réseau bus. Un incident paralysant le réseau ferroviaire peut amener une partie des usagers du réseau ferroviaire à emprunter le réseau bus. Cela peut donc entraîner une perturbation dans le réseau bus si ce comportement des usagers du réseau ferroviaire pendant la perturbation n'est pas vite pris en compte par les gestionnaires du réseau bus.

Dans [77], Lee et al. présentent cinq types d'interdépendances et proposent une modélisation de ces interdépendances sous la forme d'un problème de multiflow dans les graphes. Ces interdépendances sont :

- Interdépendance de type entrée (input interdependence)  
Une infrastructure a ce type d'interdépendance si pour produire son service/produit, elle a besoin d'un service/produit d'une autre infrastructure.
- Interdépendance mutuelle (Mutual interdependence)  
Deux infrastructures sont en interdépendance mutuelle si les deux infrastructures sont en interdépendance de type entrée l'une par rapport à l'autre.
- Interdépendance partagée (shared interdependence)  
Des infrastructures sont en interdépendance partagée si elles partagent une même ressource (une composante physique ou un service) pour produire leur propre service/produit.
- Interdépendance de type Ou exclusif (Exclusive-or interdependence)  
Des infrastructures sont en interdépendance de type Ou exclusif si deux de ces infrastructures ne peuvent pas produire leur service à la fois.
- Interdépendance géographique (Co-located interdependence)  
Cette interdépendance concerne des infrastructures qui sont proches géographiquement de telle sorte qu'une perturbation (un incendie, une explosion, etc.) dans une des infrastructures peut impacter les autres.

Lee et al. [77] ont aussi modélisé les différents types d'interdépendances qu'ils proposent. Une application de leur modélisation aux systèmes de transport a été faite.

Zio et Sansavini [121] proposent aussi une approche de modélisation et de simulation des interdépendances entre infrastructures. Pour cette approche, on modélise une infrastructure par un graphe. Les liens (arêtes) d'un graphe représentent les liens entre les composantes de l'infrastructure. Il existe aussi des liens entre les composantes de deux infrastructures différentes. Ainsi, on modélise le fonctionnement des infrastructures par un flux circulant à travers les composantes de ces infrastructures. Une perturbation est caractérisée par une surcharge dans un ou plusieurs nœuds du graphe. Lorsque cette surcharge dépasse un seuil dans un nœud, ce nœud devient indisponible. Ce qui entraîne une redistribution de la charge sur les nœuds adjacents à ce nœud, qui peuvent à leur tour dépasser leur seuil. C'est ainsi que la propagation d'une perturbation se modélise dans [121].

Les types d'interdépendances de Rinaldi et al. [103, 102] et de Lee et al. [77] sont regroupés dans [120, 72] en deux catégories : l'interdépendance fonctionnelle et l'interdépendance géographique. L'interdépendance fonctionnelle regroupe toutes les interdépendances citées précédemment sauf

l'interdépendance géographique.

Il existe différentes approches dans la littérature permettant de modéliser et de simuler l'interdépendance des infrastructures [101]. Ces approches peuvent être regroupées en trois grandes catégories : modélisation à base d'agents [32, 119], modèle de leontief [70, 108], modélisation à base de graphes [121, 77]. La modélisation à base de graphe sera celle utilisée pour les travaux présentés dans ce document et présentée dans le chapitre 3. Ce choix se justifie par le fait que les systèmes de transport sont des systèmes en réseau (networked systems en anglais) et peuvent donc être facilement modélisés sous forme d'un graphe ou d'un réseau de graphes.

### 2.2.3 Définitions de la résilience des systèmes autres que les systèmes socio-techniques

D'une manière générale, la résilience désigne la capacité d'un organisme, d'un groupe ou d'une structure à s'adapter à un environnement changeant ou perturbé. C'est un terme présent dans plusieurs domaines :

- **en science des matériaux**, la résilience mesure l'énergie nécessaire à appliquer sur un corps pour produire la rupture de ce dernier [2] ;
- **en médecine**, elle caractérise la résistance physique d'une personne ; la guérison ou la récupération rapide d'un patient [31] ;
- **en psychologie**, c'est l'aptitude d'un individu à faire face à un stress post-traumatique ou à trouver un moyen de se reconstruire après un traumatisme [25, 78, 51].

Le système de transport ferroviaire étant un système sociotechnique, il ne sera abordé dans la suite de ce document que la résilience des systèmes sociotechniques. Les définitions de la résilience dans les systèmes sociotechniques sont présentées dans la section suivante.

### 2.2.4 Définitions de la résilience des systèmes sociotechniques

La première définition de la résilience des systèmes au sens utilisé dans ce document a été donnée en 1973 par Holling lorsqu'il a étudié la résilience des systèmes écologiques [64]. Holling définit la résilience comme étant la persistance des espèces d'un système écologique et des relations entre ces espèces face aux perturbations créées par l'impact de l'homme sur ce système écologique comme les déchets domestiques et industriels, la pêche, etc. L'auteur entend par persistance, la probabilité de la non-extinction des espèces du système. Par la suite Holling a donné, en 1986 et 1992, deux autres définitions de la résilience [63, 65]. L'idée générale qui ressort dans les différentes définitions de Holling est relative à la perturbation que peut supporter le système sans que ce dernier ne change d'état (disparition d'espèces ou apparition de nouvelles espèces dans l'écosystème considéré). Depuis ces définitions de Holling, le concept de la résilience a considérablement évolué. Ce concept a surtout été adapté à beaucoup d'autres domaines tels que : l'économique [104, 105, 106], les sociétés humaines (on parle dans ce cas de la résilience communautaire) [33, 89, 39], les systèmes sociotechniques [42, 16, 29, 41, 67], etc. La résilience économique n'est pas très différente de la résilience des systèmes sociotechnique que nous allons définir dans la suite de cette section. Elle

met plus l'accent sur l'impact économique d'une perturbation sur les activités économiques d'une population/région donnée. Lorsque le concept de la résilience est appliqué à une population et à son environnement, on parle de la résilience communautaire.

Pour les systèmes sociotechniques, la définition de la résilience la plus citée dans la littérature est celle de Bruneau et al. [29] où les auteurs étudient la résilience des hôpitaux d'une région donnée suite à un tremblement de terre. Les auteurs définissent la résilience comme la capacité d'un système à :

- Réduire la probabilité d'occurrence d'une perturbation ;
- Réduire les conséquences de la perturbation si elle se produit ;
- Retrouver un état fonctionnel acceptable après la perturbation.

Remarquons que l'état fonctionnel du système après la perturbation peut être en dessous, ou le même, ou encore au-dessus de l'état fonctionnel du système avant celle-ci.

Pour faire une comparaison avec la vision de Holling de la résilience, on peut remarquer que Bruneau et al. introduisent la possibilité d'agir sur la perturbation avant qu'elle ne se produise. Cela n'est pas pris en compte dans les définitions de Holling. Cette possibilité d'agir sur la perturbation avant qu'elle ne se produise correspond à la notion d'anticipation qui est propre aux humains et aux sociétés humaines. C'est la raison pour laquelle cette notion est absente dans la définition de Holling qui concerne plutôt les systèmes écologiques. On note aussi que la définition de Bruneau et al. met l'accent sur l'effort fourni par le système pour retrouver un état comparable à son état d'avant la perturbation. Cet aspect est aussi absent dans la vision de Holling de la résilience. On retrouve néanmoins dans les deux définitions cette capacité des systèmes à se battre contre ou à supporter la perturbation.

Bruneau et al. proposent une vue conceptuelle de la résilience d'un système. Ils considèrent l'évolution au cours du temps de la performance du système,  $Q(t)$ , après l'occurrence de la perturbation, Figure 2.3. Ils ont donc formellement défini la perte en résilience d'un système comme étant :

$$R = \int_{t_0}^{t_1} (Q_0(t) - Q(t)) dt \quad (2.1)$$

Où  $t_0$  est le moment où la perturbation se produit et  $t_1$ , le moment où le système finit son retour à un état stable.  $Q_0(t)$  représente la performance du système en fonction du temps en absence de perturbation. L'équation 2.1 est simple et peut être appliquée à n'importe quel système pourvu que l'on sache évaluer la performance de ce dernier. Selon Bruneau et al. [29] un système résilient a quatre caractéristiques. On fournit des exemples de ces caractéristiques dans un système de transport ferroviaire de masse sont proposés en plus de la description de ces dernières :

- Robustesse (Robustness)

Capacité d'un système à résister à une perturbation et donc à continuer de fonctionner ou à maintenir un niveau de fonctionnement suite à un incident ou à une montée de charge.

Dans les systèmes de transport de masse, certaines composantes des trains comme les sièges peuvent être équipés de matériaux qui ne s'enflamment pas ou peu en présence du feu. Ceci rentre dans les caractéristiques qui rendent le système robuste aux incendies affectant ces

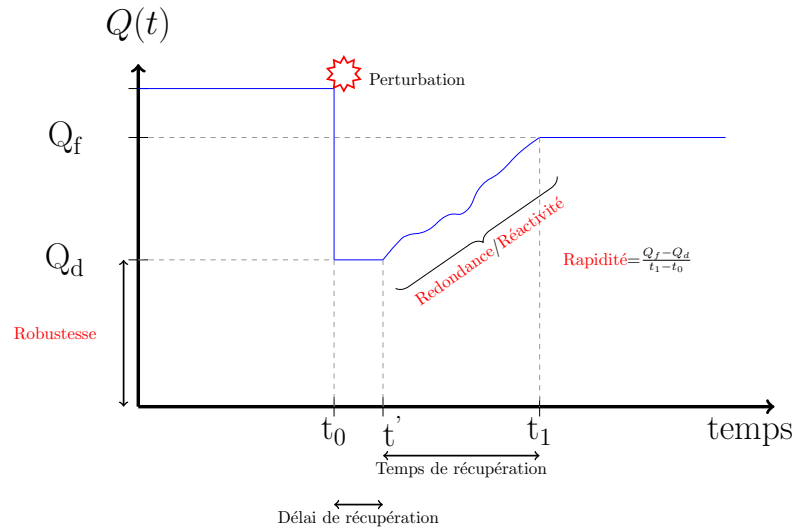


FIGURE 2.3 – Mesure de la résilience - définition conceptuelle. Source [29] modifié

trains.

- Réactivité (Resourcefulness)

Capacité d'un système à détecter, analyser les problèmes afin d'apporter des mesures adéquates (monétaires, matérielles, technologiques, humaines, etc.) pour résoudre ce problème.

La mobilisation des ressources externes au système lors d'une perturbation est une mesure améliorant la réactivité du système. On peut aussi citer ici les différentes caméras implantées dans le réseau et qui permettent aux gestionnaires de crise de vite comprendre ce qui se passe sur le terrain lors d'une perturbation.

- Redondance (Redundancy)

Capacité d'un système à continuer de fonctionner même si certaines fonctions du système sont défaillantes. Ceci s'effectue grâce à la redondance de certaines fonctions, matériels, compétences au sein du système.

Un exemple de redondance dans un système ferroviaire est le maillage du réseau et des lignes de sorte que, lors d'une perturbation sur une ligne du réseau, les passagers puissent prendre d'autres lignes pour arriver à leur destination.

- Rapidité (Rapidity)

Capacité d'un système à retrouver, en un temps court, un état acceptable après un incident. La diminution du temps de réparation d'un rail cassé va contribuer, dans un système de transport ferroviaire, à améliorer la rapidité de ce dernier.

Comme on peut le voir sur la Figure 2.3, la robustesse traduit le caractère statique du système : l'ensemble des mesures mises en place dans le système avant la perturbation pour atténuer ou éviter l'impact de la perturbation. Il peut arriver que cette robustesse soit volontairement dégradée par les gestionnaires de crise par mesure de sécurité ou dans le but de mieux analyser la situation pour pouvoir mieux gérer la perturbation. Cette situation arrive de plus en plus souvent dans les

transports parisiens lorsque l'on détecte un colis suspect dans une station. Bien souvent dans ces conditions, par mesure de sécurité ou pour limiter les risques liés à une éventuelle explosion, le trafic est ralenti voire arrêté sur une partie du réseau le temps de gérer l'incident. La réactivité et la rapidité traduisent le caractère dynamique du système : les mesures mises en place par les gestionnaires de crise pendant la perturbation afin de venir à bout de cette dernière le plus rapidement possible. Quant à la redondance, selon la mesure de gestion de perturbation considérée, elle peut être à caractère statique ou dynamique. Par exemple, des conducteurs de trains appelés en renfort lors d'une perturbation est une mesure de redondance à caractère dynamique. Mais, des conducteurs de trains remplaçants planifiés avant une perturbation pour que lors d'une perturbation ils puissent conduire des trains, est une mesure de redondance à caractère statique. La redondance peut donc contribuer à améliorer la robustesse ou la réactivité selon la mesure prise.

Dans la pratique ces caractéristiques sont difficilement quantifiables. Donc, généralement, la mesure de la résilience d'un système consiste à définir des indicateurs de performance du système étudié qui prennent en compte au mieux ces caractéristiques. On trouve aussi dans la littérature des études portant sur des relations analytiques qui existent entre ces caractéristiques d'un système résilient [81, 122, 16, 61]. Dans [122] par exemple, Zobel propose une étude analytique de la relation qui peut exister entre la robustesse et la rapidité, en supposant que la fonction  $Q(t)$  est linéaire pendant la période de retour à un état acceptable du système. Sous cette hypothèse, l'auteur propose aussi une représentation graphique (par des courbes de niveau) pour une valeur donnée de la résilience du système, les valeurs de la robustesse et de la rapidité correspondantes. Dans un autre article [123], Zobel et Khansa font une étude analytique de la relation entre la robustesse et la rapidité lorsque le système subit plusieurs perturbations simultanément, en faisant l'hypothèse sur la linéarité de  $Q(t)$  lors du retour à un état acceptable du système. L'étude de la résilience d'un système en considérant plusieurs perturbations simultanément est très rare dans la littérature. Notons que l'hypothèse sur la linéarité de  $Q(t)$  lors du retour à un état acceptable du système n'est pas toujours vraie pour certains systèmes comme par exemple les systèmes de transport ferroviaire de masse.

Il y a une réelle difficulté dans la littérature à donner une définition unique de la résilience et des caractéristiques d'un système résilient. Comme on peut le remarquer dans Berkeley et al. [19], où la robustesse est définie comme étant la robustesse et la redondance au sens de Bruneau et al. [29]. En effet, Berkeley et al. définissent aussi quatre caractéristiques d'un système résilient : la robustesse, la réactivité, la rapidité par laquelle le système retourne à la normale ou à un état acceptable et l'adaptabilité. Le sens donné à la réactivité et à la rapidité par laquelle le système retourne à la normale ou à un état acceptable reste le même que dans [29]. Quant à l'adaptabilité, elle correspond à la capacité du système à apprendre des perturbations passées afin d'améliorer à l'avenir les trois premières caractéristiques de la résilience définies dans [19]. Comme on peut le voir sur la Figure 2.4, Berkeley et al. vont au delà du fait de ramener le système à un état acceptable en intégrant dans leur approche le retour d'expérience.

Dans [112], Aven et Steen donnent une autre définition de la résilience et de la robustesse. C'est une définition proche de celle que donnent les auteurs de la notion de risque dans leurs travaux [13, 14] qui concerne l'analyse de risque d'un système. Ils définissent la robustesse comme étant la capacité d'un système à limiter les conséquences d'une perturbation donnée sur le système. Quant

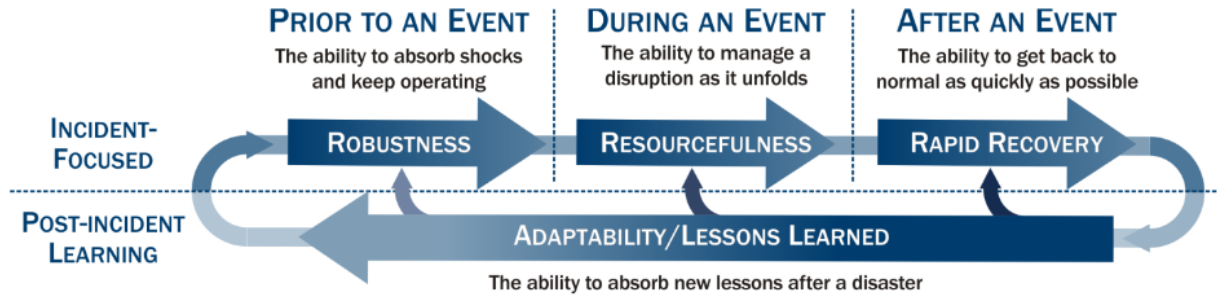


FIGURE 2.4 – Définition conceptuelle de la résilience selon [19]

à la résilience, elle est définie comme étant la capacité d'un système à limiter les conséquences de n'importe quelle perturbation sur le système. Pour Aven et Steen, la robustesse est une propriété du système liée à une perturbation donnée, alors que la résilience est une propriété qui caractérise l'état général du système en prenant en compte l'ensemble des perturbations possibles. Cette définition de la résilience ne prend en compte que la capacité de résistance du système et ne met donc pas l'accent sur l'effort que peut/doit entreprendre le système pour retrouver un état acceptable. Toujours dans le domaine de l'analyse de risque, la définition de la résilience qui semble la plus complète et qui intègre le coût lié à la perturbation et aux actions entreprises par le système pour maintenir le système résilient est celle de Haimès [59]. Pour Haimès, la résilience d'un système est la capacité de ce système à limiter à un niveau acceptable les dégradations perpétrées par une perturbation et à retrouver son niveau de performance nominal en un temps raisonnable tout en limitant les coûts et les risques associés.

Loin d'être exhaustives, ces quelques définitions de la résilience des systèmes sociotechniques dans la littérature ont permis de voir les différences qui existent entre les définitions de la résilience. Certains auteurs s'arrêtent sur l'aspect robustesse du système [112], d'autres vont jusqu'à l'intégration du retour d'expérience dans leur définition de la résilience [19]. On a aussi remarqué une différence concernant le sens donné à certaines caractéristiques d'un système résilient comme la robustesse. On retrouve des aspects de la définition de la résilience dans les définitions d'autres concepts comme : la vulnérabilité [117, 71, 72, 73], la viabilité [35, 80], la flexibilité [85], etc.

## 2.3 Modèles qualitatifs de la résilience

La qualification de la résilience d'un système se fait généralement à travers des questionnaires afin d'évaluer les différentes caractéristiques du système en termes de résilience.

Shirali et al. dans [111] présentent une approche de qualification de la résilience basée sur six indicateurs de résilience d'une organisation :

- Top management commitment  
Mesure à quel point la culture de la sécurité/résilience est implantée dans le système (l'entreprise) ;

- Just culture  
Mesure si les employés peuvent facilement remonter les problèmes liés à la sécurité/résilience du système ;
- Learning culture  
Mesure à quel point les employés maîtrisent le fonctionnement du système aussi bien en temps normal qu'en temps de perturbation ;
- Awareness and opacity  
Mesure à quel point les employés savent l'état dans lequel se trouve leur système à tout moment et quand le système dérive vers une situation de crise ;
- Preparedness  
Mesure l'état de préparation du système à une éventuelle situation de crise ;
- Flexibility  
Mesure la capacité du système à se réorganiser face à une situation de crise.

Les données concernant ces indicateurs sont récoltées en exploitant des questionnaires. Pour chaque indicateur de résilience, une série de questions est posée. A chaque question correspond une série de réponses possibles correspondant au degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis de la question posée (échelle de Likert<sup>1</sup>). Une analyse en composante principale (ACP) permet par la suite de classer les unités fonctionnelles d'une organisation selon leur degré d'implantation des indicateurs de résilience. Cette étude a aussi permis d'identifier à l'intérieur de chaque unité fonctionnelle, les indicateurs de résilience les moins implantés dans la culture de l'unité fonctionnelle considérée.

Dans [88], vingt (20) indicateurs permettant d'agir sur la résilience sont utilisés. Dans un premier temps, en interviewant les acteurs intervenant dans le management d'une chaîne d'approvisionnement et en faisant un état de l'art des indicateurs de qualification de la résilience, un questionnaire a été établi. Ce questionnaire permet par la suite de mesurer le niveau d'implémentation des vingt (20) indicateurs en faisant une étude statistique des résultats.

Comme on peut le remarquer, les données recueillies via les questionnaires dépendent essentiellement de l'appréciation des personnes/experts qui ont répondu aux questions. En effet, pour une même situation, les personnes/experts peuvent avoir des visions différentes de cette situation. Ce qui peut rendre subjectives les réponses aux questions du questionnaire. Pour compenser cette subjectivité, des approches basées sur l'analyse floue sont proposées dans la littérature. On reviendra sur ces approches basées sur l'analyse floue dans la section 2.4.1.4.

## 2.4 Modèles quantitatifs de la résilience

Dans cette section, nous allons présenter quelques approches de quantification de la résilience dans la littérature, les points forts et les limites de ces approches. Nous allons dans un premier temps présenter les approches de quantification de la résilience des systèmes d'une manière générale. Puis,

---

1. Une échelle de Likert (du nom du psychologue américain Rensis Likert) est une échelle de jugement répandue dans les questionnaires psychométriques par laquelle la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation

nous présenterons dans un second temps les méthodes de quantification de la résilience dans les systèmes de transport en particulier.

### 2.4.1 Quantification de la résilience

#### 2.4.1.1 Approches déterministes

Nous avons vu dans la section 2.2.4 que Bruneau et al. [29] proposent une approche de quantification de la résilience basée sur la quantification de la performance du système étudié. Dans [30], Bruneau et al. utilisent leur approche définie dans [29] pour quantifier la résilience des hôpitaux d'une région face à un séisme. L'indicateur utilisé pour mesurer la résilience des hôpitaux dans une région donnée est le nombre de patients que peuvent accueillir par jour les hôpitaux de la région considérée. Cet indicateur est comparé à un autre : la proportion de la population en bonne santé après l'incident par rapport à la population en bonne santé en temps normal à cette période. Pour ce dernier indicateur, il est difficile de le quantifier parce qu'une partie de la population d'une région peut se déplacer en temps de crise. Aussi, il n'est pas facile de définir de manière précise l'état de santé d'une personne. Ainsi pour les auteurs, le nombre de patients que peuvent accueillir par jour les hôpitaux d'une région est plus adapté pour la mesure de la résilience de ces infrastructures. Cela implique une bonne modélisation de la capacité d'accueil de ces infrastructures afin qu'elle soit proche de la réalité. On voit sur cet exemple que le choix des indicateurs de performance d'un système n'est pas facile. Ces indicateurs doivent non seulement prendre en compte, le mieux possible, les caractéristiques d'un système résilient définies dans [29] mais aussi doivent être facilement quantifiables. Dans la pratique, pour quantifier la résilience d'un système à travers une mesure de la performance de ce système, on fait une comparaison de la performance de ce système en absence et en présence une perturbation. Cette comparaison permet donc d'évaluer la résilience du système face à cette perturbation. C'est ce qui est fait dans [39] où Chang et Shinozuka réadaptent le modèle de Bruneau et al. [29] en termes probabilistes en l'appliquant au système de distribution d'eau de Memphis dans l'état de Tennessee aux États-Unis.

Nous avons remarqué dans la littérature que les approches de quantification de la résilience sont assez proches du domaine de recherche de leurs auteurs. Nous l'avons déjà vu avec Aven et Steen [112] et Haines [59] qui font des recherches en gestion des risques et qui ont proposé des approches basées sur l'analyse de risque. De même, Bruneau et al. [29, 30] et Chang et Shinozuka [39] proposent des modèles qui traitent essentiellement de la résilience des infrastructures d'une région face au tremblement de terre. Dans le même ordre d'idée, Barker et al. [16] proposent une approche de quantification de la résilience basée sur la fiabilité des composantes du système, en l'occurrence, la mesure d'importance des composantes d'un système. Barker et al. [16] définissent la performance d'un système à un instant  $t$  donné,  $Q(t)$ . Les auteurs considèrent la performance du système comme étant l'état fonctionnel dans lequel se trouve le système au cours du temps. Pour un système de transport routier, la performance peut être le flux de véhicules circulant dans ce système ou encore le rendement pour les chaînes de production. La fonction  $Q(t)$  est décrite dans la figure 2.5 pour un système soumis à un événement perturbateur  $e^j \in \mathcal{D}$ , où  $\mathcal{D}$  est l'ensemble des événements perturbateurs du système. Pour quantifier la résilience d'un système à un événement perturbateur  $e^j$ , il est important d'étudier le système avant, pendant et après cet événement. Pour

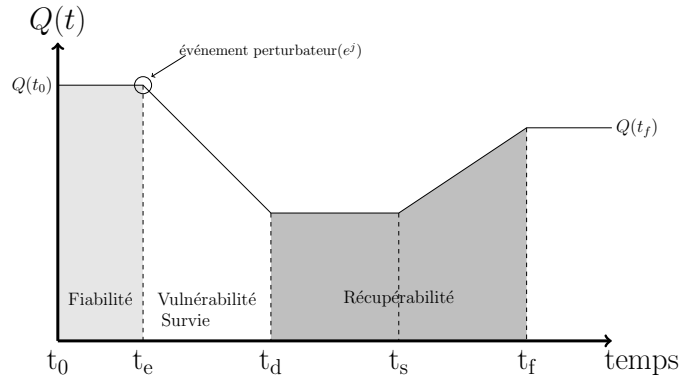


FIGURE 2.5 – Mesure de la résilience - définition conceptuelle, [16]

ce faire, quatre caractéristiques d'un système résilient sont proposées :

- Fiabilité (Reliability)

La fiabilité est définie comme le facteur qui fait fonctionner le système en absence d'un événement perturbateur grave (de  $t_0$  à  $t_e$ ). D'une manière générale, la fiabilité est caractérisée par le temps de disponibilité du système.

- Vulnérabilité (Vulnerability)

La vulnérabilité est la perte en performance du système suite à l'événement  $e^j$ . Elle est donc considérée par Barker et al. comme l'ampleur de la perturbation sur le système. C'est cette définition de la vulnérabilité que l'on trouve souvent dans la littérature. Cette définition de la vulnérabilité correspond au contraire de la définition donnée par Aven et Steen [112] pour la robustesse.

- Survie (Survivability)

La survie est la minimisation de l'impact maximal de l'événement  $e^j$  sur le système. Cette notion est similaire à la robustesse de l'approche proposée par Bruneau et al. dans [29].

- Récupérabilité (Recoverability)

La récupérabilité fait référence à la période de temps permettant au système de retrouver son état nominal. C'est une notion similaire à la rapidité de l'approche proposée par Bruneau et al. dans [29].

On remarque que sur la Figure 2.5, la dégradation de la performance du système après la perturbation est plus lente que sur la Figure 2.3. Cela s'explique par le fait que Bruneau et al. [29] ont étudié la résilience d'une région face à un séisme. En effet, les séismes sont souvent caractérisés par une forte intensité sur une durée assez courte. C'est pour cette raison que la pente représentant la dégradation de la performance sur la Figure 2.3 est beaucoup plus raide.

Pour mesurer la résilience d'un système, les auteurs utilisent la mesure de la performance d'un système,  $Q(t)$ , définie précédemment. Formellement, la résilience est définie comme le ratio entre le gain du système en performance depuis son plus bas niveau de performance,  $Q(t_d)$ , suite à  $e^j$  et la perte totale des performances du système :

$$\mathfrak{R}(t_r|e^j) = \frac{Q(t_r|e^j) - Q(t_d|e^j)}{Q(t_0) - Q(t_d|e^j)}, \quad t_r \in [t_s, t_f] \quad (2.2)$$

Les auteurs utilisent  $\mathfrak{R}$  au lieu de  $R$  pour définir la résilience car  $R$  est souvent utilisé pour désigner la fiabilité d'un système (Reliability). Cette définition ne prend pas en compte le comportement du système avant la date  $t_s$ . Le comportement du système avant la date  $t_s$  relève essentiellement de la vulnérabilité et de la survie du système comme définies par les auteurs. Pour prendre en compte ce comportement, ils ont introduit les mesures d'importance des composantes. Les mesures d'importance des composantes sont beaucoup étudiées dans le domaine de la fiabilité des systèmes. Elles sont généralement calculées en faisant le ratio entre la contribution de la composante à la fiabilité du système et la fiabilité du système elle-même. Les mesures d'importance des composantes mesurent la sensibilité d'un système à la défaillance d'une composante. En utilisant les mesures d'importance des composantes, ils classent les composants d'un système en fonction de la sensibilité du système à leur défaillance de sorte que les gestionnaires de crise puissent classer les composantes selon leur importance et donc accroître la résilience du système en mobilisant plus de moyens autour des composantes les plus sensibles. Dans l'équation 2.2, la résilience est mesurée instantanément, or, les définitions lui donnent un caractère global, donc intégrée dans le temps. On verra dans la section 2.4.1.2, plus particulièrement dans l'algorithme 1, comment les auteurs utilisent cette équation au cours du temps pour calculer les mesures d'importance des composantes d'un système.

Royce Francis et al. [54] proposent une approche qui intègre les trois capacités d'un système résilient décrites dans la Figure 2.1 : absorption, adaptation et rapidité. Soit  $S_p$  représentant la vitesse à laquelle le système retourne à un état stable après une perturbation,  $F_0$  la performance du système avant la perturbation,  $F_d$  la performance du système juste après la perturbation et  $F_r$  le niveau de performance du système après avoir exécuté toutes les actions qui devront permettre au système de revenir à la normale. La Figure 2.6 présente ces paramètres. Pour une perturbation  $i$ , les auteurs définissent la résilience  $\rho_i$  de la manière suivante :

$$\rho_i = S_p \cdot \frac{F_r}{F_0} \cdot \frac{F_d}{F_0} \quad (2.3)$$

$$S_p = \begin{cases} \left( \frac{t_\delta}{t_r^*} \right) \cdot \exp(-a(t_r - t_r^*)) & \text{si } t_r \geq t_r^* \\ \frac{t_\delta}{t_r^*} & \text{sinon} \end{cases}$$

$t_\delta$  est le temps maximal que doivent prendre les activités permettant au système de revenir à un état stable ( $F_r^*$  sur la Figure 2.6). Lorsque les activités permettant au système de revenir à un état stable prennent un temps ( $t_r^*$ ) supérieur à  $t_\delta$ , l'état de retour à la normale du système n'est plus garanti. Cet état n'est pas nécessairement l'état final du système après la perturbation.  $t_r$  est le temps nécessaire pour atteindre l'état final du système après la perturbation et  $a$ , un paramètre de contrôle. La rapidité est explicitement contenue dans l'expression de  $S_p$ , l'expression  $\frac{F_d}{F_0}$  représente l'absorption tandis que  $\frac{F_r}{F_0}$  représente l'adaptation. Plus les valeurs des expressions représentant l'absorption et l'adaptation sont grandes, plus la résilience du système augmente. On note aussi que plus  $t_r^*$  est supérieur à  $t_\delta$ , plus la résilience du système décroît. Lorsque  $t_r^* < t_\delta$ , si le système met plus de temps pour retrouver son état définitif, la résilience du système décroît aussi. Enfin, on peut remarquer que la résilience telle que définie par les auteurs peut être supérieure à

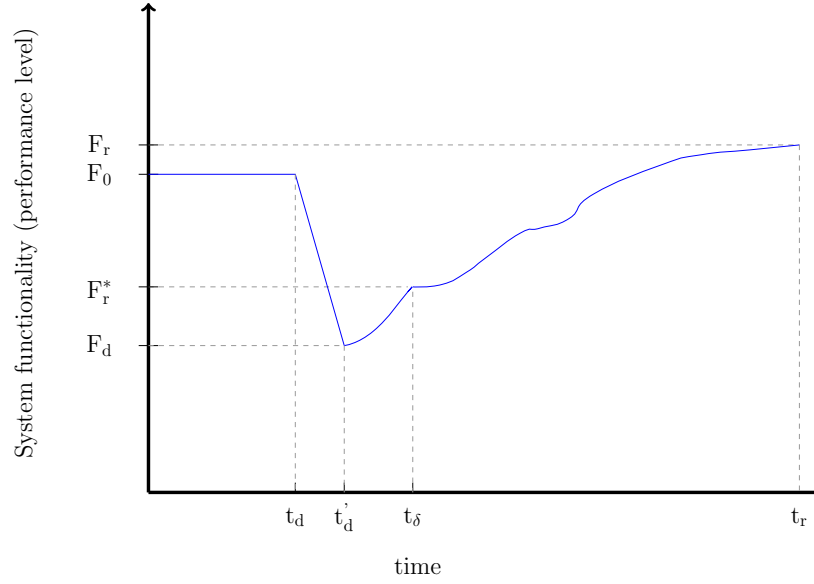


FIGURE 2.6 – Paramètres d'évaluation de la résilience de [54]

1. Cela veut dire que la performance du système après la perturbation peut dépasser celle d'avant la perturbation.

#### 2.4.1.2 Approches probabilistes

Jusqu'à présent, la plupart des approches présentées dans cette section sont des approches déterministes. Il existe aussi dans la littérature des approches probabilistes permettant de quantifier la résilience d'un système.

Dans [60] un concept probabiliste de la résilience est présenté. La résilience est définie comme étant la probabilité pour que le système soit en état de marche à la date  $t+1$  sachant que le système ne l'était pas à la date  $t$ . On a :

$$R = Pr\{S(t+1) \in NF \mid S(t) \in \overline{NF}\} \quad (2.4)$$

Avec  $S(t)$  représentant l'état du système à la date  $t$ .  $NF$  représente l'ensemble des états dans lesquels le système est en état de marche.  $\overline{NF}$  est le complémentaire de  $NF$ .

Une autre approche stochastique de la quantification de la résilience est celle proposée par [92]. Dans cette approche la résilience est définie comme le ratio entre la performance ( $P$ ) du système et la performance cible de ce dernier ( $P^*$ ). Ici la performance représente l'aire entre la courbe de la performance et l'axe des abscisses sur une année. Ce qui se formalise par :

$$R = E \left[ \frac{\int_0^T P(t) dt}{\int_0^T P^*(t) dt} \right] = E \left[ \frac{\int_0^T P^*(t) dt - \sum_n^{N(T)} AIA_n(t_n)}{\int_0^T P^*(t) dt} \right] \quad (2.5)$$

$N(T)$  est le nombre total de perturbations pendant  $T$  (une année).  $t_n$ , la date d'occurrence de la  $n^{\text{ième}}$  perturbation.  $t_n$  est une variable aléatoire.  $AIA_n(t_n)$  est l'aire entre  $P^*(t)$  et  $P(t)$  pour la  $n^{\text{ième}}$  perturbation. L'aspect stochastique est apporté dans ce modèle par la modélisation de  $P(t)$  comme un processus stochastique et aussi par  $t_n$ .

Pour la suite de cette partie concernant les approches probabilistes de quantification de la résilience, on va revenir sur les mesures d'importance des composantes [16] présentées dans la section 2.4.1.1. Cela permet de classer les composants d'un système en fonction de la sensibilité du système à leur défaillance. Ainsi, les gestionnaires de crise peuvent classer les composantes selon leur importance et donc accroître la résilience du système en renforçant la protection autour de ces composantes sensibles. On revient sur cet aspect car il sera question dans le chapitre 5 de ce document de classer les composantes selon leur importance dans le système. Ainsi, on va donc voir ici une manière de classer les composantes d'un système selon la sensibilité du système à leur défaillance.

Nous reprenons ici les notations de la Figure 2.5. [16] modélise un système par un graphe  $G = (N, A)$  avec  $N$ , l'ensemble des sommets et  $A = \{i : 1 \leq i \leq m\}$ , l'ensemble des arêtes (liens) du graphe. Dans [16], une composante d'un système est représentée par un lien. La variable modélisant l'état du lien  $i$  à l'instant  $t$  est  $x_i(t)$ . L'état du réseau à l'instant  $t$  est  $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))$ . Ensuite, on définit  $\varphi(\mathbf{x}(t))$  comme étant la performance du système à l'instant  $t$ .

Pour un système modélisé par le flux d'un certain produit qui passe à travers le réseau de ce système,  $\varphi(\mathbf{x}(t))$  représente le flux maximum de produit à travers ce réseau. Dans ce cas par exemple,  $\varphi(\mathbf{x}(t))$  dépend donc de la capacité (état) de chaque lien  $i$  du réseau.

Soit maintenant  $x_i(t_0)$  l'état du lien  $i$  avant la réalisation de l'événement  $e^j$ . On suppose que l'événement  $e^j$  réduit proportionnellement l'état du lien  $i$  avec un taux de réduction  $V_i^j \in [0, 1]$  :

$$x_i(t_d|V_i^j) = (1 - V_i^j) x_i(t_0) \quad (2.6)$$

$x_i(t_d|V_i^j)$  dépend des caractéristiques du lien  $i$  et de l'événement  $e^j$ .  $V_i^j$  est donc une variable aléatoire de loi de probabilité :

$$\Pr(a \leq V_i^j \leq b) = \int_a^b f(v_i^j) dv_i^j, \text{ avec } [a, b] \subseteq [0, 1] \quad (2.7)$$

Dans l'équation 2.7, il est important de bien caractériser le comportement de la composante  $x_i$  face à l'événement  $e^j$ . C'est ce qui est modélisé par la densité de probabilité  $f(v_i^j)$ .

La dimension Récupérabilité de la résilience de [16] est mesurée par le temps de récupération du système. Au niveau d'un lien  $i$  du système, on mesure le temps de récupération à l'aide d'une variable aléatoire,  $U_i^j(V_i^j)$ , qui dépend de  $V_i^j$  et de l'organisation mise en place pour ramener le lien dans son état nominal. La probabilité qu'un lien  $i$  retrouve son état nominal avant l'instant  $t_r \in [t_s, t_f]$  est :

$$\Pr(t_s < U_i^j(V_i^j) \leq t_r) = \int_{t_s}^{t_r} f(u_i^j|V_i^j) du_i^j \quad (2.8)$$

On vient de voir comment l'état d'une composante du système peut être affecté par un événement perturbateur  $e^j$  puis son temps de récupération correspondant. Ici, on s'intéresse à l'importance d'une composante dans la résilience d'un système pour pouvoir comprendre l'effet de la vulnérabilité et du temps de récupération de la composante sur le temps total de récupération du système  $T_{\varphi(\mathbf{x}(t_0)|V_i^j)}$ .

La mesure définie par l'équation (2.9) représente, pour un événement perturbateur  $e^j$ , la contribution de la vulnérabilité du lien  $i$  au temps total de récupération du système. La fraction dans l'équation (2.9) est le rapport entre la perte en performance du système due à la dégradation de l'état du lien  $i$  et la perte de performance maximale que la dégradation de l'état d'un lien  $k \in A$  peut avoir sur la performance du système.

$$\text{CI}\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j) = \frac{\varphi(\mathbf{x}(t_0)) - \varphi\left(\left(\mathbf{x}(t_0), x_i\left(t_d|V_i^j\right)\right)\right)}{\max_{k \in A} \left\{ \varphi(\mathbf{x}(t_0)) - \varphi\left(\left(\mathbf{x}(t_0), x_k\left(t_d|V_k^j\right)\right)\right) \right\}} T_{\varphi(\mathbf{x}(t_0)|V_i^j)} \quad (2.9)$$

Comme  $V_i^j$  et  $U_i^j$  sont des variables aléatoires,  $\text{CI}\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$  est aussi aléatoire.

La deuxième mesure représente le taux d'amélioration du temps de recouvrement du système lorsque le lien  $i$  n'est pas vulnérable par l'événement perturbateur  $e^j$ . Cette mesure est aussi aléatoire :

$$\text{W}\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j) = \frac{T_{\varphi(\mathbf{x}(t_0)|V_i^j)} - T_{\varphi(\mathbf{x}(t_0)|V_i^j=0)}}{T_{\varphi(\mathbf{x}(t_0)|V_i^j)}} \quad (2.10)$$

On vient de voir deux mesures d'importance d'une composante d'un système vis-à-vis de sa récupération. Lorsque l'on classe les composantes d'un système selon ces mesures d'importance, on cherche à évaluer :

- l'influence de la vulnérabilité d'une composante qui diminue la résilience du système ( $\text{CI}\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$ ) ;
- l'influence de la non vulnérabilité d'une composante qui diminue le temps de récupération du système ( $\text{W}\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$ ).

Pour classer les composantes d'un système selon ces mesures, [16] simule la loi de probabilité de ces mesures, puis procèdent à un classement stochastique des composantes du système selon la loi de probabilité de ces mesures. L'algorithme 1 décrit la méthode utilisée.

Le classement stochastique des composantes du système se base sur [11]. Cette méthode consiste à faire une comparaison deux à deux des composantes du système. Pour une composante, la valeur de la composante suivant une des mesures est comparée à la valeur des autres composantes suivant la même mesure. A chaque fois que l'on compare deux composantes suivant une mesure, on donne une note de +1 à la composante qui a la plus grande valeur au sens de l'amélioration de la résilience du système et une note de -1 dans le cas contraire. On itère cette procédure pour toutes les composantes du système et pour toutes les mesures. La note finale d'une composante est la somme des notes obtenues par cette composante. On obtient alors un classement des composantes du système.

On peut remarquer que ce modèle ne prend pas en compte l'interdépendance des composantes du système. La non prise en compte de l'interdépendance des composantes du système fait que ce modèle ignore certains aspects du système comme la redondance entre autres. Nous allons voir

**Algorithme 1** : Classification des composantes d'un système**Input** : L'élément perturbateur  $e^j$ La loi de probabilité de  $V_i^j$  et de  $U_i^j(V_i^j)$ **Output** : Liste de composantes classée par ordre croissant de leur influence sur la performance du système

---

```

1 pour chaque  $i \in \{1, \dots, m\}$  faire
2   pour chaque  $t_r \in \{t_s, \dots, t_f\}$  faire
3     pour chaque  $Iter \in \{1, \dots, \eta\}$  faire
4       Calculer  $CI\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$  afin de déterminer la distribution de  $CI\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$ 
5       Calculer  $W\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$  afin de déterminer la distribution de  $W\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$ 
6     /*  $\forall i$  et  $\forall t_r$ , on a la distribution de  $CI\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$  et de  $W\mathfrak{R}_{\varphi,i}(t_r|e^j)$  */
7   On fait un classement stochastique des composantes du système selon ces distributions.

```

---

dans le chapitre 5 comment les composantes du système de transport ferroviaire sont classées dans les travaux de thèse présentées dans ce document.

### 2.4.1.3 Approches basées sur des méthodes d'optimisation mathématique

On trouve aussi dans la littérature des approches de quantification de la résilience basées sur des modèles d'optimisation mathématique des paramètres qui agissent sur la résilience du système étudié [52, 68, 69, 83, 50]. Ip et Wang dans [68, 69] par exemple proposent, pour des infrastructures que l'on peut facilement modéliser par un graphe, une approche de quantification de la résilience basée sur le nombre maximal de chemins qu'il y a entre chaque paire de nœuds après une perturbation. Cette approche permet d'identifier dans un réseau, les composantes les plus importantes afin de renforcer les mesures de protection autour de ces dernières. Sur la gestion d'une perturbation, la plupart des modèles d'optimisation mathématique reposent essentiellement sur le choix des emplacements où installer les ressources (parmi un ensemble de sites possibles) afin de mener le plus efficacement possible les opérations de gestion de crise. C'est ce problème que l'on appelle en optimisation combinatoire le problème de localisation [49, 50].

Une étude qui illustre bien l'utilisation du problème de localisation est [9], d'autant plus qu'elle aborde aussi la décontamination d'une population après une attaque NRBC. La décontamination d'une population (les passagers) ou plus généralement la gestion d'une attaque de type NRBC est particulièrement d'actualité dans les systèmes de transport de masse. Rares sont les études qui abordent cette problématique.

### 2.4.1.4 Approches basées sur la logique floue

Des approches basées sur la logique floue sont aussi utilisées pour la quantification de la résilience dans les systèmes sociotechniques [109, 55, 10]. La logique floue est souvent utilisée lorsque la méthode de quantification de la résilience fait intervenir à la fois des variables qualitatives et quantitatives. Elle permet de bien prendre en compte l'incertitude et l'incomplétude qu'il peut y

avoir sur des données du modèle. Il est souvent dit que ces approches sont proches du raisonnement humain [10, 15]. Nous reviendrons sur la méthode utilisée dans [109, 55] dans la section 2.4.2.

[15] propose une méthode d'analyse floue permettant de prioriser les facteurs qui améliorent la résilience dans un système sociotechnique. Ces facteurs sont entre autres les facteurs décrits dans [111] (section 2.3). Prioriser ces facteurs peut aider les gestionnaires de crise à mieux allouer les ressources afin d'améliorer la sécurité/résilience du système. Cette méthode combine la méthode d'analyse floue et les réseaux de neurones.

## 2.4.2 Cas particulier des systèmes de transport

La modélisation des systèmes de transport dans la littérature se fait souvent par des graphes. On modélise un système de transport par un graphe  $G = (V, A)$  où  $V$  est l'ensemble des sommets (nœuds), c'est-à-dire l'ensemble des points d'entrée des passagers dans le système (gares, stations, abris bus, etc.) et  $A$  l'ensemble des liens entre les paires de sommets que l'on appelle arêtes (infrastructures et matériels nécessaires au déplacement).

Dans un premier temps, on présente dans cette section une revue des indicateurs de performance d'un système de transport. Cette revue permet de comprendre notre choix quant aux indicateurs de performance que l'on propose pour le modèle développé dans le cadre de cette thèse. Elle permet aussi de voir comment les indicateurs de performance proposés pour notre modèle se démarquent des indicateurs que l'on trouve dans la littérature. Dans un second temps, une revue des modèles de quantification de la résilience des systèmes de transport est proposée.

### 2.4.2.1 Evaluation de la performance des systèmes de transport

Les indicateurs de performance des systèmes de transport peuvent être regroupés en deux catégories : ceux qui intègrent les capacités d'un système de transport et ceux qui ne les intègrent pas. Les capacités d'un système de transport sont caractérisées par :

- la capacité d'accueil des stations, trains, bus, etc. ;
- la fréquence des trains, bus, etc. ;
- les temps de parcours entre deux points dans le réseau ;
- etc.

Ces caractéristiques correspondent à un niveau de service.

Ces indicateurs qui n'intègrent pas les capacités d'un système de transport sont assez bien étudiés dans la littérature. On peut citer la centralité de degré<sup>2</sup> d'un nœud, notée  $D_c(v)$  [45, 27, 75] :

$$D_c(v) = \frac{\sum_{p \in V} a_{v,p}}{|V| - 1}, \quad \text{avec } a_{v,p} = \begin{cases} 1 & \text{si } v \text{ et } p \text{ sont adjacents} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.11)$$

$|V|$  représente le nombre d'éléments de l'ensemble  $V$ . La centralité de degré d'un nœud décrit la manière dont ce dernier est lié à ses voisins. Comme un nœud a au plus  $|V| - 1$  nœuds adjacents,

---

2. Le degré d'un nœud  $v$  dans un graphe  $G$  est le nombre d'arêtes de  $G$  incidentes à  $v$  [26].

la centralité de degré d'un nœud est normalisée par ce nombre dans l'équation 2.11. Cet indicateur permet d'identifier les hubs dans un système de transport.

La centralité de degré d'un nœud est donc un indicateur qui évalue l'importance de ce nœud par rapport à ses voisins, c'est-à-dire localement. L'importance d'un nœud sur l'ensemble d'un réseau (globalement) peut être définie par la centralité de proximité (closeness centrality en anglais). Elle est définie par [75, 84] :

$$D_{cc}(v) = \frac{\sum_{p \in V} L_{v,p}}{|V| - 1}, \quad \text{avec } |V| > 2 \quad (2.12)$$

$L_{v,p}$  correspond au plus court chemin entre les nœuds  $v$  et  $p$ . Ce plus court chemin dans cette équation peut être en temps ou en distance. La centralité de proximité d'un nœud  $v$  traduit la rapidité avec laquelle on peut atteindre les autres nœuds du réseau, à partir de  $v$ .

Un autre indicateur permettant d'évaluer un nœud sur l'ensemble d'un réseau (globalement) est la centralité d'intermédierité (betweenness centrality). Elle est définie de la manière suivante [8, 75, 84] :

$$\mathcal{B}^s(v) = \sum_{u \neq v \neq u'} \frac{|\omega_{u,u'}(v)|}{|\omega_{u,u'}|} \quad (2.13)$$

Où  $\omega_{u,u'}$  est l'ensemble des plus courts chemins du nœud  $u$  au nœud  $u'$  et  $\omega_{u,u'}(v)$  est l'ensemble des plus courts chemins de  $\omega_{u,u'}$  qui passent par  $v$ .  $\mathcal{B}^s(v)$  est un indicateur qui modélise l'importance d'un nœud dans les chemins qu'empruntent les passagers dans le réseau.

La caractéristique de la performance d'un système de transport la plus difficile à caractériser est le niveau de service qu'offre ce dernier [84]. Il y a deux principales raisons à cela :

- Le nombre de facteurs qui permettent de mesurer la qualité de service d'un système montre le caractère multidimensionnel de la performance de ce système. On peut citer parmi ces facteurs : la distance de marche, le temps d'arrêt, le nombre de correspondances nécessaires pour atteindre une destination, la durée des correspondances, etc.
- Le caractère multimodal des systèmes de transport rend difficile la caractérisation des connexions entre les différents points d'entrée du système.

Concernant les indicateurs qui intègrent les capacités d'un système de transport, Park et al. [93] proposent l'indice de connectivité d'un nœud. Cet indicateur intègre à la fois le principe des indicateurs de centralité vus précédemment et des capacités d'un système de transport. L'indice de connectivité d'un nœud  $v$  est défini comme étant la somme de la capacité, au nœud  $v$ , des lignes qui passent par  $v$ . Selon [93], la capacité, au nœud  $v$ , d'une ligne ( $l$ ) qui passe par  $v$  est :

$$P_l(v) = \frac{\sum_{d \in \mathcal{D}} \alpha \left( C_l \cdot \frac{60}{F_l} \cdot H_l \right) \times \beta \cdot V_l \times \gamma \cdot D_{l,v}^d}{|\mathcal{D}|} \quad (2.14)$$

$\mathcal{D}$  est l'ensemble des directions de la ligne  $l$  à la station  $v$ .  $C_l$  est la capacité moyenne des trains de la ligne  $l$ ,  $F_l$  la fréquence des trains sur la ligne  $l$  (on divise 60 par la fréquence pour avoir le nombre de trains par heure sur cette ligne).  $H_l$  est le nombre heures de service,  $V_l$  la vitesse des trains et  $D_{l,v}^d$  la distance qui sépare  $v$  de son nœud adjacent sur la ligne  $l$  et dans la direction  $d$ .  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des paramètres. L'indice de connectivité d'un nœud se formule alors de la manière

suivante :

$$\theta(v) = \sum_{l \in L} P_l(v) \cdot \mu_{l,v}, \quad \text{avec} \quad \mu_{l,v} = \begin{cases} 1 & \text{si la ligne } l \text{ passe par le nœud } v \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.15)$$

$L$  est l'ensemble des lignes du réseau. L'indice de connectivité peut être calculé pour une région (resp. une ligne, un réseau) en faisant le moyenne de l'indice de connectivité des nœuds formant cette région (resp. cette ligne, ce réseau).

Par la suite, Mishra et al. [84] ont fait évoluer  $P_l(v)$  en y ajoutant l'attractivité de la région dans laquelle se trouve le nœud  $v$ . Cette attractivité dépend des ménages, des zones d'activités, des entreprises autour du nœud considéré. Plus il y a des ménages, des zones d'activités, des entreprises autour du nœud  $v$  plus la valeur de  $P_l(v)$  augmente.

L'indicateur de centralité d'intermédierité que l'on a présenté précédemment a été adapté par Cats et al. [37] en y intégrant les capacités d'un système de transport. Ils proposent deux indicateurs de centralité d'intermédierité pour les systèmes de transport ferroviaires de masse : la centralité relative au flux de trains et celle relative au flux de passagers. Concernant la centralité relative au flux de trains (*OBC*), selon les auteurs [37], un lien ( $e$ ) est important aux yeux d'un opérateur de transport si plusieurs lignes et trains passent par ce dernier. Cet indicateur dépend de la date ( $t$ ) et de la durée ( $\tau$ ) de l'évaluation. Il dépend aussi du caractère stochastique du temps de parcours et d'arrêt des trains dans le réseau. On a :

$$OCB(e|t, \tau) = \frac{\sum_{l \in L} E[|K_{l,e}(t, \tau)|]}{\sum_{l \in L} E[|K_l(t, \tau)|]} \quad (2.16)$$

$E[|K_{l,e}(t, \tau)|]$  représente l'espérance du nombre de trains sur la ligne  $l$  qui passe par le lien  $e$  pendant la période de l'évaluation et  $E[|K_l(t, \tau)|]$ , l'espérance du nombre de trains sur l'ensemble de la ligne  $l$  pendant la période de l'évaluation.  $L$  est l'ensemble des lignes du réseau.

D'une manière similaire à l'équation 2.16, Cats et al. [37] proposent la centralité relative au flux de passagers (*PBC*) de la manière suivante :

$$PCB(e|t, \tau) = \frac{\sum_{l \in L} E[|N_{l,e}(t, \tau)|]}{\sum_{l \in L} E[|N_l(t, \tau)|]} \quad (2.17)$$

$E[|N_{l,e}(t, \tau)|]$  représente l'espérance du nombre de passagers sur la ligne  $l$  qui passe par le lien  $e$  pendant la période de l'évaluation et  $E[|N_l(t, \tau)|]$ , l'espérance du nombre de passagers sur l'ensemble de la ligne  $l$  pendant la période de l'évaluation. L'équation 2.17 exprime aussi le caractère stochastique du nombre de passagers sur la ligne  $l$  ou sur le lien  $e$ . Ce caractère stochastique est lié au choix de l'itinéraire des passagers, au temps de correspondance de ces derniers, etc. qui peuvent être aléatoires.

Dans la section 2.5, nous mettons en avant les limites des indicateurs de performance des systèmes de transport présentés dans cette section et décrivons en quoi le modèle proposé dans le cadre de cette thèse se démarque de ces indicateurs.

### 2.4.2.2 Quantification de la résilience des systèmes de transport

On montre que les graphes modélisant les systèmes de transport sont souvent des graphes invariants d'échelle (scale-free graph en anglais) [8, 76, 47, 100]. Un graphe invariant d'échelle est tel

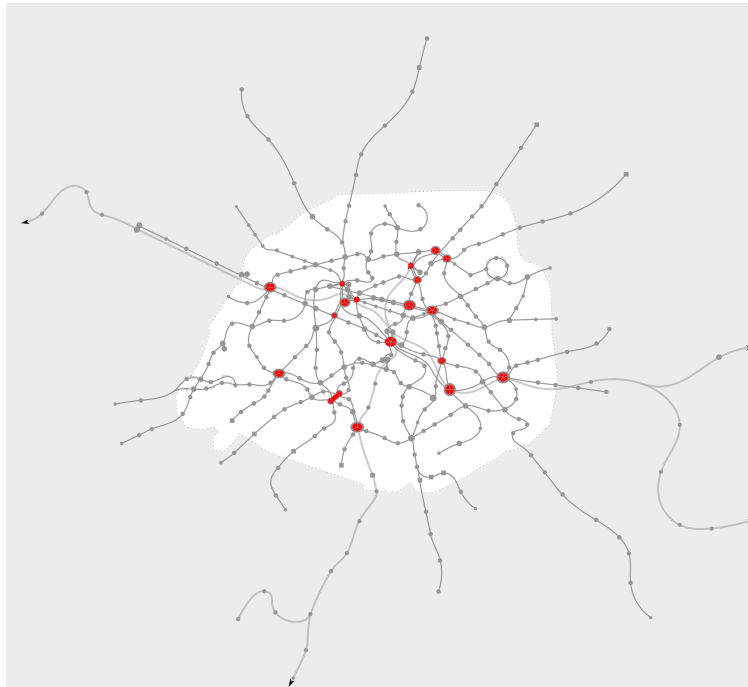


FIGURE 2.7 – Un exemple de graphe invariant d'échelle : Le réseau parisien de transport ferroviaire de masse. Les nœuds rouges sont les nœuds d'attraction.

que la proportion, notée  $P(k)$ , des nœuds de degré  $k$  suit une loi de puissance :

$$P(k) \sim k^{-\gamma}, \text{ où } \gamma \in [2, 3] \quad (2.18)$$

Les graphes invariants d'échelle sont caractérisés par :

- La présence des nœuds d'attraction (hubs en anglais) dans ces graphes [8, 100]. Les nœuds d'attraction sont les nœuds avec beaucoup d'arêtes incidentes : en général six, voir Figure 2.7.
- Leur grande vulnérabilité aux attaques ciblées [47, 100] comme par exemple les attaques terroristes sur les nœuds d'attraction.
- Concernant les systèmes de transport, ils sont construits de manière à avoir une efficacité globale à moindre coût lorsqu'ils sont attaqués et localement, très vulnérables aux pannes [76]. Cette manière de construire les systèmes de transport vient du fait qu'une perturbation à une station peut être gérée de manière à utiliser d'autres moyens de transport ou d'autres lignes afin de contourner la partie du réseau perturbée. Ce qui permet "d'isoler" facilement la zone de perturbation et par conséquent, la performance du réseau de manière globale n'est pas considérablement dégradée.

La plupart des études de la résilience dans les systèmes de transport portent sur la topologie et la connectivité des composantes du système les unes par rapport aux autres. Ceci se fait en modélisant le problème de la résilience dans les systèmes de transport par un problème d'optimisation du flux de passagers dans le système et en analysant ce flux lorsque l'on simule une perturbation (retrait des arêtes et/ou des nœuds du graphe) [76, 18, 47, 12, 69].

Une étude de la résilience dans les systèmes de transport ne doit pas porter que sur l'aspect topologique et la connectivité du système de transport. Elle doit tenir compte de l'organisation et des plans de gestion mis en place par l'opérateur de transport pour venir à bout de la perturbation [47, 100]. C'est dans cette perspective que Henry et Ramirez-Marquez [61] proposent un modèle de quantification de la résilience dans un système de transport routier basé sur différentes stratégies de gestion de la perturbation. Ils proposent trois indicateurs de performance : le plus court chemin d'une source  $S$  à un puits  $P$ , le flux maximal de passagers qui peuvent passer de la source  $S$  au puits  $P$  et l'état général des routes dans le réseau de transport c'est-à-dire la longueur totale des routes praticables. Après avoir modélisé les perturbations sur le système par la réduction de la capacité de certaines routes, les auteurs ont évalué l'effet des différentes stratégies de gestion des perturbations sur les indicateurs de performance. Les stratégies de gestion des perturbations correspondent à l'ordre dans lequel les différentes routes endommagées sont réparées et leur durée de réparation. Cette approche est une approche classique en stratégie de maintenance des systèmes.

Un autre modèle dans lequel la perturbation est simulée en réduisant la capacité des liens est celui de Omer et al. [90]. Ce modèle permet de quantifier la résilience des systèmes de transport maritime. Omer et al. proposent trois indicateurs de performance :

- La quantité de marchandises qui transite à un port donné (tonnage). Il est noté  $R_{Tn} \in [0, 1]$ .

$$R_{Tn} = \frac{\text{Tonnage pendant la perturbation}}{\text{Tonnage avant la perturbation}} \quad (2.19)$$

La perturbation pouvant durer plusieurs jours, pour calculer le tonnage pendant la perturbation, les auteurs ont fait une discrétisation de la durée de la perturbation en plusieurs périodes. Pour chaque période, ils ont évalué les tonnages avant et pendant la perturbation.

- Le temps de parcours sur chaque route maritime, noté  $R_T \in [0, 1]$ .

$$R_T = \frac{\text{Temps de parcours avant la perturbation}}{\text{Temps de parcours pendant la perturbation}} \quad (2.20)$$

Le temps de parcours inclut le temps de stockage des marchandises dans les ports, le temps que prend les formalités administratives, etc.

- Le coût lié à la perturbation, noté  $R_C \in [0, 1]$ .

$$R_C = \frac{C_{init}}{C_{init} + C_{loss}} \quad (2.21)$$

$C_{init}$  est le coût d'exploitation en temps normal et  $C_{loss}$ , le surplus de coût dû à la perturbation. Ce surplus de coût inclut le coût de stockage des marchandises, le coût lié à la péremption des marchandises, etc.

Concernant l'impact économique d'une perturbation sur une région donnée, Cox et al. [42] ont fait une étude de la résilience du métro de Londres après les attentats terroristes de 2005 contre

le métro londonien. Cette étude est basée sur un indicateur : le nombre des usagers du métro qui continuent à prendre les transports en commun pendant la période de temps qui suit ces attentats. L'étude est faite sur la base d'une enquête sur le trajet des usagers du métro de Londres pendant les quatre mois qui suivent les attentats. Plus il y a d'usagers du métro qui continuent à prendre le métro ou d'autres modes de transport comme le bus, leur voiture personnelle, le vélo, aller à pied, etc, plus le système est résilient. Cette étude est intéressante dans le sens où elle permet d'évaluer l'adaptabilité des usagers du métro londonien face à cette perturbation. L'adaptabilité est un terme que l'on retrouve souvent lorsqu'on parle de la résilience d'un système écologique ou d'une organisation. Notons aussi que cette étude est essentiellement basée sur le trajet des usagers (l'usage) du métro de Londres. Il n'y a donc pas la prise en compte du système de transport de Londres à travers son fonctionnement, ses différents sous-systèmes, ses composantes, etc.

Une autre façon de quantifier la résilience d'un système de transport est de faire une simulation numérique de ce système. Cela implique une bonne modélisation du système afin de mieux prendre en compte tous les facteurs importants pour reproduire le comportement du système. C'est ce que Greenberg et al. [58, 57] ont fait en simulant la partie du réseau ferré des États-Unis qui est entre la station New York Penn et Trenton au New Jersey. Ils proposent trois modèles :

- Le premier modèle simule le flux de passagers dans ce réseau en prenant en compte le fonctionnement des trains, les horaires des trains, le temps de parcours sur chaque tronçon de voie, le temps de correspondance entre deux lignes en une station, etc.
- Le deuxième modèle simule la dispersion d'une substance chimique dans l'air.
- Le troisième modèle simule l'impact économique de cette perturbation sur la région dans laquelle se trouve le système étudié.

Le premier modèle de [58, 57] simule essentiellement le fonctionnement opérationnel d'un système ferroviaire de masse. Il ne tient pas compte des capacités organisationnelles qu'il y a autour de ce système afin de mieux gérer les perturbations. Ces trois modèles mis ensemble ont permis d'évaluer l'impact économique de la perturbation sur la région. Cela constitue l'objectif principal des travaux menés dans [58, 57] et explique cette absence de l'aspect organisationnel dans ce modèle.

Cette prise en compte de l'aspect organisationnel manque cruellement dans les approches de quantification de la résilience dans les systèmes d'une manière générale et en particulier dans les systèmes de transport. Dans les systèmes de transport de masse, l'organisation joue un rôle très important dans la gestion des perturbations. Dans son étude sur la robustesse du réseau ferré de Suisse [47, 48], Robert Dorbritz a inclus l'aspect organisationnel qu'il y a autour de ce système. La robustesse dans [47, 48] correspond essentiellement à la connectivité structurelle du réseau [8] : le plus court chemin moyen, le nombre de nœuds dans le plus grand cluster, la centralité d'intermédiarité (betweenness centrality en anglais). L'auteur fait une modélisation basée sur les différents sous-systèmes qui composent un système de transport ferré (Figure 2.8) :

- Le sous-système Infrastructure (les infrastructures physiques). Il correspond aux composantes du système ferré qui accueillent et transportent les passagers (gares/stations, rails, trains et leur fonctionnement), y compris les connections entre elles.
- Le sous-système organisationnel. C'est essentiellement la définition des différentes lignes et l'évaluation de l'organisation humaine et opérationnelle autour du système afin d'estimer la

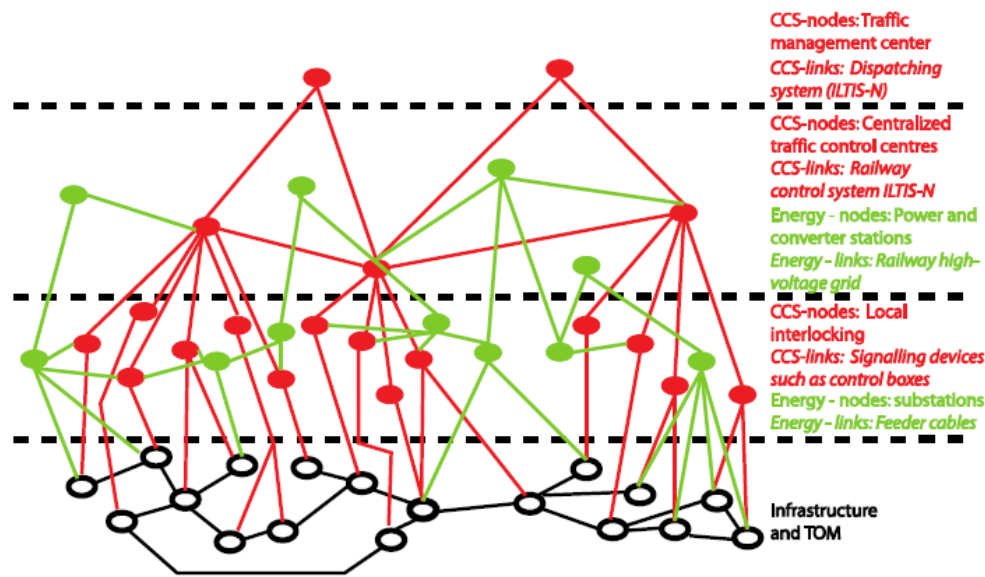


FIGURE 2.8 – Modélisation multi-couches des systèmes de transport dans [47, 48]

capacité des liens (nombre de trains qui peuvent passer par ces liens).

- Le sous-système contrôle commande, en anglais Control and Command System (CCS). La modélisation de ce sous-système dans [48] est la possibilité d'ouvrir ou de fermer certaines gares à distance.
- Le sous-système d'énergie. Ce sous-système permet de contrôler des parties du réseau physique à partir des centres de traitement et de distribution d'énergie (représentés par des nœuds).

On trouve aussi dans [72] une modélisation de systèmes de transport ferroviaire similaire à celle proposée par Robert Dorbritz [47, 48]. Une modélisation par couches ou sous-systèmes est faite d'un système ferroviaire. Les auteurs ont appliqué leur modèle au réseau ferré suédois.

Serulle [109] et Freckleton [55] ont eux aussi intégré dans leur modèle basé sur l'analyse floue des variables agissant sur la résilience dans un système de transport, le "niveau" d'organisation qu'il y a autour de ce système. Ils ont regroupé les variables en quatre groupes :

- la disponibilité et l'accessibilité du réseau,
- la demande en termes de transport,
- le coût du transport,
- le retard perçu par les usagers.

A chaque groupe, une valeur allant de 0 à 9 lui est attribuée en fonction des caractéristiques des variables constituant chaque groupe. Les auteurs intègrent enfin l'organisation dans le modèle en pondérant ces valeurs par une variable auxiliaire qui représente la capacité du centre de gestion du trafic à bien gérer les perturbations.

Murray-Tuite dans [86] propose des variables agissant sur la résilience des systèmes de transport. Ces variables sont conceptualisées dans [97] pour modéliser les interdépendances entre ces variables (voir la Figure 2.9). Dans la Figure 2.9, ces variables sont celles qui sont encadrées. On voit aussi dans la Figure 2.9, l'influence de ces variables sur le niveau de résilience d'un système de transport. Le sens dans lequel les variables agissent les unes sur les autres (positivement ou négativement) est aussi modélisé. Par la suite dans [97], un certain nombre d'indicateurs est proposé pour évaluer chaque variable décrite dans la Figure 2.9. Par exemple le temps de parcours par kilomètre et le coût du transport par kilomètre sont utilisés pour évaluer la connectivité et le caractère économiquement abordable d'un système (affordability) respectivement. Ces indicateurs et variables sont évalués dans [97] en utilisant une échelle comparable à celle de Likert (section 2.4).

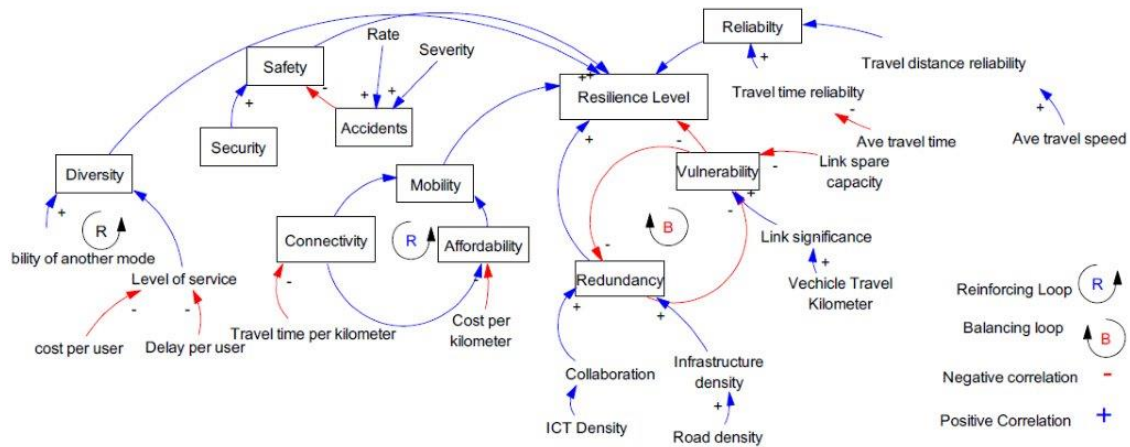


FIGURE 2.9 – Interdépendances entre ces variables agissant sur la résilience des systèmes de transport [97]

## 2.5 Contribution des travaux de cette thèse à la résilience des systèmes de transport de masse

A travers cet état de l'art sur la résilience des systèmes, on a vu qu'il y a un problème d'uniformisation du concept de la résilience des systèmes tant sur sa définition que sur sa quantification. Concernant la définition de la résilience, différents sens sont donnés aux termes utilisés dans la littérature pour désigner les caractéristiques d'un système résilient. On note aussi que certains auteurs considèrent la résilience d'un système comme n'étant que la robustesse de ce système. D'autres intègrent aussi les actions de récupération du système ou encore le retour d'expérience dans le concept de la résilience. Cela ne facilite pas l'uniformisation du concept de la résilience. Ce manque d'uniformisation du concept de la résilience dans la littérature vient aussi du fait que les systèmes étudiés sont assez différents les uns des autres. De ce fait, pour mieux saisir les caractéristiques de chaque système, il est important d'adapter les modèles de quantification de la résilience à chaque système.

Il est à noter aussi qu'il y a dans la littérature, deux types d'approches de quantification de la résilience :

- les approches prédictives qui modélisent le système afin de quantifier sa résilience [16, 122].
- les approches non prédictives qui évaluent la résilience d'un système par rapport à une perturbation après l'occurrence de cette dernière [42].

Concernant les approches prédictives, la quantification de la résilience se fait souvent avec des indicateurs de performance du système étudié. Cela requiert une bonne modélisation du système. Les systèmes étant de plus en plus complexes de nos jours, leur modélisation aussi devient de plus en plus difficile et par conséquent, la quantification des indicateurs de performance de ces systèmes est aussi de plus en plus ardue. Ceci nous a permis d'identifier certaines limites des modèles de quantification de la résilience dans la littérature :

- Manque de la prise en compte de l'aspect organisationnel dans les modèles de quantification de la résilience. Comme on peut le remarquer dans [100, 47], il est difficile d'évaluer la performance d'une organisation pendant la gestion d'une perturbation. Ceci est lié entre autres au facteur humain et aussi au stress lié à la perturbation surtout pour des événements rares avec de graves conséquences. On note aussi qu'il est difficile de modéliser et d'intégrer les plans de gestion de crise dans les modèles.
- Les modèles de quantification de la résilience ne prennent souvent pas en compte l'évolution du système au cours de temps. Par exemple, dans un système de transport de masse, le nombre de passagers dans le système pendant une journée évolue au cours du temps. De ce fait, une perturbation en heure creuse n'a pas le même impact sur le système qu'une perturbation en heure de pointe. Il y a aussi dans la littérature, très peu de modèles intégrant des indicateurs sur le temps de retour à la normale.
- Nous avons vu que les systèmes sont souvent complexes. Pour saisir cette complexité, une approche systémique est nécessaire lorsque l'on propose un modèle de quantification de la résilience, avec une prise en compte des interdépendances des composantes du système étudié [40]. L'approche systémique et l'interdépendance des composantes lorsqu'on étudie la résilience des systèmes complexes, comme dans [72, 47], ne sont pas assez prises en compte dans la littérature.
- La plupart des modèles de quantification de la résilience prennent en compte une seule perturbation à la fois. Or les actes intentionnels comme les attentats terroristes se produisent bien souvent simultanément sur plusieurs composantes du système. Il y a donc un besoin de prendre en compte dans les modèles différents types de perturbations simultanément ou à des intervalles de temps réduits sur le système comme dans [123].

Dans la suite de ce document, une approche de quantification de la résilience dans les systèmes de transport ferroviaire de masse est présentée. Cette approche a pour objet principal d'apporter, dans la mesure du possible, des réponses aux limites des indicateurs et des approches de quantification/qualification de la résilience présentées dans cette section.

Le modèle de quantification de la résilience dans les systèmes de transport de masse proposé dans ce document est un modèle prédictif proche de l'approche proposée par Bruneau et al. [29, 30]. Pour élaborer ce modèle, les mesures de performance du système sont définies et caractérisées dans un premier temps. Puis à partir de ces mesures de performance, des indicateurs de quantification de la résilience du système sont proposés. Pour quantifier ces indicateurs, les composantes du système

et leurs interdépendances sont identifiées et caractérisées. Enfin, en intégrant dans la mesure du possible, les réponses aux limites des indicateurs et des approches de quantification/qualification de la résilience présentées dans cette section, un modèle de quantification de la résilience dans les systèmes de transport de masse est proposé.

## 2.6 Conclusion

La résilience est un concept de plus en plus étudié dans la littérature tant par les chercheurs que par les industriels. Les travaux présentés dans ce chapitre montrent que la résilience est un concept pluridisciplinaire. Cette pluridisciplinarité rend difficile l'uniformisation des définitions de la résilience et aussi des méthodes de quantification/qualification de cette dernière.

L'état de l'art qui a été présenté tout au long de ce chapitre a également permis d'identifier les limites des indicateurs et des approches de quantification/qualification de la résilience. Ces limites sont présentées dans la section 2.5 de ce chapitre.

Dans la suite de ce document, une approche de quantification de la résilience dans les systèmes de transport ferroviaire de masse est présentée. Cette approche propose des indicateurs mieux adaptés au contexte du transport ferroviaire de masse. Elle se distingue ainsi des approches de quantification/qualification de la résilience présentées dans la section 2.5. Au cours de la description du modèle proposé, les réponses aux limites des indicateurs et des approches antérieurs seront précisées.

Dans un premier temps, le chapitre 3 présente la description et la formalisation du modèle de quantification de la résilience proposé pour les systèmes de transport ferroviaire de masse.

## Chapitre 3

# Proposition d'un modèle de quantification de la résilience dans les systèmes ferroviaires de masse

### 3.1 Introduction

Il ressort de l'état de l'art présenté dans le chapitre 2 que pour quantifier la résilience d'un système, il est important de bien le modéliser afin d'intégrer le mieux possible les caractéristiques d'un système résilient comme : Robustesse, Réactivité, Redondance, Rapidité, etc. Le modèle de quantification de la résilience d'un système de transport de masse décrit dans ce chapitre est basé sur l'évaluation de la performance de ce système. En effet, en comparant la performance du système lorsque le système est soumis à des perturbations avec cette même performance en absence de perturbations, on est capable d'estimer l'impact de ces perturbations sur le système. La modélisation des plans de gestion de crise présentée dans ce chapitre permet par la suite de voir l'amélioration que peuvent apporter ces différents plans sur la performance du système et donc sur la résilience de ce dernier. Ce chapitre représente donc le cœur des travaux de thèse proposés.

La section 3.2 décrit comment les systèmes ferroviaires sont modélisés dans la littérature. Il est abordé aussi dans cette section les indicateurs de performance de ces systèmes et la modélisation des perturbations sur des composantes de ce système dans la littérature. La section 3.3 traite de la définition de la performance d'un système ferroviaire de masse dans le cadre de cette étude. Une définition basée sur les fonctions principales que doit assurer un système de transport ferroviaire de masse est proposée. Puis, la section 3.4 présente les indicateurs permettant d'évaluer la performance du système décrite dans la section 3.3.

A partir des fonctions principales d'un système de transport ferroviaire de masse décrites dans la section 3.3, le système ferroviaire et ses sous-systèmes sont détaillés dans la section 3.5. La justification du choix des composantes du système dans le modèle se base sur les fonctions principales d'un système de transport ferroviaire de masse. Une étude des interdépendances entre les sous-systèmes est proposée dans la section 3.6. Puis, dans la section 3.7, la modélisation formelle des

sous-systèmes et des interdépendances inter et intra sous-systèmes décrits dans les sections 3.5 et 3.6 est abordée. Ensuite la section 3.8 présente comment les perturbations et les plans de gestion de crise sont modélisés. Enfin, la section 3.9 conclut ce chapitre.

## 3.2 Revue des modèles de simulation des systèmes ferroviaires et des perturbations dans ces systèmes

Il est présenté dans cette section quelques modèles de système de transport ferroviaire de masse. Un accent particulier est mis sur la capacité de ces modèles à simuler des perturbations. Le but ici est de donner un aperçu de la modélisation d'un système de transport de masse dans la littérature. Le modèle proposé dans ce document est alors positionné par rapport à ceux présentés dans cette section.

Peeta et Ziliaskopoulos dans [94] soulignent les limites des modèles analytiques permettant de modéliser le trafic dans un système de transport, surtout lorsque l'on cherche des résultats proches de la réalité et applicables à des réseaux réels. À l'inverse, les modèles basés sur la simulation numérique sont plus adaptés pour le réalisme de leurs résultats et leur applicabilité à des réseaux réels, c'est-à-dire des réseaux de grande taille. De plus, ces modèles peuvent facilement modéliser les interdépendances complexes dans les systèmes de transport [94, 44].

L'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs de nos jours fait que les modèles simulant le fonctionnement des systèmes de transport ferroviaire sont de plus en plus fréquents dans la littérature. Ils peuvent être classés en différentes catégories :

- macroscopiques/mésoscopiques/microscopiques  
Ils font référence au niveau de détail donné au système modélisé. La Figure 3.1 décrit un exemple de modèle macroscopique, mésoscopique et microscopique.
- synchrone/asynchrone  
Cette catégorie caractérise l'aspect temps réel ou non du modèle.
- déterministe/stochastique

Dans les sous-sections qui suivent, quelques modèles de simulation de systèmes de transport ferroviaire sont présentés.

### 3.2.1 NEMO : Network Evaluation Model

Sewcyk et al. [110] proposent un modèle macroscopique d'un système de transport ferroviaire de masse et du fret ferroviaire. Ce modèle prend en compte aussi bien les modifications dans la structure du réseau (nouvelles lignes, nouvelles stations, suppression de lignes ou stations, etc.) que les changements du service proposés aux passagers. Le modèle évalue aussi le coût du service proposé. Il est composé de quatre modules, Figure 3.2 :

- Infrastructure module (Module infrastructure)  
Ce module modélise le réseau par un graphe dans lequel les nœuds représentent les stations

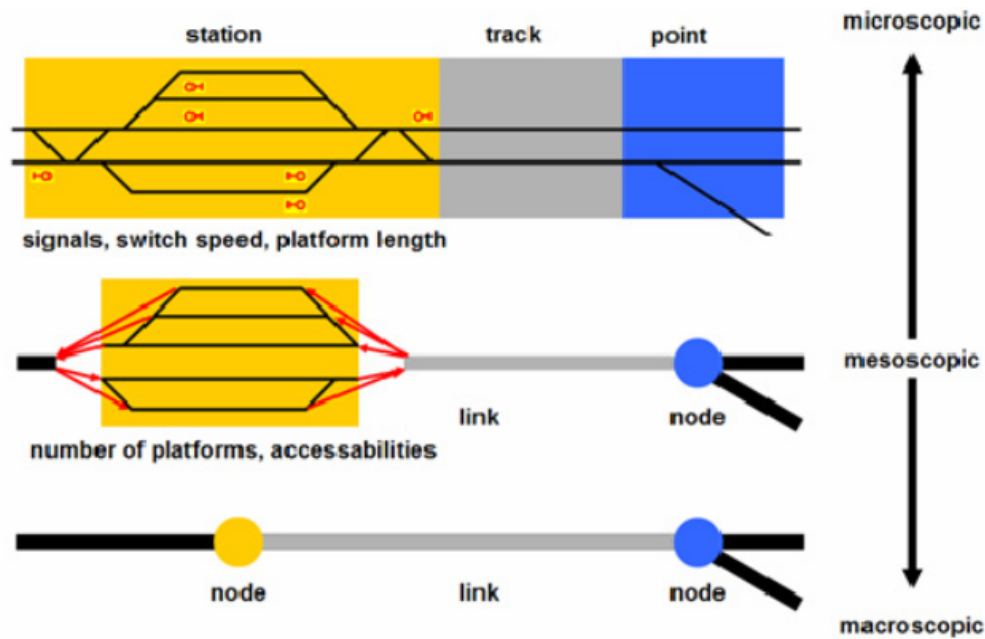


FIGURE 3.1 – Différences entre les modèles microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques [96]

et les points de jonction sur une ligne, les arcs représentent les liens entre ces nœuds.

- Traffic module for passenger trains (Module de simulation des passagers)  
Pour ce module, la demande entre chaque paire de nœuds (origine/destination) est estimée dans un premier temps. Puis un trajet est attribué aux passagers en suivant deux critères d'optimisation : le plus court chemin en temps de trajet et le coût du service proposé. A partir des résultats obtenus en attribuant les trajets aux passagers, des trains sont affectés aux lignes du réseau. Dans le processus d'affectation des trains aux lignes, la capacité des trains est prise en compte. Par la suite, le flux des trains et le type de ces derniers sont comparés à l'offre initiale prévue par l'opérateur de transport. Si l'offre simulée (le flux des trains simulé) ne correspond pas à l'offre initialement prévue, on reprend le processus à partir de la simulation de la demande entre chaque paire de nœuds jusqu'à ce que l'offre simulée soit proche de l'offre initialement prévue.
- Traffic module for freight train (Module de simulation du fret)  
Le module de simulation du fret est similaire au module de simulation des passagers présenté ci-dessus.
- Evaluation module (Module d'évaluation du coût du service proposé)  
L'évaluation du coût de service proposé se base sur les données fournies par les modules décrits précédemment. Il prend en compte les coûts liés à l'utilisation des infrastructures, des trains, etc.

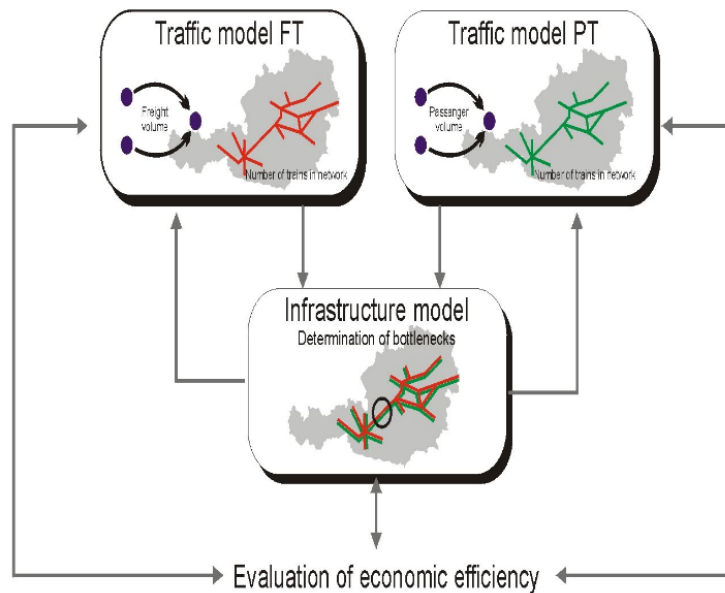


FIGURE 3.2 – Les différents modules de NEMO [110]

### 3.2.2 SIMONE : SIMulation of Model NETwork

Un autre modèle macroscopique permettant de simuler un système de transport ferroviaire est le modèle SIMONE [82]. C'est un modèle d'aide à la décision que l'on peut utiliser lors de la conception d'un nouveau système de transport ferroviaire. On peut aussi l'utiliser pour analyser la robustesse ou les causes d'une perturbation dans un système ferroviaire.

SIMONE est composé de huit modules, Figure 3.3 :

- **Incontrol Center**  
Ce module est le cœur du modèle. Il agrège les informations qui lui sont transmises par les autres modules du système, les traite et les transmet aux modules qui en ont besoin.
- **Simulation Library**  
C'est une collection de six modules élémentaires présentés dans le Tableau 3.1.
- **Infra and Timetable Database Interface**  
Ce module permet de générer, à partir des informations sur le réseau et des horaires des trains, des structures de données utilisées dans SIMONE. Une connection peut être faite à la base de données de l'opérateur de transport ferré allemand (DONS), à partir de ce module.
- **Automatic Model Generator**  
Ce module permet de générer les structures de données utilisées dans SIMONE sans l'intervention de l'utilisateur (de manière automatique).
- **Simulation Models**  
Il permet de faire une représentation graphique du réseau. Pendant la simulation, ce module représente la position des trains au cours du temps et avec différentes couleurs en fonction de la catégorie du train (train intercity, fret, TGV, train en retard, etc.).

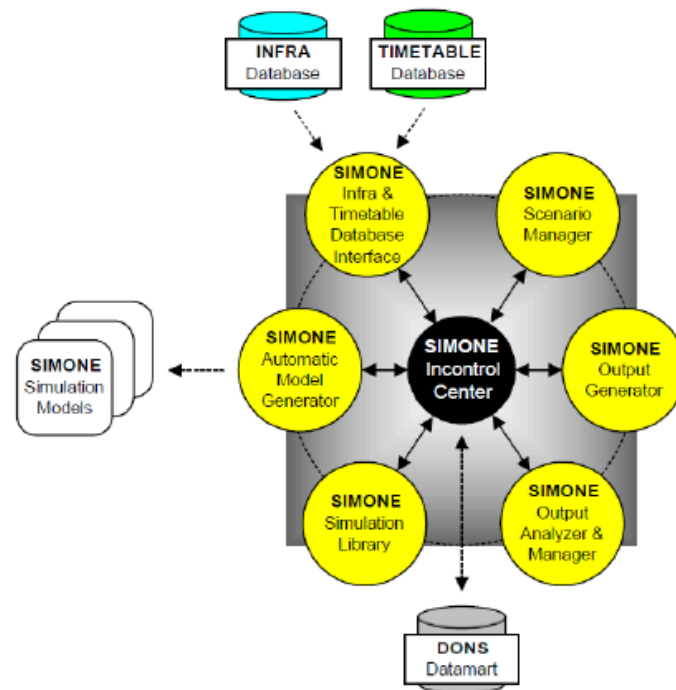


FIGURE 3.3 – Les différents modules de SIMONE [82]

- Scenario Manager  
Il permet de générer les scénarios
- Output Generator  
Il permet de générer les résultats de la simulation.
- Output Analyser and Manager  
Il permet d'analyser les résultats de la simulation. L'analyse peut se faire par station, par ligne, etc. avec différents niveaux de détail.

### 3.2.3 OpenTrack

OpenTrack est un modèle microscopique. Il est connu dans le milieu ferroviaire aussi bien par les industriels que par les chercheurs. Son architecture est décrite sur la Figure 3.4.

Les modules d'entrée du modèle sont les matériels roulants, la structure du réseau et la table des horaires des trains. Le module matériels roulants gère toutes les informations et caractéristiques sur les matériels roulants qui circulent dans le réseau. Le module sur la structure du réseau décrit les réseaux ferroviaires sous forme de graphe. La topologie du réseau est créée et gérée à l'aide d'un éditeur graphique. Les objets graphiques sont caractérisés par des attributs comme par exemple la pente, la vitesse limite etc. En plus, des objets logiques comme des itinéraires sont utilisés. D'autres informations comme les informations sur la signalisation sont aussi gérées par ce module. Le module sur la table des horaires des trains prend en compte toutes les informations sur le mouvement des trains : les heures d'arrivée ou de départ des trains dans les stations du réseau, les temps de

| Modules élémentaires                           | Description                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simulation settings (paramètres de simulation) | Cela regroupe les paramètres qui contrôlent la simulation (La durée de la simulation, le pas de temps, etc.)                                                                  |
| Network settings (paramètres du réseau)        | Cela regroupe les propriétés du réseau, les caractéristiques d'une perturbation sur le réseau, etc.                                                                           |
| Statistics (indicateurs)                       | Cela regroupe les indicateurs de performance du système.                                                                                                                      |
| Timetable (horaires des trains)                | Cela traite des informations comme les heures de passage des trains, les temps de stationnement des trains dans les stations, les temps de parcours entre deux stations, etc. |
| Station                                        | Stations, Jonctions, etc.                                                                                                                                                     |
| Connection                                     | Les rails entre les stations                                                                                                                                                  |

TABLE 3.1 – Les modules élémentaires du module Simulation Library de SIMONE

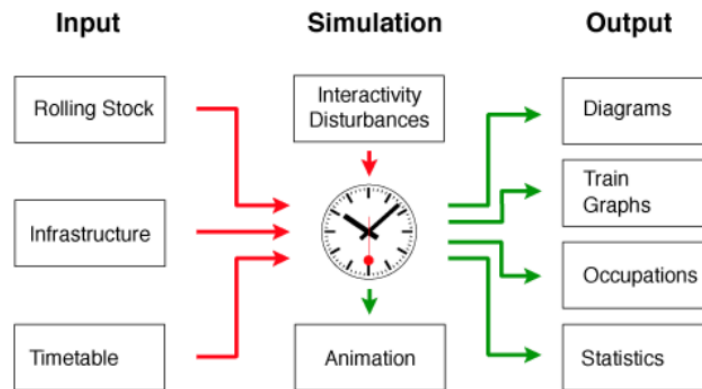


FIGURE 3.4 – L'architecture du modèle OpenTrack [91]

stationnement des trains, etc. Ces informations peuvent être déterministes ou stochastiques selon le besoin de l'utilisateur.

La simulation du trafic est effectuée en combinant à la fois les équations du mouvement des trains, l'état de la signalisation et les horaires des trains. Après un cycle de simulation, OpenTrack peut analyser et présenter les résultats en forme de diagrammes, de graphiques espace-temps, de graphiques d'occupation des voies et d'autres statistiques.

### 3.2.4 Limites des modèles de simulation des systèmes ferroviaires présentés

Ces modèles de simulation d'un système ferroviaire permettent essentiellement aux opérateurs de transport de mieux dimensionner le service proposé aux passagers. Ils ne prennent pas assez en compte la défaillance des composantes du système, encore moins les conséquences de cette défaillance qui peut se propager via les interdépendances.

Ces modèles ne prennent pas non plus en compte tous les sous-systèmes qui composent un

système ferroviaire. Ils ne modélisent que les infrastructures de transport ferroviaire qui accueillent et transportent les passagers (stations, voies, lignes, trains, etc.). Ces modèles ne sont donc pas adaptés pour la quantification de la résilience d'un tel système en modélisant ce dernier dans son ensemble : prise en compte tous les sous-systèmes et leurs interdépendances.

Le Tableau 3.2 récapitule les fonctionnalités des modèles de simulation des systèmes ferroviaires présentées dans les sections précédentes.

|                                                             | NEMO | SIMONE | OpenTrack |
|-------------------------------------------------------------|------|--------|-----------|
| Prise en compte de la demande des passagers                 | X    | X      | X         |
| Détermination des points d'engorgement                      | X    | X      | X         |
| Visualisation des résultats                                 | X    | X      | X         |
| Dimensionnement du service                                  | X    | X      | X         |
| Modification de la structure du réseau                      | X    | X      | X         |
| Simulation des perturbations (retard des trains)            | X    | X      | X         |
| Interdépendances liées aux retards des trains               | X    | X      | X         |
| <b>Prise en compte de l'ensemble des sous-systèmes</b>      |      |        |           |
| <b>Défaillance des composantes et leur interdépendances</b> |      |        |           |
| <b>Plans de gestion de crise</b>                            |      |        |           |
| Coûts liés au fonctionnement du système                     | X    |        |           |
| Coûts liés à une perturbation                               |      | X      |           |

TABLE 3.2 – Les fonctionnalités des modèles de simulation des systèmes ferroviaires

### 3.3 Caractérisation de la performance d'un système de transport ferroviaire de masse

La section précédente a permis de voir comment un système de transport ferroviaire peut se modéliser et comment on peut évaluer la performance de ce dernier. Il sera présenté dans cette section, la définition de la performance d'un système de transport ferroviaire adoptée dans cette étude.

L'ouverture à la concurrence des systèmes de transport de masse fait que les opérateurs de transport sont de plus en plus amenés à fournir des services de bonne qualité aux passagers afin d'augmenter l'attractivité du service qu'ils proposent. C'est entre autres pour cette raison que la mesure de performance proposée dans cette étude est essentiellement basée sur le service proposé aux passagers. Nous considérons donc que l'objectif principal d'un opérateur de transport est de réaliser l'offre de transport dans la région dans laquelle ce dernier se trouve. Cet objectif se traduit pour une étude de la résilience par la fonction : *"transport des passagers en toute sécurité"*. Cette fonction principale est détaillée ensuite en quatre sous-fonctions en se basant sur deux normes décrites dans [3, 1]. La norme [3] présente les exigences fonctionnelles des systèmes de contrôle-commande et de gestion de transport guidé urbain tandis que la norme [1] présente les exigences fonctionnelles et de performances d'un système CBTC (Communications-Based Train Control).

Pour identifier ces sous-fonctions, nous proposons de regrouper en quatre catégories les fonctions normalisées d'un système de transport de masse présentées dans [3, 1] en relation avec le transport des passagers. Cela nous permet d'obtenir les quatre sous-fonctions suivantes :

- Conduite/mouvement et sécurité des trains (SF1)  
Elle consiste à garantir la sécurité (protection) des itinéraires des trains, l'espacement et la vitesse des trains. Le mouvement, les arrêts et les départs des trains sont aussi portés par cette fonction.
- Supervision/gestion du trafic (SF2)  
Cette sous-fonction consiste à suivre les trains, à réguler le trafic (établir la restriction du mouvement ou de la vitesse des trains). Elle consiste aussi à gérer l'information voyageurs de manière centralisée.
- Gestion des passagers (SF3)  
Elle consiste à assurer la sécurité des voyageurs à bord des trains et dans les stations. Un autre aspect de cette fonction est la surveillance et la communication avec les passagers.
- Disponibilité du réseau (SF4)  
Cette sous-fonction consiste à assurer la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement du réseau. Pour ce faire, l'organisation de l'opérateur de transport devra permettre l'intervention, dans les brefs délais, des agents d'exploitation et de maintenance lors des perturbations.

Dans le modèle proposé dans cette thèse, ces sous-fonctions sont portées par un ensemble de sous-systèmes que nous détaillerons dans la section 3.5. On verra aussi dans la section 3.5 l'influence des composantes de chaque sous-système sur les sous-fonctions qui viennent d'être décrites. Cela permettra de justifier la prise en compte des composantes de chaque sous-système dans le modèle proposé.

On rappelle ici que la performance d'un système de transport de masse définie dans le modèle est relative à la mission principale d'un opérateur de transport ferroviaire de masse : "transport des passagers en toute sécurité". La quantification de cette fonction se fait à travers les indicateurs de performance définis dans la section 3.4.

### 3.4 Indicateurs de performance utilisés

La modélisation d'un système doit se faire sans perdre de vue l'objectif que l'on cherche en concevant ce modèle. Dans cette étude on veut évaluer les indicateurs de performance du système. Ces indicateurs de performance vont permettre par la suite de quantifier la résilience du système étudié. Les indicateurs de performance proposés sont (détaillés ci-après dans les sections 3.4.1 à 3.4.3) :

- le nombre de passagers arrivés à destination,
- le retard total accumulé par l'ensemble des passagers,
- la charge de passagers à une station ou sur une ligne à un instant donné.

Ces indicateurs font référence au niveau de service proposé par l'opérateur de transport aux passagers i.e. à la fonction "transport des passagers en toute sécurité".

### 3.4.1 Le nombre de passagers arrivés à destination

Un des objectifs d'un opérateur de transport de masse est de transporter les passagers à leur destination en toute sécurité. De ce fait, il est important de prendre en compte ce indicateur dans les performances du système. On entend par destination d'un passager, la station ou la gare à laquelle le passager souhaite sortir du système. Il peut arriver qu'une partie des passagers n'arrive pas à destination. Cela peut être dû à une grave perturbation dans le système de transport entraînant des blessés et/ou des morts. On peut prendre comme exemple de grave perturbation, une explosion dans une station ou dans un tunnel du système. Dans ces conditions, le but de l'opérateur de transport est en partie d'éviter ou du moins de limiter les dommages en termes de blessés ou de morts dus à cette perturbation.

En absence de perturbation, le comportement des passagers qui consiste à quitter le système d'eux même avant d'arriver à la destination qu'ils ont choisie n'est pas pris en compte dans cette étude. Néanmoins, en présence de perturbation, certains passagers peuvent changer leur itinéraire ou même quitter le système pour prendre un autre mode de transport. Ce comportement en présence de perturbation est pris en compte dans notre étude. On verra plus tard dans le chapitre 4 comment ce comportement des passagers est modélisé et pris en compte dans le calcul du nombre de passagers qui arrivent à leur destination.

### 3.4.2 Le retard total accumulé par l'ensemble des passagers

Un autre indicateur du niveau de service est le retard total accumulé par l'ensemble des passagers. Ce retard est relatif au temps mis par les passagers pour arriver à destination lorsqu'il n'y a pas présence d'une perturbation dans le système.

### 3.4.3 La charge de passagers à une station à un instant donné

Cet indicateur est un indicateur local basé sur le nombre de passagers présents à une station ou sur une ligne donnée. Il a la particularité d'être mesurable tout au long de l'observation du système modélisé dans les sections 3.5 à 3.8. De ce fait, l'indicateur sur la charge de passagers à une station ou sur une ligne à un instant donné peut être vu comme un signal faible. Cela veut dire qu'il peut aider l'opérateur de transport à mettre en place des plans de gestion adéquats lorsque cet indicateur dépasse un certain seuil.

Les relations entre les indicateurs que l'on vient de définir et les sous-fonctions définies dans la section 3.3 sont présentées dans le Tableau 3.3 ci-dessous.

|                                           | SF1                                                                                                                                                  | SF2                                                                                                             | SF3                                                                               | SF4                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre de passagers arrivés à destination | Un problème sur la sécurité liée au fonctionnement des trains peut entraîner l'augmentation de la valeur de cet indicateur                           | Un problème lié à cette sous-fonction impactera la sous-fonction SF1 qui a son tour va impacter ces indicateurs | Un problème lié à cette sous-fonction peut augmenter la valeur de ces indicateurs | Lorsqu'une composante du système est indisponible, selon la composante indisponible, cela peut avoir des impacts sur les sous-fonctions SF1, SF2 et/ou SF3. Cela va donc au final impacter ces indicateurs |
| Retard accumulé des passagers             | Un problème lié à cette sous-fonction entraîne l'accumulation des passagers dans les stations et donc, l'augmentation de la valeur de cet indicateur |                                                                                                                 |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                            |
| Charge de passagers                       | Un problème lié à cette sous-fonction entraîne l'augmentation de la valeur de cet indicateur                                                         |                                                                                                                 |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                            |

TABLE 3.3 – Les fonctionnalités des modèles de simulation des systèmes ferroviaires

### 3.5 Description du système et des sous-systèmes du modèle proposé

Les différents sous-systèmes qui composent le modèle proposé dans ce document et leurs composantes sont décrits dans cette section. Pour chaque composante d'un sous-système, les relations qui lient cette composante aux sous-fonctions définies dans la section 3.3 sont présentées. Cette démarche permet de justifier la prise en compte de ces composantes dans le modèle.

#### 3.5.1 Vue globale du modèle proposé

La Figure 3.5 présente une vue globale du système de transport ferroviaire proposé. Cela consiste dans un premier temps à modéliser les sous-systèmes et leurs interdépendances. C'est cet aspect qui sera présenté dans cette section. Cette modélisation permet d'évaluer les différents indicateurs de performance (voir la section 3.7). Les indicateurs sont alors utilisés pour calculer la résilience du système. Par la suite, des perturbations et des scénarios de gestion de crise sont simulés pour

évaluer l'impact de ces perturbations et l'efficacité des plans de gestion de crise.

Les différents sous-systèmes modélisés et présentés dans cette section sont les sous-systèmes de :

- transport,
- énergie,
- télécommunication,
- organisation.

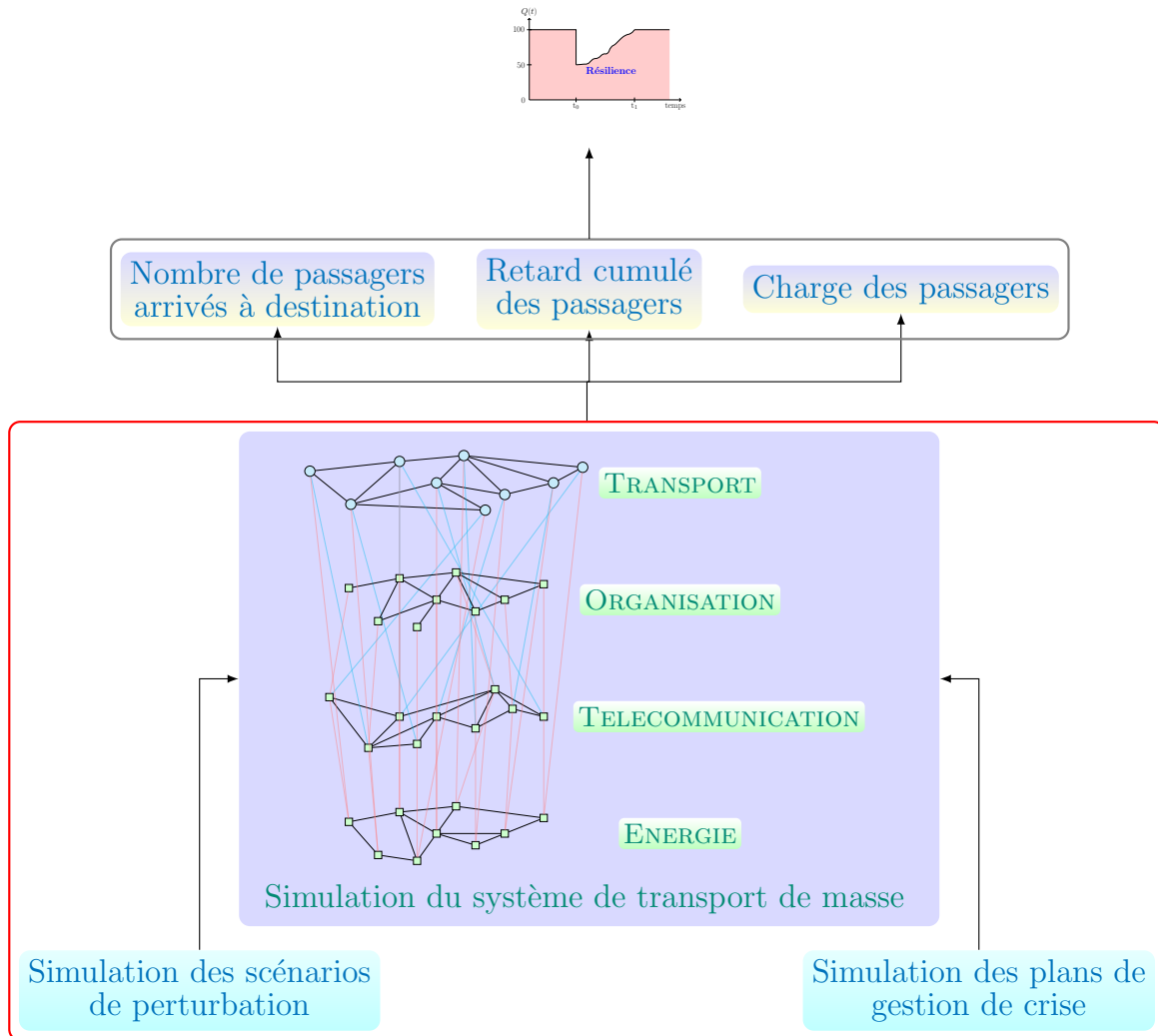


FIGURE 3.5 – Vue globale du système de transport ferroviaire proposé.

### 3.5.2 Sous-système de transport

Ce sous-système comprend essentiellement l'ensemble des composantes d'un système ferroviaire qui accueillent et transportent les passagers [115].

### 3.5.2.1 Les gares/stations

Outre les caractéristiques d'une station, les éléments suivants sont considérés dans une station :

- les escalators
- les supports d'information voyageurs (visuels et sonores)
- les éclairages
- les ventilateurs dans les stations (importants lors d'une attaque bactériologique ou lors d'un incendie)
- les caméras de vidéo surveillance dans les stations

Il est présenté dans le Tableau 3.4 les relations entre les composantes du sous-système de transport et les sous-fonctions définies dans la section 3.3.

| fonctions<br>composantes        | SF1 | SF2 | SF3 | SF4 | Commentaires                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gares, stations                 | X   |     | X   |     | Selon la gravité de la perturbation sur la station et/ou la conception de la station, l'opérateur de transport peut décider qu'aucun train ne passe par cette station. Les passagers ne peuvent pas entrer ni sortir de la station.                                                                                                                                                 |
| escalators                      |     | X   | X   |     | Une défaillance d'un ou de plusieurs escalators dans une station peut allonger le temps de correspondance des passagers dans la station considérée ou le temps entre l'entrée des passagers dans la station et la montée de ces derniers dans un train. Ils servent aussi dans l'évacuation de la station en changeant le sens de tous les escalators vers la sortie de la station. |
| support d'information voyageurs |     | X   | X   |     | L'indisponibilité de ces écrans entraîne l'allongement du temps de correspondance d'un bon nombre de passagers dans la station à cause d'un manque d'informations sur la direction et des stations desservies par les trains.                                                                                                                                                       |
| éclairages                      |     | X   | X   |     | Un manque d'éclairage peut entraîner un allongement du temps de trajet de certains passagers ou même un comportement de panique chez les passagers que l'opérateur de transport devra gérer.                                                                                                                                                                                        |
| ventilateurs                    |     |     |     | X   | Pour le désenfumage de la station                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| caméras de vidéo surveillance   | X   | X   | X   |     | La défaillance des caméras peut entraîner des difficultés dans la gestion des perturbations depuis le centre à partir duquel l'opérateur gère les perturbations. Ces difficultés se modélisent par l'allongement du temps nécessaire à la gestion des perturbations.                                                                                                                |

TABLE 3.4 – Les relations entre les composantes d'une station et les sous-fonctions

### 3.5.2.2 Les voies de chemin de fer

Elles se composent de :

- les aiguilles
- les ventilateurs dans les tunnels
- les feux de signalisation
- le caténaire ou le 3<sup>ième</sup> rail <sup>1</sup>
- les tunnels
- les ponts

| fonctions<br>composantes                  | SF1 | SF2 | SF3 | SF4 | Commentaires                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aiguilles                                 | X   |     |     |     | Dans le modèle, les aiguilles interviennent seulement lorsque l'on veut mettre en place des services spéciaux <sup>2</sup> . En actionnant les aiguilles de manière à ce que les trains puisse faire demi-tour dans la zone où se trouve les aiguilles.                                                                                                                                                                                                                                            |
| Ventilateurs<br>dans les<br>tunnels       |     |     |     | X   | Pour le désenfumage du tunnel.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Feux de signalisation                     | X   |     |     |     | Une défaillance dans la signalisation entraîne une diminution de la vitesse des trains (voire un arrêt du trafic) sur les lignes ou les portions de ligne où il n'y a pas le système Communication Based Train Control (CBTC <sup>3</sup> ). Cette vitesse (ou arrêt du trafic) est imposée par le PCC en suivant les procédures. Pour les lignes sur lesquelles il y a le système CBTC, ce système met automatiquement en place un système de signalisation : le système de cantonnement virtuel. |
| Caténaire ou<br>le 3 <sup>ième</sup> rail | X   |     |     |     | Arrêt du trafic sur la ligne ou la partie de la ligne concernée.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Tunnels                                   | X   |     |     |     | Arrêt du trafic sur la ligne ou la partie de la ligne concernée.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ponts                                     | X   |     |     |     | Arrêt du trafic sur la ligne ou la partie de la ligne concernée.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

TABLE 3.5 – Les relations entre les composantes d'une voie de chemin de fer et les sous-fonctions

1. Sur une ligne de métro, le 3<sup>ième</sup> rail est l'équivalent d'un caténaire.

2. Un service spécial correspond à l'exploitation d'une partie d'une ligne pendant que l'on gère une perturbation sur l'autre partie de la ligne.

3. Le système CBTC est un système de contrôle de vitesse et de pilotage automatique des transports urbains. Son fonctionnement est basé sur l'espacement des trains sur leur localisation indépendamment de tout dispositif fixe de détection matérielle des trains (circuits de voie, compteurs d'essieux, feux de signalisation, etc.)

### 3.5.2.3 Les matériels roulants sur rail

Dans les matériels roulants on prend en compte le système sonore permettant au conducteur de communiquer avec les passagers ou aux passagers de communiquer avec le conducteur en tirant sur la sonnette d'alarme. Sur les lignes automatisées la communication est entre le PCC et les passagers. Les bus interviennent en période de graves perturbations pour transporter les passagers d'une station à l'autre selon la décision du PCC. Le réseau de bus n'est pas pris en compte dans ce modèle, seul le temps de parcours en bus d'une station à l'autre est pris en compte.

L'indisponibilité du dispositif sonore dans un matériel roulant agit sur les sous-fonctions SF2 et SF3 tandis que l'indisponibilité d'un matériel roulant agit sur SF1.

### 3.5.2.4 Les serveurs

Les serveurs d'une ligne de métro/RER donnée permettent entre autres de :

- pouvoir passer les télécommandes depuis les consoles opérateur qui se trouvent principalement au PCC ;
- suivre la position en temps réel des trains sur le TCO et sur les consoles opérateurs ;
- donner aux opérateurs la maîtrise des situations nominales, dégradées ou exceptionnelles ;
- consulter les données d'exploitation et de maintenance (les alarmes de dysfonctionnement en provenance des différents équipements).

| fonctions<br>composantes | SF1 | SF2 | SF3 | SF4 | Commentaires                                                                                                                       |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Serveurs                 | X   | X   | X   | X   | Lorsqu'un des serveurs est défaillant, une partie des liaisons télécommunication reliées à ce serveur est perdue                   |
| matériels roulants       | X   | X   | X   |     | l'indisponibilité d'un matériel roulant agit naturellement sur le mouvement des trains sur la ligne à laquelle appartient le train |

TABLE 3.6 – Les relations entre les serveurs/trains et les sous-fonctions

Les composantes d'une station (les escalators, les ventilateurs dans les stations, les caméras, etc.) ou le long des voies (les aiguilles, les feux de signalisation, etc.) sont prises en compte dans le modèle à travers l'impact de leur défaillance sur le système. Les trains sont considérés à travers leur fonctionnement et en tenant en compte les tables des horaires des trains. Quant aux serveurs, ils font partie du sous-système de transport mais sont essentiellement utilisés dans le sous-système de télécommunication (voir la section 3.5.5).

L'environnement du système est constitué de tous les moyens d'accès au réseau : la voirie permettant d'accéder aux stations ou aux voies, les autres modes de transport comme le bus ou le tramway, les réseaux de transport connexes au réseau étudié.

### 3.5.3 Sous-système d'énergie

Le système d'énergie se compose de trois éléments : les postes de haute tension (PHT), les postes de redressement (PR) et les postes d'éclairage-force (PEF).

#### 3.5.3.1 Les postes de haute tension

Les PHTs reçoivent le courant du réseau externe et le transforme puis le distribue aux PRs et aux PEFs. Dans le modèle proposé, le réseau externe n'est pas considéré car ce dernier ne fait pas partie du réseau étudié. Chaque poste de haute tension dispose de groupe électrogène en cas de défaillance du réseau externe ou du poste de haute tension. Cet aspect est modélisé, en cas de défaillance d'un PHT, par la continuité de l'activité du PHT pendant un certain temps. Ce temps dépend de la capacité du groupe électrogène. La figure 3.6 représente le schéma général d'alimentation du réseau étudié.

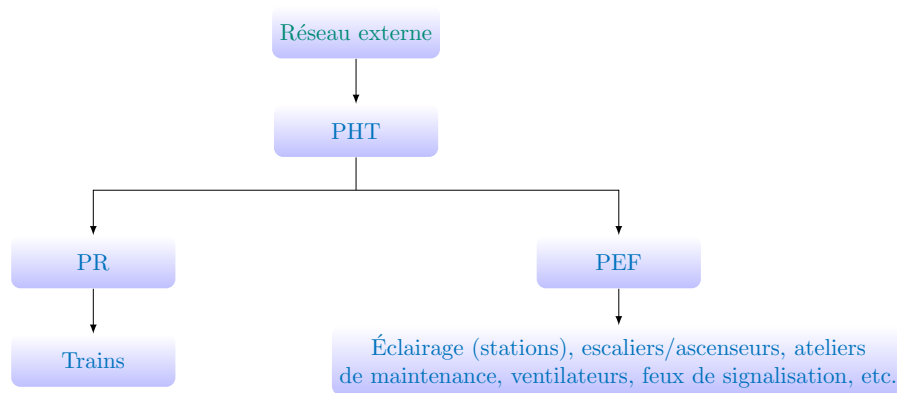


FIGURE 3.6 – Acheminement de l'énergie électrique dans le réseau.

Lorsqu'un PHT ne fonctionne pas pour cause de défaut d'électricité, les PRs et PEFs reliés à ce PHT ne vont pas non plus fonctionner après la durée d'autonomie du groupe électrogène associé.

#### 3.5.3.2 Les postes de redressement

Ils transforment le courant alternatif en un courant continu adapté au fonctionnement des trains ou des rames de métro. Une ligne de métro ou de RER se décompose en plusieurs sections électriques. Une section est une partie d'une ligne pouvant être mise hors tension indépendamment des autres :

- soit volontairement, par action des dispositifs de commande au PCC, du circuit d'alarme, etc. ;
- soit automatiquement par action des dispositifs de protection des installations (detection des courts-circuits, etc.).

Lorsqu'un PR ne fonctionne pas, l'énergie de traction à proximité de ce PR est aussi diminuée. Plus il y a de PRs défaillants plus l'énergie de traction sur la ligne est diminuée. En cas de diminution importante de l'énergie de traction sur une partie de la ligne, les plans de gestion peuvent imposer une marche de délestage des trains. Cela se modélise par une augmentation du temps de parcours de la section de ligne concernée.

La Figure 3.7 montre comment les PRs sont alimentés par les PHTs. D'une manière générale, sur une ligne de métro ou RER, deux PRs consécutifs sont alimentés par deux PHTs différents afin d'éviter une diminution considérable de l'énergie de traction sur une partie de la ligne en cas de panne d'un PHT, Figure 3.7. En effet, l'arrêt d'un PR seul est transparent pour le réseau (les PR en amont et aval peuvent subvenir à la perte de charge par une surproduction momentanée) alors que l'arrêt de deux PRs consécutifs entraînerait des mesures de délestage en ligne et une réduction possible du nombre de trains en circulation.

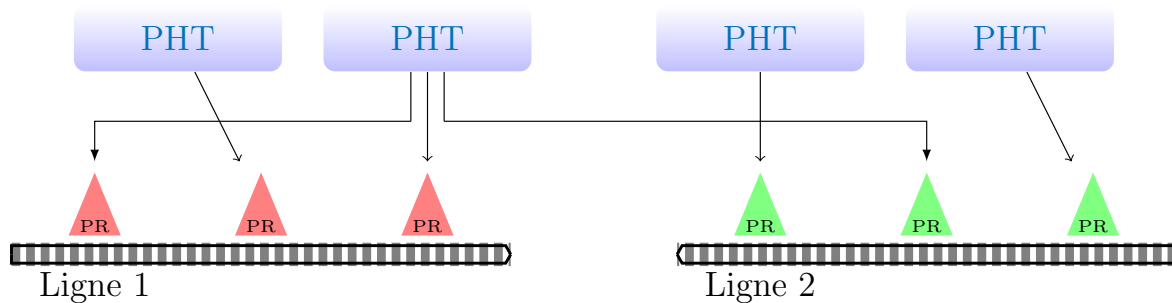


FIGURE 3.7 – Alimentation des PRs par les PHTs.

### 3.5.3.3 Les postes d'éclairage-force

Ils permettent d'éclairer les gares/stations, les ateliers de maintenance, les bâtiments (comme un PCC), servent d'alimentation force pour les escaliers roulants dans les stations. Ils permettent aussi d'alimenter en électricité les feux de signalisation sur le réseau. Comme pour les PHTs, les PEFs disposent aussi d'un groupe électrogène en cas de défaut d'électricité. Leur défaillance entraîne :

- une augmentation du temps de correspondance dans la station/gare affectée car il n'y a plus d'éclairage et/ou les escaliers roulants ne fonctionnent plus. Les afficheurs aussi ne vont plus donner d'information aux passagers. Cela entraîne donc une diminution du taux de remplissage des trains ;
- les feux de signalisation ne vont plus fonctionner ;
- en cas d'incendie par exemple dans une station ou dans un tunnel, si le PEF alimentant la station ou le tunnel ne fonctionne pas au même moment, les ventilateurs dans la station ou dans le tunnel ne seront plus alimentés. Il y aura donc un problème de désenfumage (intoxication des passagers) ;

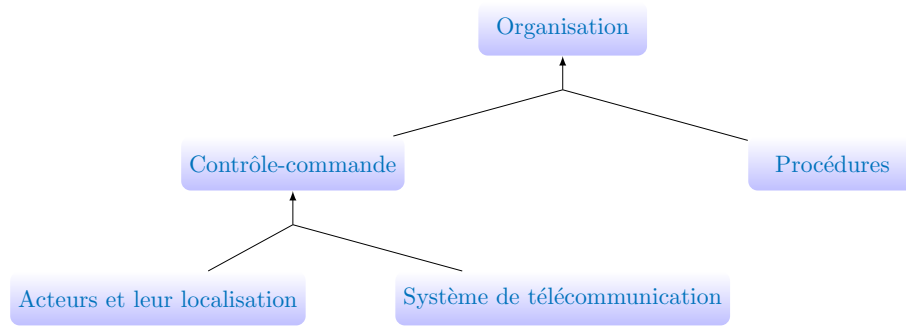


FIGURE 3.8 – L’organisation dans le modèle.

- les bâtiments et les ateliers reliés à ce PEF ne seront plus alimentés. Cela peut causer un problème dans l’organisation (voir la partie sur le sous-système d’organisation).

Le tableau 3.7 décrit les relations entre les composantes du sous-système d’énergie et les sous-fonctions.

| fonctions<br>composantes | SF1 | SF2 | SF3 | SF4 | Commentaires                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PHT                      | X   |     |     |     | Agit sur le fonctionnement des PRs et des PEFs.                                                                                                                                                                                |
| PR                       | X   |     |     |     | Ralentissement ou arrêt du trafic sur la ligne ou la partie de la ligne concernée.<br>Augmentation de la durée de maintenance des trains dans un atelier de maintenance due à un défaut d’énergie de traction dans un atelier. |
| PEF                      |     | X   | X   |     | Indisponibilité des escalators, des support d’information voyageurs, de l’éclairages, etc. dans les stations.                                                                                                                  |

TABLE 3.7 – Les relations entre les composantes du sous-système d’énergie et les sous-fonctions

### 3.5.4 Sous-système d’organisation

L’organisation dans le modèle est composée du contrôle-commande et des procédures de gestion de crise. Le contrôle-commande est constitué du système de télécommunication et des acteurs (voir Figure 3.8).

Le système de télécommunication correspond au système qui permet aux acteurs de communiquer entre eux et de commander des éléments du système comme les aiguilles, l’information voyageur, les feux de signalisation, etc. Dans un système de transport ferroviaire, le système de télécommunication est beaucoup plus complexe que la modélisation qui est faite de ce système dans cette étude. Il inclut entre autres les échanges d’informations entre les éléments du système pour le bon fonctionnement de ce dernier. Pour les lignes équipées du système CBTC, c’est le

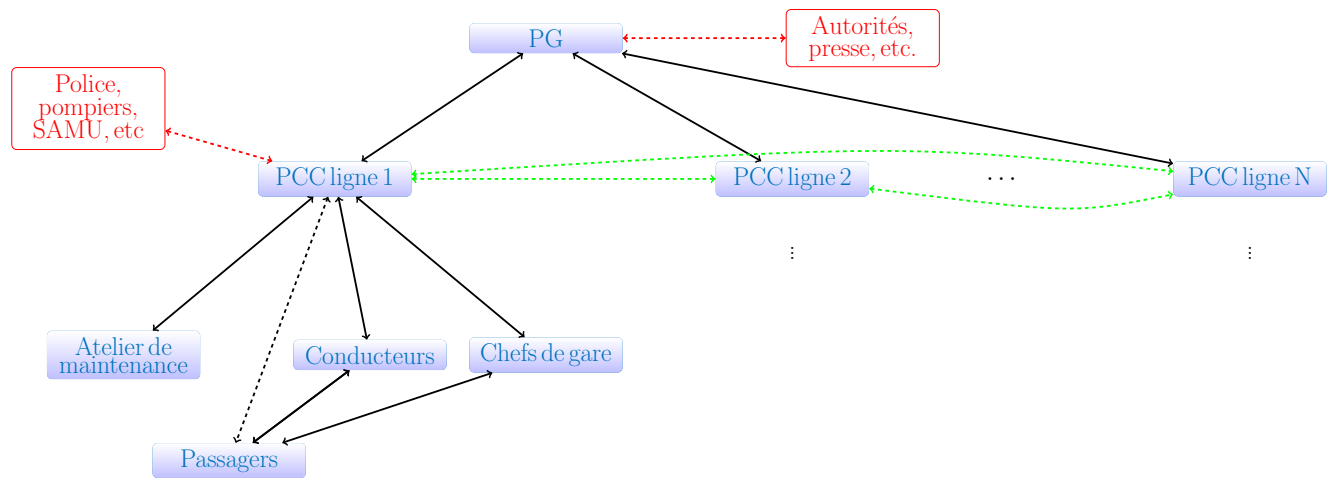


FIGURE 3.9 – Les interactions entre les acteurs.

système CBTC qui porte les échanges d'information de la ligne. Les procédures de gestion de crise correspondent à des listes d'actions à effectuer pendant une perturbation dans le but de ramener le système dans son état initial ou dans un état acceptable [99]. On inclut aussi dans les procédures le temps nécessaire pour exécuter les actions.

Les acteurs sont organisés comme sur la Figure 3.9. La permanence générale (PG) est l'endroit où les décisions stratégiques pour l'opérateur de transport se prennent en cas de graves perturbations du système de transport. En période de crise, elle est en contact avec les PCCs de chaque ligne afin de gérer globalement (sur l'ensemble des lignes) les perturbations graves. Au nombre d'un par ligne, les PCCs gèrent de manière opérationnelle l'ensemble de la ligne à sa charge. Le PCC coordonne les opérations de régulation du trafic sur une ligne et de gestion de perturbation. Pour cela, il est en communication avec :

- les ateliers de maintenance pour leurs éventuelles interventions sur la ligne lors d'une perturbation. Dans le modèle, le temps qu'il faut aux mainteneurs pour arriver sur chaque partie de la ligne est estimé. La maintenance ne se limite pas qu'aux matériels roulants. Dans le modèle, les agents de maintenance interviennent sur les composantes des sous-systèmes de transport, d'énergie et de télécommunication.
- sur les lignes entièrement automatisées (pas de conducteurs), le PCC a la possibilité de donner des informations aux passagers de même que les passagers peuvent entrer en contact avec le PCC en tirant sur la sonnette d'alarme.
- le PCC est en relation avec les conducteurs de la ligne et vise versa. Les conducteurs peuvent aussi rentrer en contact avec les passagers.
- à chaque station d'une ligne, il y a un chef de gare qui mène des opérations comme l'évacuation d'une station en cas de besoin. Ces opérations se font sur ordre du PCC.
- lors d'une perturbation sur une ligne, le PCC de la ligne affectée informe les PCCs des autres

lignes susceptibles d'être affectées par cette perturbation.

- pour bien gérer une perturbation, un PCC peut être en relation avec des intervenants externes à l'opérateur de transport comme la police, les pompiers, etc.

| fonctions<br>composantes | SF1 | SF2 | SF3 | SF4 | Commentaires                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PG                       |     |     |     |     | Un dysfonctionnement à la PG n'est pas pris en compte dans la version actuelle du modèle                                                                                                          |
| PCC                      | X   | X   | X   | X   | Un dysfonctionnement au PCC allonge la durée d'exécution des procédures.                                                                                                                          |
| Conducteur               | X   |     |     |     | L'incapacité d'un conducteur à conduire son train entraîne l'arrêt du train conduit par le conducteur.                                                                                            |
| Chef de gare             |     |     | X   |     | Un dysfonctionnement dans l'organisation dans une station entraîne l'allongement de la durée d'exécution des procédures comme l'évacuation de la station, etc.                                    |
| Passagers                | X   |     |     |     | Un malaise de passager dans un train stationné dans une station entraîne l'arrêt du train à cette station. Si cela se passe en inter-stations, le train concerné s'arrête à la prochaine station. |
| Atelier de maintenance   |     |     |     | X   | Un dysfonctionnement dans un atelier entraîne l'allongement de la durée d'exécution des procédures liées à la maintenance des composantes défectueuses.                                           |

TABLE 3.8 – Les relations entre les composantes du sous-système organisation et les sous-fonctions

### 3.5.5 Sous-système de télécommunication

La modélisation du sous-système de télécommunication pour une ligne de métro/RER se décompose en trois niveaux [114, 116].

Le premier niveau se compose des équipements terrain qui sont les éléments terminaux du système. Ces équipements sont pour la plupart les composantes des sous-systèmes de transport et d'énergie et sont liés au sous-système de télécommunication :

- les appareils de voie et les aiguilles ;
- les caméras de vidéo surveillance ;
- les supports d'information voyageurs ;
- les éléments permettant de commander l'énergie de traction des trains.

Ces équipements terrain peuvent envoyer des informations aux serveurs et vice versa grâce au sous-système de télécommunication.

Le deuxième niveau est constitué de la télétransmission d'informations entre les équipements de terrain et les serveurs et vice versa. Pour ce faire :

- les équipements Radio sont installés le long des lignes afin de transmettre des données des

équipements terrain vers les locaux techniques et vice versa ;

- les locaux techniques permettent la transmission des données des équipements Radio vers les serveurs et vice versa.

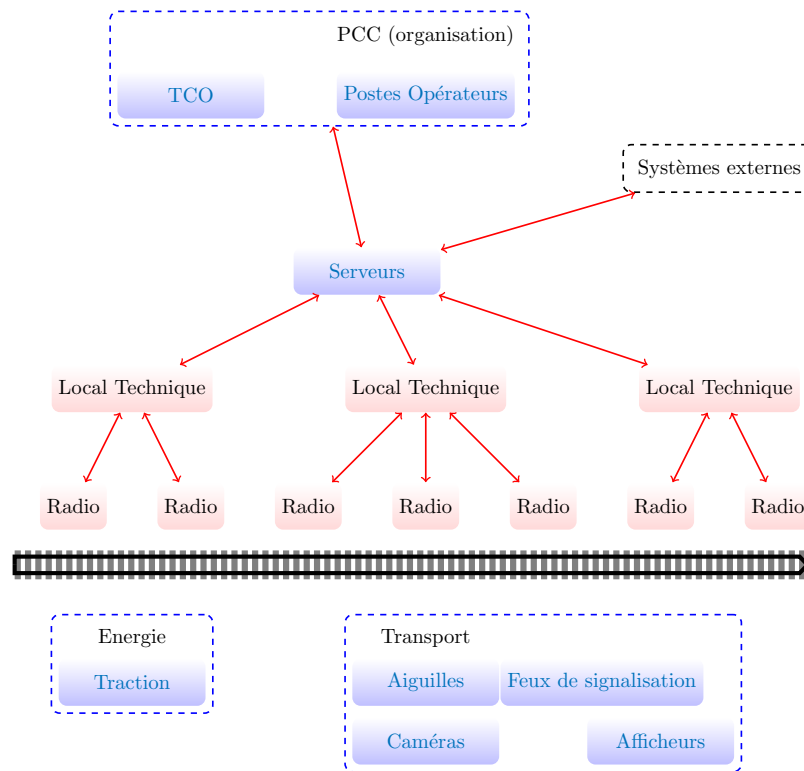


FIGURE 3.10 – Le sous-système télécommunication pour une ligne de Métro/RER.

Le réseau peut compter deux à trois serveurs par ligne. Une fois arrivées au niveau des serveurs, ces données sont évaluées afin d'assurer la gestion de l'ensemble des fonctions opérationnelles du système en produisant des commandes de gestion de l'exploitation à destination des équipements du terrain en fonction des procédures de gestion du trafic de la ligne.

Le troisième niveau est constitué des Interfaces Homme-Machine (IHM) qui font l'interface entre les serveurs et les acteurs (principalement au PCC). Ces IHMs permettent de visualiser la situation sur le terrain et de commander certaines composantes du système. Ce sont les postes opérateurs, les écrans de vidéosurveillance, le Tableau de Contrôle Optique (TCO), etc. La Figure 3.10 décrit le sous-système de télécommunication.

Le sous-système télécommunication gère aussi la communication entre les différents acteurs du système en utilisant la Téléphonie Haute Fréquence (THF), la radio TETRA, etc. En d'autres termes, les liens (interactions) entre les acteurs dans la Figure 3.9 est possible grâce au sous-système de télécommunication.

L'intégration du sous-système de télécommunication dans notre modèle se fait en modélisant :

- les liens entre les équipements terrain et les locaux techniques. Les équipements Radio ne

sont pas modélisés dans cette étude. Ces équipements sont tellement nombreux le long des lignes de telle sorte que la défaillance de quelques équipements Radio n'a pas d'impact sur le fonctionnement d'une ligne.

- les liens entre les locaux techniques et les serveurs ;
- les liens entre les serveurs et les IHMs ;
- les liens de communication entre les acteurs.

Dans le Tableau 3.9 les relations entre les composantes du sous-système de télécommunication et les sous-fonctions sont décrites.

| fonctions<br>composantes     | SF1 | SF2 | SF3 | SF4 | Commentaires                                                                                         |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lien Serveur-IHM             | X   | X   | X   |     | Sa défaillance entraîne l'arrêt du trafic sur la ligne concernée.                                    |
| Lien Serveur-Local technique | X   | X   | X   |     | Sa défaillance entraîne l'arrêt du trafic sur la partie de la ligne couverte par le local technique. |
| Local technique              | X   |     |     |     | Sa défaillance entraîne l'arrêt du trafic sur la partie de la ligne couverte par le local technique. |
| Liens entre les acteurs      | X   | X   | X   | X   | Sa défaillance entraîne l'allongement de la durée d'exécution des procédures                         |

TABLE 3.9 – Les relations entre les composantes du sous-système télécommunication et les sous-fonctions

Dans cette étude, on n'aborde pas la défaillance des composantes du sous-système de télécommunication d'un point de vue logiciel (les cyberattaques, etc.).

### 3.6 Interdépendances entre les sous-systèmes

Dans cette section, l'influence de chaque composante du système sur le sous-système auquel appartient cette composante et aussi sur les autres sous-systèmes est décrite. L'influence désigne l'impact de la défaillance d'une composante sur les autres composantes du système.

L'objectif de cette étude des interdépendances est, entre autres, d'estimer la propagation d'une perturbation dans le système pour au final estimer les conséquences de cette perturbation sur le sous-système de transport ; puisque les indicateurs de performance du système définis dans la section 3.4 se calculent essentiellement à partir du niveau de fonctionnement de ce sous-système.

Dans le Tableau 1.1, on a présenté les événements redoutés dans les systèmes de transport ferroviaires de masse. Ces événements se traduisent dans notre modèle par leurs conséquences sur le sous-système de transport. Les événements du Tableau 1.1 que nous considérons dans cette étude sont donc ceux qui peuvent avoir un impact direct ou indirect sur le fonctionnement du sous-système de transport. Les conséquences d'une perturbation sur le sous-système de transport

seront modélisées par [6, 5] :

- la diminution de la vitesse des trains sur une ligne ou une partie de ligne ;
- la fermeture d'une station ;
  - soit les trains ne passent plus par cette station
  - soit les trains ne marquent plus d'arrêt à cette station
- l'arrêt du trafic sur une partie du réseau et la durée de l'arrêt ;
- défaillance d'une composante des sous-systèmes
- toutes combinaisons possibles des conséquences citées ci-dessus.

Avec cette modélisation des conséquences des perturbations sur le sous-système de transport, la modélisation des procédures exécutées par les acteurs dans le sous-système organisation et la quantification des indicateurs de performance présentés dans la section 3.7.1, on peut estimer la performance du système par rapport à cette perturbation.

### 3.6.1 Le sous-système de transport

#### 3.6.1.1 Influence sur les composantes des sous-systèmes d'énergie et de télécommunication

La défaillance d'une composante du sous-système de transport comme les ponts, les tunnels peut avoir une influence sur le fonctionnement des composantes des sous-systèmes d'énergie et de télécommunication installées sur ces ouvrages. Par conséquent, dans une composante de type pont, tunnel ou voie de chemin de fer doivent être renseignées les composantes du sous-système d'énergie et de télécommunication qu'elle porte.

#### 3.6.1.2 Influence sur les composantes du sous-système d'organisation

Une perturbation sur une composante du sous-système de transport peut avoir une influence sur le sous-système d'organisation dans le sens où la perturbation fera réagir les acteurs avec éventuellement l'exécution d'une procédure par ces derniers. Encore faut-il que les acteurs remarquent la défaillance de la composante. Cette capacité à identifier les perturbations est modélisée par le système de vidéosurveillance, la présence des acteurs sur les lieux, etc.

#### 3.6.1.3 Influence sur les composantes du sous-système de transport

A part l'influence des ouvrages comme les ponts et les tunnels sur les autres composantes du sous-système de transport qu'ils portent, les composantes de ce sous-système n'ont pas d'influence entre elles. Comme nous l'avons vu dans la sous-section 3.6.1.2, la décision qu'aura pris l'organisation peut agir sur d'autres composantes du sous-système de transport comme la suppression de certains trains, fermeture d'une station, etc.

Pour une ligne donnée, les liaisons télécommunication entre les serveurs de cette ligne et les

composantes des autres sous-systèmes sont souvent assurées par des fibres optiques. Lorsque l'on perd une de ces liaisons, la composante reliée au serveur reste opérationnelle mais :

- la commande de cette composante à distance est impossible. Elle peut toutefois se faire à pied d'œuvre et cela prendra généralement un peu plus de temps.
- la remontée d'informations de cette composante vers le serveur pour le bon fonctionnement du trafic des trains sur la ligne considérée est aussi impossible.

Le Tableau 3.10 détaille l'influence de chaque composante du sous-système de transport sur les autres sous-systèmes.

|                                       | Transport | Énergie | Télécommunication | Organisation |
|---------------------------------------|-----------|---------|-------------------|--------------|
| Gares, stations                       | X         | X       | X                 | X            |
| escalators                            |           |         |                   | X            |
| support d'information voyageurs       |           |         |                   | X            |
| éclairage                             |           |         |                   | X            |
| ventilateurs                          |           |         |                   | X            |
| caméras de vidéo surveillance         |           |         |                   | X            |
| Ventilateurs dans les tunnels         |           |         |                   | X            |
| Feux de signalisation                 |           |         |                   | X            |
| Serveur                               |           |         |                   | X            |
| Caténaire ou le 3 <sup>ème</sup> rail | X         |         |                   | X            |
| Ponts et Tunnels                      | X         |         |                   | X            |
| Matériels roulants                    |           |         |                   | X            |

TABLE 3.10 – L'influence des composantes du sous-système de transport sur les autres sous-systèmes

### 3.6.2 Le sous-système d'énergie

#### 3.6.2.1 Influence sur les composantes du sous-système de transport

Les composantes du sous-système de transport alimentées par les composantes du sous-système d'énergie ne le seront plus en cas de défaillance de ces dernières. Ce défaut d'alimentation est pris en compte dans le système une certaine durée de temps après le début de la défaillance. Cela correspond à la durée d'autonomie des groupes électrogènes associés à certaines composantes du sous-système d'énergie.

Les serveurs qui se trouvent dans un bâtiment alimenté par un PEF ne seront plus alimentés si ce PEF tombe en panne.

#### 3.6.2.2 Influence sur les composantes du sous-système d'organisation

Lorsqu'il y a un défaut d'électricité dans le bâtiment dans lequel se trouve un acteur du sous-système d'organisation, cet acteur aura des difficultés à exécuter des procédures. Plus particulièrement dans utilisation des outils qui nécessitent une source d'énergie pour fonctionner. Les

conducteurs ne sont pas directement impactés par un défaut d'alimentation de traction. Un défaut d'alimentation de traction empêche le mouvement des trains qui de fait, empêche les conducteurs de faire leur tâche. Les ateliers de maintenance, quant à eux, sont à la fois alimentés par des PEFs pour l'éclairage et l'utilisation des outils et aussi par des PRs pour la traction des trains en maintenance.

On récapitule dans le Tableau 3.11 les interdépendances de chaque composante du sous-système d'énergie sur les autres sous-systèmes.

|     | Transport | Énergie | Télécommunication | Organisation |
|-----|-----------|---------|-------------------|--------------|
| PHT | X         |         | X                 | X            |
| PR  | X         |         |                   | X            |
| PEF |           |         | X                 | X            |

TABLE 3.11 – L'influence des composantes du sous-système d'énergie sur les autres sous-systèmes

### 3.6.3 Le sous-système de télécommunication

Pour une ligne donnée, les liaisons de télécommunications entre les locaux techniques de cette ligne et les composantes des autres sous-systèmes sont souvent assurées par des fibres optiques (voir les détails dans le Tableau 3.12). Lorsque l'on perd une de ces liaisons, la composante reliée au local technique reste opérationnelle mais :

- la commande de cette composante à distance est impossible. Elle peut toutefois se faire à pied d'œuvre et cela prend généralement un peu plus de temps.
- la remontée d'informations de cette composante vers le serveur pour le bon fonctionnement du trafic des trains sur la ligne considérée est aussi impossible.

|                              | Transport | Énergie | Télécommunication | Organisation |
|------------------------------|-----------|---------|-------------------|--------------|
| Lien Serveur-IHM             | X         |         | X                 | X            |
| Lien Serveur-Local technique | X         |         | X                 | X            |
| Local technique              | X         |         | X                 | X            |
| Lien entre les acteurs       |           |         |                   | X            |

TABLE 3.12 – L'influence des composantes du sous-système de télécommunication sur les autres sous-systèmes

### 3.6.4 Le sous-système d'organisation

A part les conducteurs, l'incapacité des acteurs n'impacte pas directement les autres sous-systèmes. Ces autres sous-systèmes sont impactés à travers l'incapacité ou les difficultés qu'ont les acteurs à exécuter les procédures.

On récapitule dans le Tableau 3.13 les interdépendances de chaque composante du sous-système d'organisation sur les autres sous-systèmes.

|                         | Transport | Énergie | Télécommunication | Organisation |
|-------------------------|-----------|---------|-------------------|--------------|
| PCC                     |           |         |                   | X            |
| Conducteur              | X         |         |                   | X            |
| Chef de gare            |           |         |                   | X            |
| Passagers               |           |         |                   | X            |
| Ateliers de maintenance |           |         |                   | X            |

TABLE 3.13 – L’influence des composantes du sous-système d’organisation sur les autres sous-systèmes

### 3.7 Modélisation formelle des sous-systèmes et des interdépendances inter et intra sous-systèmes

Dans cette section, les sous-systèmes et leurs interdépendances présentés dans les sections précédentes sont modélisés formellement. Des précisions sur les paramètres et les données du modèle sont aussi données. De plus, les hypothèses décrites dans la section 1.3 sont rappelées et d’autres hypothèses, plus spécifiques, sont présentées. Ceci permet d’avoir une idée précise de la manière dont le modèle est conçu.

#### 3.7.1 Modélisation du sous-système de transport

Le sous-système de transport est composé en partie des composantes qui accueillent et transportent les passagers. On y trouve, les stations, les voies de chemin de fer entre les stations, les lignes de métro/RER, etc. La modélisation formelle du sous-système de transport s’est faite en deux temps. Dans un premier temps, on a développé un modèle d’optimisation mathématique permettant de simuler le fonctionnement de ce sous-système et les interactions entre ses composantes. Ce modèle d’optimisation est sous la forme d’un problème de multiframe multiterminaux dans un réseau.

Après avoir analysé ce modèle et identifié ses limites quant à son insolvabilité entre autres, on a décidé dans le cadre de cette thèse de ne pas continuer les travaux de thèse avec ce modèle. On a donc développé et poursuivi les travaux de thèse avec un autre modèle présenté dans la section 3.7.1.2. On présente dans la section 3.7.1.1, le modèle basé sur l’optimisation mathématique.

##### 3.7.1.1 Modèle basé sur l’optimisation mathématique

Soient  $S$  l’ensemble des stations du réseau et  $G = (V, A, w)$  un graphe orienté pondéré.  $V$  correspond à l’ensemble des nœuds de  $G$ .

$$\begin{aligned}
 L &= \{\text{ensemble des lignes du réseau}\} \\
 &= \left\{ l = \{s_1, \dots, s_k\} : s_i \in S \ \forall i \in \{1, \dots, k\} \wedge \{s_1, \dots, s_k\} \text{ est un ensemble ordonné de stations} \right. \\
 &\quad \left. \text{formant un ou des circuits dans } G \right\}
 \end{aligned}$$

On a :

$$V = \{(s, l) : s \in S, l \in L \text{ et } s \in l\}$$

Remarques :

- Un nœud de  $G$  représente le quai de la ligne  $l$ , à la station  $s$ .
- On note par  $S_v$ ,  $L_v$ ,  $\pi_v$  et  $\theta_v$  respectivement la station, la ligne du nœud  $v$ , l'ensemble des services qui passent par le nœud  $v$  et l'ensemble des directions des trains qui passent par le nœud  $v$ . Un service est un parcours, d'un terminus à un autre, d'un train sur une ligne donnée. On peut remarquer qu'un nœud  $v$  peut avoir plusieurs directions selon que la ligne correspondante possède une ou plusieurs branches. L'heure de départ programmé d'un service (un train) à la station  $v$  est notée  $\pi_{v,service}$ . On note aussi par  $Cap_{service}$  la capacité du train qui assure ce service.  $O_{ser}$  (resp.  $D_{ser}$ ) la station de départ (resp. d'arrivée) du train assurant le service  $ser$ .

On définit maintenant l'ensemble des arcs du graphe  $G$ .

$$A = A_{train} \cup A_{cor}$$

$$A_{train} = \left\{ \left( (s, l), (s', l') \right) : \begin{array}{l} \text{les trains de la ligne } l \text{ peuvent circuler de la station } s \text{ à la station} \\ \text{adjacente } s' \end{array} \right\}$$

$$A_{cor} = \left\{ \left( (s, l), (s, l') \right) : \text{représente la correspondance à la station } s \text{ entre les lignes } l \text{ et } l' \right\}$$

Remarques :

- Nous supposons qu'il suffit à un passager d'arriver avant le départ d'un train pour le prendre (à condition que la capacité du train ne soit pas atteinte).
- Dans le modèle, chaque heure est représentée par un nombre entier correspondant à la conversion de cette heure en minutes. On peut donc additionner ou comparer des heures.
- Nous n'imposons pas des contraintes de capacité dans les couloirs des stations ( $A_{cor}$ ). Par contre, le nombre de passagers pouvant passer par un arc  $a \in A_{train}$  est limité par la capacité du train assurant ce service.

Les arcs de  $A$  sont pondérés par la fonction  $w$  qui représente le temps minimal de parcours d'un arc. On a :

$$w : A \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$a \longmapsto w(a) = \begin{cases} \delta'_{v,v'} & \text{si } a = (v, v') \in A_{train} \\ \delta_{s,l,l'} & \text{si } a \in A_{cor} \end{cases}$$

Avec  $\delta_{s,l,l'}$  le temps minimal pour faire une correspondance entre les lignes  $l$  et  $l'$  à la station  $s$  si  $a = ((s, l), (s, l')) \in A_{cor}$ .  $\delta'_{v,v'}$  est la durée minimale pour parcourir l'arc  $a = (v, v') \in A_{train}$ . On a :

$$\delta'_{v,v'} \leq \pi_{v',service} - \pi_{v,service}, \quad \forall a = (v, v') \in A_{train}, \forall service \in Services \quad (3.1)$$

$Services$  est l'ensemble des services dans tout le réseau. On dit qu'une table horaire est consistante lorsque l'équation (3.1) est satisfaite.

Soit  $\mathcal{P}$  l'ensemble des passagers du système sur la période de la simulation. Soit  $p \in \mathcal{P}$ , on note par :

- $\tau_p$  l'heure d'entrée du passager  $p$  dans le système ;
- $O_p$  la station d'origine de  $p$  ;
- $D_p$  la station de destination de  $p$ .

Le problème que nous cherchons à résoudre consiste à transporter chaque passager  $p$  de sa station d'origine  $O_p$  à sa station de destination  $D_p$ . On a donc un problème bien connu en optimisation combinatoire : problème de flow entier multiterminal (en anglais Integer Multicommodity Flow Problem, noté IMFP). A ce problème nous ajoutons les contraintes liées au fonctionnement des trains et les interactions entre les trains et les passagers.

On définit maintenant  $d$  qui est un paramètre modélisant l'effet d'une perturbation sur le système :

- $d_a(t) \forall a \in A_{train}$  : la durée supplémentaire de parcours de l'arc  $a$ , à la date  $t$ .
- $d_a(t) \forall a = (v, v') \in A_{cor}$  : la durée supplémentaire de correspondance à la station  $S_v$ , à la date  $t$ .

On discrétise la durée de la simulation ( $T$ ) de la manière suivante :  $\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$ .

Soit  $y_{v,service}^t, \forall v \in V, \forall t \in \mathcal{T}, \forall service \in Services$  un ensemble de variables binaires définies de la manière suivante :

$$y_{v,service}^t = \begin{cases} 1 & \text{si } t \text{ est l'heure effective du départ du service } service \text{ à la station } S_v \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Notons que cette heure peut être différente de  $\pi_{v,service}$  qui est l'heure programmée (théorique) du départ du service  $service$  à la station  $S_v$ . Une autre variable est celle permettant de modéliser le flux de passagers dans le système. On a  $\forall p \in \mathcal{P}, \forall a \in A, \forall t \in \mathcal{T}$  :

$$x_{p,a}^t = \begin{cases} 1 & \text{si le passager } p \text{ emprunte l'arc } a \text{ à la date } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$z_p$ ,  $\forall p \in \mathcal{P}$  est la variable qui représente l'heure de sortie du passager  $p$  du système. Nous proposons le modèle (P) pour notre problème.

$$(P) = \min \sum_{p \in \mathcal{P}} (z_p - \tau_p) \quad (3.2a)$$

$$s.t. \sum_{t \in \mathcal{T}} t.y_{v,r}^t \geq \pi_{v,r} \quad \forall v \in V, \forall r \in \pi_v | O_r = S_v \quad (3.2b)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} y_{v,r}^t = 1 \quad \forall v \in V, \forall r \in \pi_v \quad (3.2c)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} y_{v,r}^t = 0 \quad \forall v \in V, \forall r \in Services \setminus \pi_v \quad (3.2d)$$

$$\sum_{r \in \pi_v} y_{v,r}^t \leq 1 \quad \forall v \in V, \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.2e)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.y_{v',r}^t) &\geq \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.y_{v,r}^t) + d_a \left( \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.y_{v,r}^t) \right) \\ &+ w(a) - M. \left( 1 - \sum_{t \in \mathcal{T}} (y_{v,r}^t) \right) \end{aligned} \quad \forall a = (v, v') \in A_{train}, \forall r \in \pi_{v'} \quad (3.2f)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} t. (y_{v,r}^t - y_{v,r'}^t) \leq M.h_{a,r,r'} \quad \forall a = (v, v') \in A_{train}, \forall (r, r') \in (Services \cap (\pi_v \cap \pi_{v'}))^2, r \neq r' \quad (3.2g)$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}} t. (y_{v',r}^t - y_{v',r'}^t) \leq M. (1 - h_{a,r,r'}) \quad \forall a = (v, v') \in A_{train}, \forall (r, r') \in (Services \cap (\pi_v \cap \pi_{v'}))^2, r \neq r' \quad (3.2h)$$

$$\sum_{a \in \Lambda^+(v)} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{p,a}^t - \sum_{a \in \Lambda^-(v)} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{p,a}^t = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P}, v \in V \setminus \{O_p, D_p\} \quad (3.2i)$$

$$\sum_{v \in V | s_v = O_p} \sum_{a \in \Lambda^+(v)} \sum_{t=\tau_p}^T x_{p,a}^t = 1 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (3.2j)$$

$$\sum_{v \in V | s_v = D_p} \sum_{a \in \Lambda^-(v)} \sum_{t=\tau_p}^T x_{p,a}^t = 1 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (3.2k)$$

$$\begin{aligned} \sum_{a' \in \Lambda^+(v')} \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.x_{p,a'}^t) &\geq \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.x_{a,p}^t) + w(a) \\ &+ d_a \left( \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.x_{a,p}^t) \right) \\ &- M. \left( 1 - \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.x_{a,p}^t) \right) \end{aligned} \quad \forall a = (v, v') \in A_{cor}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (3.2l)$$

$$2.x_{p,a}^t \leq y_{v,r}^t + \sum_{t'=t}^T y_{v',r}^{t'} \quad \forall p \in \mathcal{P}, \forall a = (v, v') \in A_{train}, \forall t \in \mathcal{T}, \forall r \in \pi_v \quad (3.2m)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{p,a}^t \leq \sum_{r \in \pi_v} Cap_r.y_{v,r}^t \quad \forall a = (v, v') \in A_{train}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.2n)$$

$$z_p \geq \sum_{v \in V | s_v = D_p} \sum_{a \in \Lambda^-(v)} \sum_{t \in \mathcal{T}} (t.x_{p,a}^t) \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (3.2o)$$

$$\begin{aligned}
x_{p,a}^t &\in \{0, 1\} & \forall p \in \mathcal{P}, \forall a \in A, \forall t \in \mathcal{T} \\
y_{v,r}^t &\in \{0, 1\} & \forall v \in V, \forall r \in Services, \forall t \in \mathcal{T} \\
z_p &\in \mathbb{N} & \forall p \in \mathcal{P} \\
h_{a,r,r'} &\in \{0, 1\} & \forall a \in A_{train}, \forall (r, r') \in Services^2
\end{aligned}$$

On définit  $\Lambda^-(v)$  et  $\Lambda^+(v)$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
\Lambda^-(v) &= \{a = (u, v) \in A : \exists u \in V\} \\
\Lambda^+(v) &= \{a = (v, u) \in A : \exists u \in V\}
\end{aligned}$$

Nous cherchons à minimiser le temps passé dans le réseau par les passagers (la contrainte 3.2a). Nous verrons dans la suite comment modifier cette fonction objective pour ne prendre en compte que le retard cumulé de l'ensemble des passagers lorsque le système est perturbé. Les contraintes (3.2b) - (3.2h) modélisent le fonctionnement des trains (services) dans le réseau. (3.2c) et (3.2d) contraignent les trains à ne desservir que les stations où ils sont programmés. Le départ d'un train de son terminus ne doit pas être avant son heure programmée  $\pi_{v,r}$  : (3.2b). La contrainte (3.2e) impose qu'il n'y ait pas à chaque quai et par unité de temps, plus d'un train qui quitte ce quai pour une direction donnée. Il faut donc choisir le pas de temps assez petit pour que deux trains allant dans la même direction ne puissent pas quitter un quai pendant une unité de temps. Lorsqu'un train part d'une station  $v' \mid \exists a = (v, v') \in A_{train}$ , si ce train vient de la station  $v$ , il doit mettre un temps au moins égal à  $w(a)$  plus éventuellement un temps supplémentaire dû à une perturbation sur l'arc  $a$  avant cette heure de départ de la station  $v'$  : contrainte (3.2f).  $M$  dans la contrainte (3.2f) est une constante entière très grande qui rend inactive cette contrainte lorsque le service  $r$  ne passe pas par  $v$ . On peut donner à  $M$  la valeur de  $T$ . Quant aux contraintes (3.2g) et (3.2h), elles garantissent que deux trains allant dans la même direction ne puissent pas se dépasser. En effet, deux trains qui quittent le quai  $v$  de la station  $S_v$  pour la station  $v'$  à des dates différentes quitteront la station  $v'$  dans le même ordre qu'il ont quitté la station  $v$ . On peut traduire cette relation formellement par :

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} (t \cdot y_{v,r}^t) > \sum_{t \in \mathcal{T}} (y_{v,r'}^t) \Rightarrow \sum_{t \in \mathcal{T}} (t \cdot y_{v',r}^t) \geq \sum_{t \in \mathcal{T}} (y_{v',r'}^t) \quad (3.3)$$

La contrainte (3.2c) assure la stricte inégalité dans le membre de droite de la relation que nous venons d'établir (équation 3.3). Les contraintes (3.2g) et (3.2h) représentent une interprétation de cette relation avec des contraintes linéaires.  $h_{a,r,r'} \forall a \in A_{train}, \forall (r, r') \in Services^2$  est un ensemble de variables binaires définies pour modéliser cette relation. Ce modèle ne gère pas la distance entre deux services consécutifs en interstation. La vérification ne se fait qu'au niveau des stations. Pour que le modèle puisse gérer les services en interstation, les arcs du modèle doivent être détaillés en modélisant par exemple les cantons<sup>4</sup> au niveau des arcs.

---

4. Un canton dans le domaine ferroviaire est une subdivision de la voie servant au cantonnement.

Les contraintes (3.2i) - (3.2l) décrivent le mouvement des passagers dans le réseau. Les contraintes (3.2i) à (3.2l) avec la contrainte de binarité des variables  $x_{p,a}^t$  modélisent le problème (IMFP). La conservation des flows est modélisée par la contrainte (3.2i). Les contraintes (3.2j) et (3.2k) modélisent les flows aux terminaux. Comme pour les trains (3.2f), la contrainte (3.2l) modélise la correspondance d'un passager à une station.

La contrainte (3.2m) modélise la condition pour qu'un passager  $p$  puisse prendre un train à la station  $v$  pour la station  $v'$  à la date  $t$  ( $a = (v, v')$ ) : il faut qu'il y ait un train qui fasse le même parcours à cette date. La contrainte sur la capacité des trains est modélisée par (3.2n). Enfin (3.2o) modélise la date de sortie du passager  $p$  du réseau.

Notre objectif étant de calculer le retard cumulé des passagers dans le réseau lors d'une perturbation, il nous faut dans un premier temps calculer le temps passé par les passagers dans le réseau en temps normal (en absence de perturbation). Pour ce faire, on utilise le programme (P) que nous venons de définir. Soit  $z_p^{*,normal}$  les valeurs des variables  $Z_p$ ,  $\forall p \in \mathcal{P}$  à l'optimal du programme (P) dans lequel nous fixons tous les paramètres  $d_a$  à 0 (c'est-à-dire en absence de perturbation).

$z_p^{*,normal}$  correspond donc au temps passé par le passager  $p$  dans le réseau en temps normal. Le retard cumulé des passagers dans le réseau lors d'une perturbation peut donc être calculé en remplaçant la fonction objective de (P) (3.2a) par :

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} (z_p - z_p^{*,normal}) \quad (3.4)$$

Le programme (P) à l'optimum donne les valeurs des variables  $y_{v,r}^t$  (les dates de passage des trains dans les stations) et des variables  $x_{p,a}^t$  (le trajet des passagers dans le réseau) pour que le retard cumulé des passagers lors d'une perturbation soit le plus petit possible. Puisque c'est le programme qui fixe automatiquement la valeur de ces variables, cela rendrait difficile l'implémentation des plans de gestion de perturbation qui consistent à modifier les itinéraires des trains pendant la perturbation. En effet, mettre en place des plans de gestion reviendrait à ajouter des contraintes dans le programme (P). Cela complexifie un peu plus ce dernier. Pour les mêmes raisons, modifier l'itinéraire des passagers pendant une perturbation reviendrait aussi difficile.

Le problème (IMFP) est un problème NP-difficile [56, 17]. Cela rend le programme (P) NP-difficile aussi. De plus, le nombre de passagers dans le réseau étudié dans le cadre de cette thèse est d'environ dix millions (voir le Tableau 4.1), cela correspond à autant de terminaux pour le programme (P). Il est donc impossible de résoudre le programme (P) par un solveur. Développer une métaheuristique pour approcher la solution optimale du programme (P) reviendrait aussi ardu car la taille de l'instance de ce programme que l'on cherche à résoudre dans le cadre de cette thèse est assez importante.

On a vu dans la section 3.2 que les modèles analytiques ne sont pas adaptés pour la simulation du fonctionnement d'un système de transport ferroviaire [94, 44]. C'est pour toutes ces raisons que notre choix s'est par la suite porté sur un modèle basé sur la simulation des flux de passagers et de trains dans le réseau de transport que l'on présente dans la section suivante. Dans la suite de ce document nous ne parlerons plus du programme (P).

### 3.7.1.2 Modèle basé sur la simulation des flux de passagers et de trains

On définit dans cette section les différentes composantes du sous-système de transport, les paramètres permettant de faire fonctionner les trains et leurs interactions avec les passagers. Puis, l'algorithme permettant de simuler le fonctionnement du système ferroviaire de masse aussi bien en temps normal qu'en présence de perturbations est décrit.

Il est important de noter que dans cette section, on reprend certaines notations de la section 3.7.1.1 mais leur définition ici n'est pas toujours la-même.

L'ensemble des stations du réseau de transport que l'on veut étudier est noté  $S$ ,  $L$  désigne l'ensemble des lignes de métro ou RER du réseau. On a :

$$S = \{\text{ensemble des stations du réseau}\}$$

$$L = \{\text{ensemble des lignes du réseau}\}$$

$$= \left\{ l = \{s_1, \dots, s_k\} : s_i \in S \forall i \in \{1, \dots, k\} \wedge \{s_1, \dots, s_k\} \text{ est un ensemble ordonné de stations formant un ou des circuits dans } G \right\}$$

Une ligne est un ensemble ordonné<sup>5</sup> de stations formant un circuit dans  $G$ .  $G$  est un multigraphe que l'on va définir ci-dessous. Sur les lignes avec des bifurcations, on compte plusieurs circuits.

Soit  $G = (V, A, w, State)$  un multigraphe<sup>6</sup> orienté et pondéré.  $G$  est le graphe modélisant le sous-système de transport.  $G$  est un multigraphe car entre deux nœuds adjacents, il peut y avoir plusieurs arcs reliant ces nœuds. Dans ce cas, chaque arc correspond à une ligne desservant les deux nœuds adjacents.

$V$  correspond à l'ensemble des nœuds de  $G$ . On a :

$$\begin{aligned} V &= \{\text{ensemble des nœuds du réseau modélisant le sous-système de transport}\} \\ &= \{(s, l) \in S \times L : s \in l\} \end{aligned}$$

Un nœud de  $G$  représente le quai de la ligne  $l \in L$ , à la station  $s \in l$ . D'une manière générale, lorsqu'une ligne de métro/RER, dessert une station, il y a dans cette station deux quais correspondant à chaque direction de la ligne. Dans cette étude, pour simplifier le modèle, les deux quais d'une ligne à une station sont regroupés en un seul. On notera par  $S_v$  et  $L_v$  respectivement la station et la ligne du nœud  $v$ .

On définit maintenant l'ensemble des arcs du graphe  $G$ .

$$A = A_{train} \cup A_{cor}$$

$$A_{train} = \left\{ \left( (s, l), (s', l) \right) : \text{arcs permettant aux trains de la ligne } l \text{ de circuler de la station } s \text{ à la station adjacente } s' \right\}$$

---

5. Une relation d'ordre dans un ensemble est une relation binaire dans cet ensemble qui permet de comparer ses éléments entre eux de manière cohérente. Un ensemble muni d'une relation d'ordre est un ensemble ordonné. Ici la relation d'ordre utilisée est la position d'un élément dans un ensemble.

6. Graphe doté d'un ou plusieurs arcs multiples, ou de boucles.

$A_{cor} = \left\{ \left( (s, l), (s, l') \right) : \begin{array}{l} \text{représente les arcs permettant aux passagers d'effectuer leur} \\ \text{correspondance à la station } s \text{ entre les lignes } l \text{ et } l' \end{array} \right\}$

On discrétise la durée de la simulation ( $T$ ) de la manière suivante :

$$\mathcal{T} = \{0, \Delta t, 2.\Delta t, \dots, n.\Delta t = T\}$$

$\Delta t > 0$  est le pas de temps.

Les arcs de  $A$  sont pondérés par la fonction  $w$  qui représente le temps de parcours d'un arc. On a :

$$w : A \times \mathcal{T} \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$(a, t) \longmapsto w(a, t) = \begin{cases} \delta_{v, v'}(t) & \text{si } a = (v, v') \in A_{train} \\ \delta_{s, l'}(t) & \text{si } a \in A_{cor} \end{cases}$$

$\delta_{s, l'}(t)$  est le temps de correspondance entre les lignes  $l$  et  $l'$  à la station  $s$  et à l'instant  $t$ . Ce temps dépend du temps de marche des passagers entre les lignes  $l$  et  $l'$  à la station  $s$  mais aussi du nombre de passagers dans cette station à cet instant (heure de pointe ou pas). Plus il y a de passagers dans la station, plus le temps de correspondance est long.  $\delta_{v, v'}(t)$  est le temps de parcours des trains entre les stations  $S_v$  et  $S_{v'}$  à l'instant  $t$ .

La fonction *State* est une fonction représentant l'état d'un arc  $a \in A$  ou d'un nœuds de  $V$  à l'instant  $t$ . Elle est définie par :

$$State : (V \cup A) \times \mathcal{T} \longrightarrow \{0, 1\}$$

$$(x, t) \longmapsto State(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } ((x \in V) \wedge (x \text{ peut accueillir des passagers/trains à l'instant } t)) \\ & \vee \\ & ((x \in A) \wedge (\text{les passagers/trains peuvent emprunter } x \text{ à l'instant } t)) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Cette fonction *State* modélise l'état de fonctionnement des nœuds ou des arcs du multigraphe  $G$ . Elle vaut 0 si la composante est défaillante et 1 sinon. On peut donc simuler une perturbation sur ces composantes en modifiant la valeur de la fonction *State* associée à cette composante.

Dans ce qui suit, un ensemble est considéré comme une liste d'éléments et les éléments d'une liste *Liste* sont indexés de 1 à  $|Liste|$ .  $Liste[1]$  est donc l'élément à la première position de la liste. La fonction  $first(l, k)$  avec  $l \subset Liste$  et  $k \in \mathbb{N}$  correspond aux  $k$  premiers éléments de  $l$ . Elle est définie de la manière suivante :

$$first : Liste \times \mathbb{N} \longrightarrow Liste$$

$$(l, k) \longmapsto first(l, k) = \begin{cases} l & \text{si } |l| \leq k \\ l' = \{l_1, l_2, \dots, l_k\} & \text{si } |l| > k \text{ avec } l = \{l_1, l_2, \dots, l_k, l_{k+1}, \dots, l_{|l|}\} \end{cases}$$

Soit  $SER$  l'ensemble des services dans le réseau pendant la durée de la simulation. Un Service  $ser \in SER$  représente un train qui effectue un parcours sur une ligne et dans une direction (d'un terminus à l'autre). Il correspond à un train qui part d'un terminus pour desservir les stations de son parcours jusqu'à sa station finale. Il est caractérisé par :

- $Cap(ser)$  qui modélise la capacité du train qui assure le service  $ser$ .
- Une liste  $P_{ser} = \{(v_1, \dots, v_i = (s_i, l_i), \dots, v_k) : (l_i = l_j \ \forall i, j \in \{1, \dots, k\}) \wedge (v_1, \dots, v_k) \text{ forme un chemin dans } G\}$ .  $P_{ser}$  représente le parcours du service  $ser$  dans le graphe  $G$ . Sur des lignes RER par exemple, des trains peuvent passer par une station sans pour autant s'arrêter à cette station. Cette situation se modélise en ajoutant un arc  $a = (v, v')$  qui "saute" les stations non desservies par ce service et en attribuant à cet arc une valeur de  $\delta_{v,v'}(t)$  correspondant au temps de parcours de cet arc. Prenons pour exemple, une ligne desservant les nœuds  $v_1, v_2, v_3, v_4$  dans cet ordre. Si un service de cette ligne ne dessert pas les nœuds  $v_2$  et  $v_3$ , on crée pour ce service un arc  $(v_1, v_4)$  dans  $G$  avec  $w((v_1, v_4), t)$  correspondant au temps de parcours (sans arrêts) entre  $v_1$  et  $v_4$ .
- La date  $t_{ser}$  de départ du service  $ser$  à la station terminus  $v_1$ .
- $Position_{ser}$  est la position de  $ser$  sur son parcours  $P_{ser}$ . Au départ, le service  $ser$  est initialisé à  $Position_{ser} = 1$ . C'est-à-dire le service se trouve à  $P_{ser}[Position_{ser}] = v_1$ .
- $Timer_{ser}$  est un entier représentant le temps restant au service  $ser$  pour arriver à la position  $position_{ser}$ . Lorsque  $Timer_{ser} \leq 0$ , cela veut dire que le service  $ser$  est à la position  $position_{ser}$ . La position  $position_{ser}$  est dans ce cas la position courante du service  $ser$ . Lorsque  $Timer_{ser} > 0$ , cela veut dire que  $position_{ser}$  est la position cible du service  $ser$  et qu'il lui reste  $Timer_{ser}$  unités de temps pour arriver à  $position_{ser}$ .  $Timer_{ser}$  est initialisé à 0 au début de la simulation.

Soit  $\mathcal{P}$  l'ensemble des passagers du système sur la période de la simulation. Un passager  $p \in \mathcal{P}$  est caractérisé par :

- Une liste  $P_p = \{(v_1, \dots, v_k)\}$  qui représente le parcours du passager  $p$  dans  $G$ . Cette liste est déterminée en calculant le plus court chemin en temps entre  $S_{v_1}$  à  $S_{v_k}$ . Pour cela, une station de destination ( $S_{v_k}$ ) est affectée à chaque passager  $p$  qui entre dans le réseau par une station donnée ( $S_{v_1}$ ). Le processus d'affectation d'une station de destination à un passager dans le cadre du réseau considéré dans cette étude est présenté dans la section 4.3.3.1. Il est à noter que ce processus dépend des données que l'on possède sur la destination des passagers.
- $\tau_p$ , un entier représentant la date d'entrée du passager  $p$  dans le système.
- $Position_p$  est la position de  $p$  sur son parcours  $P_p$ . Au départ,  $Position_p$  est initialisée à  $Position_p = 1$ .
- Comme pour les services, une variable  $Timer_p$  permet de connaître avec précision la position du passager  $p$  sur son parcours. Son fonctionnement est identique au  $Timer$  d'un service.

$G$ ,  $SER$  et  $\mathcal{P}$  sont les données d'entrée du modèle. L'algorithme 2 permet de simuler le fonctionnement du système de transport de masse en prenant en compte l'état des composantes du sous-système de transport.  $Passengers\_Load(v, t) \forall v \in V, \forall t \in \mathcal{T}$  est un tableau dans lequel est enregistrée la charge des passagers en  $v$  à l'instant  $t$ . On verra dans la suite comment adapter ce calcul pour une station ou pour une ligne. On enregistre dans  $Total\_Travel\_Time(t) \forall t \in \mathcal{T}$  le temps cumulé du trajet des passagers à leur sortie du système en fonction du temps. Pour avoir le retard des passagers en cas de perturbation, il suffit donc de soustraire de  $Total\_Travel\_Time(t)$  obtenu en cas de perturbation, de la valeur obtenue dans les conditions normales d'exploitation.

Pour chaque pas de temps, lignes 5 à 34, l'algorithme 2 permet de simuler le bilan des flots de passagers et de trains avec leurs interdépendances. Pour chaque station du système,  $s$ , et pour chaque nœud  $v$  lié à cette station  $s$ , on effectue les traitements suivants :

- Traitement des passagers qui arrivent à destination et des trains qui arrivent au terminus.  
On enlève des passagers/trains présents dans le système ceux qui arrivent à/au destination/-terminus à la station  $S_v$ . Le temps cumulé des passagers dans le système est mis à jour à la ligne 11.
- Traitement des passagers entrant dans le système.  
Après avoir ajouté à  $\mathcal{P}'$  les passagers qui entrent dans le système par la station  $S_v$  à la date  $t$  (ligne 14), on met à jour la charge des passagers à la ligne 15. Dans la formule du calcul de la charge des passagers,  $Passengers\_Load(v, t)$ , on n'a considéré que les passagers qui sont sur le point de quitter la station  $S_v$  par le nœud  $v$  ( $Timer_p \leq 0$ ). On pourrait avoir les variantes suivantes :
  - La charge des passagers à la station  $s$  (équation 3.5).

$$Passengers\_Load(s, t) = |\{p \in \mathcal{P}' : ((P_p[position_p] = v) \wedge (S_v = s)) \wedge ((Timer_p \leq 0) \vee (P_p[position_p - 1] = u : S_u \in s))\}| \quad (3.5)$$

La charge des passagers à la station  $s$  est la somme des passagers sur un quai de cette station et de ceux qui sont en train de faire leur correspondance à cette station. L'équation 3.5 est à mettre juste avant la ligne 28 : après avoir effectué le bilan de la charge des passagers à la station  $s$  (la boucle "while" de la ligne 7). Pour que le modèle ait le temps de compter les passagers qui entrent dans le système avant qu'ils ne quittent la station  $s$  (lignes 16 à 23), le  $Timer_p$  doit être initialisé à 1 pour ces derniers.

- La charge des passagers sur une ligne  $l$ .

$$Passengers\_Load(l, t) = |\{p \in \mathcal{P}' : ((P_p[position_p] = v) \wedge (L_v = l))\}| \quad (3.6)$$

Cette équation est à mettre juste avant la ligne 34 : une fois que l'on a traité toutes les stations, pour un instant  $t$  donné.

- Traitement des départs des trains/passagers d'une station.  
D'une manière générale, un passager ou un train peut emprunter un arc  $a$  lorsque cet arc est opérationnel, c'est-à-dire  $State(a, t) = 1$  : lignes 17 et 24. Pour un passager voulant emprunter un arc  $a \in A_{train}$ , il faut en plus qu'il existe un train qui emprunte cet arc au même moment : lignes 16 et 17. Il faut aussi vérifier la contrainte de capacité du train : ligne 21.

**Algorithme 2** : Algorithme de simulation d'un système de transport ferroviaire de masse

---

**Input** :  $G = (V, A, w, State)$ ;  $S$ ;  $SER$ ;  $\mathcal{P}$   
**Output** :  $Total\_Travel\_Time(t) \forall t \in \mathcal{T}$   
 $Passengers\_Load(v, t) \forall v \in V, \forall t \in \mathcal{T}$ .

---

```

1  $Total\_Travel\_Time(0) \leftarrow 0$ 
2  $\mathcal{P}' \leftarrow \emptyset$ ; /* L'ensemble des passagers actuellement dans le système */
3  $Trains \leftarrow \emptyset$ ; /* L'ensemble des trains actuellement dans le système */
4  $t \leftarrow \Delta t$ ;
5 while  $t \leq T$  do
6    $S' \leftarrow S$ ;
7   while  $S' \neq \emptyset$  do
8      $s \leftarrow S'[1]$ ;
9     foreach  $v \in \{v \in V : S_v = s\}$  do
10      /* Traitement des passagers/trains qui arrivent à/au destination/terminus */
11       $Exit \leftarrow \{x \in \mathcal{P}' \cup Trains : (P_x[position_x] = v) \wedge (position_x = |P_x|) \wedge (Timer_x \leq 0)\}$ ;
12       $Total\_Travel\_Time(t) \leftarrow Total\_Travel\_Time(t - 1) + \sum_{\{y \in Exit : y \in \mathcal{P}'\}} (t - \tau_y)$ ;
13       $\mathcal{P}' \leftarrow \mathcal{P}' \setminus \{y \in Exit : y \in \mathcal{P}'\}$ ;
14       $Trains \leftarrow Trains \setminus \{y \in Exit : y \in Trains\}$ ;
15      /* Traitement des passagers entrant dans le système */
16       $\mathcal{P}' \leftarrow \mathcal{P}' \cup \{p \in \mathcal{P} : (\tau_p = t) \wedge (P_p[1] = v)\}$ ;
17       $Passengers\_Load(v, t) = |\{p \in \mathcal{P}' : (P_p[position_p] = v) \wedge (Timer_p \leq 0)\}|$ ;
18      /* Traitement des départs des trains/passagers de la station s */
19      foreach  $u \in \{u \in V : (v, u) \in A_{train}\}$  do
20        if  $\exists Tr \in Trains : (P_{Tr}[position_{Tr}] = v) \wedge (P_{Tr}[position_{Tr} + 1] = u) \wedge (Timer_{Tr} \leq 0) \wedge (State(v, u), t) = 1$  then
21           $position_{Tr} \leftarrow position_{Tr} + 1$ ;
22           $Timer_{Tr} \leftarrow \delta_{v,u}(t) + 1$ ;
23           $\mathcal{P}_{v \rightarrow u} \leftarrow \{p \in \mathcal{P}' : (P_p[position_p] = v) \wedge (P_p[position_p + 1] = u) \wedge (Timer_p \leq 0)\}$ ;
24          foreach  $p \in first(\mathcal{P}_{v \rightarrow u}, Cap_{Tr})$  do
25             $position_p \leftarrow position_p + 1$ ;
26             $Timer_p \leftarrow \delta_{v,u}(t) + 1$ ;
27          /* Traitement des passagers en correspondance à la station s */
28          foreach  $u \in \{u \in V : ((v, u) \in A_{cor}) \wedge State((v, u), t) = 1\}$  do
29            foreach
30               $p \in \{p \in \mathcal{P}' : (P_p[position_p] = v) \wedge (P_p[position_p + 1] = u) \wedge (Timer_p \leq 0)\}$  do
31                 $position_p \leftarrow position_p + 1$ ;
32                 $Timer_p \leftarrow \delta_{S_v, L_v, L_u}(t) + 1$ ;
33       $S' \leftarrow S' \setminus s$ ;
34      /* Traitement des passagers/trains en "interstation" */
35      foreach
36         $x \in \{x \in \mathcal{P}' \cup Trains : (Timer_x \geq 0) \wedge State((P_x[position_x - 1], P_x[position_x]), t) = 1\}$  do
37           $Timer_x \leftarrow Timer_x - 1$ ;
38      /* Traitement des trains qui entrent dans le système */
39      foreach  $ser \in \{ser \in SER : (t = t_{ser})\}$  do
40        if  $|\{Tr \in Trains : (P_{Tr}[position_{Tr}] = P_{ser}[1]) \wedge (Timer_{Tr} \leq 0)\}| = 0$  then
41           $Trains = Trains \cup ser$ ;
42       $t \leftarrow t + \Delta t$ ;

```

---

Les sous-sections suivantes décrivent les autres sous-systèmes de notre modèle d'un système ferroviaire de masse et leurs interdépendances. Les contraintes décrites dans ces sous-sections sont à considérer avant l'exécution de l'algorithme 2 afin de mettre à jour les données d'entrée de cet algorithme :  $G = (V, A, w, State); S; SER; \mathcal{P}$ .

### 3.7.2 Modélisation du sous-système d'énergie

On modélise ici le sous-système d'énergie d'un système de transport ferroviaire de masse. La présentation de ce sous-système a été faite dans la section 3.5.3 de ce chapitre. Ce sous-système est modélisé par un graphe orienté  $G^{En} = (V^{En}, A^{En}, State^{En})$ . Avec  $V^{En}$ , l'ensemble des composantes de ce sous-système et  $A^{En}$ , les liens (arcs) de ce sous-système essentiellement composés de câbles électriques et de caténaires. On a :

$$V^{En} = V_{pht}^{En} \cup V_{pr}^{En} \cup V_{pef}^{En}$$

$V_{pht}^{En}$  (resp.  $V_{pr}^{En}$ ,  $V_{pef}^{En}$ ) est l'ensemble des nœuds correspondant aux PHTs (resp. PRs, PEFs).

$$A^{En} = A_{pr}^{En} \cup A_{pef}^{En} \cup A_{train}^{En}$$

$$A_{pr}^{En} = \left\{ (v, v') : (v \in V_{pht}^{En}) \wedge (v' \in V_{pr}^{En}) \wedge (v, v') \text{ représente un artère reliant un PHT } v \text{ à un PR } v' \text{ dans le réseau} \right\}$$

$$A_{pef}^{En} = \left\{ (v, v') : (v \in V_{pht}^{En}) \wedge (v' \in V_{pef}^{En}) \wedge (v, v') \text{ représente un artère reliant un PHT } v \text{ à un PEF } v' \text{ dans le réseau} \right\}$$

$$A_{train}^{En} = \left\{ (v, v') : (\forall a = (u, u') \in A_{train}, (v = u) \wedge (v' = u')) \right\}$$

Les arcs de  $A_{train}^{En}$  représentent les caténaires (et le 3<sup>ième</sup> rail pour les lignes de métro) et il en existe pour chaque arc de  $A_{train}$ .  $A_{pr}^{En}$  correspond aux artères reliant les PHTs aux PRs. De même que  $A_{pef}^{En}$  correspond aux artères reliant les PHTs aux PEFs.

La fonction  $State^{En}$  est une fonction représentant l'état d'un arc  $a \in A^{En}$  et des nœuds de  $V^{En}$  à l'instant  $t$ . Elle est définie par :

$$State^{En} : (V^{En} \cup A^{En}) \times \mathcal{T} \longrightarrow \{0, 1\}$$

$$(x, t) \longmapsto State^{En}(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \text{ est en état de fonctionner à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On a vu dans la section 3.5.3 que les PHTs et les PEFs sont équipés d'un groupe électrogène permettant de leur fournir d'électricité en cas de défaillance d'un PHT ou d'un PEF. On définit une fonction qui représente l'état des groupes électrogènes,  $\forall v \in V_{pht}^{En} \cup V_{pef}^{En}, \forall t \in \mathcal{T}$ , de la manière suivante :

$$g^{En} : (V_{pht}^{En} \cup V_{pef}^{En}) \times \mathcal{T} \longrightarrow \{0, 1\}$$

$$(x, t) \longmapsto g^{En}(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{si le groupe électrogène associé à } v \text{ est en mesure d'alimenter} \\ & \text{une composante à la date } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Un PR alimente un ensemble d'arcs  $a \in A_{train}^{En}$  correspondant à la zone d'influence de ce PR qu'on note  $Zone_v^{pr}$ ,  $\forall v \in V_{pr}^{En}$ . On a :

$$Zone_v^{pr} = \left\{ a \in A_{train}^{En} : \text{le PR } v \text{ agit sur l'énergie de traction de } a \right\}$$

Lorsqu'un PR tombe en panne ou n'est pas alimenté par son PHT, sa défaillance est modélisée par l'augmentation du temps de parcours dans la zone concernée :

$$\delta_{v,v'}(t) = \delta_{v,v'}(t) + \lambda_1^a \cdot (1 - State^{En}(u, t)), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad \forall u \in V_{pr}^{En}, \quad \forall a = (v, v') \in Zone_u^{pr} \quad (3.7)$$

$\lambda_1^a > 0$  est un paramètre à déterminé par le PCC et qui modélise le temps supplémentaire de parcours de l'arc  $a$  en cas de défaillance d'un PR qui l'alimente. Dans l'équation 3.7, lorsqu'un PR tombe en panne, son état vaut 0, ce qui augmente  $\delta_{v,v'}(t)$  de  $\lambda_1^a$ . L'équation 3.7 peut être modélisée par le pseudo-code de l'algorithme 3. Dans la suite de ce document, on ne va pas systématiquement écrire le pseudo-code correspondant aux équations.

---

**Algorithme 3 :** Le pseudo-code correspondant à l'équation 3.7

---

```

1 foreach  $t \in \mathcal{T}$  do
2   foreach  $u \in V_{pr}^{En}$  do
3     foreach  $a = (v, v') \in Zone_u^{pr}$  do
4        $\delta_{v,v'}(t) = \delta_{v,v'}(t) + \lambda_1^a \cdot (1 - State^{En}(u, t));$ 

```

---

Lorsque deux PRs adjacents sont défaillants, les trains ne peuvent plus passer sur les arcs concernés. Cela se formalise par :

$$State(a, t) = \min \left( State(a, t), \left\lceil \frac{State^{En}(v, t) + State^{En}(v', t)}{2} \right\rceil \right), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad \forall (v, v') \in (V_{pr}^{En})^2,$$

$$\forall a \in Zone_v^{pr} \cap Zone_{v'}^{pr} \quad (3.8)$$

Dans la contrainte 3.8,  $Zone_v^{pr} \cap Zone_{v'}^{pr} \neq \emptyset$  lorsqu'il existe des parties du réseau couvertes à la fois par les PRs  $v$  et  $v'$ . C'est donc dans ces parties du réseau que le trafic est arrêté. La contrainte 3.8 devient active lorsque  $State(a, t) = 1$  au début de l'exécution de la contrainte et que l'état des PRs  $v$  et  $v'$  vaut 0 simultanément ( $\left\lceil \frac{State^{En}(v, t) + State^{En}(v', t)}{2} \right\rceil = 0$ ). Il est ici important de noter que l'équation 3.7 doit être exécutée avant l'équation 3.8 puisque (3.8) annule (3.7) lorsque la contrainte 3.8 devient active. Une contrainte est active lorsque cette contrainte change l'état des variables du système.

Après avoir décrit la dépendance de certaines composantes du sous-système de transport aux PRs, décrivons maintenant l'influence des PHTs sur les PRs et les PEFs. L'équation (3.9) exprime la relation qui lie les PHTs aux PRs et aux PEFs. Pour qu'un PR ou un PEF ne fonctionne pas à cause d'une défaillance d'un PHT ou de l'artère liant le PHT au PR ou au PEF, il faut l'une des conditions suivantes :

- Le PHT est défaillant depuis une durée supérieure à l'autonomie de son groupe électrogène. Et donc son groupe électrogène ne fonctionne plus.
- L'artère liant le PHT au PR ou au PEF est défaillante.

La contrainte 3.9 traduit les conditions qui viennent d'être décrites.  $v$  représente un PHT. Pour que  $\left\lceil \frac{State^{En}(v,t) + g^{En}(v,t)}{2} \right\rceil = 0$ , il faut que l'état du PHT et du groupe électrogène associé valent 0 simultanément. Le membre de gauche de l'inégalité est inférieur ou égal à 1 lorsqu'au moins une des conditions ci-dessus est vérifiée. Dans ce cas, il faut que l'état de la composante  $v'$  soit égal à 0.

$$\left\lceil \frac{State^{En}(v,t) + g^{En}(v,t)}{2} \right\rceil + State^{En}(a,t) \geq 2 \cdot State^{En}(v',t), \quad \forall a = (v, v') \in A_{pr}^{En} \cup A_{pef}^{En}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.9)$$

$\lceil x \rceil$  correspond à la partie entière supérieure de  $x$  et  $\lfloor x \rfloor$  à la partie entière inférieure de  $x$ . La contrainte 3.9 étant une inégalité, on ne peut pas l'utiliser pour fixer l'état des PRs et des PEFs ( $State^{En}(v',t)$ ). On a finalement la contrainte 3.10 sur l'état des PEFs et PRs à prendre en compte dans le modèle qui traduit l'inégalité 3.9 :

$$State^{En}(v',t) = \min \left( State^{En}(v',t), \left\lfloor \frac{\left\lceil \frac{State^{En}(v,t) + g^{En}(v,t)}{2} \right\rceil + State^{En}(a,t)}{2} \right\rfloor \right), \quad \forall a = (v, v') \in A_{pr}^{En} \cup A_{pef}^{En}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.10)$$

Lorsque  $State^{En}(v',t) = 0$  la contrainte 3.10 n'est pas active.

On décrit maintenant l'évolution de l'état des groupes électrogènes dans le temps. Plus particulièrement lorsque le PHT ou le PEF associé est défaillant. Lorsqu'un PHT est défaillant, le groupe électrogène associé à ce PHT arrête lui aussi de fonctionner si dans les  $Auto_v$  unités de temps après la défaillance du PHT, ce dernier n'est pas réparé. Ceci se traduit par l'équation (3.11). Les PEFs et les groupes électrogènes associés aussi fonctionnent de la même manière.

$$g^{En}(v,t) = \left\lfloor \frac{\sum_{k=t-Auto_v}^t State^{En}(v,k)}{Auto_v} \right\rfloor, \quad \forall v \in V_{pht}^{En} \cup V_{pef}^{En}, \quad \forall t \in \mathcal{T} : t \geq Auto_v \quad (3.11)$$

Dans l'équation 3.11, il est supposé que lorsqu'un PHT ou un PEF commence à fonctionner de nouveau, le groupe électrogène associé retrouve automatiquement son autonomie d'avant la défaillance.

Il est aussi à noter que l'ordre dans lequel les contraintes sont présentées n'est pas l'ordre dans lequel ces contraintes doivent être exécutées. On doit commencer par l'exécution des contraintes qui font intervenir les PHTs pour finir avec les contraintes sur les composantes du sous-système de transport.

### 3.7.3 Modélisation des sous-systèmes de télécommunication et d'organisation

Les composantes des sous-systèmes de télécommunication et d'organisation sont étroitement liées, dans le sens où les acteurs du sous-système d'organisation s'appuient beaucoup sur les composantes du sous-système de télécommunication pour exécuter leurs procédures. C'est pour cette raison que ces deux sous-systèmes sont modélisés par un même graphe. On suppose dans ce modèle qu'il y a assez d'unités radios le long des lignes pour que lorsqu'il y a une défaillance de quelques unités radios sur une partie d'une ligne, cette partie reste couverte (voir la section 3.5.5). Pour cette raison, on ne considère pas la défaillance des unités radios dans notre modèle mathématique.

Soit  $G^{T.O} = (V^{T.O}, A^{T.O}, State^{T.O})$  le graphe non orienté représentant les composantes des sous-systèmes de télécommunication et d'organisation. On note par  $V^{T.O}$ , l'ensemble des composantes des sous-systèmes d'organisation et de télécommunication en plus des serveurs comprenant les éléments suivants :

$$V^{T.O} = V_{lt}^{Tel} \cup V_{ate}^{Or} \cup V_{che}^{Or} \cup V_{con}^{Or} \cup V_{pcc}^{Or} \cup V_{ser}$$

$V_{ser}$  est l'ensemble des serveurs du système.  $V_{pcc}^{Or}$ ,  $V_{ate}^{Or}$ ,  $V_{che}^{Or}$ ,  $V_{con}^{Or}$  sont respectivement l'ensemble des PCCs, des Ateliers, des chefs de gares et des conducteurs.  $V_{lt}^{Tel}$  représente l'ensemble des locaux techniques.  $A^{T.O}$  est l'ensemble des liens de télécommunication liant les composantes de  $V^{T.O}$ . On a :

$$A^{T.O} = A_{ser.lt}^{Tel} \cup A_{pcc.ser}^{Tel} \cup A_{pcc.ate}^{Tel} \cup A_{pcc.che}^{Tel} \cup V_{pcc.con}^{Tel}$$

#### Notation

- $pcc$  : PCC
- $ser$  : serveur
- $con$  : conducteur
- $che$  : chef de gare
- $ate$  : atelier de maintenance
- $lt$  : local technique
- $Or$  : sous-système d'organisation
- $Tel$  : sous-système de télécommunication
- $T.O$  : sous-systèmes de télécommunication et d'organisation

Les liens de  $A^{T.O}$  sont les liens représentés dans les Figures 3.9 et 3.10

La fonction  $State^{T.O}$  est une fonction représentant l'état d'un arc  $a \in A^{T.O}$  et des nœuds de  $V^{T.O}$  à l'instant  $t$ . Elle est définie par :

$$State^{T.O} : (V^{T.O} \cup A^{T.O}) \times \mathcal{T} \longrightarrow \{0, 1\}$$

$$(x, t) \longmapsto State^{T.O}(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \text{ est en état de fonctionner à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On peut maintenant décrire la relation qui lie les serveurs aux locaux techniques (3.12). Comme pour la relation qui lie les PHTs aux PRs ou aux PEFs, pour qu'un local technique ne fonctionne

pas à cause d'une défaillance d'un serveur ou du lien liant le serveur au local technique, il faut l'une des conditions suivantes :

- Le serveur est défaillant.
- Le lien liant le serveur au local technique est défaillant.

On a donc :

$$State^{T.O}(v', t) = \min \left( State^{T.O}(v', t), \left\lfloor \frac{State^{T.O}(v, t) + State^{T.O}(a, t)}{2} \right\rfloor \right), \quad \forall a = (v, v') \in A_{ser\_lt}^{Tel}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.12)$$

Lorsqu'un local technique  $v$  ne fonctionne plus, le trafic est interrompu sur la partie de la ligne couverte par ce local technique (3.13). La zone couverte par un local technique est définie comme :

$$Zone_v^{lt} = \{a \in A_{train} : \text{le local technique } v \text{ couvre l'arc } a\}$$

$$State(a, t) = \min \left( State(a, t), State^{T.O}(v, t) \right), \quad \forall v \in V_{lt}^{Tel}, \quad \forall a \in Zone_v^{lt}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.13)$$

Une autre contrainte dans  $G^{T.O}$  est celle décrivant le lien entre un PCC et son serveur :

$$State^{T.O}(v', t) = \min \left( State^{T.O}(v', t), State^{T.O}(a, t) \right), \quad \forall a = (v, v') \in A_{pcc\_ser}^{Tel}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.14)$$

Dans le modèle, les composantes du sous-système d'organisation interviennent à travers les scénarios de perturbations et les plans de gestion de crises. On présente dans la section 3.8 comment les scénarios de perturbations et les plans de gestion de crises se modélisent.

Les relations d'interdépendances que l'on vient de décrire formellement dans les sections 3.7.2 et 3.7.3 permettent de déterminer l'état des composantes du système de transport ferroviaire en fonction du temps. Cela permet par la suite de simuler dans le modèle, les conséquences liées à la défaillance des ces composantes et présentées dans les Tableaux 3.4 à 3.9. Un exemple de ce processus est décrit dans la section 3.8.

### 3.8 Modélisation des perturbations et des plans de gestion de crise

Un scénario est un ensemble de perturbations sur une ou des composantes du système. On note par  $\mathcal{E}$  la liste des perturbations que l'on veut simuler. Soit  $e \in \mathcal{E}$ , on a :

- $\tau_e$  la date du début de la perturbation  $e$  ;
- $C_e \in V \cup V^{En} \cup V^{T.O} \cup A \cup A^{En} \cup A^{T.O}$  la composante défaillante dans le cadre de la perturbation  $e$  ;
- $d_e$  l'impact de la perturbation sur la fonction  $w$ . La fonction  $w$  est le poids des arcs du graphe  $G$  et correspond au temps de parcours de ces arcs.

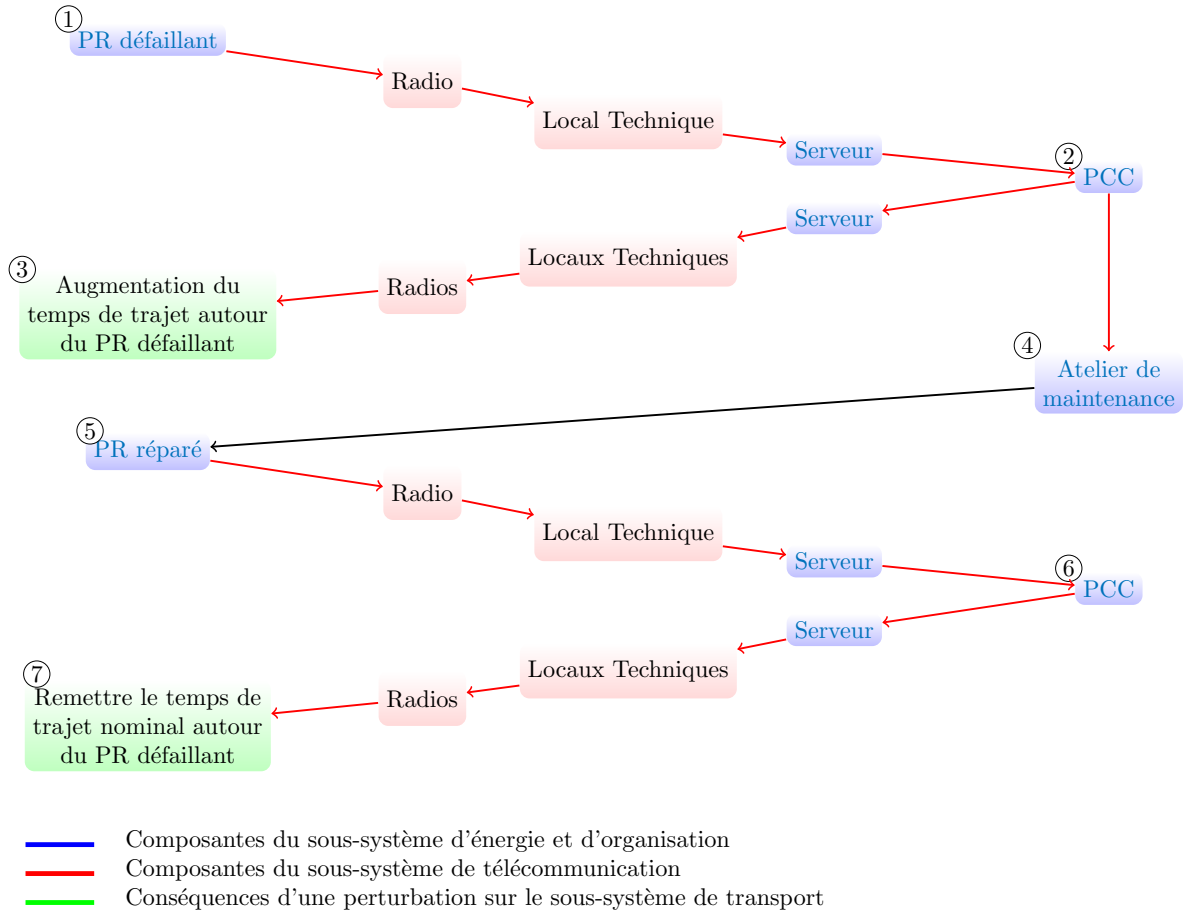


FIGURE 3.11 – Les interactions entre les acteurs.

On suppose que  $\mathcal{E}$  est une liste triée par  $\tau_e$  croissant. On considère ci-dessous l'exemple d'une défaillance d'un PR. La Figure 3.11 illustre les interactions entre les acteurs au cours de cette perturbation. Lorsqu'un PR tombe en panne, une information est donc envoyée au PCC via les composantes du sous-système de télécommunication et le serveur : de ① à ②. Lorsque l'information arrive au PCC, ce dernier diminue la vitesse des trains dans la zone impactée. Puis, le PCC envoie les agents de maintenance (l'atelier) sur les lieux de l'incident. Après réparation du PR, cet information est renvoyée au PCC qui rétablit la vitesse nominale des trains dans la zone.

L'algorithme 4 décrit la procédure en cas de défaillance d'un PR.

Les algorithmes de simulation des procédures en cas de défaillance d'une composante du système sont à exécuter dans la partie pré-traitement, avant l'exécution de l'algorithme 2. Dans l'algorithme 4, la ligne (2) permet d'identifier le local technique qui prend en charge le transfert des données dans la zone où le PR  $v$  est défaillant afin de transférer cet information au PCC. Ce local technique est celui qui couvre le plus la zone d'influence du PR défaillant.  $\delta_v(\tau_e)$  de la ligne (4) est une estimation du temps nécessaire aux agents de maintenance pour réparer le PR  $v$ . Ce temps inclut le temps de parcours de l'atelier de maintenance au PR  $v$ . S'il y a un problème sur une composante du sous-système de télécommunication ou sur le serveur avant cette période de maintenance, cela augmente

la durée des procédures : lignes (6) et (7). De même pour la communication entre le PCC et l'atelier correspondant : lignes (9) et (10). La dernière ligne de l'algorithme 4 permet de modifier les services en fonction de la perturbation : retournement des trains, suppression des services, ajout de services, etc. Cette modification de services peut aussi consister à ajouter des arcs dans  $G = (V, A, w)$  avec des services correspondant à ces arcs afin de modéliser le service provisoire des bus.

Notons qu'une éventuelle perturbation d'une composante du sous-système de télécommunication ou du serveur après la date  $\tau_e$  n'est pas traitée dans l'algorithme 4 car cette perturbation se trouve dans la liste des perturbations qui forment le scénario  $\mathcal{E}$ . Les perturbations qui forment  $\mathcal{E}$  sont traitées dans le modèle par ordre croissant de leur date d'occurrence. De ce fait, dans l'algorithme 4, une éventuelle perturbation d'une composante du sous-système de télécommunication ou du serveur après la date  $\tau_e$  est traitée ultérieurement.

---

**Algorithme 4 :** Procédure en cas de défaillance d'un PR

---

**Input :**  $G = (V, A, w, State)$ ;  $G^{En} = (V^{En}, A^{En}, State^{En})$ ;  $G^{T.O} = (V^{T.O}, A^{T.O}, State^{T.O})$ ;  
 $S$ ;  $SER$ ;  $\mathcal{P}$ ;  $e \in \mathcal{E}$  :  $C_e \in V_{pr}^{En}$

**Output :**  $G = (V, A, w, State)$  et  $SER$  modifiés.

```

1  $v \leftarrow C_e$ ;
2  $v' \leftarrow \arg \max_{v'' \in V_{lt}^{Tel}} |Zone_v^{pr} \cap Zone_{v''}^{lt}|$ ;
3  $a \leftarrow (v_1, v') \in A_{ser\_lt}^{Tel} : v_1 \in V_{ser}$ ;
4  $\Delta t \leftarrow \delta_v(\tau_e)$ ; /* calcul du temps de réparation du PR  $v$  à l'instant  $\tau_e$  */
5  $a' \leftarrow (v_2, v_1) \in A_{pcc\_ser}^{Tel} : v_2 \in V_{pcc}^{Or}$ ;
6 if  $\left( \left\lfloor \frac{State^{T.O}(v', \tau_e) + State^{T.O}(a, \tau_e)}{2} \right\rfloor = 0 \right) \vee \left( \left\lfloor \frac{State^{T.O}(v_1, \tau_e) + State^{T.O}(a', \tau_e)}{2} \right\rfloor = 0 \right)$  then
7    $\Delta t \leftarrow \Delta t + \delta'$ ; /*  $\delta'$ : temps supplémentaire dû à la défaillance des
   composantes de  $G^{T.O}$  */
8  $a'' \leftarrow (v_3, v_2) : v_3 \in V_{at}^{Or}$ ;
9 if  $\left\lfloor \frac{State^{T.O}(v_3, \tau_e) + State^{T.O}(a'', \tau_e)}{2} \right\rfloor = 0$  then
10   $\Delta t \leftarrow \Delta t + \delta''$ ; /*  $\delta''$ : temps supplémentaire dû à la défaillance des
   composantes de  $G^{T.O}$  */
11 foreach  $t \in \{\tau_e, \dots, \tau_e + \Delta t\}$  do
12   $State^{En}(v, t) \leftarrow 0$ ;
13 Modifier  $SER$  en fonction de  $\tau_e$ ,  $v$ , et  $\Delta t$ ; /* Modification de l'offre de service
   selon les conditions d'exploitation */
```

---

Notons aussi que les lignes (11) et (12) de l'algorithme 4 permettent de mettre à jour l'état du PR défaillant après la date  $\tau_e$ . Cet état sera donc considéré dans les relations d'interdépendances décrites dans la section 3.7.2 pour mettre à jour l'état des composantes du sous-système de transport. Ainsi, en exécutant l'algorithme 2, on évalue l'impact de la défaillance de ce PR sur la performance du système.

On peut remarquer que dans le modèle, à part les conducteurs, les composantes du sous-système d'organisation ne peuvent pas être complètement défaillantes car ces composantes sont constituées d'un groupe de personnes et il y aura toujours des agents pour exécuter les procédures. Néanmoins,

ces composantes peuvent connaître une diminution de performance due à une perturbation. Cela se modélise par une augmentation du temps d'exécution des procédures par la dite composante organisationnelle.

### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, Il est présenté dans un premier temps quelques modèles dans la littérature permettant de simuler un système de transport ferroviaire de masse. Ces modèles ont permis de voir les différentes manières de modéliser un système ferroviaire.

Dans un second temps, le modèle développé dans cette étude est présenté. Une description et une modélisation formelle des différents sous-systèmes (sous-systèmes de transport, d'énergie, de télécommunication et d'organisation), de leurs composantes et leurs interdépendances sont présentées. Ce modèle est développé en prenant en compte les hypothèses suivantes :

- les passagers prennent le plus court chemin en temps pour atteindre leur station de destination,
- une fois fixée, la station de destination d'un passager ne change pas au cours de la simulation,
- les données d'entrée du modèle sont déterministes, seule la station de destination des passagers est choisie en utilisant un processus aléatoire (voir la section 4.3.3.1),
- l'état binaire des composantes du système (les composantes fonctionnent ou sont défaillantes).

Ensuite, la modélisation puis la simulation des perturbations et des plans de gestion de crise ont été faites à travers un exemple de perturbation : la défaillance d'un poste de redressement (PR).

Ce travail a permis de quantifier les indicateurs de performance du système :

- le nombre de passagers arrivés à destination,
- le retard total accumulé par l'ensemble des passagers,
- la charge de passagers à une station ou sur une ligne à un instant donné.

Ces indicateurs de performance vont être utilisés dans le chapitre suivant pour définir les indicateurs de résilience du système et les quantifier.



## Chapitre 4

# Evaluation des indicateurs de résilience d'un système de transport ferroviaire

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente, sur la base du modèle théorique présenté dans le chapitre 3, un outil d'aide à la décision permettant de quantifier la résilience d'un système de transport ferroviaire de masse en présence d'une perturbation. Les objectifs de cet outil sont les suivants :

- tester et valider le modèle théorique du chapitre 3,
- aider les gestionnaires de crise à prédire le comportement du système et à identifier les composantes les plus sensibles à chaque type de perturbation,
- permettre aux gestionnaires de crise de vérifier l'impact/l'efficacité des plans de gestion prévus,
- simuler les conditions d'exploitation du système aussi bien en temps normal que pendant une perturbation afin que ces conditions d'exploitation puissent être utilisées pour améliorer les indicateurs topologiques de performance d'un système de transport (voir le chapitre 5).

### 4.2 La base de données TJRF

Cette section présente la source des données qui ont permis d'alimenter le modèle présenté dans le chapitre précédent : la base de données issue des enquêtes TJRF [98]. Il est important de noter ici que dans le cadre des travaux présentés dans ce document, il n'y a pas de contribution à l'élaboration de la base de données TJRF. Ce travail a uniquement utilisé les données issues de cette base.

Les enquêtes TJRF (Trafic Journalier du Réseau Ferré) réalisées sur le réseau ferré RATP

(métro et RER) permettent de connaître avec précision, l'ensemble des déplacements effectués par les passagers sur ce réseau. Initialisée en 1997 par une enquête sur l'ensemble des stations, les données issues de l'enquête sont stockées dans une base de données appelée la base de données TJRF. Cette base est partiellement réactualisée chaque année, en fonction des modifications du réseau.

#### **4.2.1 La présentation de l'enquête TJRF**

Pour pouvoir offrir un service adapté à la demande de transport, la RATP doit connaître de façon précise l'utilisation de ses réseaux ferrés et routiers. Les enquêtes TJRF permettent d'appréhender l'ensemble des déplacements effectués sur le réseau du métro et du RER RATP, et d'en déduire les flux engendrés par ce moyen de transport.

Ces enquêtes sont réalisées à chaque station, auprès des voyageurs entrant sur ce réseau. Dans le passé (en 1977, 1982, 1990, et 1997), elles ont été effectuées sur l'ensemble des stations, ce qui a permis d'initialiser une Base de Données TJRF. A l'heure actuelle, cette base de données est constamment réactualisée en fonction des modifications du réseau (ouverture de stations, création de lignes, nouvelle connexion avec la SNCF, etc.) par des enquêtes partielles annuelles.

##### **4.2.1.1 L'organisation de l'enquête**

La base de données TJRF doit refléter les déplacements d'un jour ouvrable d'hiver. C'est pourquoi les enquêtes ont toujours lieu entre les mois d'octobre et avril (hors vacances scolaires), et seulement les mardis et jeudis. Les voyageurs sont interviewés de 6h à 23h, période qui représente environ 97% du trafic.

Les interviews sont effectuées à chaque point d'entrée des stations, en général devant les lignes de contrôle. En moyenne le taux de sondage est de 5%, ce qui consiste à interroger une personne sur vingt.

Pour arriver à cet objectif, un plan de sondage est établi pour chaque station, en fonction du trafic et du contexte géographique. Il précise les heures d'enquête et le nombre d'enquêteurs nécessaires, pour chaque point d'entrée des voyageurs.

Le recueil des données est effectué par des enquêteurs spécialisés dans ce domaine, afin d'obtenir des informations les plus fiables possibles.

##### **4.2.1.2 Le traitement du fichier**

Le fichier obtenu comprend l'ensemble des interviews effectuées (environ 300 000 enregistrements pour l'ensemble du réseau). Avant de pouvoir l'utiliser, il faut s'assurer de sa fiabilité, par une vérification approfondie (voir le section 4.2.2.4).

Le fichier peut contenir diverses erreurs venant d'une incompréhension entre l'enquêteur et le voyageur interviewé. Il est donc soumis à toute une série de tests de vérification (cohérence du trajet,

adéquation de l'origine du déplacement avec la station d'entrée et le mode de rabattement, etc.). Quand cela est possible, les interviews erronées sont corrigées, par recoupement d'informations. Sinon elles sont rejetées.

A partir des déplacements de l'échantillon de voyageurs, nous devons reconstituer le trafic total. Pour ce faire, un poids est attribué à chaque questionnaire en fonction du nombre d'entrants. Le trafic pris en compte est le trafic moyen d'un jour ouvrable d'hiver, augmenté de la part d'entrants non décomptés par les lignes de contrôle. La pondération s'effectue par ligne de contrôle et par demi-heure, elle permet aussi de corriger un certain nombre de biais.

## 4.2.2 La méthodologie utilisée

### 4.2.2.1 Le taux de sondage

Le taux de sondage d'une enquête est égal au rapport entre la Population et l'échantillon de personnes interrogées. Plus ce taux est élevé, plus les estimations des résultats seront fiables.

Dans le cas de l'enquête TJRF, le taux de sondage réalisé est de 5%. Concrètement, cela signifie qu'environ une personne sur vingt, sera interrogée. Ce taux de sondage varie en fonction de l'importance de chaque station : il est seulement de 3% à Saint Lazare qui compte 150 000 entrants par jour, et de 7% pour une station de l'ordre de 10 000 entrants.

Ce taux de sondage permet d'obtenir une bonne précision des résultats : moins de 1% sur les données par réseau et entre 5% et 10% pour les données par station.

### 4.2.2.2 Le plan de sondage

Le Plan de Sondage détermine pour chaque station, les heures à enquêter et le nombre d'enquêteurs nécessaires selon la ligne de contrôle.

Il est élaboré à partir du nombre d'entrants par ligne de contrôle et du taux de sondage désiré selon la station.

Afin d'avoir un échantillon représentatif de la population, il est impératif d'enquêter à chaque point d'entrée, au moins une heure dans chaque tranche horaire (6h-9h30, 9h30-12h, 12h-14h, 14h-16h30, 16h30-20h00, 20h00-23h). Ces tranches horaires représentent des périodes de temps à l'intérieur desquelles les motifs de déplacements sont similaires.

### 4.2.2.3 La saisie des interviews

Les interviews sont réalisées par des sociétés spécialisées dans ce type de travail.

La passation du questionnaire ne doit pas nécessiter plus d'une ou deux minutes, sinon le voyageur risque de s'impatience et de ne pas répondre à la totalité des questions.

Les interviews sont effectuées sur terminaux portables, ce qui permet de vérifier une partie des

réponses en temps réel, en particulier la validité du déplacement annoncé. En cas d'incohérence, l'enquêteur peut reposer de suite sa question au voyageur.

De plus, ce type d'enquête évite le travail de codage et de saisie, et les erreurs inhérentes. Elle permet ainsi une meilleure fiabilité des résultats.

#### 4.2.2.4 L'apurement du fichier

Le fichier de l'enquête remis par la société doit être vérifié avant d'être utilisable. Les principaux types d'erreurs pouvant être détectées sont :

- la cohérence du trajet RATP ;
- la possibilité d'utiliser le mode de rabattement <sup>1</sup> déclaré, à la station enquêtée ;
- la possibilité d'utiliser le mode de diffusion <sup>2</sup> déclaré, à partir de la station de sortie ;
- l'adéquation entre la commune d'origine et la station d'entrée ;
- l'adéquation entre la commune de destination et la station de sortie ;
- la vraisemblance de la gare SNCF utilisée, en cas de rabattement ou diffusion par ce mode.

Les questionnaires erronés sont corrigés si la logique du déplacement peut être reconstituée. Sinon, ils sont rejetés du fichier.

#### 4.2.2.5 La pondération du fichier

Pour obtenir des résultats sur l'ensemble de la population des voyageurs du réseau, on attribue un poids à chaque questionnaire, en fonction du nombre de personnes entrant dans la station au moment où le voyageur est interviewé.

Ce poids est égal au nombre d'entrants dans la station divisé par le nombre de personnes interrogées. La pondération est calculée par ligne de contrôle et par demi-heure. Pour certains cas particuliers, on affine les poids par tranche de dix minutes : trafic élevé, arrivée SNCF, etc.

### 4.3 Description de l'application implémentant le modèle

Dans cette section, il est présenté comment les informations de la base de données TJRF couplées avec d'autres informations récupérées dans diverses bases de données internes à la RATP sont utilisées pour implémenter le modèle présenté dans le chapitre 3. La base de données permettant de stocker les données du modèle est présentée dans un premier temps. Ensuite les fonctionnalités que propose l'application permettant d'implémenter le modèle sont décrites. Enfin pour terminer cette section, une validation du modèle sur le réseau RATP étudié est proposée.

---

1. Le mode de rabattement représente le dernier mode de transport utilisé pour arriver à la gare ou la station de départ (Bus, Tramway, marche à pied, etc.)

2. Le mode de diffusion représente le premier mode de transport utilisé par un passager après la sortie de ce passager du réseau étudié.

### 4.3.1 La base de données du modèle

Le stockage des données est important, car il conditionne la facilité ou non d'accès aux données lors de la simulation. Le stockage des données se fait à l'aide d'une base de données de type MySQL. Ce choix a été effectué car, pour des données assez importantes en taille, les bases de données de type MySQL ont un temps de réponse réduit. De plus, en cas de besoin, il est possible d'exporter la base ou certaines de ses tables sous de multiples formats.

Comme le montre la Figure 4.1, la base de données est composée de deux principales tables autour desquelles les autres tables de la base de données sont construites : les tables Station et Ligne. En plus de son identifiant (id), la table Station est composée du champ correspondant au nom de la station et du champ Catégorie. Le champ Catégorie correspond à la capacité d'accueil d'une station. Les stations du réseau RATP sont regroupées en cinq catégories. A chaque catégorie correspond une capacité maximale d'accueil de cette dernière. Quant à la table Ligne, elle est constituée de la liste des lignes du réseau étudié. Associée à la table Ligne, la table Direction contient les directions des lignes du réseau. Pour une ligne donnée, la table Direction renseigne l'ensemble des directions de cette ligne et un identifiant du parcours que doivent emprunter les trains circulant dans une direction donnée. Le parcours des trains circulant dans une direction d'une ligne est enregistré dans la table Parcours. Un parcours est une liste ordonnée des stations formant un chemin. Il est aussi enregistré dans la table Parcours, les différents chemins entre chaque paire de stations du réseau et le temps théorique nécessaire pour parcourir ces chemins. Ces chemins entre les paires de stations sont affectés aux passagers dans la simulation pour modéliser leur parcours. Ce temps théorique est calculé en sommant le temps de parcours des liens formant ce chemin. Il est théorique parce qu'il ne prend pas en compte les conditions d'exploitation du système à une période donnée de la simulation. Pour le moment dans le modèle, on a supposé que les passagers prennent le plus court chemin en temps pour arriver à destination. Il est possible, avec la structure de la table Parcours, de construire plusieurs chemins possibles entre chaque paire de stations de telle sorte qu'on puisse choisir pour un passager un chemin plus ou moins long en temps pour simuler l'information voyageur dans le réseau comme dans [37, 36, 38]. Mais cet aspect n'est pas encore pris en compte dans la version actuelle du modèle.

La table Lien modélise le trajet en train des passagers entre deux stations adjacentes. Elle renseigne aussi la ligne à laquelle appartient un lien, la durée de parcours (en absence de perturbation) et la distance de ce lien. La table Correspondance représente la possibilité pour les passagers d'effectuer une correspondance dans une station entre deux lignes. Elle renseigne aussi la durée de la correspondance.

Dans la table Entrants\_Sortants, on trouve des informations concernant le nombre de passagers qui entrent ou sortent du système par station et par tranche horaire. Le champ Type permet de distinguer les entrants des sortants. Les informations concernant les entrants sont utilisées pendant la simulation pour injecter des passagers dans le système. Quant aux informations concernant les sortants, elles sont utilisées pour attribuer une station de destination aux passagers. En effet, par tranche horaire, la station de destination des passagers est choisie en fonction de la fréquence des sorties des passagers de la table Entrants\_Sortants : plus il y a de passagers qui sortent par une station, dans une tranche horaire, plus la probabilité de choisir cette station pour destination d'un

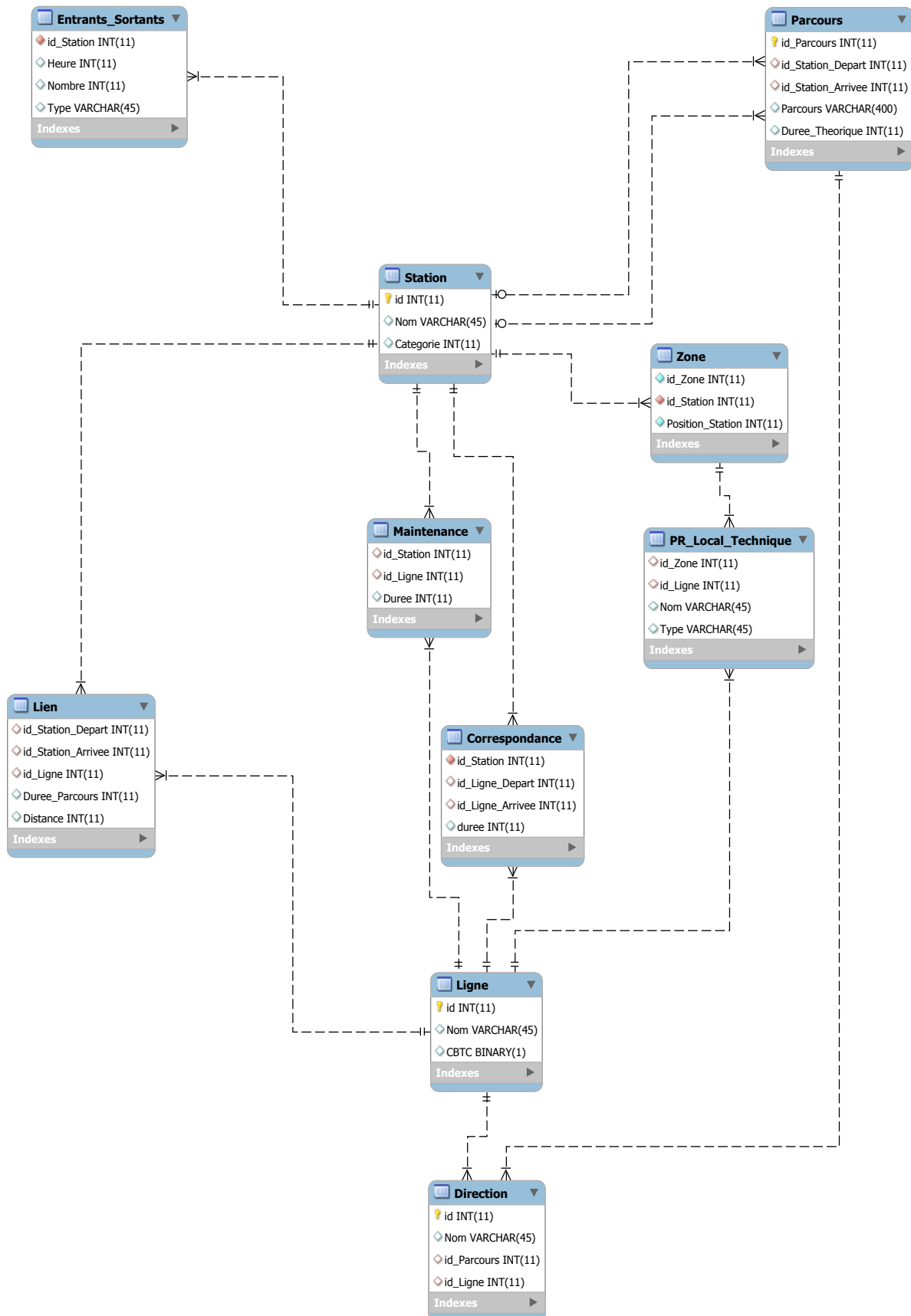


FIGURE 4.1 – Le schéma relationnel de la base de données associée à l'application.

passager est forte dans cette tranche horaire.

La table Maintenance modélise le temps nécessaire aux équipes de maintenance d'une ligne pour arriver à une station donnée. La table PR\_Local\_Technique représente les PRs et les locaux techniques du réseau. Ils sont caractérisés par la ligne à laquelle ils appartiennent, leur nom, leur type (PR ou local technique) et l'identifiant de leur zone d'influence. Cette zone d'influence est définie dans la table Zone. Dans la table Zone, une zone est représentée par une liste ordonnée de stations formant une chaîne. C'est le champ Position\_Station qui permet de modéliser l'ordre des stations qui forment cette zone.

Pour simplifier la représentation de la base de données sur la Figure 4.1, ne sont pas représentées, toutes les tables du schéma relationnel de la base de données comme par exemple :

- la table Scenario qui permet à l'utilisateur du modèle d'enregistrer (ou de charger) dans la base de données des scénarios de perturbation ;
- les tables PHT et PEF correspondant aux PHTs et aux PEFs du réseau avec la durée d'autonomie de leur groupe électrogène ;
- la table Procedure qui contient la liste des actions à exécuter pour gérer une perturbation. La durée de ces actions est aussi renseignée ;
- etc.

### 4.3.2 Description des fonctionnalités de l'application

#### 4.3.2.1 Fonctionnalités liées au stockage des données et des résultats de la simulation

Comme on l'a vu dans la section précédente, les données du modèle sont stockées dans une base de données de type MySQL dans laquelle l'application vient récupérer les informations nécessaires pour la simulation.

Le traitement des données de la base de données afin d'initialiser le modèle (construction du réseau et de ses paramètres) peut prendre du temps. Pour gagner du temps, l'utilisateur de l'application peut éviter cette phase de pré-traitement. Un réseau initialisé peut donc être enregistré (sérialisé<sup>3</sup>) dans un fichier XML. Cela permet, pour une future simulation, si les données de la base de données ne changent pas, de charger (désérialiser) un réseau initialisé et sérialisé auparavant.

On peut utiliser cette application sur n'importe quel système de transport ferroviaire de masse en modifiant les données de la base de données mais en gardant la structure de cette dernière. On peut aussi utiliser cette application après des travaux dans un réseau (construction de gares, Ajout/suppression de tronçons de voies, etc.), en modifiant la base de données selon ces travaux afin d'analyser l'impact de ces travaux sur la résilience du réseau.

Afin de consulter et/ou d'analyser les résultats d'une simulation, ces résultats sont accessibles

---

3. En informatique, la sérialisation est un processus visant à coder l'état d'une information qui est en mémoire sous la forme d'une suite d'informations plus petites (dites atomiques) le plus souvent des octets voire des bits. L'activité symétrique, visant à décoder cette suite pour créer une copie conforme de l'information d'origine, s'appelle la désérialisation.

dans un fichier Excel à la fin de la simulation.

#### 4.3.2.2 Description de l'interface graphique de l'application

La Figure 4.2 présente l'interface graphique de l'application. Cette application est développée en utilisant le langage de programmation C# dans la suite de logiciels de développement Visual Studio 2012.

Tout en haut de cette interface, on trouve les paramètres qui permettent de gérer la simulation :

- La durée de l'observation.  
Cette durée est par défaut de 24 heures. Elle est fixée par l'utilisateur et peut être de plus d'une journée.
- Le pas de temps de la simulation.  
Ce pas de temps correspond à  $\Delta t$  dans l'algorithme 2. Sa valeur peut être modifiée par l'utilisateur.
- La date du début de la simulation.  
Elle est fixée à 4h et ne peut pas être modifiée par l'utilisateur. Elle est fixée à 4h parce qu'à cette heure les trains et les passagers ne circulent pas encore dans le réseau. Ceci permet de tenir compte de la dynamique du système dès le début de la journée d'exploitation du réseau que l'on veut simuler.
- La possibilité de charger un réseau initialisé et stocké dans un fichier XML (la désérialisation présentée dans la section 4.3.2.1).

La zone Scénario de l'interface graphique donne à l'utilisateur la possibilité de construire un scénario de perturbation. Elle est composée de trois principaux onglets. L'onglet "Augmentation du temps de parcours et/ou de correspondance" permet d'augmenter le temps de parcours des trains sur une ligne, entre deux stations adjacentes ou dans une zone donnée. Il permet aussi d'allonger le temps de correspondance des passagers dans une station à un moment donné pendant la simulation en spécifiant l'heure du début et de fin de cette perturbation. Cet allongement du temps de correspondance peut modéliser la présence des travaux dans une station par exemple.

L'onglet "Reduction de capacité" permet d'augmenter ou de diminuer la capacité d'accueil des trains sur une ligne pendant une période de temps donnée. On peut aussi utiliser cet onglet pour modéliser l'arrêt total du trafic sur une ligne ou dans une zone du réseau, soit en choisissant la ligne sur laquelle on veut arrêter le trafic, soit en choisissant les arcs définissant cette zone.

Ces deux premiers onglets permettent de modéliser des conséquences d'une ou des perturbations sur le sous-système de transport sans pour autant spécifier la composante défaillante. Il est donc important de spécifier, dans ce cas, l'heure du début et de fin de la perturbation. Dans le troisième onglet ("Perturbations sur les composantes"), l'utilisateur peut simuler la défaillance d'une ou de plusieurs composantes du réseau (les onglets à gauche de la Figure 4.2) en spécifiant uniquement l'heure du début de la perturbation. Dans ce cas, l'application ira charger dans la table Procedures de la base de données, les actions à exécuter lors de la défaillance de ces composantes et aussi la

durée de ces actions.

Les scénarios de perturbation créés dans la zone Scénario de l'interface graphique apparaissent dans la zone "Liste des perturbations créées" où l'on peut aussi enregistrer ces scénarios dans la base de données. Enfin, les scénarios enregistrés dans la base de données sont chargés dans la zone "Liste des scénarios enregistrés".

### 4.3.3 Validation du modèle sur le réseau étudié

Le réseau étudié dans le cadre de cette thèse est une partie du réseau de transport de Paris exploitée par la RATP. Il est constitué de seize (16) lignes de métro et de deux (2) lignes RER. Ces lignes sont souvent connectées avec d'autres lignes exploitées par d'autres opérateurs de transport : la SNCF principalement. Dans ce cas, les passagers venant de ces lignes sont considérés dans cette étude comme venant de l'environnement du système étudié.

Sur les lignes RER du réseau étudié, des parties de ces lignes sont exploitées par la SNCF. Ces parties de ligne ne seront pas considérées dans cette étude et les passagers venant de ces parties seront considérés comme venant de l'environnement du système. Par exemple la partie du RER B du réseau de transport de Paris se trouvant au nord de la GARE DU NORD est exploitée par la SNCF. Par conséquent, les passagers venant du nord de Paris et qui arrivent à la GARE DU NORD par le RER B seront considérés comme venant de l'environnement du système (c.-à-d. venant de l'extérieur du système).

Le réseau de bus n'est pas non plus pris en compte. Néanmoins, le modèle développé dans le cadre de cette étude permet de faire intervenir les bus en cas de perturbation pour contourner la zone de perturbation. On peut donc, dans le modèle, ramener des passagers d'une station à une autre par bus ou autres moyens de transport comme le tramway. Dans ce cas le temps de parcours entre les stations concernées et la capacité de ces moyens de transport sont estimés.

L'environnement du système est aussi constitué de la voirie menant aux différentes stations du réseau et qui permet donc aux passagers de rentrer dans le système. La Figure 4.3 présente le réseau que l'on vient de décrire et qui représente le réseau étudié.

#### 4.3.3.1 Le choix de la station de destination des passagers

Le processus d'affectation de la station de destination à un passager a été décrit de manière informelle dans la section 4.3.1. On présente formellement dans cette section ce processus aléatoire. La reproductibilité du comportement du réseau d'une simulation à l'autre est aussi discutée.

Ce processus aléatoire est basé sur les données de la table Entrants.Sortants de la base de données. Pour chaque station et dans chaque tranche horaire, la destination des passagers qui entrent dans le réseau dans cette tranche horaire est choisie de la manière suivante :

Soit  $\kappa_{s,h}$  le nombre de passagers qui quittent le réseau par la station  $s$ , dans la tranche horaire  $h$ . L'ensemble  $S$  est représenté de la manière suivante :  $S = \{s_1, \dots, s_{|S|}\}$ . Rappelons que l'ensemble  $S$  est l'ensemble des stations du réseau. On définit  $\tau$  par :

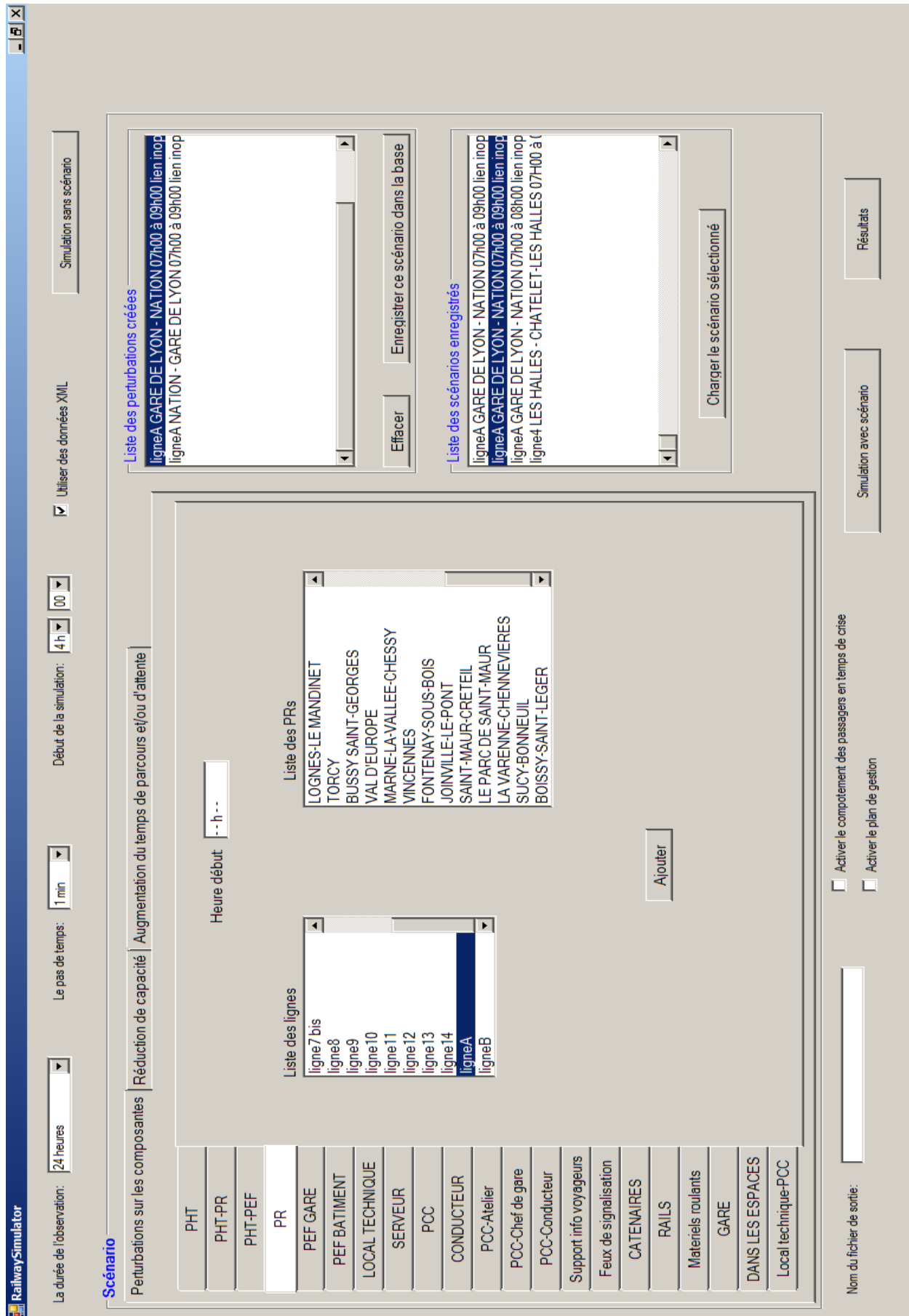


FIGURE 4.2 – L'interface graphique de l'application.



$$\tau_{i,h} = \frac{\kappa_{s_i,h}}{\sum_{i=1}^{|S|} \kappa_{s_i,h}}, \quad \forall i, \forall h$$

$\tau_{i,h}$  est le taux de sortie des passagers à la station  $s_i$  dans la tranche horaire  $h$ . Soit maintenant  $RAND \in [0, 1]$  une variable aléatoire. La station de destination,  $dest(p)$ , d'un passager  $p$  se définit comme :

$$dest(p) = \left\{ s_j \in S : \Xi_{j-1} \leq RAND < \Xi_j \right\}$$

Avec  $\tau_{0,h} = 0$ ,  $dest(p) = s_{|S|}$  si  $RAND = 1$  et  $\Xi_j = \sum_{i=0}^j \tau_{i,h} \quad \forall j \in \{0, \dots, |S|\}$ .

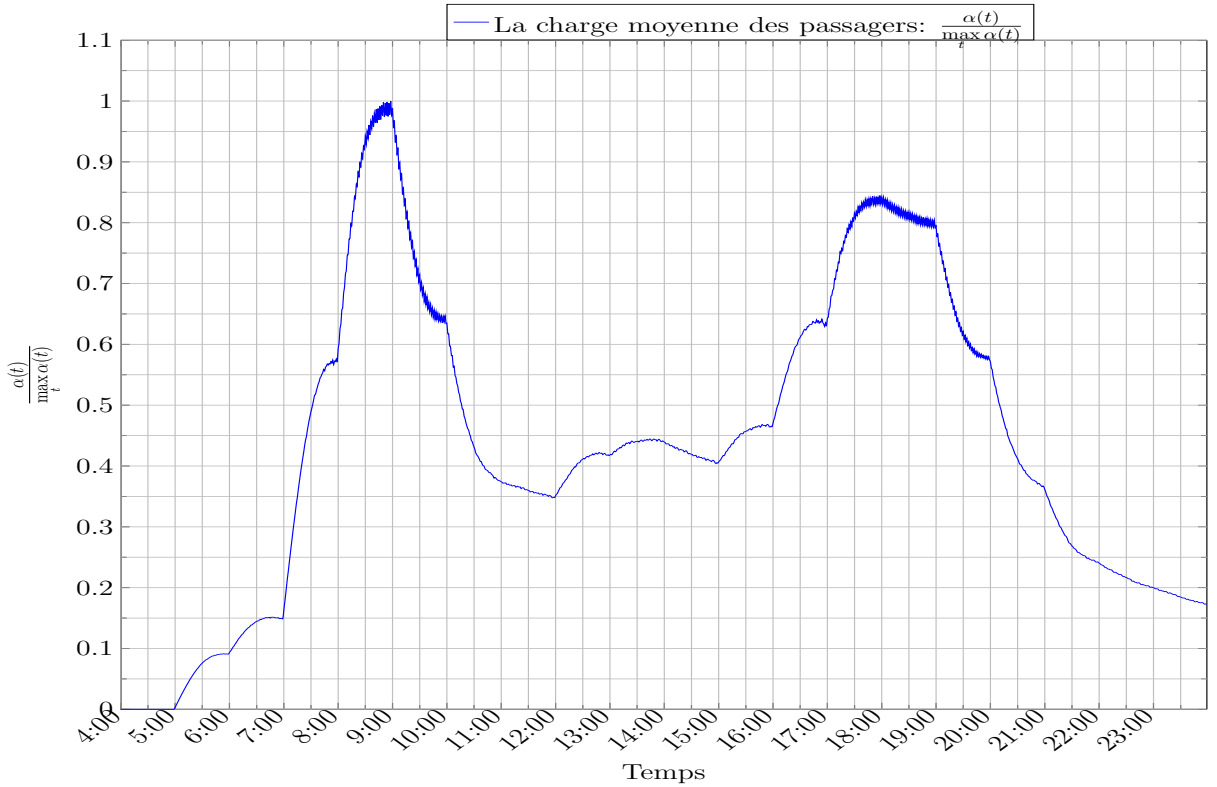


FIGURE 4.4 – La charge moyenne des passagers dans le réseau au cours du temps.

On remarque sur la Figure 4.4 les deux heures de pointe dans le réseau de transport étudié : celle du matin entre 8h et 9h30 et celle du soir entre 17h30 et 19h30. Les Figures 4.4 et 4.5 montrent que de manière statistique, d'une simulation à l'autre ce processus aléatoire ne change pas de manière significative la charge des passagers ( $\alpha(t)$ ) dans le réseau au cours du temps. En effet, la Figure 4.4 décrit la charge moyenne normalisée (ramenée entre 0 et 1) des passagers dans tout le réseau au cours du temps et la Figure 4.5, l'écart type de la charge des passagers au cours du temps ( $\sigma(t)$ ). Cet écart type décrit la manière dont la charge des passagers varie dans tout le réseau d'une simulation à l'autre. Le plus grand écart type obtenu sur la Figure 4.5 est égal à environ 0.67% de la charge moyenne des passagers correspondante. Cela nous amène à considérer dans la suite de cette étude que d'une simulation à l'autre, la charge des passagers dans tout le réseau ne varie pas au cours

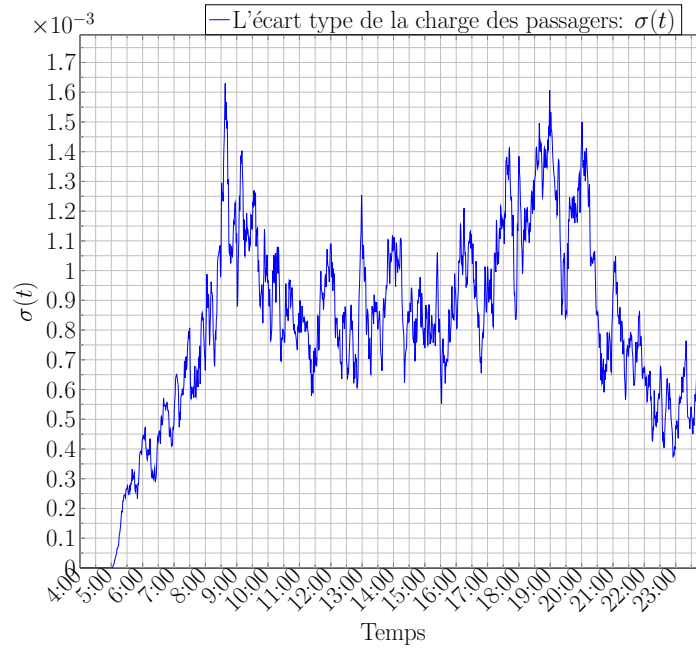


FIGURE 4.5 – L'écart type de la charge des passagers dans le réseau au cours du temps.

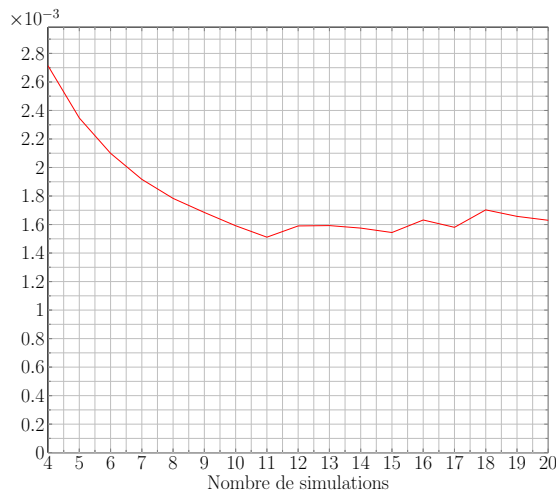
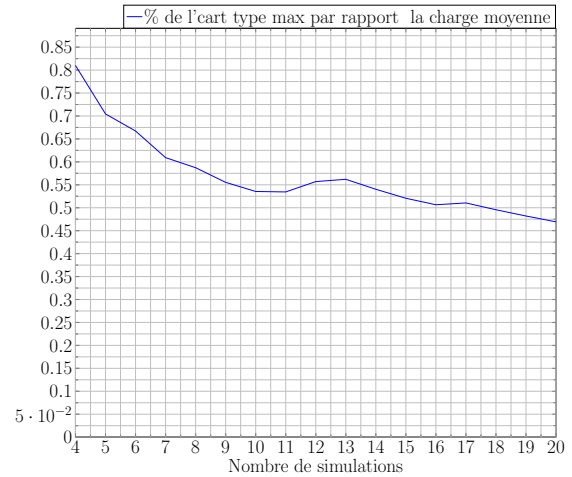
FIGURE 4.6 – La courbe de convergence de l'écart type maximal obtenu au cours du temps ( $\max_t \sigma(t)$ ) en faisant varier le nombre de simulations de quatre à vingt.

FIGURE 4.7 – La courbe de convergence du pourcentage de l'écart type maximal par rapport à la charge moyenne des passagers.

du temps. Ceci s'explique par le fait que le nombre de passagers qui entrent dans le réseau par tranche horaire est de plusieurs dizaines de milliers. Le nombre de fois que ce processus aléatoire est exécuté par tranche horaire (nombre d'événements) est aussi de plusieurs dizaines de milliers. Ce nombre important d'événements simulés favorise la convergence de la charge des passagers dans le réseau. Pour le calcul de la moyenne et de l'écart type, le nombre de simulations effectuées est de vingt. Comme on peut le voir sur la Figure 4.6, ce nombre de simulations permet de montrer la convergence de l'écart type maximal obtenu au cours du temps ( $\max_t \sigma(t)$ ) en faisant varier le

nombre de simulations de quatre à vingt. De même, sur la Figure 4.7 le pourcentage de l'écart type maximal par rapport à la charge moyenne des passagers dans le réseau converge aussi très rapidement.

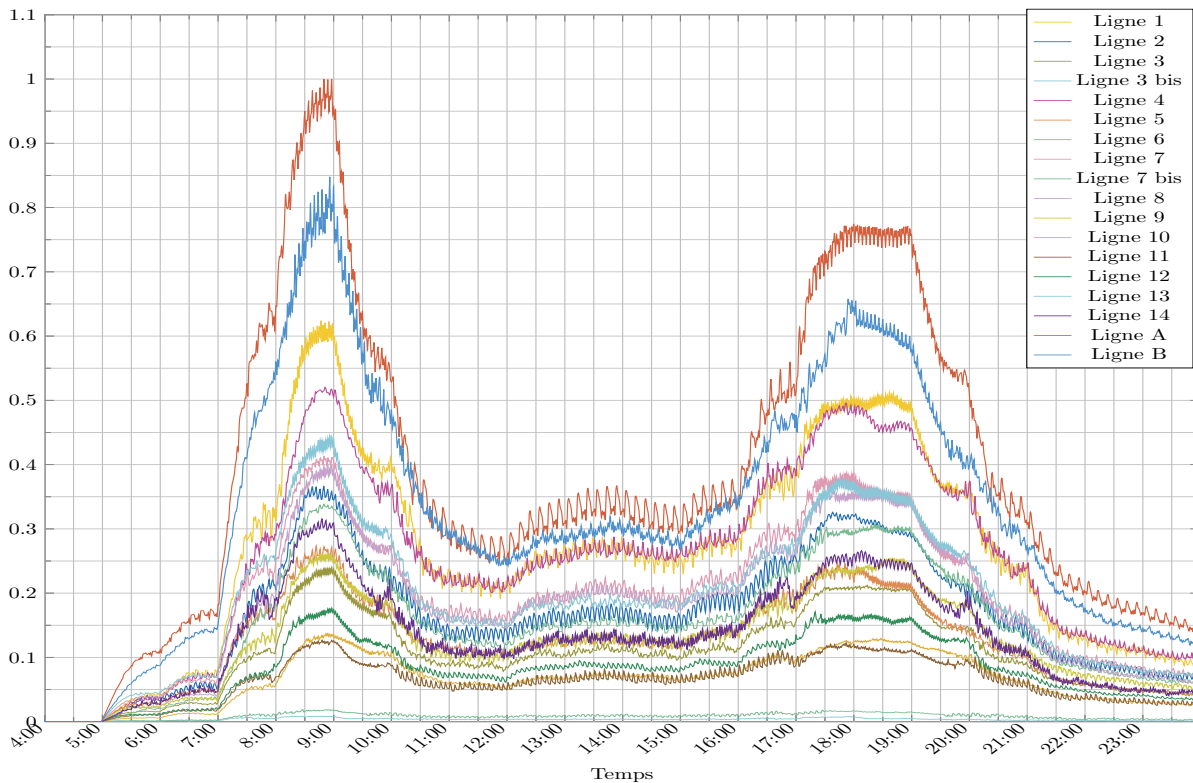


FIGURE 4.8 – La charge moyenne des passagers par ligne au cours du temps.

Un peu comme sur la Figure 4.4, la Figure 4.8 décrit la charge moyenne des passagers par ligne au cours du temps dans le réseau. Les lignes les plus chargées sur cette figure sont celles qui correspondent aux lignes les plus chargées dans la réalité. On trouve dans le Tableau 4.1 les données de la base de données TJRF relatives au nombre de passagers qui entrent dans le réseau par ligne, sur une journée. Le Tableau 4.1 contient les données de 2010 et de 2014. La version actuelle du modèle contient les données de 2010. Néanmoins, malgré l'augmentation du flux de passagers que l'on constate entre 2010 et 2014, le classement des lignes relativement au nombre de passagers qui entrent dans le réseau ne change pas considérablement.

La Ligne A est la plus chargée aussi bien dans la base de données TJRF que par rapport au flux simulé par le modèle (Figure 4.8). La Ligne B est classée cinquième (5) dans la base de données TJRF (par rapport aux entrants) mais vient en deuxième position des lignes les plus chargées. La Ligne B étant une ligne RER, les passagers restent plus longtemps sur cette ligne parce qu'elle dessert des banlieues de Paris. Aussi, le temps de parcours entre les stations des lignes RER est en général long. C'est pour ces raisons que la Ligne B vient en deuxième position des lignes les plus chargées. Le classement du flux des passagers sur les autres lignes du réseau suit le classement des entrants du Tableau 4.1.

On voit aussi, au niveau de chaque ligne du réseau, que cette charge des passagers varie au cours du temps d'une simulation à l'autre. En effet, si de manière globale cette charge ne varie

| 2010   |           | 2014   |           |
|--------|-----------|--------|-----------|
| Lignes | Entrants  | Lignes | Entrants  |
| A      | 1 034 069 | A      | 1 122 500 |
| 1      | 707 248   | 1      | 774 150   |
| 4      | 700 163   | 4      | 742 680   |
| 13     | 635 726   | B      | 666 235   |
| B      | 590 316   | 13     | 663 665   |
| 7      | 581 062   | 9      | 621 890   |
| 9      | 569 007   | 7      | 614 405   |
| 6      | 564 649   | 6      | 607 880   |
| 2      | 518 691   | 2      | 551 300   |
| 5      | 468 450   | 5      | 515 520   |
| 8      | 458 029   | 8      | 512 430   |
| 3      | 456 272   | 3      | 483 245   |
| 12     | 402 695   | 12     | 428 100   |
| 14     | 376 865   | 14     | 416 790   |
| 11     | 236 309   | 11     | 241 840   |
| 10     | 213 270   | 10     | 231 150   |
| 7 bis  | 24 747    | 7 bis  | 22 920    |
| 3 bis  | 10 826    | 3 bis  | 9 470     |

TABLE 4.1 – TJRF : les entrants par ligne

pas au cours du temps d'une simulation à l'autre comme on vient de le voir, cela ne nous permet pas de dire qu'elle ne varie pas non plus localement au niveau des lignes. Ainsi, cette charge peut localement varier considérablement tout en étant globalement invariante. Deux facteurs font varier la charge des passagers dans le réseau au cours du temps d'une simulation à l'autre :

- la variation de la station de destination des passagers d'une simulation à l'autre,
- le chemin emprunté par les passagers entre leur station d'entrée dans le réseau et leur station de sortie du réseau.

En effet, la variation importante de l'itinéraire des passagers dans le système peut faire varier considérablement la charge des passagers dans des parties du réseau et donc sur des lignes du réseau aussi. Il est donc important d'analyser aussi le comportement de la charge des passagers au niveau des lignes car généralement, la gestion d'une perturbation sur une ligne du réseau se fait de manière indépendante par rapport aux autres lignes. De ce fait, pour pouvoir comparer deux plans de gestion de perturbation d'une simulation à l'autre, il faut que la charge des passagers en absence de perturbation ne varie pas d'une simulation à l'autre.

On trouve dans le Tableau 4.2 le plus grand écart type obtenu par ligne sur la durée de la simulation et ce que représente cet écart type en termes de pourcentage de la charge moyenne des passagers. Dans ce tableau,  $\alpha_L(t)$  représente la charge moyenne des passagers sur une ligne donnée. Les données du Tableau 4.2 montrent que par rapport à la charge moyenne des passagers sur une ligne, la dispersion autour de cette moyenne n'est pas très importante (entre 1% et 5% en moyenne).

On remarque aussi que pour les lignes assez peu fréquentées (Ligne 3 bis, 7 bis, etc), cette dispersion peu augmenter jusqu'à environ 20% par rapport à la charge moyenne des passagers sur ces lignes. On note aussi que contrairement au comportement global de la charge des passagers dans le réseau, le comportement local de cette charge (au niveau des lignes) est plus sensible aux variations du flux de passagers d'une simulation à l'autre. Ainsi, comme les indicateurs de performance définis dans cette étude sont essentiellement basés sur le flux de passagers, lors d'une perturbation, le système reste localement plus sensible à cette perturbation. Cela confirme la propriété de scale-free graph des systèmes de transport qui a été présentée dans la section 2.4.2. Dans le chapitre 5 de ce document, cette propriété sera démontrée pour le réseau étudié.

| Ligne       | $\max_t \sigma(t)$ | $\frac{\max_t \sigma(t)}{\alpha_L(t)} \times 100$ |
|-------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| Ligne 1     | 0.011395068        | 5.3%                                              |
| Ligne 2     | 0.01342789         | 5.8%                                              |
| Ligne 3     | 0.012694066        | 4.87%                                             |
| Ligne 3 bis | 0.050308975        | 18.64%                                            |
| Ligne 4     | 0.009761965        | 3.62%                                             |
| Ligne 5     | 0.011271874        | 4.32%                                             |
| Ligne 6     | 0.013257968        | 5.01%                                             |
| Ligne 7     | 0.009315482        | 2.92%                                             |
| Ligne 7 bis | 0.053623233        | 25.40%                                            |
| Ligne 8     | 0.009582648        | 4.38%                                             |
| Ligne 9     | 0.013524019        | 3%                                                |
| Ligne 10    | 0.02004622         | 8.54%                                             |
| Ligne 11    | 0.025517086        | 7.76%                                             |
| Ligne 12    | 0.014258509        | 5.35%                                             |
| Ligne 13    | 0.009490822        | 2.4%                                              |
| Ligne 14    | 0.011920467        | 8.66%                                             |
| Ligne A     | 0.005760254        | 1.51%                                             |
| Ligne B     | 0.007014623        | 2.91%                                             |

TABLE 4.2 – Le plus grand écart type obtenu par ligne sur la durée de la simulation et son pourcentage par rapport à la charge moyenne des passagers correspondante.

## 4.4 Les résultats sur un scénario : la défaillance d'un poste de redressement

### 4.4.1 Impact d'une perturbation sur les indicateurs de performance du système

Dans cette section, on simule la défaillance des postes de redressement (PRs) sur une ligne du réseau étudié. La ligne sur laquelle sont simulées les perturbations est une des plus fréquentées du réseau : Ligne A sur la Figure 4.3.

Les différents scénarios de perturbation sont décrits ci-après et récapitulés dans le tableau 4.3. Dans un premier temps, on simule sur cette ligne, la défaillance d'un PR : Scénario#1. Le

| Scénario   | Description                           |
|------------|---------------------------------------|
| Scénario#1 | Défaillance d'un PR                   |
| Scénario#2 | Défaillance de deux PRs non-adjacents |
| Scénario#3 | Défaillance de deux PRs adjacents     |

TABLE 4.3 – Les différents scénarios simulés.

Scénario#2 consiste à simuler la défaillance de deux PRs mais qui ne sont pas adjacents (éloignés physiquement l'un de l'autre) sur la ligne considérée. En effet, la Figure 3.7 et dans le graphe  $G^{En}$  définissant le sous-système d'énergie montrent qu'il n'y a pas de liens physiques (arêtes/arcs) entre les PRs du réseau. L'adjacence de deux PRs signifie que ces deux PRs se suivent sur la ligne considérée c'est le cas du Scénario#3. L'heure du début de ces perturbations est fixée à 07h00.

Définissons formellement les indicateurs de performance du système. La charge des passagers sur une ligne en fonction du temps  $t$  est définie comme :

$$\begin{aligned}
 P_L(t) &= 1 - \frac{\alpha_{L,d}(t) - \alpha_L(t)}{C_L(t) - \alpha_L(t)} \\
 &= \frac{C_L(t) - \alpha_{L,d}(t)}{C_L(t) - \alpha_L(t)}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Où  $C_L(t)$  est la capacité de la ligne  $L$ . La capacité d'une ligne est le nombre maximal de passagers que cette ligne peut contenir à un instant  $t$ . Elle est calculée en sommant la capacité des stations et des trains se trouvant sur cette ligne. La capacité d'une station correspond à sa capacité d'accueil. Elle se calcule en utilisant le champ *Categorie* de la table *Station* dans la base de données du modèle. Le nombre maximal de trains qui peuvent circuler sur cette ligne a donc aussi été estimé.  $\alpha_{L,d}(t)$  est le nombre de passagers sur la ligne  $L$  à l'instant  $t$  pendant la perturbation et  $\alpha_L(t)$ , le nombre de passagers sur la ligne  $L$  à l'instant  $t$  en absence de perturbation.

D'une manière générale, la performance d'un système diminue pendant une perturbation. Or, les systèmes de transport de masse sont caractérisés par l'augmentation de la charge des passagers dans le système pendant une perturbation.  $P_L(t)$  modélise bien un indicateur de performance des systèmes de transport de masse (basé sur la charge des passagers) qui diminue lors d'une perturbation.

Le retard cumulé des passagers dans le système à l'instant  $t$ ,  $D(t)$ , est modélisé par :

$$D(t) = \frac{\vartheta(t)}{\vartheta_d(t)} \tag{4.2}$$

$\vartheta(t)$  (resp.  $\vartheta_d(t)$ ) est le temps passé par l'ensemble des passagers dans le système à l'instant  $t$ , en absence de perturbation (resp. pendant une perturbation).

Voyons maintenant la pertinence des deux indicateurs qui viennent d'être définis. Il est à noter que le retard des passagers,  $D(t)$ , ne permet pas d'avoir des détails sur les performances locales

(au niveau des lignes, des stations, etc.) du système. En effet, un passager peut prendre plusieurs lignes ou passer par plusieurs stations lors de son trajet. Il est alors impossible d'avoir des détails sur le retard cumulé des passagers par ligne ou même par station. En revanche avec la charge, il est possible de quantifier cette performance par ligne ou par station. Cela peut être considéré comme un signal faible et donc alerter les gestionnaires de crise lorsque cet indicateur dépasse un seuil. Pendant une perturbation, les passagers peuvent être amenés à changer d'itinéraire, et donc à changer de ligne. La charge des passagers permet dans ces conditions d'estimer la redistribution, sur les autres lignes, des passagers impactés par cette perturbation. Lors d'événements de grande ampleur comme des matchs de football, des concerts, etc. le système de transport de masse peut être amené à prendre en charge des passagers supplémentaires. Dans ces conditions, la charge des passagers est naturellement plus importante qu'en temps normal. La charge des passagers n'est donc plus pertinente pour estimer l'impact de cette soudaine montée de charge sur la performance du système. Le retard cumulé des passagers permet dans cette situation d'estimer l'impact de cette soudaine montée de charge sur le temps de trajet des passagers habituels du réseau. On voit donc clairement la pertinence de chacun des deux indicateurs de performance du système que l'on vient de définir formellement.

Les indicateurs de résilience du système sont naturellement définis par rapport aux indicateurs de performance du système (Equations 4.1 et 4.2). L'indicateur de résilience du système lié à la charge des passagers est défini par :

$$R_{P_L} = \frac{\int_0^T (P_L(t)) dt}{T} \quad (4.3)$$

En supposant que  $T = N \cdot \Delta t$ , on a :

$$R_{P_L} \simeq \frac{\sum_{i=1}^N (P_L(i)) \Delta t}{T} \quad (4.4)$$

De même pour le retard cumulé des passagers, on a :

$$R_D = \frac{\int_0^T (D(t)) dt}{T} \quad (4.5)$$

$$\simeq \frac{\sum_{i=1}^N (D(i)) \Delta t}{T} \quad (4.6)$$

$\Delta t$  est le pas de temps. Dans notre modèle, il est fixé à 1. En effet, comme le temps de parcours en train entre deux stations du réseau (de  $s$  à  $s'$ ) peut être inférieur à une minute, si l'on veut prendre en compte le départ des trains en  $s$  et l'arrivée de ces derniers à  $s'$ , on doit prendre  $\Delta t$  inférieur à un. Aussi dans le modèle, pour ne pas trop allonger la durée d'exécution des scénarios, le temps de parcours en train des arcs est en minutes. Cela veut dire que lorsque l'on a un temps de parcours en nombre décimal, il est automatiquement arrondi au plus petit entier qui lui est supérieur. C'est pour ces raisons que l'on a fixé la valeur de  $\Delta t$  à un. La Figure 4.9 montre la

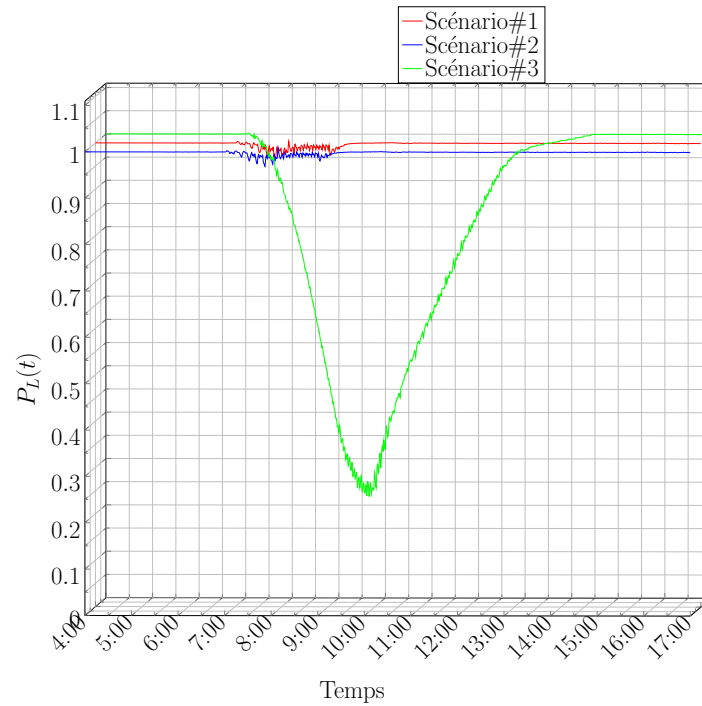


FIGURE 4.9 – La charge des passagers au cours du temps sur la ligne impactée.

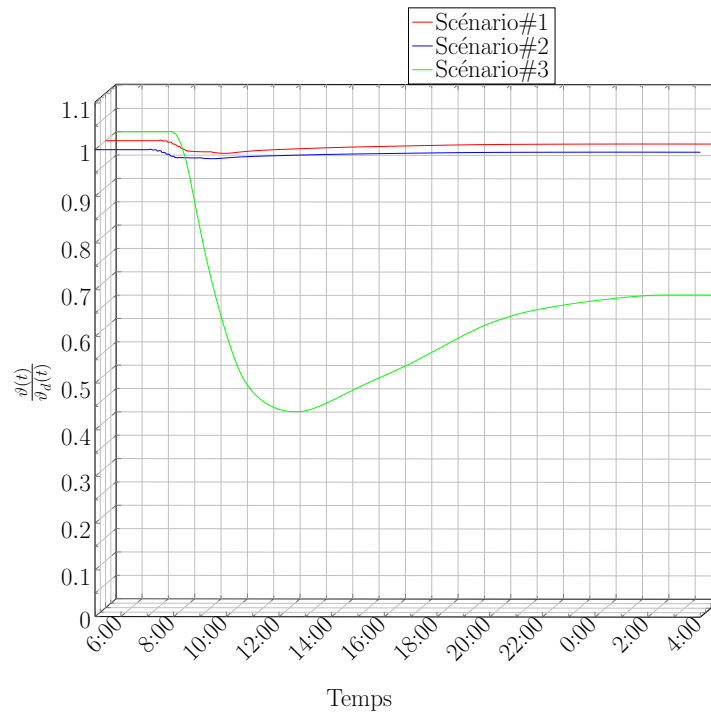


FIGURE 4.10 – Le retard cumulé des passagers au cours du temps sur la ligne impactée.

courbe représentative de la charge des passagers au cours du temps sur la ligne impactée en simulant les scénarios #1, #2 et #3 du Tableau 4.3. Lorsque quelques postes de redressement (PRs) sont défaillants sur une ligne, si ces quelques PRs ne sont pas adjacents, ces défaillances n'impactent pas beaucoup la performance du système. Et ce, quelque soit leur position sur la ligne. Pour les

scénarios de perturbation #1 et #2, la résilience du système par rapport à la charge des passagers,  $R_{PL}$ , est de 0.999 et 0.997 respectivement. Pour le Scénario#3,  $R_{PL}$ , est de 0.91. La durée de la simulation pour ces scénarios est :  $T = 24$  heures. Le Tableau 4.4 récapitule ces résultats.

|          | scenario#1 | scenario#2 | scenario#3 |
|----------|------------|------------|------------|
| $R_{PL}$ | 0.999      | 0.997      | 0.91       |

TABLE 4.4 – Les valeurs de  $R_{PL}$  pour les scénarios considérés

Lorsqu'un ou deux PRs non-adjacents sont défaillants dans une zone, les trains continuent de circuler dans cette zone mais diminuent leur vitesse. C'est pour cette raison que  $R_{PL}$  est proche de 1 pour les scénarios #1 et #2. Par contre lorsque deux PRs adjacents tombent en panne, l'énergie de traction entre ces deux PRs diminue considérablement. Dans ces conditions, le PCC arrête le trafic dans la zone concernée jusqu'à ce que les PRs soient réparés. Du fait des l'interdépendances liées au fonctionnement des trains (un train ne peut pas dépasser un autre sur une même ligne), le trafic finira par s'arrêter sur cette ligne. C'est pour cette raison que dans la plupart des système de transport ferroviaire, deux PRs adjacents ne sont pas alimentés par le même PHT. Ceci permet d'éviter que la défaillance de ce PHT n'entraîne l'arrêt du trafic sur une ligne. Afin d'être plus résilient par rapport à cette perturbation, le PCC doit mettre en place des mesures de gestion de perturbation visant à faire circuler les trains et/ou les passagers pendant cette perturbation. C'est ce qui est proposé dans la section 4.4.2.

On retrouve sur la Figure 4.10 ces mêmes résultats avec le deuxième indicateur : le retard cumulé des passagers. On remarque que par rapport à cet indicateur, le système ne retrouve pas son état initial après la perturbation (Scénario#3 de la Figure 4.10). Cela s'explique par le fait que le réseau n'a pas été modifié (pas d'ajout de liens entre les stations) et le PCC n'a pas augmenté la vitesse des trains dans le réseau pendant et après la perturbation. C'est pour cette raison que le retard pris par les passagers pendant cette perturbation ne peut pas être rattrapé.

#### 4.4.2 Impact des plans de gestion de crise sur les indicateurs de performance du système pendant une perturbation

Il est présenté dans la Figure 2.1 les capacités d'un système résilient : Absorption, Adaptation et la Rapidité. Dans cette section on prend en compte les plans de gestion correspondant à ces capacités et on évalue comment ces plans de gestion améliorent la performance du système. Le Scénario#3 est celui que l'on a simulé dans cette section. Pour chacune de ces capacités, on implémente des plans de gestion de perturbation définis ci-dessous :

- Absorption.

Pendant une perturbation, lorsque le temps d'attente d'un passager affecté par la perturbation dépasse un certain temps, noté  $\beta$  dans la suite, ce passager va essayer de changer d'itinéraire et prendre une autre ligne pour atteindre sa station de destination. Il est à noter qu'il n'est pas toujours possible à un passager de changer d'itinéraire, soit parce qu'il est en interstation, soit parce qu'il est à une station où par rapport à sa station de destination il ne lui est pas possible de faire une correspondance. On fixe à 80%, la probabilité qu'un passager change

d'itinéraire dans ces conditions. En effet, il y aura des passagers qui vont attendre la fin de la perturbation pour continuer leur trajet, soit parce qu'ils n'ont pas assez d'informations sur la perturbation ou soit parce qu'ils ne veulent pas changer d'itinéraire tout simplement.

- Adaptation.

Concernant la capacité d'adaptation simulée, il s'agit de mettre en place des services provisoires sur les parties que l'on peut encore exploiter de la ligne impactée par la perturbation. Dans cette simulation, on estime à 20 minutes, le temps nécessaire à la mise en place d'un service provisoire. Pendant ce service provisoire, le trafic est donc arrêté uniquement sur la partie de la ligne impactée par la perturbation. Dans le modèle, la position des aiguilles permettent de définir cette zone.

- Rapidité.

Ce plan de gestion consiste à mobiliser les moyens autour des PRs défaillants afin de diminuer le temps de réparation de ces derniers.

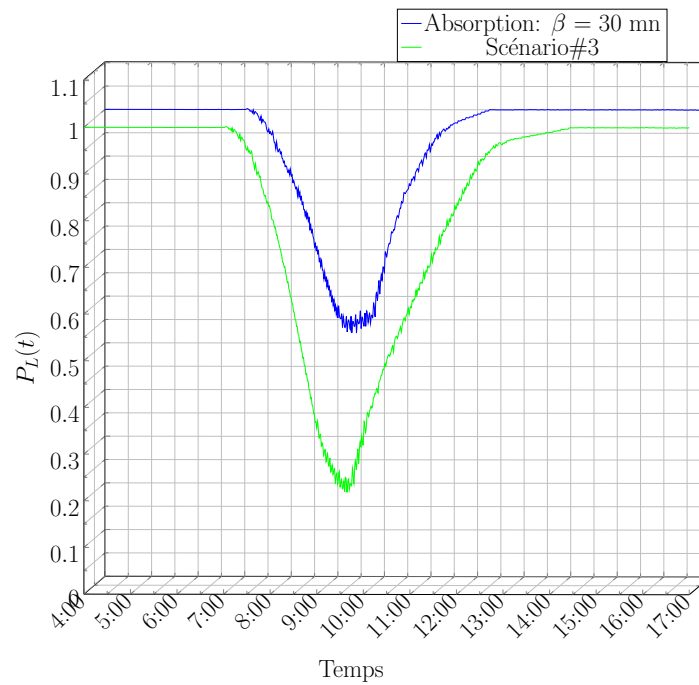


FIGURE 4.11 – Absorption - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée.

La Figure 4.11 montre l'impact du plan de gestion concernant l'Absorption sur la performance du système en prenant  $\beta = 30$  minutes. Par rapport au Scénario#3, la mesure liée à la capacité d'absorption du système permet d'améliorer la résilience du système  $R_{P_L}$  de 0.91 à 0.958. Lorsque l'on considère la mesure liée à la capacité d'adaptation du système, la résilience du système  $R_{P_L}$  a été amélioré de 0.91 à 0.956, Figure 4.12. Quant à la Rapidité, on a fait varier le temps de réparation des PRs. On remarque que plus le temps de réparation des PRs diminue, plus le système est résilient ( $R_{P_L}$  augmente), Figure 4.13.

En comparant la variation de la robustesse du système au sens de Bruneau et al. [29] ( $\min_t \{P_L(t)\}$ ) à celle de la résilience ( $R_{P_L}$ ) lorsque le temps de réparation augmente, la résilience décroît plus lentement que la robustesse, Figure 4.14. Ceci s'explique par le fait que pour les longs temps de

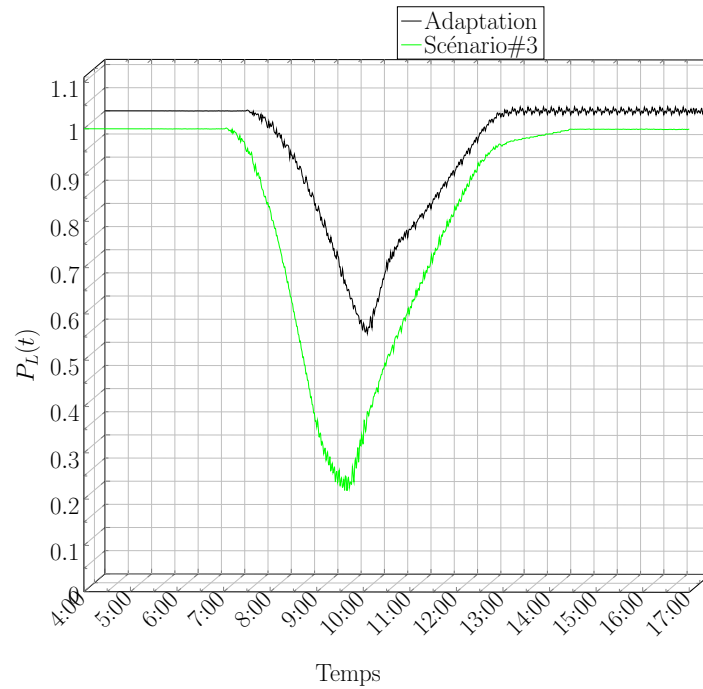


FIGURE 4.12 – Adaptation - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée.

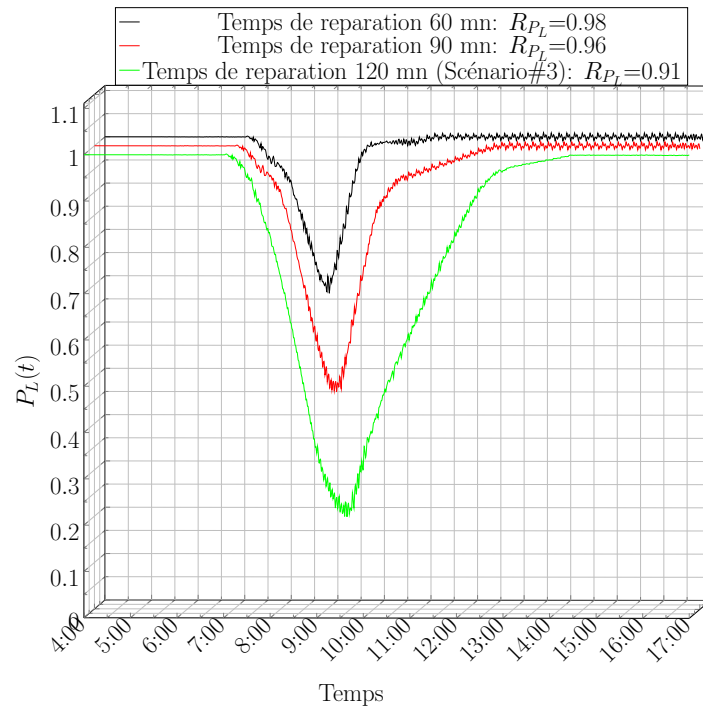


FIGURE 4.13 – Rapidité - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée.

réparation, même si pendant la perturbation la charge des passagers augmente considérablement sur la ligne perturbée, après la perturbation la capacité et la fréquence des trains permettent au système de retrouver rapidement ses performances initiales. Cela ne dégrade pas beaucoup la résilience du système  $R_{P_L}$ .

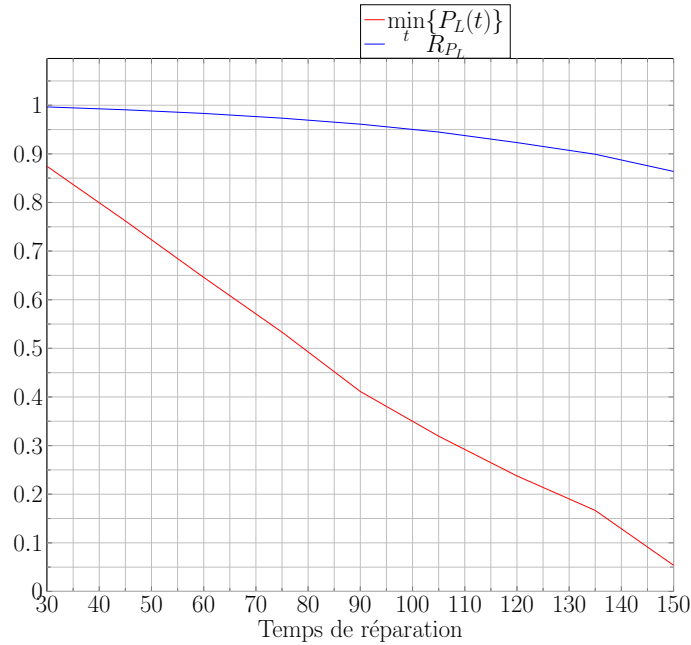


FIGURE 4.14 – Relation entre  $\min_t\{P_L(t)\}$  et  $R_{P_L}$  lorsque le temps de réparation augmente.

On analyse maintenant la relation entre la charge de passagers sur la ligne perturbée ( $P_L(t)$ ) et la capacité de cette ligne ( $C_L(t)$ ). Avec cet analyse, on peut caractériser la relation de dépendance des deux indicateurs de performance : la charge des passagers et le retard cumulé de ces derniers. A partir de l'équation 4.1, on a :

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial P_L(t)}{\partial t} \right|_{\alpha_{L,d}(t), \alpha_L(t)} &= \frac{\frac{\partial C_L(t)}{\partial t} \cdot (C_L(t) - \alpha_L(t)) - \frac{\partial C_L(t)}{\partial t} \cdot (C_L(t) - \alpha_{L,d}(t))}{(C_L(t) - \alpha_L(t))^2} \\ &= \frac{\frac{\partial C_L(t)}{\partial t} \cdot (\alpha_{L,d}(t) - \alpha_L(t))}{(C_L(t) - \alpha_L(t))^2} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Lorsqu'il y a une perturbation dans le système, la charge de passagers pendant cette perturbation est toujours supérieure à la charge de passagers en absence de perturbation :  $\alpha_{L,d}(t) > \alpha_L(t)$ . Par conséquent, on a :

$$\frac{\alpha_{L,d}(t) - \alpha_L(t)}{(C_L(t) - \alpha_L(t))^2} > 0$$

On peut donc dire que  $\frac{\partial P_L(t)}{\partial t}$  et  $\frac{\partial C_L(t)}{\partial t}$  sont de même signe et donc  $P_L(t)$  et  $C_L(t)$  ont le même sens de variation. Cela signifie que l'on peut améliorer la résilience du système par rapport à la charge des passagers en augmentant la capacité de la ligne. Néanmoins, augmenter seulement la capacité de la ligne ne permet pas aux passagers de circuler rapidement dans le système pendant une perturbation. Les passagers vont s'accumuler sur la ligne mais cette accumulation ne va pas dégrader l'indicateur de performance sur la charge des passagers du fait de l'augmentation de la capacité de la ligne. Cette accumulation entraîne donc la dégradation de l'indicateur de performance sur le retard cumulé des passagers. Pour améliorer de manière globale la résilience du système, tous les indicateurs du système doivent être pris en compte de manière simultanée. Par ailleurs, on note aussi que lorsque l'on diminue  $\alpha_{L,d}(t)$  dans l'équation 4.1, on augmente ainsi la résilience du système

par rapport à la charge des passagers. La diminution de  $\alpha_{L,d}(t)$  signifie que l'on fluidifie le flux de passagers dans le système et par conséquent, on diminue le retard cumulé des passagers. L'analyse faite dans ce paragraphe montre clairement que les indicateurs de performance du système proposés dans ce modèle ne sont pas indépendants. La recherche d'indicateurs indépendants est un réel sujet de recherche que l'on retrouve souvent dans la littérature [97, 62, 20].

En combinant les différents plans de gestion de perturbation implémentés dans cette section, on retrouve les conditions presque habituelles lorsque ce type de perturbation se produit dans un système ferroviaire de masse. Dans ces conditions,  $R_{P_L}$  passe de 0.91 (Scénario#3) à 0.98, Figure 4.15. Le Tableau 4.5 récapitule tous ces résultats.

|           | Absorption<br>( $\beta = 30$ mn) | Adaptation | Temps de réparation |       |        | Combinaison des plans<br>Temps de réparation = 90 mn |
|-----------|----------------------------------|------------|---------------------|-------|--------|------------------------------------------------------|
|           |                                  |            | 60 mn               | 90 mn | 120 mn |                                                      |
| $R_{P_L}$ | 0.958                            | 0.956      | 0.98                | 0.96  | 0.91   | 0.98                                                 |

TABLE 4.5 – Les valeurs de  $R_{P_L}$  pour différents plans de gestion de perturbation.

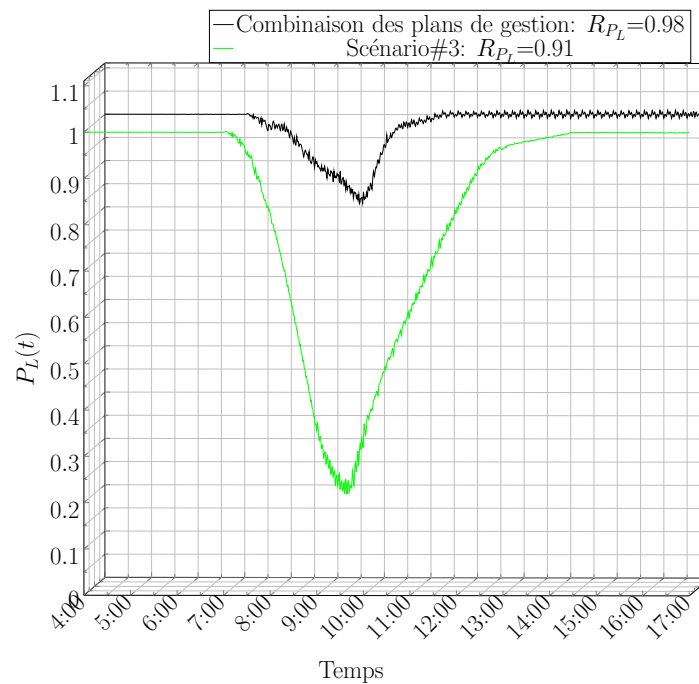


FIGURE 4.15 – Combinaison des capacités d'absorption ( $\beta=30$  mn), d'adaptation et de rapidité (temps de réparation = 90 mn) - la charge des passagers au cours du temps sur la ligne perturbée.

## 4.5 Classement des stations du réseau selon l'impact de leur défaillance sur les indicateurs de résilience

La résilience du système par rapport à la charge des passagers ( $R_{P_L}$ ) est utilisée dans cette section pour classer les stations du réseau. Ce classement permet d'identifier les stations du réseau dont leur défaillance impacte considérablement la résilience du système. La défaillance d'une station

est modélisée par l'arrêt du trafic sur les arcs incidents à cette station. La période de défaillance est de 7h00 à 9h00 pour chaque station.

| Classement | Stations                     | $R_{P_L}$ |
|------------|------------------------------|-----------|
| 1          | CHATELET-LES HALLES          | 0,9491    |
| 2          | NATION                       | 0,9583    |
| 3          | GARE DE LYON                 | 0,9650    |
| 4          | CHARLES DE GAULLE-ETOILE     | 0,9659    |
| 5          | LA DEFENSE                   | 0,9734    |
| 6          | DENFERT ROCHEREAU            | 0,9750    |
| 7          | GARE DU NORD                 | 0,9761    |
| 8          | BASTILLE                     | 0,9763    |
| 9          | SAINT MICHEL                 | 0,9784    |
| 10         | PALAIS ROYAL-MUSEE DU LOUVRE | 0,9787    |
| 11         | REUILLY-DIDEROT              | 0,9787    |
| 12         | GARE DE L'EST                | 0,9802    |
| 13         | MONTPARNASSE                 | 0,9805    |
| 14         | CONCORDE                     | 0,9806    |
| 15         | CHAMPS ELYSEES-CLEMENCEAU    | 0,9809    |
| 16         | VINCENNES                    | 0,9811    |
| 17         | HOTEL DE VILLE               | 0,9820    |
| 18         | REPUBLIQUE                   | 0,9825    |
| 19         | STRASBOURG-SAINT DENIS       | 0,9826    |
| 20         | SAINT-LAZARE                 | 0,9827    |

TABLE 4.6 – Classement des stations selon l'impact de leur défaillance sur  $R_{P_L}$

Comme on peut le voir dans le Tableau 4.6, les stations dont leur défaillance dégrade considérablement  $R_{P_L}$  sont généralement les stations des lignes A, B, 1 et 4. Ces lignes sont les plus chargées du réseau. Sur ces lignes, les stations les plus sensibles correspondent très souvent à celles qui ont une correspondance avec au moins une autre ligne. Des stations qui n'appartiennent pas à ces lignes font aussi partie de cette liste : SAINT-LAZARE, REPUBLIQUE, etc. On note deux principales raisons à cela :

- un nombre important de lignes passent par cette station (comme REPUBLIQUE) ;
- cette station est dans une zone d'activité (comme SAINT-LAZARE).

Comme on peut le voir sur la Figure 4.16 la grande majorité de ces stations se trouve dans Paris intra-muros.

Nous avons vu dans la section 2.4.1.2, l'approche proposée par Barker et al. [16] pour classer les composantes d'un système selon leur sensibilité aux perturbations. Cette approche ne tient pas en compte les interdépendances des composantes du système. Néanmoins, elle intègre les caractéristiques des composantes par rapport à une perturbation. Ces caractéristiques se modélisent par la densité de probabilité modélisant l'état de la composante considérée, en fonction du temps, suite à une perturbation. Cet aspect n'est pas pris en compte dans la version actuelle de notre



FIGURE 4.16 – Cartographie des stations les plus sensibles du réseau.

modèle. Une discussion sur une manière d'intégrer dans notre modèle cet aspect probabiliste du comportement des composantes du système est faite dans la section 4.7.

## 4.6 Proposition d'une démarche d'évaluation et de maintien d'un niveau de résilience du système

On propose dans cette section, une procédure de mise en place d'une démarche de résilience de bout en bout dans un système de transport ferroviaire de masse. Cette démarche est basée sur l'utilisation du modèle développé dans le cadre de cette étude. On rappelle que la résilience de bout en bout d'un système consiste à :

- déterminer, mobiliser et mettre en place des solutions nécessaires pour atteindre un niveau de résilience désiré (allocation de résilience) ;
- mettre en place des procédures pour maintenir ce niveau de résilience tout au long de la vie du système.

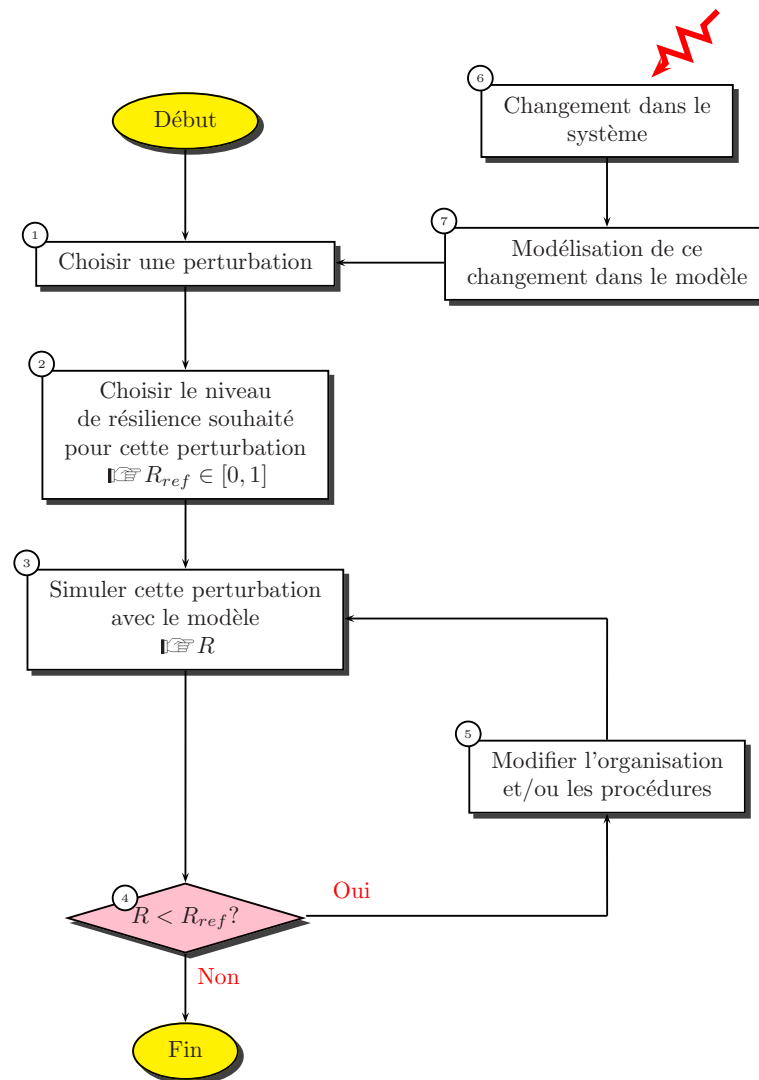


FIGURE 4.17 – Procédure de mise en place d'une démarche de résilience de bout en bout.

La Figure 4.17 présente cette démarche. La première phase de cette démarche consiste, pour une perturbation donnée, à mettre en place des solutions nécessaires pour que le système atteigne le niveau de résilience souhaité. Pour ce faire, on choisit une perturbation (①) puis le niveau de résilience souhaité pour cette perturbation (②). L'étape ③ consiste à utiliser le modèle proposé dans cette étude pour simuler cette perturbation. Si la valeur de l'indicateur de résilience retournée par le modèle est inférieure au niveau de résilience souhaité pour cette perturbation, on modifie l'organisation et/ou les procédures (⑤) puis on passe à l'étape ③. Dans l'étape ⑤, on peut aussi modifier les composantes des sous-systèmes du modèle autres que le sous-système d'organisation. On réitère les étapes ③, ④ et ⑤ jusqu'à ce que la valeur de l'indicateur de résilience pour cette perturbation atteigne le niveau de résilience souhaité.

La deuxième phase consiste, après une modification des composantes du système (construction d'une station, de ligne, changements dans l'organisation, etc), à modéliser ces changements dans le modèle (⑦) et à passer à l'étape ① de la première phase de la démarche. Ainsi, on garantit, pour une perturbation donnée, un niveau de résilience pour le système tout au long de la vie de ce dernier. Notons qu'une loi, une norme, une réglementation, etc. peuvent faire évoluer le niveau de résilience du système face à une perturbation. Il convient, dans ce cas, d'utiliser cette démarche pour mettre à jour le niveau de résilience du système.

## 4.7 Discussions sur le modèle proposé et ses limites

Tout au long de ce chapitre, le seul scénario de perturbation simulé est la défaillance d'un poste de redressement. Ceci soulève naturellement une question : ce modèle peut-il gérer tous les types d'événements comme des catastrophes naturelles ou des attaques terroristes ? Dans la colonne "Descriptions" des Tableaux 3.4 à 3.9, il est décrit comment la défaillance d'une composante du système est prise en compte dans le modèle ; i.e. en modélisant les conséquences de la perturbation sur le fonctionnement du sous-système de transport. Par conséquent, pour modéliser des perturbations complexes il faut donc modéliser les conséquences de ces perturbations sur les composantes du système de transport ferroviaire de masse. Ceci requiert donc un expert décrivant ces conséquences ou des modules complémentaires modélisant ces conséquences. Avec ces modules complémentaires, on peut non seulement estimer les conséquences de ces perturbations sur les composantes du système mais aussi l'impact de ces perturbations sur les passagers. Cela permet alors la quantification de l'indicateur de performance qui est le nombre de passagers arrivés à destination (section 3.4.1). Toutefois, comme on l'a mentionné dans la section 1.3.3, il existe des scénarios de perturbation pour lesquels le modèle proposé dans cette étude ne s'applique pas. Il s'agit des scénarios de perturbation pour lesquels les autorités publiques prennent la main sur la gestion de la perturbation.

Concernant la modélisation de l'aspect organisationnel, on n'a pas pris en compte le comportement des acteurs lorsque ces derniers exécutent des tâches ou des procédures pendant une perturbation. On a juste considéré ces procédures et leur durée d'exécution. Lors d'une perturbation, le stress lié à cette dernière, le nombre d'années d'expérience qu'ont les acteurs par rapport aux procédures, leur niveau d'entraînement, etc. sont des facteurs qui conditionnent la façon dont cette perturbation est gérée. Ces facteurs conditionnent non seulement la capacité des acteurs à mener à bien les procédures, mais aussi le temps d'exécution de ces procédures. Pour que le modèle soit plus réaliste, il est nécessaire de prendre en compte le comportement des acteurs face à une perturbation. Cet aspect organisationnel peut donc être modélisé en introduisant de l'incertitude dans le temps de réparation des composantes du système par exemple. Cette incertitude peut correspondre à la probabilité qu'une procédure prenne un certain temps. Modéliser cette probabilité nécessite d'avoir des données sur les conditions dans lesquelles les acteurs opèrent. Dans cette étude on a choisi de ne faire qu'une analyse de sensibilité des temps de réparation des composantes du système (Figure 4.13 et 4.14).

La modélisation du comportement des acteurs n'est pas la seule manière d'introduire de l'incertitude dans le modèle. On a vu dans la section 4.3.3.1 le processus aléatoire permettant de choisir

une station de destination aux passagers. Il existe d'autres manières d'introduire de l'incertitude dans le modèle. On a supposé dans cette étude l'état binaire des composantes du système (les composantes fonctionnent ou sont défectueuses). Une manière de modéliser l'état d'une composante est de le modéliser par une variable aléatoire dont chaque valeur puisse correspondre à un impact sur le système. Cet impact peut être estimé par un expert du système de transport ferroviaire de masse. L'incertitude peut aussi être introduite via les données d'entrée du modèle ou les paramètres du modèle : le nombre de passagers qui entrent dans le système, le temps de réparation des composantes du système ou encore le choix de l'itinéraire d'un passager qui peut être un choix aléatoire parmi un ensemble d'itinéraires.

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une implémentation du modèle décrit dans le chapitre 3 est faite. Ce modèle est ensuite appliqué à une partie du réseau de transport ferroviaire de masse de Paris.

En utilisant les indicateurs de performance définis dans le chapitre 3, on a développé puis quantifié des indicateurs de résilience du système. Ces indicateurs permettent d'estimer la résilience du système face à une perturbation et surtout le niveau d'efficacité des plans de gestion de perturbation. Les perturbations considérées dans ce chapitre consistent à simuler la défaillance d'un ou de plusieurs PRs. Le modèle permet bien évidemment de prendre en compte d'autres types de perturbations. Pour chaque capacité d'un système résilient (Absorption, Adaptation, Rapidité), un plan de gestion de perturbation a été implémenté et simulé. L'efficacité de ces plans de gestion de perturbation a aussi été démontrée sur le réseau étudié.

L'implémentation puis la simulation du modèle ont permis d'avoir des données sur les conditions d'exploitation du système face à une perturbation. Dans le chapitre suivant, ces données sont utilisées pour développer des indicateurs topologiques du réseau de transport qui prennent en compte ses conditions d'exploitation. Ceci permet de classer les composantes du système de manière à ce que les gestionnaires de perturbation puissent concentrer leurs efforts sur les composantes les plus sensibles aux perturbations et par conséquent, améliorer la résilience du système. Une comparaison de ce classement avec le classement des stations du système de la section 4.5 est aussi faite.



## Chapitre 5

# Intégration des conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques d'un système de transport

### 5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, on a proposé un modèle de quantification de la résilience d'un système de transport ferroviaire de masse. A partir de ce modèle, on a élaboré un outil d'aide à la décision qui permet d'évaluer la résilience du système face à une perturbation. Cet outil fournit aussi les conditions d'exploitation du système qui vont être utilisées dans ce chapitre pour construire d'autres indicateurs de performance du système. Ces nouveaux indicateurs de performance permettent par la suite de classer les composantes du système selon leur sensibilité aux perturbations. Ainsi, pour améliorer la résilience du système, la robustesse des composantes les plus sensibles aux perturbations peut être renforcée ou bien plus de moyens autour de ces composantes sensibles peuvent être mobilisés pendant la gestion d'une perturbation.

Bien souvent, l'étude de la performance d'un système de transport porte sur les indicateurs topologiques de performance de ce système [76, 18, 47]. Comme on a pu le voir dans les chapitres précédents, le fonctionnement d'un système de transport ferroviaire est basé sur les interactions entre les acteurs et les éléments techniques qui forment le système, voir la section 2.2.1. Ainsi, lorsque l'on évalue la performance de ce système, il est nécessaire de considérer non seulement la topologie du réseau mais aussi l'organisation autour de ce système. L'organisation autour du système de transport ferroviaire dans ce chapitre se traduit par les conditions d'exploitation de ce système pendant la durée de l'observation :

- les heures de départ et le temps de trajet des trains dans le réseau,
- le flux des passagers dans le réseau.

Dans ce chapitre, une approche visant à introduire les conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques de performance d'un système de transport ferroviaire de masse est présentée. Les indicateurs topologiques sur lesquels on a travaillé sont : le plus court chemin moyen et la centralité d'intermédierité (betweenness centrality en anglais).

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. La section 5.2 décrit comment le temps est intégré aux indicateurs topologiques en définissant des graphes dynamiques et les indicateurs topologiques liés à ces graphes. La section 5.3 décrit comment les conditions d'exploitation sont prises en compte dans les indicateurs de performance qui sont proposés dans ce chapitre. Une application de cette approche à une partie du réseau de Paris est faite dans la section 5.4. Enfin, la section 5.5 conclue ce chapitre.

## 5.2 Définition des graphes dynamiques et des indicateurs topologiques de performances correspondants

Le trajet d'un passager dans un système de transport ferroviaire dépend des conditions d'exploitation à l'heure à laquelle ce passager effectue son trajet. C'est pour cette raison que les indicateurs de performance de ce système doivent intégrer la dépendance intrinsèque du système au temps. Pour intégrer le temps dans les indicateurs de performance, on utilise les graphes dynamiques.

### 5.2.1 La définition d'un graphe dynamique

On reprend ici une définition des graphes dynamiques que l'on trouve dans la littérature [107, 34]. On définit un graphe dynamique de la manière suivante :  $\mathcal{G} = (V, A, \mathcal{T}, \rho, \zeta)$ .

$$V := \{\text{l'ensemble des nœuds du réseau}\}$$

$$A := \{\text{l'ensemble des arcs du réseau}\}$$

Soit  $T$  la durée de l'observation. On définit  $\mathcal{T}$  comme :  $\mathcal{T} := \{0, \Delta t, 2.\Delta t, \dots, N.\Delta t = T\}$  où  $\Delta t > 0$  est le pas de temps.

$\rho$  représente la fonction d'activation d'un arc  $a \in A$  à l'instant  $t \in \mathcal{T}$ . Un arc  $a = (v, v')$  est activé à l'instant  $t$  si l'arc  $a$  est considéré comme appartenant au réseau à l'instant  $t$ . Dans le cas contraire, cet arc n'est pas considéré dans le réseau. On a :

$$\begin{aligned} \rho : A \times \mathcal{T} &\longrightarrow \{0, 1\} \\ (a, t) &\longmapsto \rho(a, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } a \text{ est activé à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

On peut aussi étendre la définition de  $\rho$  aux nœuds de réseau.  $\zeta$  est une fonction qui représente le poids d'un arc à l'instant  $t$ . On a :

$$\zeta : \{(a, t) \in A \times \mathcal{T} : \rho(a, t) = 1\} \longrightarrow \mathbb{R}$$

$$(a, t) \longmapsto \zeta(a = (v, v'), t) = \text{Poids}_{v, v'}(t)$$

On peut aussi étendre cette définition de  $\zeta$  aux nœuds de réseau. Comme on peut le remarquer, la fonction  $\zeta(a, t)$  n'est pas définie lorsque  $\rho(a, t) = 0$ . Cela veut dire que lorsque l'arc  $a$  n'est pas disponible à l'instant  $t$ , la fonction  $\zeta$  n'est pas définie non plus pour l'arc  $a$  à cet instant là. Dans la pratique, lorsque  $\rho(a, t) = 0$ , on attribue à  $\zeta(a, t)$  une valeur très grande ( $+\infty$ ) ou très petite ( $-\infty$ ) selon le problème que l'on cherche à résoudre. Par exemple si  $\zeta(a, t)$  représente le temps de parcours de l'arc  $a$  à l'instant  $t$  et que l'on cherche le plus court chemin dans ce graphe dynamique, on pose  $\zeta(a, t) = \infty$  lorsque  $\rho(a, t) = 0$ . Ainsi comme on cherche à minimiser le temps de trajet, l'arc  $a$  ne sera pas considéré à l'instant  $t$ . Si en calculant le plus court chemin entre deux sommets du réseau, on trouve une valeur égale à  $+\infty$ , cela voudra dire qu'il n'y a pas de chemin entre ces deux sommets.

### 5.2.2 Adaptation des graphes dynamiques aux réseaux de transport ferroviaire de masse

Dans cette section, la définition des graphes dynamiques de la section 5.2.1 est adaptée aux réseaux de transport ferroviaire de masse.

Soit  $\mathcal{G} = (V, A, \mathcal{T}, \rho, \zeta)$  le graphes dynamique défini dans la section 5.2.1.  $V$ ,  $A$  et  $\mathcal{T}$  sont déjà définis dans la section 3.7.1 lorsqu'on a formellement défini le sous-système de transport. On rappelle brièvement ici leur définition :

$S = \{\text{ensemble des stations du réseau}\}$

$L = \{\text{ensemble des lignes du réseau}\}$

$= \left\{ l = \{s_1, \dots, s_k\} : s_i \in S \ \forall i \in \{1, \dots, k\} \wedge \{s_1, \dots, s_k\} \text{ est un ensemble ordonné de stations formant un ou des circuits dans } G \right\}$

$V = \{\text{ensemble des nœuds du réseau modélisant le sous-système de Transport}\}$

$= \{(s, l) \in S \times L : s \in l\}$

Un nœud de  $G$  représente le quai de la ligne  $l \in L$ , à la station  $s \in l$ . D'une manière générale, lorsqu'une ligne de métro/RER, dessert une station, il y a dans cette station deux quais correspondant à chaque direction de la ligne. Dans cette étude, pour simplifier le modèle, les deux quais d'une ligne à une station sont regroupés en un seul. On notera par  $S_v$  et  $L_v$  respectivement la station et la ligne du nœud  $v$ .

$$A = A_{train} \cup A_{cor}$$

$A_{train} = \left\{ \left( (s, l), (s', l) \right) : \text{arcs permettant aux trains de la ligne } l \text{ de circuler de la station } s \text{ à la station adjacente } s' \right\}$

$A_{cor} = \left\{ \left( (s, l), (s, l') \right) : \text{représente les arcs permettant aux passagers d'effectuer leur correspondance à la station } s \text{ entre les lignes } l \text{ et } l' \right\}$

On reprend aussi comme définition de  $\mathcal{T}$  la même que dans la section précédente.

Pour le système de transport ferroviaire étudié, la fonction d'activation  $\rho$  de l'arc  $a = (v, v')$  à l'instant  $t$  représente la possibilité pour un passager de traverser cet arc à cet instant. Elle vaut un lorsque les passagers peuvent quitter le nœud  $v$  à l'instant  $t$  pour le nœud  $v'$ . Dans le cas contraire, elle vaut zéro. Il y a deux différentes sortes d'arcs dans l'ensemble  $A$  :  $A_{train}$  et  $A_{cor}$ . Un arc  $(v, v') \in A_{train}$  est actif à l'instant  $t$  si un train quitte  $v$  à l'instant  $t$  pour  $v'$ . Pour les arcs de  $A_{cor}$ , les passagers n'ont pas besoin d'être dans un train pour pouvoir les emprunter. Par contre, des travaux dans une station peuvent rendre impossible la correspondance à cette station. On a :

$$\rho : A \times \mathcal{T} \longrightarrow \{0, 1\}$$

$$(a, t) \longmapsto \rho(a, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } ((a \in A_{cor}) \wedge (\text{un passager peut quitter } v \text{ pour } v' \text{ à l'instant } t)) \vee \\ & ((a = (v, v') \in A_{train}) \wedge (\text{un train quitte } v \text{ pour } v' \text{ à l'instant } t)) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La fonction  $\zeta$  représente le temps de parcours d'un arc à l'instant  $t$ . Elle est définie de la manière suivante :

$$\zeta : A \times \mathcal{T} \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$(a, t) \longmapsto \zeta(a, t) = \begin{cases} \delta_{v,v'}^t & \text{si } (a = (v, v') \in A_{train}) \\ \delta_{s,l,l'}^t & \text{si } a = ((s, l), (s, l')) \in A_{cor} \\ +\infty & \text{si } \rho(a, t) = 0 \end{cases}$$

Comme on va le voir dans la suite, on cherche dans cette étude le plus court chemin entre des paires de sommets. C'est la raison pour laquelle on pose  $\zeta(a, t) = +\infty$  lorsque  $\rho(a, t) = 0$  (voir la section 5.2.1).  $\delta_{s,l,l'}^t$  est le temps de correspondance à la station  $s$  entre les lignes  $l$  et  $l'$ . Il dépend entre autres du nombre de passagers dans la station  $s$  à l'instant  $t$  (heure de pointe ou heure creuse).  $\delta_{v,v'}^t$  représente le temps de parcours de  $v$  à  $v'$  à l'instant  $t$ .  $\delta_{v,v'}^t$  dépend des conditions d'exploitation dans le réseau avant et après  $t$ . On reviendra en détail sur cet aspect dans la section 5.3.

Définissons des indicateurs topologiques de performance dans un graphe dynamique. Ces indicateurs correspondent à une adaptation des indicateurs de mêmes noms dans les graphes statiques [23, 76, 8, 48, 47]. Les indicateurs topologiques de performance dans les graphes dynamiques étudiés dans ce chapitre sont [87, 22, 107] :

- la centralité d'intermédiarité (betweenness centrality en anglais),
- le plus court chemin moyen (average shortest path en anglais).

Ces indicateurs sont basés sur la notion du plus court chemin dans les graphes. Il est donc nécessaire de formellement définir la notion du plus court chemin dans les graphes dynamiques avant de définir ces indicateurs. Ces définitions sont génériques et ne prennent pas en compte l'adaptation de la définition des graphes dynamiques aux systèmes de transport ferroviaires de masse faite dans cette section.

### 5.2.3 La notion du plus court chemin dans les graphes dynamiques

On commence par définir un chemin dans un graphe dynamique. Un chemin dans un graphe dynamique est considéré comme un flux qui se déplace d'un nœud à un autre à des dates bien précises. La notion de chemin dans un graphe dynamique est donc étroitement liée à la notion de voyage et donc aussi à la date de départ et d'arrivée à chaque nœud du parcours.

Un  $k$ -uplet  $\mathcal{C} = \{(a_1, t_1, t'_1), (a_2, t_2, t'_2), \dots, (a_k, t_k, t'_k)\} \in (A \times \mathcal{T} \times \mathcal{T})^k$  est un chemin dans  $\mathcal{G}$  si et seulement si  $\mathcal{C}$  vérifie les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \text{le } k\text{-uplet } \{a_1, a_2, \dots, a_k\} \text{ est un chemin dans } G = (V, A) & (5.1a) \\ t_i < t'_i, \forall i \in \{1, \dots, k\} & (5.1b) \\ t'_i \leq t_{i+1}, \forall i < k & (5.1c) \end{cases}$$

Un triplet  $(a_i, t_i, t'_i) \forall i \in \{1, \dots, k\}$  constituant le chemin  $\mathcal{C}$  veut dire que le flux définissant ce chemin commence le parcours de l'arc  $a_i = (v, v')$  à la date  $t_i$  par le nœud  $v$  et arrive à l'autre extrémité de  $a_i$  (le nœud  $v'$ ) à la date  $t'_i$ . L'équation 5.1a définit un chemin dans le graphe statique  $G = (V, A)$  à partir duquel on a défini  $\mathcal{G}$ . Un chemin dans  $G = (V, A)$  est un  $k$ -uplet  $\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$  qui vérifie les conditions suivantes :

$$\{\forall i < k, \exists u \in V : a_i = (v, u) \wedge a_{i+1} = (u, v') \text{ avec } a_i \text{ et } a_{i+1} \in A\}$$

L'équation 5.1b impose un temps de parcours sur l'arc  $a_i \forall i \in \{1, \dots, k\}$  et l'équation 5.1c contrôle l'ordre dans lequel le flux définissant  $\mathcal{C}$  parcourt les arcs qui forment ce chemin.

De plus, si  $a_1 = (v, u)$  et  $a_k = (u', v')$  alors  $\mathcal{C}$  est un chemin qui lie  $v$  à  $v'$  et sera noté  $\mathcal{C}(v, v')$ . On désigne aussi par  $\text{depart}(\mathcal{C}(v, v'))$ , la date à partir de laquelle le flux commence à parcourir le chemin  $\mathcal{C}(v, v')$  et par  $\text{arrive}(\mathcal{C}(v, v'))$  la date d'arrivée au nœud  $v'$ .  $\text{depart}(\mathcal{C}(v, v'))$  n'est pas forcément la date de départ du flux définissant  $\mathcal{C}$  au nœud  $v$  car si l'arc  $a_1$  n'est pas activé à cette date, ce flux ne peut pas quitter  $v$  à cette date non plus.  $\text{depart}(\mathcal{C}(v, v'))$  est la date à laquelle on cherche à aller de  $v$  à  $v'$ . On a donc,  $\text{depart}(\mathcal{C}(v, v')) = t_1$  et  $\text{arrive}(\mathcal{C}(v, v')) = t'_k$ .

D'une manière générale, la recherche du plus court chemin dans un graphe dynamique se fait soit en minimisant la distance parcourue par le flux définissant ce chemin, soit en minimisant le temps de parcours de ce chemin [107, 118]. On a vu dans la section 3.3 que la définition donnée dans cette étude à la performance du système de transport de masse est basée sur le service proposé aux passagers. Pour un passager, peu lui importe la distance parcourue pour arriver à destination. Il cherche à atteindre la station de destination le plus rapidement possible. C'est donc pour cette raison que l'on ne considère ici que la recherche du plus court chemin qui minimise le temps de parcours du flux définissant ce chemin.

Étant donné un instant  $t$ , le plus court chemin de  $v$  à  $v'$  à partir de  $t$ ,  $\Delta^t(v, v')$ , est défini de la

manière suivante :

$$\Delta^t(v, v') = \left\{ \mathcal{C}(v, v') \subset \overline{\mathcal{C}}(v, v') : (\text{depart}(\mathcal{C}(v, v')) \geq t) \wedge \right. \\ \left. \left( \text{arrive}(\mathcal{C}(v, v')) - \text{depart}(\mathcal{C}(v, v')) \leq \text{arrive}(\mathcal{C}'(v, v')) - \text{depart}(\mathcal{C}'(v, v')) \right) \right. \\ \left. \forall \mathcal{C}'(v, v') \in \overline{\mathcal{C}}(v, v') \right\}$$

Avec  $\overline{\mathcal{C}}(v, v')$ , l'ensemble des chemins de  $v$  à  $v'$ .

#### 5.2.4 La centralité d'intermédierité (betweenness centrality)

Soit  $\mathcal{C} = \{(a_1, t_1, t'_1), (a_2, t_2, t'_2), \dots, (a_k, t_k, t'_k)\}$  un chemin et  $a \in A$ . On dira que  $a \in \mathcal{C}$  s'il existe  $(a_i, t_i, t'_i) \in \mathcal{C}$ , avec  $i \in \{1, \dots, k\}$  tel que  $a = a_i$ . De même, soit  $v \in V$  et  $a \in A$ . On dira que  $v \in \mathcal{C}$  s'il existe  $a \in \mathcal{C}$  tel que  $v$  est une extrémité de  $a$ .

La centralité d'intermédierité d'un nœud/arc mesure la proportion des plus courts chemins entre chaque paire de nœuds dans le réseau qui passent par le nœud/arc considéré par rapport l'ensemble des plus courts chemins entre chaque paire de nœuds dans tout le réseau [107]. Cet indicateur évalue l'importance d'une composante (nœud ou arc) dans le réseau lorsque cette composante n'est pas défaillante. Dans un graphe dynamique, la centralité d'intermédierité à un instant  $t$  est définie de la manière suivante :

$$\mathcal{B}(v, t) = \sum_{\substack{u: u \neq v \\ u \in V}} \sum_{\substack{u': u' \neq u \neq v \\ u' \in V}} \frac{|\{p \in \Delta^t(u, u') : v \in p\}|}{|\Delta^t(u, u')|} \\ \mathcal{B}(a, t) = \sum_{u \in V} \sum_{\substack{u': u' \neq u \\ u' \in V}} \frac{|\{p \in \Delta^t(u, u') : a \in p\}|}{|\Delta^t(u, u')|}$$

La centralité d'intermédierité d'un nœud/arc sur toute la durée de l'observation,  $T$ , est :

$$\mathcal{B}(v) = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{t \in \mathcal{T}} \mathcal{B}(v, t) \\ \mathcal{B}(a) = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{t \in \mathcal{T}} \mathcal{B}(a, t)$$

Rappelons que pour un ensemble  $x$ ,  $|x|$  correspond sa cardinalité.

#### 5.2.5 Le plus court chemin moyen

Le plus court chemin moyen caractérise le temps moyen de trajet des passagers dans le réseau et permet donc d'évaluer la fluidité du réseau. C'est un indicateur lié à l'état global du réseau. Plus la valeur du plus court chemin moyen dans un réseau de transport de masse est petite, plus

ce réseau est performant. Le plus court chemin moyen dans un réseau est défini par :

$$\mathcal{S} = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{t \in \mathcal{T}} \left( \frac{1}{|V| \cdot (|V| - 1)} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{v': v' \neq v \\ v' \in V}} \left( arrive(\Delta^t(v, v')) - depart(\Delta^t(v, v')) \right) \right)$$

Dans un graphe dynamique il peut arriver que deux nœuds du réseau ne soient pas connectés, surtout lors des perturbations au cours desquelles le trafic est arrêté sur des parties de réseau. Le problème dans ces conditions est que si un nœud  $v'$  n'est pas atteignable à partir de  $v$  à un instant  $t$  donné, alors  $\Delta^t(v, v') = \infty$  avec la définition de la fonction  $\zeta$ . De ce fait, le plus court chemin moyen diverge [87]. Pour éviter cette divergence, un autre indicateur a été proposé à la place du plus court chemin moyen [113] : l'efficacité du réseau. L'efficacité du réseau,  $\mathcal{E}$ , est définie de la manière suivante :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{t \in \mathcal{T}} \left( \frac{1}{|V| \cdot (|V| - 1)} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{v': v' \neq v \\ v' \in V}} \frac{1}{(arrive(\Delta^t(v, v')) - depart(\Delta^t(v, v')))} \right)$$

On a alors  $\frac{1}{(arrive(\Delta^t(v, v')) - depart(\Delta^t(v, v')))} = 0$  pour deux nœuds  $v, v' \in V$  qui ne sont temporellement pas connectés. Plus la valeur de  $\mathcal{E}$  est grande plus le réseau est performant.

### 5.3 Intégration des conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques des graphes dynamiques

Le point commun entre les deux indicateurs topologiques des graphes dynamiques que l'on a défini dans la section 5.2 est le calcul du plus court chemin. De ce fait, l'intégration des conditions d'exploitation dans ces indicateurs se fera à travers l'algorithme du plus court chemin. L'algorithme du plus court chemin dans les graphes dynamiques est similaire à celui des graphes statiques [46, 53].

Avant de présenter l'algorithme du plus court chemin dans les graphes dynamiques, il est nécessaire de décrire une donnée d'entrée importante de cet algorithme : le temps d'attente et de trajet sur chaque arc  $a \in A$  du réseau, c'est-à-dire  $\delta_{v,v'}^t$  et  $\delta_{s,l,l'}$  de la fonction  $\zeta$ .

Soit  $a = (v, v') \in A$ . On définit  $D_{v,v'}(t)$  comme étant le temps nécessaire à un passager, arrivé à la station  $v$  à l'instant  $t$ , pour atteindre la station  $v'$ .  $D_{v,v'}(t)$  est composé du temps d'attente ( $Wait_{v,v'}(t)$ ) à l'instant  $t$  et du temps de trajet ( $Travel_{v,v'}(t)$ ) à l'instant  $t + Wait_{v,v'}(t)$  pour un passager qui veut atteindre  $v'$  à partir du nœud  $v$  à l'instant  $t$ . On peut remarquer ici que  $Travel_{v,v'}(t)$  correspond à  $\delta_{v,v'}^t$  de la définition de la fonction  $\zeta$ .

Pour formellement définir  $D_{v,v'}(t)$ , on se donne  $t_1, \dots, t_M$  les dates de départ des trains du nœud  $v$  au nœud  $v'$  sur toute la période de l'observation, voir la Figure 5.1. On a :

$$D_{v,v'}(t) = \begin{cases} (t_1 - t) + Travel_{v,v'}(t_1) & \text{si } t \leq t_1 \wedge (v, v') \in A_{train} \\ (t_{i+1} - t) + Travel_{v,v'}(t_{i+1}) & \text{si } t_i < t \leq t_{i+1}, \forall i \in \{1, \dots, M-1\} \wedge (v, v') \in A_{train} \\ \infty & \text{si } t > t_M \wedge (v, v') \in A_{train} \\ \delta_{s,l,l'} & \text{si } (v, v') \in A_{cor} \end{cases} \quad (5.2)$$

$(t_i - t) \forall i \in \{1, \dots, M\}, \forall t \leq t_M$  représente le temps d'attente,  $Wait_{v,v'}(t)$ , d'un passager arrivé au nœud  $v$  à l'instant  $t$  et voulant atteindre le nœud  $v'$ . Il faut remarquer ici que  $Travel_{v,v'}$  et  $Wait_{v,v'} \forall a = (v, v') \in A_{train}$  font partie des données qui modélisent les conditions d'exploitation dans le réseau. On a supposé dans la définition de la fonction  $D_{v,v'}(t)$  que pour les arcs permettant aux passagers de faire une correspondance à une station,  $a \in A_{cor}$ , la durée de la correspondance ne varie pas au cours du temps.  $D_{v,v'}(t)$  va représenter le poids de l'arc  $(v, v')$  à l'instant  $t$  dans l'algorithme du plus court chemin dans un graphe dynamique. La fonction  $D_{v,v'}(t)$  est décrite dans la Figure 5.1, pour un arc  $(v, v') \in A_{train}$ , en considérant un exemple de conditions d'exploitation. Pour un passager qui arrive au nœud  $v$  à l'instant  $t$ , le temps qu'il lui faut pour atteindre le nœud  $v'$  est son temps d'attente,  $Wait_{v,v'}(t) = t_3 - t$ , avant l'arrivée du train qui part du nœud  $v$  à la date  $t_3$ , plus le temps de parcours de l'arc  $(v, v')$ ,  $Travel_{v,v'}(t_3)$ , par ce train.

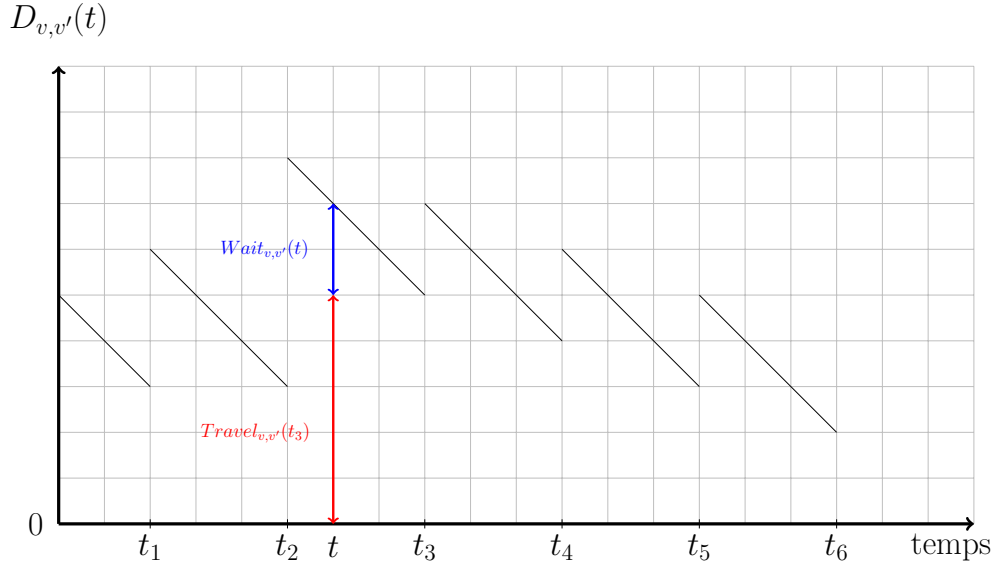


FIGURE 5.1 – Fonction représentant le poids de l'arc  $(v, v') \in A_{train}$  au cours du temps :  $t_i, \forall i \in \{1, \dots, 6\}$  représente la date de départ de chaque train du nœud  $v$  au nœud  $v'$ .

Le modèle proposé dans le chapitre 3 permet d'obtenir les dates de départ des trains aux nœuds du réseau et le temps de parcours des arcs du réseau par ces trains. Il permet aussi d'obtenir la

charge des passagers dans tout le réseau et à chaque instant de la période de l'observation. On intègre donc aussi la charge des passagers dans le poids des arcs afin que cette charge puisse être prise en compte dans les calculs du plus court chemin dans le graphe dynamique. Pour ce faire, on modifie  $D_{v,v'}(t)$  de telle sorte que plus la charge des passagers sur un arc est importante, plus cet arc sera important aux yeux de l'opérateur de transport. Ainsi, les nœuds qui forment les arcs importants aux yeux de l'opérateur de transport (les extrémités de ces arcs) seront aussi importants pour ce dernier. L'équation (5.3) décrit la nouvelle formule de  $D_{v,v'}(t)$  que l'on renomme dans la suite  $D'_{v,v'}(t)$ .

$$D'_{v,v'}(t) = D_{v,v'}(t) + \lambda \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v(t)}{Cap_v}\right) \quad (5.3)$$

$\sigma_v(t)$  est la charge des passagers au nœud  $v$  à l'instant  $t$  et  $Cap_v$  est la capacité d'accueil des passagers au nœud  $v$ .  $\lambda$  est un paramètre qui permet de pondérer la charge des passagers.  $\lambda$  permet aussi de modéliser la préférence de l'opérateur de transport entre le flux des trains ( $D_{v,v'}(t)$ ) et la charge des passagers  $\left(1 - \frac{\sigma_v(t)}{Cap_v}\right)$ . Plus il y a de passagers au nœud  $v$  plus la valeur de  $D'_{v,v'}(t)$  décroît. Plus la valeur de  $D'_{v,v'}(t)$  est petite, plus l'arc  $(v, v')$  a des chances d'appartenir aux plus courts chemins entre des paires de nœuds. Ainsi cet arc sera important aux yeux de l'opérateur de transport. Par rapport à  $D_{v,v'}$ , plus la charge des passagers est importante dans la décision de l'opérateur de transport, plus  $\lambda$  prendra une valeur petite afin que  $D'_{v,v'}(t)$  soit lui aussi petit.

Décrivons l'algorithme du plus court chemin dans les graphes dynamiques. Cet algorithme est très proche de celui de plus court chemin dans les graphes statiques où l'on attribue des étiquettes aux nœuds du graphe [46, 53]. Cet algorithme consiste, à partir d'un nœud source, à attribuer de manière itérative des étiquettes aux nœuds du graphe jusqu'à ce que tous les nœuds du graphe soient étiquetés. L'étiquette d'un nœud à un instant donné de l'algorithme correspond à la valeur du plus court chemin du nœud source à ce nœud en ne considérant que les nœuds étiquetés à cet instant. Ainsi à la fin de l'algorithme, l'étiquette d'un nœud correspond à la valeur du plus court chemin entre le nœud source et ce nœud. On a donc le plus court chemin entre le nœud source et les autres nœuds du graphe à la fin de l'algorithme.

La principale différence entre l'algorithme du plus court chemin dans les graphes dynamiques, l'algorithme 5, et celui dans les graphes statiques réside dans le calcul de  $D'_{v,v'}(t)$ . Dans l'algorithme 5,  $X_v$  correspond à l'étiquette finale donnée à un nœud  $v$ , c'est-à-dire la date d'arrivée au plus tôt au nœud  $v$  en considérant une date de départ ( $t_s$ ) à un nœud source ( $s$ ).  $X_v = NULL$  veut dire que le nœud  $v$  n'est pas encore étiqueté. L'étiquette temporaire d'un nœud est notée  $Y_v$ . La variable  $f_v$  donne le prédécesseur du nœud  $v$  dans le plus court chemin du nœud source au nœud  $v$ . Cela permet de reconstruire le plus court chemin du nœud source au nœud  $v$  à la fin de l'algorithme.  $\Gamma^+(j)$  dans l'algorithme 5 désigne les arcs qui sortent du sommet  $j$ .

## 5.4 Application au réseau ferroviaire de Paris

Dans cette section, les indicateurs topologiques présentés dans la section 5.2 et détaillés dans la section 5.3 sont appliqués au réseau ferroviaire de masse de Paris. Pour évaluer  $D'_{v,v'}(t)$  sur ce réseau, le modèle présenté dans le chapitre 3 est utilisé. Après avoir choisi puis simulé dans le modèle un scénario de perturbation, on stocke les données relatives aux conditions d'exploitation.

**Algorithme 5** : Algorithme du plus court chemin dans les graphes dynamiques

---

**Input** :  $\mathcal{G} = (V, A, \mathcal{T}, \rho, \zeta)$ ;  
 $D'_{v,v'}(t), \forall (v, v') \in A, \forall t \in \mathcal{T}$ ;  
 $s; t_s$ ;      /\* The source node and the starting time at the source node \*/  
**Output** :  $X_k, \forall k \in V; f_k, \forall k \in V$

---

```

1   $X_s \leftarrow t_s$ ;
2   $j \leftarrow s$ ;
3  foreach  $k \in \{k \in V : k \neq s\}$  do
4       $Y_k \leftarrow \infty$ ;
5       $X_k \leftarrow NULL$ ;
6       $f_k \leftarrow NIL$ ;
7  forall the  $k \in \{\Gamma^+(j) : X_k = NULL\}$  do
8       $Changed \leftarrow false$ ;
9      if  $Y_k > X_j + D'_{j,k}(X_j)$  then
10          $Y_k \leftarrow X_j + D'_{j,k}(X_j)$ ;
11          $Changed \leftarrow true$ ;
12     if  $Changed$  then
13          $f_k \leftarrow j$ ;
14 if  $\{v \in V : X_v = NULL\} \neq \emptyset$  then
15      $l \leftarrow \arg \min_u \{Y_u : X_u = NULL\}$ ;
16      $X_l \leftarrow Y_l$ ;
17      $j \leftarrow l$ ;
18     GO TO line 7;
19 else
20     STOP;

```

---

Ces données sont utilisées à la fin de la simulation pour quantifier les indicateurs topologiques que l'on a défini dans ce chapitre. On rappelle que ce modèle peut simuler aussi bien une situation nominale qu'une situation perturbée du réseau.

Avant de présenter les résultats liés aux caractéristiques dynamiques du réseau étudié, on présente dans un premier temps les caractéristiques statiques de ce réseau.

### 5.4.1 Les caractéristiques statiques du réseau

Une importante caractéristique des systèmes de transport de masse est qu'ils sont bien souvent invariants d'échelle (scale-free graph en anglais). Cette caractéristique donne aux systèmes de transport des propriétés décrites dans la suite. On montre dans la section suivante que le système de transport étudié tout au long de cette étude est invariant d'échelle.

### 5.4.1.1 Les caractéristiques de graphe invariant d'échelle du réseau étudié

Un graphe invariant d'échelle est tel que la proportion, notée  $P(x)$ , des nœuds de degré  $x$  suit une loi de puissance [8] :

$$P(x) \sim x^{-\gamma}, \text{ où } \gamma \in [2, 3] \quad (5.4)$$

Les graphes invariants d'échelle sont caractérisés par :

- La présence des nœuds d'attraction (hubs en anglais) dans ces graphes [8, 100]. Les nœuds d'attraction sont les nœuds avec beaucoup d'arêtes incidentes : en général six, voir Figure 2.7.
- Leur grande vulnérabilité aux attaques ciblées [47, 100] comme par exemple les attaques terroristes sur les nœuds d'attraction.
- Concernant les systèmes de transport, ils sont construits de manière à avoir une efficacité globale à moindre coût lorsqu'ils sont attaqués et localement, une très grande sensibilité aux pannes [76]. Cette manière de construire les systèmes de transport vient du fait qu'une perturbation en une station peut être gérée de manière à utiliser d'autres moyens de transport ou d'autres lignes afin de contourner la partie du réseau perturbée. Ce qui permet "d'isoler" facilement la zone de perturbation.

Ces propriétés des graphes invariants d'échelle contribuent à identifier les composantes importantes sur le plan topologique du réseau étudié. On utilise le test proposé dans [8, 79] pour montrer que le réseau étudié est invariant d'échelle :

- tracer l'histogramme correspondant aux fréquences des degrés des nœuds dans le réseau,
- trouver une valeur à  $\gamma$  telle que la fonction  $P(x)$  approche le mieux l'histogramme des fréquences des degrés des nœuds du réseau,
- si  $2 \leq \gamma \leq 3$  alors le réseau est invariants d'échelle.

La Figure 5.2 montre l'histogramme correspondant aux fréquences des degrés des nœuds dans le réseau et la courbe représentative de la fonction  $P(x)$  qui approche le mieux l'histogramme des fréquences des degrés (la courbe rouge). Avec  $\gamma = 2.424344$  ( $2 \leq \gamma \leq 3$ ), on montre que le réseau étudié est un graphe invariant d'échelle. La méthode utilisée pour estimer  $\gamma$  est celle de l'estimation du maximum de vraisemblance.

### 5.4.1.2 La centralité d'intermédierité et le plus court chemin moyen

Sur le plan topologique, la centralité d'intermédierité (betweenness centrality) d'un nœud  $v$  et le plus court chemin moyen ( $\mathcal{B}^s(v)$  et  $\mathcal{S}^s$  respectivement) sont définis de la manière suivante [8] :

$$\mathcal{B}^s(v) = \sum_{u \neq v \neq u'} \frac{|\omega_{u,u'}(v)|}{|\omega_{u,u'}|}$$

Où  $\omega_{u,u'}$  est l'ensemble des plus courts chemins du nœud  $u$  au nœud  $u'$  et  $\omega_{u,u'}(v)$  est l'ensemble des plus courts chemins de  $\omega_{u,u'}$  qui passent par  $v$ .

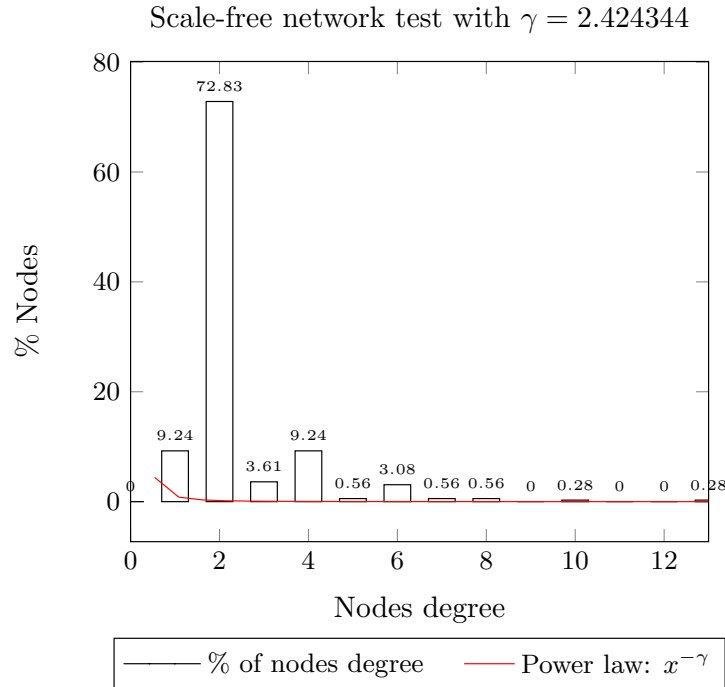


FIGURE 5.2 – Test montrant que le réseau étudié est un graphe invariant d'échelle : l'histogramme correspondant aux fréquences des degrés des nœuds et la courbe (rouge) représente la fonction  $P(x)$  avec  $\gamma = 2.424344$ .

$$\mathcal{S}^s = \frac{1}{|S| \cdot |S-1|} \cdot \sum_{u \neq u'} d(u, u')$$

Avec  $d(u, u')$  la plus courte distance entre  $u$  et  $u'$ . Comme on a supposé dans cette étude que les passagers prennent le plus court chemin pour atteindre leur station de destination,  $\mathcal{B}^s(v)$  est un indicateur qui modélise dans cette situation l'importance d'un nœud dans les chemins des passagers. Lorsque l'on enlève un nœud  $v$  du réseau,  $\mathcal{S}^s$  permet d'estimer à quel point les chemins autour du nœud  $v$  sont redondants par rapport à cette suppression du nœud  $v$ . Plus le réseau est redondant autour de  $v$ , moins le plus court chemin moyen dans le réseau augmente suite à la suppression du nœud  $v$ .

Le Tableau 5.1 montre les nœuds (stations) les plus pertinents par rapport à chaque indicateur topologique, c'est-à-dire  $\mathcal{B}^s(v)$ ,  $\mathcal{S}^s$  et les nœuds d'attraction (hubs).  $\mathcal{S}^s$  dans le Tableau 5.1 montre à quel point le nœud correspondant augmente le plus court chemin moyen dans le réseau lorsque ce dernier est supprimé du réseau.

La station CHATELET est celle qui impacte le plus le réseau relativement à ces indicateurs. Lorsque cette station n'est pas supprimée du réseau, le nombre de plus courts chemins qui passent par cette station est important ( $\mathcal{B}^s(v)$ ). Cela veut dire que les passagers passent plus souvent par cette station durant leur trajet. D'autre part, lorsque l'on supprime la station CHATELET du réseau, cette suppression augmente considérablement le plus court chemin moyen dans le réseau.

Il y a dans ce réseau, des stations comme REPUBLIQUE, STRASBOURG-S. DENIS, OPERA, etc. qui sont des nœuds d'attraction mais par rapport au trajet des passagers ne correspondent pas

à des nœuds importants. Cela veut dire que malgré que ces stations soient des nœuds d'attraction, elles ne sont pas très souvent parcourues par des plus courts chemins dans le réseau. Par exemple, le classement de la station REPUBLIQUE, qui est le deuxième nœud d'attraction du réseau, est de 78 pour  $\mathcal{B}^s(v)$  et de 44 pour  $\mathcal{S}^s$ .

La station NATION est une station souvent empruntée par les passagers (une grande valeur de  $\mathcal{B}^s(v)$ ) mais lorsqu'elle est supprimée du réseau cela n'augmente pas considérablement le plus court chemin moyen du réseau ( $\mathcal{S}^s$ ). Cela signifie que lorsque la station NATION est supprimée du réseau, les plus courts chemins, entre des paires de stations, qui passaient par la station NATION empruntent maintenant d'autres chemins. Ces nouveaux chemins ont un poids (distance) qui n'est pas si éloigné des poids des plus courts chemins lorsque la station NATION n'est pas supprimée du réseau. Après cette suppression, il existe toujours dans le réseau des chemins redondants autour de la station NATION avec des poids proches des poids des plus courts chemins d'avant la suppression de la station NATION.

Il y a aussi d'autres stations qui ont une forte influence sur l'indicateur topologique de performance  $\mathcal{B}^s(v)$  mais pas sur  $\mathcal{S}^s$  : CITE UNIVERSITAIRE, GENTILLY, LAPLACE, ARCUEIL-CACHAN et BAGNEUX. Pour ces stations, la situation est différente par rapport à la station NATION. Ces stations sont situées sur une partie de ligne (RER) où il n'y a pas de correspondance possible avec d'autres lignes. De plus, de cette partie de ligne jusqu'à la fin de cette ligne, il y a beaucoup de stations à partir desquelles les passagers ne peuvent pas non plus correspondre. Du coup, lors du calcul de  $\mathcal{B}^s(v)$ , beaucoup de plus courts chemins passent par les stations CITE UNIVERSITAIRE, GENTILLY, LAPLACE, ARCUEIL-CACHAN et BAGNEUX. C'est pour cette raison que  $\mathcal{B}^s(v)$  augmente pour ces stations. Par contre, lorsque l'on supprime ces stations elles déconnectent beaucoup de paires de stations. Et comme l'algorithme du plus court chemin lors du calcul de  $\mathcal{S}^s$  ne prend pas en compte les stations déconnectées,  $\mathcal{S}^s$  n'a pas augmenté considérablement lors de la suppression de ces stations.

Il est important de noter ici que l'on ne considère pas encore l'aspect organisationnel qu'il y a autour du système. En effet, on n'a considéré dans cette section que la topologie du réseau. Cela se traduit, entre autres, dans l'algorithme du plus court chemin par le fait que tout les arcs dans le réseau ont la même distance ou le même temps de parcours. Cela n'est évidemment pas le cas si l'on considère les conditions d'exploitation autour de ce système. Aussi, à cause des interdépendances entre les composantes du système, une perturbation dans une station entraîne probablement des perturbations dans d'autres stations. Plus particulièrement lorsque ces stations se trouvent sur une même ligne. Par exemple, une perturbation à la station NATION va probablement entraîner des perturbations à la station CHATELET (puisque ces stations sont sur la même ligne) qui est une station très sensible aux perturbations par rapport aux indicateurs topologiques. De ce fait, si l'on prend en compte les conditions d'exploitation et les interdépendances, la station NATION pourra elle aussi devenir une station sensible aux perturbations puisqu'elle est directement liée sur le plan organisationnel à la station CHATELET. C'est ce que l'on va voir dans la section suivante.

| Rang | Hubs                 |       | $\mathcal{B}^s(v)$   |           | $\mathcal{S}^s$      |        |
|------|----------------------|-------|----------------------|-----------|----------------------|--------|
|      | Station              | degré | Station              | valeur    | Station supprimée    | valeur |
| 1    | CHATELET             | 13    | CHATELET             | 74781.494 | CHATELET             | 15.080 |
| 2    | REPUBLIQUE           | 10    | GARE DE LYON         | 44895.423 | GARE DE LYON         | 13.303 |
| 3    | NATION               | 8     | GARE DU NORD         | 29053.471 | GARE DU NORD         | 12.889 |
| 4    | MONTARNASSE          | 8     | NATION               | 28593.651 | SAINT MICHEL         | 12.862 |
| 5    | SAINT-LAZARE         | 7     | SAINT MICHEL         | 28437.541 | LUXEMBOURG           | 12.590 |
| 6    | CHARLES DE GAULLE-E. | 7     | DENFERT ROCHEREAU    | 23654.945 | AUBER                | 12.587 |
| 7    | STRASBOURG-S. DENIS  | 6     | CHARLES DE GAULLE-E. | 22629.797 | PORT ROYAL           | 12.570 |
| 8    | STALINGRAD           | 6     | MADELEINE            | 22587.563 | BARBES-ROCHECHOUART  | 12.412 |
| 9    | OPERA                | 6     | PYRAMIDES            | 21684.615 | CHARLES DE GAULLE-E. | 12.346 |
| 10   | MADELEINE            | 6     | AUBER                | 19132.314 | SAINT-LAZARE         | 12.342 |
| 11   | LA MOTTE PICQUET-G.  | 6     | STALINGRAD           | 17992.454 | PYRAMIDES            | 12.332 |
| 12   | JAURES               | 6     | LUXEMBOURG           | 17038.185 | TROCADERO            | 12.305 |
| 13   | GARE DE LYON         | 6     | PORT ROYAL           | 16695.519 | MONTARNASSE          | 12.285 |
| 14   | GARE DE L'EST        | 6     | SAINT-LAZARE         | 16615.334 | ODEON                | 12.281 |
| 15   | DENFERT ROCHEREAU    | 6     | CITE UNIVERSITAIRE   | 16550     | LA MOTTE PICQUET-G.  | 12.278 |
| 16   | CONCORDE             | 6     | GENTILLY             | 15936     | STALINGRAD           | 12.269 |
| 17   | BASTILLE             | 6     | LAPLACE              | 15318     | RASPAIL              | 12.260 |
| 18   | PLACE D'ITALIE       | 5     | MONTARNASSE          | 15131.946 | INVALIDES            | 12.259 |
| 19   | GARE DU NORD         | 5     | ARCUEIL-CACHAN       | 14696     | BERCY                | 12.256 |
| 20   | VILLIERS             | 4     | BAGNEUX              | 14070     | MADELEINE            | 12.253 |

TABLE 5.1 – Classement des stations les plus sensibles aux perturbations par rapport aux indicateurs topologiques dans le réseau étudié

#### 5.4.2 Les caractéristiques dynamiques du réseau

Dans cette section, on calcule les indicateurs dynamiques du réseau et les compare aux indicateurs statiques décrits dans le Tableau 5.1. Pour calculer  $D'_{v,v'}(t)$  pour chaque arc du réseau au cours du temps, on a utilisé le modèle basé sur la simulation numérique d'un système de transport ferroviaire de masse décrit dans [6, 5]. Après avoir calculé les  $D'_{v,v'}(t)$ , ils sont utilisés dans l'algorithme 5 pour le calcul des indicateurs dynamiques du réseau.

Dans le Tableau 5.2 la centralité d'intermédiarité dans le contexte des graphes dynamiques et l'efficacité du réseau ont été calculées et classées par ordre de pertinence dans le réseau. L'efficacité du réseau,  $\mathcal{E}$ , décrit l'impact de la suppression d'une station du réseau. Dans le réseau dynamique, on ne supprime pas vraiment les stations. Supprimer une station dans ce contexte se modélise par le fait que les trains ne peuvent plus passer sur les rails adjacents à cette station. Cela entraîne l'arrêt du trafic sur les lignes qui passent par cette station à cause des interdépendances liées au fonctionnement des trains dans un système de transport ferroviaire [6, 5]. Plus la suppression d'une station impacte de manière négative l'efficacité du réseau (la station supprimée est pertinente) plus  $\mathcal{E}$  décroît. Les résultats du Tableau 5.2 correspondent à un scénario de perturbation qui consiste à supprimer des stations entre 07h00 et 09h00 du matin. Cela coïncide avec une heure de pointe dans

le réseau étudié.

| Rang | $\mathcal{B}(v)$     |             | $\mathcal{E}$        |                             |
|------|----------------------|-------------|----------------------|-----------------------------|
|      | station              | valeur      | station              | valeur ( $\times 10^{-4}$ ) |
| 1    | CHATELET             | 0.504156793 | CHATELET             | 45.49385933396              |
| 2    | GARE DE LYON         | 0.305227081 | CHARLES DE GAULLE-E. | 46.23654971422              |
| 3    | NATION               | 0.200912337 | GARE DE LYON         | 46.38134992537              |
| 4    | SAINT MICHEL         | 0.192713989 | GARE DE L'EST        | 46.48293354381              |
| 5    | GARE DU NORD         | 0.184155091 | NATION               | 46.49878564120              |
| 6    | CHARLES DE GAULLE-E. | 0.162464986 | SAINT-LAZARE         | 46.53691453883              |
| 7    | DENFERT ROCHEREAU    | 0.159897839 | GARE DU NORD         | 46.56590657132              |
| 8    | PYRAMIDES            | 0.149259411 | SAINT MICHEL         | 46.58114011615              |
| 9    | MADELEINE            | 0.14696454  | LA DEFENSE           | 46.68084487146              |
| 10   | AUBER                | 0.133072373 | PYRAMIDES            | 46.68495264101              |
| 11   | STALINGRAD           | 0.12517313  | DENFERT ROCHEREAU    | 46.72994661953              |
| 12   | SAINT-LAZARE         | 0.122839273 | MONTPARNASSE         | 46.76512642189              |
| 13   | MONTPARNASSE         | 0.119465159 | BERCY                | 46.77504129426              |
| 14   | LUXEMBOURG           | 0.110127271 | ODEON                | 46.80983335006              |
| 15   | CITE UNIVERSITAIRE   | 0.108686878 | JUSSIEU              | 46.82034666754              |
| 16   | PORT ROYAL           | 0.107569768 | VINCENNES            | 46.82988267337              |
| 17   | GENTILLY             | 0.104134647 | VILLIERS             | 46.84297203323              |
| 18   | LAPLACE              | 0.099657083 | AUBER                | 46.84735204198              |
| 19   | BERCY                | 0.097300659 | STALINGRAD           | 46.85249082873              |
| 20   | VINCENNES            | 0.096953825 | BOURG-LA-REINE       | 46.85474333362              |

TABLE 5.2 – Classement des stations du réseau selon leur pertinence par rapport aux indicateurs dynamiques.

Rappelons ici que la pertinence d'une station dans le cadre de cette étude correspond à leur degré d'impact sur la performance du système. Plus la défaillance d'une composante affecte négativement la performance du système, plus cette composante est pertinente vis-à-vis des gestionnaires de crise dans le sens où ces derniers vont devoir mobiliser plus de moyens autour de cette composante afin d'augmenter sa résilience.

En absence de perturbation dans le réseau, le classement des stations avec l'indicateur statique correspondant à la centralité d'intermédiarité,  $\mathcal{B}^s(v)$ , et celui avec l'indicateur dynamique correspondant à la centralité d'intermédiarité,  $\mathcal{B}(v)$ , sont quasiment les mêmes. Cela veut dire que l'indicateur statique,  $\mathcal{B}^s(v)$ , du système en absence de perturbation est aussi performant que l'indicateur correspondant dans un graphe dynamique ( $\mathcal{B}(v)$ ).

L'intégration des conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques devient intéressante lorsque l'on simule des perturbations dans le système [7, 4]. Lors d'une perturbation, les interdépendances et le flux des passagers dans le réseau font qu'avec les indicateurs statiques, on tire moins d'informations sur le réseau. Il y a, néanmoins, des stations qui sont pertinentes aussi bien par rapport aux indicateurs statiques que par rapport aux indicateurs dynamiques : CHATE-

LET, GARE DE LYON, GARE DU NORD, etc. Des stations comme LA DEFENSE ou GARE DE L'EST ne sont pas pertinentes avec les indicateurs statiques mais le deviennent avec les indicateurs dynamiques. Par exemple, le classement de la station LA DEFENSE avec  $\mathcal{B}^s(v)$  et  $\mathcal{S}^s$  est respectivement 45 et 228 mais elle devient la neuvième (9) station pertinente avec l'indicateur  $\mathcal{E}$ .

| Rang | Indicateur topologique station | $\mathcal{S}^s$ | Indicateur topologique modifié station | $\mathcal{E} (\times 10^{-4})$ | Le modèle station    | $R_{PL}$ |
|------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------|
| 1    | CHATELET                       | 15.080          | CHATELET                               | 45.4938                        | CHATELET             | 0.9491   |
| 2    | GARE DE LYON                   | 13.303          | CHARLES DE GAULLE-E.                   | 46.2365                        | NATION               | 0.9583   |
| 3    | GARE DU NORD                   | 12.889          | GARE DE LYON                           | 46.3813                        | GARE DE LYON         | 0.9650   |
| 4    | SAINT MICHEL                   | 12.862          | GARE DE L'EST                          | 46.4829                        | CHARLES DE GAULLE-E. | 0.9659   |
| 5    | LUXEMBOURG                     | 12.590          | NATION                                 | 46.4987                        | LA DEFENSE           | 0.9734   |
| 6    | AUBER                          | 12.587          | SAINT-LAZARE                           | 46.5369                        | DENFERT ROCHEREAU    | 0.9750   |
| 7    | PORT ROYAL                     | 12.570          | GARE DU NORD                           | 46.5659                        | GARE DU NORD         | 0.9761   |
| 8    | BARBES-ROCHECHOUART            | 12.412          | SAINT MICHEL                           | 46.5811                        | BASTILLE             | 0.9763   |
| 9    | CHARLES DE GAULLE-E.           | 12.346          | LA DEFENSE                             | 46.6808                        | SAINT MICHEL         | 0.9784   |
| 10   | SAINT-LAZARE                   | 12.342          | PYRAMIDES                              | 46.6849                        | PALAIS ROYAL         | 0.9787   |
| 11   | PYRAMIDES                      | 12.332          | DENFERT ROCHEREAU                      | 46.7299                        | REUILLY-DIDEROT      | 0.9787   |
| 12   | TROCADERO                      | 12.305          | MONTARNASSE                            | 46.7651                        | GARE DE L'EST        | 0.9802   |
| 13   | MONTARNASSE                    | 12.285          | BERCY                                  | 46.7750                        | MONTARNASSE          | 0.9805   |
| 14   | ODEON                          | 12.281          | ODEON                                  | 46.8098                        | CONCORDE             | 0.9806   |
| 15   | LA MOTTE PICQUET-G.            | 12.278          | JUSSIEU                                | 46.8203                        | CHAMPS ELYSEES-C.    | 0.9809   |
| 16   | STALINGRAD                     | 12.269          | VINCENNES                              | 46.8298                        | VINCENNES            | 0.9811   |
| 17   | RASPAIL                        | 12.260          | VILLIERS                               | 46.8429                        | HOTEL DE VILLE       | 0.9820   |
| 18   | INVALIDES                      | 12.259          | AUBER                                  | 46.8473                        | REPUBLIQUE           | 0.9825   |
| 19   | BERCY                          | 12.256          | STALINGRAD                             | 46.8524                        | STRASBOURG-ST D.     | 0.9826   |
| 20   | MADELEINE                      | 12.253          | BOURG-LA-REINE                         | 46.8547                        | SAINT-LAZARE         | 0.9827   |

TABLE 5.3 – Comparaison des différentes approches de classification des composantes

Dans le Tableau 5.3, une comparaison des trois approches permettant de classer les stations d'un système de transport ferroviaire de masse, étudiées dans ce document, est faite. On compare le plus court chemin moyen dans le réseau ( $\mathcal{S}^s$ ) modélisé par un graphe topologique, l'efficacité du réseau ( $\mathcal{E}$ ) et la résilience du système par rapport à la charge des passagers ( $R_{PL}$ ). On voit les évolutions successives du classement des stations du réseau par rapport à chacun de ces indicateurs :

- malgré que dans le classement avec l'indicateur topologique ( $\mathcal{S}^s$ ), on retrouve des stations pertinentes aux yeux des experts (CHATELET, GARE DU NORD, GARE DE LYON, etc.), il ressort néanmoins des stations moins pertinentes selon les experts (PYRAMIDES, TROCADERO, ODEON, etc.).
- le classement basé sur l'efficacité du réseau ( $\mathcal{E}$ ) ressort des stations topologiquement moins importantes mais pertinentes sur le plan organisationnel (LA DEFENSE, GARE DE L'EST, DENFERT ROCHEREAU, etc.). Néanmoins, des stations moins pertinentes sur un point de vue organisationnel persistent (PYRAMIDES, TROCADERO, ODEON, etc.).

- Enfin, le modèle développé dans cette étude donne des résultats plus cohérents avec la vision des experts.

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les indicateurs topologiques d'un réseau de transport ferroviaire de masse dans lesquels on a intégré les conditions d'exploitation. Les indicateurs topologiques étudiés sont la centralité d'intermédiarité (betweenness centrality) et le plus court chemin moyen dans le réseau. Les données sur les conditions d'exploitation sont simulées et obtenues en utilisant le modèle de simulation d'un système de transport ferroviaire de masse décrit dans [5, 6]. L'intégration des conditions d'exploitation dans les indicateurs topologiques se fait en affectant un poids aux arcs du réseau qui est une fonction des conditions d'exploitation.

Une application de ces indicateurs au réseau de transport ferroviaire de masse de Paris est alors proposée dans ce chapitre. Ces indicateurs dynamiques sont aussi comparés aux indicateurs topologiques correspondants. Cela a permis de montrer qu'en absence de perturbations, les indicateurs statiques et dynamiques donnent quasiment les mêmes résultats. Lors d'une perturbation, les interdépendances et le flux des passagers dans le réseau conduisent à des indicateurs statiques fournissant moins d'informations sur le réseau.

Pour un opérateur de transport, les activités économiques autour d'une station rentrent aussi dans les critères qui font d'une station, une station sensible ou stratégique. On entend par activités économiques autour d'une station, les quartiers d'affaires, les entreprises, les zones d'activités économiques, etc. qui sont proches de la station considérée. Ce critère n'est pas considéré dans ce chapitre. Il faut noter que ce critère ne rentre pas dans les conditions d'exploitation du système mais est déterminant dans les préférences de l'opérateur de transport surtout pendant une perturbation. Cet aspect peut être intégré dans le modèle proposé en adaptant l'équation 5.3 définissant  $D'_{v,v'}(t)$ . En effet, une manière simple de le faire est de remplacer  $\lambda$  dans l'équation 5.3 par un  $\lambda_v$  qui va dépendre de la station  $S_v$  et qui intégrerait l'importance économique de la zone dans laquelle se trouve la station  $S_v$ .



## Chapitre 6

# Conclusion générale

Ce chapitre sera consacré à une conclusion sur l'ensemble des travaux effectués dans le cadre de cette thèse. Un rappel des objectifs de cette thèse est fait dans la section 6.1 de ce chapitre. Dans la section 6.2, on décrit les travaux effectués et les principales réalisations par rapport aux objectifs de la thèse présentés dans la section 1.2. Une discussion sur les limites de l'approche proposée est faite dans la section 6.3. Il est aussi détaillé dans la section 6.3 les perspectives qu'offre ce travail de thèse pour de futurs travaux de recherche.

### 6.1 Rappel des objectifs de cette thèse

Les crises de ces dernières années ont mis en évidence les limites des méthodes de gestion de risque et/ou de crise dans les infrastructures critiques. Il est donc important de construire des infrastructures résilientes ou de rendre résilientes celles qui existent déjà. Or s'il est possible de se référer à un certain nombre de normes, pour l'évaluation et la prescription du niveau de sécurité, la normalisation et l'édification de standards en matière de résilience des systèmes, en particulier des systèmes de transports ferroviaire de masse restent encore à leurs débuts. Il est donc important de proposer des indicateurs pertinents, qui permettent de modéliser la résilience d'un système de transport ferroviaire de masse en cas d'événement majeur. L'objectif de ce projet de thèse est de fournir un cadre conceptuel et un outil de conception d'un système résilient de bout en bout (c'est-à-dire tout au long de la vie du système) dans un réseau de transport ferroviaire de masse. Cet outil devra se baser sur la dualité entre, d'une part, l'adaptabilité et la sécurité des usagers et, d'autre part, une capacité de recouvrement acceptable au regard des objectifs et finalités du système.

### 6.2 Bilan des travaux effectués dans cette étude

On propose dans cette thèse un modèle d'aide à la décision permettant de modéliser un système de transport ferroviaire de masse dans le but de quantifier la résilience de ce dernier en présence de perturbations. Ce modèle permet de simuler le fonctionnement de ce système aussi bien en temps normal que lors des perturbations dans le système.

Le modèle est principalement basé sur le flux des passagers ainsi que le flux des trains dans le réseau pendant la durée de la simulation. Ces flux sont utilisés dans le modèle pour quantifier la performance du système de transport ferroviaire de masse. Ainsi, les valeurs de ces indicateurs de performance en temps normal et en présence de perturbation sont utilisées pour quantifier les indicateurs de résilience du système.

La démarche dans cette étude a consisté dans un premier temps à analyser les indicateurs et les modèles de quantification de la résilience des systèmes sociotechniques dans la littérature, sections 2.2 à 2.4. Cette analyse a permis d'identifier les limites des approches de quantification de la résilience dans la littérature (section 2.5) et de proposer des indicateurs de performance et un modèle de quantification de la résilience en essayant d'apporter une réponse à ces limites, chapitres 3 et 4. A partir de ce modèle, une démarche d'allocation et de maintien d'un niveau de résilience d'un système de transport ferroviaire de masse est proposée, section 4.6.

La modélisation du système de transport ferroviaire de masse est faite en modélisant les différents sous-systèmes qui composent un système ferroviaire. Les composantes de ce système sont très interdépendantes. Cela nous a amené à modéliser formellement ces sous-systèmes et les interdépendances entre leurs composantes dans les sections 3.5 à 3.7. Ces sous-systèmes sont :

- le sous-système de transport constitué des éléments du système qui accueillent et transportent les passagers (gares/stations, rails, trains et leur fonctionnement) et les serveurs ;
- le sous-système d'énergie permettant d'alimenter en énergie électrique les trains, les stations, les centres de surveillance, les centres de maintenance, etc. ;
- le sous-système de télécommunication qui rend possible la circulation des flux de données pour le bon fonctionnement du système ferroviaire ;
- le sous-système d'organisation qui intervient particulièrement dans le modèle lors des perturbations afin de ramener le système à son fonctionnement nominal.

Enfin, la modélisation des perturbations et des plans de gestion de perturbation dans la section 3.8 permettent d'évaluer l'impact de ces derniers sur le système lors de la quantification de sa résilience.

On a remarqué que beaucoup d'études de la résilience des systèmes de transport portent sur l'analyse des indicateurs topologiques du réseau étudié (la centralité d'intermédiarité, le plus court chemin moyen, etc.). Dans le chapitre 5, afin de profiter des conditions d'exploitation obtenues grâce au modèle développé dans cette étude, une approche visant à introduire dans ces indicateurs topologiques de performance d'un système de transport ferroviaire de masse, les conditions d'exploitation de ce dernier est proposée et présentée.

## 6.3 Les limites et les perspectives de l'approche proposée

### Modélisation de l'information voyageurs

Dans le modèle, il est supposé que les passagers prennent le plus court chemin en temps

pour aller de leur station de départ à leur station de destination. Il n'y a pas d'alternatives possibles quant au choix de l'itinéraire d'un passager dans le réseau. Ce plus court chemin est calculé sur la base des parcours théoriques des trains dans le réseau. Cela veut dire que ce calcul ne tient pas en compte les conditions d'exploitation ou l'information que les passagers peuvent avoir sur le système à un moment donné de la vie du système ou à un instant donné de la simulation.

Effet, une ligne peut avoir une mauvaise réputation auprès des passagers quant à la fréquence des perturbations sur cette ligne. Cela peut amener les passagers de cette ligne à emprunter, si possible, d'autres itinéraires même si la ligne réputée mauvaise fait partie de leur plus court chemin. Ou encore, l'information voyageur accessible aux passagers à leur entrée dans le réseau peut amener ces derniers à changer d'itinéraire si l'information voyageurs annonce qu'il y a une perturbation sur leur itinéraire de départ.

Cette possibilité qu'un passager puisse changer d'itinéraire en fonction de la réputation d'une ligne ou de l'information voyageurs accessible aux passagers n'est pas prise en compte dans la version actuelle du modèle. Néanmoins, cette fonctionnalité peut être prise en compte en modélisant, entre chaque paire de stations, plusieurs chemins avec pour chacun le coût associé correspondant au temps de parcours de ce chemin. Ainsi, en fonction de la réputation d'une ligne, de l'information voyageurs accessible aux passagers, etc. on peut attribuer un chemin différent du plus court chemin théorique à un passager.

### **Introduction de la granularité dans les états que peuvent avoir les composantes du système**

On a supposé dans cette étude l'état binaire des composantes du système. Cela signifie que les composantes du système peuvent être soit en état de marche soit défectueuses. Dans un système de transport ferroviaire de masse, il arrive fréquemment qu'une composante soit partiellement défectueuse. Par exemple, un problème moins grave sur les freins d'un train peut entraîner une diminution de la performance de ce train (réduction de sa vitesse par exemple) et non une défaillance totale de ce dernier. Dans ces situations, une manière de modéliser l'état d'une composante est de le modéliser par une variable aléatoire de manière à ce que chaque valeur de cette variable aléatoire corresponde à un impact sur le système. Cet impact peut être estimé par un expert du système de transport ferroviaire de masse.

Enfin, on peut par la suite étudier la vulnérabilité de la composante en évaluant la probabilité que la variable aléatoire modélisant l'état de cette composante prenne une certaine valeur. Cette valeur dépend de la perturbation, de l'environnement autour de la composante, de l'état de la composante avant la perturbation, etc.

### **Autres indicateurs de performance à prendre en compte**

Dans la section 3.4, les indicateurs de performance que l'on a modélisés et quantifiés dans cette étude sont présentés. Ils ne prennent pas en compte les coûts économiques liés

aussi bien au fonctionnement nominal du système qu'aux moyens mis en place par les gestionnaires de crise pour ramener le système à la normale lors d'une perturbation. Ces coûts correspondent précisément aux coûts des pertes initiales (l'immobilisation, l'absence de services, etc.), aux coûts liés à l'effort de récupération (ressources, communication, etc.) et d'autres coûts supplémentaires (juridique, assurance, etc.). Dans le cadre de cette thèse on ne dispose pas assez d'informations liées à ces coûts pour pouvoir les modéliser et les intégrer au modèle que l'on a développé. Une évolution futur du modèle consistera donc à modéliser les coûts liés à une perturbation et aux plans de gestion de cette dernière.

Un autre indicateur que l'on n'a pas pu prendre en compte dans le cadre de ces travaux de thèse est l'impact d'une perturbation sur l'image de l'opérateur de transport auprès des passagers. La difficulté que l'on peut rencontrer en évaluant cet indicateur réside entre autres dans sa subjectivité. En effet, les attentes d'un passager quant à la performance du système de transport de masse varient d'un passager à l'autre. Par rapport à une perturbation, un des critères d'évaluation de cet indicateur peut être le nombre d'articles et de journaux qui traitent de cette perturbation.

# Bibliographie

- [1] IEEE 1474.1. IEEE standard for user interface requirements in communications-based train control (CBTC) systems, 2003.
- [2] ISO 148-1. Matériaux métalliques - essai de flexion par choc sur éprouvette charpy - partie 1 : Méthode d'essai, 2009.
- [3] NF EN 62290-2. Applications ferroviaires - systèmes de contrôle/commande et de gestion des transports guidés urbains - partie 2 : spécification des exigences fonctionnelles, Novembre 2014.
- [4] K. Adjetei-Bahun, B. Birregah, E. Châtelet, and J.-L. Planchet. Scoring stations in mass railway transportation system : case study of paris network. *RATP/MOP/STIV*, November 2015.
- [5] K. Adjetei-Bahun, B. Birregah, E. Châtelet, and J.-L. Planchet. A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 153 :1–14, 2016.
- [6] K. Adjetei-Bahun, B. Birregah, E. Châtelet, J.-L. Planchet, and E. Laurens-Fonseca. A simulation-based approach to quantifying resilience indicators in a mass transportation system. In *Proceedings of the 11th International ISCRAM Conference*, pages 75 – 79, University Park, Pennsylvania, USA, May 2014.
- [7] Kpotissan Adjetei-Bahun, Jean-Luc Planchet, Babiga Birregah, and Eric Châtelet. Railway transportation system's resilience : integration of operating conditions into topological indicators. In *IEEE/IFIP UMITS 2016 (Turkey Edition)*, Istanbul, Turkey, apr 2016.
- [8] Réka Albert and Albert-László Barabási. Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.*, 74 :47–97, Jan 2002.
- [9] Pavel Albores and Duncan Shaw. Government preparedness : Using simulation to prepare for a terrorist attack. *Computers & Operations Research*, 35(6) :1924 – 1943, 2008. Part Special Issue : {OR} Applications in the Military and in Counter-Terrorism.
- [10] Aleksandar Aleksić, Miladin Stefanović, Danijela Tadić, and Slavko Arsovski. A fuzzy model for assessment of organization vulnerability. *Measurement*, 51 :214 – 223, May 2014.
- [11] Ghanima AlSharrah. Ranking using the copeland score a comparison with the hasse diagram. *J Chem Inf Model.*, 50(5) :785- 91, 2010.

- [12] J. Ash and D. Newth. Optimizing complex networks for resilience against cascading failure. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 380 :673 – 683, 2007.
- [13] Terje Aven. Perspectives on risk in a decision-making context - review and discussion. *Safety Science*, 47(6) :798 – 806, 2009.
- [14] Terje Aven. On how to define, understand and describe risk. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6) :623 – 631, 2010.
- [15] A. Azadeh, V. Salehi, M. Arvan, and M. Dolatkah. Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps : A petrochemical plant. *Safety Science*, 68 :99 – 107, 2014.
- [16] Kash Barker, Jose Emmanuel Ramirez-Marquez, and Claudio M. Rocco. Resilience-based network component importance measures. *Reliability Engineering & System Safety*, 117 :89–97, 2013.
- [17] C. Bentz. Exact and approximate resolution of integral multiflow and multicut problems : algorithms and complexity. *4OR*, 6(1) :89–92, 2008.
- [18] B. Berche, C. von Ferber, T. Holovatch, and Yu. Holovatch. Resilience of public transport networks against attacks. *The European Physical Journal B*, 71(1) :125–137, 2009.
- [19] Alfred R. Berkeley and Mike Wallace. A framework for establishing critical infrastructure resilience goals. Technical report, National Infrastructure Advisory Council, October 2010.
- [20] Jorn Birkmann. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies : Conceptual frameworks and definitions. *Measuring vulnerability to natural hazards : Towards disaster resilient societies*, 1 :9–54, 2006.
- [21] B. Birregah, Lacleme P., and E. Châtelet. The attacker’s perspective of the shield system of a target : a framework to improve resilience assessment. In *International Conference on Emergency Preparedness (InterCEPt)- The Challenges of Mass Evacuation*, pages 13–18, 2010.
- [22] Benjamin Blonder, Tina W. Wey, Anna Dornhaus, Richard James, and Andrew Sih. Temporal dynamics and network analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(6) :958–972, 2012.
- [23] S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, and D.-U. Hwang. Complex networks : Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4 - 5) :175 – 308, 2006.
- [24] Arjen Boin and Allan McConnell. Preparing for critical infrastructure breakdowns : The limits of crisis management and the need for resilience. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 15(1) :50–59, 2007.
- [25] George A. Bonanno, Sandro Galea, Angela Bucciarelli, and David Vlahov. What predicts psychological resilience after disaster? the role of demographics, resources, and life, 2007.
- [26] John Adrian Bondy. *Graph Theory With Applications*. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, 1976.

- [27] Stephen P. Borgatti. Centrality and network flow. *Social Networks*, 27(1) :55 – 71, 2005.
- [28] Robert P Bostrom and J Stephen Heinen. Mis problems and failures : A socio-technical perspective part 1 : The causes. *MIS quarterly*, 1(3), 1977.
- [29] Michel Bruneau, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D. O’ Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, and Detlof von Winterfeldt. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4) :733–752, 2003.
- [30] Michel Bruneau and Andrei Reinhorn. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 23(1) :41 – 62, February 2007.
- [31] Pat Caldwell. Child survival : Physical vulnerability and resilience in adversity in the european past and the contemporary third world. *Social Science & Medicine*, 43(5) :609 – 619, 1996. {XIVth} International Conference on the Social Sciences and Medicine.
- [32] V. Cardellini, E. Casalicchio, and S. Tucci. Agent based modeling of web systems in critical information infrastructures. In *Proceedings of Complex Network Infrastructure Protection*, Rome, 2006.
- [33] CARRI. Definitions of community resilience. Technical report, Community and Regional Resilience Institute (CARRI), 2013. <http://www.resilientus.org/wp-content/uploads/2013/08/definitions-of-community-resilience.pdf>.
- [34] Arnaud Casteigts, Paola Flocchini, Walter Quattrociocchi, and Nicola Santoro. Time-varying graphs and dynamic networks. In Hannes Frey, Xu Li, and Stefan Ruehrup, editors, *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks*, volume 6811 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 346–359. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [35] J. Castet and J. Saleh. Survivability and resiliency of spacecraft and space-based networks : A framework for characterization and analysis, 2008 2008.
- [36] Oded Cats. An agent-based approach for modeling real-time travel information in transit systems. *Procedia Computer Science*, 32 :744 – 749, 2014. The 5th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2014), the 4th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2014).
- [37] Oded Cats and Erik Jenelius. Dynamic vulnerability analysis of public transport networks : Mitigation effects of real-time information. *Networks and Spatial Economics*, 14(3-4) :435–463, 2014.
- [38] Oded Cats and Erik Jenelius. Planning for the unexpected : The value of reserve capacity for public transport network robustness. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 2015.
- [39] Stephanie E. Chang and Masanobu Shinozuka. Measuring improvements in the disaster resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 20(3) :739 – 755, August 2004.
- [40] Eric Châtelet. *Vulnerability and Resilience Assessment of Infrastructures and Networks : Concepts and Methodologies*, pages 21–40. John Wiley & Sons, Inc., 2014.

- [41] G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, and M. Bruneau. Quantification of seismic resilience. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, pages 8 – 22, 2006.
- [42] Andrew Cox, Fynnwin Prager, and Adam Rose. Transportation security and the role of resilience : A foundation for operational metrics. *Transport Policy*, 18 :307 – 317, 2011.
- [43] J Peral de Ceballos, F Turegano-Fuentes, D Perez-Diaz, M Sanz-Sanchez, C Martin-Llorente, and JE Guerrero-Sanz. 11 march 2004 : The terrorist bomb explosions in madrid, spain - an analysis of the logistics, injuries sustained and clinical management of casualties treated at the closest hospital. *Critical Care*, 9(1) :104–111, 2005. See related commentary <http://ccforum.com/content/9/1/20>.
- [44] André de Palma and Fabrice Marchal. Real cases applications of the fully dynamic metropolis tool-box : An advocacy for large-scale mesoscopic transportation systems. *Networks and Spatial Economics*, 2(4) :347–369, 2002.
- [45] Sybil Derrible and Christopher Kennedy. Network analysis of world subway systems using updated graph theory. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2112) :17–25, 2009.
- [46] E.W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1) :269–271, 1959.
- [47] Robert Dorbritz. Assessing the resilience of transportation systems in case of large-scale disastrous events. In *Proceedings of The 8th International Conference on Environmental Engineering*, pages 1070–1076, Vilnius, Lithuania, 19-20 May 2011.
- [48] Robert Dorbritz. *Methodology for assessing the structural and operational robustness of railway networks*. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule, ETH, Zürich, 2012.
- [49] Zvi Drezner and Horst Hamacher. *Facility Location : Applications and Theory*. Springer, 2004.
- [50] Christophe Duhamel, Eric Châtelet, Andréa Cynthia Santos, and Babiga Birregah. An optimization model for the post-disaster response in terms of system resilience. *Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale (WISG13)*, 2013.
- [51] Patrice L. Engle, Sarah Castle, and Purnima Menon. Child development : Vulnerability and resilience. *Social Science & Medicine*, 43(5) :621 – 635, 1996. {XIVth} International Conference on the Social Sciences and Medicine.
- [52] Reza Faturechi and Elise Miller-Hooks. A mathematical framework for quantifying and optimizing protective actions for civil infrastructure systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(8) :572–589, 2013.
- [53] L. R. Ford and D. R. Fulkerson. *Flows in Networks*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1962.

- [54] Royce Francis and Behailu Bekera. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121 :90 – 103, 2014.
- [55] Derek Freckleton, Kevin Heaslip, William Louisell, and John Collura. Evaluation of transportation network resiliency with consideration for disaster magnitude. *91st annual meeting of the transportation research board, Washington, DC, U.S.A.*, pages 22–26, January 2012.
- [56] Michael R. Garey and David S. Johnson. *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1979.
- [57] Michael Greenberg, Paul Lioy, Birnur Ozbas, Nancy Mantell, Sastry Isukapalli, Michael Lahr, Tayfur Altiok, Joseph Bober, Clifton Lacy, Karen Lowrie, et al. Passenger rail security, planning, and resilience : application of network, plume, and economic simulation models as decision support tools. *Risk Analysis*, 33(11) :1969–1986, 2013.
- [58] Michael Greenberg, Karen Lowrie, Tayfur Altiok, Michael Lahr, Paul Lioy, and Henry Mayer. Improving resilience in rail transit corridors : Developing models for estimating the impacts of system disruptions. *TR News*, 275 :29–30, 2011.
- [59] Yacov Y. Haimes. On the definition of resilience in systems. *Risk Analysis*, 29(4) :498–501, 2009.
- [60] T. Hashimoto, D. P. Loucks, and J. R. Stedinger. Robustness of Water Resources Systems. *Water Resources Research*, 18 :21–26, February 1982.
- [61] Devanandham Henry and Jose Emmanuel Ramirez-Marquez. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering and System Safety*, 99 :114–122, 2012.
- [62] Michael Hiete and Mirjam Merz. An indicator framework to assess the vulnerability of industrial sectors against indirect disaster losses. In *International ISCRAM Conference, Gothenburg (Sweden)*. Citeseer, 2009.
- [63] C. S. Holling. *The Resilience of Terrestrial Ecosystems : Local Surprise and Global Change*, pages 292–317. W. C. Clark, and R. E. Munn, 1986.
- [64] Crawford S Holling. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4 :1 – 23, 1973.
- [65] C.S. Holling. Cross-scale morphology, geometry, and dynamics of ecosystems. *Ecological Monographs*, 62 :447–502, 1992.
- [66] Erik Hollnagel, David D Woods, and Nancy Leveson. *Resilience engineering : Concepts and precepts*. Ashgate Publishing, Ltd., 2006.
- [67] Seyedmohsen Hosseini, Kash Barker, and Jose E. Ramirez-Marquez. A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145 :47 – 61, 2016.
- [68] W.H. Ip and Dingwei Wang. Resilience evaluation approach of transportation networks. In *International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, volume 2, pages 618–622, April 2009.

- [69] W.H. Ip and Qing Wang. Resilience and friability of transportation networks : Evaluation, analysis and optimization. *IEEE Systems Journal*, 5(2) :189–198, June 2011.
- [70] Pu Jiang and Yacov Y. Haimes. Risk management for leontief-based interdependent systems. *Risk Analysis*, 24(5) :1215–1229, 2004.
- [71] Jonas Johansson and Henrik Hassel. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(12) :1335 – 1344, 2010. 19th European Safety and Reliability Conference.
- [72] Jonas Johansson, Henrik Hassel, and Alexander Cedergren. Vulnerability analysis of interdependent critical infrastructures : case study of the swedish railway system. *International Journal of Critical Infrastructures*, 7 :289 – 316, 2011.
- [73] Jonas Johansson, Henrik Hassel, and Enrico Zio. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures : Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 120 :27–38, 2013.
- [74] Stan Kaplan. The words of risk analysis. *Risk Analysis*, 17(4) :407–417, 1997.
- [75] V. Latora and M. Marchiori. A measure of centrality based on the network efficiency. *eprint arXiv :cond-mat/0402050*, February 2004.
- [76] Vito Latora and Massimo Marchiori. Is the boston subway a small-world network? *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 314(1) :109–113, 2002.
- [77] E.E. Lee, J.E. Mitchell, and W.A. Wallace. Restoration of services in interdependent infrastructure systems : A network flows approach. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews*,, 37(6) :1303–1317, 2007.
- [78] Eun-Kyoung Othelia Lee, Ce Shen, and Thanh V. Tran. Coping with hurricane katrina : Psychological distress and resilience among african american evacuees. *Journal of Black Psychology*, 2008.
- [79] Ted G. Lewis. *Critical Infrastructure Protection in Homeland Security : Defending a Networked Nation*, chapter Networks, pages 71–106. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [80] Sophie Martin. *La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, June 2005.
- [81] O. Mezzou, B. Birregah, and E. Châtelet. A theoretical study of the interactions between the components of resilience in critical urban infrastructures. In *IET International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC 2011)*,, pages 1–6, 2011.
- [82] Dick Middelkoop and Michiel Bouwman. Simone : Large scale train network simulations. In *Proceedings of the 33Nd Conference on Winter Simulation*, WSC '01, pages 1042–1047, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [83] Elise Miller-Hooks, Xiaodong Zhang, and Reza Faturechi. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Computers & Operations Research*, 39(7) :1633 – 1643, 2012.
- [84] Sabyasachee Mishra, Timothy F Welch, and Manoj K Jha. Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 46(7) :1066 – 1085, 2012.

- [85] Edward K. Morlok and David J. Chang. Measuring capacity flexibility of a transportation system. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 38(6) :405 – 420, 2004.
- [86] P.M. Murray-Tuite. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions. In *Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter*, pages 1398–1405, Dec 2006.
- [87] Vincenzo Nicosia, John Tang, Cecilia Mascolo, Mirco Musolesi, Giovanni Russo, and Vito Latora. Graph metrics for temporal networks. In Petter Holme and Jari Saramäki, editors, *Temporal Networks, Understanding Complex Systems*, pages 15–40. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [88] H. Nikookar, J. Takala, D. Sahebi, and J Kantola. A qualitative approach for assessing resiliency in supply chains. *Management and Production Engineering Review*, 5(4) :36–45, 2014.
- [89] FranH. Norris, SusanP. Stevens, Betty Pfefferbaum, KarenF. Wyche, and RoseL. Pfefferbaum. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, 41(1-2) :127–150, 2008.
- [90] Mayada Omer, Ali Mostashari, Roshanak Nilchiani, and Mo Mansouri. A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems. *Maritime Policy & Management*, 39(7) :685–703, 2012.
- [91] OpenTrack. Opentrack railway technology. [http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack\\_f/opentrack\\_f.html](http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_f/opentrack_f.html). Accessed : 2015-10-30.
- [92] Min Ouyang, Leonardo Dueñas-Osorio, and Xing Min. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. *Structural Safety*, 36 -37 :23 – 31, 2012.
- [93] Junsik Park and Seong-Cheol Kang. A model for evaluating the connectivity of multimodal transit networks. In *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, number 11-1670, 2011.
- [94] Srinivas Peeta and AthanasiosK. Ziliaskopoulos. Foundations of dynamic traffic assignment : The past, the present and the future. *Networks and Spatial Economics*, 1(3-4) :233–265, 2001.
- [95] Charles Perrow. Disasters ever more ? reducing u.s. vulnerabilities. In *Handbook of Disaster Research*, Handbooks of Sociology and Social Research, pages 521–533. Springer New York, 2007.
- [96] A. Radtke. Software tools to model the railway operation. Railway construction and operatio, Leibniz Universität Hannover, 2005.
- [97] Rawia Ahmed EL Rashidy and Susan Grant-Muller. Resilience assignment framework using system dynamics and fuzzy logic. 2012.
- [98] RATP. Les enquêtes tjrf. <http://www.merlin.lyon-bercy.ratp/tjrf/index.php>. Accessed : 2015-11-05 (RATP’s intranet website).

- [99] RATP. PCC : système d'automatisation de l'exploitation des trains. Technical report, RATP/MTS/Département Métro Transport et Services, Novembre 2013.
- [100] Aura Reggiani. Network resilience for transport security : Some methodological considerations. *Transport Policy*, 28 :63 – 68, 2013.
- [101] Tom Rigole and Geert Deconinck. A survey on modeling and simulation of interdependent critical infrastructures. In *Proc. 3rd IEEE Benelux Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering*, April 2006.
- [102] S.M. Rinaldi. Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies. In *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2004.
- [103] S.M. Rinaldi, J.P. Peerenboom, and T.K. Kelly. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems*, 21(6) :11–25, 2001.
- [104] Adam Rose. Defining and measuring economic resilience to disasters. *Disaster Prevention and Management*, 13 :307–314, 2004.
- [105] Adam Rose. Economic resilience to natural and man-made disasters : Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards*, 7(4) :383 – 398, 2007.
- [106] Adam Rose and Elisabeth Krausmann. An economic framework for the development of a resilience index for business recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 5 :73 – 83, 2013.
- [107] Nicola Santoro, Walter Quattrociocchi, Paola Flocchini, Arnaud Casteigts, and Frédéric Amblard. Time-Varying Graphs and Social Network Analysis : Temporal Indicators and Metrics. In *3rd AISB Social Networks and Multiagent Systems Symposium (SNA-MAS)*, pages 32–38, United Kingdom, May 2011.
- [108] Joost R. Santos. Inoperability input-output modeling of disruptions to interdependent economic systems. *Systems Engineering*, 9(1) :20–34, 2006.
- [109] Urena Nayel Serulle. Transportation network resiliency : A fuzzy systems approach. Master's thesis, Utah State University, 2010. <http://digitalcommons.usu.edu/etd/769>.
- [110] Bernd Sewcyk and Michael Kettner. Network evaluation model nemo. Technical report, Institute of Transport, Railway Construction and Operation (IVE), University of Hanover, Germany, 2001.
- [111] Gh.A. Shirali, I. Mohammadfam, and V. Ebrahimipour. A new method for quantitative assessment of resilience engineering by PCA and NT approach : A case study in a process industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 119 :88 – 94, 2013.
- [112] Riana Steen and Terje Aven. A risk perspective suitable for resilience engineering. *Safety Science*, 49(2) :292 – 297, 2011.
- [113] John Tang, Mirco Musolesi, Cecilia Mascolo, and Vito Latora. Characterising temporal distance and reachability in mobile and online social networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 40(1) :118–124, January 2010.

- [114] Schön Walter, Larraufie Guy, Moëns Gilbert, and Jacques Poré. *Railway signalling and automation*, volume 2. La vie du rail, Mars 2013.
- [115] Schön Walter, Larraufie Guy, Moëns Gilbert, and Jacques Poré. *Railway signalling and automation*, volume 1. La vie du rail, Mars 2013.
- [116] Schön Walter, Larraufie Guy, Moëns Gilbert, and Jacques Poré. *Railway signalling and automation*, volume 3. La vie du rail, Mars 2013.
- [117] Shuliang Wang, Liu Hong, Min Ouyang, Jianhua Zhang, and Xueguang Chen. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies. *Safety Science*, 51(1) :328 – 337, 2013.
- [118] B. BUI XUAN, A. FERREIRA, and A. JARRY. Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks. *International Journal of Foundations of Computer Science*, 14(02) :267–285, 2003.
- [119] Pengcheng Zhang, Srinivas Peeta, and Terry Friesz. Dynamic game theoretic model of multi-layer infrastructure networks. *Networks and Spatial Economics*, 5(2) :147–178, 2005.
- [120] Rae Zimmerman. Social implications of infrastructure network interactions. *Journal of Urban Technology*, 8(3) :97–119, 2001.
- [121] E. Zio and G. Sansavini. Modeling interdependent network systems for identifying cascade-safe operating margins. *IEEE Transactions on Reliability*, 60(1) :94–101, 2011.
- [122] Christopher W. Zobel. Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience. *Decision Support Systems*, 50(2) :394 – 403, 2011.
- [123] Christopher W. Zobel and Lara Khansa. Characterizing multi-event disaster resilience. *Computers & Operations Research*, 42 :83 – 94, 2014.



# Kpotissan ADJETEY-BAHUN

## Doctorat : Optimisation et Sûreté des Systèmes

### Année 2016

#### Résilience de bout en bout pour la (re)conception d'un système de transport

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse consistent à développer un modèle permettant d'évaluer et d'améliorer la résilience d'un système de transport ferroviaire de masse.

L'état de l'art des approches de quantification de la résilience a montré leurs limites quant à leur adéquation au système de transport ferroviaire de masse. Le système modélisé dans le cadre de cette étude se compose des quatre sous-systèmes respectivement de transport, d'énergie, de télécommunication et d'organisation. La caractérisation et la modélisation des interdépendances intra et inter sous-systèmes conduisent à mieux comprendre et étudier ce type de système. Des indicateurs de performance adaptés à ce système (le nombre de passagers arrivés à destination, le retard cumulé et la charge des passagers) permettent de quantifier la performance puis la résilience du système. Une application de ce modèle est proposée sur le réseau de transport ferroviaire de Paris. Par la suite, la modélisation des perturbations et des plans de gestion de crise ont permis d'évaluer l'impact/l'efficacité de ces plans de gestion pour les améliorer. A partir de ce modèle, un simulateur a été développé, et une procédure de mise en place d'une démarche de résilience de bout en bout dans un système de transport ferroviaire de masse est proposée.

Les conditions d'exploitation sont intégrées dans les indicateurs topologiques des systèmes de transport que l'on trouve dans la littérature via le modèle. Les indicateurs de résilience ainsi obtenus se montrent plus pertinents que ces indicateurs topologiques usuels.

**Mots clés :** résilience (psychologie) - transports ferroviaires - gestion des crises - simulation par ordinateur.

#### End-to-end Resilience for the (Re)designing of a Transportation System

This thesis aims to develop a model that assesses and improves the resilience of mass railway transportation system.

A state of the art on resilience quantification approaches in sociotechnical systems reveals some limitations relative to their adequacy to the mass railway transportation systems. The model developed in this work is helping to give some answers to these limitations. We identify and develop four inter-related subsystems: transportation, power, telecommunication and organization subsystems. We also characterized and modeled these subsystems' interdependencies. This allows us to get insight into the system holistically. We also propose and quantify some performance indicators of this system. These performance indicators are used afterwards to quantify the resilience of the system. The number of passengers that reach their destination station, passenger delay and passenger load are performance indicators used in this work. The model is applied to the Paris mass railway transportation system. After modeling perturbations, we also assess the extent to which some crisis management plans are taken into account in the model. Then, a simulator has been developed, and an approach that aims to implement an end-to-end resilient system is proposed.

Operating conditions of railway transportation system are incorporated into topological indicators of transportation systems found in the literature through the model. This allows us to show the relevance of these operating-conditions dependent indicators relative to the usual topological indicators of the studied network.

**Keywords:** resilience (personality trait) - railroads - crisis management - computer simulation.

Thèse réalisée en partenariat entre :

