



UNIVERSITÉ
DE NAMUR

University of Namur

Institutional Repository - Research Portal Dépôt Institutionnel - Portail de la Recherche

researchportal.unamur.be

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES À FINALITÉ SPÉCIALISÉE EN SOFTWARE ENGINEERING

Visualisation du trafic ferroviaire pour la planification à long terme de travaux d'infrastructure

Delaisse, Pierre

Award date:
2021

Awarding institution:
Universite de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Download date: 03. Jul. 2025

UNIVERSITÉ DE NAMUR
Faculté d'informatique
Année académique 2020-2021

Visualisation du trafic ferroviaire pour la planification à long
terme de travaux d'infrastructure

Pierre DELAISSE



Maître de stage : Frédéric BUFFART

Promoteur : Bruno DUMAS

(Signature pour approbation du dépôt - REE art.
40)

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques.

Remerciements

Nous tenons à remercier notre promoteur le Professeur Bruno Dumas pour son suivi, son aide et sa précieuse guidance tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions également notre Maître de stage Frédéric Buffart pour son accueil chaleureux lors du stage effectué au sein de l'entreprise Infrabel, son temps et son partage de l'expertise tant au sein d'Infrabel que dans le développement de systèmes informatiques.

Nous adressons aussi nos remerciements à Thibaut Goelff et Emmanuël Manteau pour leur aide dans la compréhension de l'environnement informatique d'Infrabel et des enjeux liés à l'application de planification des coupures à long terme et leur disponibilité.

Nous remercions aussi Elise Quertinmont pour le partage de son expertise dans la planification de travaux de maintenance ferroviaire et son enthousiasme à améliorer les outils informatiques de façon constructive.

Nous remercions Mohamed Boujabed, Sébastien Lheureux, Eric Perrini, Séverine Mouton, Damien Paque, Nicolas Goossens et Jérôme Duckers pour leur disponibilité, leur réactivité et leur précieux support durant le stage réalisé au sein d'Infrabel.

Aussi, nous remercions Guy Gilson pour son intérêt et son appui tout au long du stage au sein d'Infrabel.

Enfin, nous tenons à remercier Clara Rygaert pour ses retours objectifs et constructifs durant les tests utilisateurs réalisés dans le cadre de ce travail.

Résumé

La maintenance de l'infrastructure est un élément clé pour le bon fonctionnement du réseau ferroviaire en toute sécurité. De par la complexité de cette infrastructure et l'impact que la maintenance peut avoir sur le trafic, il est indispensable d'avoir une planification des travaux de maintenance optimale. Pour cela, les gestionnaires de l'infrastructure ont recours à des systèmes informatiques de plus en plus complets.

Ce travail porte sur le système utilisé par le gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire en Belgique, Infrabel. En particulier, nous analysons en détail le processus de planification à long terme des travaux, ainsi que l'outil informatique utilisé à cette fin au sein d'Infrabel. Nous proposons de multiples ajouts à cet outil afin de faciliter la planification optimale des travaux en améliorant la prise en compte du trafic.

Les améliorations proposées prennent la forme d'un système de visualisation de l'information pour les données de trafic. Les données considérées visent non seulement le trafic des trains ainsi que les itinéraires empruntés par ceux-ci. Celui-ci est à la fois clair et simple d'utilisation, tout en mettant l'accent sur l'efficacité et la satisfaction des utilisateurs envers l'outil.

Mots-clés : visualisation de données, infrastructure ferroviaire, trafic ferroviaire, planification de travaux

Table des matières

1	Introduction.....	5
1.1	Contexte.....	5
1.2	Objectifs	5
1.3	Question de recherche.....	6
1.4	Plan du mémoire	6
2	Etat de l'art	7
2.1	Systèmes de visualisation de l'information	8
2.1.1	Comparaison des pipelines de données.....	8
2.1.2	Utilisation des systèmes de visualisation de données pour le trafic	10
2.2	Challenges spécifiques au domaine de l'infrastructure ferroviaire	21
2.2.1	Planification de la maintenance de l'infrastructure.....	21
2.2.2	Capacité de l'infrastructure	24
2.2.3	Représentation des données d'infrastructure.....	26
3	Développement de la recherche.....	29
3.1	Contexte	29
3.1.1	Contexte métier	30
3.1.2	Analyse de l'existant.....	33
3.2	Analyse des besoins et implémentation	36
3.2.1	Fournir une représentation des données de trafic lors de la planification d'une coupure.....	37
3.2.2	Suggestion d'itinéraires de détournements	43
3.2.3	Routing ferroviaire	44
3.3	Evaluation du résultat	48
3.3.1	Tâche 1 : planification d'une coupure et impact sur le trafic	49
3.3.2	Tâche 2 : détermination d'un itinéraire de détournement avec correspondance dans l'historique.....	49
3.3.3	Tâche 3 : détermination d'un itinéraire de détournement sans correspondance dans l'historique.....	50
3.3.4	User Experience Questionnaire	50
4	Perspectives et directions.....	53

5	Conclusion.....	55
6	Bibliographie.....	57
7	Annexes.....	60
7.1	Annexe 1 : résultats du test UEQ.....	60

1 Introduction

1.1 Contexte

En Belgique, le trafic ferroviaire est en constante augmentation. Pour faire face à cette croissance, il est nécessaire d'adapter l'infrastructure disponible. En parallèle, les évolutions technologiques dans le domaine ferroviaire permettent d'augmenter à la fois l'efficacité du réseau mais également sa sécurité. Toujours pour garantir efficacité et sécurité, l'infrastructure existante nécessite une maintenance constante.

Depuis 2005 et la libéralisation des chemins de fer, le développement et la maintenance du réseau ferré belge sont sous la responsabilité du gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire, l'entreprise Infrabel. Pour les réaliser, Infrabel effectue en continu des travaux d'infrastructure. Ainsi, ce sont en permanence pas moins d'une centaine de chantiers qui ont lieu sur le réseau en 2021.

Outre la complexité opérationnelle qu'implique l'organisation de ces chantiers, les nombreux éléments qui composent l'infrastructure ferroviaire (voies, signalisation, passages à niveau...) constituent un défi supplémentaire. Enfin, la cohabitation entre ces travaux nécessaires et la poursuite du trafic est le dernier facteur de cette équation. Pour la résoudre, un élément essentiel se trouve avant même le début des chantiers : la planification.

Pour ce faire, Infrabel comprend des équipes chargées de déterminer quels sont les tronçons nécessitant des travaux ainsi qu'une équipe chargée de coordonner ces travaux avec l'ensemble des parties prenantes du rail. Afin de supporter ces tâches, des outils informatiques ont été développés au sein de la société.

Ce travail a été réalisé sur base d'un stage auprès de l'entreprise Infrabel visant à développer davantage l'un de ces outils.

1.2 Objectifs

Les développements envisagés dans le cadre de ce stage partent tous de constats réalisés par l'équipe de coordination de la planification et par des clients internes. Ces constats sont liés à la faible prise en compte des données de trafic dans l'outil utilisé.

En particulier, trois axes sont mis en avant :

1. Lors de la planification de travaux, il n'est pas possible de consulter le trafic déjà prévu sur le tronçon concerné. Ainsi, il peut arriver que des travaux planifiés aient un impact sur le trafic alors qu'il suffirait de les décaler de quelques heures voire quelques jours pour éviter un tel impact ;
2. Lorsque des travaux ont un impact sur le trafic, l'une des solutions consiste à dévier le trafic en question. Bien que ces déviations tendent à se répéter pour

des travaux ayant lieu à un même endroit, l'outil utilisé ne propose aucune facilité quant à ces itinéraires récurrents. Il en résulte une perte de temps liée à cette multiplication d'encodages répétitifs ;

3. Enfin, l'expérience acquise sur base des travaux passés a fait apparaître l'utilité d'un nouvel outil complémentaire : un Waze ferroviaire. Par cela, on entend un outil de navigation réactif à la fois aux changements sur les routes disponibles mais aussi réactif aux retards causés par des ralentissements ou des engorgements.

L'objectif de ce travail est de répondre à ces trois défis en proposant des fonctionnalités à la fois pratiques mais surtout visuelles afin de faciliter la compréhension des données manipulées.

1.3 Question de recherche

En travaillant sur les 3 objectifs identifiés, nous cherchons à travers ce travail à déterminer en quoi la visualisation des données de trafic peut être utile dans le contexte de la planification à long terme des travaux d'infrastructure ferroviaire.

En particulier, nous cherchons à déterminer :

- La visualisation des données d'infrastructure est-elle pertinente pour chacun des objectifs poursuivis ?
- Quelles sont les techniques de visualisation de l'information les plus adaptées à chaque situation ?
- Comment peut-on gérer la masse de données générées par le trafic ferroviaire tout en la rendant intelligible ?
- Comment l'amélioration de la prise en compte du trafic dans le processus de planification peut augmenter la satisfaction des utilisateurs envers l'outil ?

1.4 Plan du mémoire

Afin d'envisager cette question de recherche, nous commençons par nous intéresser à la littérature pertinente concernant notre sujet.

En particulier, nous étudions tout d'abord les données de trafic et leur visualisation. Cette première partie vise à nous offrir un panorama des techniques existantes, de leur mise en place et de leur efficacité. Ce panorama ne se borne pas à la visualisation des données de trafic ferroviaire mais intègre aussi la visualisation d'autres types de trafic, notamment routier avec Waze.

Le deuxième grand axe de la revue de littérature se concentrera quant à lui sur les aspects typiquement métier des maintenance et renouvellement de l'infrastructure ferroviaire. Aussi, nous envisagerons la difficile question de l'évaluation de la capacité du réseau. Enfin, nous évoquerons brièvement les techniques utilisées pour traiter informatiquement les problématiques relatives à l'infrastructure ferroviaire.

Ensuite, le développement de la recherche se fera en s'appuyant sur l'outil existant rencontré durant le stage et expliquera comment nous avons abordé nos objectifs. En particulier, la richesse de ce développement reposera sur sa proximité avec les attentes business quant à leur outil.

Les différentes fonctionnalités développées seront détaillées au regard des challenges rencontrés et des solutions mises en place pour y faire face. Le design de ces fonctionnalités sera effectué main dans la main avec les utilisateurs clés issus du business afin de profiter autant que faire se peut de leurs retours. Leur implémentation sera quant à elle effectuée dans l'environnement informatique d'Infrabel.

Afin d'évaluer la pertinence des résultats obtenus, nous évaluerons les développements effectués par le biais de tests utilisateurs. Nous discuterons ensuite les résultats de ces tests au regard des forces et faiblesses identifiées dans notre solution.

Enfin, sur base de ces forces et faiblesses ainsi que des opportunités que nous aurons identifiées en cours de route, nous suggérerons de potentielles directions à suivre afin de compléter nos développements et améliorer encore davantage le processus de planification des travaux d'infrastructure ferroviaire.

2 Etat de l'art

Dans cette section, nous parcourons la littérature autour de deux axes principaux : les systèmes de visualisation de l'information et la maintenance de l'infrastructure ferroviaire, notre domaine d'application.

La première partie sur les systèmes de visualisation de l'information propose tout d'abord un aperçu des méthodologies employées pour mettre en place de tels systèmes. Ensuite, le focus sera mis sur les différentes utilisations qui en sont faites dans le cadre des données de trafic. Par données de trafic, nous entendons aussi bien le trafic ferroviaire que les autres moyens de locomotion, et singulièrement les taxis en raison de leur large couverture dans la littérature.

Le second axe que nous étudions concerne les défis spécifiques à la maintenance de l'infrastructure ferroviaire. En particulier, il s'agit de comprendre quels systèmes informatiques existent pour faire face à ces défis. Aussi, nous étudions la question de la planification de cette maintenance, celle de l'impact sur la capacité de l'infrastructure et enfin celle des différentes représentations de l'infrastructure.

2.1 Systèmes de visualisation de l'information

2.1.1 Comparaison des pipelines de données

Les outils de systèmes de visualisation de l'information ont en commun de fournir une représentation visuelle de données. Pour ce faire, plusieurs pipelines existent afin de définir les étapes de transformation successives permettant de passer de données brutes à leur représentation.

Une première approche est celle proposée par [Chen et al.]. Pour eux, 4 étapes sont nécessaires à la production de systèmes de visualisation de l'information (Figure 1).

- 1) La première consiste en la récolte des données brutes. Celles-ci peuvent provenir de sources variées allant de données GPS à des logs d'incidents.
- 2) La seconde étape identifiée par [Chen et al.] est le préprocessing. Celui-ci consiste à la mise en relation de ces données entre elles afin d'en faire ressortir plusieurs dimensions pouvant être analysées.
- 3) La troisième étape est celle de la transformation visuelle : les dimensions présentes dans les données préprocessées sont mises en relation avec des représentations visuelles appropriées.
- 4) Enfin, la quatrième étape est le mapping visuel : les différentes représentations visuelles créées lors de la transformation visuelle sont associées à des canaux visuels (couleur, taille, forme...) et mis en commun afin de fournir le visuel correspondant aux filtres sélectionnés par l'utilisateur.

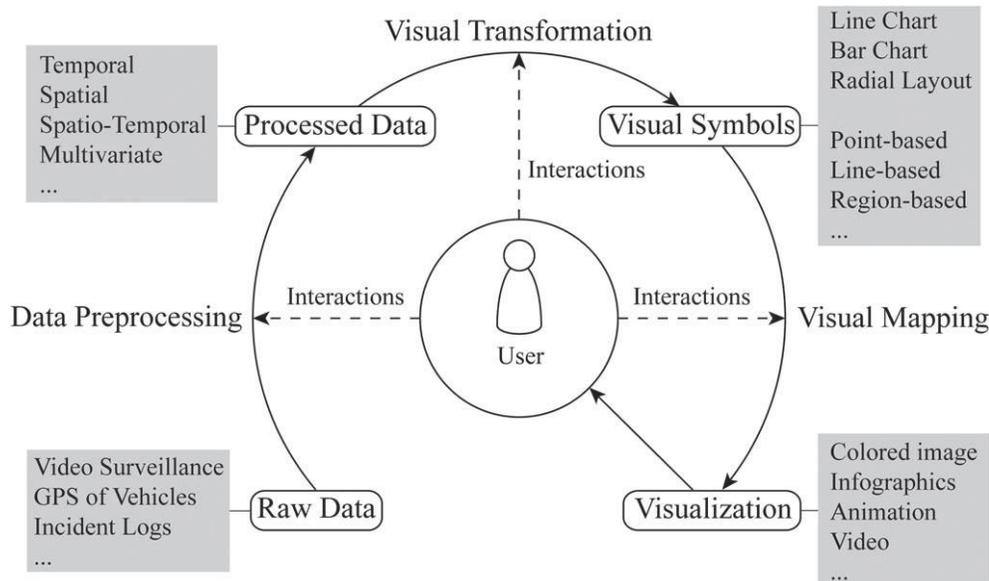


Figure 1 : pipeline de données de [Chen et al.]

Un autre modèle, proposé par [Card et al.], compte lui aussi 4 étapes. Cependant, il diffère fortement du modèle de [Chen et al.] dans la mesure où il en regroupe les 3

premières étapes du modèle en une seule, qu'ils nomment l'analyse de données. La raison de ce choix réside notamment dans l'acteur responsable de cette étape : la machine seule, sans implication de l'utilisateur.

De fait, les 3 dernières étapes nous apportent davantage de précisions quant au mapping visuel.

La deuxième étape de ce modèle est le filtrage des données, c'est-à-dire la sélection des données à intégrer au visuel.

La troisième étape du pipeline de [Card et al.] est le mapping. Celui-ci est défini comme l'association entre les données filtrées et des symboles visuels. En cela, ce mapping se situe à mi-chemin entre la transformation visuelle et le mapping visuel du modèle de [Chen et al.] : il comprend non seulement l'association entre les données et des représentations visuelles, mais aussi l'association aux canaux visuels particuliers.

Enfin, la dernière étape du modèle de [Card et al.] n'est pas du tout mentionnée dans le modèle de [Chen et al.] : il s'agit du rendering, qui consiste en la transformation du visuel en une image (interactive).

Le troisième et dernier modèle que nous abordons est davantage orienté vers la visualisation sur des supports « non conventionnels ». Par cela, on entend des visualisations proposées sur un support autre qu'un écran d'ordinateur. Ce modèle est celui proposé par [Jansen et al.] (Figure 2)

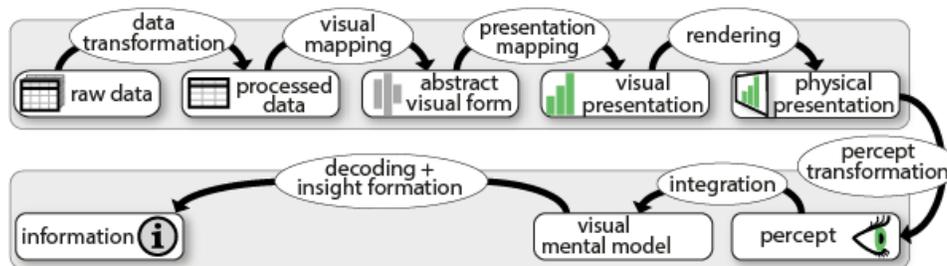


Figure 2 : pipeline de données de [Jansen et al.]. Nous soulignerons la partie inférieure qui fait la particularité de ce modèle

Ce pipeline a la particularité de mettre l'accent non seulement sur le système de visualisation en lui-même, comme les deux autres pipelines vus précédemment, mais aussi sur la perception qu'a l'utilisateur du système de visualisation de l'information. Il se distingue en cela des deux autres.

Les 4 étapes identifiées par [Chen et al.] sont particulièrement proches de celles du système de visualisation identifiées par [Jansen et al.], à ceci près que ces derniers terminent leur pipeline par le rendering.

Un autre élément notable dans cette partie du pipeline réside dans la description du mapping visuel et du mapping de présentation (respectivement transformation visuelle et mapping visuel dans le modèle de [Chen et al.]) : le mapping visuel est décrit comme une représentation abstraite, qui définit des symboles sans les instancier ni forcément en définir toutes les propriétés, tandis que le mapping visuel est pour sa part concret : les symboles sont entièrement définis et instanciés.

La seconde partie du pipeline de [Jansen et al.] concerne la perception que l'utilisateur a de l'information que lui présente le système. Cette partie s'articule en 3 étapes :

- La transformation du percept
- L'intégration
- Le décodage + formation de l'insight

La transformation du percept consiste en la transformation d'un stimulus (la visualisation du système proposé) en une perception. [Jansen et al.] expliquent par exemple que dans le cas d'une visualisation desktop, l'utilisateur ne verra pas l'écran comme un panneau de leds, mais plutôt comme un dessin, une représentation.

Ensuite, l'intégration permet à l'utilisateur de lier le percept à ses autres connaissances, à son expérience. Cette étape est cruciale dans la mesure où elle affecte la représentation interne que l'utilisateur a de la situation qui est présentée.

Enfin, le décodage et la formation de l'insight consistent en la familiarisation avec l'information présentée et la réflexion appliquée à cette information. Par exemple, l'évaluation approximative d'une moyenne d'un ensemble de valeurs.

2.1.2 Utilisation des systèmes de visualisation de données pour le trafic

Sur base des pipelines de données envisagés au point 2.1.1, nous pouvons mettre davantage le focus sur l'utilisation des systèmes de visualisation de l'information, en particulier dans le cas de la visualisation de données de trafic.

Pour ce faire, [Chen et al.] proposent une taxonomie qui distingue quatre catégories de système utilisés pour la visualisation de telles données :

- Les systèmes d'analyse de données récoltées via l'observation du trafic
- Ceux permettant la découverte et le rassemblement de patterns
- Les systèmes d'exploration et de prédiction
- Ceux visant le planning et la recherche de chemins

Pour chacune de ces 4 catégories, nous parcourons les différents systèmes existants, tant pour les données de trafic de façon générale que pour les données de trafic ferroviaires.

2.1.2.1 Analyse de données récoltées via l'observation du trafic

Cette première catégorie de systèmes de visualisation de l'information identifiée par [Chen et al.] consiste en l'analyse de données récoltées via l'observation du trafic. Ces données sont obtenues via des capteurs GPS disposés sur des véhicules, des données de caméra de surveillance du trafic etc. Ces systèmes de visualisation de l'information permettent typiquement de détecter des événements survenant sur le réseau, tels des congestions (embouteillage), ralentissements... Ils permettent aussi d'analyser les causes de ces événements.

Un exemple de ce type de systèmes de visualisation de l'information est l'outil T-Watcher conçu par [Jiansu Pu et al.] (figure 3). Cet outil permet d'analyser les données récoltées par des capteurs GPS placés sur des taxis. T-Watcher permet ensuite de comparer les données en temps réel avec les données historiques et ainsi de détecter des situations de trafic inhabituelles.

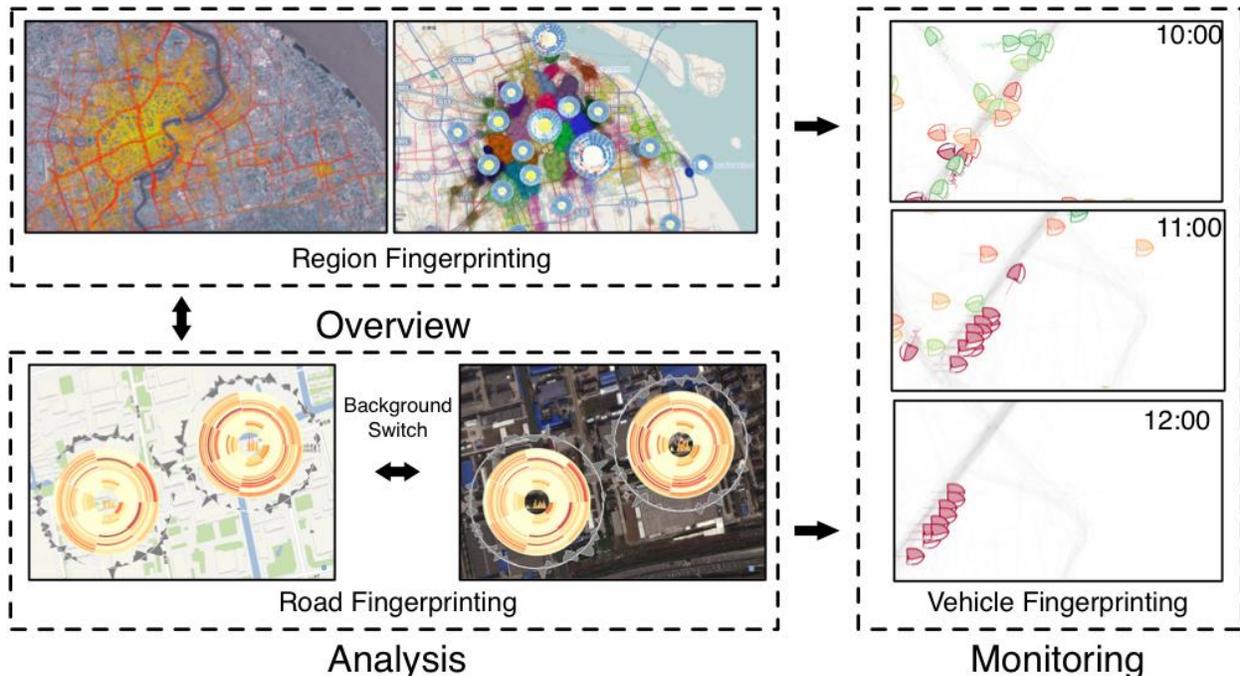


Figure 3 : aperçu des visuels de T-Watcher, repartis par les 3 niveaux d'analyse. Aussi, le niveau véhicule (à droite) grâce à la figure Gryph-Cell.

Un aspect secondaire de T-Watcher (Figure 3) est à mi-chemin entre la visualisation du trafic et la découverte de patterns : il s'agit de la représentation Gryph-Cell. Celle-ci associe chaque véhicule à une « cellule » et permet de regrouper les données présentes et les données historiques, prédisant ainsi les mouvements du véhicule sur base de l'historique des données.

T-Watcher propose une analyse sur 3 niveaux distincts :

- Le niveau « Région » prend en compte l'ensemble des axes routiers d'une zone géographique. La zone géographique en question peut être aussi restreinte qu'un quartier.
- Le niveau « Route » se limite à l'analyse du trafic sur un seul axe routier. Ce niveau ignore donc les interactions entre les différents axes et l'impact de la situation des axes voisins sur l'axe analysé.
- Le niveau « Véhicule » prend en compte un véhicule particulier et permet de le suivre sur le réseau.

2.1.2.2 Découverte et rassemblement de patterns

La deuxième catégorie de techniques de visualisation de l'information identifiée par [Chen et al.] est la découverte de patterns ainsi que le rassemblement de ces patterns. L'objectif est ici de rechercher quels sont les liens entre les différents paramètres qui influencent le trafic.

Nous noterons également que l'objectif de cette deuxième catégorie est davantage l'exploration de données, là où l'analyse des informations de trafic visait surtout à permettre de comprendre des situations données.

La découverte et le rassemblement de patterns ont la particularité que la visualisation n'est pas une fin en soi : en effet, il est envisageable de dégager des patterns de façon tout à fait automatisée, comme le soulignent [Adrienko et al.]

Dans les développements de ces derniers, l'objectif est de procéder à l'analyse de volumes de données massifs : à titre d'exemple, ils citent l'exemple de l'équivalent des données de trajet de 17200 voitures pendant 1 semaine.

Leur méthodologie débute par un préprocessing significatif : c'est dans un premier temps la machine qui recherche des patterns et les classe. Cependant, [Adrienko et al.] postulent que cette seule analyse automatique est insuffisante pour analyser de larges volumes de données : les résultats obtenus manqueraient de pertinence.

Afin de remédier à ce manque de pertinence, ils proposent d'augmenter les capacités de la machine en permettant à l'homme de la guider. C'est précisément dans cette tâche qu'interviennent les systèmes de visualisation de l'information. En effet, afin de pouvoir déterminer les voies les plus prometteuses, il est nécessaire que les analystes puissent comprendre les données déjà analysées. Pour ce faire, ce type de visualisation repose en particulier sur les filtres de données à afficher. En jouant avec les filtres, l'analyste doit pouvoir comprendre petit à petit le jeu de données qui lui est présenté.

2.1.2.3 Exploration de données et prédiction

La troisième utilisation des systèmes de visualisation de l'information identifiées par [Chen et al.] est l'exploration de données récoltées dans le passé afin de les projeter dans le futur. Cette projection est considérée comme une prédiction.

Ces données ont deux caractéristiques clés : leur emplacement géographique et le moment auquel elles sont récoltées. Les autres dimensions gravitent ensuite autour de ces deux caractéristiques clés et peuvent être utilisées pour expliquer les données.

Un exemple cité par [Chen et al.] est le système d'analyse des courses de taxi à New York développé par [Ferreira et al.]. De par les deux caractéristiques prépondérantes à cette forme d'exploration de données, les systèmes de visualisation de l'information proposés par [Ferreira et al.] sont à la fois des cartes (en particulier des heatmaps), ainsi que des diagrammes de temps.

Il est important de noter que le moment représenté par les données est davantage qu'une simple représentation linéaire : il est lui-même décomposé en de multiples sous-caractéristiques ayant une influence sur le trafic. Dans le cas d'étude de [Ferreira et al.], cette décomposition mène à « préanalyser » le trafic lors de la semaine de travail et lors des weekends, lors des heures de pointe et lors des heures creuses, lors des heures creuses de jours et celles de nuit, etc. Cette décomposition temporelle intervient sous forme d'hypothèse, et non sous forme de résultat comme elle pourrait apparaître dans l'analyse de l'observation de données de trafic.

Dans le cadre spécifique de l'analyse du trafic ferroviaire, un exemple intéressant est celui de l'outil Peak Spotting (Figure 4) développé pour la DB (Deutsche Bahn, l'entreprise publique allemande chargée entre autres de la gestion et l'exploitation du réseau ferré en Allemagne). Celui-ci a pour objectif de faciliter la détection de situations de saturation de certaines lignes du réseau, et de permettre de prévenir et remédier à de telles situations. Pour ce faire, Peak Spotting repose sur une série de visualisations permettant d'analyser l'état de saturation d'une ligne en fonction du temps, l'impact de cette saturation sur un train en particulier et l'impact de la saturation d'une ligne sur le réseau dans son ensemble.

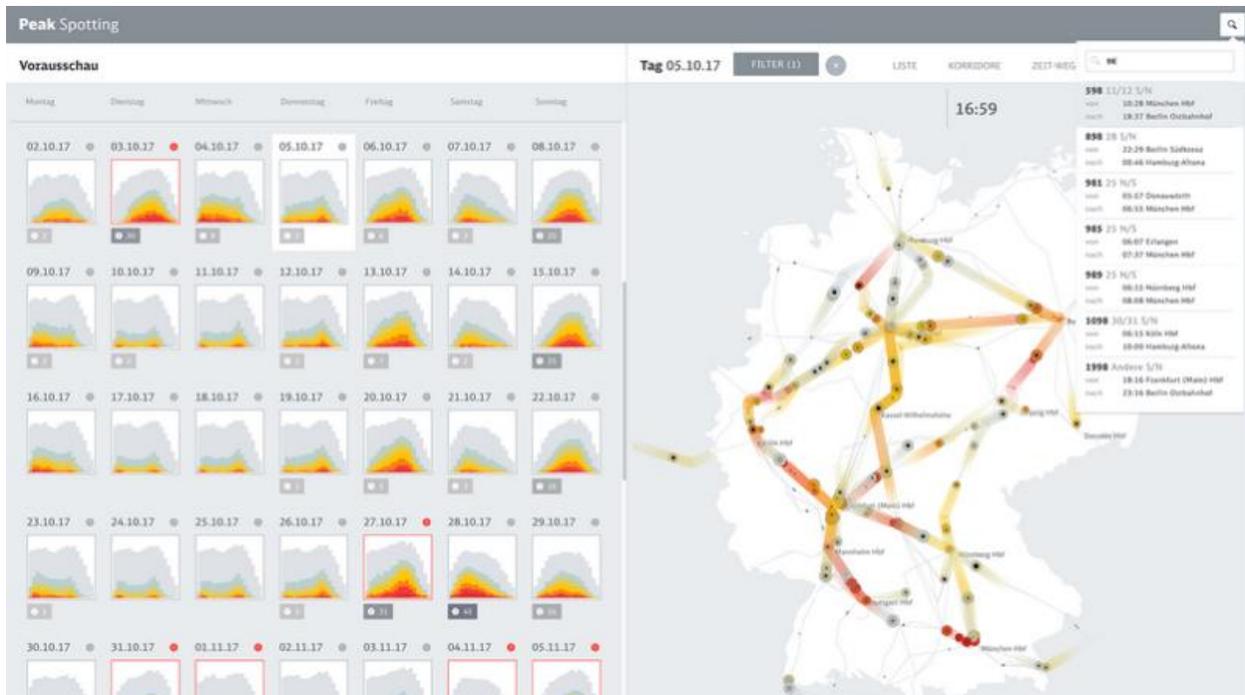


Figure 4 : Peak Spotting. Sur la gauche de l'écran, la représentation de congestion du réseau. Chaque case correspond à un jour en particulier, puis au sein d'une cellule l'axe X représente le temps. Sur la droite de l'écran, la représentation de la congestion répartie sur la carte du réseau pour 1 seul jour.

Le système Peak Spotting s'appuie sur l'hypothèse qu'en un lieu et un moment similaire, les mêmes situations de trafic vont se répéter. Sur base de cela, il extrapole les données passées récoltées pour en tirer une conclusion plus générale et une prédiction des situations de trafic futures.

Quant à l'outil Trains of data [KloECKl et al.] (Figure 5), il propose quant à lui une visualisation du trafic basée uniquement sur un type de train particulier : les trains à grande vitesse voyageurs. La symbologie choisie est assez simple et directe : les trains sont représentés par des cercles se déplaçant sur le réseau. Une échelle de couleur allant du vert au rouge symbolise le retard du train concerné, tandis que le rayon du cercle est proportionnel au nombre de voyageurs utilisant le train concerné.

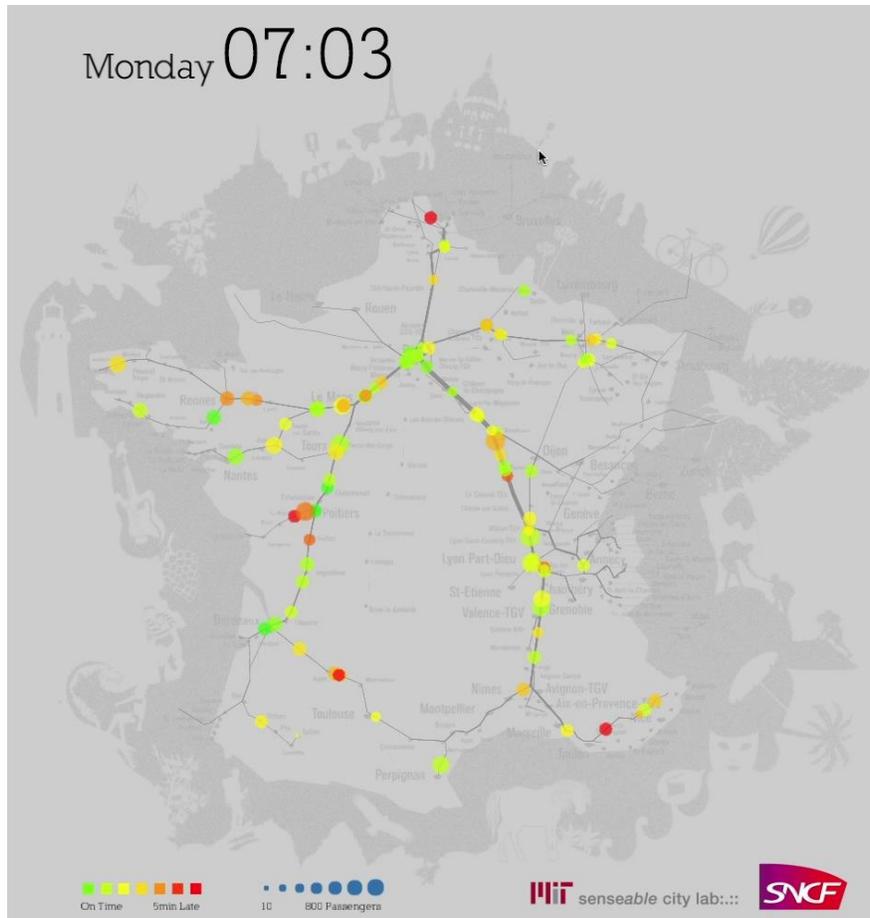
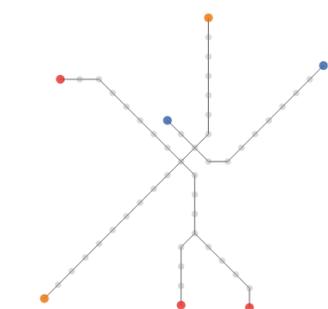


Figure 5 : la visualisation Trains of Data

Un autre exemple spécifique au trafic ferroviaire est le système proposé par [Landmark et al.] Il permet de visualiser les données de ponctualité des trains grâce à 3 axes : le moment de la journée, la ligne et le train concerné. En cela, nous constatons que deux de ces axes sont comparables à ceux pris en compte par Peak Spotting : la vue ligne et la vue train.

La dimension manquante est celle du réseau : [Landmark et al.] ne proposent pas d'analyse prenant en compte le réseau dans son ensemble, soit plusieurs lignes et leur interdépendance.

Le dernier exemple que nous aborderons dans cette catégorie est celui du métro de Boston, publié par [Barry et al.] (Figure 6). Leur outil vise à permettre aux utilisateurs du métro de mieux comprendre celui-ci, et en particulier le lien entre les utilisateurs et la situation sur le réseau.



Locations of each train on the red, blue, and orange lines at 5:13 am. Hover over the diagram to the right to display trains at a different time.

Trains are on the right side of the track relative to the direction they are moving.

See the [morning rush-hour](#), [midday lull](#), [afternoon rush-hour](#), and the [evening lull](#).

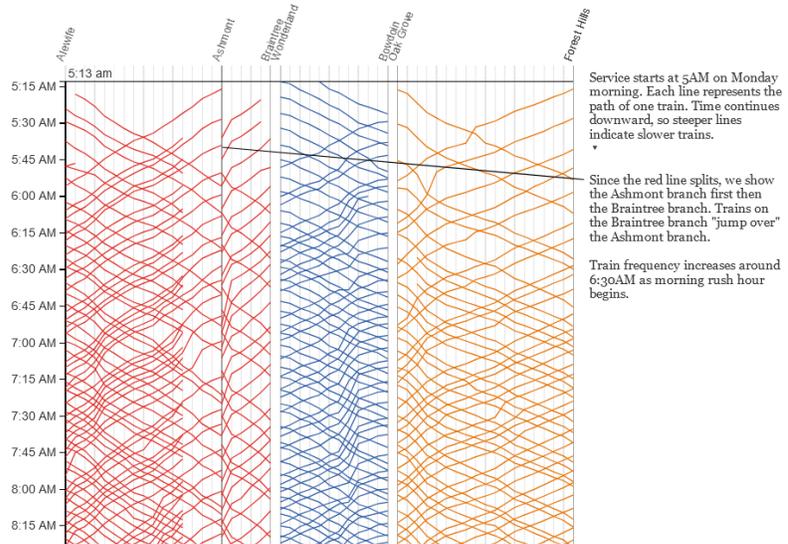


Figure 6 : visualisation du trafic des métros de Boston. Sur la gauche, la représentation schématique du réseau. Sur la droite, le diagramme de ligne : l'axe X représente l'espace et l'axe Y le temps. Le passage d'un métro est représenté par un trait. Chaque ligne possède son code couleur. Pour la ligne rouge, le Y dans la partie inférieure de la représentation schématique du réseau donne lieu à la séparation de la ligne (les nombreux traits interrompus à Ashmont).

Pour ce faire, [Barry et al.] font reposer leurs visualisations sur un concept en particulier : le diagramme de ligne. Celui-ci a deux axes : le temps et chacune des 3 lignes du réseau de métro considéré dans cet exemple. Le passage d'un métro sur une ligne est représenté par un trait. Il est intéressant de constater la façon de gérer les embranchements sur une ligne : afin de représenter les deux branches d'un « Y », chacune des branches est juxtaposée. De fait, lorsqu'un métro emprunte la seconde branche, le trait qui le représente est interrompu, bien qu'en réalité il poursuive sur la même ligne sans interruption ni téléportation.

En plus de cette représentation par ligne, [Barry et al.] la mettent secondairement en relation avec le réseau. Pour ce faire, ils permettent de survoler à la souris un point du diagramme de ligne et de représenter les trains présents à ce moment sur un schéma du réseau. Cette complémentarité devient indispensable pour des cas comme celui évoqué plus haut d'un embranchement en Y.

Dans cette visualisation, il est important de constater que c'est la visualisation par ligne qui est centrale : elle permet à l'utilisateur d'avoir une vue d'ensemble. La vue réseau est totalement subordonnée à la vue par ligne et permet de faciliter la compréhension de parties sélectionnées de la première.

2.1.2.4 Planning et recherche de chemin

La quatrième grande catégorie de systèmes de visualisation de l'information identifiée par [Chen et al.] est celle relative à la navigation.

Cette dernière catégorie comprend en réalité 3 aspects : la navigation proprement dite, au sens de ce qu'un GPS peut fournir, ou encore le système CARS proposé par [Wilson et al.] (Figure 7), déjà en 1969. La navigation est alors entièrement automatisée : la machine propose un itinéraire et l'utilisateur est invité à le suivre.

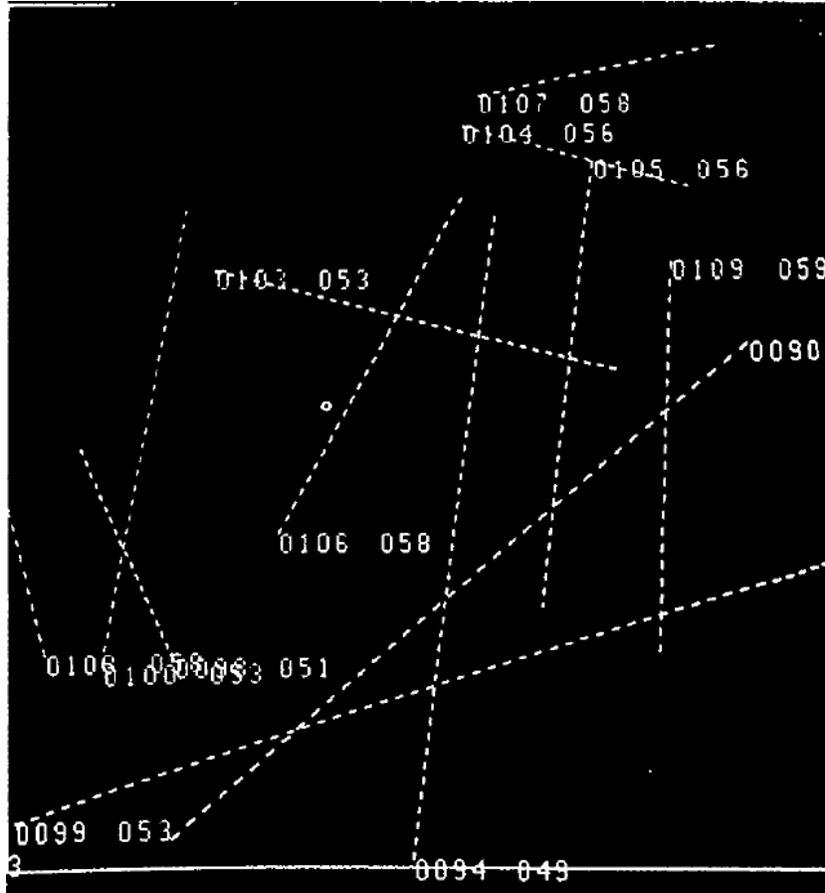


Figure 7 : le système de routing CARS. Les traits pointillés représentent chacun les trajets proposés à chaque chauffeur de taxi.

D'autre part, ces systèmes de navigation peuvent également allier l'intelligence de la machine avec celle de l'humain. Ce second aspect est dominant dans les travaux de [Liu et al.].

Enfin, un troisième aspect est celui de la navigation dite « sociale ». Par cela, on entend la détermination d'un itinéraire optimal en prenant en compte non seulement les caractéristiques du réseau, mais aussi la circulation rencontrée en cours de

route. L'exemple d'application grand public proposant cette navigation sociale étant l'application Waze, dont les mécanismes sont analysés par [Vasserman et al.].

Dans la mesure où les systèmes de routing « simples » ont déjà été maintes et maintes fois étudiés, nous proposons de nous concentrer uniquement sur les systèmes de routing interactifs et aux systèmes de routing sociaux.

L'exemple étudié par [Liu et al.] (Figure 8) est celui fourni par le service T-Drive, lui-même développé par Microsoft. Celui-ci permet de proposer un itinéraire non pas sur une base d'analyse du réseau, mais sur base d'itinéraires que recommanderaient des chauffeurs de taxi expérimentés. Il s'agit donc d'un système de routing sur base de l'expérience.

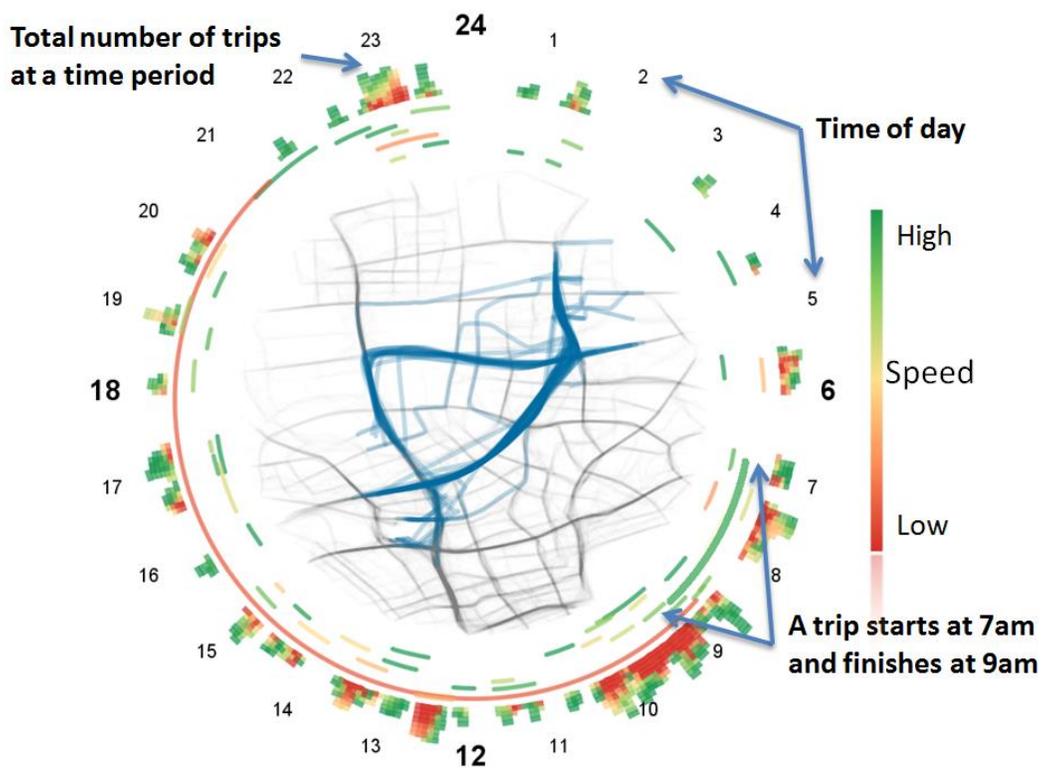


Figure 8 : l'une des visualisations de T-Drive. Le visuel combine une information géographique au centre et une information de saturation autour du centre. Nous noterons la fusion des informations très variées en un seul visuel.

Les itinéraires recommandés sont alors dépendants d'une série de facteurs externes qui ne proviennent pas du réseau en lui-même : la météo, le moment de la journée, les travaux en cours etc. L'élément clé de leur étude est la diversité d'itinéraires qui résultent de ces paramètres.

T-Drive consiste donc en la proposition de visuels présentant les temps de parcours et les longueurs des trajets pour une région, mais aussi pour des itinéraires

particuliers. Il est à noter qu'il s'agit d'une vision statistique de la détermination d'itinéraires : les événements exceptionnels mais avec un lourd impact sont ignorés.

Les résultats obtenus par [Liu et al.] sont significatifs pour déterminer l'itinéraire optimal avec des jeux de données à taille raisonnable. Cependant, [Liu et al.] reconnaissent les limites de leur méthodologie pour des jeux de données particulièrement complexes : lorsque trop d'itinéraires différents sont possibles sur une zone géographique réduite, les visualisations tendent à perdre en lisibilité.

Il est également intéressant de comparer les visualisations de [Liu et al.] avec celles de [Barry et al.]. En effet, l'une comme l'autre représentent sur une même visualisation des données de localisation et de temps. Or les visualisations ne se ressemblent pas et mettent des éléments très différents en avant.

[Frank] distingue 4 types de temps susceptibles d'être rencontrés en termes de données :

- Les événements qui sont de simples points sur la ligne du temps, sans durée ni intervalle entre événements ;
- Les événements arrivent via un process (suite d'événements) ou de façon cyclique, mais sans être liés à une échelle ordinale ;
- Les événements arrivent et peuvent être placés sur une échelle ordinale ;
- Les événements arrivent selon un ordre connu, qui peut être totalement ordonné (tous les événements sont prévus et fixés les uns par rapport aux autres) ou partiellement ordonné (on distingue des suites d'événements mais toutes les suites ne sont pas liées entre elles)

A partir de ces différents types de temps, [Frank] identifie plusieurs informations pouvant être extraits de ces données en fonction de l'aspect devant être mis en avant :

- Les intervalles de temps, exprimés en unité de temps (heures, jours, etc).
- Le temps continu, c'est-à-dire une vision du temps comme un flux continu et mesurable. A partir de ce temps entre deux événements. De plus, il est également possible d'effectuer des opérations mathématiques sur cette vision du temps : par exemple, si un objet prend 10 minutes pour passer d'un point A à un point B à vitesse continue, alors après 5 minutes il sera à mi-chemin. Il s'agit ici du temps utilisé notamment en physique : le moindre écart est considéré comme étant significatif.
- Afin d'éviter de distinguer inutilement des événements à une poignée de microsecondes d'intervalles, on peut également considérer un delta acceptable. Dans ce cas, deux événements se déroulant à un intervalle inférieur à ce delta acceptable sera considéré comme égal.
- Le temps cyclique, dans lequel l'ordre d'une occurrence d'un événement par rapport à une autre occurrence d'un événement a peu de sens : il sera d'office

après un autre et avant un autre. Cependant, [Frank] note que cette représentation du temps n'autorise pas la transitivité entre événements au sein du cycle : par exemple, bien qu'un matin arrive après un soir, le cycle considéré pour une journée est que le soir arrive après le matin.

Ces représentations du temps mènent à différentes compréhensions d'un même événement. Alors que [Liu et al.] et [Barry et al.] proposent tous deux des visualisations de la localisation par rapport au temps, nous notons que la représentation du temps choisie impacte significativement la compréhension que l'utilisateur de leur système peut avoir des données présentées.

A cet égard, [Aigner et al.] distinguent pour leur part 3 caractéristiques clé pour la représentation des données temporelles :

- Le caractère cyclique ou bien linéaire ;
- La représentation d'intervalles ou bien de points ;
- Le caractère ordonné ou bien les « branchings » (similaires aux multiples outputs d'un diagramme de Gant)

En fonction de ces caractéristiques, [Aigner et al.] soulignent que la représentation tend à varier fortement. Néanmoins, ils notent également que dans le cas de larges volumes de données, la représentation tend à s'obscurcir, ne permettant plus de distinguer tous les aspects remarquables du jeu de données.

Quant à la navigation sociale de type Waze, [Vasserman et al.] expliquent que son principe clé est de synchroniser les itinéraires empruntés par chaque véhicule. Cette synchronisation se fait à la fois sur base des difficultés rencontrées sur le réseau par les autres utilisateurs (par exemple un accident qui provoque des ralentissements), mais aussi au niveau de l'itinéraire qui est recommandé à chaque utilisateur.

([Vasserman et al.] illustrent cet aspect par un exemple simple : pour deux points reliés par deux routes distinctes, Waze va balancer la charge entre les deux routes).

[Vasserman et al.] démontrent que ces systèmes de type Waze sont en pratique dans le pire des cas équivalents à une situation « anarchique » (c'est-à-dire chaque véhicule définit son propre itinéraire, sans prendre en compte les autres véhicules). Dans le meilleur des cas, ces systèmes permettent d'obtenir des résultats nettement plus optimaux grâce à cet aspect social que sans.

Il est à noter que bien que [Vasserman et al.] n'aient pas étudié l'application de cette méthodologie dans le domaine d'application du trafic ferroviaire, il semble de prime abord pouvoir s'y prêter adéquatement. En effet, les situations sur le réseau ferroviaire peuvent être connues à l'avance, tout comme les itinéraires de chaque train. De fait, ajouter un train supplémentaire pourra se faire de façon « sociale », et de fait profiter des gains d'une telle méthodologie.

2.2 Challenges spécifiques au domaine de l'infrastructure ferroviaire

Cette dernière partie de l'état de l'art vise à explorer les différents systèmes conçus pour envisager les problématiques abordées dans ce travail. Il s'agit d'une recherche d'un point de vue métier et non pas nécessairement d'un point de vue visualisation de l'information.

2.2.1 Planification de la maintenance de l'infrastructure

Afin d'assurer la maintenance de l'infrastructure, il est nécessaire de prévoir des travaux pouvant avoir un impact sur le réseau et le trafic qui l'utilise.

[Lidén] identifie de multiples challenges liés à cette maintenance : la minimisation de l'impact sur le trafic, que ce soit via la réunion de plusieurs travaux de maintenance compatibles ou via la sélection de moments identifiés comme moins impactants ; l'optimisation de l'utilisation des ressources nécessaires à la maintenance (machines et équipes de chantier) ; l'utilisation de la maintenance préventive.

Pour y faire face, plusieurs tactiques existent. En particulier, la planification des travaux constitue un élément clé. [Lidén] distingue 4 problèmes relatifs à cette planification :

- La planification des coupures majeures : il s'agit ici de la planification des travaux ayant un impact significatif sur le réseau, sa capacité et le trafic. Ces coupures majeures posent le cadre de toute la planification de maintenance.
- La prévision de plages régulières de travaux : en plus de la planification des coupures majeures, [Lidén] suggère qu'il est aussi nécessaire de réserver des plages disponibles pour les petits travaux ayant peu d'impact. L'avantage de ces plages est qu'elles peuvent être définies à l'avance et de manière préventive. De fait, l'introduction de petits travaux dans ces plages ne force pas à revoir l'entièreté du planning.
- La coordination des travaux : certains travaux peuvent impacter d'autres portions du réseau qui bien que n'étant pas elles-mêmes en travaux sont indisponibles pour le trafic. De même, certains travaux peuvent se faire sur ces portions du réseau en ayant un impact nul : la circulation y est déjà indisponible.
- La compression d'horaire : plutôt que d'agir directement sur le réseau, [Lidén] affirme qu'il est aussi possible d'agir sur le trafic : en comprimant l'horaire. Par cela, on entend le rapprochement du passage des trains plutôt que son étalement. Ce rapprochement est censé dégager des moments sans trains pour permettre d'effectuer des travaux.

[Ferreira] note que pour faire face à ces problèmes, de nombreux modèles ont été développés avec la caractéristique commune de reposer sur des systèmes de prédictions basés sur l'historique des mesures effectuées sur l'infrastructure, les activités de maintenance passées et leurs coûts ou encore l'espérance de vie du matériel utilisé.

Un exemple d'automatisation de ces modèles est le système AUTONOM [Turner et al.]. AUTONOM permet de rencontrer des challenges comme la planification de la maintenance du réseau ferroviaire de façon semi-automatisée (avec intervention humaine sur certains aspects) à entièrement automatisée. Pour ce faire, AUTONOM repose sur l'analyse et le croisement automatique des données provenant d'une multitude de capteurs, d'horaires et disponibilité des assets nécessaires à la maintenance.

[Turner et al.] ont mis leur prototype en pratique sur le réseau anglais *Network Rail*. Cependant, bien qu'AUTONOM s'avère prometteur, [Turner et al.] ne fournissent pas d'éléments permettant de valider les résultats obtenus grâce à cette méthodologie.

Quant à [Albrecht], la vision proposée est singulièrement différente. Là où les questions de planification de la circulation des trains et de maintenance du réseau sont généralement traités de façon disjointe (sans néanmoins nier leurs liens réciproques), elle propose pour sa part de réunir les deux problématiques et de les considérer comme deux sous-types d'utilisation d'un tronçon. Ainsi, l'horaire généré comprend à la fois des intervalles dédiés à la circulation et d'autres liés à la maintenance. Bien que prometteuse sur des cas d'études réduits, [Albrecht] considère néanmoins que cette méthodologie n'est pas applicable à la complexité rencontrée dans des cas réels.

[Caetano et al.] envisagent pour leur part le problème de la planification de la maintenance sous un autre axe : la méthodologie qu'ils proposent consiste à mettre la priorité sur les travaux afin de maximiser la disponibilité du réseau. Ainsi, ils proposent une méthodologie basée sur l'évaluation de la dégradation des différents éléments de l'infrastructure (rails, ballast, etc.) pour déterminer le moment optimal pour effectuer les travaux. Ils en distinguent deux sous-types qui disposent chacun d'un traitement particulier : les travaux de maintenance et les travaux de renouvellement.

En plus d'optimiser la disponibilité du réseau, [Caetano et al.] considèrent aussi le paramètre budgétaire, l'ajustement de celui-ci faisant varier la concentration de travaux possibles sur une même année.

Malgré les optimisations possibles, les travaux d'infrastructure ont néanmoins un impact sur le trafic. Lorsque les ressources d'infrastructure disponibles pour le trafic

sont réduites, il est alors nécessaire de revoir le planning de ce dernier. [Corman et al.] identifient deux stratégies possibles à cet égard : la première est de supprimer les trains qui ne rentrent plus dans l'horaire initial afin de permettre aux autres de rouler normalement, tandis que la seconde consiste à revoir l'horaire prévu quitte à générer des retards.

En pratique, [Corman et al.] notent qu'un équilibre entre les deux stratégies est trouvé. La recherche de cet équilibre correspond au problème qu'ils appellent la détection et la résolution biobjective des conflits. Pour résoudre ce problème, ils introduisent deux algorithmes : Add and Remove. Ceux-ci permettent de construire l'optimum entre la minimisation des retards et la maximisation du nombre de trains pouvant rouler sur le réseau une fois l'infrastructure disponible réduite.

[Forsgren et al.] proposent quant à eux une autre approche qu'ils appliquent au réseau suédois. Celle-ci consiste à réorganiser le trafic sur le réseau en fonction des travaux de maintenance prévus, qui eux-mêmes font l'objet d'un consensus entre les planificateurs de maintenance et les entrepreneurs ferroviaires (càd les utilisateurs du réseau).

La réorganisation du trafic peut prendre différentes formes : l'annulation d'un train, la définition d'un itinéraire alternatif ou encore le déplacement à un autre moment. Pour tester leur modèle, [Forsgren et al.] considèrent une partie du réseau susceptible de conduire leur algorithme à proposer des redirections (Figure 9). Ils exécutent ensuite leur algorithme en simulant des travaux sur l'une des voies d'une section à deux voies (qui permet au trafic d'être en partie reporté sur l'autre voie), puis sur une section à une seule voie (le trafic ne pouvant être reporté, seules une annulation ou une déviation sont possibles).

Dans chacun des cas, leur algorithme propose en output les trains qui doivent être annulés et ceux qui peuvent rouler. Pour ces derniers, l'horaire adapté est également proposé, ainsi que l'itinéraire alternatif le cas échéant.

Nous notons deux éléments particulièrement intéressants dans les résultats de [Forsgren et al.]. Tout d'abord, l'horaire adapté pour le cas d'une coupure sur la section à deux voies consiste en la répartition des trains entre d'une part la seconde voie et d'autre part, pour les trains qui ne peuvent pas y passer, par un détournement via d'autres lignes. Ensuite, la partie du réseau considérée est particulièrement réduite. Selon [Forsgren et al.], cela permet de faciliter les calculs d'itinéraires alternatifs mais empêche de fait d'envisager de tels itinéraires en dehors de cette partie de réseau considérée.

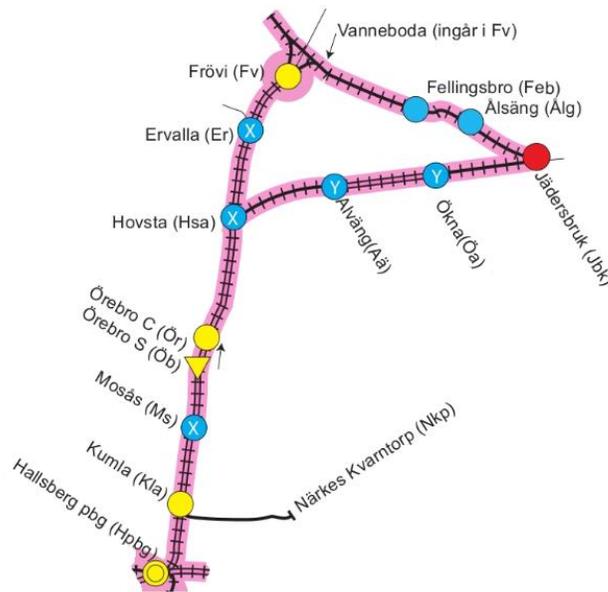


Figure 9 : la partie du réseau ferré suédois considérée par [Forsgren et al.]. On y distingue clairement les sections à deux voies et celles à une seule voie.

2.2.2 Capacité de l'infrastructure

Comme expliqué dans la section précédente, les données de trafic sont un aspect capital dans une planification efficace de la maintenance ferroviaire. De fait, le trafic est dépendant de la capacité de l'infrastructure. L'estimation de cette capacité et son analyse forment un champ de recherche à part. Ce champ est notamment exploré par [Gasparik et al.] qui définissent la capacité comme le nombre de trains pouvant emprunter, sur une période donnée, un élément d'infrastructure ferroviaire.

Pour calculer cette capacité, [Gasparik et al.] distinguent trois types de méthodologies : analytique, graphique et par simulation.

La méthodologie analytique repose sur une analyse déterministique et théorique : elle est ignorante des perturbations qui pourraient survenir et affecter la capacité. Il s'agit donc de calculer la capacité comme une combinaison de plusieurs facteurs caractéristiques de l'infrastructure. Il est à noter que l'un des facteurs influençant la capacité d'une ligne repose sur la distinction entre les trains de marchandises et de voyageurs. Cette méthodologie est selon [Gasparik et al.] utilisée en Croatie, Slovaquie et Tchèque.

Quant à la méthodologie graphique, elle consiste en la compression d'horaire de trains empruntant un élément d'infrastructure : on considère que tous les trains se suivent aussi proches que possible pour emprunter l'élément en question (Figure 10). L'output de cette méthodologie sont la capacité utilisée et la capacité disponible.

Au-delà d'un seuil de capacité utilisée, on considère que l'élément est saturé. Cette méthodologie est déterminée par l'International Union of Railway dans sa norme 406.

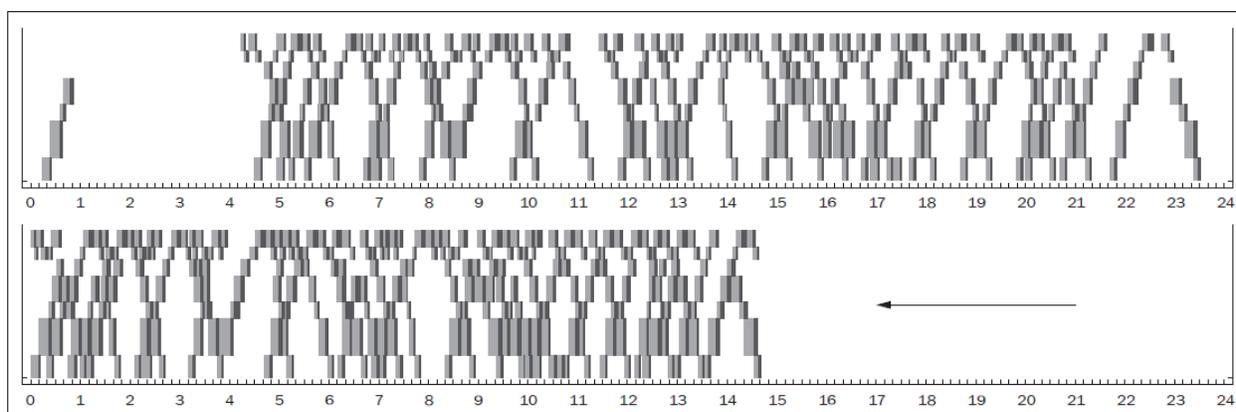


Figure 10 : représentation graphique de la compression d'horaire.

La méthodologie graphique peut être étendue par la simulation de trains supplémentaires. Il s'agit là de la troisième méthodologie identifiée par [Gasparik et al.]. Il s'agit de simuler des trains supplémentaires avec la méthodologie graphique et de mesurer si le seuil de congestion est dépassé. Lorsque ce seuil est dépassé, on considère que les trains « réels » (non simulés) constituent la capacité utilisée de l'élément, tandis que les trains « virtuels » (simulés) constituent la capacité résiduelle de l'élément. Cette méthodologie est développée par [Gasparik et al.].

Un autre outil pertinent pour l'évaluation de la capacité est LUKS (Figure 11), développé par [Janecek et al.]. LUKS a la particularité de combiner les trois méthodologies précédentes en un seul outil. De plus, LUKS les associe à des utilisations différentes. En particulier, la méthodologie analytique est associée à la planification long terme (module LUKS-A).



Figure 11 : Interface de LUKS utilisée pour l'analyse de la circulation des trains sur le réseau Infrabel. Dans la partie supérieure de l'écran et sur l'axe X : la représentation d'une ligne. Sur l'axe Y, le temps. Chaque bloc sur le diagramme représente l'occupation d'une section par un train.

Au niveau de l'outil en lui-même, LUKS propose une suite complète de représentation du réseau et de simulation du trafic. En particulier, nous retenons la possibilité de manipuler le réseau en créant, modifiant ou supprimant des axes. Il est à noter que LUKS diffère fortement d'outils comme AUTONOM : là où l'objectif d'AUTONOM est d'automatiser la prise de décision, LUKS permet quant à lui de fournir des analyses visant à aider à la prise de décision.

2.2.3 Représentation des données d'infrastructure

Le dernier aspect étudié dans cet état de l'art est la représentation des données d'infrastructure. Bien que n'étant pas le cœur du sujet de ce travail, comprendre les différents formats de données susceptibles d'être manipulés nous semble indispensable.

Comme le soulignent [Blanco et al.], l'infrastructure ferroviaire est composée d'une multitude d'éléments qui ensemble sont d'une grande complexité. Cependant, toutes les applications ne nécessitent pas de prendre en compte toute cette complexité : afin de simplifier ces problèmes, il est possible de s'abstraire du détail de cette

infrastructure. Cette abstraction consiste à dériver une représentation macroscopique à partir des éléments du niveau microscopique.

Par niveau microscopique, on entend des éléments qui constituent le réseau à un niveau de détail très fin (par exemple le rail, le signal, l'aiguillage, etc.). Quant au niveau macroscopique, il s'agit d'une représentation de plus haut niveau, typiquement la ligne.

L'utilité de ce niveau macroscopique est qu'en réduisant la complexité de l'information représentée, il permet de faciliter grandement le calcul sur base de ces informations.

Le problème abordé par [Blanco et al.] est celui de l'allocation de voie. Celui-ci consiste en l'optimisation du temps nécessaire pour faire passer un nombre donné de trains sur le réseau. Pour ce problème, [Blanco et al.] démontrent que l'utilisation du niveau macroscopique dans la résolution n'a pas d'influence significative sur le résultat.

De même, [Goverde et al.] (Figure 12) associent les niveaux macroscopique et microscopique à l'optimisation de différents paramètres.

La problématique qu'ils abordent est celle de la composition d'un horaire optimal. Le caractère optimal comprend des paramètres variés comme le temps d'occupation de l'infrastructure, la consommation énergétique, la robustesse (capacité à résister à des modifications « normales », comme l'ajout exceptionnel d'un train), la faisabilité (absence de conflit, c'est-à-dire l'utilisation simultanée d'un même élément d'infrastructure par deux trains) etc.

Pour aborder ces différents paramètres, [Goverde et al.] défendent l'utilisation des 3 niveaux de représentation différents. Ainsi, pour optimiser des paramètres comme le temps de trajet, ils préconisent l'utilisation du niveau macroscopique. A l'inverse, pour l'optimisation de paramètres comme l'utilisation d'un élément d'infrastructure, la consommation énergétique ou encore la détection de conflit, le niveau microscopique lui est préféré.

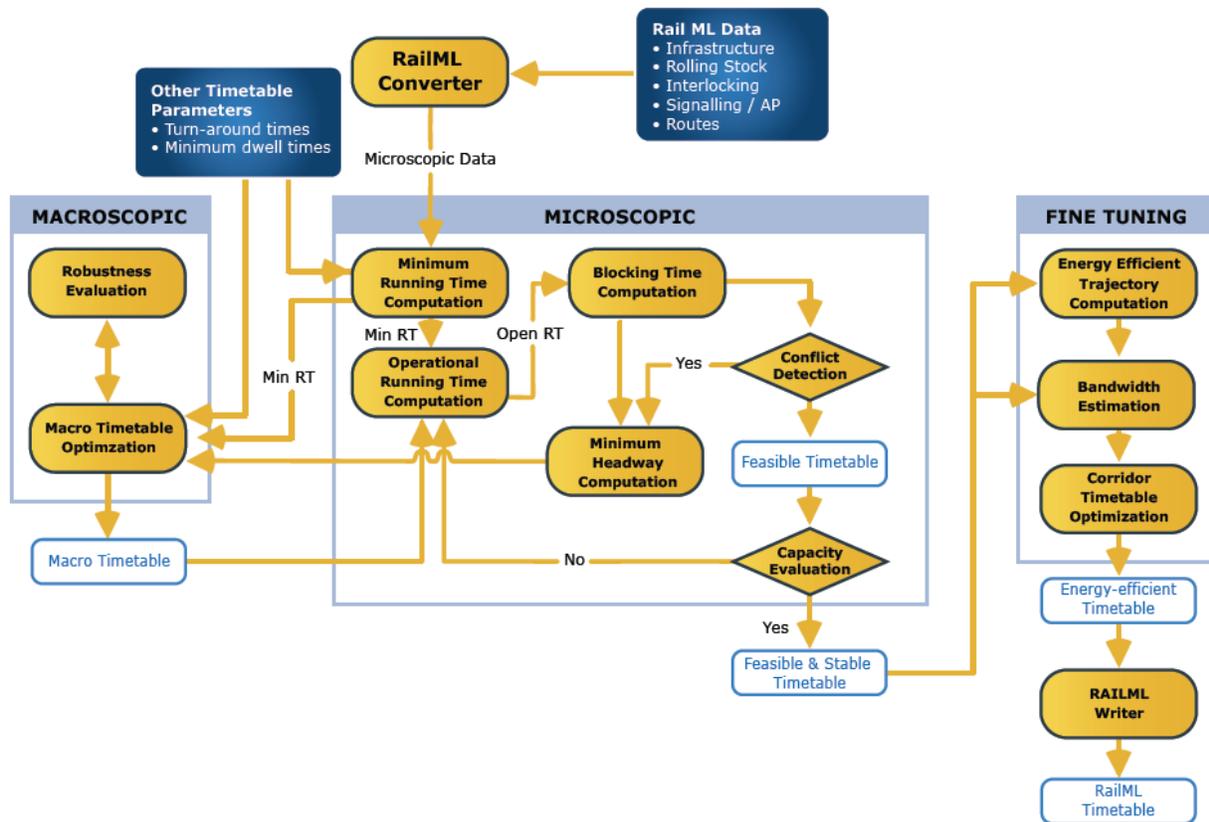


Figure 12 : diagramme de flux de [Goverde et al.] et ses 3 niveaux et les tâches associées à chacun des 3 niveaux.

Dans le détail, tout calcul passe en premier lieu par le niveau microscopique : l'input des paramètres calculés par le niveau macroscopique proviennent d'un premier processing du niveau microscopique.

Enfin, [Goverde et al.] distinguent un troisième niveau : le « fine tuning ». Ce niveau est dédié exclusivement à l'optimisation des données qui proviennent, ici aussi, du niveau microscopique.

Quant à [Larsen et al.], ils distinguent eux aussi 3 niveaux : stratégique, tactique et opérationnel (Figure 13). Au fur et à mesure des déplacements du niveau stratégique vers le niveau opérationnel, [Larsen et al.] notent que l'horizon de la planification se rapproche passant du long terme au court terme. De même, le niveau de détail de l'infrastructure gagne lui aussi en détail en se rapprochant du niveau opérationnel. Ils notent aussi que chaque niveau utilise comme input le résultat du niveau supérieur.

Dans leur modèle, le niveau stratégique est associé aux grands contours du réseau : quelles sont les lignes disponibles ainsi que leur capacité ? En fonction de

cela, le niveau stratégique est associé à des décisions de construction de nouvelles lignes ou d'augmentation de la capacité des lignes existantes.

Le niveau tactique est pour sa part associé à l'allocation des ressources d'infrastructure en considérant celles-ci comme fixée (il n'est plus possible de les augmenter). La décision associée à ce niveau est typiquement la conception d'un horaire. Pour cela, [Larsen et al.] notent les contraintes différentes qui touchent le transport passager et le transport de fret : le premier inclut l'importance de prendre en compte les correspondances ou encore la réflexion sur l'éventuel couplage de trains qui partagent une portion de leur trajet. Naturellement, ces contraintes n'ont pas cours dans le cas des trains de fret.

Enfin, le niveau opérationnel sert à gérer les situations rencontrées lors de l'opération de l'horaire défini : des retards, des incidents sur le réseau etc.

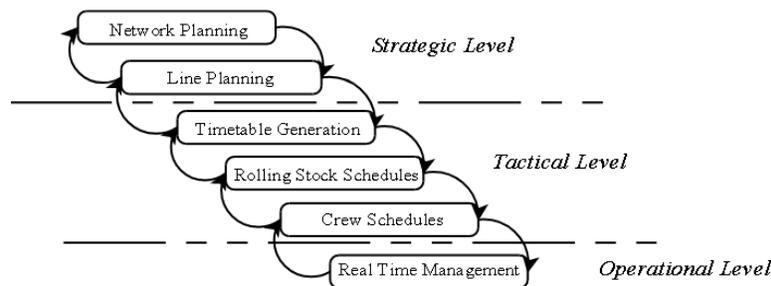


Figure 13 : les 3 niveaux identifiés par [Larsen et al.]

3 Développement de la recherche

3.1 Contexte

Notre objectif est de déterminer en quoi les systèmes de visualisation de l'information peuvent jouer un rôle dans la planification à long terme des travaux ferroviaires. Ces systèmes de visualisation de l'information existent depuis longtemps et pour des usages très variés, comme nous l'avons vu à la section 2.1.2. En fonction de l'objectif poursuivi et de la nature des données de trafic à représenter, nous avons vu un aperçu des différentes solutions existantes.

Quant à la planification des travaux ferroviaires, celle-ci peut se faire de façons très différentes comme nous l'avons vu à la section 2.2.1. Ainsi, nous avons vu des exemples d'outils utilisés en Allemagne, en France, au Royaume-Uni ou encore en Croatie.

Nous nous concentrons cependant sur la méthodologie employée au sein de l'entreprise gérant l'infrastructure ferroviaire belge, Infrabel. Grâce à un stage effectué

au sein d'Infrabel, nous avons pu étudier la façon dont les travaux d'infrastructure y sont planifiés et voir quels sont les outils utilisés pour supporter ce processus.

Dans cette section, nous analysons tout d'abord le contexte métier spécifique à Infrabel et la méthodologie employée pour effectuer cette planification à long terme.

Dans un second temps, nous mettons le focus sur l'outil informatique utilisé au sein d'Infrabel pour supporter le processus de planification.

Nous développons ensuite l'analyse et l'implémentation des fonctionnalités de visualisation jugés pertinents pour faciliter le processus et améliorer la prise en compte du trafic. Ces développements prennent place dans le cadre de l'outil CoLT, que nous complétons avec ces nouveaux développements.

Enfin, nous évaluons le résultat des fonctionnalités développées au regard de notre objectif, évaluer l'utilité et la pertinence des systèmes de visualisation de l'information pour supporter le processus de planification à long terme des travaux sur le réseau ferroviaire d'Infrabel.

3.1.1 Contexte métier

Comme expliqué précédemment, l'entretien de l'infrastructure ferroviaire nécessite des travaux pouvant avoir un impact sur le réseau. Ces impacts prennent la forme de coupures sur les lignes concernées.

Afin de coordonner ces travaux, les coupures doivent être prévues suffisamment en avance afin de permettre aux utilisateurs du réseau de s'adapter. En particulier, Infrabel distingue la planification des coupures à long terme et celles des coupures à court terme. La planification long terme correspond à un horizon supérieur à 6 mois, tandis que la planification à moins de 6 mois est dite à court terme.

Chacun des deux types de planification dispose d'une gestion totalement indépendante et donne lieu à un encodage dans un outil informatique spécifique : respectivement CoLT (Coupures Long Terme) et UPM (Unified Planning Module). Lorsque des travaux prévus à long terme sont sur le point de se produire, ceux-ci sont alors réencodés manuellement dans UPM.

Au sein d'Infrabel, deux acteurs majeurs participent à la planification des coupures long terme (Figure 14) : les ingénieurs responsables de l'entretien du réseau (aussi appelés « Project leaders ») et les planificateurs. Les premiers demandent les coupures de travaux nécessaires à leur tâche. Quant aux seconds, leur rôle est de déterminer si la coupure demandée est possible au regard des autres coupures prévues et si c'est le cas, de prévoir les alternatives utiles afin de ne pas bloquer le trafic prévu. De plus, leur rôle est aussi de prévenir les conflits.

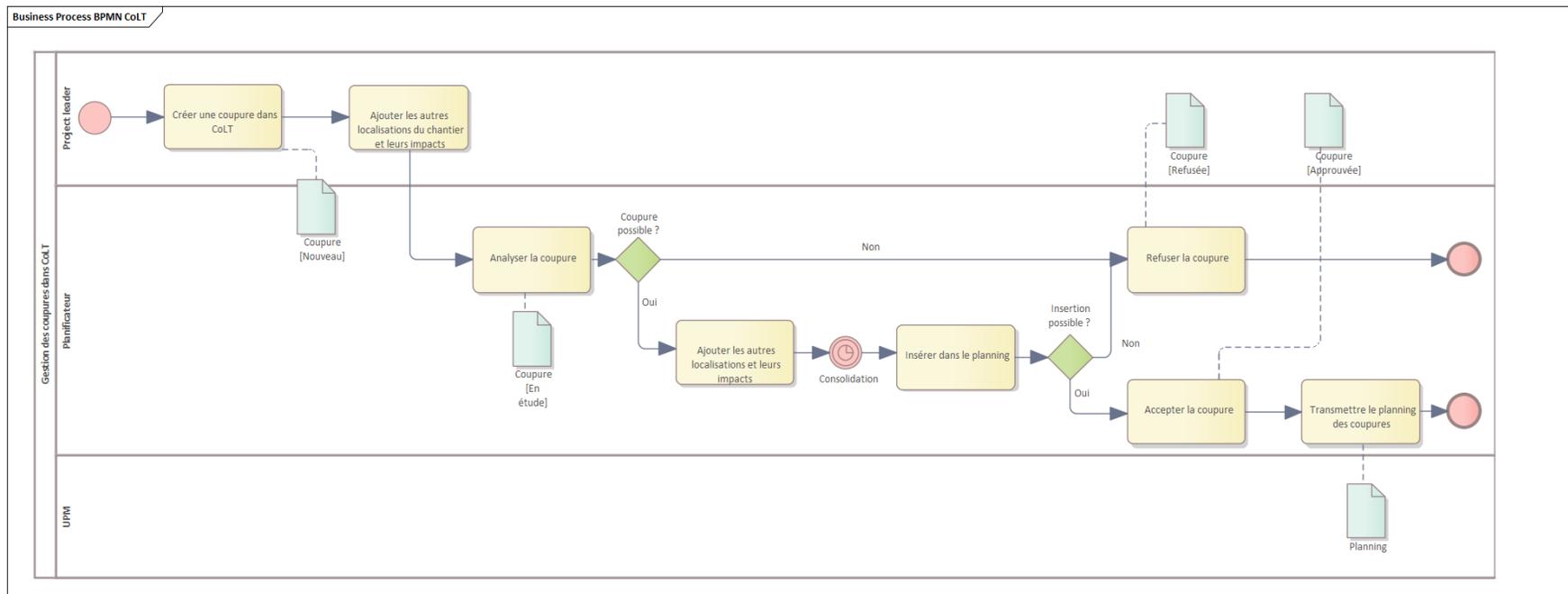


Figure 14 : processus de planification d'une coupure

Par conflit, on entend tout d'abord la superposition de deux coupures incompatibles. Par exemple, deux coupures simultanées dont l'une couperait une voie, tandis que l'autre renseigne « Pas de travaux » sur cette même voie. Ensuite, un conflit peut aussi signifier la présence simultanée de plusieurs coupures qui ensemble bloquent l'entièreté du réseau.

Pour la construction du planning, les planificateurs procèdent par phase : les coupures considérées comme les plus impactantes ou difficiles à déplacer se voient attribuer la phase 1, tandis que les moins impactantes se verront attribuer une phase supérieure. La phase est donc utilisée pour construire le planning pas à pas.

L'outil de planification à long terme, CoLT, comprend à la fois la communication entre ces deux acteurs ainsi que le suivi des coupures. C'est sur cet outil que porte le présent cas d'étude.

Le rôle clé de CoLT est de proposer un accès à la base de données des coupures à long terme tout en respectant le processus décrit à la Figure 14. Ainsi, l'application propose à l'utilisateur les actions de création, lecture, mise à jour et suppression des coupures. Ces deux dernières actions sont limitées à certains rôles disposant de privilèges plus élevés.

Le rôle de CoLT est aussi de proposer des facilités à l'utilisateur pour effectuer les actions précédemment citées. Ainsi, on retrouve la possibilité de dupliquer des coupures existantes, de les extraire au format Excel etc.

La Figure 15 propose le diagramme de classe de CoLT avec une orientation métier.

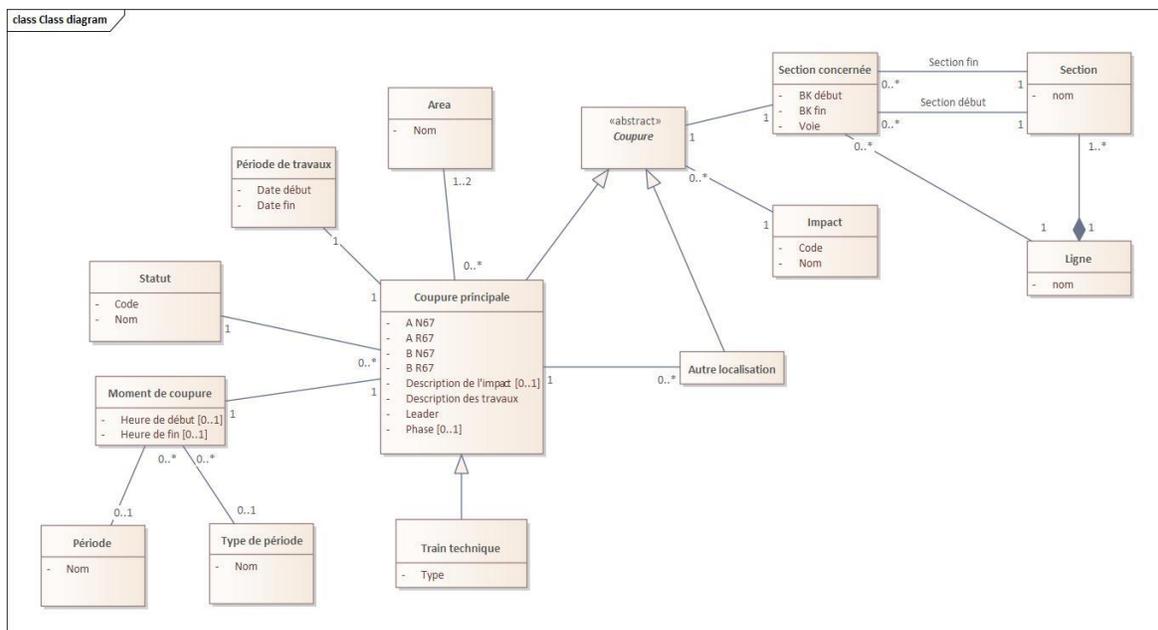


Figure 15 : diagramme de classe de CoLT avec une orientation business

Le concept clé de CoLT est la coupure. On en distingue deux types : les coupures de travaux et les autres localisations. Ces dernières peuvent être comprise comme des « sous-coupures » et sont toujours rattachées à une coupure principale.

En fonction des travaux à prévoir, l'impact sur le trafic peut être très variable. Les impacts possibles incluent une diminution de la vitesse possible sur le tronçon concerné ou une fermeture de l'une (SAVU pour Service A Voie Unique) ou des deux voies (CTL pour Coupure Totale de Ligne). Dans certains cas, il est aussi possible qu'une coupure n'ait pas d'impact sur le trafic : c'est notamment le cas lors du passage des trains de meulage ou de mesure, appelés « trains spéciaux ».

Un impact particulier est le « Pas de travaux ». Celui-ci signale l'interdiction de planifier des travaux sur un tronçon. L'objectif de ces coupures « Pas de travaux » est de garantir la possibilité de circuler ailleurs sur le réseau afin de ne pas le bloquer. Ces coupures « Pas de travaux » servent donc à la construction pas à pas du planning des travaux.

Quant à l'emplacement des travaux, celui-ci est défini sur une ligne. Sur cette ligne, l'emplacement concerné est ramené à une paire de points repères : les sections. Enfin, l'emplacement exact est exprimé sous la forme de bornes kilométriques (BK). Une fois la section définie et en fonction de l'infrastructure existante, les travaux peuvent concerner l'unique voie présente, ou bien dans le cas de lignes à deux voies, l'une, l'autre ou les deux voies. Dans ce deuxième cas, chacune des voies est identifiée par la lettre A ou B. La voie concernée est donc soit A, soit B, soit A+B (A et B en même temps) ou A/B (A et B en alternance, l'une ou l'autre étant en permanence disponible).

De même, le moment où les travaux ont lieu est lui-aussi variable : il est possible qu'ils aient lieu durant toute la semaine ou seulement pendant une partie de celle-ci. Il en va de même pour le moment de la journée : en continu ou seulement pendant un moment de la journée.

Les caractéristiques précitées permettent de dégager le concept de coupure de travaux. Un concept connexe est la coupure « Pas de travaux ». Celle-ci ne diffère de la première que par son impact sur le réseau : la section désignée doit rester disponible afin de ne pas bloquer la circulation sur le réseau.

Enfin, le statut permet la communication entre les acteurs et le suivi des demandes de coupures.

3.1.2 Analyse de l'existant

Le cœur de CoLT consiste en une application de création, modification et suppression d'un concept central : la coupure.

Sur le plan technique, CoLT consiste en une single-page app codée en AngularJS. Le backend est quant à lui assuré par une API REST en .Net. Les données sont pour leur part stockées dans une base de données PostgreSQL.

Sur le plan process (voir diagramme de contexte à la Figure 16), l'ingénieur responsable des travaux (ou Project Leader) initie le processus de demande de coupure. Lors de la création, l'ingénieur encode la localisation de ses travaux dans les champs relatifs à la localisation. La validation du formulaire est principalement syntaxique et non orientée métier : le système n'effectue pas de traitement sur le bienfondé d'une coupure. En cela, le système se montre souple. Il est à noter que les planificateurs ont eux aussi la possibilité de créer des coupures à la manière de super user : ils ont la main sur tous les champs disponibles, sans devoir passer par chacune des étapes du processus.

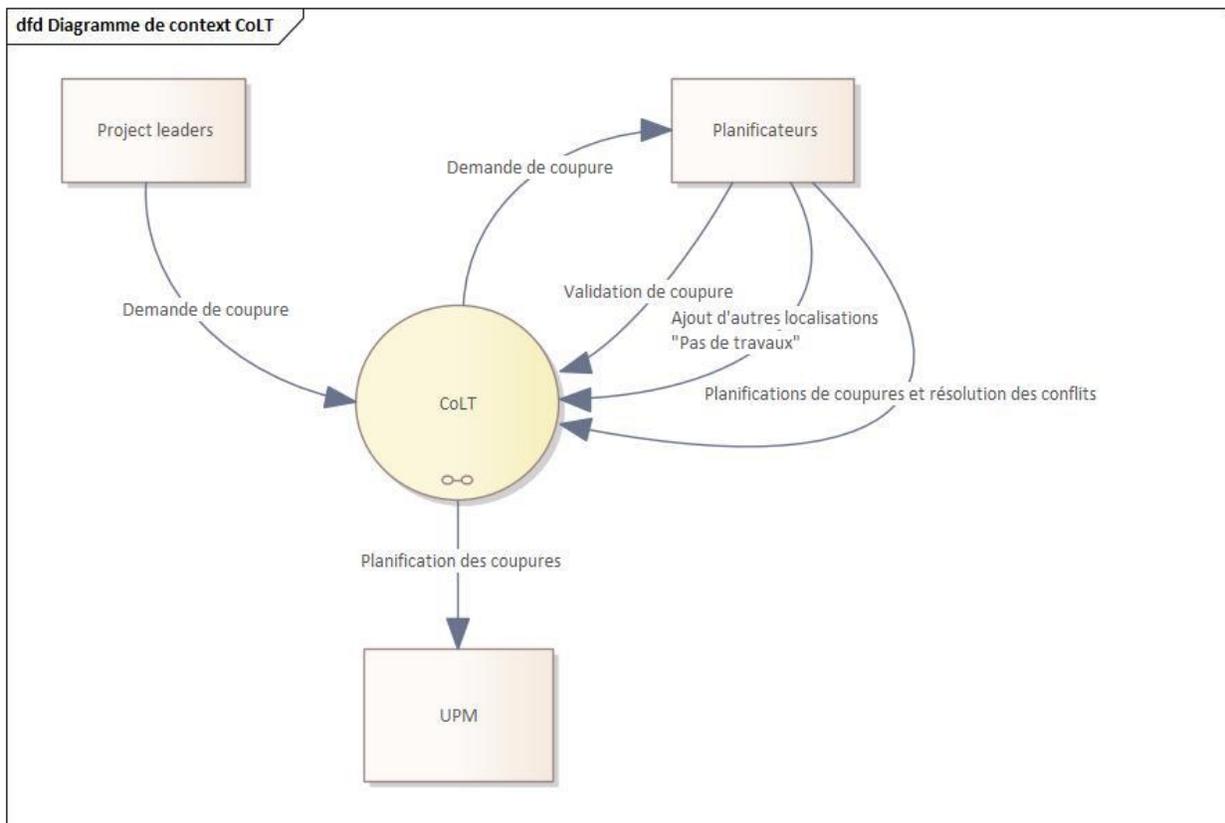


Figure 16 : Diagramme de contexte de CoLT

Une fois la coupure créée, le rôle de l'ingénieur devient passif : il suit uniquement l'évolution du statut de sa coupure. Ainsi, il reçoit chaque jour un mail récapitulatif des changements apportés aux coupures qu'il a demandées. Au terme du processus, le statut sera soit l'acceptation, soit le refus.

Sitôt la coupure créée, les planificateurs l'examinent et déterminent si elle est compatible avec les autres coupures déjà prévues. Cette vérification se fait de façon manuelle. Afin de proposer un support à cette tâche, CoLT propose une visualisation des coupures par ligne (aussi appelée axe, Figure 17).

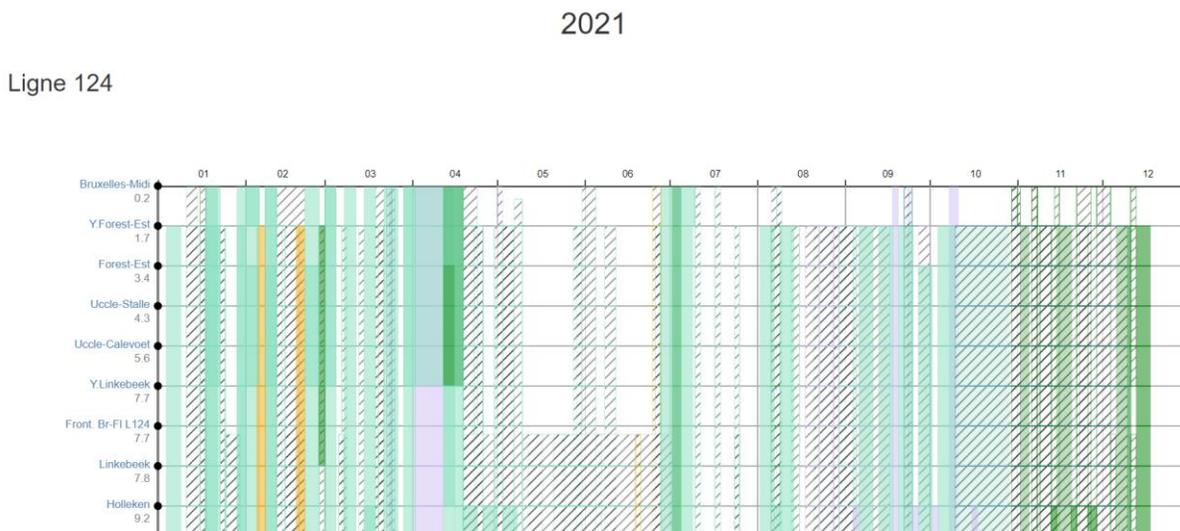


Figure 17 : exemple de visualisation Axe. On distingue les coupures « Pas de travaux » hachurée et les coupures de travaux pleines.

Cette visualisation prend en abscisse le temps et en ordonnée la ligne et les différentes sections qui la composent. Les coupures sont représentées comme des rectangles occupant une partie de la ligne pendant une certaine période. Le remplissage de ce rectangle indique l'impact de la coupure : les « Pas de travaux » sont représentées hachurées, tandis les autres impacts sont représentés par un rectangle plein. La couleur de ce rectangle détermine l'impact précis : CTL, SAVU etc.

En complément de cette visualisation incluse dans l'outil CoLT, les utilisateurs ont aussi créé un outil géographique sous la forme d'un projet reposant sur le logiciel d'information géographique QGIS¹ (Figure 18). Ce projet représente le réseau ferroviaire belge (càd les lignes ferroviaires) ainsi que les couloirs utilisés par le transport marchandise. Il est ensuite possible de sélectionner une date et de visualiser les coupures actives à cette date grâce à des traits colorés placés sur les sections de voie concernées. Un code couleur permet de distinguer les différents types de coupure. De plus, le style de trait correspond à la phase.

¹ <https://www.qgis.org>

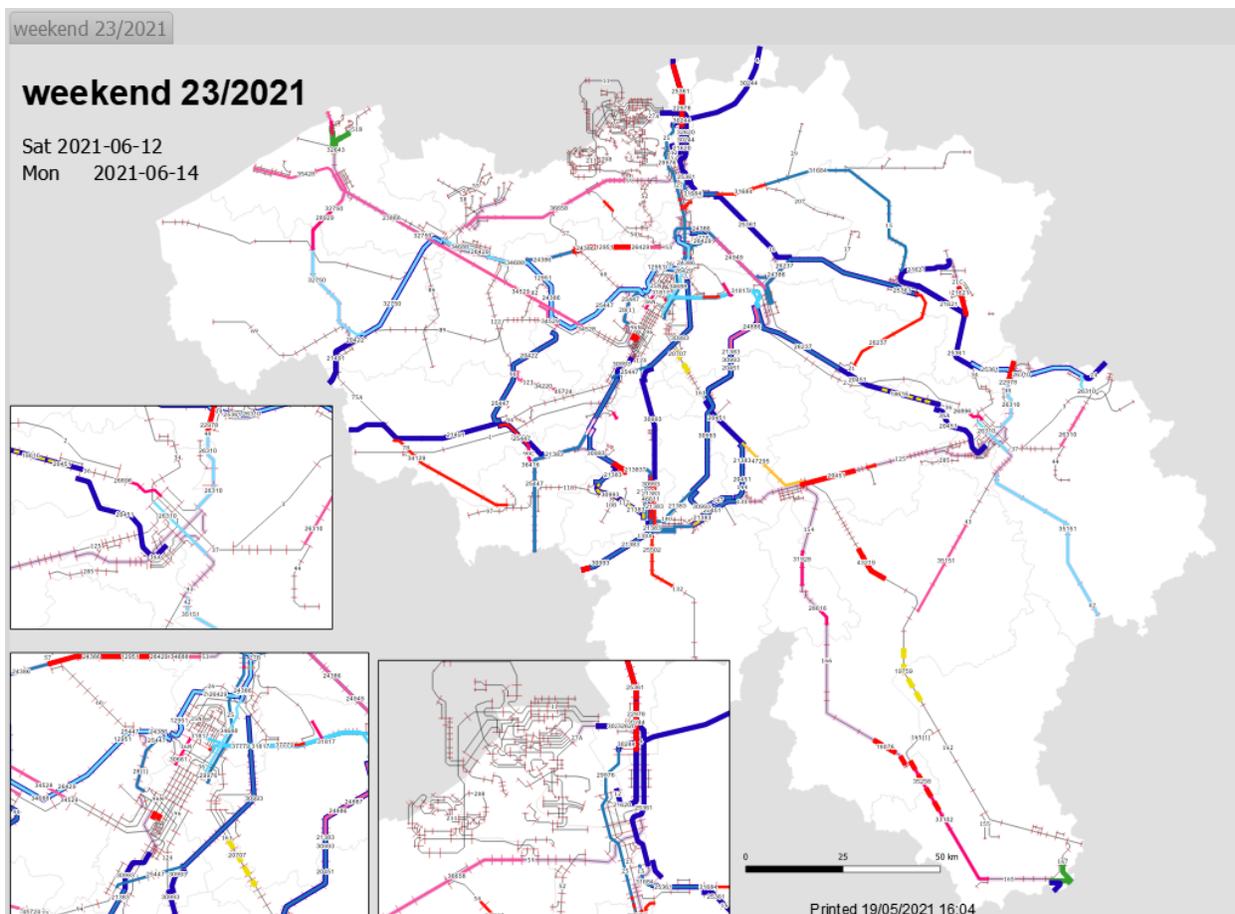


Figure 18 : l'outil de visualisation géographique des coupures dans CoLT, développé par les utilisateurs.

Si la coupure est compatible, les planificateurs déterminent si un itinéraire de détournement est nécessaire ou pas. Cette tâche repose sur l'expérience du planificateur et n'est pas automatique. Dans l'éventualité où un itinéraire de détournement est nécessaire, les planificateurs l'encodent dans CoLT. Cet encodage prend la forme d'une série de coupure « Autres localisations » : ce sous-type de coupure est lié à la coupure « principale » et ne comprend que deux attributs : l'impact et la localisation concernée. A nouveau, cette tâche est manuelle et repose sur l'expérience du planificateur.

3.2 Analyse des besoins et implémentation

L'objectif du cas pratique développé dans ce mémoire est double : fournir une prise en compte visuelle des données de trafic (pas encore implémentées dans CoLT mais prises en considération via l'expérience des planificateurs) et faciliter la gestion des conflits et détournements.

L'objectif n'est pas de fournir un système entièrement automatique : la complexité de la tâche et les arbitrages à effectuer en cas de conflit sont difficiles à automatiser. De surcroît, l'infrastructure recèle des limitations qui ne sont pas toutes considérées dans CoLT : les limitations du poids des trains, l'électrification des lignes etc. Il s'agit donc de développer un système d'aide à la décision.

3 fonctionnalités ont été développées dans ce sens :

- la prise en compte du trafic lors de la planification d'une coupure ;
- la recherche historique de détournements pour des coupures comparables ;
- la détermination d'itinéraires de détournement et le routing ferroviaire.

Pour chacune de ces fonctionnalités, l'objectif poursuivi est explicité et détaillé. Ensuite, les choix d'implémentation sont présentés et discutés.

Il est à noter que les fonctionnalités développées ici l'ont été en étroite collaboration avec des utilisateurs métier. L'objet de ce travail est donc de fournir une solution informatique répondant à leurs besoins davantage que de proposer une nouvelle approche à la planification à long terme de travaux d'infrastructure ferroviaire.

3.2.1 Fournir une représentation des données de trafic lors de la planification d'une coupure

3.2.1.1 Objectif

Ce premier aspect vise à offrir une prise en compte des données de trafic lors de la création d'une nouvelle coupure.

D'un point de vue business, le besoin pour cette fonctionnalité provient du constat d'une inefficacité : il est parfois possible de prévoir des coupures qui prennent place à un moment où aucun train n'est prévu. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir accès aux données du trafic prévu.

3.2.1.2 Implémentation

Les données de trafic sont réparties par saison. Une saison correspond à un plan de transport, c'est-à-dire à une « année Infrabel ». Par cela, on entend une période proche d'une année calendrier mais très légèrement décalée (par exemple du 10 décembre au 9 décembre). Deux saisons ont été publiées : elles contiennent donc les données de trafic au maximum pour les deux prochaines années.

Ces données prennent la forme de fichiers correspondant chacun à un train. Pour chaque train, une liste de points de passage et les horaires prévus pour chacun d'eux sont fournis. Quant aux jours concernés, ceux-ci sont fournis via un vecteur de 365 (ou 366) valeurs booléennes, chacune d'elles correspondant à 1 jour de la saison.

Un tel format de données est particulièrement éloigné du résultat que nous voulons en extraire : vérifier l'absence de train à un lieu et un moment donnés.

Dès lors, pour cette première fonctionnalité, le pipeline de données proposé par [Chen et al.] semble adapté dans la mesure où il met l'accent sur le préprocessing, qui occupera une place importante pour réaliser cette fonctionnalité et combler le fossé entre le format de l'input et celui de l'output.

Les données sont tout d'abord parsées et introduites dans une base de données structurée (Figure 19). Celle-ci est mise en lien avec le format de désignation des lieux de travaux utilisés dans CoLT – les sections. Cette mise en relation permet donc de déterminer quels trains passent à un moment donné sur un tronçon du réseau. Ces données en question sont présentées sous la forme de l'occupation, pendant une durée donnée, d'un tronçon. Cette durée est caractérisée par une heure de début et une heure de fin. Ces données sont donc présentées de façon cyclique dans la taxonomie de [Frank].

De plus, afin d'éviter de devoir réinterpréter le vecteur indiquant les jours où le train roule effectivement, cette donnée est extraite à part entière dans une table. Ainsi, pour chaque jour où un train est prévu, un record est créé dans la table « Date de circulation ». Cela permet d'augmenter grandement l'efficacité des requêtes et les opérations sur le vecteur, lesquelles seraient de nature à ralentir significativement le système. Il est également à noter que les dates ainsi reconstituées correspondent à la représentation linéaire du temps dans la taxonomie de [Frank].

De plus, chaque train a un opérateur. L'opérateur correspond au client d'Infrabel qui a acheté un sillon qu'il peut emprunter sur le réseau. Dans le cas présent, cette information nous permet également de déterminer la nature du train : les trains opérés par la SNCB, l'opérateur belge du transport passager, sont considérés comme des trains de voyageurs, tandis que les autres sont assimilés à des trains de marchandises.

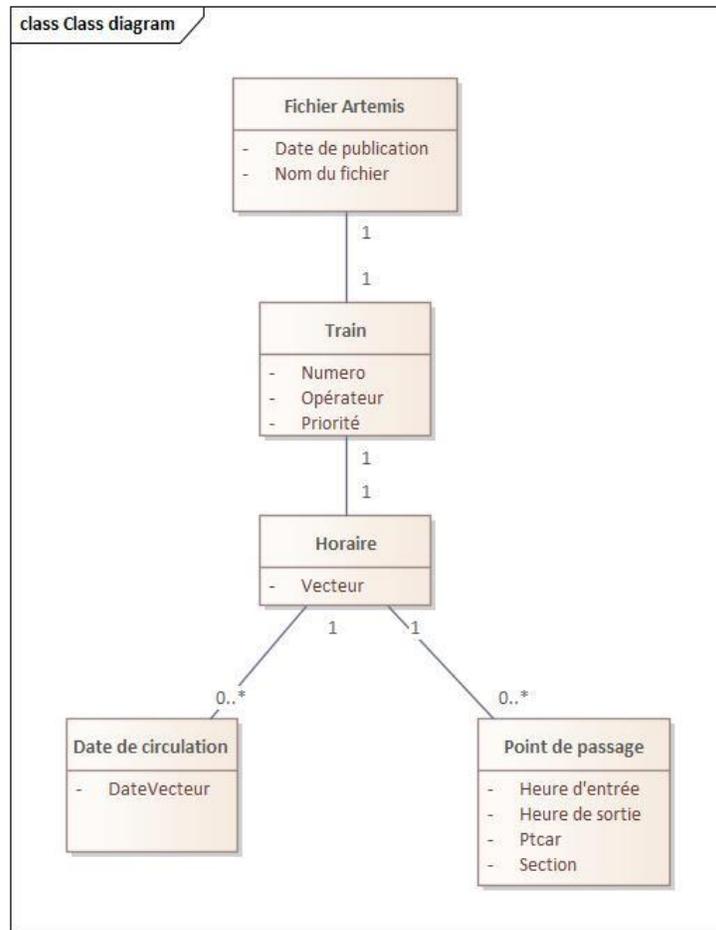


Figure 19 : diagramme de classe de la structure de données utilisées pour représenter la circulation des trains

Dans la mesure où la visualisation de ces données s'adresse à la fois aux ingénieurs responsables de travaux et aux planificateurs, celle-ci se doit d'être simple et lisible. A cette fin, la représentation du métro de Boston de [Barry et al.] semble adaptée tant au format de données qu'à l'objectif poursuivi.

Le visuel proposé prend donc la forme d'un graphe (Figure 20). L'axe vertical correspond au temps, tandis que l'axe horizontal correspond à la ligne concernée par la coupure. Il est à noter que dans la mesure où seule une ligne est considérée et où les Y n'existent pas au niveau « ligne » sur le réseau Infrabel, nous ne devons pas gérer ce cas particulier comme [Barry et al.] avaient dû le faire. Par Y, nous entendons ici la séparation d'une ligne en (au moins) 2 branches.

Le symbole choisi pour représenter un train est un trait représentant sa progression sur la ligne au fur et à mesure du temps.

Quant à la coupure, nous reprenons la symbologie de la vue Axe déjà existante : une coupure est représentée par un rectangle indiquant le tronçon et le moment concernés.

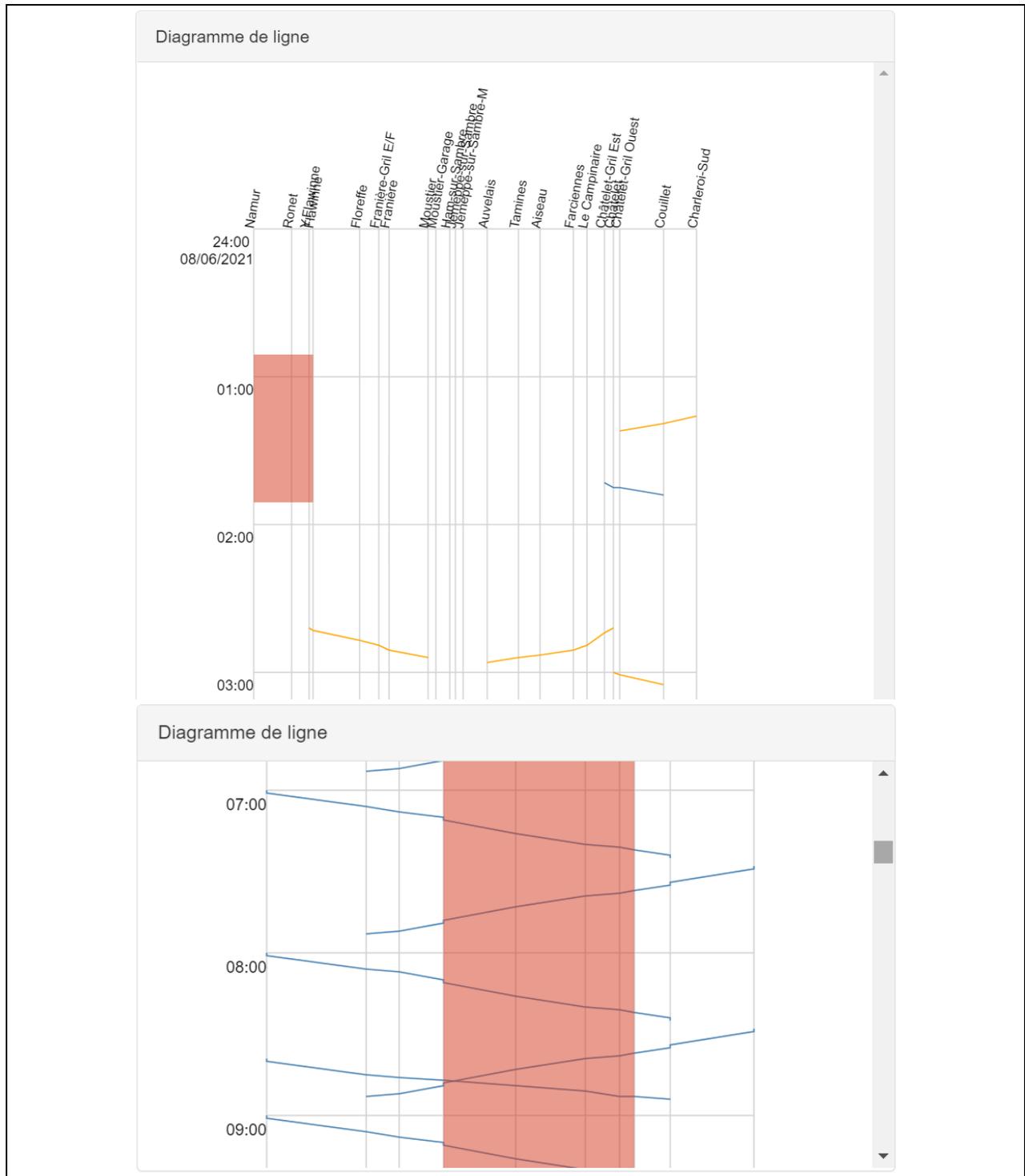


Figure 20 : diagrammes de ligne et représentation d'une coupure. En dessous, on distingue aisément les trains impactés par la coupure.

Cependant, un cas de figure est problématique avec cette visualisation : les données proposées couvrent l'ensemble de la coupure. Or dans le cas de coupures particulièrement longues, la quantité de données à représenter est à la fois trop importante à récupérer (et provoque donc une latence significative) mais aussi à représenter : la visualisation s'étire en longueur à tel point qu'elle est inutilisable. D'autre part, d'un point de vue business, il semble illusoire de vérifier des dizaines voire des centaines de moments de coupure. Dès lors, une limite arbitraire de 7 jours maximum représentés simultanément a été mise en place.

Cependant, cette fonctionnalité de visualisation du trafic à elle seule s'avère être insuffisante pour satisfaire l'objectif recherché : il est en effet nécessaire de parcourir le visuel à la recherche d'un créneau disponible.

Afin de pallier cette limitation, un système de recherche de plage libre (Figure 21) est mis en place. L'objectif de ce système de recherche de plages libres est de rechercher un créneau disponible dans la masse de données. Ainsi, l'utilisateur est mené directement vers la section de la visualisation correspondant à ce qu'il cherche.

Ce système prend deux paramètres : le nombre d'heures souhaitées et le nombre de jours consécutifs. Par exemple, une coupure de 2 jours pendant 4 heures est à comprendre comme 2 jours consécutifs lors desquels la coupure sera effective pendant 4 heures. Les 20 heures restantes, la coupure ne sera pas effective.

L'output prend la forme d'une liste de créneaux disponible. Cette liste est filtrée en fonction des paramètres de recherche. Pour chacun des résultats, il est possible de le visualiser à l'aide d'un diagramme de ligne (et donc d'avoir un zoom sur la partie de la visualisation concernée), ainsi que de le sélectionner. Cette deuxième option permet de remplir automatiquement les champs concernés dans le formulaire de la coupure.

Recherche de plage libre

Nombre de jours
Nombre d'heures

Date de début	Heure de début	
25/05/2021	21:57	Sélectionner / Visualiser
01/06/2021	21:57	Sélectionner / Visualiser
08/06/2021	21:57	Sélectionner / Visualiser
15/06/2021	21:57	Sélectionner / Visualiser
22/06/2021	21:57	Sélectionner / Visualiser

Figure 21 : le formulaire de recherche de plage et les résultats proposés

Cependant, le format de données utilisé jusqu'ici se montre à nouveau inapproprié pour une telle recherche de plage libre : calculer à la volée le temps disponible entre des trains sur un tronçon donné pour une période allant jusqu'à deux ans requiert un traitement significatif. Cette solution n'est donc pas envisageable.

Afin de limiter l'impact d'un tel traitement sur le temps de latence perceptible par l'utilisateur, la représentation en base de données a été complétée par une vue matérialisée contenant la durée des plages libres pré calculée. La vue matérialisée est un objet ayant à la fois les propriétés d'une vue en lecture mais dont la représentation n'est pas virtuelle, mais matérielle. De fait, la lecture des données contenues dans cet objet ne requiert aucun calcul supplémentaire et est dès lors nettement plus rapide.

La seule limitation liée à l'utilisation d'une telle vue matérialisée est l'impossibilité de paramétrer le calcul au vol. Concrètement, il n'est pas possible de spécifier un tronçon précis dans la requête, à moins de calculer tous les tronçons possibles. Une telle approche est inenvisageable tant les combinaisons possibles sont nombreuses.

La solution adoptée est donc intermédiaire : les plages libres calculées dans la vue matérialisée le sont par paire de points de passage contigus. Dans la mesure où une recherche porterait sur un tronçon de voie contenant plusieurs de ces paires, la réunion de celles-ci se fait au vol. Cette solution semble acceptable comme

l'agrégation de données effectuée par la vue matérialisée permet de n'avoir plus à manipuler au vol qu'une quantité nettement réduite de données.

3.2.2 Suggestion d'itinéraires de détournements

3.2.2.1 Objectif

Le deuxième aspect abordé dans le cadre de ce cas pratique est celui de la détermination d'itinéraires de détournement. Comme expliqué dans le contexte métier, tant la nécessité de tels itinéraires que leur mise en place sont confiés à l'expérience des planificateurs.

En termes de forme, un itinéraire de détournement est composé d'un à plusieurs tronçons de voie. Ceux-ci ne sont pas nécessairement contigus.

Aussi, les coupures ont tendance à se répéter de saison en saison, et les itinéraires de détournement associés sont stables. Le besoin prend donc la forme d'un système tirant parti de la connaissance disponible dans l'historique des données.

Afin d'augmenter l'efficacité d'utilisation de CoLT, il s'agit de proposer des facilités de saisie des itinéraires alternatifs.

3.2.2.2 Implémentation

De prime abord, l'implémentation de cette fonctionnalité semble triviale : il s'agit d'une simple agrégation de l'historique des données afin d'en extraire les tronçons composant les itinéraires alternatifs les plus empruntés. Le résultat (Figure 22) constitue la liste de suggestions. Par facilité, elle est classée par nombre d'occurrences décroissant.

Cependant, CoLT ne permet d'encoder les itinéraires alternatifs que comme un set de tronçons de voie. Ces données ne sont donc pas ordonnées pour former un itinéraire continu. De même, dans l'éventualité où plusieurs itinéraires distincts seraient nécessaires, cette particularité n'est aucunement reflétée dans le set de tronçons. Enfin, aucune garantie n'est disponible quant au fait que les différents tronçons impliqués soient contigus.

Ce format de données rend difficile l'interprétation automatique des résultats. Cette limitation n'est cependant pas traitée plus en avant dans le cadre de ces développements.

D'autre part, tous les tronçons proposés ne sont pas nécessairement libres au moment souhaité : il est possible que des travaux y soient déjà prévus, les rendant de fait indisponibles. A l'inverse, il est aussi possible qu'un tronçon soit déjà utilisé dans un itinéraire alternatif relatif à une autre coupure (alors marqué avec l'impact

« Pas de travaux »), ce qui exclut d'office la possibilité que des travaux y prennent place.

Afin de récupérer ces informations, chaque tronçon figurant dans la liste de suggestions est croisé avec les coupures déjà prévues au moment et lieu concernés. Les coupures ayant un impact incompatible au même moment constituent les conflits, et les coupures ayant un impact compatible constituent les matches. Ce résultat est également fourni à titre indicatif aux planificateurs.

Coupure 151934

Autres localisations suggérées

Recherche sur base de : Mêmes sections Mêmes BKs Même voie

Ligne	Voies	Section de début	BK début	Section de fin	BK fin	Impact	Matching	Sections	Nombre de records	
97	A+B	MONS	40300	SAINT-GHISLAIN	49493	Pas de travaux	151582 151583 144400		16	<input type="checkbox"/>
96	A+B	MONS	40300	JURBISE	48600	Pas de travaux	0 X / 3 ✓		7	<input type="checkbox"/>
118	A+B	Y.SAINT-VAAST	21300	MONS	39900	Pas de travaux	0 X / 0 ✓		6	<input type="checkbox"/>
112	A+B	Y.SAINT-VAAST	21300	MARCHIENNE-AU-PONT	2500	Pas de travaux	0 X / 0 ✓		3	<input type="checkbox"/>
96	A+B	MONS	40300	JURBISE	48600	Pas de travaux	0 X / 0 ✓		3	<input type="checkbox"/>

Terminer

Figure 22 : le résultat de la recherche de tronçons de détournement dans l'historique. On distingue le popover présentant les coupures matching de l'un des tronçons proposés

La visualisation de ces informations n'a pas été spécifiquement développée car elle existait déjà dans la vue Axe : une situation de conflit correspond à la superposition de deux rectangles, l'un étant hachuré et l'autre étant plein. Une situation de match correspond à la superposition de deux rectangles ayant le même type de remplissage : tous les deux pleins ou tous les deux hachurés.

3.2.3 Routing ferroviaire

3.2.3.1 Objectif

La fonctionnalité de représentation des données de trafic au moment de la coupure permet de déterminer si le trafic sera impacté au moment de la coupure. Si tel est le cas, un itinéraire alternatif est nécessaire. Dans l'éventualité où d'autres coupures similaires auraient déjà existé dans le passé, l'historique peut être utilisé pour déterminer celui-ci. Cependant, dans le cas où aucune coupure ne correspondrait dans l'historique, cette dernière fonctionnalité permet d'aider à déterminer malgré tout un itinéraire alternatif.

Il s'agit donc de développer une couche de routing se comportant comme un GPS. De surcroît, cette couche doit permettre de moduler le réseau au gré des coupures, et donc de retirer dynamiquement les tronçons fermés des itinéraires praticables.

3.2.3.2 Implémentation

De par l'organisation d'Infrabel, cette fonctionnalité de routing a été développée par l'équipe dédiée GIS, tandis que l'adaptation de cette fonctionnalité pour prendre en compte ces coupures est quant à elle rentrée dans le scope de ce cas d'étude.

La fonctionnalité de routing ferroviaire prend la forme d'un web service ArcGIS² implémentant l'interface de routing ArcGIS : les lignes et leurs coordonnées sont prises en compte, ainsi que les jonctions entre ces lignes. Les vitesses maximales sur les lignes ne sont pas prises en compte. De fait, l'itinéraire retourné par le service est le plus court.

Le niveau de représentation considéré est le niveau microscopique de [Goverde et al.]. Le réseau a la particularité d'avoir des jonctions déduites des coordonnées de voies : lorsqu'un tronçon en rencontre un autre, une jonction a été déduite. Il est également à noter que le réseau a été reconstitué en deux dimensions par l'équipe GIS mais en considérant tout de même les z-values. De fait, les croisements multi niveaux ne sont à juste titre pas considérés comme des jonctions.

Pour la prise en compte des coupures, l'interface de routing ArcGIS prend nativement en compte des « barriers » : il s'agit de coordonnées par lesquelles l'itinéraire ne doit pas passer. Ces coordonnées peuvent être au format de points, polygones (succession de segments) ou de polygones. Le système prend cependant en compte une zone autour de ces points « barriers ». Dans certains cas, cette zone peut s'avérer problématique : c'est notamment le cas pour les croisements sur plusieurs niveaux (ponts), où le système considère erronément que tous les niveaux sont à exclure et non un seul.

Quant à la visualisation des itinéraires, celle-ci se fait naturellement sur une carte. Les informations affichées comprennent les areas (Infrabel est divisé en 5 areas correspondant chacune à une zone géographique), les lignes sous forme de routes et les principales gares ferroviaires. ArcGIS gère automatiquement et dynamiquement les informations à afficher afin de ne pas surcharger la carte. Ainsi par exemple, les petites gares ne sont affichées qu'avec un zoom important.

Les coupures sont quant à elles représentées sous la même forme que dans le projet Q-GIS déjà mis en place par les utilisateurs. Un code couleur est donc associé à chaque impact.

² <https://www.arcgis.com>

Au niveau de la spécialisation de ce service pour le cas d'utilisation de CoLT, les coupures à afficher sont récupérées au format GeoJson puis à la fois considérées comme polyline barriers pour le routing et affichées en surimpression sur la carte.

Des points de passage peuvent ensuite être ajoutés sur la carte pour déterminer un itinéraire. Dans l'éventualité où un itinéraire peut être déterminé, celui-ci est affiché sur la carte. L'itinéraire en lui-même n'est pas manipulable par l'utilisateur : seuls les points de passage permettent de le moduler. Dans l'éventualité où un itinéraire ne peut pas être trouvé, cette information est également fournie à l'utilisateur.

Cette fonctionnalité est utilisée de deux façons.

La première vise à fournir une indication géographique d'une coupure en particulier, ainsi que des « Autres locations » liées à cette coupure (Figure 23). Il s'agit donc de localiser l'impact d'une unique coupure sur le réseau.

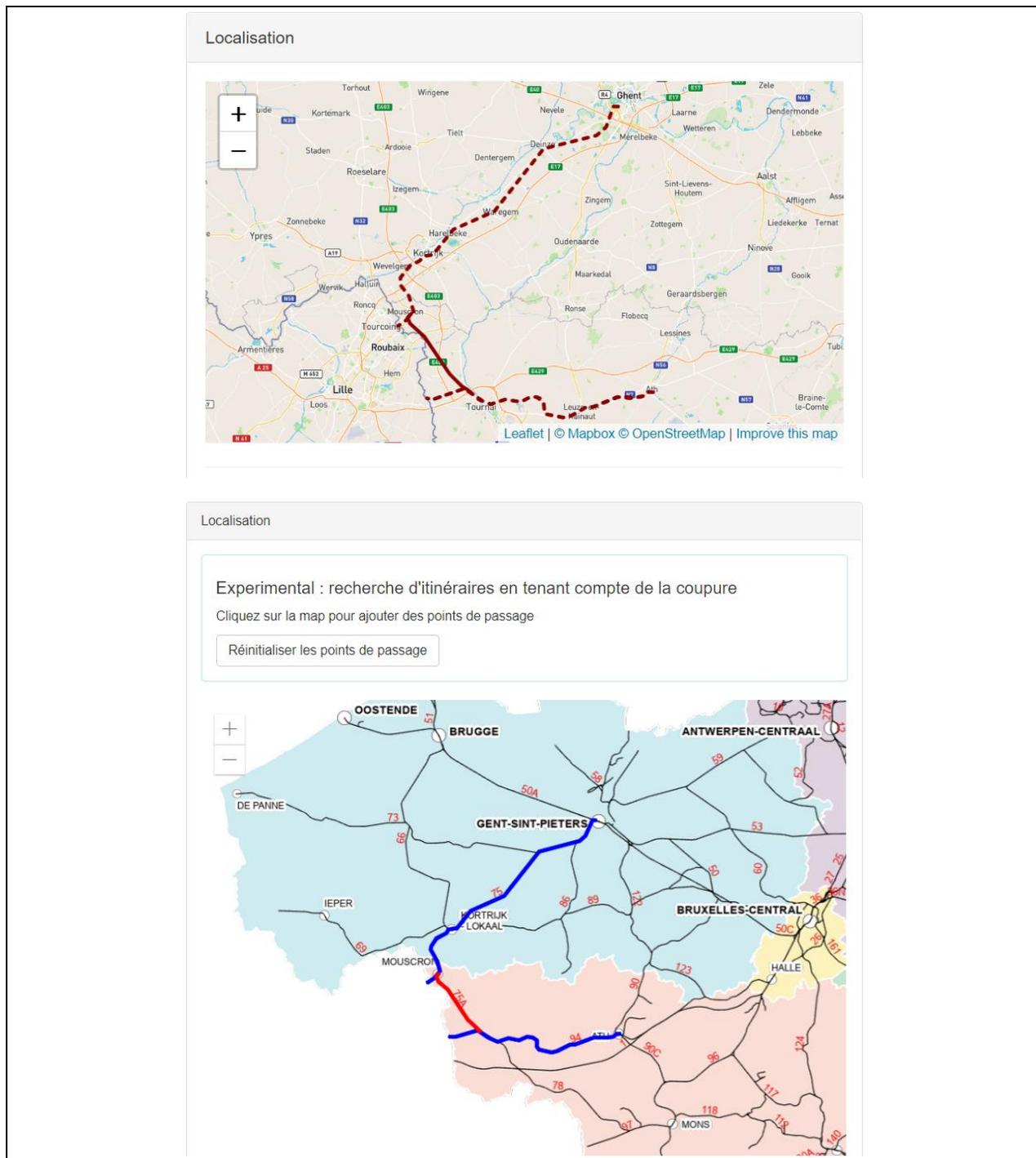


Figure 23 : en haut, la carte Open Street Map anciennement proposée dans CoLT pour la visualisation d'une coupure. En bas, la carte ArcGIS proposée dans ce cadre de ces développements.

Quant à la seconde, l'objectif est de permettre la visualisation de toutes les coupures actives à un moment donné (Figure 24). Il s'agit donc ici d'une vue globale. La possibilité de recherche d'itinéraire y trouve donc davantage d'intérêt dans la

mesure où elle permet de s'assurer de l'existence d'un chemin entre deux points frontières devant impérativement rester accessibles, ou encore de déterminer s'il est possible de se faufiler entre les coupures pour rejoindre un point donné.

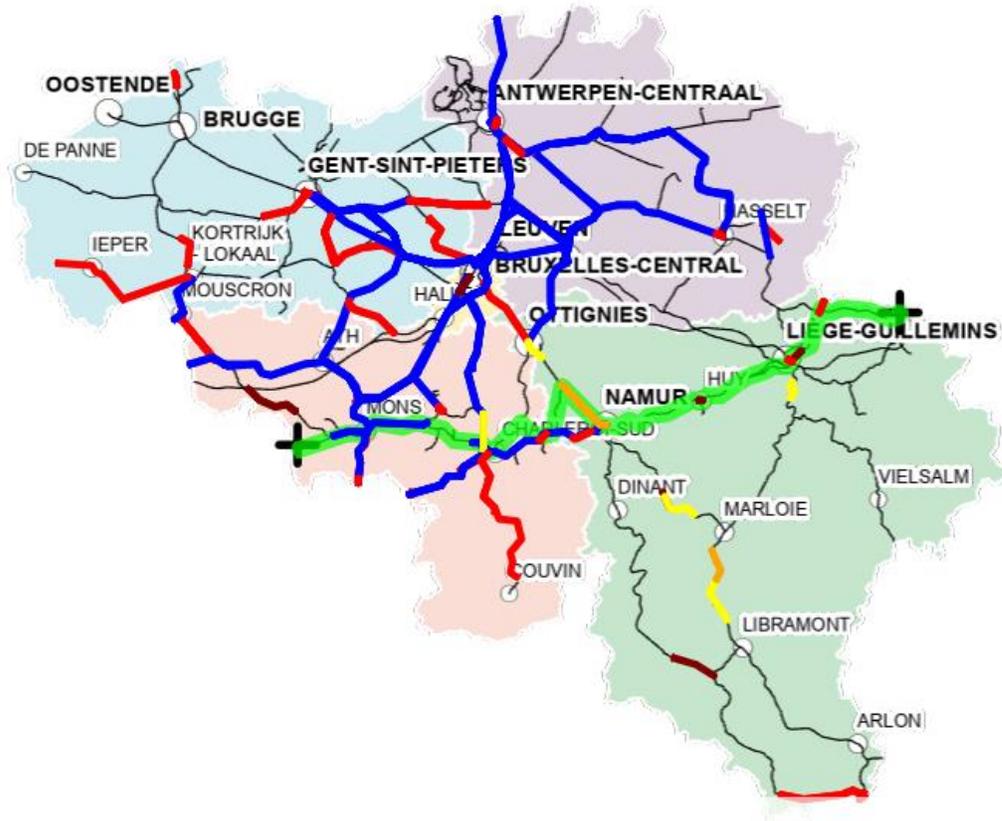


Figure 24 : la vue du réseau à une date donnée. On distingue en vert fluo un itinéraire déterminé entre deux points frontières, qui évite les coupures totales de lignes (CTL, en rouge) qui bloquent entièrement le trafic sur le tronçon concerné.

3.3 Evaluation du résultat

Le protocole d'évaluation des développements effectués sur l'application CoLT a pris la forme d'un test utilisateur. Cet utilisateur était familier de l'utilisation de CoLT en tant que planificateur. Il n'avait cependant pas connaissance des changements apportés à l'outil.

Le test reposait sur trois cas pratiques nécessitant chacun l'usage d'une des fonctionnalités développées. Chaque cas a pris la forme d'une tâche à effectuer avec l'outil :

- La planification d'une coupure ;
- La détermination d'un itinéraire de détournement avec correspondance dans l'historique ;

- La détermination d'un itinéraire de détournement sans correspondance dans l'historique.

L'utilisateur était invité à verbaliser sa pensée lors du test. Tant les fonctionnalités que l'interface proposée ont été considérées pour ce test. Enfin, afin de capturer aussi la satisfaction globale de l'utilisateur, le test UEQ (User Experience Questionnaire) a été proposé.

3.3.1 Tâche 1 : planification d'une coupure et impact sur le trafic

La première tâche proposée dans le cadre de ce test utilisateur consiste en la planification d'une coupure avec une contrainte particulière : celle-ci ne doit avoir aucun impact sur le trafic prévu. L'objectif est que l'utilisateur utilise le système de recherche de plage libre et confirme cela grâce au diagramme de ligne.

Nous notons tout d'abord que l'ordre dans lequel l'interface présente l'information tend à faire dévier l'utilisateur du processus tel qu'il a été conçu. Ensuite, le fait que l'interface présente le diagramme de ligne sans nécessiter d'action de la part de l'utilisateur tend là aussi à embrouiller celui-ci. Cependant, malgré ces 2 problèmes d'interface identifiés, l'utilisateur parvient à accomplir la tâche avec succès. De même, il parvient également à comprendre ce que représente l'information proposée.

3.3.2 Tâche 2 : détermination d'un itinéraire de détournement avec correspondance dans l'historique

La deuxième tâche proposée à l'utilisateur était l'encodage d'un itinéraire de détournement « classique » sur une coupure demandée par un ingénieur responsable de travaux. Par détournement « classique », on entend un itinéraire fréquemment utilisé en cas de besoin d'un itinéraire de détournement. Il était donc attendu de l'utilisateur qu'il sélectionne cet itinéraire « classique ».

Cette tâche permet de mettre en avant 2 soucis, l'un fortuit et l'autre inhérent à l'interface proposée. Le premier réside dans le fait que la faible taille de l'écran utilisé pour le test fait en sorte que toute l'interface ne peut être affichée simultanément, obligeant l'utilisateur à scroller. Cet aspect est donc moins intuitif que s'il avait été possible de présenter toute l'information simultanément. Le second souci consiste en l'utilisation du terme « Nombre de records » pour indiquer à l'utilisateur le nombre d'occurrence de cette autre localisation dans l'historique. Cet élément n'a pour sa part pas été compris. Malgré cela, la tâche a elle-aussi pu être menée à bien.

3.3.3 Tâche 3 : détermination d'un itinéraire de détournement sans correspondance dans l'historique

Cette dernière tâche consiste en la recherche de possibles itinéraires de détournement à l'aide de la fonctionnalité de routing. Elle comprend une situation où un tel itinéraire est possible et une autre où un tel itinéraire ne l'est pas.

L'interface proposée semble être rapidement comprise par l'utilisateur. Le seul problème que nous notons ici est l'absence de distinction entre le message de non-reconnaissance d'un point sélectionné (car il ne correspondrait à aucune ligne) et celui d'absence d'itinéraire. Cela mène l'utilisateur à essayer à de multiples reprises de trouver un itinéraire pour la situation où il n'en existe aucun. Malgré ces multiples essais, l'utilisateur parvient malgré tout à la conclusion escomptée par cette tâche.

3.3.4 User Experience Questionnaire

Afin d'évaluer la pertinence de la solution proposée et son adéquation avec les besoins des utilisateurs, le User Experience Questionnaire [Laugwitz et al.] a été proposé au terme des 3 tâches à réaliser. Ce test permet d'objectiver 6 aspects de l'expérience utilisateur :

- L'attraction (l'impression générale par rapport à l'interface proposée)
- La compréhensibilité (la facilité d'apprentissage du système)
- L'efficacité (la vitesse à laquelle les utilisateurs peuvent effectuer les tâches souhaitées avec le système)
- La contrôlabilité (le sentiment de sécurité ressenti lors de l'utilisation du système, ainsi que sa prédictibilité)
- La stimulation (l'excitation et la motivation à utiliser le système)
- L'originalité (la créativité et la capacité à susciter l'intérêt de l'utilisateur)

L'échantillon considéré pour ce test est limité à un seul utilisateur. Dès lors, il est évident que la valeur statistique d'un tel échantillon est nulle. Cependant, nous pensons néanmoins que ce test peut s'avérer intéressant dans la mesure où il a été proposé à un utilisateur régulier de l'application CoLT. Cet utilisateur est en cela représentatif des utilisateurs cibles et de leurs attentes. De plus, ce test nous permet d'avoir l'opinion d'un utilisateur extérieur aux développements et n'ayant pas été impliqué dans le projet jusqu'ici. Nous estimons donc que son opinion nous offre un autre regard sur la pertinence de ces développements guidés par des représentants de ces mêmes utilisateurs cibles.

Les résultats du test UEQ sont présentés à la Figure 25. Le détail de chacun des 26 items est quant à lui en annexe.

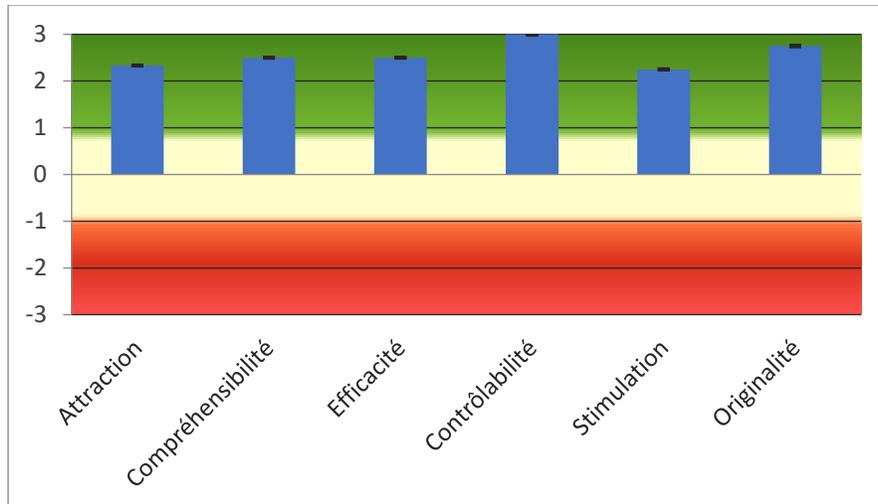


Figure 25 : résultats du test UEQ

Chacun des 6 critères analysés par le UEQ reçoivent une appréciation très positive. Les notes attribuées vont de 2,25 à 3 sur l'échelle du UEQ, qui s'étend de -3 à 3.

Nous les présentons par ordre décroissant de score.

3.3.4.1 Contrôlabilité

La contrôlabilité est à son maximum (3 sur l'échelle de -3 à 3). De fait, l'utilisateur se sent en sécurité lors de l'utilisation du système et ne craint pas de graves conséquences à une erreur de manipulation de l'interface. La contrôlabilité nous indique également que l'utilisateur considère le système comme étant prévisible, présentant une information semblable dans les différents cas d'utilisation rencontrés.

Les éléments apportés par ce premier critère nous laissent penser que la prise en compte des données de trafic est de nature à apporter une plus-value significative dans la perception que l'utilisateur a du logiciel. De plus, cette prise en compte est de nature à renforcer la confiance de l'utilisateur envers le logiciel.

3.3.4.2 Originalité

L'originalité (2,75 sur l'échelle de -3 à 3) est également mise en avant par l'utilisateur. Par cela, on entend le caractère innovant de l'interface proposée par rapport à d'autres outils permettant d'accomplir des tâches similaires ou proposant la visualisation de données de nature semblable. Le seul item en retrait dans la constitution de l'originalité est la modernité de l'interface. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de Bootstrap 3 dans l'interface générale de CoLT, et par souci de cohérence dans les nouvelles fonctionnalités proposées également. L'appréciation demeure cependant assez haute, laissant apparaître que cela n'est pas problématique outre mesure.

3.3.4.3 Compréhensibilité

Les deux critères apparaissant ensuite à égalité sont la compréhensibilité et l'efficacité (2,50 sur l'échelle de -3 à 3).

La compréhensibilité comprend tout d'abord la facilité à s'approprier l'interface proposée. De même, elle permet aussi de capturer la simplicité de l'interface. L'un et l'autre de ces aspects obtiennent la note maximale de la part de l'utilisateur. En effet, il est apparu également lors de chacune des tâches que l'utilisateur comprenait très rapidement l'information proposée et sa signification, et parvenait très rapidement à jongler avec l'interface.

En revanche, deux items sont légèrement moins bien notés : la compréhensibilité et la clarté. Le premier peut s'expliquer par exemple par l'un des aspects rencontrés lors de la 2^{ème} tâche qui incluait la présentation d'une recherche dans l'historique des données de coupures. La présentation du résultat indique notamment le nombre d'occurrences rencontrées lors de la recherche avec le label « Nombre de records ». Le manque d'explications dans l'interface quant à cet égard avait déstabilisé l'utilisateur.

L'item de la clarté fait également baisser la note attribuée au critère de compréhensibilité. Cet aspect particulier peut aussi trouver son explication dans un élément survenu quant à lui lors de la première tâche. L'utilisateur cherchait alors à obtenir l'heure exacte à laquelle le tronçon concerné était libre. L'interface ne proposait cependant pas une lecture claire, réduisant l'utilisateur à estimer cette heure sur base de l'échelle. Une marque légendée sur l'axe ou un popup peuvent permettre d'améliorer cet élément.

3.3.4.4 Efficacité

A jeu égal avec la compréhensibilité, l'efficacité est elle plutôt bien notée par l'utilisateur (2,5 sur l'échelle de -3 à 3). Les items de l'efficacité et du pragmatisme obtiennent la note maximale de la part de l'utilisateur. Dans un logiciel professionnel tel que CoLT, l'efficacité est un critère essentiel. Le fait que l'utilisateur puisse atteindre son objectif aisément est donc un indicateur de l'utilité des fonctionnalités développées ici.

Les deux autres items de l'efficacité sont légèrement en retrait. Il s'agit de la rapidité et de la sobriété. L'un comme l'autre peuvent s'expliquer par les soucis rencontrés dans la fonctionnalité du diagramme de ligne. En effet, pour certaines lignes particulièrement longues et disposant d'une circulation dense, le temps de chargement peut être particulièrement long (plusieurs secondes). D'autre part, pour ces mêmes lignes particulièrement longues, la visualisation perd en lisibilité tant la concentration d'information est importante. Cela s'explique par un choix technique :

afin d'éviter de redessiner le visuel à chaque changement de taille d'écran, il a été décidé de fixer la largeur maximale du visuel. De fait, les longues lignes se voient comprimées sur cet espace maximal, le diagramme s'en trouvant surchargé.

3.3.4.5 Attraction

Le critère d'attraction atteint la valeur de 2,33 sur l'échelle de l'UEQ. De par la nature de l'outil proposé et son usage à caractère professionnel, cet aspect nous semble occuper une place secondaire par rapport notamment à l'efficacité.

Le résultat relativement bon qui ressort néanmoins sur ce critère nous laisse penser que l'interface proposée parvient à éviter l'écueil de provoquer l'ennui de l'utilisateur.

3.3.4.6 Stimulation

Le critère le moins bien noté par notre utilisateur est la stimulation : ce critère atteint une valeur de 2,25 (sur l'échelle UEQ de -3 à 3). Cette valeur reste néanmoins largement positive.

Au niveau des items composant le critère de stimulation, il est à noter que l'item ayant reçu l'appréciation la plus basse sur l'entièreté du test y figure. Cet item est celui du caractère captivant de l'interface proposée. A nouveau, le caractère professionnel de l'utilisation typique du logiciel est susceptible d'expliquer cet aspect.

Néanmoins, les trois autres items constitutifs du critère de stimulation sont quant à eux tout à fait favorables. En particulier, la valeur ajoutée et l'intérêt suscité par le système proposé ont l'un comme l'autre recueilli les faveurs de notre utilisateur. Ces deux éléments nous confortent dans l'idée que les développements proposés sont à la fois créateurs de valeur et utiles au cas d'utilisation étudié ici.

4 Perspectives et directions

Les fonctionnalités développées dans CoLT et présentées dans ce travail permettent de mettre en avant l'importance de la prise en compte du trafic dans la planification des coupures à long terme. La visualisation de ces données est de nature à en faciliter nettement la compréhension, tandis que la recherche au sein des données permet de satisfaire efficacement les besoins rencontrés par les utilisateurs.

Cependant, les fonctionnalités développées dans ce travail souffrent d'un certain nombre de simplifications qui entravent le déploiement de leur plein potentiel en situation réelle.

Tout d'abord, la notion de capacité n'a pas été prise en compte. Cette notion serait néanmoins utile à trois égards.

En effet, l'absence de prise en compte de la capacité dans la fonctionnalité de routing et détermination d'itinéraire pose un problème. Par exemple, dans un cas extrême où d'importants travaux auraient lieu simultanément et forceraient à l'utilisation d'un seul itinéraire de détournement, le système n'y verrait aucun souci. En effet, le seul souci pris en compte actuellement est l'existence d'un itinéraire, en ignorant la masse de trafic qui y serait détournée. De fait, un tel cas extrême est en pratique impossible à supporter pour le réseau. Cet aveuglement du système est donc une faiblesse en de tels cas.

Ensuite, l'absence de prise en compte de la capacité est également problématique lors de la recommandation d'itinéraire de détournements. En effet, il est à ce moment possible de déterminer quels sont les autres coupures qui utilisent déjà un itinéraire de détournement simultanément. Le système affiche cette information pour chaque coupure sous forme de « matching », en référant les coupures concernées. Cependant, le système ne propose actuellement aucune information quant à la capacité utilisée ou résiduelle du tronçon concerné. Seulement, un nombre élevé de matchings peut être compris comme un avertissement, tandis que la prise en compte de la capacité réelle du tronçon permettrait de détecter un éventuel dépassement.

Le troisième aspect faisant de la prise en compte de la capacité un élément intéressant est l'un des impacts possibles d'une coupure : le SAVU (Service A Voie Unique). Comme son nom l'indique, le SAVU ramène toute la circulation sur une seule voie et ne bloque donc pas totalement la circulation sur le tronçon concerné. En revanche, un SAVU a un impact significatif sur la capacité du tronçon en question. Or la fonctionnalité de routing et de détermination d'itinéraire considère donc les SAVU comme n'étant pas des barrières et permet donc de les inclure dans l'itinéraire proposé. Dès lors, l'absence de prise en compte de la capacité ignore la congestion que pourrait entraîner le détournement de trains via des SAVU, laquelle serait susceptible de mener à un dépassement de la capacité du tronçon.

La deuxième grande amélioration dont pourrait bénéficier le système proposé se situe au niveau du routing et de la détermination d'itinéraire. Cette fonctionnalité ne prend en effet pas en compte les limitations d'infrastructures qui peuvent empêcher l'utilisation de certains itinéraires. Par exemple, certains tronçons ont une limite de poids pour les trains qui les empruntent. D'autres sont trop inclinés que pour être empruntés par certains trains. La prise en compte de ces paramètres serait de nature à améliorer les résultats proposés.

De même, la vitesse possible sur chaque tronçon est pour l'instant ignorée par le système de routing et détermination d'itinéraire. Celui-ci se borne en effet à la

proposition du chemin le plus court et ne propose pas la possibilité de prendre le chemin le plus rapide.

Enfin, cette fonctionnalité n'est pas liée à celle de suggestion d'itinéraires alternatifs : l'interface ne permet pas de transformer les données visibles sur la carte en un set de tronçons à rajouter en « Pas de travaux ». Cette amélioration serait de nature à encore faciliter l'encodage de ces « Pas de travaux ». De même, elle permettrait d'offrir à l'utilisateur une vue sur les tronçons connexes parmi ceux proposés, tandis que le système se base actuellement sur la fréquence dans l'historique sans prise en compte des données géographiques.

Le troisième axe d'amélioration consiste en la visualisation de la simulation de l'entièreté du trafic sur le réseau. Nous avons vu jusqu'ici la visualisation du trafic sur des axes particuliers avec le diagramme de ligne. Comme expliqué précédemment, cette visualisation s'avère inadaptée dans le cas de longues coupures : la quantité de données à afficher est trop importante. De plus, cette vue n'offre pas d'information sur les lignes adjacentes potentiellement impactées. Afin de pallier ces soucis dans le cas de coupures longues, il apparaît qu'une vue consolidée serait adaptée. Par vue consolidée, on entend une vue agrégée des données de trafic sur une longue période, semblable à celle proposée par [Liu et al.] grâce à leur outil T-Drive. Une telle vue serait de nature à permettre de mieux appréhender et objectiver le trafic présent lors de telles coupures longues.

Enfin, comme évoqué à la section 3.3.4, le fait que le test UEQ n'ait été mené qu'avec un seul utilisateur constitue une faiblesse importante dans l'évaluation de nos résultats. Il serait dès lors intéressant de d'élargir l'échantillon considéré et ainsi déterminer si la pertinence des résultats engrangés est statistiquement confirmée.

5 Conclusion

Au terme de ce travail, nous avons tout d'abord pu voir la grande variété de visualisations existant pour représenter des données de trafic d'apparence similaire. Aussi, l'étude de la littérature relative à l'infrastructure ferroviaire nous a permis d'en saisir à la fois la complexité et les enjeux clés.

Avec les besoins du métier pour fil conducteur, nous avons ensuite pu mettre en avant l'utilité de la visualisation des données de trafic pour faciliter la planification de travaux. Cela a pu se faire en s'inspirant des visualisations de trafic existantes tout en les déclinant pour correspondre à notre contexte. De plus, nous avons mis en avant l'utilité de mécanismes de recherche pour gérer l'énorme masse de données à traiter.

Nous avons aussi pu mettre en avant le fait que les visuels adaptés à la visualisation du trafic ferroviaire dans le contexte de la planification de travaux étaient à la fois simples et proches de ceux présents dans la littérature : les diagrammes de lignes pour la représentation du trafic sur une période donnée ainsi que les représentations d'itinéraires sur des cartes du réseau pour aider à la détermination d'itinéraires de détournement. Ceux-ci constituent donc les visuels qui nous semblent les plus adaptés à l'une et l'autre des situations.

Aussi, nous avons mis en avant que dans le cas de la recherche sur base de l'historique, aucun visuel ne nous semblait adapté et une interface traditionnelle s'est avérée suffisante. Cet élément met en avant le fait que la visualisation des données d'infrastructure n'est pas pertinente dans tous les cas.

Nous avons également pu constater que dans le cas de la suggestion de tronçons de détournement sur base historique, l'expertise des utilisateurs appelés à utiliser une telle fonctionnalité avait tendance à mettre la recherche dans les données davantage en avant par rapport à la visualisation proprement dite. En cela, nous proposons ainsi une approche pour rendre plus intelligible l'importante masse de données générée par le trafic ferroviaire.

L'évaluation de nos développements par le prisme de l'utilisateur a permis de mettre en avant à la fois la perception du caractère pertinent des fonctionnalités développées pour l'intégration des aspects de trafic ferroviaire ainsi que l'aisance d'utilisation de l'interface proposée. Ces deux facteurs sont de nature à nous faire penser que ces développements peuvent améliorer la satisfaction des utilisateurs vis-à-vis de CoLT, l'outil considéré. Nous sommes cependant conscients des réserves vis-à-vis de la validité statistique de cette évaluation.

Enfin, nous avons pu identifier les pistes de nature à permettre de poursuivre dans la voie d'une meilleure prise en compte des données de trafic lors de la planification des travaux d'infrastructure. En particulier, les premiers pas quant à notre objectif de mise en place d'un Waze ferroviaire ouvrent d'importantes perspectives d'amélioration via la prise en compte progressive de tous les paramètres permettant de parfaire le processus.

6 Bibliographie

Amie Albrecht, “Integrating railway track maintenance and train timetables”, Phd Thesis at University of South Australia, 2009.

Gennady Andrienko, Natalia Andrienko, Salvatore Rinzivillo, Mirco Nanni, Dino Pedreschi, Fosca Giannotti, “Interactive Visual Clustering of Large Collections of Trajectories”, IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology, 2009, pp 3-10.

Mike Barry, Brian Card, “Boston’s Massachusetts Bay Transit Authority (MBTA).”, <http://mbtaviz.github.io/>, consulté le 02/05/2021.

Marco Blanco, Thomas Schlechte, “Analysis of Micro-Macro Transformations of Railway Networks”, ZIB-report, 2013, pp 13-65.

Luis Filipe Caetano, Paulo Fonseca Teixeira, “Availability Approach to Optimizing Railway TrackRenewal Operations”, Journal of Transportation Engineering, 2013, pp. 941-948.

Stuart Card, Jock Mackinlay, Ben Shneiderman, “Readings in information visualization: using vision to think”, 1999, pp 1-34.

Wei Chen, Fangzhou Guo, Fei-Yue Wang, “A Survey of Traffic Data Visualization”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 16, no. 6, 2015, pp 2970-2984.

Francesco Corman, Andrea D’Ariano, Dario Pacciarelli, Marco Pranzo, “Bi-objective conflict detection and resolution in railway traffic management”, Proceedings of the 7th Triennial Symposium on Transportation Analysis, 2010, pp 1-4.

Andreas Dypvik Landmark, Andreas Amdahl Seim, Nils Olsson, “Visualisation of Train Punctuality – Illustrations and Cases”, Transportation Research Procedia, vol. 27, 2017, pp 1227-1234.

L. Ferreira, “Planning Australian freight rail operations: An overview”, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 31, 1997,pp 335-348

Nivan Ferreira, Jorge Poco, Huy T. Vo, Juliana Freire, Cláudio T. Silva, “Visual Exploration of Big Spatio-Temporal Urban Data: A Study of New York City Taxi Trips”, IEEE Transactions on visualization and computer graphics, vol. 19, no. 12, 2013, pp 2149-2158.

Malin Forsgren, Martin Aronsson, Sara Gestrelus, “Maintaining tracks and traffic flow at the same time”, Journal of Rail Transport Planning & Management, Vol. 3, 2013, pp 111-123.

Josef Gasparik, Borna Abramovic, Martin Halas, “New Graphical Approach to Railway Infrastructure Capacity Analysis”, *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 27, 2015, No. 4, pp 283-290.

Rob M.P. Goverde, Nikola Besinovic, Anne Binder, Valentina Cacchiani, Egidio Quaglietta, Roberto Roberti, Paolo Toth, “A three-level framework for performance-based railway timetabling”, 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis – RailTokyo, 2015, pp2 – 20.

David Janecek, Frédéric Weymann, “LUKS – Analysis of lines and junctions”, 12th World Conference on Transport Research, 2010, pp. 1-16.

Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, “An Interaction Model for Visualizations Beyond The Desktop”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 19, no. 12, 2013, pp.2396-2405.

Kristian Kloeckl, Xiaoji Chen, Christian Sommer, Carlo Ratti, and Assaf Biderman, “Trains of data.”, <http://senseable.mit.edu/trainsofdata/> , consulté le 02/05/2021.

Christian Laesser, “Peak spotting”, <https://christianlaesser.com/projects/peak-spotting-train-data-visualization.html>, consulté le 02/05/2021.

Jesper Larsen, Richard Lusby, Matthias Ehrgott, David Ryan, “Railway track allocation : models and methods”; *DTU Management Engineering : Report 3.2009*, 2009, pp. 1 – 29.

Bettina Laugwitz, Martin Schrepp, Theo Held, “Construction and evaluation of a user experience questionnaire”, *USAB*, 2008, pp. 63-76

Tomas Liden, “Railway infrastructure maintenance - a survey of planning problems and conducted research”, *Transportation Research Procedia*, vol 10, 2015, pp 574 – 583.

He Liu, Yuan Gao, Lu Lu, Siyuan Liu, Huamin Qu, Lionel M. Ni, “Visual Analysis of Route Diversity”, *IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology*, 2011, pp 169-178.

Jiansu Pu, Siyuan Liu, Ye Ding, Huamin Qu, Lionel Ni, « T-Watcher: A New Visual Analytic System for Effective Traffic Surveillance”, *Mobile Data Management (MDM)*, 2013 IEEE 14th International Conference, Research Collection School Of Information Systems, 2013.

Chris Turner, Ashutosh Tiwari, Andrew Starr, Isidro Sergio Durazo-Cardenas, Blacktop, “An Intelligent Framework and Prototype for Autonomous Maintenance Planning in the Rail Industry”, *Proceedings of the 1st International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2015.

Shoshana Vasserman, Michal Feldman, Avinatan Hassidim, “Implementing the Wisdom of Waze”, International Joint Conference on Artificial Intelligence, vol. 24, 2015.

N H M Wilson, J M Sussman, L A Goodman, B T Higonnet, “Simulation of a Computer Aided Routing System (CARS)”, Proceedings of the third conference on Applications of simulation, 1969, pp 171–183.

PostgreSQL Materialized views, <https://www.postgresql.org/docs/9.3/rules-materializedviews.html>, consulté le 20/05/2021.

7 Annexes

7.1 Annexe 1 : résultats du test UEQ

	1	2	3	4	5	6	7	
Agaçant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Agréable
Incompréhensible	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Compréhensible
Moderne	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sans fantaisie
Appropriation simple	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Appropriation compliquée
Apporte de la valeur	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Peu de valeur ajoutée
Ennuyeux	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Captivant
Inintéressant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Intéressant
Imprévisible	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Prévisible
Rapide	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Lent
Original	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Conventionnel
Rigide	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Facilitant
Bien	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Médiocre
Compliqué	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Simple
Repoussant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Attractif
Habituel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Avant-gardiste
Désagréable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Agréable
Sécurisant	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Insécurisant
Stimulant	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Soporifique
Répond aux attentes	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ne répond pas aux attentes
Inefficace	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Efficace
Clair	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Déroutant
Non pragmatique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Pragmatique
Sobre	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Surchargé
Attrayant	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Rébarbatif
Sympathique	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Inamical
Conservateur	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Innovant