POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Étude permettant d'établir des corrélations entre les accélérations qui traduisent la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques identifiés
Auteur: Author:	Paul Charbachi
Date:	2020
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Charbachi, P. (2020). Étude permettant d'établir des corrélations entre les accélérations qui traduisent la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques identifiés [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/5429/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/5429/
Directeurs de recherche: Advisors:	Nathalie De Marcellis-Warin, & Martin Trépanier
Programme: Program:	Maîtrise recherche en génie industriel

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Étude permettant d'établir des corrélations entre les accélérations qui traduisent la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques identifiés

PAUL CHARBACHI

Département de mathématique et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Août 2020

© Paul Charbachi, 2020.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire est intitulé :

Étude permettant d'établir des corrélations entre les accélérations qui traduisent la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques identifiés

présenté à **Paul CHARBACHI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Samira KEIVANPOUR, présidente
Nathalie de MARCELLIS-WARIN, membre et directrice de recherche
Martin TRÉPANIER, membre et codirecteur de recherche
Yannick WARIN, membre

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à mon petit Michel

« Petit train va loin »

REMERCIEMENTS

Tout d’abord, j’aimerais remercier mes directeurs de maîtrise de recherche Martin Trépanier et Nathalie de Marcellis-Warin pour leur support, leur attitude empathique et leurs commentaires constructifs qui m’ont permis de progresser tout au long du mémoire.

J’aimerais remercier mes collègues à VIA Rail pour leurs supports et le respect, humour et leurs commentaires constructifs qui m’ont accompagné tout au long de ce processus.

J’aimerais aussi remercier Mohammed Souka, Simon Dubreuil de Transport Canada ainsi qu’Alireza Roghani, Elton Toma, et Yan Lui pour leur soutien et leurs commentaires constructifs qui ont contribué grandement à la réussite de ce mémoire.

Finalement, je tiens du fond de mon cœur à remercier mon épouse Sophie pour sa présence, son écoute, sa patience, son empathie, et son soutien continuel qui m’encourage à persévérer dans mes projets.

RÉSUMÉ

En Amérique du Nord, les défauts géométriques représentent une des principales causes de déraillements. Étant donné que les défauts géométriques affectent considérablement les conditions de la voie ferrée, et qu'ils sont susceptibles de provoquer des accidents, il est pertinent de s'intéresser au développement et à l'amélioration de méthodes visant à mieux détecter et identifier ces anomalies de la voie ferrée.

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'un projet en collaboration avec le Conseil de Recherche du Canada (CNRC) et Via Rail Canada, dans le but de déterminer les relations qui existent entre les données d'accélérations traduisant la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques de la voie ferrée. Plus particulièrement, l'objectif est d'identifier précisément les défauts géométriques les plus problématiques, ainsi que les plans (vertical, latéral et longitudinal) dans lesquels se situent ces défauts géométriques.

Les données des accélérations proviennent du CNRC et les données des défauts géométriques de la voie ferrée ont été fournies par VIA Rail. Toutes les données des accélérations ont été récoltées en août 2018, par le biais de deux bogies instrumentés. Quant aux données des défauts géométriques de la voie ferrée, elles ont été récoltées en novembre 2018 par le biais d'un train d'évaluation de la géométrie de la voie ferrée. Toutes les données ont été collectées dans la subdivision de Smith Falls, en Ontario.

À partir des données obtenues, les défauts géométriques les plus significatifs pour faire l'étude ont été retenus. Ensuite, les accélérations associées aux plans vertical, latéral et longitudinal ont été identifiées. Les accélérations ont ensuite été classées, selon un niveau de criticité. Les minimums et les maximums des accélérations ont été calculés, à l'aide de la formule du TQI. Par la suite ils ont été associés aux défauts géométriques, par le biais d'une régression linéaire. Finalement, les corrélations entre les accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée ont été établies.

Les résultats obtenus ont démontré qu'il existe une très forte corrélation (0,61) entre les maximums des accélérations et le défaut géométrique de profil. On peut donc affirmer que le défaut de profil est problématique, puisqu'il affecte considérablement la qualité du confort de la voie ferrée. Plus particulièrement, des corrélations entre les accélérations ont permis d'associer un défaut géométrique de profil avec le plan vertical. Aucune autre corrélation n'a pu être établie, et cela peut

s’expliquer par le faible nombre de données de défauts géométriques disponibles au moment de faire l’étude.

Il serait donc intéressant de mener une nouvelle étude avec un plus large éventail de données de défauts géométriques. Toutefois, les résultats obtenus dans cette étude, tels que l’identification précise d’un défaut géométrique problématique, ainsi que le plan auquel il est associé, constituent des contributions significatives pour le domaine ferroviaire, puisque ces résultats pourraient grandement faciliter la programmation d’outils automatisés lors des inspections et de la surveillance des voies ferrées.

ABSTRACT

In North America, track geometry defects are one of the main causes of derailments. Considering that track geometry defects affect the conditions of the railway, and that they are likely to cause accidents, it is relevant to be interested in the development and improvement of methods aimed at better detecting and identifying these track geometry defects.

The present study was conducted in collaboration with the National Research Council of Canada (NRC) and Via Rail Canada, aiming to determine the relationships that exist between the acceleration that quantify the quality of ride comfort and the track geometry defects. Moreover, the objective is to identify precisely the most problematic geometry defects, as well as the planes (vertical, lateral and longitudinal) in which these geometry defects are located in.

The acceleration data were provided by the NRC and the track geometry defects data were provided by VIA Rail Canada. The acceleration data were collected in August 2018, using two instrumented train bogies. The data on the track geometry defects were collected in November 2018 through a specialized track evaluation train. All data were collected on the Smith Falls subdivision in Ontario.

From the data received, the most significant track geometry defects for the study were selected. Thereafter, the accelerations associated with the vertical, lateral and longitudinal planes were identified. The accelerations were then classified, according to a level of criticality. The minimums and maximums of the accelerations were calculated, using the TQI formula. Afterwards, the minimums and maximums of the accelerations were subsequently associated with track geometry defects, through linear regression. Finally, the correlations between the accelerations and the track geometry defects were established.

The results demonstrated that there is a very strong correlation (0.61) between the maximums of the accelerations and the track geometry profile defect. Thus, we can say that the track geometry profile defect is problematic, since it considerably affects the quality of the ride comfort. More precisely, the correlations between accelerations have made it possible to associate a track geometry profile defect with the vertical plane. No other correlation could be established, and this may be explained by the low number of track geometry defects data available at the time of the study.

It would be interesting to perform a new study with a larger amount of track geometry defects data. Nevertheless, the results obtained in this study, such as identifying with precision the problematic track geometry defect, as well as the plan to which it is associated, constitute significant contributions in the railway sector, since these results could greatly facilitate the programming of automated tools to perform track inspections and monitoring.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

LISTE DES FIGURES XV

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XIX

LISTE DES ANNEXES XX

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Loi sur la sécurité ferroviaire du Canada 3

1.2 Objectif 4

1.3 Structure du document 6

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 7

2.1 La composition de la voie ferrée 7

2.2 Les unités de mesure de la voie ferrée 8

2.2.1 L'unité de mesure universelle : MTB 8

2.2.2 Le système impérial 9

2.3 Catégories de défauts géométriques de la voie ferrée 9

2.3.1 Nivellement 9

2.3.2 Tracé de la voie 11

2.3.3 Écartement de la voie ferrée 12

2.3.4 Catégorisation des défauts géométriques de la voie ferrée, selon le niveau de criticité 13

2.4 La qualité du confort de la voie ferrée 14

2.4.1 La norme internationale ISO 2631-1 : 1997 14

2.4.2 Les calculs des accélérations sur la voie ferrée, selon la norme internationale ISO 2631-1 :1997 14

2.4.3 Les accélérations maximales en fonction de la vitesse de train, à des points fixes ... 15

2.5 Les inspections et la surveillance de la voie ferrée 17

2.5.1 Prototype d'un outil automatisé de surveillance développé par le CNRC 18

2.5.2 Types de contrôle électronique de la géométrie de la voie ferrée 18

2.6 Études portant sur l'analyse de la voie ferrée 19

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 24

3.1 Lieu géographique de collecte des données 24

3.2 Données utilisées dans l'étude 27

3.2.1 Les données d'accélération 27

3.2.2 Nomenclature et convention d'un wagon 28

3.2.3 Les données des défauts géométriques de la voie ferrée 30

3.3 Étapes de la méthodologie pour identifier le minimum et maximum 33

3.3.1 Étape 1 : Séparation de la voie ferrée en tronçons de 52.8 pieds 34

3.3.2 Étape 2 : La formule du Track Quality Index (TQI) 34

3.3.3 Étape 3 : Calcul de la moyenne de tous les TQI moyen des accélérations, pour chaque tronçon de 52.8 pieds 35

3.3.4 Étape 4 : Comparaison des moyennes des TQI moyens, entre chaque tronçon de 52.8 pieds 35

3.3.5 Étape 5 : Catégorisation des accélérations de 52.8 pieds en fonction du niveau de criticité 36

3.3.6 Étape 6 : Identification des minimums et des maximums des accélérations catégorisées, selon un niveau de criticité 37

3.3.7 Étape 7 : Association des minimums et des maximums des accélérations avec les défauts géométriques de la voie ferrée.....44

3.3.8 Étape 8 : Principe et hypothèse pour effectuer les corrélations entre les minimums et les maximums des accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée.....45

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....46

4.1 Résultats.....46

4.1.1 Corrélations entre les minimums et les maximums des accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée.....46

4.2 Discussion des résultats.....63

4.2.1 Analyse des corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques d'alignements gauche et droite (L et R) sur 62 pieds.....63

4.2.2 Analyse des corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques d'alignements gauche et droite (L et R) sur 62 pieds.....63

4.2.3 Analyse des corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profil gauche et droite (L et R) sur 62 pieds.....64

4.2.4 Analyse des corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques de profil gauche et droite (L et R) sur 62 pieds.....65

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....66

5.1 Contributions.....66

5.1.1 Résultats.....67

5.1.2 Limites de l'analyse.....68

5.2 Perspectives d'amélioration.....68

BIBLIOGRAPHIE.....70

ANNEXES.....74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :10 principales causes d'incidents de déraillements de trains sur voie principale selon le nombre de déraillements survenus entre 2001 et 2014 au Canada (Leishman, 2017)..... 2

Tableau 2.1: Vitesses maximales de circulation (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012). 8

Tableau 2.2: Nivellement autorisé dans les limites indiquées (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012)..... 10

Tableau 2.3 : Tracé de la voie et toute variation qui ne peuvent être excédées (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012)..... 11

Tableau 2.4: Prescriptions relatives à l'écartement (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012) 12

Tableau 3.1 : Les canaux d'accélérations utilisées dans cette étude, ainsi que leurs emplacements sur le bogie instrumenté, selon le Technical Report VIA Remote Track Monitoring (2019) 29

Tableau 3.2 : Les accéléromètres aCBCL et aCBCLN, selon le Technical Report VIA Remote Track Monitoring (2019) 29

Tableau 3.3 : Défauts géométriques R Align 62 de la voie ferrée 30

Tableau 3.4 Défauts géométriques L Align 62 de la voie ferrée 30

Tableau 3.5 Défauts géométriques R Prof 62 de la voie ferrée 31

Tableau 3.6 Défauts géométriques L Prof 62 de la voie ferrée..... 32

Tableau 3.7 : Niveau de criticité des accélérations 35

Tableau 3.8 : Comfort Reactions to Vibrations ISO-2631-1:1997 36

Tableau 3.9 : Calcul du TQI pour les accélérations, le TQI moyen et le niveau de criticité des accélérations pour chaque tronçon de la voie ferrée entre le point de mile 3 et le point de mile 4 38

Tableau 3.10 : Les valeurs minimales et maximales des accélérations (aCACLT, aCALVT aCARVT, aCBCLN, aCBCLT, aCBLVT, aCBRVT) associées au défaut géométrique R Align 62 44

Tableau 3.11 : Les valeurs minimales et maximales des accélérations (aCACLT, aCALVT aCARVT, aCBCLN, aCBCLT, aCBLVT, aCBRVT) associées au défaut géométrique L Align 62 44

Tableau 4.1 : Sommaire statistique des accélérations minimales et du défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds 47

Tableau 4.2 : Corrélations entre les accélérations minimales et les défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds 47

Tableau 4.3 : Sommaire statistique des maximums des accélérations et des défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds 51

Tableau 4.4 : Corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds 51

Tableau 4.5 : Sommaire statistique des accélérations et des défauts géométriques de profile sur 62 pieds 55

Tableau 4.6 : Corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profile sur 62 pieds 55

Tableau 4.7 : Sommaire statistique des maximums accélérations et des défauts géométriques de profile sur 62 pieds 59

Tableau 4.8 : Corrélations entre les maximums accélérations et les défauts géométriques de profile sur 62 pieds 59

Tableau A.1 : Calcul du TQI du point de 1 au point de mile 2 74

Tableau A.2 : Calcul du TQI du point de 3 au point de mile 4 76

Tableau A.3 : Calcul du TQI du point de 5 au point de mile 6 78

Tableau A.4 : Calcul du TQI du point de 6 au point de mile 7 80

Tableau A.5 : Calcul du TQI du point de 7 au point de mile 8 82

Tableau A.6 Calcul du TQI du point de 9 au point de mile 10 84

Tableau A.7 : Calcul du TQI du point de 11 à point de mile 12 86

Tableau A.8 : Valeurs minimales et maximales des accélérations (aCACLT, aCALVT aCARVT, aCBCLN, aCBCLT, aCBLVT, aCBRVT) associées aux défauts géométriques R et L PROF 62 88

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Répartition des déraillements et du matériel roulant déraillé sur la voie principale par groupe de causes principales, 2001-2014 (Leishman, 2017). 2

Figure 2-1: Composantes des défauts géométriques (Esveld,2017)..... 7

Figure 2-2 : Composition de la voie ferrée (Phanyakit et Satiennam, 2018)..... 8

Figure 2-3 : Concepts de base de la géométrie de la voie ferrée (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002). 9

Figure 2-4 : Mesure des conditions de profil de la voie ferrée (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002) 10

Figure 2-5 : Défaut géométrique du tracé de la voie ferrée sur une distance de 62 pieds (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002)..... 11

Figure 2-6: Prescriptions relatives à l'écartement (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002)..... 12

Figure 2-7 : Accélération dans le plan vertical du train en fonction de sa vitesse moyenne sur les points fixes de la voie ferrée (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019) 16

Figure 2-8 : Accélération dans le plan vertical du train en fonction de sa vitesse moyenne sur les points fixes de la voie ferrée (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019) 16

Figure 2-9 : Accélération dans le plan longitudinal du train en fonction de sa vitesse moyenne sur les points fixes de la voie ferrée (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019). 17

Figure 2-10 : Prototype proposé par le CNRC pour mesurer les accélérations (Development of a Prototype Ride Quality Monitoring Solution, 2020) 18

Figure 2-11 : Mouvement dynamique de la voie ferrée lorsqu'elle est mise sous charge (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002)..... 19

Figure 2-12: Track Logger (Gustafsson et Larsson, 2019)..... 21

Figure 3-1 : Diagramme de poisson qui démontre les facteurs qui contribuent à la dégradation de la voie ferrée (Phanyakit et Satiennam, 2018) 24

Figure 3-2 : Localisation de la subdivision de Smith Falls (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019) 25

Figure 3-3 : Train d'évaluation de la géométrie de la voie ferrée EM120N (State Railway of Thailand, 2015, cité dans Phanyakit et Satiennam, 2015) 25

Figure 3-4 : Défauts géométriques de la voie ferrée détectés par le train d'évaluation de la voie ferrée au point de mile 3 Smith Falls. 26

Figure 3-5 : Accélérations du bogie instrumenté au point de mile 3 Smith Falls 26

Figure 3-6: Nomenclature et convention d'un wagon (Railway Association of Canada, 2017) ... 28

Figure 3-7 : Diagramme des étapes de la méthodologie 33

Figure 3-8 Graphique de comparaison entre les défauts géométriques de la voie ferrée recueillis par le train d'évaluation de la voie ferrée et la catégorisation des accélérations 38

Figure 3-9 : Exemple d'un tronçon de la voie ferrée 39

Figure 3-10 : Exemple de graphique de TQI Moyen entre le point de mile 3 et le point de mile 4 sur la subdivision de Smith Falls 40

Figure 3-11 : Ensemble des sept accélérations 41

Figure 3-12 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCACLT 41

Figure 3-13 : Identification du minimum et maximum pour l'accélération aCALVT 42

Figure 3-14 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCARVT 42

Figure 3-15 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBCLN 42

Figure 3-16 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBCLT 43

Figure 3-17 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBLVT 43

Figure 3-18 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBRVT 43

Figure 4-1 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT 48

Figure 4-2 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT 48

Figure 4-3 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT ... 48

Figure 4-4 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN.... 49

Figure 4-5 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT.... 49

Figure 4-6 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT.... 49

Figure 4-7 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT.... 50

Figure 4-8 : Graphique Quantile -Quantile des défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds 50

Figure 4-9 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT.... 52

Figure 4-10 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT.. 52

Figure 4-11 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT.. 52

Figure 4-12 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN.. 53

Figure 4-13 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLT .. 53

Figure 4-14 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT.. 53

Figure 4-15 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT.. 54

Figure 4-16 : Graphique Quantile -Quantile des maximums des accélérations et des défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds..... 54

Figure 4-17 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT.. 56

Figure 4-18 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT.. 56

Figure 4-19 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT.. 56

Figure 4-20 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN.. 57

Figure 4-21 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLT .. 57

Figure 4-22 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT.. 57

Figure 4-23 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT.. 58

Figure 4-24 : Graphique Quantile -Quantile des valeurs minimales du défaut géométrique de profile sur 62 pieds..... 58

Figure 4-25 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT.. 60

Figure 4-26 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT.. 60

Figure 4-27 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN.. 60

Figure 4-28 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT.. 61

Figure 4-29 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLT .. 61

Figure 4-30 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT.. 61

Figure 4-31 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT.. 62

Figure 4-32 : Graphique Quantile -Quantile des défauts géométriques de profile sur 62 pieds.... 62

Figure 5-1 : TQI Moyen entre le point de mile 1 et 2 75

Figure 5-2 : TQI Moyen entre le point de mile 3 et 4 77

Figure 5-3 : TQI Moyen entre le point de mile 5 et 6 79

Figure 5-4 : TQI Moyen entre le point de mile 6 et 7 81

Figure 5-5 : TQI Moyen entre le point de mile 7 et 8 83

Figure 5-6 : TQI Moyen entre le point de mile 9 et 10 85

Figure 5-7 : TQI Moyen entre le point de mile 11 et 12..... 87

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

aCACLT	Wagon, côté A, au centre (Carbody, A-End, centreline)
aCALVT	Wagon, côté A, côté gauche (Carbody, A-End, left side)
aCARVT	Wagon, côté A, côté droit (Carbody, A-End, right side)
aCBCLN	Wagon, côté B, au centre (Carbody, B-End, centreline)
aCBCLT	Wagon, côté B, au centre (Carbody, B-End, centreline)
aCBLVT	Wagon, côté B, côté gauche (Carbody, B-End, left side)
aCBRVT	Wagon, côté B, côté droit (Carbody, B-End, right side)
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
CNRC	Conseil National de recherches du Canada
L ALIGN 62	Défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds sur le côté gauche
L PROF 62	Défaut géométrique de profile sur 62 pieds sur le côté gauche
NU	Défaut de criticité presque Urgent
P	Défaut de criticité priorité
R ALIGN 62	Défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds sur le côté droit
R PROF 62	Défaut géométrique de profile sur 62 pieds sur le côté droit
TQI	Track Quality Index or Indices
U	Défaut de criticité urgente

LISTE DES ANNEXES

Annexe A 74

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au Canada, le transport de marchandises et le transport de voyageurs sont les deux types de transport ferroviaire (Bureau de Sécurité des Transports du Canada, 2019). Le transport de marchandises représente environ 90 % du réseau ferroviaire, tandis que le service passager en représente environ 10 %. Selon le Bureau de Sécurité des Transports du Canada (2019), parmi tous les réseaux ferroviaires à travers le monde, le réseau ferroviaire canadien est classé troisième en importance, et il se place en quatrième position en termes de volume de marchandises transportées annuellement (BSTC, 2019). En effet, chaque année les chemins de fer canadiens transportent plus de 70 % des marchandises canadiennes à travers le pays, dont 40 % représentent des exportations canadiennes (BSTC, 2019). Aussi, selon la lettre du Mandat du Ministre des Transports Fédéral (2020), on remarque que le réseau ferroviaire canadien est l'un des corridors commerciaux du Canada qui permet d'accroître l'accès des produits canadiens aux marchés mondiaux. Et, en ce qui a trait au transport passager, le réseau ferroviaire canadien permet les déplacements de 70 millions de personnes (BSTC, 2019). Le réseau ferroviaire canadien représente indéniablement un grand vecteur de l'économie canadienne, d'où la nécessité d'encadrer la sécurité des opérations ferroviaires par une loi et des règlements. Également, il s'étend sur environ 45 000 kilomètres (Statistiques Canada, mai 2016).

Selon le Bureau de la sécurité des transports du Canada (2019), depuis les années 1980, le nombre d'incidents et d'accidents ferroviaires est en régression continue. La diminution significative des accidents ferroviaires est notamment due à plusieurs mesures prises par l'industrie ferroviaire, telles que la mise en œuvre de technologies permettant de détecter les défauts internes des rails, l'amélioration de la métallurgie et du profil du rail, ainsi que l'inspection automatisée et spécialisée des défauts de la voie ferrée et des joints (Leishman, Macciotta, Hendry et Martin, 2015). Selon les mêmes auteurs, il a aussi été observé que le nombre d'accidents ferroviaires se produisant sur la voie principale ne diminue pas, mais demeure toutefois stable. Et, comme démontré à la figure 1, alors que le pourcentage de déraillements est sensiblement similaire dans chacun des groupes de causes principales, on remarque toutefois que la gravité du déraillement qui est mesurée en fonction du nombre de wagons déraillés semble être plus élevée lorsque la cause est attribuée à la voie, à la chaussée et aux structures.

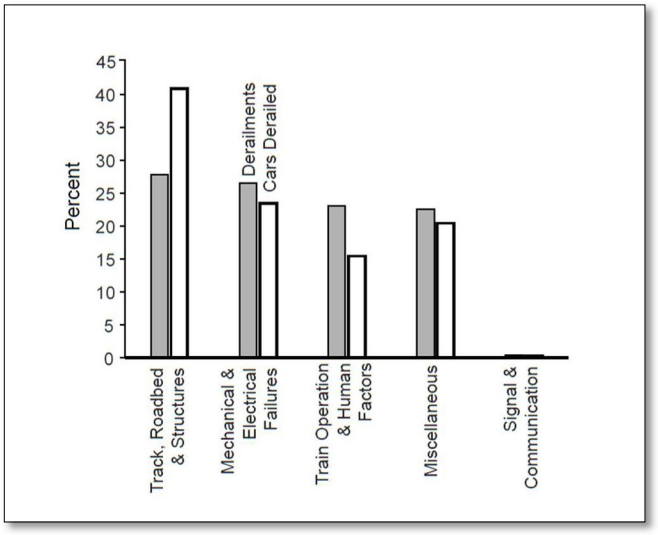

Figure 1-1 : Répartition des déraillements et du matériel roulant déraillé sur la voie principale par groupe de causes principales, 2001-2014 (Leishman, 2017).

Le tableau 1.1 présente les dix principales causes de déraillement se produisant sur la voie principale. Les conditions de la voie sont donc des causes prédominantes.

Rang	***Voie Principale***	
	Causes	***%***
1	Rail, joint/ Éclisses and ancrage rail	10.8
2	Geométrie de voie	9.7
3	Conditions environmentales	6.9
4	Roue	6.8
5	Manoeuvre de train	6.6
6	Autres causes	6.2
7	Essieu et roulements	5.3
8	Règles Générales de commutation	5
9	Aiguillages	4.8
10	Applications des freins	3.9

Tableau 1.1 :10 principales causes d'incidents de déraillements de trains sur voie principale selon le nombre de déraillements survenus entre 2001 et 2014 au Canada (Leishman, 2017).

Depuis 2001, le nombre de déraillements a considérablement diminué; on dénombre 135 déraillements, donc une diminution significative de 40 % (Leishman, Macciotta, Hendry et Martin,

2015). La diminution du nombre de déraillements est en grande partie attribuée aux facteurs qui suivent, selon (Miller, 2015., cité dans Leishman, 2017) :

- le développement et implémentation graduelle de la technologie des longs trains, qui résulte à augmenter la longueur maximale des trains jusqu'à 150 wagons soit de 4 km de long;
- augmentation des installations de détecteurs de voie, et amélioration continue de la technologie des détecteurs et leurs processus;
- des locomotives en tandem;
- amélioration des technologies pour évaluer les défauts internes du rail et des défauts géométriques de la voie ferrée;
- et finalement, les coupures budgétaires relatives aux opérations ainsi que la maintenance.

De plus, les deux principales causes de déraillements, sur les voies principales des réseaux ferroviaires nord-américains, sont la géométrie de la voie ferrée et les bris de rails (Liu et al., 2012, cité dans Leishman, 2017).

1.1 Loi sur la sécurité ferroviaire du Canada

Selon le mandat du Ministre des Transports (Lettre de mandat du ministre des Transports, 2020) : « *il faudra continuer d'améliorer la sécurité du secteur des transports au Canada par l'entremise de l'examen et de la modernisation des lois et règlements pertinents ».*

De plus, selon la Loi sur la sécurité ferroviaire du Canada (1985), les objectifs sont les suivants :

- ***a)*** *pourvoir à la sécurité et à la sûreté du public et du personnel dans le cadre de l'exploitation ferroviaire et à la protection des biens et de l'environnement, et en faire la promotion;*
- ***b)*** *encourager la collaboration et la participation des parties intéressées à l'amélioration de la sécurité et de la sûreté ferroviaires;*
- ***c)*** *reconnaître la responsabilité qui incombe aux compagnies d'établir, par leurs systèmes de gestion de la sécurité et autres moyens à leur disposition, qu'elles gèrent continuellement les risques en matière de sécurité;*

- ***d)*** *favoriser la mise en place d'outils de réglementation modernes, flexibles et efficaces dans le but d'assurer l'amélioration continue de la sécurité et de la sûreté ferroviaires.*

La section Objet du Règlement concernant la sécurité de la voie (Transport Canada, 2011) concernant la sécurité de la voie ferrée (Transport Canada, 2011) stipule que:

3.1 Le présent règlement indique les prescriptions minimales à observer sur une voie ferrée à écartement normal et sous réglementation fédérale.

3.2 Ces prescriptions s'appliquent à certaines anomalies de voie prises individuellement. En présence d'un ensemble de ces anomalies, dont aucune ne déroge individuellement aux présentes prescriptions, il faut parfois prendre des mesures correctives propres à assurer la sécurité de la circulation sur la voie considérée.

3.3 Tout chemin de fer peut se fixer des exigences supplémentaires ou plus sévères que celles prévues aux présentes.

Malheureusement, il n'existe aucune prescription qui traite du confort de la voie ferrée dans la loi ni la réglementation. Cependant, le cadre réglementaire donne l'autorité aux chemins de fer d'établir des exigences qui répondre aux modes d'exploitation afin d'améliorer la sécurité des opérations ferroviaires. De plus, le cadre réglementaire ne réglemente aucune méthode, technologie d'inspection ou d'évaluation des prescriptions établie dans le Règlement concernant la sécurité de la voie de Transport Canada (2012). Ceci permet notamment de ne pas freiner l'innovation et les recherches pour effectuer des inspections de la voie ferrée et permet d'établir un processus d'amélioration continue comme prescrit dans la Loi sur la sécurité ferroviaire L.R.C. (1985), ch. 32 (4e suppl.) à l'article 3 (b) b) encourager la collaboration et la participation des parties intéressées à l'amélioration de la sécurité et de la sûreté ferroviaires.

Finalement, il est pertinent de s'intéresser aux défauts géométriques, étant donné qu'ils représentent une des principales causes de déraillements, et que ces derniers compromettent la sécurité des activités ferroviaires.

1.2 **Objectif**

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'un projet en collaboration avec le Conseil National de Recherche du Canada (CNRC) et VIA Rail Canada, dans le but de déterminer les relations qui

existent entre les données d'accélérations traduisant la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques de la voie ferrée. Plus particulièrement, les corrélations les plus fortes entre les défauts géométriques identifiés et les accélérations permettront d'identifier avec précision les défauts géométriques les plus problématiques, soit ceux qui affectent le plus significativement la qualité du confort de la voie ferrée, à des emplacements précis. Les corrélations permettront également d'identifier dans quels plans (vertical, latéral et longitudinal) ces défauts géométriques se situent. En lien avec les inspections automatisées, ces plans identifiés seront programmés dans les outils d'inspections, afin de permettre de détecter plus rapidement les défauts géométriques les plus problématiques sur la voie ferrée. À plus long terme, la réduction des coûts des inspections et la diminution des risques de déraillements des trains représentent des objectifs complémentaires.

De plus, en parallèle, le CNRC (2020) a développé le prototype d'un outil automatisé composé d'un ensemble de capteurs intégrés (traduction libre de *integrated sensor package*) permettant d'effectuer la surveillance continue des véhicules ferroviaires et les interactions avec le rail. Plus particulièrement, en fonction des accélérations mesurées le prototype sera en mesure d'évaluer la qualité du confort de la voie ferrée. Ce prototype sera présenté plus en détail, à la fin du chapitre portant sur la revue de littérature, mais il représente un grand intérêt en lien avec cette étude, car les résultats de la présente étude de recherche pourraient fournir plus spécifiquement les catégories de défauts géométriques associées à une faible qualité du confort de la voie ferrée, afin de programmer le prototype en fonction de ces types défauts géométriques spécifiques, ainsi que les plans associés. Ceci pourrait permettre d'optimiser les inspections de la voie ferrée, à l'aide du prototype de cet outil automatisé.

Les données des accélérations proviennent du rapport du CNRC *Technical Report VIA Remote Track Monitoring* (2019) et les données des défauts géométriques de la voie ferrée ont été fournies par VIA Rail. Toutes les données des accélérations ont été récoltées en août 2018, par le biais d'un bogie instrumenté. Quant aux données des défauts géométriques de la voie ferrée, elles ont été récoltées en novembre 2018 par le biais d'un train d'évaluation de la géométrie de la voie ferrée.

Afin de répondre à la problématique, cette étude s'est effectuée de la façon suivante :

- identifier les défauts géométriques le plus significatifs pour faire l'étude, soit ceux qui sont les plus récurrents;
- identifier les accélérations associées aux plans vertical, latéral et longitudinal;

- classifier les accélérations, selon un niveau de criticité urgent, presque urgent ou prioritaire;
- calculer les maximums et les minimums des accélérations;
- associer les défauts géométriques aux minimums et maximums des accélérations;
- établir des corrélations entre les défauts géométriques identifiés et les accélérations (qualité du confort de la voie ferrée).

Ceci nous permettra d'identifier les défauts géométriques qui affectent les plus significativement la qualité du confort de la voie ferrée. Au final, les corrélations permettront d'identifier avec précision dans quels plans (vertical, latéral et longitudinal) ces défauts géométriques se situent.

1.3 Structure du document

Le rapport de ce projet de recherche se divise en 6 chapitres. Dans le chapitre 2 se trouve une revue de littérature portant sur les défauts géométriques et le confort de la qualité du confort de la voie ferrée. Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée afin de répondre à l'objectif, et le chapitre 4 présente les résultats obtenus. En conclusion, le chapitre 5 présente les contributions de cette étude, un résumé des résultats les plus saillants, les limites de l'analyse, ainsi que les perspectives d'amélioration.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Le chapitre portant sur la revue de littérature sera séparé en six sections. La première section de ce chapitre présentera la composition de la voie ferrée. Deuxièmement, les unités de mesure de la voie ferrée utilisées seront présentées. La troisième section abordera les trois catégories de défauts géométriques de la voie ferrée, ainsi qu'une catégorisation de ces défauts géométriques selon leur niveau de criticité. La quatrième section abordera la qualité du confort de la voie ferrée. La cinquième section présentera les inspections de la voie ferrée. Finalement, des résumés de travaux de recherche portant sur l'analyse de la voie ferrée seront présentés.

2.1 La composition de la voie ferrée

Selon Esveld (2017) les types de défauts géométriques de la voie ferrée sont mesurés suivant la coupe transversale de la voie ferrée illustrée à la figure 2.1. De plus, l'auteur ajoute que chaque rail a 2 degrés de liberté, et les 4 degrés de liberté restants sont remplacés par un système similaire composé du *Cant*, du Profil (*level*), de l'alignement, et de l'écartement de la voie ferrée.

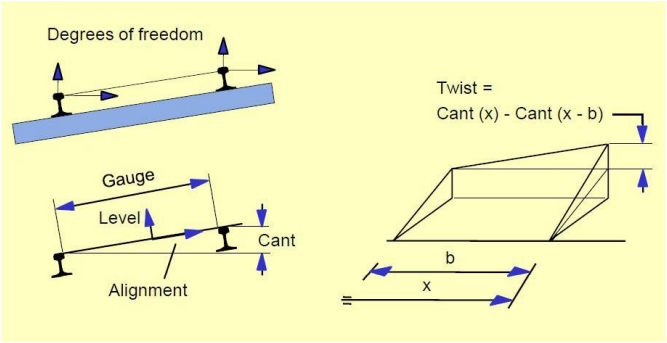

Figure 2-1: Composantes des défauts géométriques (Esveld,2017)

La voie ferrée est divisée en deux sections, soit la superstructure et la structure (Phanyakit et Satiennam, 2018). La superstructure est composée du rail, d'un système d'attaches, de coussins de rail (*rail pads*), ainsi que de traverses, tandis que la structure de la voie ferrée est généralement composée de ballast, de sous ballast et de la plateforme de la voie ferrée, tel qu'illustré à la figure 2.2.

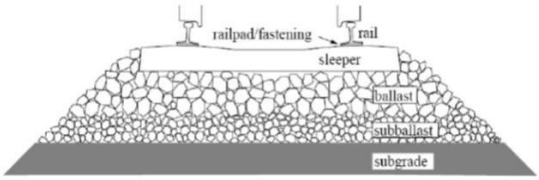

Figure 2-2 : Composition de la voie ferrée (Phanyakit et Satiennam, 2018)

2.2 Les unités de mesure de la voie ferrée

2.2.1 L'unité de mesure universelle : MTB

Selon le règlement de la sécurité de la voie ferrée, l'unité de mesure universelle sur le chemin de fer est le million de tonnes brutes (MTB) (TC-54, 2012). En Amérique du Nord, l'unité MTB est le tonnage annuel estimé qui est transporté sur un tronçon de voie ferrée, il permet : de classifier les voies ferrées, d'établir la fréquence d'inspection automatisée et visuelle de la voie ferrée et de prendre les actions correctives afin de minimiser le risque de déraillement (Leishman, 2017).

Alors, les catégories de voies, selon le règlement de la sécurité de la voie ferrée (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012), permettront de déterminer la vitesse de circulation en miles par heure des trains de marchandises et des trains voyageurs comme indiqué dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Vitesses maximales de circulation (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012).

Pour les voies répondant à toutes les prescriptions reliées à la:	Vitesse maximale permise pour les trains marchandises MPH (KM/h)	Vitesse maximale permise pour les trains marchandises MPH (KM/h)
Catégorie 1	10 (16)	15 (24)
Catégorie 2	25 (40)	30 (48)
Catégorie 3	40 (64)	60 (96)
Catégorie 4	60 (96)	80 (128)
Catégorie 5	80 (128)	95 (152)*
* pour les trains LRC : 100 mi /h (160 km/h)		

Dans le cadre de cette étude, le MTB sera donc l'unité de mesure utilisée afin de déterminer les tolérances des défauts géométriques pour la classe de voie 5.

2.2.2 Le système impérial

Le système impérial, soit les unités de mesure en pouces, en pieds et en miles, est le système actuellement utilisé en Amérique du Nord pour mesurer les distances, les tolérances et les points de référence des systèmes ferroviaires. Il sera donc le système de mesure préconisé dans le cadre de cette étude, notamment en ce qui a trait aux défauts de la voie ferrée.

2.3 Catégories de défauts géométriques de la voie ferrée

Il existe trois catégories de défauts géométriques de la voie ferrée. La première catégorie de défauts est dans le plan vertical, soit des défauts nivellement de la voie ferrée, qui sont mesurés en pouces sur des tronçons de 31 ou 62 pieds. La deuxième catégorie de défauts est dans le plan latéral (horizontal), soit des défauts d'alignement de la voie ferrée ou tracé de la voie ferrée qui sont mesurés en pouces sur des tronçons de 31 pieds ou de 62 pieds dans une tangente ou dans une courbe. Finalement, la troisième catégorie de défauts géométriques est l'écartement de la voie ferrée. La figure 2.3 illustre les trois catégories de défauts.

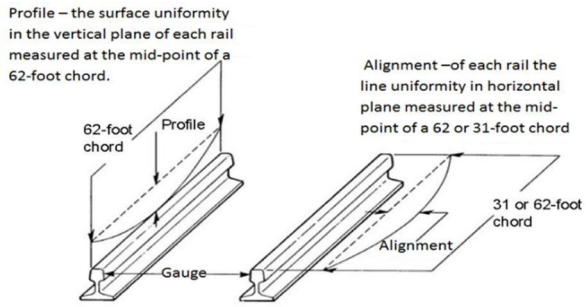

Figure 2-3 : Concepts de base de la géométrie de la voie ferrée (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002).

2.3.1 Nivellement

Selon le règlement concernant la sécurité de la voie ferrée partie C, section 6, tous les propriétaires d'une voie ferrée doivent maintenir le nivellement de la voie ferrée à l'intérieur des limites indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 2.2: Nivellement autorisé dans les limites indiquées (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012)

Nivellement	Catégorie de voie				
	1	2	3	4	5
A l'intérieur d'une distance de 31 pieds, un écart d'élévation à l'extrémité d'une rampe, ne peut être supérieur à :	3 ½ po	3 po	2 po	1 ½ po	1 po
Par rapport au profil uniforme, la flèche maximale sur un cordeau de 62 pieds, sur l'un ou l'autre rail, ne peut être supérieure à :	3 po	2 ¾ po	2 ¼ po	2 po	1 ¼ po
Dans une courbe de raccordement, la différence de nivellement transversal entre deux points séparés de moins de 31 pieds, ne peut être supérieure à :	2 po	1 ¾ po	1 ¼ po	1 po	¾ po
L'écart par rapport au plan horizontal en tout point d'une voie en tangente, ou la valeur du nivellement transversal en situation de dévers inversé sur une voie qui n'est pas en tangente, ne peut être supérieur à :	3 po	2 po	1 ¾ po	1 ¼ po	1 po
La différence de nivellement transversal entre deux points séparés de moins de 62 pieds ne peut être supérieure à :	3 po	2 ¼ po	2 po	1¾ po	1 ½ po

La figure 2.4 illustre le défaut de profile uniforme de la voie ferrée sur une distance de 62 pieds.

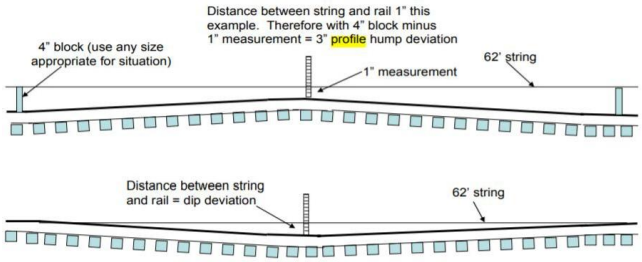

Figure 2-4 : Mesure des conditions de profil de la voie ferrée (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002)

2.3.2 Tracé de la voie

Selon le règlement concernant la sécurité de la voie ferrée partie C, section 3, le tracé de la voie doit être uniforme et toute variation ne peut excéder les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous:

Tableau 2.3 : Tracé de la voie et toute variation qui ne peuvent être excédées (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012)

Nivellement	Voie en tangente	Voie en courbe	
	Flèche maximale sur une ligne de 62 pieds (voir note 1)	Flèche maximale sur une ligne de 31 pieds (voir note 2)	Flèche maximale sur une ligne de 62 pieds (voir note 2)
1	5 po	S.O.[3]	5 po
2	3 po	S.O.[3]	3 po
3	1 ¾ po	1 ¼ po	1 ¾ po
4	1 ½ po	1 po	1 ½ po
5	¾ po	½ po	5/8 po

La figure 2.5 illustre le défaut géométrique du tracé de la voie ferrée sur une distance de 31 pieds. Le défaut géométrique du tracé de la voie ferrée est aussi calculé sur une distance de 62 pieds.

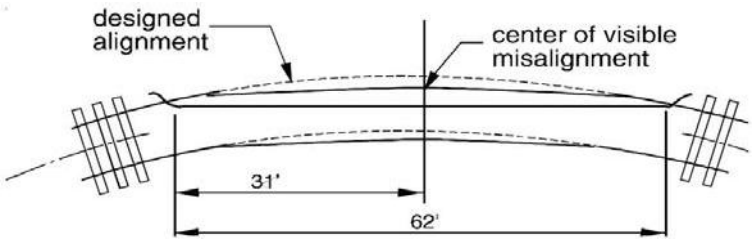

Figure 2-5 : Défaut géométrique du tracé de la voie ferrée sur une distance de 62 pieds (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002).

2.3.3 Écartement de la voie ferrée

Selon la partie C du Règlement concernant la sécurité de la voie ferrée, la présente section porte sur les prescriptions relatives à l'écartement.

Tableau 2.4: Prescriptions relatives à l'écartement (Règlement concernant la sécurité de la voie, 2012)

Catégorie de voie	Minimum	Maximum
Voie exempte	S.O.	58 ¼ po
1	55 ¾ po	58 po
2	55 ¾ po	57 ¾ po
3	56 po	57 ¾ po
4 et 5	56 po	57 ¾ po

L'illustration suivante de l'écartement illustre clairement les tolérances de l'écartement de la voie.

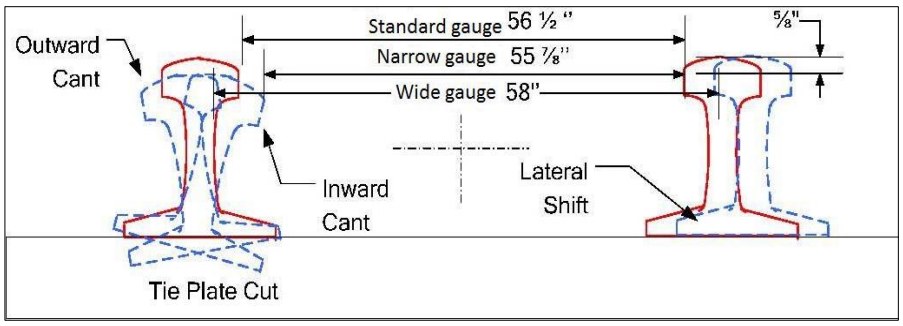

Figure 2-6: Prescriptions relatives à l'écartement (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002)

2.3.4 Catégorisation des défauts géométriques de la voie ferrée, selon le niveau de criticité

Les défauts géométriques de la voie ferrée sont classés en trois catégories, soit ‘’URGENT, NEAR URGENT et PRIORITY¨, en fonction leur niveau de criticité (National Engineering Track Standards for Canadian Passenger Service, 2020) :

- En premier lieu, les défauts URGENT indiquent que le défaut de géométrie évalué ne respecte aucunement les prescriptions établies par le Règlement sur la sécurité de la voie (RSV) de Transport Canada.
- Quant aux défauts NEAR URGENT, des inspections et un suivi accru de la dégradation des défauts doivent être effectués afin de faire les réparations avant que le défaut de géométrie évalué ne respecte aucunement les prescriptions établies par le Règlement sur la sécurité de la voie (RSV) de Transport Canada, bien que les conditions optimales de la voie ferrée s’approchent des recommandations. En effet, les défauts NEAR URGENT sont fixés de façon générale à 80 % de la valeur du défaut URGENT.
- Et, finalement, les défauts PRIORITY respectent les normes établies par le Règlement sur la sécurité de la voie (RSV) de Transport Canada, mais ne sont pas conformes aux pratiques privilégiées par les compagnies ferroviaires, à leurs normes de tolérance et à leurs politiques de maintenance.

Lorsqu’un défaut urgent est observé, les actions correctives doivent immédiatement être effectuées, afin de sécuriser les opérations ferroviaires. Les réparations urgentes doivent être entreprises afin d’éliminer les défauts de la voie ferrée et de rétablir la vitesse de la circulation. Dans le cas échéant, une limite de vitesse devra être imposée, ou même un arrêt complet du trafic ferroviaire devra être exigé afin de protéger l’opération ferroviaire.

Lorsqu’un défaut « Near urgent » est observé, les actions correctives doivent être réalisées au cours des 30 jours suivant la détection des défauts, afin de sécuriser l’opération ferroviaire, et une surveillance à chaque 72 heures doit être effectuée jusqu’à la réparation du défaut détecté. Si jamais le délai de 30 jours est dépassé, une limite de vitesse ou même un arrêt complet du trafic ferroviaire devra être mis en place afin de protéger l’opération ferroviaire.

Lorsqu'un défaut « prioritaire » est observé, les actions correctives doivent être planifiées, ainsi qu'un suivi et une surveillance doivent être entrepris afin d'éviter que le défaut ne devienne urgent dans un délai de 30 jours.

2.4 La qualité du confort de la voie ferrée

Selon Karakasis, Skarlatos et Zakinthinos (2005), le confort ressenti par les passagers à bord d'un train est une expérience largement complexe, ainsi qu'un phénomène individuel. Les auteurs ajoutent que de nombreuses recherches ont démontré que les vibrations et le bruit ont été identifiés comme étant les facteurs les plus importants pouvant influencer la qualité du confort. Puisque la qualité du confort de la voie ferrée est qualifiée d'expérience individuelle, il est donc nécessaire de quantifier ce phénomène, afin de pouvoir l'évaluer. En ce sens, en surveillant les vitesses des trains et les niveaux de vibrations, tant au niveau temporel que géospatial, les compagnies ferroviaires peuvent quantifier la qualité du confort de la voie ferrée et les conditions du rail (CNRC, 2020).

2.4.1 La norme internationale ISO 2631-1 : 1997

Dans le cadre de cette étude, la norme internationale ISO 2631-1-1997 (Vibrations et chocs mécaniques — Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps) (*Technical Report Via Remote Track Monitoring,* 2019*)* a été utilisée comme référence, afin d'évaluer la qualité du confort de la voie ferrée par le biais des accélérations calculées. Cette norme internationale, fréquemment utilisée dans le domaine des transports, permet d'évaluer la qualité du confort à bord des trains passagers (*Technical Report Via Remote Track Monitoring,2019).*

2.4.2 Les calculs des accélérations sur la voie ferrée, selon la norme internationale ISO 2631-1 :1997

Le calcul du confort de la voie utilise deux équations.

Tout d'abord, selon la norme ISO 2631-1-1997, l'équation $a_w(t_0)$ représente la moyenne quadratique pondérée des accélérations en fonction des fréquences,

$$a_w(t_0) = \left\{\frac{1}{\tau}\int_{t_0-\tau}^{t_0}[a_w(t)]^2 dt\right\}^{\frac{1}{2}}$$

Où, $a_w(t_0)$ est la fréquence pondérée de l'accélération instantanée; *t* le temps; t_0 est le temps d'observation (temps instantané); la période intégration (la période d'intégration) τ est choisi à 5 secondes selon to ISO 2631-4:2001.

Et, selon la norme ISO 2631-1-1997, l'équation a_v permet de calculer la moyenne totale quadratique pondérée de l'accélération (a_v) en fonction de la fréquence, soit le calcul qui permet de déterminer la qualité du confort de la voie ferrée, calcul. À partir de la combinaison des trois plans soit : vertical, latéral et longitudinal:

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

Ou, a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} sont les axes en *x*, *y* et *z*; k_z, k_z, k_z, sont les facteurs multiplicatifs qui ont été établis à 1.

Selon le *Technical Report Via Remote Track Monitoring* (2019), les accéléromètres sont connectés à un système d'acquisition de données, tels que : les accélérations longitudinales, les accélérations verticales, les accélérations latérales, les coordonnées GPS dans l'axe des X et des Y, la vitesse du wagon, le temps et la date.

2.4.3 Les accélérations maximales en fonction de la vitesse de train, à des points fixes

De plus, pour la subdivision de Smith Falls, on peut remarquer que les figures 2.7, 2.8 et 2.9 représentent respectivement l'accélération du train en fonction de sa vitesse moyenne. L'accélération est calculée selon l'axe latéral (figure 2.7), l'axe vertical (figure 2.8) et l'axe longitudinal (figure 2.9). La présence d'accélérations indique que le niveau de confort de la voie ferrée est affecté aux points fixes suivants : les ponts, les passages à niveau, les ponceaux, les aiguillages et la plateforme de la voie ferrée. Cela pourrait également indiquer qu'il y a la présence de défauts géométriques à ces points fixes de la voie ferrée.

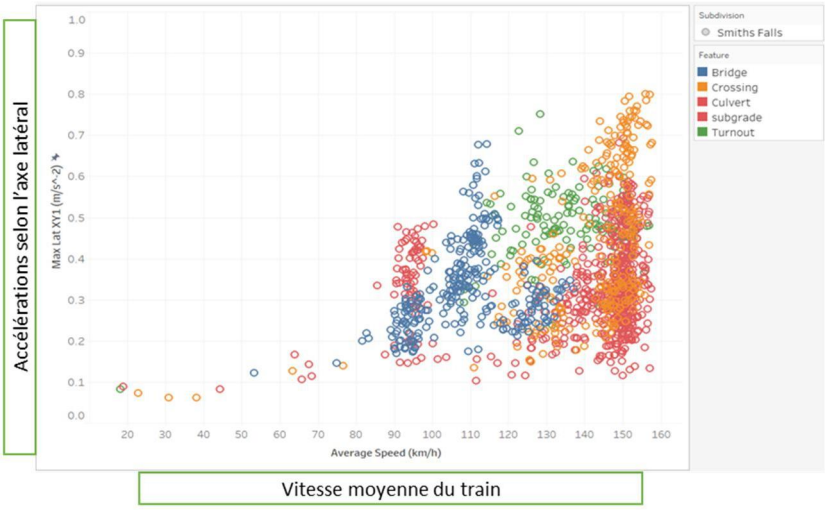

Figure 2-7 : Accélération dans le plan vertical du train en fonction de sa vitesse moyenne sur les points fixes de la voie ferrée (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019)

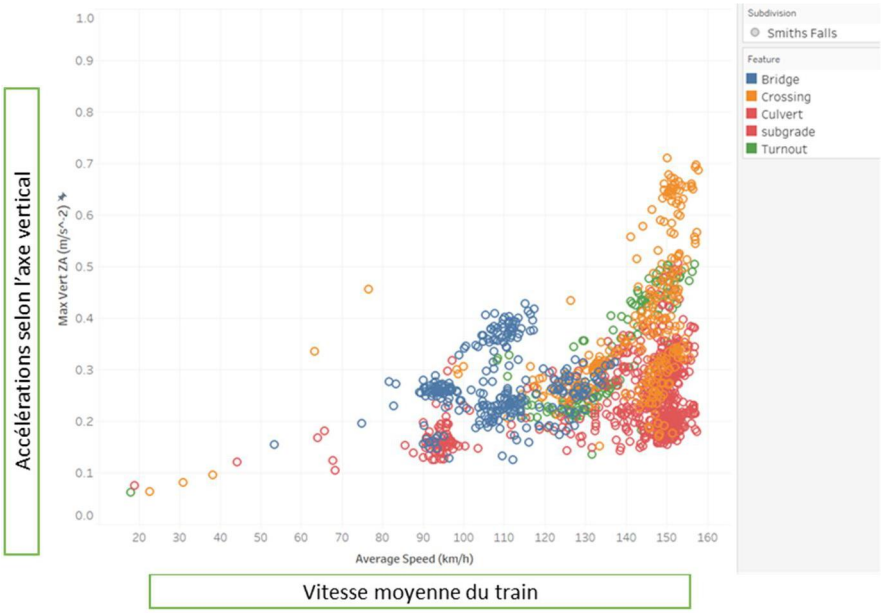

Figure 2-8 : Accélération dans le plan vertical du train en fonction de sa vitesse moyenne sur les points fixes de la voie ferrée (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019)

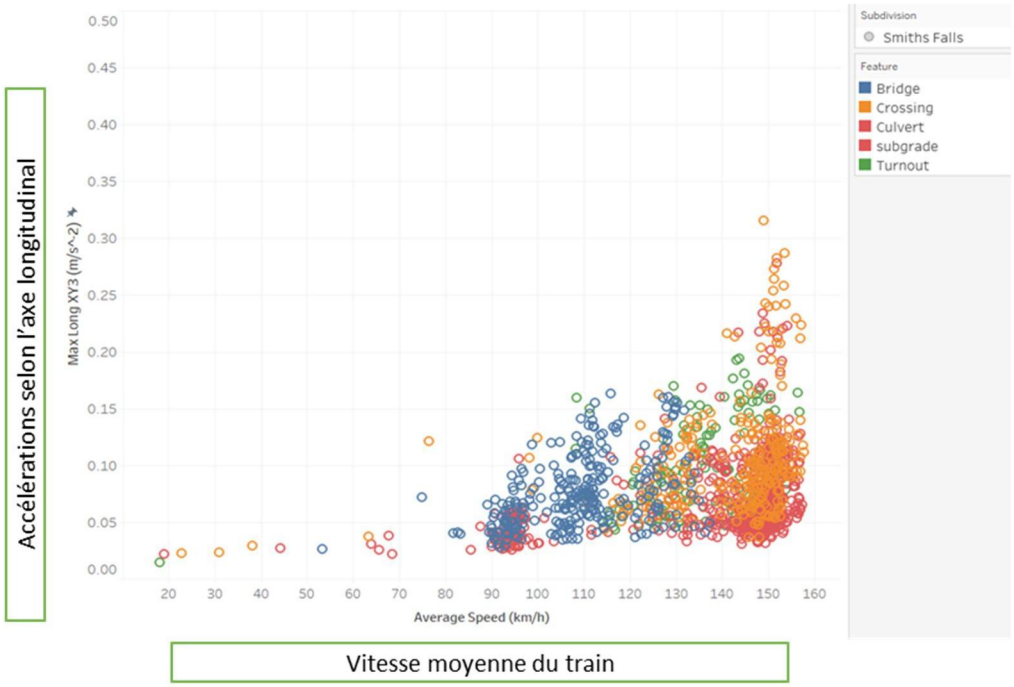

Figure 2-9 : Accélération dans le plan longitudinal du train en fonction de sa vitesse moyenne sur les points fixes de la voie ferrée (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019).

2.5 Les inspections et la surveillance de la voie ferrée

Selon Weston, Roberts, Yeo et Stewart (2015), il est nécessaire de différencier la surveillance de l'inspection. Les auteurs précisent que les inspections de la voie ferrée mettent l'emphase sur la sécurité de la voie qui est traditionnellement assurée par des trains d'inspection de la voie ferrée qui se déplacent sur le réseau ferroviaire afin d'accumuler des données sur la géométrie de la voie ferrée. Quant à la surveillance, elle met l'accent sur les défauts et soutien les interventions de maintenance efficaces. La surveillance s'intéresse à l'identification des défauts, au diagnostic des causes des défauts et à prédire à quel moment une irrégularité sur la voie ferrée va devenir un défaut (Weston, Roberts, Yeo et Stewart, 2015). Les auteurs ajoutent que la prochaine étape dans le domaine de la maintenance de la voie ferrée va être d'utiliser les informations enregistrées par des véhicules ferroviaires, en combinaison avec d'autres sources de données. Au lieu de planifier les interventions de maintenance suite à la détection d'un défaut sur la voie ferrée, l'enregistrement de ces données va permettre de les prédire (Weston, Roberts, Yeo et Stewart, 2015).

2.5.1 Prototype d'un outil automatisé de surveillance développé par le CNRC

Tel que brièvement présenté dans la section portant sur l'objectif de cette étude, le prototype d'un outil automatisé composé d'un ensemble de capteurs intégrés (traduction libre de *integrated sensor package*) permet d'effectuer la surveillance continue des véhicules ferroviaires et les interactions avec le rail (CNRC, 2020). La série de capteurs est équipée d'accéléromètres ainsi que d'autres capteurs, d'une communication cellulaire 4G, d'un GPS, d'un microprocesseur et d'une source de courant sans interruption. Les données sont collectées continuellement et sans fil, par l'entremise d'une base de données qui ne nécessite aucune intervention humaine.

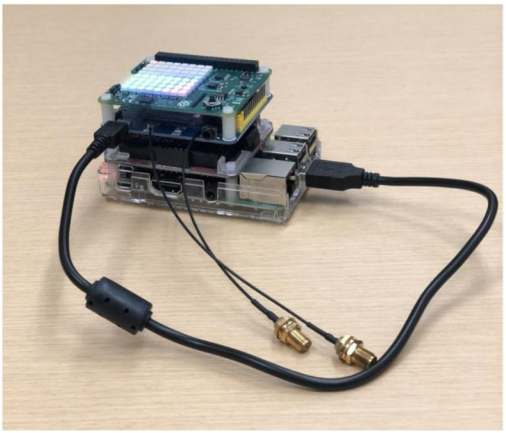

Figure 2-10 : Prototype proposé par le CNRC pour mesurer les accélérations (Development of a Prototype Ride Quality Monitoring Solution, 2020)

2.5.2 Types de contrôle électronique de la géométrie de la voie ferrée

Il existe deux types de contrôle électronique de la géométrie: le véhicule léger et le véhicule lourd. D'abord, il y a le véhicule léger de contrôle de l'état géométrique (VLéCEG) (TC-54, 2012) est considéré comme un test statique, notamment en raison du poids sur les roues qui est inférieur à 10 000 livres. Quant au véhicule lourd de contrôle de l'état géométrique (VLoCEG), il doit avoir une charge verticale sur les roues d'au moins 10 000 livres (TC-54, 2012). Les mesures obtenues avec ces véhicules (VLoCEG) sont considérées comme étant des mesures dynamiques de la géométrie représentatives d'une voie sous charge.

La figure 2.11 illustre le mouvement dynamique de la voie ferrée lorsqu'elle est mise sous charge. On remarque un déplacement entre les mesures statique et dynamique.

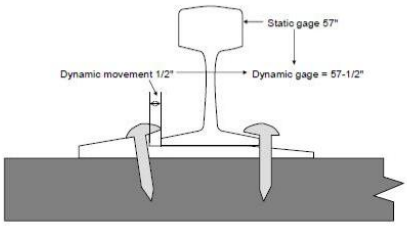

Figure 2-11 : Mouvement dynamique de la voie ferrée lorsqu'elle est mise sous charge (Federal Railroad Administration Track Safety Standards Compliance Manual, 2002).

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation géométrique de la voie ferrée a été effectuée par un train, soit un véhicule lourd. Par conséquent, les données récoltées sont considérées comme étant des données sous charges.

2.6 Études portant sur l'analyse de la voie ferrée

Quelques travaux de recherches portant sur l'analyse de la voie ferrée seront présentés dans cette section. Les résumés de ces études donnent un aperçu des méthodes utilisées, ainsi que des approches ou des outils utilisés, lors des inspections et de la surveillance de la voie ferrée.

Dans une étude espagnole (Salvador, Narnajo, Insa et Teixera, 2016), les auteurs utilisent une approche topographique (*surveying approach*) capable de détecter et de classifier les différentes irrégularités présentes sur la voie ferrée, ainsi que les modes de vibration. Leur étude vise à approfondir l'acquisition des données, ainsi que les techniques de traitement de données. Les auteurs précisent que les données proviennent des accélérations des boîtes de roulements des essieux (*axlebox accelerations*), et que les tests ont été effectués sur les voies ferrées du Metrovalencia, à Valence. Une analyse spectrale (*spectral analysis)* et une représentation fréquence-temps (time-frequency representation) ont permis d'identifier avec précision les défauts géométriques de la voie ferrée, les différents éléments de la voie ferrée ainsi que les modes de vibrations. L'étude démontre que la détection des défauts géométriques de la voie ferrée peut être effectuée avec un Hamming de 0,3 à 0,5 s et coïncide à 95% à la fenêtre du temps du spectrogramme. Ceci permet de détecter plus facilement les défauts géométriques de la voie ferrée. Les résultats obtenus démontrent une reconnaissance des éléments de la voie ferrée, ainsi que les fréquences de résonnance correspondantes. Les défauts géométriques de la voie ferrée sur les joints soudés, les joints redondants qui sont utilisés pour la signalisation de la voie ferrée, les aiguillages,

ainsi que les défauts de surfaces des rails peuvent être facilement classifiés (Salvador, Narnajo, Insa et Teixera, 2016).

Une étude américaine (Lasisi et Attoh-Okine, 2018) avait pour objectif d'utiliser une approche par apprentissage automatique (*machine learning approach*) dans le domaine ferroviaire. Cette étude permet d'étudier la possibilité de réduire les multiples indices qui décrivent la géométrie de la voie ferrée en un *Low Dimensional Form* (TQI) sans perdre d'informations significatives. (Lasisi et Attoh-Okine, 2018). En effet, les auteurs ajoutent que la quantité de données des inspections prises au pied est passée de mégaoctets à pétaoctets. Le volume de données cause notamment un problème d'emmagasinage des données, ainsi que de traitement de données. Les auteurs ont donc décidé d'utiliser les principales composantes en tant que TQI et ils ont utilisé une approche en deux étapes. Premièrement, ils ont identifié une technique d'apprentissage automatique qui fonctionne bien avec les données de la géométrie de la voie ferrée. La seconde étape visait à former la technique d'apprentissage automatique sur un échantillon de données récoltées sur un mile, en utilisant des TQI combinés, ainsi que les principales composantes en tant que prédicteurs de défauts. Les résultats démontrent que les trois composantes principales étaient de meilleurs prédicteurs de la présence de défauts géométriques sur la voie ferrée, que les TQI combinés, bien que certaines autres corrélations puissent potentiellement être utilisées lors des interventions de maintenance de la voie ferrée (Lasisi et Attoh-Okine, 2018)

Une étude suédoise (Berggren, Li et Spannar, 2018) a présenté une approche pratique permettant d'améliorer l'évaluation de la géométrie verticale de la voie ferrée et de la rugosité du rail, par le biais d'une simulation de l'interaction rail-roue et d'une analyse du contenu des longueurs d'ondes. Les auteurs ajoutent que cette approche permettrait de mieux intervenir lors des activités de maintenance de la voie ferrée. Les résultats présentent les deux outils utilisés dans cette approche pratique (Berggren, Li et Spannar, 2018). Le premier outil permet de calculer les forces d'interaction verticale rail-roue et les irrégularités mesurées sur la voie ou sur le rail. Le second outil introduit permet d'utiliser le fait que l'amplitude de la qualité de la géométrie de la voie ferrée et la rugosité du rail varient considérablement avec les longueurs d'onde.

Dans cette étude indienne (Chellaswamy, Krishnasamy, Balaji, Dhanalakshmi et Ramesh, 2017), les auteurs décrivent une nouvelle méthode permettant de détecter les défauts sur la voie ferrée. Les auteurs ajoutent que les anomalies de la voie ferrée créent des vibrations, mais que les bruits

externes de fond ont tendance à déformer les signaux envoyés aux capteurs. Afin de résoudre ce problème, les chercheurs ont développé une nouvelle méthode, le *Dynamic differential Evolution algorithm (RHMDE)* pour identifier les défauts sur la voie ferrée. Les chercheurs ont également installé des accéléromètres MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) sur les plans vertical et horizontal du bogie, afin de détecter les anormalités sur la voie. Une boîte de roulement (*axle box*) a également été utilisée. La méthode consiste en ce que l'accélération verticale des wagons ferroviaires soit analysée à l'aide d'un algorithme de régression et d'une analyse spectrale par le biais des transformations de série de Fourier (FFT). Ensuite, l'accélération verticale des extrémités du wagon ont été comparée à l'aide d'une régression simple. Cette méthode permet d'identifier les anomalies présentes sur la voie ferrée (Chellaswamy, Krishnasamy, Balaji, Dhanalakshmi et Ramesh, 2017). Les auteurs affirment que les résultats obtenus lors de l'expérience démontrent que la méthode RHMDE est supérieure aux autres méthodes existantes, afin de détecter des défauts sur la voie ferrée.

Une équipe de chercheurs suédois ont développé un équipement portable pouvant mesurer l'alignement de la voie ferrée et pouvant être installé sur n'importe quel véhicule ferroviaire (Gustafsson et Larsson, 2019). Le but de cet équipement portable est d'augmenter le nombre d'inspections de la voie ferrée, tout en augmentant le temps disponible pour le trafic ferroviaire. Ce système *Track Logger* est connecté à des accéléromètres, à un gyroscope et à un GPS. Les accéléromètres sont installés sur les boîtiers des roulements de l'essieu, tel qu'illustré sur la figure 2.12. On remarque qu'un seul bogie est équipé du système *Track Logger*.

.

Figure 2-12: Track Logger (Gustafsson et Larsson, 2019).

Le système *Track Logger* consiste à récolter des données de nivellement et d'alignements sur la voie ferrée, et il collecte les accélérations lorsqu'une anomalie de nivellement ou d'alignement est détectée. Aucun traitement de données n'est effectué en temps réel. En conclusion, les auteurs soulignent qu'une augmentation de la disponibilité des données peut permettre de comparer les taux de dégradation de la voie ferrée à travers le temps, et de planifier les interventions de maintenance en conséquence.

Récemment, une étude canadienne (Tien Do, Abdulrazagh, Gül, Hendry, Roghani et Toma, 2020) s'est intéressée à l'évaluation de la qualité du confort de la voie ferrée, par le biais d'un téléphone intelligent. L'étude s'est déroulée sur une route de VIA Rail, en Ontario. Les auteurs se réfèrent aux normes suivantes, afin de quantifier la qualité du confort de la voie ferrée : la norme internationale ISO 2631:1-1997 et la norme britannique BS EN 12299:2009. Les données des vibrations étaient collectées par plusieurs téléphones intelligents installés à différents endroits sur le train. Afin de vérifier la précision des capteurs du téléphone intelligent, les chercheurs ont effectué un test en laboratoire en comparant les données collectées par le biais d'un téléphone intelligent (vibration, vitesse et données de géolocalisation) et les données collectées par un accéléromètre conventionnel sans fil sur une voie ferrée de VIA Rail. Les résultats démontrent que la qualité des données collectées par le téléphone intelligent est semblable à celle collectée par les capteurs sans fil. De plus, l'étude démontre que le confort de la voie ferrée est affecté considérablement aux points fixes suivants : aux approches de ponts, aux passages à niveau, aux joints mécaniques, aux aiguillages et aux courbes. En effet, il est observé que les valeurs maximums des accélérations concordent avec la géolocalisation de ces points fixes sur la voie ferrée. Les auteurs ajoutent que ce constat démontre le potentiel des accélérations détectées par des téléphones intelligents dans l'identification des variations abruptes de vitesse sur la voie ferrée. Les auteurs concluent en affirmant que l'analyse des données collectées par des appareils mobiles représente une méthode d'évaluation rapide et économique permettant de quantifier la qualité du confort de la voie ferrée et des conditions de la voie ferrée, et ce presque en temps réel (Tien Do, Abdulrazagh, Gül, Hendry, Roghani et Toma, 2020).

Les travaux de recherche présentés dans cette sous-section illustrent bien l'intérêt que porte le domaine ferroviaire à l'international, envers l'analyse de la géométrie de la voie ferrée et de la qualité du confort de la voie ferrée, l'acquisition et le traitement des données, ainsi que le

développement de nouvelles technologies permettant d'améliorer les inspections et la surveillance de la voie ferrée.

Plus particulièrement, la récente étude canadienne (Tien Do, Abdulrazagh, Gül, Hendry, Roghani et Toma, 2020) illustre bien à quel point il est d'actualité dans la recherche ferroviaire de s'intéresser à la relation qui existe entre la qualité du confort de la voie ferrée et la géométrie de la voie ferrée.

Les objectifs poursuivis dans le cadre de notre projet de recherche sont toutefois différents, puisque l'identification précise des défauts géométriques affectant la qualité du confort de la voie ferrée a été ciblée, ainsi que l'identification des plans dans lesquels se situent ces défauts géométriques problématiques qui affectent considérablement la qualité du confort de la voie ferrée. La méthodologie utilisée distingue également la présente étude des autres travaux de recherche antérieurs présentés. Néanmoins, il est espéré que les résultats obtenus dans cette étude puissent également contribuer à l'amélioration de nouvelles technologies d'inspection et de surveillance de la voie ferrée.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, le lieu géographique dans lequel les données ont été récoltées sera présenté. La seconde section présentera les données utilisées dans le cadre de cette étude. Finalement, les étapes de la méthodologie utilisée seront détaillées dans la troisième section.

3.1 Lieu géographique de collecte des données

Dans le cadre de cette étude, la subdivision de Smith Falls de VIA Rail Canada a été retenue, car celle-ci comporte plusieurs composantes ferroviaires, telles que des ponts, des aiguillages et des passages à niveau. La subdivision de Smith Falls ayant été bâtie dans un marécage, plusieurs problèmes de drainage et de sursaturation de la plateforme de la voie ferrée subsistent dans ce secteur. Roghani, Kashani et Wiljanen (2019) affirment que l'effet du gel ainsi que l'adoucissement de la plateforme de la voie ferrée affectent considérablement l'intégrité de la voie ferrée. En effet, ceci entraîne la dégradation de la géométrie de la voie ferrée ainsi que la qualité du confort de la voie ferrée.

La figure 3.1 illustre bien l'ensemble des facteurs qui contribuent à la dégradation de la voie ferrée.

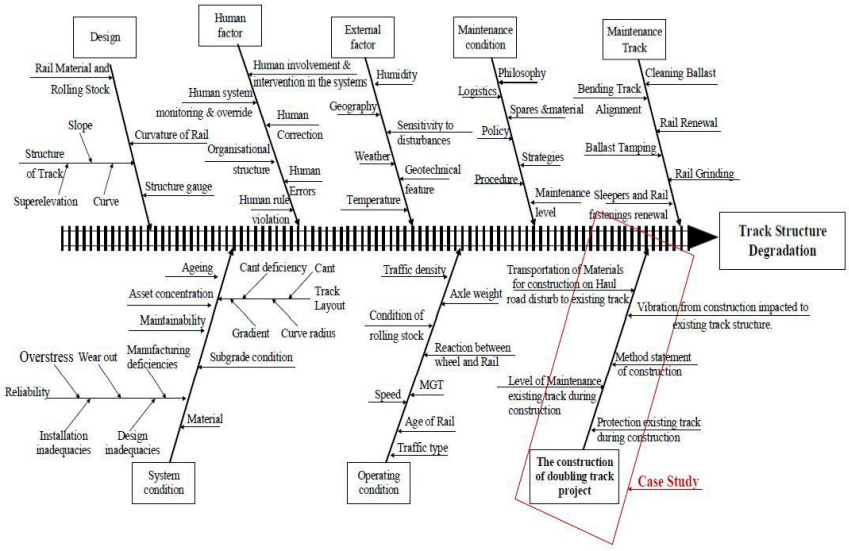

Figure 3-1 : Diagramme de poisson qui démontre les facteurs qui contribuent à la dégradation de la voie ferrée (Phanyakit et Satiennam, 2018)

La figure 3.2 permet de situer la subdivision de Smith Falls en Ontario, près de la ville D'Ottawa. Seuls les points de miles (*milepoints*) 1 à 12 font partie de l'étude, puisque la majorité des défauts géométriques de la voie ferrée détectés par le train d'évaluation se situent entre ces points de miles.

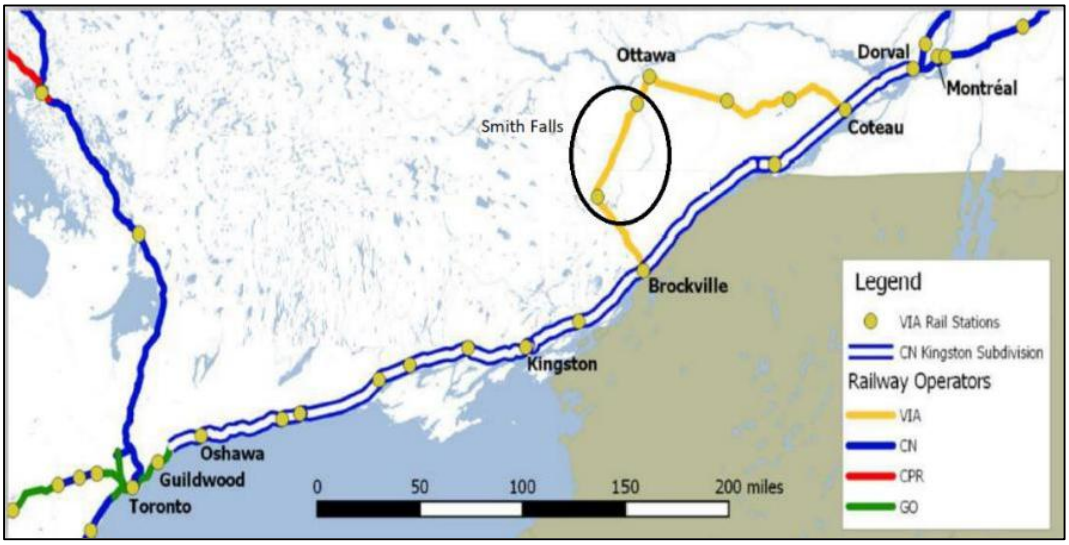

Figure 3-2 : Localisation de la subdivision de Smith Falls (Technical Report VIA Remote Track Monitoring du CNRC, 2019)

Un exemple d'un train d'évaluation de la voie ferrée est illustré à la figure 3.3.

Figure 3-3 : Train d'évaluation de la géométrie de la voie ferrée EM120N (State Railway of Thailand, 2015, cité dans Phanyakit et Satiennam, 2015)

À bord du train d'évaluation, les données des défauts géométriques sont récoltées par un système de laser et elles sont représentées en temps réel sur un graphique illustré à la figure 3.4. Par exemple, on peut observer dans ce graphique que le profil (R Surf 62 et L Surf 62) de la voie ferrée représente les défauts géométriques évalués qui affectent la qualité du confort de la voie ferrée.

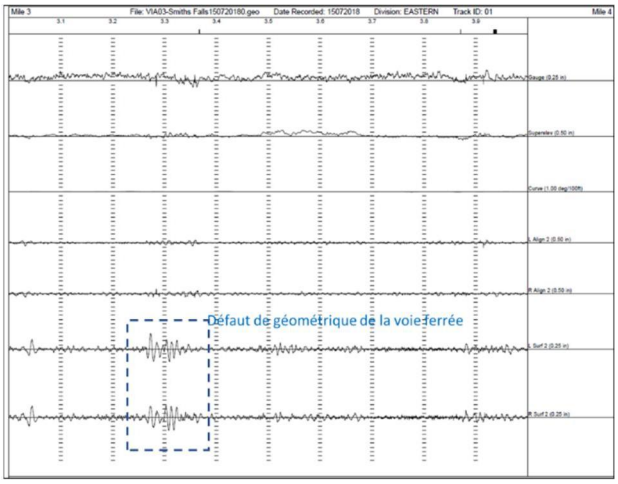

Figure 3-4 : Défauts géométriques de la voie ferrée détectés par le train d'évaluation de la voie ferrée au point de mile 3 Smith Falls.

Ensuite, la figure 3.5 illustre les accélérations récoltées et évaluées par le bogie instrumenté. Les accélérations évaluées démontrent que la qualité du confort de la voie ferrée est affectée.

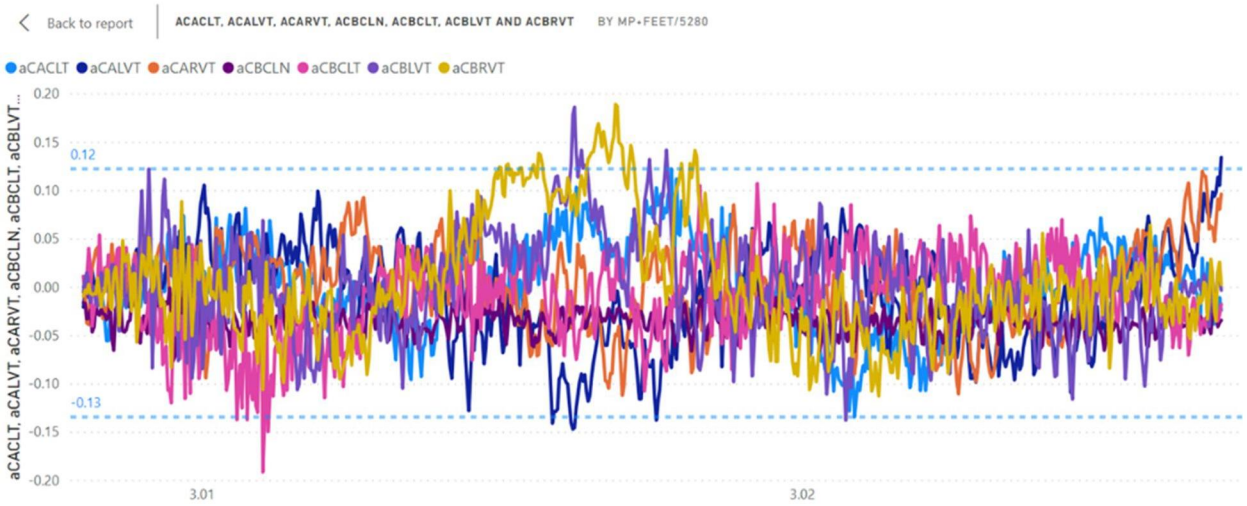

Figure 3-5 : Accélérations du bogie instrumenté au point de mile 3 Smith Falls

3.2 Données utilisées dans l'étude

Les données utilisées dans le cadre de cette étude proviennent du CNRC, en ce qui a trait aux données d'accélérations (qualité du confort de la voie ferrée), et proviennent également de VIA Rail en ce qui a trait aux données des défauts géométriques de la voie ferrée. Les données d'accélération provenant du CNRC, et disponibles dans le rapport *Technical Report VIA Remote Track Monitoring* (2019), ont été collectées par deux bogies instrumentés. Quant aux données des défauts géométriques de la voie ferrée, elles ont été collectées par un train d'évaluation de la géométrie de la voie ferrée, par VIA Rail.

Plus particulièrement, dans le but d'établir des corrélations entre les accélérations (qualité du confort de la voie ferrée) et les défauts géométriques identifiés, quatre défauts géométriques de la voie ferrée ont été retenus, ainsi que sept accélérations, étant donné que ce sont les accélérations qui ont permis d'évaluer la qualité du confort de la voie ferrée. Afin d'établir les corrélations les plus significatives, les données retenues ont été collectées à deux dates les plus rapprochées possible, soit le mois d'août 2018 en ce qui concerne les données de la qualité du confort de la voie ferrée et le 19 novembre 2018 en ce qui concerne les défauts géométriques de la voie ferrée. Il est à rappeler que les données ont été récoltées sur la subdivision de Smith Falls, entre le point de mile 1 et le point de mile 12. Un délai de trois mois peut sembler long, mais il s'explique par le fait que toutes les données disponibles ne provenaient que de ces deux dates. Toutefois, malgré le délai de temps entre les deux collectes de données, aucune intervention de maintenance et aucune réparation n'ont été effectuées entre ceux deux dates sur le tronçon de la voie ferrée retenu pour cette étude. De plus, aucune variation de température susceptible d'affecter la géométrie de la voie verrée n'a été observée. Autrement dit, le temps écoulé entre les deux collectes de données ne semble pas avoir eu d'incidence sur les corrélations calculées.

3.2.1 Les données d'accélération

Au départ, 32 données d'accélération étaient disponibles dans le *Technical Report VIA Remote Track Monitoring* (2019). Sept accélérations ont finalement été retenues pour cette étude, car elles permettaient de situer les trois plans suivants : latéral, vertical et longitudinal. Les données ont été récoltées à une fréquence de 500 Hz (*Technical Report VIA Remote Track Monitoring,* 2019), soit 500 données à la seconde sur un bogie instrumenté.

3.2.2 Nomenclature et convention d'un wagon

Le côté « B » du wagon est considéré comme étant le côté référentiel. Le frein du wagon se situe dans le côté « B ». D'une part, le côté « B » permet d'identifier le côté gauche et le côté droit du rail. Aussi, le côté « B » permet d'établir l'orientation des essieux 1 à 4, tel qu'illustré dans la figure 3.6.

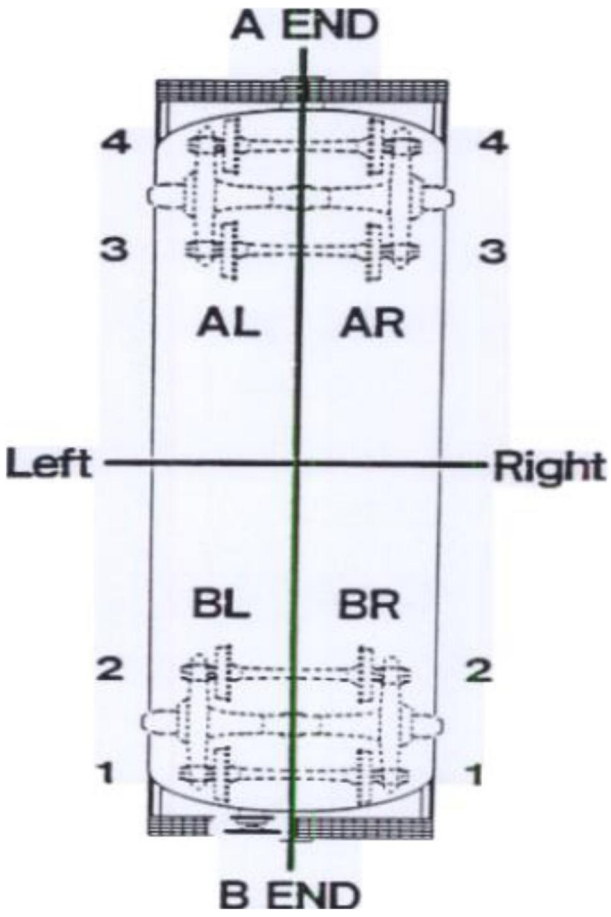

Figure 3-6: Nomenclature et convention d'un wagon (Railway Association of Canada, 2017)

Le tableau 3.1 décrit l'emplacement des accéléromètres sur les bogies instrumentés situés sur le wagon, l'orientation ainsi que les emplacements. Quant au tableau 3.2, il décrit les emplacements des accéléromètres sur un bogie instrumenté.

Tableau 3.1 : Les canaux d'accélérations utilisées dans cette étude, ainsi que leurs emplacements sur le bogie instrumenté, selon le Technical Report VIA Remote Track Monitoring (2019)

Les sept canaux utilisés pour effectuer les corrélations avec les défauts			
Numéro canal	Description	Orientation	Emplacements
18	aCBCLN	Longitudinale	Wagon, côté B, au centre (Carbody, B-End, centreline)
19	aCARVT	Verticale	Wagon, côté A, côté droit (Carbody, A-End, right side)
20	aCALVT	Verticale	Wagon, côté A, côté gauche (Carbody, A-End, left side)
21	aCBRVT	Verticale	Wagon, côté B, côté droit (Carbody, B-End, right side)
22	aCBLVT	Verticale	Wagon, côté B, côté gauche (Carbody, B-End, left side)
23	aCACLT	Latérale	Wagon, côté A, au centre (Carbody, A-End, centreline)
24	aCBCLT	Latérale	Wagon, côté B, au centre (Carbody, B-End, centreline)

Tableau 3.2 : Les accéléromètres aCBCL et aCBCLN, selon le Technical Report VIA Remote Track Monitoring (2019)

	Exemples d'accéléromètres qui ont permis de récolter les accélérations. Les images illustrent les accéléromètres aCBCL pour récolter les données dans le plan latéral et aCBCLN pour récolter les données dans le plan longitudinal.

3.2.3 Les données des défauts géométriques de la voie ferrée

Dans le cadre de la présente étude, on a retenu quatre défauts géométriques, en prenant pour critère leur niveau de criticité. Autrement dit, ces défauts géométriques étaient associés à des anomalies de la voie ferrée pour lesquels il était crucial de planifier des activités de maintenance. Donc, plus précisément, les défauts géométriques **d'alignement** (R Align 62 et L Align 62) et de **profil** (R Prof 62 et L Prof 62) [1]de la voie ferrée ont été retenus et ils ont été collectés par un train d'évaluation de la géométrie de la voie ferrée. Les tableaux 3.3 et 3.4 présentent les défauts géométriques d'alignement, *right et left,* et les tableaux 3.5 et 3.6 présentent les défauts géométriques de profil, *right* et *left*. On peut observer qu'il existe moins de données disponibles pour les défauts géométriques d'alignement, en comparaison avec les données des défauts géométriques de profil. Cela s'explique tout simplement qu'il y avait moins de défauts d'alignement présents sur le tronçon de la voie ferrée, au moment de l'évaluation effectuée par le train d'évaluation. Il est certain que la quantité moindre de données de défauts géométriques d'alignement, en comparaison avec la quantité de données de défauts géométriques de profil, aura une incidence sur les corrélations calculées ultérieurement. Cela sera présenté dans la section portant sur les résultats.

Tableau 3.3 : Défauts géométriques R Align 62 de la voie ferrée

Date de l'inspection	Saison	Catégorie de voie	Description du défaut	Valeur maximale
19-nov	Automne	Principale	R Align 62	-0,49
19-nov	Automne	Principale	R Align 62	0,66
19-nov	Automne	Principale	R Align 62	-0,62
19-nov	Automne	Principale	R Align 62	0,6
19-nov	Automne	Principale	R Align 62	-0,51
19-nov	Automne	Principale	R Align 62	0,41

Tableau 3.4 Défauts géométriques L Align 62 de la voie ferrée

Date de l'inspection	Saison	Catégorie de voie	Description du défaut	Valeur maximale
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	-0,47
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	0,55
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	0,56
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	-0,51
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	-0,56
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	0,45
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	0,56
19-nov	Automne	Principale	L Align 62	-0,43

[1] L désigne Left , soit le côté gauche de la voie ferrée et R désigne Right, soit le côté droit de la voie ferrée

Tableau 3.5 Défauts géométriques R Prof 62 de la voie ferrée

Date de l'inspection	Saison	Catégorie de voie	Description du défaut	Valeur maximale
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.79
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.78
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.95
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.88
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.82
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.83
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.83
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-1.03
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.88
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.83
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.09
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.87
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-1.01
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.09
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.85
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.8
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.95
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-1.14
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.8
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.79
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.82
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.79
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.12
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.86
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.97
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-1.21
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.91
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.93
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.07
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.11
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.08
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.92
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	-0.79
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.79
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	0.98
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.2
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.03
19-Nov	Automne	Principale	R Prof 62	1.11

Tableau 3.6 Défauts géométriques L Prof 62 de la voie ferrée

Date de l'inspection	Saison	Catégorie de voie	Description du défaut	Valeur maximale
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	1.07
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.95
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1.27
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1.25
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	1.17
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1.33
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.84
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	1.03
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.88
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	1.06
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	1.07
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.8
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.85
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.95
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.78
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1.08
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	1.01
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.93
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.85
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.89
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.77
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.88
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.78
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.85
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.87
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.98
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1.26
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-1.6
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.78
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	0.8
19-Nov	Automne	Principale	L Prof 62	-0.93

3.3 Étapes de la méthodologie pour identifier le minimum et maximum

La figure suivante présente les étapes de la méthodologie, qui seront détaillées dans les sections suivantes. En effet, les étapes 1 à 7 ont été effectuées avec le logiciel Excel, tandis que l'étape 8 a été effectuée à l'aide du logiciel Statistica pour les calculs des régressions linaires multiples.

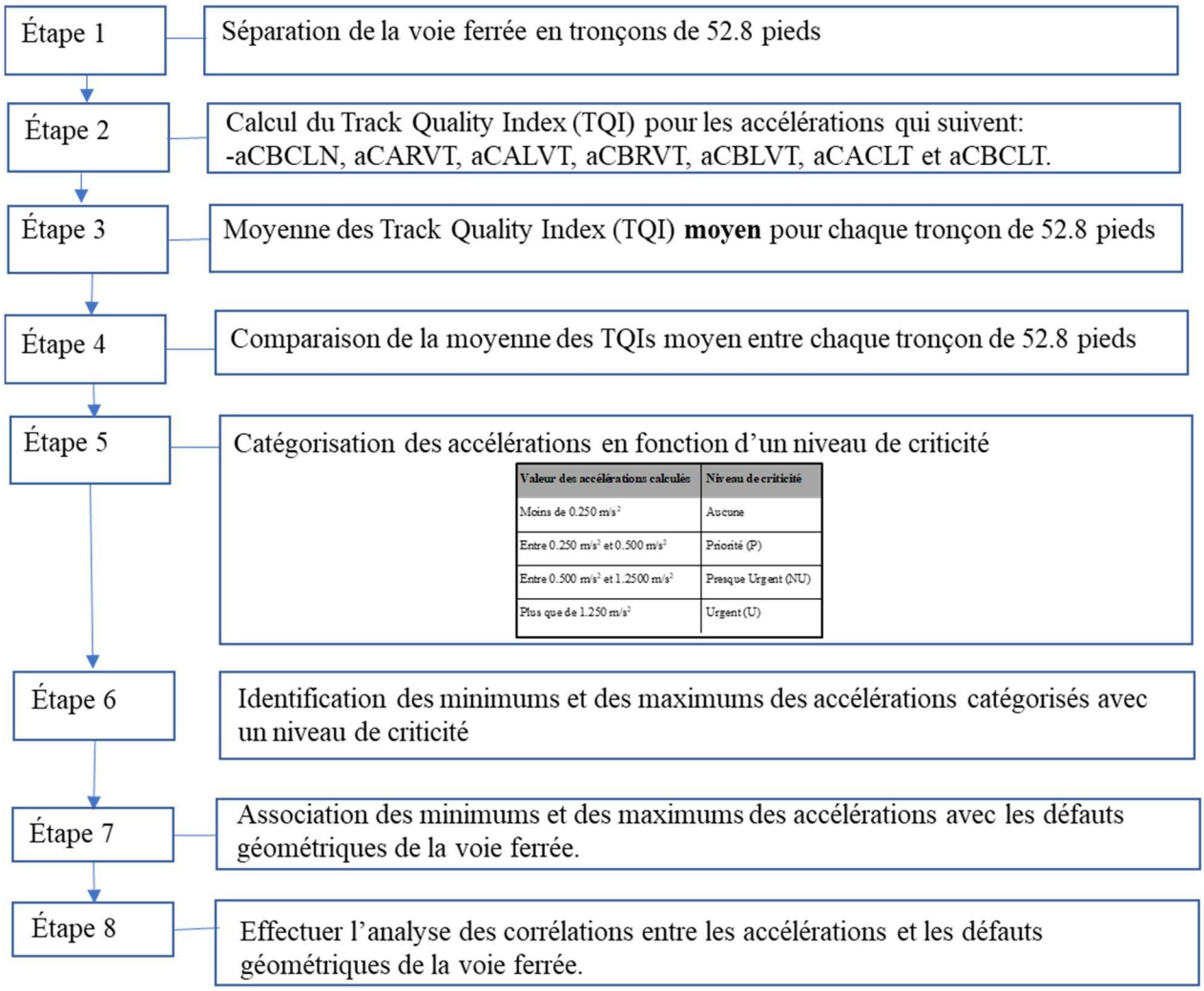

Figure 3-7 : Diagramme des étapes de la méthodologie

3.3.1 Étape 1 : Séparation de la voie ferrée en tronçons de 52.8 pieds

La formule du TQI a été retenue et les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel Microsoft Excel. Par contre, afin d'avoir un degré de précision plus élevé, au lieu de séparer la voie en tronçons de 1320 pieds, nous avons décidé que la voie ferrée serait séparée en tronçons de 52.8 pieds (16.1 mètres). La distance de 52.8 pieds représente 1 / 100 de la valeur d'un mile, et c'est la distance la plus précise que nous avons pu obtenir après plusieurs essais de segmentation. En effet, la segmentation est donc 25 fois plus précise que la segmentation de 1320 pieds utilisée normalement avec la formule du TQI dans l'industrie ferroviaire. Ceci nous permettra notamment d'identifier avec plus de précision les anomalies présentes sur la voie ferrée. Étape 2 : Calcul du TQI des accélérations

3.3.2 Étape 2 : La formule du Track Quality Index (TQI)

La formule du Track Quality Index (TQI) est utilisée afin d'identifier les tronçons problématiques de la voie ferrée. Au préalable, il est nécessaire de séparer la voie ferrée en tronçons de 1320 pieds (1/4 de mile, soit 402,34 mètres), selon les meilleures pratiques d'ingénierie d'AREMA (2008). En deuxième lieu, la formule TQI consiste à calculer séparément l'écart-type sur chacun des défauts géométriques suivants : de surface, d'alignement, d'écartement, du dévers et du nivellement pour chaque tronçon de 1320 pieds. En troisième lieu, une moyenne des écarts-types est calculée pour chaque tronçon de 1320 pieds. Finalement, plus la valeur de la moyenne des écarts types est élevée, plus on remarque une importante dégradation de la qualité de la voie ferrée.

Au Canada, le TQI est calculé selon la formule des Chemins de Fer Nationaux du Canada:

$$TQI_i = 1000 - C * {\sigma_i}^2$$

La formule des Chemins de Fer Nationaux du Canada est une équation polynomiale de degré deux. L'écart type σ_i est la qualité géométrique de la voie ferrée sur un tronçon de la voie ferrée Le C est une constante de valeur 700 (Liu et al, 2015 cités dans Setiawan et Rosyidi, 2016). Soit 1000 le tronçon de la voie idéal sans aucun défaut géométrique de la voie ferrée.

À l'aide de la formule du TQI, l'écart type pour chacune des accélérations suivantes est calculé : aCBCLN, aCARVT, aCALVT, aCBRVT, aCBLVT, aCACLT et aCBCLT.

Ensuite, une moyenne des écarts-types est calculée pour chaque tronçon.

3.3.3 Étape 3 : Calcul de la moyenne de tous les TQI moyen des accélérations, pour chaque tronçon de 52.8 pieds

Lors de cette troisième étape, nous avons choisi d'ajouter un calcul de la moyenne de tous les TQI moyens, pour chaque tronçon de 52.8 pieds, afin de pouvoir observer la tendance centrale des données d'accélérations dans un tronçon donné. Autrement dit, chaque tronçon aura sa propre moyenne générale. Cette étape est réalisée, afin de trouver la valeur autour de laquelle se concentrent les données des accélérations.

3.3.4 Étape 4 : Comparaison des moyennes des TQI moyens, entre chaque tronçon de 52.8 pieds

Ensuite, entre chaque tronçon, nous avons décidé de comparer entre elles les valeurs moyennes des TQI moyens, afin d'établir la différence entre la valeur moyenne actuelle du tronçon évalué et la valeur moyenne du TQI moyen évalué pour le tronçon précédent. Ceci nous permet de voir si, de tronçon en tronçon, les moyennes des accélérations augmentent ou diminuent, ou bien si elles demeurent stables. Ces différences de valeurs d'accélération vont ensuite nous servir à catégoriser les accélérations, selon leur niveau de criticité, tel que présenté dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Niveau de criticité des accélérations

Valeur des différences des accélérations calculées	**Niveau de criticité**
Moins de 0.250 m/s^2	Aucune
Entre 0.250 m/s^2 et 0.500 m/s^2	Priorité (P)
Entre 0.500 m/s^2 et 1.2500 m/s^2	Presque Urgent (NU)
Plus que de 1.250 m/s^2	Urgent (U)

3.3.5 Étape 5 : Catégorisation des accélérations de 52.8 pieds en fonction du niveau de criticité

Les valeurs d'accélérations du tableau 3.7 sont inspirées des données d'accélérations présentées dans le tableau 3.8. En effet, le tableau 3.8 permet de catégoriser les accélérations et les niveaux de confort associés auquel un être humain peut être exposé, sur une période de 8 heures.

Tableau 3.8 : Comfort Reactions to Vibrations ISO-2631-1:1997

ISO-2631-1:1997 Comfort Reactions to Vibrations Environments	
Magnitude of total RMS	**Classification**
Less than 0.315 m/s^2	Not comfortable
0.315 m/s^2 to 0,63 m/s^2	A little uncomfortable
0.5 m/s^2 to 1,0 m/s^2	Fairly uncomfortable
0.80 m/s^2 to 1,6 m/s^2	Uncomfortable
1.25 m/s^2 to 2,5 m/s^2	Very uncomfortable
Greater than 2 m/s^2	Extremely uncomfortable

Le tableau 3.8 illustre la classification des accélérations selon la norme ISO-2631-1 :1997. Alors le tableau 3.7 a été librement adapté, afin de classer les accélérations en fonction d'un niveau de criticité : Prioritaire, Presque Urgent et Urgent. Le choix des termes utilisés dans cette nouvelle classification adaptée vise à nommer les niveaux de criticité pour les accélérations de la même façon que pour les défauts géométriques, afin qu'il y ait une similitude entre les deux variables. Ce choix a également été motivé par le fait que la catégorisation des défauts géométriques (Prioritaire, presque urgent et urgent) est un standard auquel sont déjà habitués les agents de maintenance de la voie ferrée.

Concernant le tableau 3.7, pour établir le niveau de criticité de Priorité, la limite inférieure a été calculée à partir de 80 % de la valeur de 0.315 m/s2 qui s'avère être l'accélération classée Not

Comfortable. Ensuite, la limite supérieure du niveau de criticité Priorité a été identifiée en sélectionnant la limite inférieure de la classification Fairly uncomfortable du tableau 3.8 soit de 0.500 m/s2.

Aussi, la valeur de 0.500 m/s2 détermine aussi la limite inférieure du niveau de criticité Presque Urgent. Par la suite, la limite supérieure du niveau de criticité Presque Urgent a été identifiée en sélectionnant la limite inférieure de la classification Very Uncomfortable du tableau 3.8 soit de 1,25m/s2. En effet, on remarque dans le tableau 3.8 la classe Very Uncomfortable débute 1.25m/s2 tandis que la valeur maximale de la classe précédente Uncomfortable est de 1,6 m/s2, dans ce cas l'accélération la plus basse a été sélectionnée soit de 1.25 m/s2. Ce qui a permis d'établir la limite supérieure du niveau de criticité Presque Urgent.

Aussi, la valeur de 1.25 m/s2 a permis d'établir le niveau de criticité Urgent. En effet, la valeur de 1.25 m/s2 est la limite inférieure de la classe Very Uncomfortable. Les accélérations qui excèdent la valeur de 1,250 m/s2 sont considérées Urgentes, car d'après le tableau 3.8 les accélérations Very Uncomfortable à Extremely Unconfortable affectent de façon significative la qualité du confort de la voie ferrée.

3.3.6 Étape 6 : Identification des minimums et des maximums des accélérations catégorisées, selon un niveau de criticité

À titre d'exemple, le tableau 3.9 présente les calculs du TQI pour les accélérations, le TQI moyen et le niveau de criticité des accélérations pour chaque tronçon de la voie ferrée, entre le point de mile 3 et le point de mile 4, afin d'illustrer la méthodologie utilisée pour le calcul des minimums et maximums des accélérations.

Tableau 3.9 : Calcul du TQI pour les accélérations, le TQI moyen et le niveau de criticité des accélérations pour chaque tronçon de la voie ferrée entre le point de mile 3 et le point de mile 4

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta	Defaut	Commentaires
3.010	999.604	999.261	999.363	999.858	998.168	998.894	999.462	999.230	0.194	-0.128		-	
3.020	998.881	998.111	998.890	999.893	998.675	997.988	996.699	998.448	0.189	-0.191	0.782	P	Approches d'un pont ferroviaire open deck
3.030	998.783	997.559	997.517	999.920	999.438	998.893	998.703	998.688	0.156	-0.137	0.239	-	
3.040	999.386	998.580	997.408	999.915	999.418	999.455	999.262	999.061	0.159	-0.188	0.373	P	Pont ferroviaire de type open deck
3.050	999.508	999.260	999.228	999.932	999.382	999.438	999.729	999.497	0.103	-0.089	0.436	P	Approches d'un pont ferroviaire open deck
3.060	999.515	999.512	999.237	999.933	999.480	999.687	999.746	999.587	0.083	-0.080	0.090	-	
3.070	999.504	999.304	998.888	999.941	999.731	999.664	999.754	999.541	0.100	-0.094	0.046	-	
3.080	999.620	999.507	999.042	999.946	999.643	999.673	999.752	999.598	0.095	-0.091	0.057	-	
3.090	999.588	999.539	999.277	999.925	999.649	999.703	999.793	999.639	0.088	-0.083	0.042	-	
3.100	999.784	999.413	999.241	999.929	999.608	999.353	999.574	999.557	0.095	-0.085	0.082	-	
3.110	999.706	998.955	998.892	999.930	999.746	999.497	999.682	999.487	0.118	-0.098	0.071	-	
3.120	999.667	999.583	999.527	999.944	999.753	999.681	999.749	999.701	0.080	-0.081	0.214	-	
3.130	999.789	999.638	999.687	999.921	999.746	999.563	999.761	999.729	0.073	-0.068	0.029	-	
3.140	999.821	999.685	999.656	999.944	999.786	999.719	999.788	999.771	0.065	-0.061	0.042	-	
3.150	999.781	999.704	999.702	999.949	999.719	999.502	999.753	999.730	0.080	-0.069	0.042	-	
3.160	999.795	999.629	999.617	999.944	999.686	999.689	999.765	999.732	0.078	-0.065	0.002	-	
3.170	999.768	999.653	999.623	999.956	999.598	999.754	999.839	999.742	0.069	-0.065	0.010	-	
3.180	999.686	999.625	999.483	999.963	999.698	999.759	999.792	999.715	0.076	-0.070	0.027	-	
3.190	999.776	999.675	999.429	999.936	999.772	999.761	999.783	999.733	0.079	-0.082	0.018	-	
3.200	999.768	999.707	999.583	999.904	999.772	999.799	999.794	999.761	0.081	-0.075	0.028	-	
3.210	999.665	999.656	999.607	999.821	999.661	999.782	999.841	999.719	0.082	-0.093	0.042	-	
3.220	999.706	999.716	999.742	999.934	999.751	999.782	999.808	999.777	0.063	-0.070	0.058	-	
3.230	999.830	999.594	999.640	999.945	999.792	999.734	999.740	999.753	0.072	-0.064	0.023	-	
3.240	999.828	999.768	999.671	999.909	999.753	999.720	999.725	999.768	0.064	-0.067	0.014	-	
3.250	999.668	999.572	999.592	999.875	998.975	997.176	998.315	999.025	0.215	-0.179	0.743	NU	Approches d'un passage à niveau
3.260	999.500	996.137	997.375	999.815	999.390	999.217	999.363	998.685	0.150	-0.137	0.340	P	Passage à niveau
3.270	999.562	998.494	998.794	999.877	999.498	998.744	999.350	999.188	0.123	-0.160	0.503	NU	Approches d'un passage à niveau
3.280	999.635	998.949	999.113	999.840	999.286	997.671	998.034	998.933	0.149	-0.155	0.256	P	Approches d'un passage à niveau
3.290	999.617	996.732	996.746	999.839	999.397	998.938	998.592	998.552	0.178	-0.158	0.381	P	Passage à niveau et ponceau de drainage non localisé
3.300	999.675	996.769	996.667	999.894	999.697	999.183	999.158	998.721	0.156	-0.152	0.169	-	
3.310	999.721	998.081	997.946	999.797	999.297	999.238	999.447	999.075	0.241	-0.208	0.355	P	Passage à niveau et ponceau de drainage non localisé
3.320	999.648	999.548	999.329	999.740	998.956	999.269	999.535	999.432	0.217	-0.148	0.357	P	Approches d'un passage à niveau

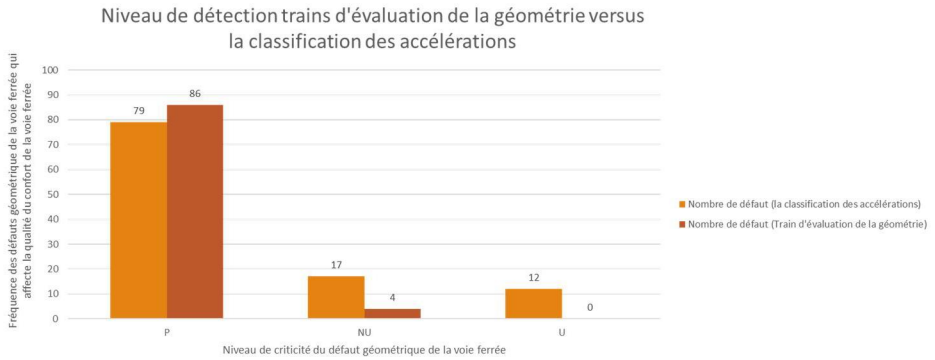

Figure 3-8 Graphique de comparaison entre les défauts géométriques de la voie ferrée recueillis par le train d'évaluation de la voie ferrée et la catégorisation des accélérations

La figure 21 permet de comparer les résultats de la classification des accélérations qu'on a identifié précédemment et sont présentés au tableau 3.9. On remarque que les défauts évalués par les trains d'inspection de la voie ferrée sont beaucoup moins nombreux au niveau de criticité Presque Urgent et Urgent. Ceci est notamment à cause de la différence des règlements d'exploitations ferroviaires qui sont basés sur les opérations ferroviaires de marchandises et non de passagers et qui ne tiennent pas compte du confort de la voie ferrée.

L'exercice de catégorisation des différences d'accélérations en fonction de leur niveau de criticité a été fait pour tous les points de mile 1 à 12 et les tableaux se trouvent en Annexe A. De plus, si on se réfère au diagramme de la voie ferrée illustrée par la figure 3.8, plus précisément entre le point de mile 3 et point de mile 3.3, on voit qu'il y a la présence de passages à niveau et d'un pont ferroviaire qui affectent considérablement les accélérations à ces points fixes.

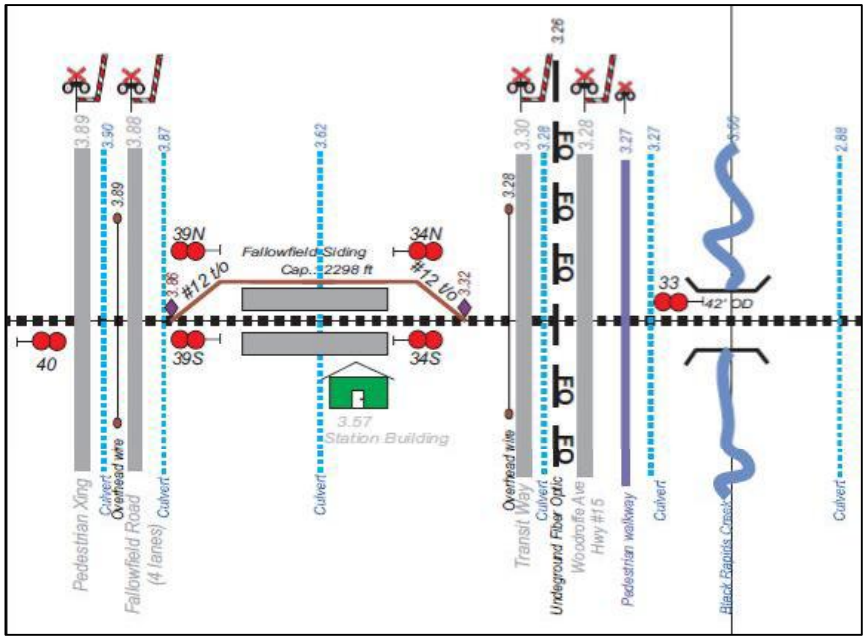

Figure 3-9 : Exemple d'un tronçon de la voie ferrée

On peut observer dans la figure 3.9 que les accélérations de la voie ferrée se produisent au point de mile 3, et ensuite autour des points de mile 3,3.

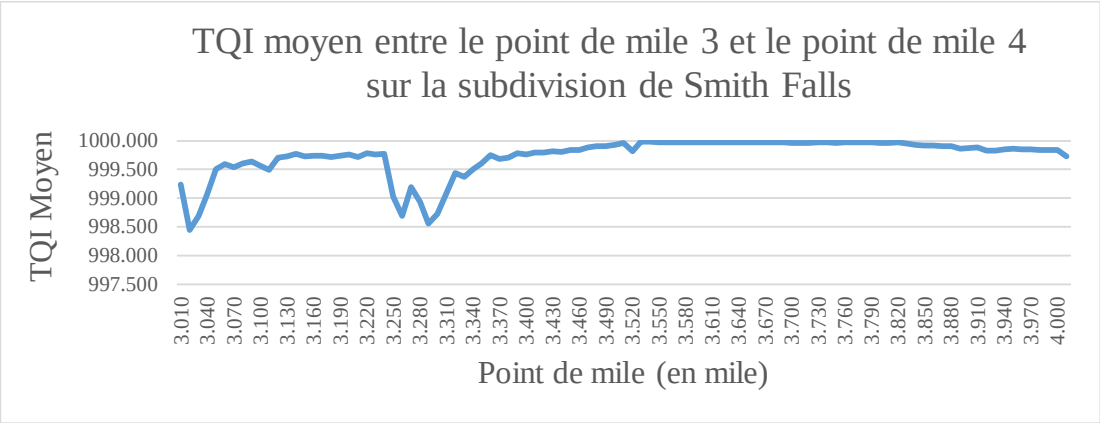

Figure 3-10 : Exemple de graphique de TQI Moyen entre le point de mile 3 et le point de mile 4 sur la subdivision de Smith Falls

En effet, on peut observer sur la figure 3.9 que le TQI est plus bas que la moyenne autour du point de mile 3, ce qui coïncide avec la présence d'un pont ferroviaire dans la figure 3.8. Donc, dans le tableau 3.9, les accélérations au point de mile 3 dont le TQI est plus bas que la moyenne du point de mile 3 sont catégorisés comme étant de Priorité (P). Par la suite, on peut remarquer sur la figure 3.9 que le TQI autour du point de mile 3,3 est nettement plus bas que les moyennes. Un lien peut être fait avec la figure 3.8, puisqu'il y a présence de deux passages à niveau autour du point de mile 3,3, ce qui est susceptible d'affecter considérablement la qualité du confort de la voie ferrée. En plus, selon le tableau 3.9 le niveau de criticité des accélérations au point de mile 3.3 est catégorisé comme étant Priorité (P), sur les surfaces des passages à niveau. Par contre, les approches du premier passage à niveau sont catégorisées comme étant Presque Urgents (NU). En effet, ceci peut indiquer que les approches sont basses et doivent être resurfacées, afin de remettre la surface du chemin de fer égal au passage à niveau. Le piètre état de surface qui affecte la qualité du confort de la voie ferrée peut être causé par l'épandage de sel effectué par les autorités routières, ou tout simplement, par un drainage inadéquat entre le chemin de fer et la ville au passage de niveau.

Dans cette étude, les variables explicatives sont les accélérations, soit aCBCLN, aCARVT, aCALVT, aCBRVT, aCBLVT, aCACLT et aCBCLT et les variables dépendantes sont les valeurs mesurées des défauts géométriques, L Align 62, R Align 62, L Prof 62 et R prof 62.

En premier lieu, à chaque emplacement où est évalué un défaut géométrique de la voie ferrée, on a ajouté et soustrait 50 pieds (horizon glissant). L'ajout et la soustraction de 50 pieds permettent de mieux délimiter le tronçon de la voie ferrée où est identifié le défaut géométrique, afin de pouvoir aussi y identifier l'accélération minimale et maximale sur chacune des accélérations, soit (aCBCLN, aCARVT, aCALVT, aCBRVT, aCBLVT, aCACLT et aCBCLT. La figure 3.10 illustre les minimums et les maximums pour l'ensemble des sept accélérations, tandis que les figures 3.11 à 3.17 présentent le minimum et le maximum pour chaque accélération séparément.

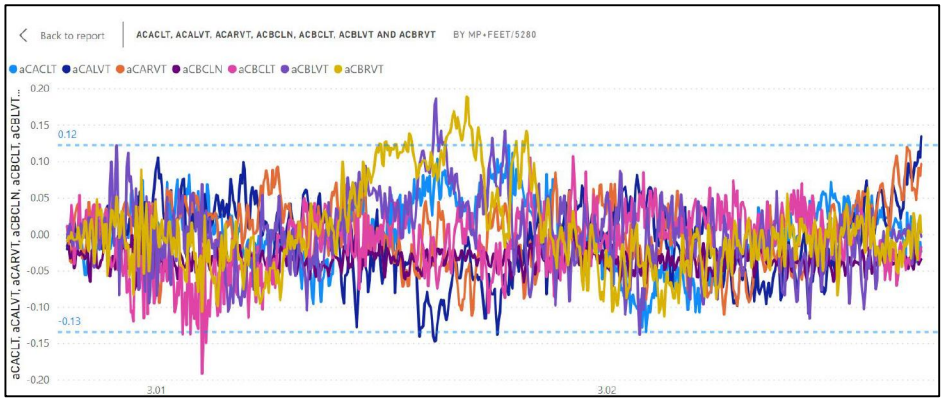

Figure 3-11 : Ensemble des sept accélérations

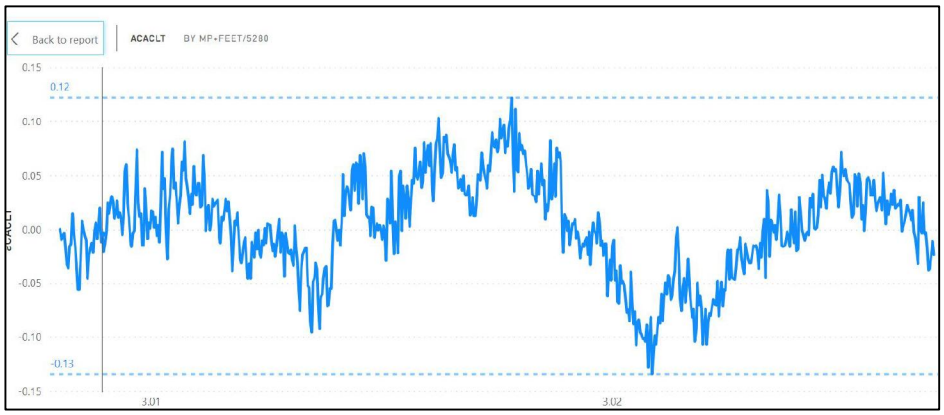

Figure 3-12 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCACLT

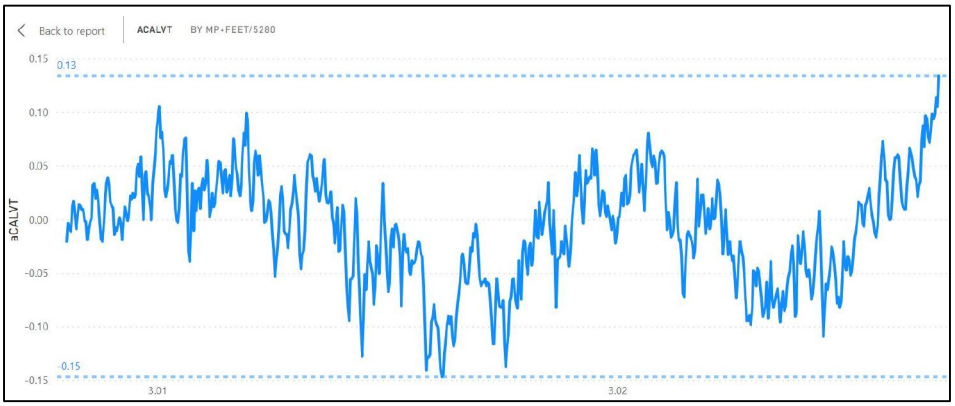

Figure 3-13 : Identification du minimum et maximum pour l'accélération aCALVT

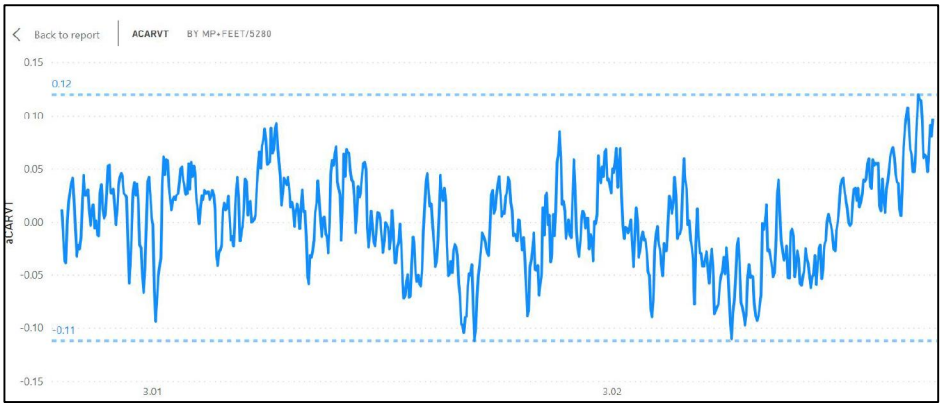

Figure 3-14 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCARVT

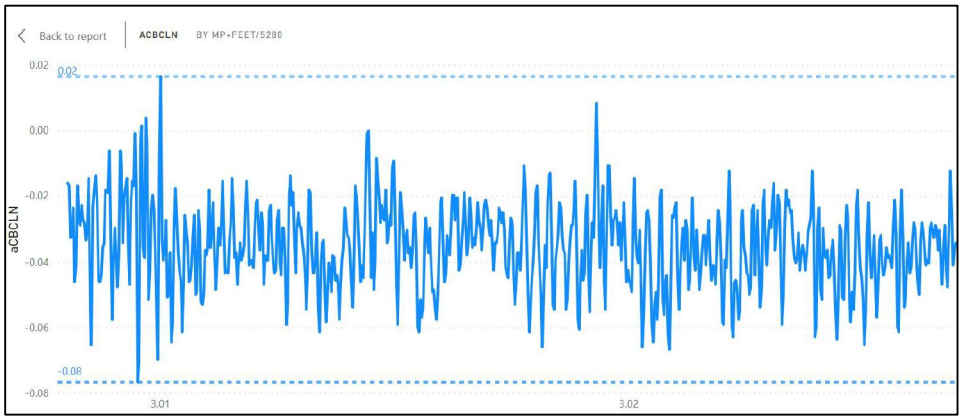

Figure 3-15 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBCLN

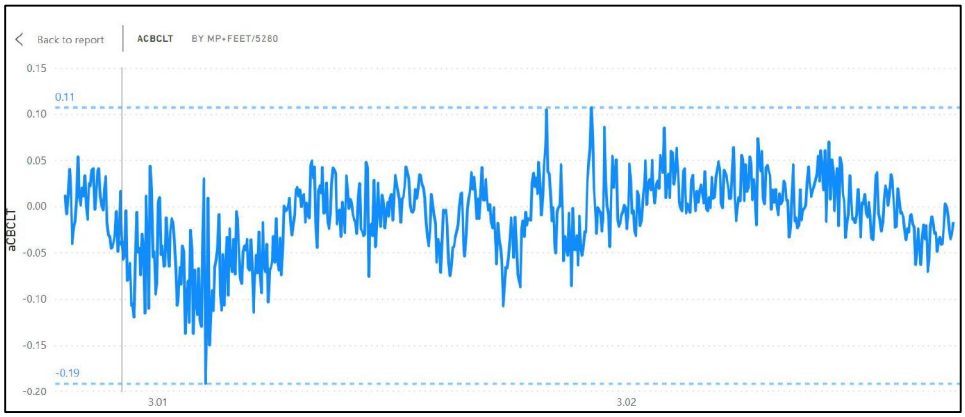

Figure 3-16 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBCLT

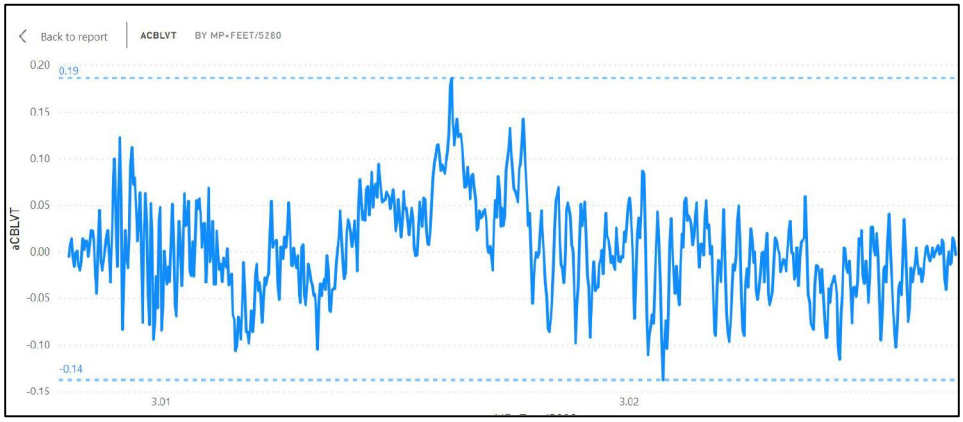

Figure 3-17 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBLVT

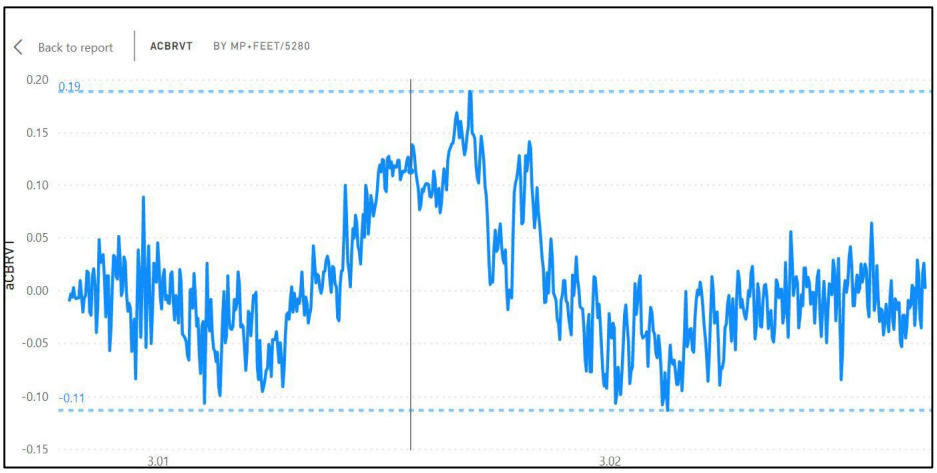

Figure 3-18 : Identification du minimum et du maximum pour l'accélération aCBRVT

3.3.7 Étape 7 : Association des minimums et des maximums des accélérations avec les défauts géométriques de la voie ferrée

Lors de cette étape, le minimum et le maximum de chaque accélération ont été associés aux quatre défauts géométriques de la voie. Les résultats sont disponibles dans l'annexe A. Mais, afin d'illustrer cette étape, le tableau 3.10 présente un exemple d'associations entre les minimums et les maximums des sept accélérations avec le défaut géométrique R Align 62. Le tableau 3.11 présente également un exemple d'associations entre les maximums et les minimums des sept accélérations, mais avec le défaut géométrique L Align 62.

Tableau 3.10 : Les valeurs minimales et maximales des accélérations (aCACLT, aCALVT aCARVT, aCBCLN, aCBCLT, aCBLVT, aCBRVT) associées au défaut géométrique R Align 62

Description du défaut	Valeur maximale detectée par le train d'évaluation de la voie ferrée	Point de mile sur la voie ferrée			Axes du bogie instrumenté													
					aCACLT		aCALVT		aCARVT		aCBCLN		aCBCLT		aCBLVT		aCBRVT	
		Entre le point de mile		Et le point de mile	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale
R Align 62	-0.49	3.008	3.018	3.027	-0.13	0.12	-0.15	0.13	-0.11	0.12	-0.08	0.02	-0.19	0.11	-0.14	0.19	-0.11	0.19
R Align 62	0.66	3.277	3.287	3.296	-0.05	0.09	-0.16	0.16	-0.15	0.18	-0.07	0.02	-0.08	0.09	-0.15	0.14	-0.14	0.12
R Align 62	-0.62	3.318	3.328	3.337	-0.07	0.08	-0.07	0.12	-0.07	0.1	-0.08	0.06	-0.28	0.12	-0.12	0.12	-0.11	0.1
R Align 62	0.6	3.338	3.347	3.356	-0.1	0.09	-0.09	0.09	-0.12	0.11	-0.06	0.01	-0.08	0.06	-0.08	0.06	-0.06	0.07
R Align 62	-0.51	3.346	3.356	3.365	-0.05	0.07	-0.06	0.06	-0.08	0.08	-0.06	0.02	-0.06	0.06	-0.08	0.09	-0.06	0.1
R Align 62	0.41	3.651	3.661	3.670	-0.02	0.03	-0.03	0.02	-0.02	0.03	-0.01	0.01	-0.02	0.02	-0.07	0.03	-0.03	0.03

Tableau 3.11 : Les valeurs minimales et maximales des accélérations (aCACLT, aCALVT aCARVT, aCBCLN, aCBCLT, aCBLVT, aCBRVT) associées au défaut géométrique L Align 62

Description du défaut	Valeur maximale detectée par le train d'évaluation de la voie ferrée	Point de mile sur la voie ferrée			Axes du bogie instrumenté													
					aCACLT		aCALVT		aCARVT		aCBCLN		aCBCLT		aCBLVT		aCBRVT	
		Entre le point de mile		Et le point de mile	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale
L Align 62	-0.47	3.009	3.018	3.028	-0.13	0.12	-0.15	0.13	-0.11	0.12	-0.08	0.02	-0.19	0.11	-0.14	0.19	-0.11	0.19
L Align 62	0.55	3.252	3.261	3.270	-0.12	0.07	-0.13	0.15	-0.13	0.14	-0.08	0.02	-0.1	0.08	-0.16	0.12	-0.12	0.09
L Align 62	0.56	3.255	3.265	3.274	-0.12	0.07	-0.13	0.15	-0.13	0.14	-0.08	0.02	-0.1	0.08	-0.16	0.12	-0.12	0.09
L Align 62	-0.51	3.279	3.288	3.298	-0.05	0.09	-0.16	0.16	-0.15	0.18	-0.07	0.02	-0.08	0.09	-0.15	0.14	-0.14	0.12
L Align 62	-0.56	3.332	3.341	3.351	-0.1	0.09	-0.09	0.09	-0.12	0.11	-0.06	0.01	-0.08	0.07	-0.09	0.07	-0.06	0.07
L Align 62	0.45	3.650	3.659	3.669	-0.02	0.03	-0.03	0.02	-0.02	0.03	-0.01	0.01	-0.02	0.02	-0.07	0.03	-0.03	0.03
L Align 62	0.56	7.182	7.191	7.201	-0.12	0.14	-0.1	0.17	-0.11	0.22	-0.03	0.05	-0.12	0.08	-0.11	0.14	-0.09	0.16
L Align 62	-0.43	9.763	9.772	9.781	-0.12	0.11	-0.12	0.13	-0.11	0.11	-0.05	0.03	-0.09	0.09	-0.09	0.13	-0.09	0.13

3.3.8 Étape 8 : Principe et hypothèse pour effectuer les corrélations entre les minimums et les maximums des accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée

Dans le but de déterminer les corrélations entre les minimums et les maximums des accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée, des régressions linéaires multiples sont réalisées à l'aide du logiciel d'analyse Statistica.

Soit une base de données avec n enregistrements, p variables explicatives Xi= (1, $X1,i,\ldots, Xp,i$) (i variant de 1 à n) et une variable dépendante Y= ($y1,\ldots,yn$)′:

Afin de pouvoir vérifier la validité du modèle, les deux types d'hypothèse doivent être validés, résumés ci-dessous :

Dans le but est pouvoir trouver un vecteur A= ($a0,a1,\ldots,ap$)'

Tel que $Y=XA+\epsilon$ (résidus) où $X=\begin{bmatrix} X1,1 & \cdots & Xp,1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X1,n & \cdots & Xp,n \end{bmatrix}$ et ϵ (résidus) = $\begin{bmatrix} \in 1 \\ \vdots \\ \in 1 \end{bmatrix}$

Hypothèses aléatoires:

- hypothèse 1 : les Xi sont aléatoires.
- hypothèse 5: cov (Xi, ϵj)=0 $\forall i \neq j$, les résidus sont linéairement indépendants des variables exogènes.
- hypothèse 6 : $\epsilon \sim Nn$ (0, $\sigma^2 In$), les erreurs suivent une loi normale multidimensionnelle.

Hypothèses structurelles :

- hypothèse 7 : $X'X$ est régulière et $(X'X)^{-1}$ existe ; absence de colinéarité entre les variables explicatives.
- hypothèse 8 : $(X'X)/n$ tend vers une matrice finie non singulière lorsque $n \to \infty$.
- hypothèse 9 : $n>p+1$, le nombre d'observations est supérieur au nombre de variables +1.

Remarque : Dans le cas où l'hypothèse 6 implique les hypothèses 2, 3 et 4 suivantes :

- hypothèse 2 : $E(\epsilon i)=0$, le modèle est bien spécifié en moyenne ;
- hypothèse 3 : $V(\epsilon i)= \sigma^2 \forall i$, homoscédasticité des erreurs (variance constante) ;
- hypothèse 4 : cov ($\epsilon i,\epsilon j$)=0 $\forall i \neq j$, pas d'autocorrélation des erreurs.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1 Résultats

Cette section permet de présenter les résultats des corrélations entre les miniums et maximums accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée.

4.1.1 Corrélations entre les minimums et les maximums des accélérations et les défauts géométriques de la voie ferrée

Les variables explicatives sont significatives si la valeur du p-valeur qui décrit la probabilité d'un modèle statistique donné est inférieure à 0,05 et que l'hypothèse nulle est rejetée (95% de confiance). Alors, dans notre étude, l'hypothèse nulle est que les données des défauts géométriques de la voie ferrée et des minimums et maximums des accélérations ne sont pas corrélées.

Les corrélations des variables explicatives seront itérées et les modèles retenus sont ceux qui ont la valeur de corrélation la plus grande.

Ensuite, le modèle retenu satisfait les requis des hypothèses et structurelles.

- Dans notre étude l'hypothèse 1 est toujours vraie, car les variables explicatives, soit les données des minimums et des maximums des accélérations sont toutes aléatoires.
- Un graphique des valeurs résiduelles sera généré (ϵi dans le modèle) en fonction de la valeur prédite. En effet, le graphique permet de vérifier l'hypothèse 5. Afin de valider les valeurs prédites, il faudra vérifier si les valeurs prédites se concentrent autour de l'axe des abscisses soit les résidus sont linéairement indépendants des variables exogènes.
- Un graphique Quantile-Quantile permet de vérifier l'hypothèse 6. Le nuage de points des défauts géométriques se concentre près de la bissectrice afin de pouvoir confirmer l'hypothèse 6, soit les erreurs suivent une loi normale multidimensionnelle.

4.1.1.1 Corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts d'alignement sur 62 pieds gauche et droite (L et R)

Tableau 4.1 : Sommaire statistique des accélérations minimales et du défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds

Tableau de sommaire statistique des valeurs minimales du défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds							
	b*	**Std.Err.**	**b**	**Std.Err.**	**t(6)**	**p-value**	**Hypothèse nulle**
aCACLT	-0.2	0.54	-2	7.3	-0.3	0.75	Acceptée
aCALVT	1.0	0.87	12	10.6	1.1	0.31	Acceptée
aCARVT	-0.7	0.91	-10	12.3	-0.8	0.47	Acceptée
aCBCLN	0.8	0.63	18	14.0	1.3	0.24	Acceptée
aCBCLT	0.3	0.66	2	5.2	0.4	0.71	Acceptée
aCBLVT	-1.3	0.96	-21	15.4	-1.4	0.22	Acceptée
aCBRVT	0.3	1.45	5	21.6	0.2	0.83	Acceptée

Tableau 4.2 : Corrélations entre les accélérations minimales et les défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds

Tableau des corrélations entre les accélérations minimales et les défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds								
Variable	**aCACLT**	**aCALVT**	**aCARVT**	**aCBCLN**	**aCBCLT**	**aCBLVT**	**aCBRVT**	**Valeur**
aCACLT	1.00	0.57	0.56	0.55	0.49	0.44	0.41	0.11
aCALVT	0.57	1.00	0.88	0.73	0.33	0.84	0.89	0.11
aCARVT	0.56	0.88	1.00	0.72	0.19	0.70	0.78	0.02
aCBCLN	0.55	0.73	0.72	1.00	0.63	0.75	0.78	0.35
aCBCLT	0.49	0.33	0.19	0.63	1.00	0.44	0.50	0.47
aCBLVT	0.44	0.84	0.70	0.75	0.44	1.00	0.93	-0.03
aCBRVT	0.41	0.89	0.78	0.78	0.50	0.93	1.00	0.11
Valeur	0.11	0.11	0.02	0.35	0.47	-0.03	0.11	1.00

Alors pour vérifier l'hypothèse 5, les figures 3.18 à 3.24 démontrent pour chaque accélération les valeurs résiduelles qui seront générées, en fonction de la valeur prédite.

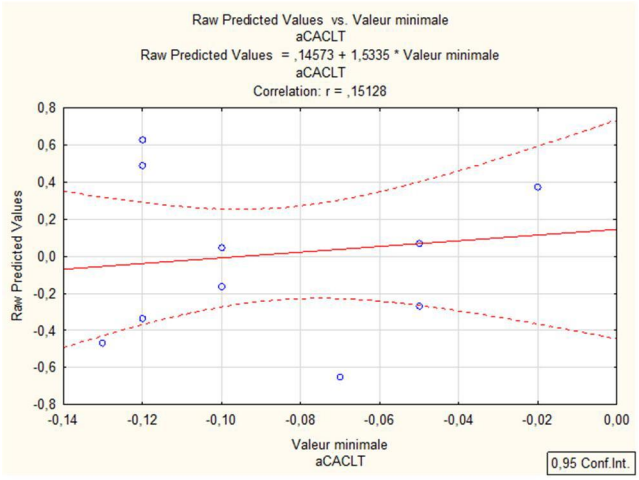

Figure 4-1 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT

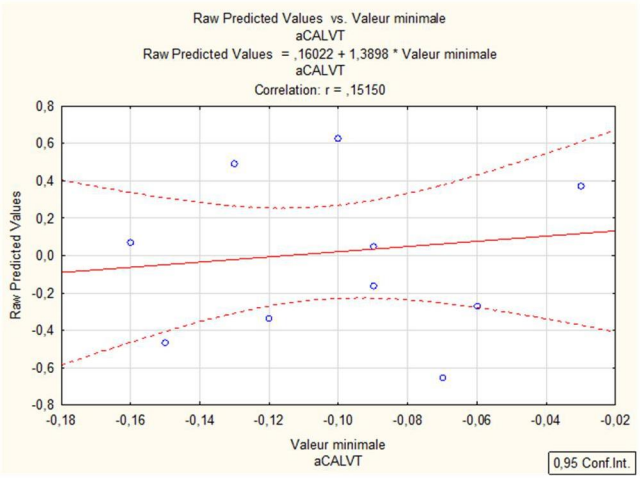

Figure 4-2 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT

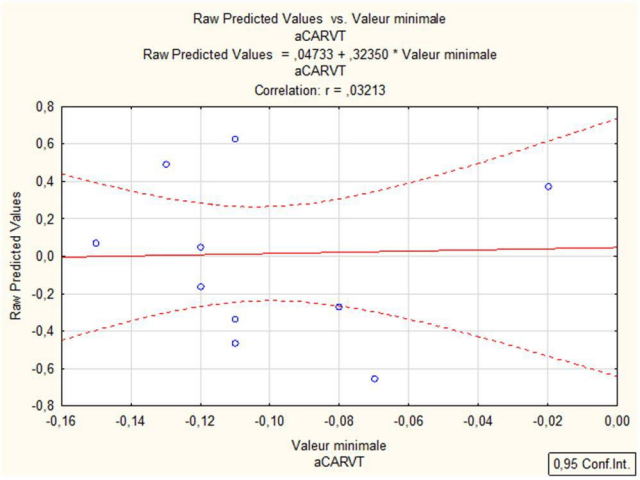

Figure 4-3 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT

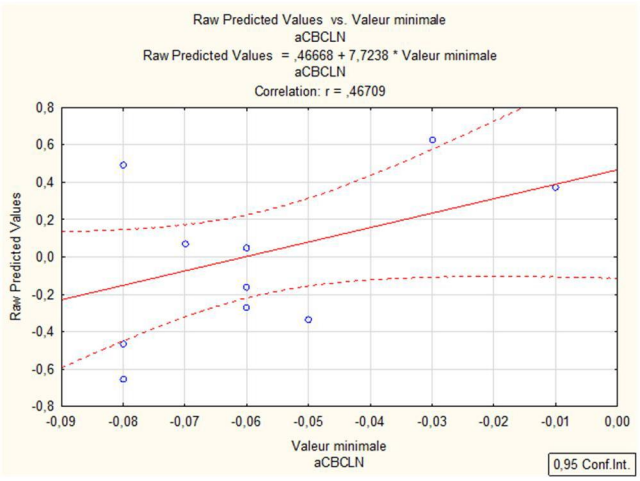

Figure 4-4 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN

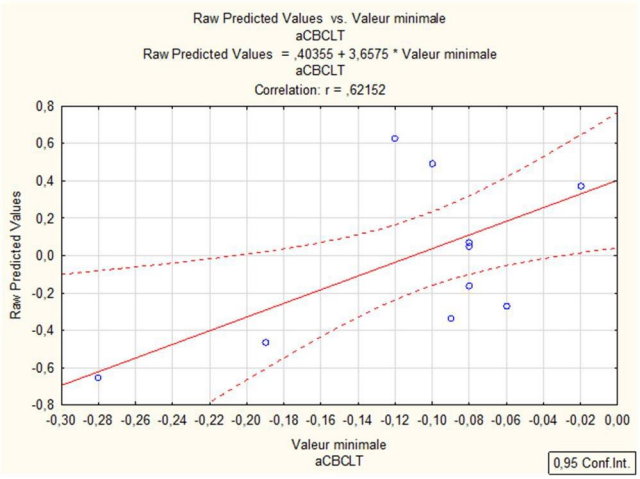

Figure 4-5 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT

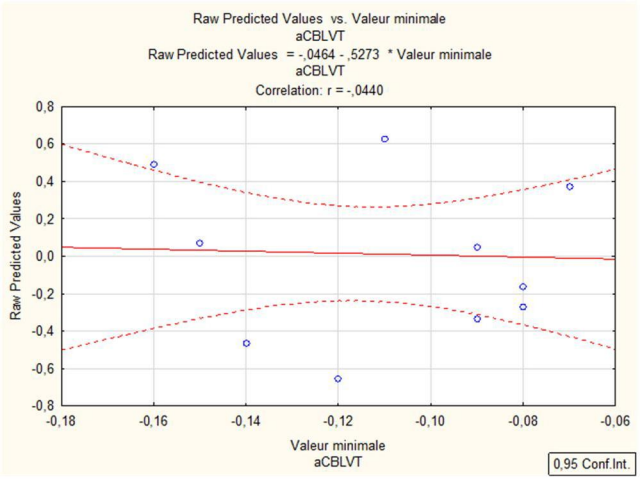

Figure 4-6 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT

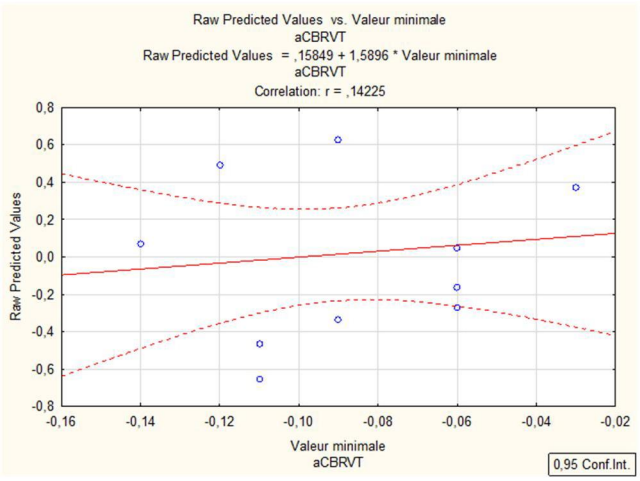

Figure 4-7 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT

Un graphique Quantile-Quantile permet de vérifier l'hypothèse 6 représentée à la figure 3.25. Le nuage de points des défauts géométriques doit se concentrer près de la bissectrice, afin de pouvoir confirmer l'hypothèse 6 soit les erreurs suivent une loi normale multidimensionnelle.

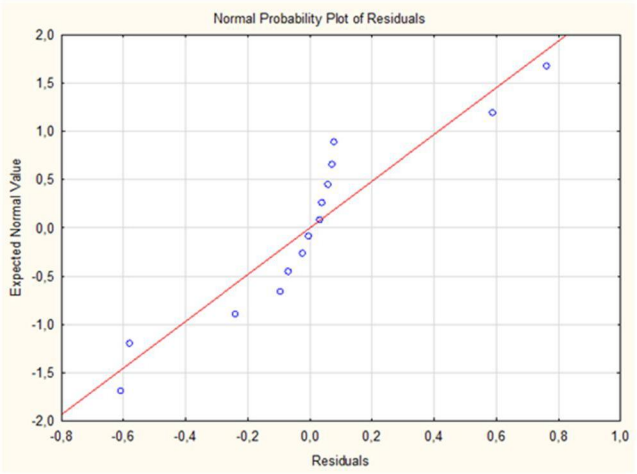

Figure 4-8 : Graphique Quantile -Quantile des défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds

4.1.1.2 Corrélations entre le défaut d'alignement sur 62 pieds gauche et droite (L et R) et les maximums des accélérations.

Tableau 4.3 : Sommaire statistique des maximums des accélérations et des défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds

Tableau de sommaire statistique des valeurs maximales du défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds							
	b*	**Std.Err.**	**b**	**Std.Err.**	**t(6)**	**p-value**	**Hypothèse nulle**
aCACLT	-1,49	2,70	-26,09	47,13	-0,55	0,60	Acceptée
aCALVT	3,00	3,07	33,14	33,85	0,98	0,37	Acceptée
aCARVT	-0,82	1,26	-8,50	13,11	-0,65	0,54	Acceptée
aCBCLN	-0,10	0,52	-3,85	19,14	-0,20	0,85	Acceptée
aCBCLT	-0,76	1,44	-13,95	26,59	-0,52	0,62	Acceptée
aCBLVT	-3,72	7,02	-40,43	76,38	-0,53	0,62	Acceptée
aCBRVT	3,55	6,69	39,01	73,61	0,53	0,62	Acceptée

Tableau 4.4 : Corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds

Tableau des corrélations entre les valeurs maximales d'accélérations et le défaut géométrique d'alignement								
Variable	**aCACLT**	**aCALVT**	**aCARVT**	**aCBCLN**	**aCBCLT**	**aCBLVT**	**aCBRVT**	**Valeur**
aCACLT	1.00	0.73	0.73	0.44	0.73	0.78	0.88	-0.29
aCALVT	0.73	1.00	0.92	0.46	0.79	0.80	0.69	0.00
aCARVT	0.73	0.92	1.00	0.40	0.59	0.65	0.61	0.12
aCBCLN	0.44	0.46	0.40	1.00	0.57	0.40	0.40	-0.20
aCBCLT	0.73	0.79	0.59	0.57	1.00	0.88	0.80	-0.48
aCBLVT	0.78	0.80	0.65	0.40	0.88	1.00	0.95	-0.35
aCBRVT	0.88	0.69	0.61	0.40	0.80	0.95	1.00	-0.38
Valeur	-0.29	0.00	0.12	-0.20	-0.48	-0.35	-0.38	1.00

s

Alors pour vérifier l'hypothèse 5, les figures 3.26 à 3.32 démontrent pour chaque accélération que valeurs résiduelles seront générées (ϵi dans le modèle) en fonction de la valeur prédite.

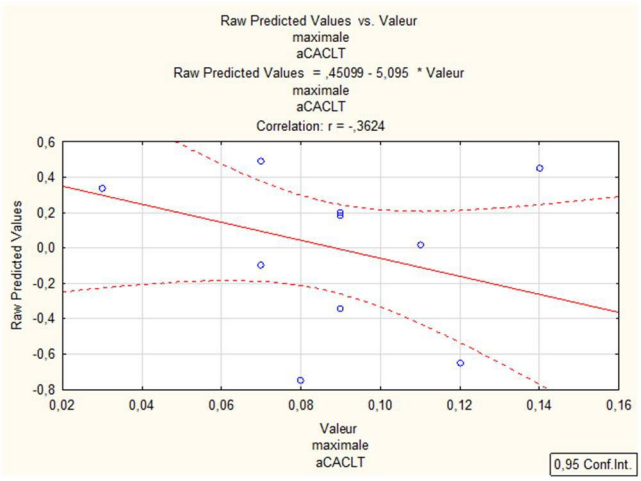

Figure 4-9 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT

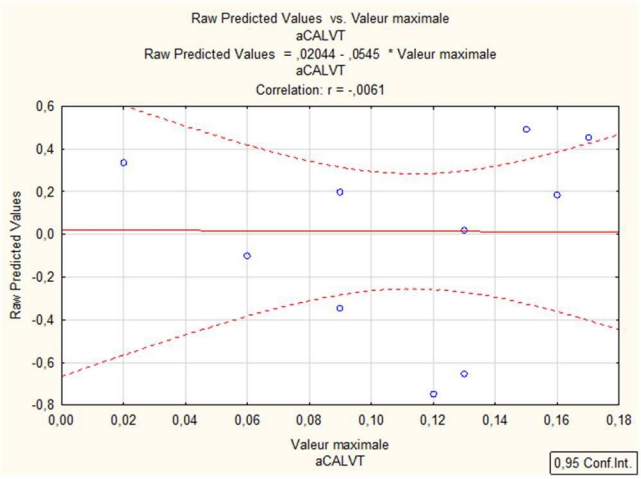

Figure 4-10 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT

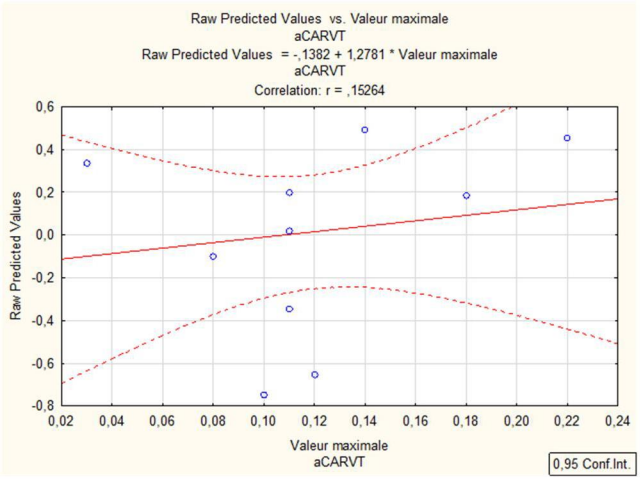

Figure 4-11 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT

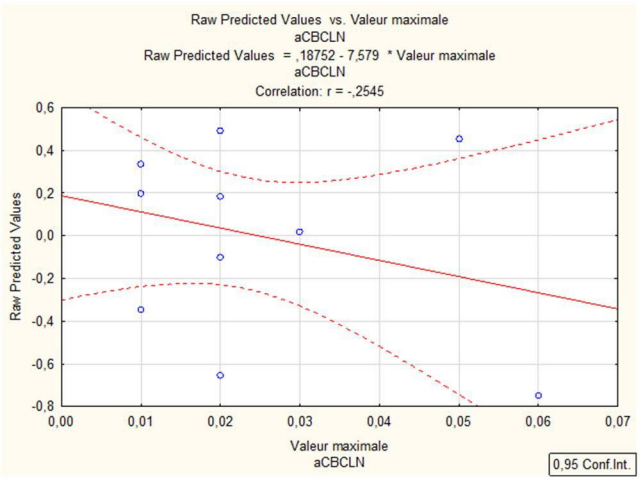

Figure 4-12 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN

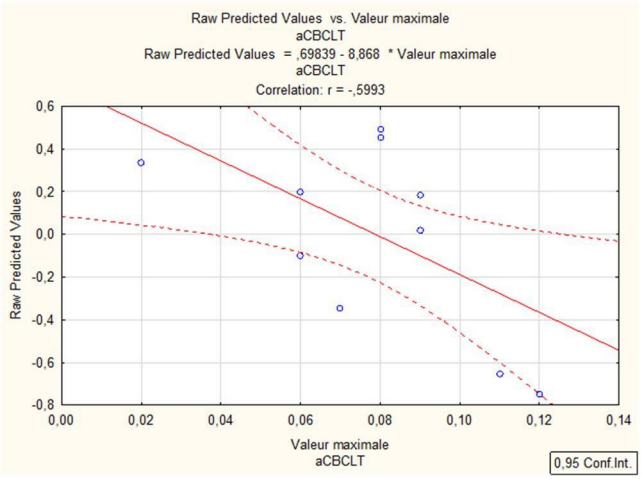

Figure 4-13 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLT

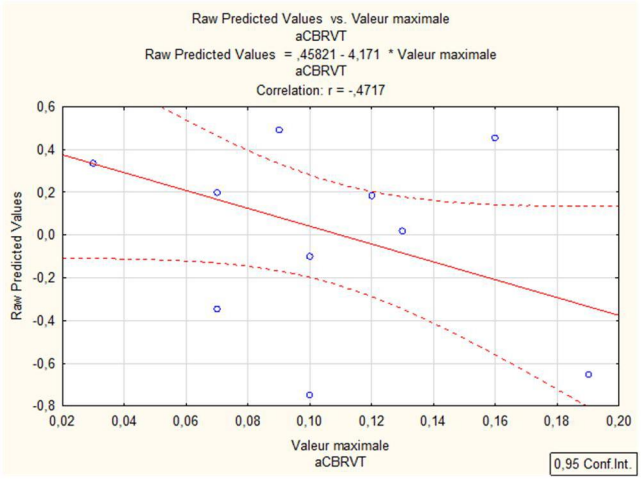

Figure 4-14 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT

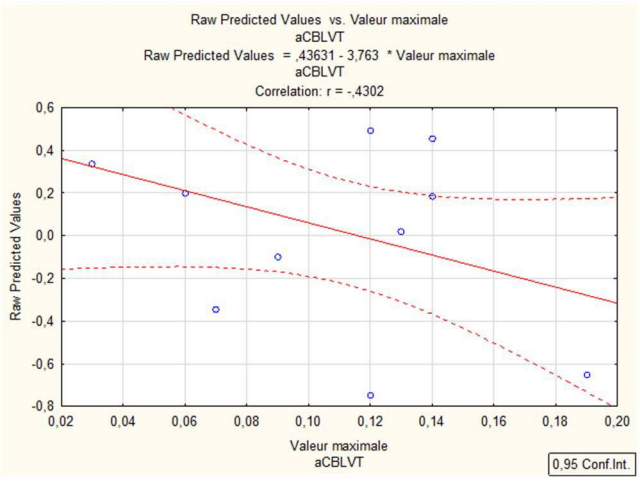

Figure 4-15 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT

Un graphique Quantile-Quantile permet de vérifier l'hypothèse 6 représentée à la figure 3.33. Le nuage de points des défauts géométriques doit se concentre près de la bissectrice afin de pouvoir confirmer l'hypothèse 6 soit les erreurs suivent une loi normale multidimensionnelle.

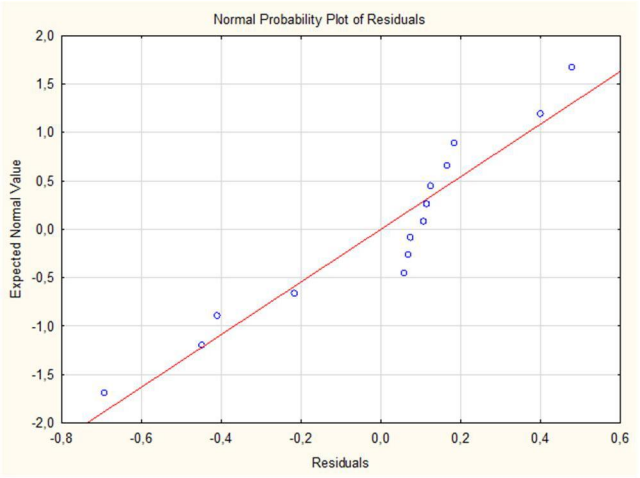

Figure 4-16 : Graphique Quantile -Quantile des maximums des accélérations et des défauts géométriques d'alignement sur 62 pieds

4.1.1.3 Corrélations entre les minimums des accélérations et le défaut de Profile sur 62 pieds gauche et droite (L et R)

Tableau 4.5 : Sommaire statistique des accélérations et des défauts géométriques de profile sur 62 pieds

Tableau de sommaire statistique des valeurs minimales du défaut géométrique de profile sur 62 pieds							
	b*	**Std.Err.**	**b**	**Std.Err.**	**t(6)**	**p-value**	**Hypothèse nulle**
aCACLT	0.07	0.14	2.75	5.70	0.48	0.63	Acceptée
aCALVT	-0.02	0.15	-0.46	3.73	-0.12	0.90	Acceptée
aCARVT	0.02	0.16	0.62	5.55	0.11	0.91	Acceptée
aCBCLN	-0.07	0.15	-2.05	4.58	-0.45	0.66	Acceptée
aCBCLT	-0.16	0.13	-2.80	2.29	-1.22	0.23	Acceptée
aCBLVT	0.17	0.15	4.69	4.03	1.16	0.25	Acceptée
aCBRVT	-0.01	0.17	-0.25	5.54	-0.05	0.96	Acceptée

Tableau 4.6 : Corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profile sur 62 pieds

Tableau des corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profile sur 62 pieds								
Variable	**aCACLT**	**aCALVT**	**aCARVT**	**aCBCLN**	**aCBCLT**	**aCBLVT**	**aCBRVT**	**Valeur**
aCACLT	1,00	0,01	0,21	0,31	-0,09	0,03	-0,05	0,07
aCALVT	0,01	1,00	0,48	0,07	0,02	0,28	0,46	0,03
aCARVT	0,21	0,48	1,00	0,12	0,05	0,31	0,52	0,06
aCBCLN	0,31	0,07	0,12	1,00	0,08	0,40	0,25	0,01
aCBCLT	-0,09	0,02	0,05	0,08	1,00	0,24	0,24	-0,13
aCBLVT	0,03	0,28	0,31	0,40	0,24	1,00	0,40	0,11
aCBRVT	-0,05	0,46	0,52	0,25	0,24	0,40	1,00	0,01
Valeur	0,07	0,03	0,06	0,01	-0,13	0,11	0,01	1,00

Alors pour vérifier les l'hypothèse 5, les figures 3.34 à 3.40 démontrent pour chaque accélération, les valeurs résiduelles seront générées (ϵi dans le modèle) en fonction de la valeur prédite.

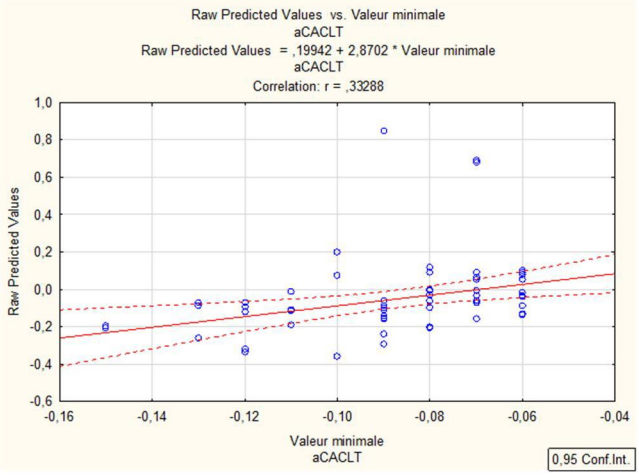

Figure 4-17 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT

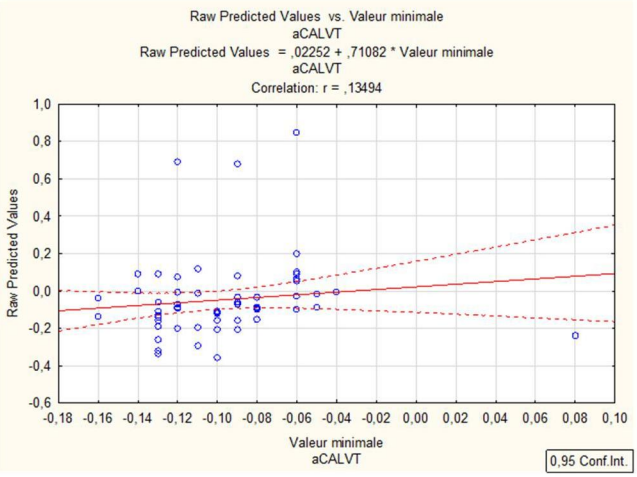

Figure 4-18 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT

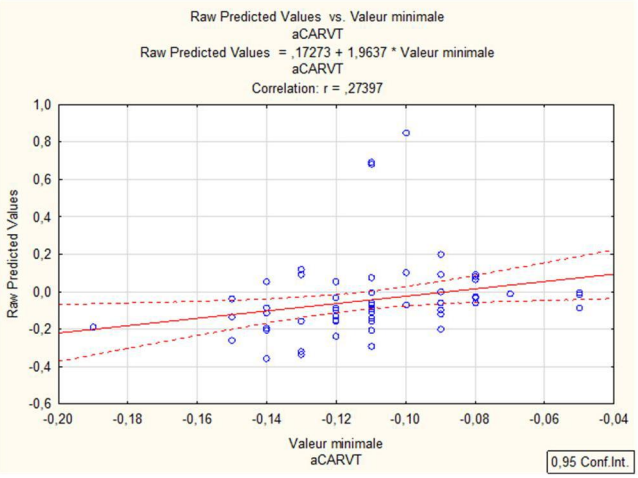

Figure 4-19 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT

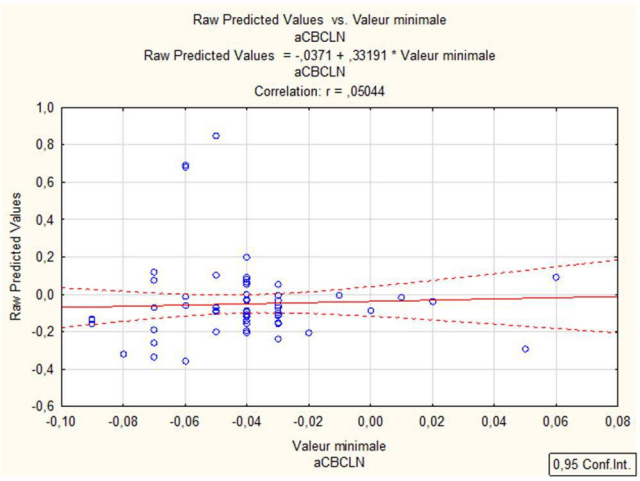

Figure 4-20 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN

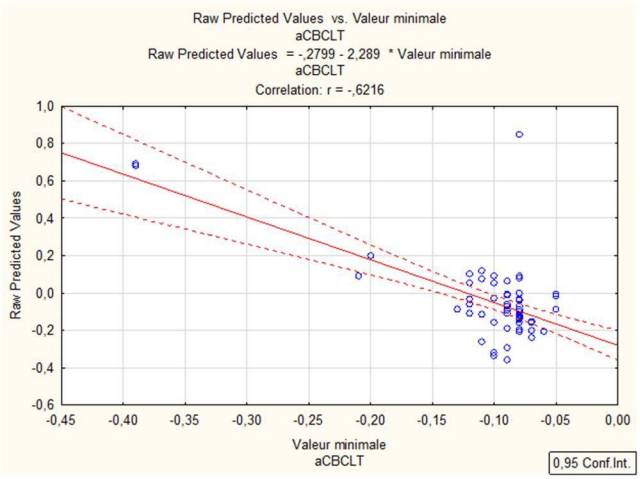

Figure 4-21 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLT

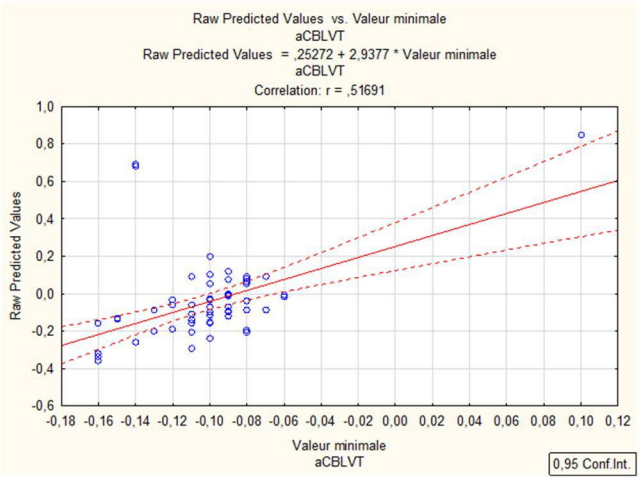

Figure 4-22 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT

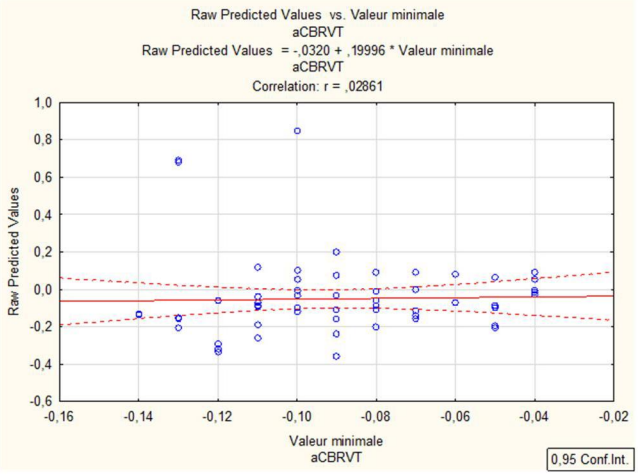

Figure 4-23 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT

Un graphique Quantile-Quantile permet de vérifier l'hypothèse 6 représentée à la figure 3.41. Le nuage de points des défauts géométriques doit se concentrer près de la bissectrice afin de pouvoir confirmer l'hypothèse 6 soit les erreurs qui suivent une loi normale multidimensionnelle.

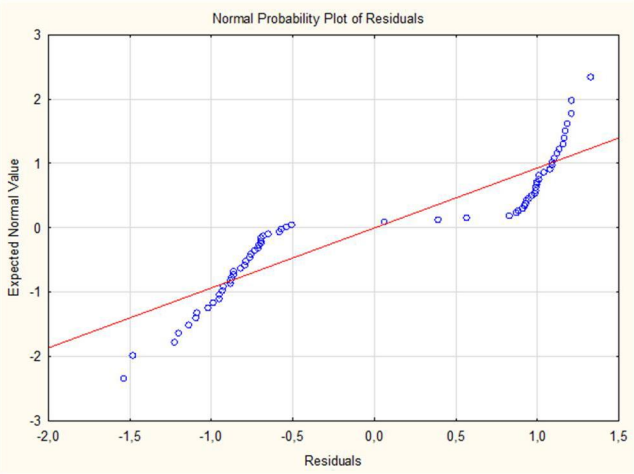

Figure 4-24 : Graphique Quantile -Quantile des valeurs minimales du défaut géométrique de profile sur 62 pieds

4.1.1.4 Corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts de Profile sur 62 pieds gauche et droite (L et R)

Tableau de sommaire statistique des maximums des accélérations et les défauts géométriques de profile							
	b*	**Std.Err.**	**b**	**Std.Err.**	**t(6)**	**p-value**	**Hypothèse nulle**
aCACLT	0,09	0,15	4,48	7,45	0,60	0,55	Acceptée
aCALVT	0,33	0,16	8,42	4,08	2,06	0,04	Rejetée
aCARVT	-0,13	0,17	-3,36	4,48	-0,75	0,46	Acceptée
aCBCLN	0,23	0,14	6,06	3,75	1,62	0,11	Acceptée
aCBCLT	0,05	0,13	0,85	2,43	0,35	0,73	Acceptée
aCBLVT	-0,26	0,17	-6,71	4,23	-1,59	0,12	Acceptée
aCBRVT	0,15	0,19	4,82	5,98	0,81	0,42	Acceptée

Tableau 4.7 : Sommaire statistique des maximums accélérations et des défauts géométriques de profile sur 62 pieds

Tableau des corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques de profile sur 62 pieds								
Variable	**aCACLT**	**aCALVT**	**aCARVT**	**aCBCLN**	**aCBCLT**	**aCBLVT**	**aCBRVT**	**Valeur**
aCACLT	1.00	0.17	0.37	0.00	0.03	0.37	0.52	0.08
aCALVT	0.17	1.00	0.61	-0.40	0.19	0.42	0.46	0.15
aCARVT	0.37	0.61	1.00	-0.46	0.19	0.38	0.49	-0.01
aCBCLN	0.00	-0.40	-0.46	1.00	-0.02	-0.10	-0.23	0.14
aCBCLT	0.03	0.19	0.19	-0.02	1.00	0.36	0.34	0.04
aCBLVT	0.37	0.42	0.38	-0.10	0.36	1.00	0.66	-0.04
aCBRVT	0.52	0.46	0.49	-0.23	0.34	0.66	1.00	0.08
Valeur	0.08	0.15	-0.01	0.14	0.04	-0.04	0.08	1.00

Tableau 4.8 : Corrélations entre les maximums accélérations et les défauts géométriques de profile sur 62 pieds

Alors pour vérifier les l'hypothèse 5, les figures 3.42 à 3.48 démontrent pour chaque accélération les valeurs résiduelles qui sont générées en fonction de la valeur prédite.

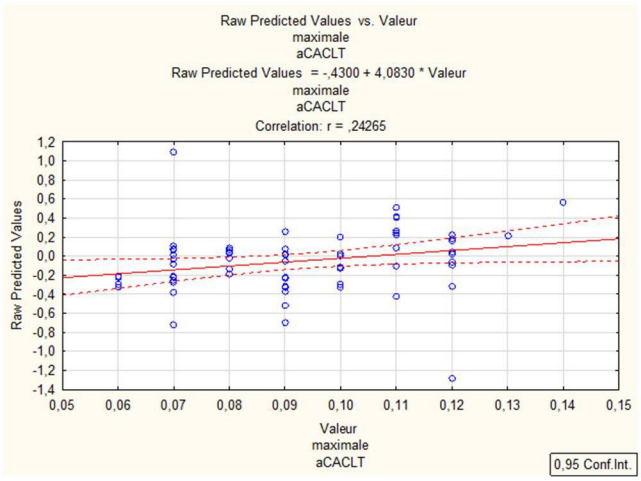

Figure 4-25 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCACLT

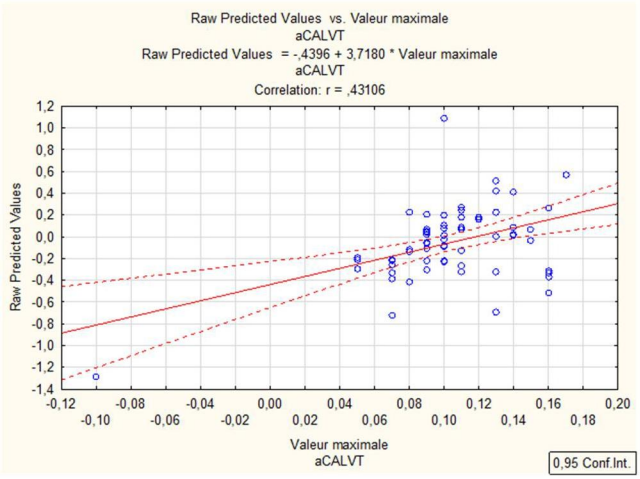

Figure 4-26 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCALVT

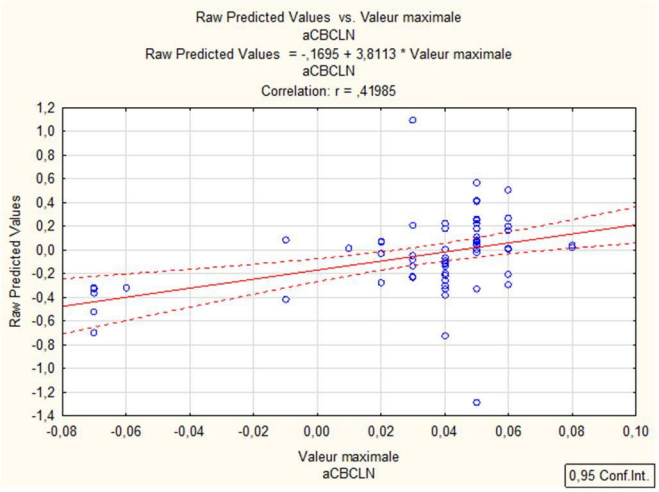

Figure 4-27 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLN

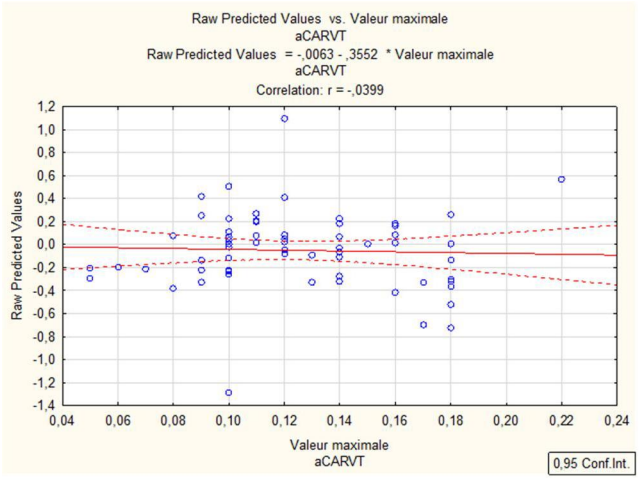

Figure 4-28 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBRVT

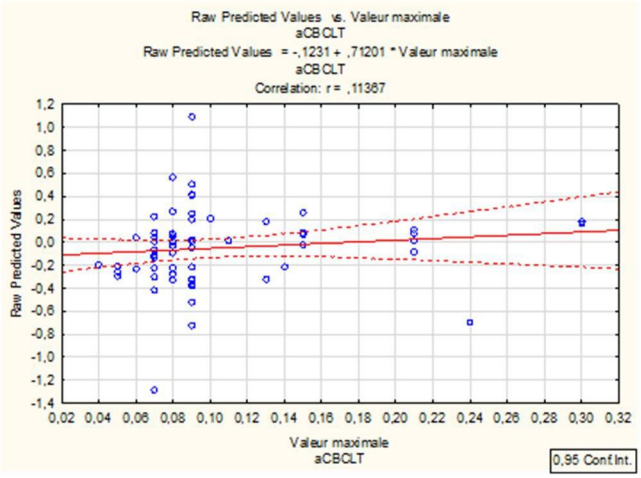

Figure 4-29 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBCLT

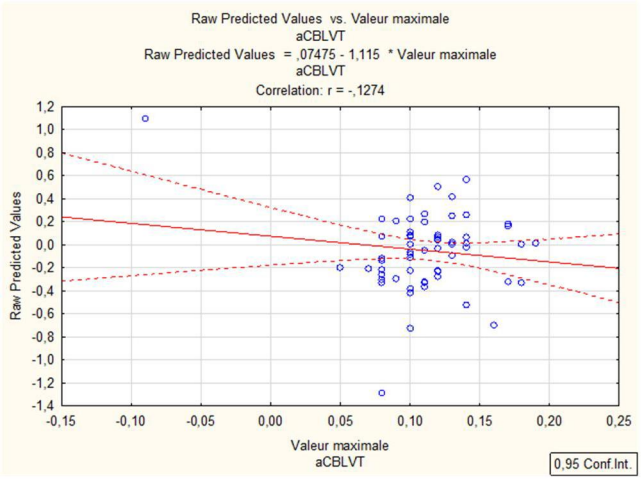

Figure 4-30 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCBLVT

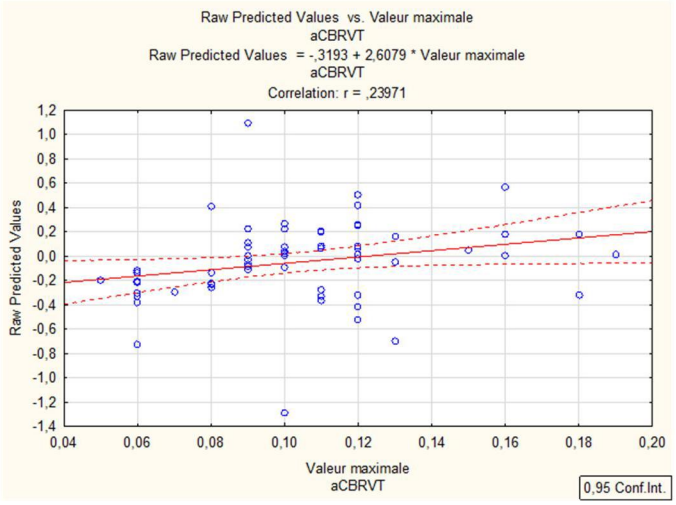

Figure 4-31 : Valeurs résiduelles en fonction de la valeur prédite pour l'accélération aCARVT

Un graphique Quantile-Quantile permet de vérifier l'hypothèse 6 représentée à la figure 3.49. Le nuage de points des défauts géométriques doit se concentrer près de la bissectrice afin de pouvoir confirmer l'hypothèse 6 soit les erreurs qui suivent une loi normale multidimensionnelle.

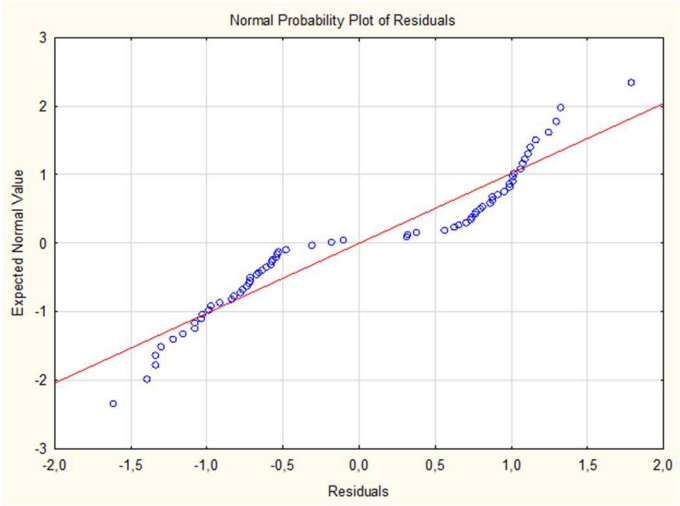

Figure 4-32 : Graphique Quantile -Quantile des défauts géométriques de profile sur 62 pieds

4.2 Discussion des résultats

4.2.1 Analyse des corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques d'alignements gauche et droite (L et R) sur 62 pieds

On peut remarquer que les hypothèses nulles des accélérations (la qualité du confort de la voie ferrée) ont été toutes acceptées, soit l'hypothèse nulle est que les données des défauts géométriques de la voie ferrée et les données des accélérations ne corrèlent pas. En effet, aucun p-valeur n'a une valeur ≤ 0.05. De plus, on peut observer sur les figures 4.1 à figure 4.7 inclusivement que les valeurs résiduelles sont dispersées et ne sont pas concentrées autour de l'axe des abscisses. La variation des valeurs minimales des accélérations n'influe pas sur les défauts géométriques de la voie ferrée. Le graphique Quantile-Quantile qui est représenté à la figure 4.8 démontre que les données des défauts géométriques de la voie ferrée ne se concentrent pas près de la bissectrice. Ceci indique que les données des défauts géométriques ne suivent pas une loi normale multidimensionnelle. Dans le tableau 4.1 sur la corrélation des accélérations des valeurs minimales du défaut géométrique d'alignement sur 62 pieds, on observe que les accélérations aCARVT, aCALVT , aCBRVT, aCBLVT qui sont dans le plan vertical ont une forte corrélation entre elles. Les accélérations aCARVT, aCBRVT, qui se situent du côté droit du wagon et aCALVT, aCBLVT qui se situent du côté gauche du wagon elles des deux extrémités du wagon. De plus, on remarque que l'accélération aCBCLN dans le plan longitudinal corrèle bien avec les accélérations aCARVT, aCALVT, aCBRVT, aCBLVT. Par conséquent, ceci peut s'expliquer par le fait que le wagon s'incline entièrement du côté droit ou du côté gauche.

4.2.2 Analyse des corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques d'alignements gauche et droite (L et R) sur 62 pieds

On peut remarquer que les hypothèses nulles des accélérations ont été toutes acceptées, soit l'hypothèse nulle étant que les données des défauts géométriques de la voie ferrée et des accélérations ne corrèlent pas. En effet, aucun p-valeur n'a de valeur ≤ 0.05. En effet, les valeurs d'accélérations minimales et maximales n'obtiennent pas de corrélations. Par contre, on peut observer sur observer sur les figures 4.9 à figure 4.16 que les valeurs résiduelles sont moins dispersées et que les données plus sont concentrées autour de l'axe des abscisses que les minimums des accélérations. La variation des valeurs minimales des accélérations n'influe pas sur les défauts

géométriques de la voie ferrée. Le graphique Quantile-Quantile à la figure 4.17 démontre que les données des défauts géométriques de la voie ferrée se concentrent plus près de la bissectrice que les minimums des accélérations. Alors, les défauts géométriques d'alignements semblent mieux corrélés lorsqu'on évalue les maximums des accélérations. Par contre, ceci indique aussi que les données des défauts géométriques ne suivent pas une loi normale multidimensionnelle. On peut également observer dans le tableau 4.3 les accélérations dans le plan vertical aCARVT et aCBRVT, qui se situent du côté droit du wagon, et les accélérations dans le plan vertical aCALVT et aCBLVT qui se situent du côté gauche du wagon, sont aux deux extrémités du wagon. On observe plus précisément une forte corrélation entre les accélérations situées dans le plan vertical, situées à droite et à gauche du wagon, ce qui signifie que le wagon se déplace de façon similaire aux deux extrémités. De plus, on remarque que les accélérations situées dans le plan latéral au centre aCACLT et aCBCLT ont une forte corrélation avec les accélérations situées dans le plan vertical aCARVT, aCALVT, aCBRVT, aCBLVT. Par conséquent, ceci peut s'expliquer par le fait que le wagon s'incline entièrement du côté droit, ou du côté gauche, et se déplace dans le plan latéral ce qui coïncide avec le train de géométrie de la voie qui détecte les défauts d'alignements dans le plan latéral. Le faible nombre aussi de défauts géométriques d'alignement ne permet pas d'effectuer une analyse plus approfondie.

4.2.3 Analyse des corrélations entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profil gauche et droite (L et R) sur 62 pieds

Les p-valeurs pour toutes les accélérations sont supérieures à la valeur de 0.05. Par conséquent, les hypothèses nulles de toutes les accélérations ont été acceptées, ce qui signifie qu'il n'existe aucune corrélation possible. On peut conclure dans ce cas que les minimums des accélérations n'ont aucune incidence sur les défauts géométriques de profil sur 62 pieds. En effet, le défaut géométrique de profil est général associé à l'affaissement de la voie ferrée, mais les résultats de cette étude démontrent plutôt qu'il y a la présence d'une surévaluation de la voie ferrée, étant donné l'absence de corrélation entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profil gauche et droite.

4.2.4 Analyse des corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques de profil gauche et droite (L et R) sur 62 pieds

Le p-valeur de l'accélération aCALVT a une valeur ≤ 0.05. En effet, l'accélération aCALVT a une très forte corrélation avec le aCARVT soit de 0.61. Toutefois on remarque sur la figure 4.32 soit le graphique Quantile-Quantile que les données sont séparées en deux séries de nuages de données. Ceci s'explique par le fait que les corrélations ont été effectuées en combinant les défauts géométriques de profil gauche et droite, donc qu'il n'y a pas eu de corrélations séparées en fonction du côté gauche ou droit. Tout d'abord, la corrélation est forte car le défaut de géométrie de profile sur 62 pieds est évalué à partir du plan vertical et les accélérations qui y sont corrélées sont également dans le plan vertical. Ensuite, on peut observer que l'hypothèse nulle a été rejetée pour l'accélération verticale gauche, ce qui indique que le p-valeur est de 0.04. Plus particulièrement, les corrélations entre l'accélération verticale gauche aCALVT et l'accélération verticale droite aCARVT indiquent qu'il y a eu deux accélérations en même temps sur le même bogie. Ces corrélations permettent de détecter la présence d'un affaissement de la voie ferrée. En somme, on peut conclure que lorsqu'on observe des accélérations dans le plan vertical et que les deux côtés, droit et gauche s'accélèrent en même temps, qu'il s'agit de défauts géométriques de profil sur 62 pieds. Ceci nous permet d'associer le défaut géométrique de profil à un plan spécifique, soit le plan vertical.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Contributions

En collaboration avec le Centre de Recherche du Canada (CNRC) et VIA Rail Canada, la présente étude avait pour but de déterminer les relations qui existent entre les données d'accélérations traduisant la qualité du confort de la voie ferrée et les défauts géométriques de la voie ferrée.

Des études antérieures se sont penchées sur l'analyse des défauts géométriques de la voie ferrée et sur l'analyse de la qualité du confort de la voie ferrée. Pourtant, peu d'études se sont penchées sur les corrélations qui existent entre la présence d'un défaut géométrique sur la voie ferrée et les accélérations mesurées. Plus particulièrement, selon l'état actuel des connaissances, aucune étude n'a associé de défauts géométriques à un plan précis, tel que cela a été fait dans cette étude. Surtout, l'apport de cette étude se situe au niveau de la méthodologie utilisée :

- Lors du calcul des minimums et des maximums des accélérations, la formule du TQI a été utilisée. Par contre, afin d'avoir un degré de précision plus élevé, la voie ferrée a été séparée en tronçons de 52.8 pieds, au lieu de la segmentation de 1320 pieds normalement utilisée dans l'industrie ferroviaire. Cela a permis d'obtenir une segmentation 25 fois plus précise.
- Habituellement, lorsqu'on utilise la formule du TQI, on calcule le TQI pour chaque tronçon et on fait une moyenne de tous les TQI calculés à la fin. Dans le cadre de cette étude, toujours dans l'optique d'avoir un degré de précision plus élevé, le TQI moyen a été calculé pour chaque tronçon, puis une moyenne de tous les TQI moyens a été calculée. Un apport personnel se situe aussi au niveau des comparaisons effectuées entre les moyennes des TQI moyens qui ont permis d'établir les niveaux de criticité servant à catégoriser les différences des accélérations.
- Ainsi, les différences des accélérations ont été catégorisées selon un niveau de criticité, en s'inspirant de la catégorisation défauts géométriques de la voie (Prioritaire, presque urgent et urgent), puisqu'il s'agit d'un standard auquel sont déjà habitués les agents de maintenance de la voie ferrée. Donc, cela permet de planifier les interventions de maintenance en fonction du niveau de criticité décelé à partir des accélérations calculées par les bogies. Au final, cela permet d'optimiser la planification des interventions de maintenance, d'améliorer la qualité du confort de la voie ferrée, et donc de réduire les coûts liés aux inspections et aux interventions de maintenance.

Les données d'accélérations fournies par le CNRC provenaient de deux bogies instrumentés installés aux deux extrémités du wagon, alors qu'habituellement un seul bogie instrumenté est installé sur le wagon lors des tests et des inspections. La présence des deux bogies permet de faire des corrélations entre les accélérations calculées à chaque extrémité du wagon (A et B), et donc de comprendre dans la globalité le comportement du wagon lorsqu'il est exposé à des anomalies de la voie ferrée.

Tel que cela a été présenté dans la section portant sur les résultats, une corrélation significative a été établie entre le défaut géométrique de profil et les accélérations dans le plan vertical du même bogie. Cela a permis d'identifier le défaut géométrique le plus problématique, soit celui qui affecte considérablement la qualité du confort de la voie ferrée. Plus précisément, le défaut géométrique de profil a été identifié dans le plan vertical. Au niveau pratique, un outil d'inspection automatisé, tel que le prototype développé par le CNRC (2020), pourrait donc être programmé en fonction du plan qui réagit sur le tronçon, afin d'identifier une catégorie de défaut en particulier. Cela pourrait représenter une contribution importante lors des inspections et de la surveillance, en termes d'efficacité et de réduction de coûts.

5.1.1 Résultats

Dans cette étude, en raison du faible nombre de données disponibles, aucune corrélation n'a été établie entre les minimums et les maximums des accélérations et les défauts géométriques d'alignement L et R de la voie ferrée. Ensuite, les résultats ont démontré qu'il n'existe aucune corrélation entre les minimums des accélérations et les défauts géométriques de profil L et R de la voie ferrée.

Par contre, il existe une très forte corrélation, entre les maximums des accélérations et les défauts géométriques de profil L et R de la voie ferrée, soit de 0.61. On peut donc conclure que le défaut géométrique de profil L et R est problématique, étant donné qu'il affecte considérablement la qualité du confort de la voie ferrée.

De plus, les résultats obtenus lors des corrélations entre les maximums des accélérations et les défauts de profil L et R nous indiquent que l'hypothèse nulle est rejetée pour l'accélération aCALVT. Plus particulièrement, les corrélations entre l'accélération verticale gauche aCALVT et l'accélération verticale droite aCARVT indiquent qu'il y a eu deux accélérations en même temps

du côté droit et du côté gauche sur le même bogie. On peut donc conclure que lorsqu'on observe des accélérations dans le plan vertical et que les deux côtés (L et R) s'accélèrent en même temps sur le même bogie, qu'il s'agit donc de défauts géométriques de profil sur 62 pieds.

5.1.2 Limites de l'analyse

Le faible nombre de données, particulièrement pour les défauts géométriques d'alignement, n'a pas permis d'établir de corrélations avec les accélérations. Il serait intéressant de reproduire l'étude avec plus de données de défauts d'alignement, ainsi que des données d'autres défauts géométriques.

Aussi, l'analyse n'a pas tenu compte des facteurs suivants :

- La séparation des défauts géométriques de la voie ferrée, selon le rail droit et gauche. Cela permettrait d'apporter encore plus de précisions aux résultats.
- L'intervalle de temps entre la collecte des données des accélérations et la collecte des données des défauts géométriques. Afin de réduire l'incidence des facteurs liés au temps, aux variations de température, aux changements de saisons, et aux activités de maintenance sur la condition de la voie ferrée, il serait préférable de réduire l'intervalle de temps entre les collectes de données.
- L'influence possible du bogie instrumenté sur les accélérations, notamment à cause de l'usure de certaines pièces du bogie qui peuvent amplifier les valeurs des accélérations. Par exemple, le boudin de la roue usée peut créer un jeu entre le rail et la roue, et amplifier les valeurs récoltées.
- Le freinage des trains, ainsi que le poids et le type de wagon n'ont pas été considérés comme étant des facteurs pouvant influencer les valeurs d'accélérations.

5.2 Perspectives d'amélioration

Il serait intéressant d'améliorer la précision de l'emplacement des accélérations sur la voie ferrée, en utilisant les coordonnées fournies par un GPS, contrairement aux points de mile (*milespoint*) utilisés dans le cadre de cette étude puisque ces derniers fournissent une plus faible précision.

L'identification des minimums et des maximums, ainsi que les calculs des TQI, ont été faits de manière manuelle, soit par le logiciel Excel. Il pourrait être intéressant de développer un

programme qui permettrait d'identifier les minimums et les maximums de façon automatisée, ce qui réduirait significativement le temps de traitement et les erreurs humaines pouvant influencer les calculs.

Finalement, cette étude est novatrice puisqu'il s'agirait de la première étude pouvant identifier un défaut géométrique en fonction du plan qui réagit sur la voie ferrée. Également, tel que cela a été présenté au début de ce chapitre, l'innovation dans cette étude se situe au niveau de la méthodologie utilisée.

Quant au domaine de la recherche et du développement des nouvelles technologies, cette étude représente un premier pas prometteur, en ce qui a trait à la détection et à l'identification des défauts géométriques de la voie ferrée. Il est recommandé de programmer un outil d'inspection automatisé, tel que le prototype développé par le CNRC (2020), en fonction du plan qui réagit sur le tronçon afin d'identifier précisément une catégorie de défaut. En temps réel il sera donc possible de cibler les emplacements problématiques sur la voie ferrée et qui correspondent à certaines catégories de défauts. En recueillant des données de façon continue, le prototype accroîtra la surveillance de la voie ferrée. Ainsi, les interventions d'inspection et de maintenance seront optimisés. Ceci réduira considérablement les coûts, mais accroîtra surtout la qualité du confort de la voie et la sécurité ferroviaire.

Il est aussi recommandé que le prototype programmé soit installé dans les wagons passagers et dans la locomotive d'un train. L'impact du poids d'une locomotive sur le rail est plus important, alors que l'impact du poids d'un wagon sur le rail est moindre. Cette différence d'impact sur le rail influence considérablement les accélérations évaluées, et donc il est pertinent de comparer les données obtenues dans le wagon et dans la locomotive, afin d'avoir une vue d'ensemble de la qualité de la de la voie ferrée.

De façon complémentaire, il est recommandé que le prototype soit également installé sur les véhicules rail-route, afin d'obtenir des données supplémentaires, notamment lorsque le train sur lequel sont installés les prototypes utilise une autre voie. Les données supplémentaires obtenues par le véhicule rail-route ne peuvent qu'aider l'inspecteur de la voie ferrée, lors de la prise de décision des interventions de maintenance à privilégier.

BIBLIOGRAPHIE

American Railway Engineering and Maintenance of way. (2008). *Track Measuring Systems*, chapitre 2.

An M., Lin W., et Huang S. (2013). An Intelligent Railway Safety Risk Assessment Support System for Railway Operation and Maintenance Analysis, *The Open Transportation Journal*, (7) 27-42.

Berggren E.G., Li M.X.D., Spannar J. (2008). A new approach to the analysis and presentation of vertical track geometry quality and rail roughness, Elsevier Ltd., Wear 265, pages 1488 à 1496.

Chellaswamy C., Krishnasamy M., Balaji L., Dhanalakshmi A., Ramesh R. (2020). Optimized railway track health monitoring system based on dynamic differential evolution algorithm, Elsevier Ltd., Measurement 152, 107332.

Dian Setiawan M., Atmaja S. et Rosyidi P. (2016). Track Quality Index as track Quality Assessement indicator, Simposium XIX FSTPT, Universitas Islam Indonesia, 11-13.

Esveld C. (2016). Modern Railway Track, Version 3.8, MRT-Productions.

Federal Railroad Administration. (2002). Track Safety Standards Compliance Manual.

Gustafsson C. et Larsson D. (2019). Increasing track uptime by using a portable equipment for measuring track alignment from regular trains, International Heavy Haul Association STS conference. (Norvège), p.204.

Hines W. W., Montgomery D.C., Goldsman D. M., Borror C. M. (2012). Probabilités et Statistique pour ingénieurs, 2ième édition, chapitre 14, Chenelière Éducation.

International Standards Organization. (1997). Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration ISO 2631-1: 1997, Genève.

International Standards Organization. (2005). Human response to vibration – Measuring instrumentation, ISO 8041 : 2005, Genève.

International Union of Railways. (1995). Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, UIC Code 513 R, First edition, 1.7.94, Paris, France.

Jiabo H., Ben-Gera T., et Xiang L. (2016). Risk analysis of freight-train derailment caused by track Geometry Defect, proceedings of the 2016 Joint Rail conference JRC2016, Columbia, Sc, USA.

Johanning E., Fischer S., Christ E., Gores B. et Landsbergis P. (2002). Whole-body vibration exposure study in U.S. Railroad locomotives – An ergonomic risk assessment, AIHA Journal, Vol. 63, pages 439-446

Karakasis K., Skarlatos D., Zakinthinos T. (2005). A factorial analysis for the determination of an optimal train speed with a desired ride comfort, Elsevier Ltd., Applied Acoustics 66, pages 1121 à 1134.

Larsson D. (2012). Enhanced condition monitoring of railway vehicles using rail-mounted sensors. COMADEM Special Issue on Railway.

Lasisi A., et Attoh-Okine N. (2018). Principal components analysis and track quality index: A machine learning approach, Elsevier Ltd., Transportation Research Part C 91, pages 230 à 248.

Lauriks G., Evans J., Förstberg J.,Balli M. and Barron de Angoiti I. (2003). UIC comfort tests, Investigation of ride comfort and comfort disturbance on transition and circular curves, VTI notat 56A-2003

Le Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2020). Site visité en juillet 2020, https://www.tsb.gc.ca/fra/index.html

Le Conseil national de recherches du Canada. (2020). Development of a Prototype Ride Quality Monitoring Solution, CNRC Project Ref: A1-TBD.

Le Conseil national de recherches du Canada. (2019). Technical Report VIA Remote Track Monitoring, ST-R -TR -0113

Le règlement de la sécurité ferroviaire (TC-E054). (mai 2012). Site visité en juillet 2020, https://tc.canada.ca/en/rail-transportation/rules/rules-respecting-track-safety

Leishman E. M. (2017). Analysis of Canadian Train Derailments from 2001 to 2014, University of Alberta.

Li F. Y., Xu Y. D, Li H. F., Shen J. F., Liu W.Y. et Qiu J. X. (2016). A comparative study of the TQI method and process performance index method in the quality evaluation of track fine adjustment, WIT Transactions on The Built Environment. (Volume 162)

Liu R.-K., Xu P., Sun Z.-Z., C. Zou, et Sun Q.-X. (2015). Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro, Hindawi Publishing Corporation Discrete Dynamics in Nature and Society.

Liu Y., et Magel E. (2007). Performance based track geometry and the track geometry interaction map, le Conseil national de recherche du Canada.

Liu Y., Caldwell N., et Sawley K. (2005). Dynamic modeling of VIA Rail's GE P42DC locomotive. CSTT-RVC-TR-099, le Conseil national de recherches du Canada

Loi sur la sécurité ferroviaire (L.R.C. (1985), ch. 32 (4e suppl.)). Site visité en juillet 2020 https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/r-4.2/index.html

Palo M., Schunnesson H., et Kumar U. (2012). Condition monitoring of rolling stock using wheel/rail forces. The Ninth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technology.

Phanyakit T., et Satiennam T. (2018). Track-quality index and degradation of railway track structure: The construction track doubling project of northeast line from thanon chira junction to khon kaen station, Thailand, MATEC Web of Conferences 192.

Railway emergency awareness guide. (2017). Railway Association of Canada, page 7.

Ravitharan R., Chevin J., Chung H., Vong C.H., et Zhang D. (2019). The implementation of unmanned autonomous systems for railway inspection, International Heavy Haul Association STS conference (Norvège), page 26.

Robert Grant R., et Markus Nottelmann M. (2019). Enriching track maintenance planning with data fusion of traditional and emerging inspection technologies, International Heavy Haul Association STS conference (Norvège), page 218.

Roghani A., et Hendry M.T. (2017). Quantifying the Impact of Subgrade Stiffness on Track, J. Transp. Eng., Part A: Systems, 143(7).

Roghani A., Pall R., et Toma E. (2019). Combining field measurements and machine learning to quantify impact of different track parameters on ride quality of railway tracks, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit.

Salvador P., Naranjo V., Insa R., et Teixeira P. (2016). Axle box accelerations: Their acquisition and time–frequency characterization for railway track monitoring purposes, Elsevier Ltd. pages 301–312.

Lacoffe, A. (2014). Projet de recherche portant sur les interrelations des principaux facteurs influençant ou pouvant influencer la qualité du marquage (durabilité et rétroréflexion) (pp. 90 et 91): École Polytechnique Montréal.

Tien Do N., Abdulrazagh P. H., Gül M., Hendry M.T., Roghani A., et Toma E. (2020). Evaluating passenger railway ride quality over long distances using smartphones, ASME Joint Rail Conference JRC2020.

Toma E., Liu Y., Jahagirdar A., Oxelgren E., Charbachi P. (2019). Track Monitoring Using Ride Quality Measurements, WCRR 2019 Tokyo.

Transport Canada. (2020). Site visité en juillet 2020. https://tc.canada.ca/fr/transport-ferroviaire

National Engineering Track Standards for Canadian Passenger Service, VIA-0420-ITSD. (2020). VIA Rail Canada

Weston P., Roberts C., Yeo G., et Stewart E. (2015). Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles, Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, volume 53, numéro 7, pages 1063-1091.

Wheelwright H.E., Vincent D., et Pagett R. (2019). Track defect and wheel damage: detection and location, International Heavy Haul Association STS conference. (Norvège), pages 341.

Zhang Y.-J., El-Sibaie M., et Lee S. (2004). FRA Track Quality Indices and Distribution Characteristics, AREMA 2004 Annual Conference.

ANNEXE A

Tableau A.1 : Calcul du TQI du point de 1 au point de mile 2

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta > .315	Niveau de Criticité
1,010	999,442	999,079	999,240	999,916	999,508	999,517	999,595	999,471	0,100	-0,097		
1,020	999,728	999,367	999,492	999,917	999,373	999,515	999,641	999,576	0,085	-0,076	0,105	-
1,030	999,521	999,501	999,317	999,926	999,583	999,535	999,634	999,574	0,102	-0,075	0,002	-
1,040	999,615	999,428	999,313	999,908	999,601	999,319	999,673	999,551	0,089	-0,093	0,023	-
1,050	999,539	999,465	999,370	999,920	999,604	999,466	999,664	999,575	0,106	-0,090	0,024	-
1,060	999,691	999,531	999,281	999,887	999,522	999,341	999,684	999,562	0,091	-0,095	0,013	-
1,070	999,703	999,304	999,397	999,930	999,546	999,442	999,638	999,566	0,098	-0,093	0,003	-
1,080	999,568	999,115	999,377	999,941	999,471	999,431	999,478	999,483	0,097	-0,119	0,083	-
1,090	999,518	999,584	999,465	999,916	999,552	999,567	999,608	999,602	0,088	-0,087	0,119	-
1,100	999,722	999,487	999,499	999,941	999,598	999,351	999,584	999,597	0,098	-0,103	0,004	-
1,110	999,525	999,418	999,366	999,888	999,061	999,132	999,194	999,369	0,102	-0,098	0,229	-
1,120	998,870	999,451	999,373	999,911	999,314	999,441	999,589	999,421	0,096	-0,104	0,052	-
1,130	999,196	999,520	999,502	999,939	999,361	999,533	999,454	999,501	0,077	-0,092	0,079	-
1,140	999,554	999,218	999,553	999,896	999,365	999,303	999,667	999,508	0,095	-0,077	0,008	-
1,150	999,632	999,303	999,244	999,944	999,587	999,204	999,291	999,458	0,094	-0,109	0,050	-
1,160	999,721	999,512	999,382	999,929	999,592	999,153	999,598	999,555	0,098	-0,085	0,097	-
1,170	999,645	999,291	999,421	999,914	999,410	999,512	999,605	999,542	0,090	-0,077	0,013	-
1,180	999,557	999,616	999,508	999,913	999,165	999,219	999,391	999,481	0,100	-0,103	0,061	-
1,190	999,334	999,408	999,499	999,940	999,553	999,378	999,362	999,496	0,097	-0,098	0,015	-
1,200	999,559	999,465	999,326	999,908	999,667	999,271	999,297	999,499	0,098	-0,082	0,003	-
1,210	999,673	999,355	999,269	999,878	999,489	999,209	999,525	999,485	0,090	-0,091	0,014	-
1,220	999,745	999,550	999,372	999,910	999,548	999,418	999,617	999,594	0,084	-0,079	0,109	-
1,230	999,701	999,442	999,380	999,891	999,406	999,441	999,591	999,550	0,112	-0,073	0,044	-
1,240	999,610	999,553	999,600	999,922	999,263	999,405	999,498	999,550	0,082	-0,091	0,000	-
1,250	999,454	999,546	999,588	999,932	999,376	998,848	999,091	999,405	0,104	-0,098	0,145	-
1,260	999,410	999,063	998,959	999,913	999,442	999,278	999,491	999,365	0,085	-0,105	0,040	-
1,270	999,498	999,400	999,425	999,925	999,532	999,297	999,667	999,535	0,103	-0,084	0,170	-
1,280	999,557	999,511	999,284	999,894	999,593	999,473	999,417	999,533	0,093	-0,081	0,002	-
1,290	999,336	999,454	999,474	999,898	999,331	998,995	999,552	999,434	0,110	-0,084	0,098	-
1,300	999,626	999,491	998,940	999,921	998,983	999,428	999,688	999,440	0,104	-0,087	0,005	-
1,310	999,780	999,689	999,510	999,893	999,540	999,483	999,704	999,657	0,089	-0,079	0,217	-
1,320	999,558	999,657	999,540	999,931	999,384	999,526	999,686	999,612	0,080	-0,075	0,045	-
1,330	999,545	999,479	999,630	999,933	999,548	999,655	999,789	999,654	0,084	-0,074	0,042	-
1,340	999,729	999,520	999,515	999,936	999,455	999,575	999,593	999,618	0,067	-0,081	0,036	-
1,350	999,669	999,494	999,344	999,900	999,291	999,595	999,500	999,542	0,086	-0,083	0,076	-
1,360	999,600	999,303	999,414	999,913	999,461	999,434	999,331	999,494	0,103	-0,079	0,048	-
1,370	999,504	999,187	999,375	999,939	999,418	999,109	999,416	999,421	0,112	-0,092	0,072	-
1,380	999,437	999,427	999,100	999,936	999,647	999,336	999,552	999,491	0,102	-0,094	0,070	-
1,390	999,640	999,185	999,031	999,927	999,531	999,370	999,580	999,466	0,096	-0,100	0,025	-
1,400	999,502	999,515	999,454	999,927	999,465	999,466	999,696	999,575	0,079	-0,079	0,109	-
1,410	999,730	999,573	999,517	999,868	999,483	999,246	999,659	999,582	0,137	-0,086	0,007	-
1,420	999,482	999,390	999,318	999,908	999,465	999,457	999,710	999,533	0,080	-0,089	0,049	-
1,430	999,531	999,432	999,272	999,928	999,581	999,571	999,656	999,567	0,100	-0,083	0,034	-
1,440	999,579	999,389	999,176	999,934	999,617	999,566	999,729	999,570	0,103	-0,087	0,003	-
1,450	999,621	999,470	999,398	999,944	999,794	999,639	999,822	999,670	0,095	-0,073	0,100	-
1,460	999,642	999,528	999,499	999,915	999,428	999,431	999,527	999,567	0,089	-0,100	0,103	-
1,470	999,297	999,579	999,522	999,913	999,223	999,252	999,466	999,465	0,095	-0,085	0,103	-
1,480	999,463	999,372	999,357	999,915	999,323	999,392	999,343	999,452	0,088	-0,086	0,012	-
1,490	999,607	999,480	999,604	999,928	999,447	999,609	999,737	999,630	0,091	-0,065	0,178	-
1,500	999,576	999,593	999,433	999,888	999,349	999,417	999,688	999,564	0,086	-0,079	0,067	-
1,510	999,664	999,569	999,497	999,873	999,412	999,455	999,576	999,578	0,089	-0,099	0,014	-
1,520	999,520	999,363	999,355	999,909	998,884	999,589	999,443	999,437	0,094	-0,091	0,141	-
1,530	999,438	999,363	999,410	999,930	999,230	999,455	999,615	999,491	0,086	-0,090	0,054	-
1,540	999,448	999,384	999,524	999,937	999,276	999,535	999,736	999,549	0,108	-0,080	0,057	-
1,550	999,720	999,649	999,600	999,937	999,716	999,418	999,770	999,687	0,074	-0,074	0,138	-
1,560	999,734	999,606	999,390	999,934	999,570	999,524	999,751	999,644	0,116	-0,080	0,043	-
1,570	999,734	999,649	999,390	999,912	999,444	999,224	999,673	999,575	0,088	-0,092	0,069	-
1,580	999,505	999,591	999,488	999,924	999,634	999,670	999,788	999,657	0,075	-0,071	0,082	-
1,590	999,498	999,581	999,408	999,873	999,674	999,509	999,656	999,600	0,083	-0,083	0,057	-
1,600	999,309	999,591	999,478	999,891	999,259	999,342	999,438	999,472	0,098	-0,087	0,127	-
1,610	999,391	999,236	999,185	999,910	999,466	999,274	999,365	999,404	0,103	-0,102	0,069	-
1,620	999,373	999,156	999,338	999,900	999,483	997,040	997,715	998,858	0,157	-0,128	0,546	P
1,630	999,405	998,630	998,038	999,803	999,292	998,863	998,957	998,998	0,130	-0,144	0,141	-
1,640	999,044	998,479	997,775	999,704	998,563	998,649	998,978	998,742	0,301	-0,388	0,256	P
1,650	999,087	999,278	999,168	999,786	998,148	995,001	994,614	997,869	0,284	-0,134	0,873	P
1,660	998,643	995,768	994,463	999,870	999,518	999,280	999,608	998,164	0,220	-0,146	0,295	P
1,670	999,282	999,181	999,257	999,905	999,306	998,790	999,354	999,296	0,092	-0,136	1,132	P
1,680	999,636	999,491	999,134	999,907	999,455	999,481	999,625	999,533	0,103	-0,085	0,236	-
1,690	999,614	999,425	999,401	999,890	999,600	999,446	999,610	999,570	0,095	-0,085	0,037	-
1,700	999,413	999,334	999,212	999,915	999,297	999,035	999,095	999,329	0,101	-0,095	0,241	-
1,710	999,446	999,556	999,493	999,920	999,518	999,508	999,614	999,579	0,093	-0,075	0,251	P
1,720	999,607	999,520	999,557	999,900	999,658	999,172	999,186	999,514	0,118	-0,084	0,065	-
1,730	999,580	999,269	999,220	999,935	999,486	999,453	999,504	999,492	0,096	-0,097	0,022	-
1,740	999,532	999,537	999,417	999,898	999,306	999,602	999,707	999,571	0,100	-0,079	0,079	-
1,750	999,481	999,599	999,572	999,922	999,512	999,411	999,648	999,592	0,088	-0,083	0,021	-
1,760	999,589	999,527	999,475	999,899	999,538	999,461	999,522	999,573	0,093	-0,076	0,019	-
1,770	999,578	999,543	999,441	999,910	999,524	999,401	999,682	999,583	0,082	-0,090	0,010	-
1,780	999,538	999,502	999,400	999,923	999,516	999,551	999,627	999,579	0,112	-0,074	0,003	-
1,790	999,598	999,434	999,406	999,914	999,472	999,346	999,406	999,511	0,090	-0,087	0,068	-
1,800	999,668	999,421	999,292	999,907	999,233	999,013	999,100	999,376	0,098	-0,098	0,135	-
1,810	999,537	999,451	999,337	999,930	999,530	999,347	999,447	999,511	0,093	-0,089	0,135	-
1,820	999,555	999,517	999,525	999,924	999,387	999,568	999,705	999,597	0,091	-0,129	0,086	-
1,830	999,497	999,389	999,349	999,906	999,508	999,438	999,603	999,527	0,101	-0,096	0,070	-
1,840	999,447	999,493	999,327	999,929	999,584	999,475	999,615	999,553	0,089	-0,095	0,025	-
1,850	999,607	999,555	999,639	999,926	999,674	999,377	999,681	999,637	0,080	-0,097	0,085	-
1,860	999,491	999,579	999,442	999,924	999,539	999,378	999,598	999,564	0,087	-0,089	0,073	-
1,870	999,655	999,480	999,434	999,883	999,622	999,504	999,535	999,588	0,076	-0,077	0,023	-
1,880	999,573	999,328	999,257	999,911	999,645	999,486	999,573	999,539	0,113	-0,090	0,049	-
1,890	999,592	999,554	999,403	999,930	999,662	999,612	999,703	999,637	0,092	-0,084	0,098	-
1,900	999,527	999,634	999,410	999,948	999,467	999,628	999,747	999,623	0,082	-0,074	0,014	-
1,910	999,599	999,621	999,335	999,923	999,656	999,396	999,569	999,586	0,086	-0,091	0,037	-
1,920	999,613	999,590	999,222	999,928	999,426	999,119	999,308	999,458	0,095	-0,104	0,128	-
1,930	999,551	999,353	998,856	999,915	999,398	999,527	999,254	999,408	0,112	-0,091	0,050	-

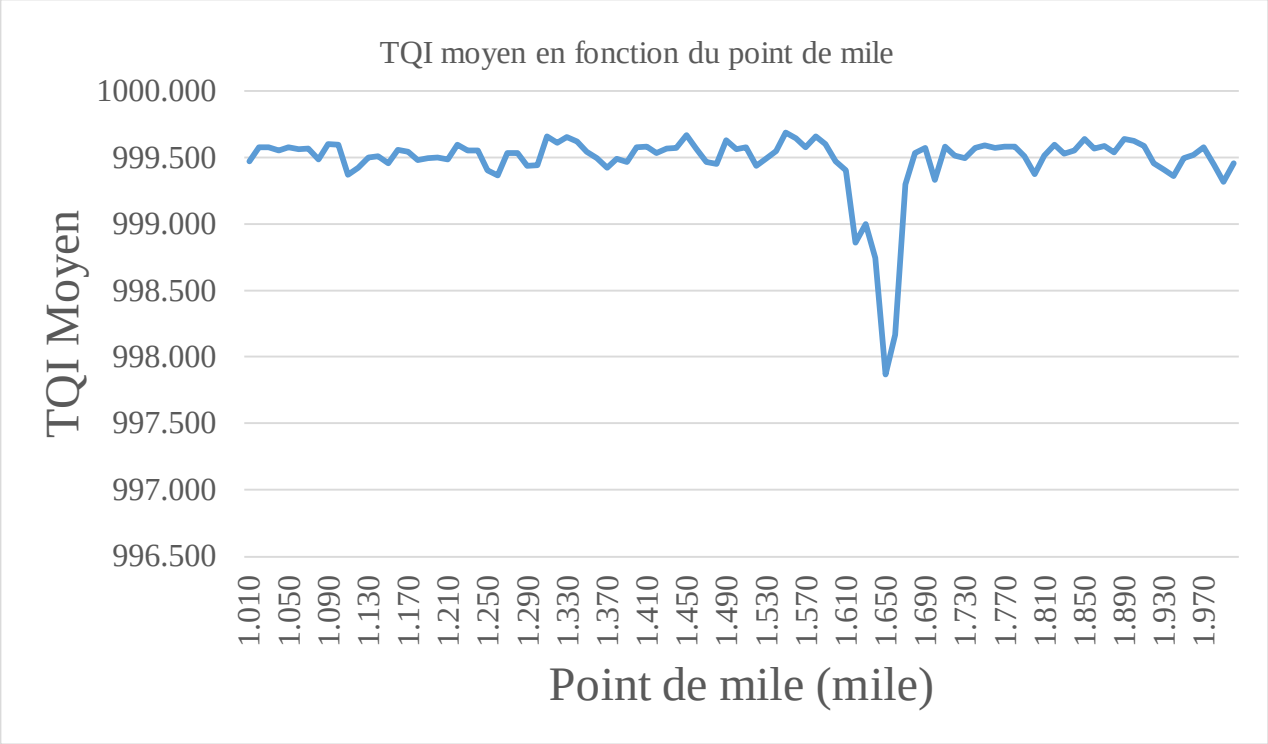

Figure A-1 : TQI Moyen entre le point de mile 1 et 2

Tableau A.2 : Calcul du TQI du point de 3 au point de mile 4

Segment de voie	Écart type aCACLT	TQI aCACLT	Écart type aCALVT	TQI aCALVT	Écart type aCARVT	TQI aCARVT	Écart type aCBCLN	TQI aCBCLN	Écart type aCBCLT	TQI aCBCLT	Écart type aCBLVT	TQI aCBLVT	Écart type CBRVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta > .315	Niveau de criticité
3,010	0,024	999,604	0,032	999,261	0,030	999,363	0,014	999,858	0,051	998,168	0,040	998,894	0,028	999,462	999,230	0,194	-0,128		-
3,020	0,040	998,881	0,052	998,111	0,040	998,890	0,012	999,893	0,044	998,675	0,054	997,988	0,069	996,699	998,448	0,189	-0,191	0,782	P
3,030	0,042	998,783	0,059	997,559	0,060	997,517	0,011	999,920	0,028	999,438	0,040	998,893	0,043	998,703	998,688	0,156	-0,137	0,239	-
3,040	0,030	999,386	0,045	998,580	0,061	997,408	0,011	999,915	0,029	999,418	0,028	999,455	0,032	999,262	999,061	0,159	-0,188	0,373	P
3,050	0,027	999,508	0,033	999,260	0,033	999,228	0,010	999,932	0,030	999,382	0,028	999,438	0,020	999,729	999,497	0,103	-0,089	0,436	P
3,060	0,026	999,515	0,026	999,512	0,033	999,237	0,010	999,933	0,027	999,480	0,021	999,687	0,019	999,746	999,587	0,083	-0,080	0,090	-
3,070	0,027	999,504	0,032	999,304	0,040	998,888	0,009	999,941	0,020	999,731	0,022	999,664	0,019	999,754	999,541	0,100	-0,094	0,046	-
3,080	0,023	999,620	0,027	999,507	0,037	999,042	0,009	999,946	0,023	999,643	0,022	999,673	0,019	999,752	999,598	0,095	-0,091	0,057	-
3,090	0,024	999,588	0,026	999,539	0,032	999,277	0,010	999,925	0,022	999,649	0,021	999,703	0,017	999,793	999,639	0,088	-0,083	0,042	-
3,100	0,018	999,784	0,029	999,413	0,033	999,241	0,010	999,929	0,024	999,608	0,030	999,353	0,025	999,574	999,557	0,095	-0,085	0,082	-
3,110	0,020	999,706	0,039	998,955	0,040	998,892	0,010	999,930	0,019	999,746	0,027	999,497	0,021	999,682	999,487	0,118	-0,098	0,071	-
3,120	0,022	999,667	0,024	999,583	0,026	999,527	0,009	999,944	0,019	999,753	0,021	999,681	0,019	999,749	999,701	0,080	-0,081	0,214	-
3,130	0,017	999,789	0,023	999,638	0,021	999,687	0,011	999,921	0,019	999,746	0,025	999,563	0,018	999,761	999,729	0,073	-0,068	0,029	-
3,140	0,016	999,821	0,021	999,685	0,022	999,656	0,009	999,944	0,017	999,786	0,020	999,719	0,017	999,788	999,771	0,065	-0,061	0,042	-
3,150	0,018	999,781	0,021	999,704	0,021	999,702	0,009	999,949	0,020	999,719	0,027	999,502	0,019	999,753	999,730	0,080	-0,069	0,042	-
3,160	0,017	999,795	0,023	999,629	0,023	999,617	0,009	999,944	0,021	999,686	0,021	999,689	0,018	999,765	999,732	0,078	-0,065	0,002	-
3,170	0,018	999,768	0,022	999,653	0,023	999,623	0,008	999,956	0,024	999,598	0,019	999,754	0,015	999,839	999,742	0,069	-0,065	0,010	-
3,180	0,021	999,686	0,023	999,625	0,027	999,483	0,007	999,963	0,021	999,698	0,019	999,759	0,017	999,792	999,715	0,076	-0,070	0,027	-
3,190	0,018	999,776	0,022	999,675	0,029	999,429	0,010	999,936	0,018	999,772	0,018	999,761	0,018	999,783	999,733	0,079	-0,082	0,018	-
3,200	0,018	999,768	0,020	999,707	0,024	999,583	0,012	999,904	0,018	999,772	0,017	999,799	0,017	999,794	999,761	0,081	-0,075	0,028	-
3,210	0,022	999,665	0,022	999,656	0,024	999,607	0,016	999,821	0,022	999,661	0,018	999,782	0,015	999,841	999,719	0,082	-0,093	0,042	-
3,220	0,020	999,706	0,020	999,716	0,019	999,742	0,010	999,934	0,019	999,751	0,018	999,782	0,017	999,808	999,777	0,063	-0,070	0,058	-
3,230	0,016	999,830	0,024	999,594	0,023	999,640	0,009	999,945	0,017	999,792	0,019	999,734	0,019	999,740	999,753	0,072	-0,064	0,023	-
3,240	0,016	999,828	0,018	999,768	0,022	999,671	0,011	999,909	0,019	999,753	0,020	999,720	0,020	999,725	999,768	0,064	-0,067	0,014	-
3,250	0,022	999,668	0,025	999,572	0,024	999,592	0,013	999,875	0,038	998,975	0,064	997,176	0,049	998,315	999,025	0,215	-0,179	0,743	P
3,260	0,027	999,500	0,074	996,137	0,061	997,375	0,016	999,815	0,030	999,390	0,033	999,217	0,030	999,363	998,685	0,150	-0,137	0,340	P
3,270	0,025	999,562	0,046	998,494	0,042	998,794	0,013	999,877	0,027	999,498	0,042	998,744	0,030	999,350	999,188	0,123	-0,160	0,503	P
3,280	0,023	999,635	0,039	998,949	0,036	999,113	0,015	999,840	0,032	999,286	0,058	997,671	0,053	998,034	998,933	0,149	-0,155	0,256	P
3,290	0,023	999,617	0,068	996,732	0,068	996,746	0,015	999,839	0,029	999,397	0,039	998,938	0,045	998,592	998,552	0,178	-0,158	0,381	P
3,300	0,022	999,675	0,068	996,769	0,069	996,667	0,012	999,894	0,021	999,697	0,034	999,183	0,035	999,158	998,721	0,156	-0,152	0,169	-
3,310	0,020	999,721	0,052	998,081	0,054	997,946	0,017	999,797	0,032	999,297	0,033	999,238	0,028	999,447	999,075	0,241	-0,208	0,355	P
3,320	0,022	999,648	0,025	999,548	0,031	999,329	0,019	999,740	0,039	998,956	0,032	999,269	0,026	999,535	999,432	0,217	-0,148	0,357	P
3,330	0,029	999,428	0,031	999,326	0,030	999,354	0,017	999,803	0,035	999,138	0,035	999,154	0,029	999,394	999,371	0,120	-0,276	0,061	-
3,340	0,027	999,473	0,028	999,452	0,030	999,366	0,013	999,881	0,025	999,557	0,032	999,282	0,026	999,537	999,507	0,100	-0,117	0,136	-
3,350	0,023	999,640	0,030	999,360	0,033	999,238	0,010	999,929	0,020	999,731	0,025	999,552	0,019	999,743	999,599	0,106	-0,104	0,092	-
3,360	0,015	999,839	0,020	999,713	0,023	999,634	0,010	999,928	0,019	999,752	0,023	999,631	0,018	999,763	999,752	0,081	-0,076	0,152	-
3,370	0,019	999,752	0,020	999,731	0,022	999,655	0,012	999,907	0,020	999,720	0,029	999,421	0,025	999,578	999,680	0,097	-0,083	0,071	-
3,380	0,017	999,798	0,023	999,629	0,024	999,598	0,011	999,918	0,018	999,772	0,026	999,528	0,022	999,660	999,700	0,082	-0,076	0,020	-
3,390	0,015	999,845	0,022	999,665	0,023	999,631	0,009	999,948	0,016	999,823	0,019	999,750	0,016	999,825	999,784	0,081	-0,081	0,083	-
3,400	0,016	999,812	0,024	999,596	0,024	999,597	0,009	999,944	0,016	999,826	0,020	999,712	0,016	999,817	999,758	0,076	-0,077	0,026	-
3,410	0,013	999,879	0,018	999,762	0,020	999,720	0,009	999,945	0,015	999,847	0,025	999,569	0,016	999,821	999,792	0,078	-0,073	0,034	-
3,420	0,013	999,876	0,019	999,757	0,017	999,786	0,010	999,926	0,017	999,794	0,022	999,651	0,018	999,778	999,795	0,079	-0,062	0,004	-
3,430	0,016	999,810	0,018	999,764	0,021	999,702	0,009	999,943	0,013	999,883	0,020	999,729	0,015	999,838	999,810	0,072	-0,060	0,015	-
3,440	0,015	999,838	0,017	999,803	0,019	999,750	0,009	999,949	0,015	999,847	0,022	999,660	0,016	999,809	999,808	0,057	-0,062	0,002	-
3,450	0,013	999,883	0,017	999,790	0,017	999,791	0,008	999,958	0,014	999,854	0,019	999,738	0,015	999,850	999,838	0,071	-0,062	0,030	-
3,460	0,012	999,895	0,019	999,753	0,019	999,743	0,009	999,948	0,013	999,891	0,017	999,789	0,015	999,848	999,838	0,080	-0,092	0,000	-
3,470	0,011	999,922	0,015	999,844	0,016	999,819	0,007	999,969	0,011	999,917	0,014	999,861	0,013	999,878	999,887	0,058	-0,080	0,049	-
3,480	0,011	999,909	0,014	999,857	0,013	999,883	0,006	999,976	0,009	999,940	0,014	999,868	0,012	999,905	999,905	0,060	-0,075	0,018	-
3,490	0,010	999,932	0,014	999,868	0,012	999,903	0,007	999,964	0,010	999,926	0,014	999,856	0,011	999,909	999,908	0,050	-0,083	0,003	-
3,500	0,008	999,955	0,011	999,916	0,011	999,917	0,006	999,977	0,009	999,945	0,012	999,907	0,012	999,906	999,932	0,049	-0,094	0,023	-
3,510	0,006	999,977	0,007	999,962	0,008	999,952	0,006	999,972	0,007	999,964	0,009	999,949	0,008	999,957	999,962	0,044	-0,095	0,030	-
3,520	0,003	999,993	0,006	999,977	0,006	999,978	0,040	998,863	0,005	999,983	0,008	999,959	0,006	999,973	999,818	0,077	-0,091	0,144	-
3,530	0,004	999,988	0,005	999,985	0,005	999,984	0,005	999,986	0,005	999,984	0,005	999,981	0,005	999,986	999,985	0,047	-0,050	0,167	-
3,540	0,005	999,983	0,006	999,979	0,006	999,976	0,003	999,994	0,005	999,982	0,006	999,975	0,006	999,979	999,981	0,032	-0,022	0,004	-
3,550	0,006	999,973	0,007	999,964	0,007	999,963	0,003	999,993	0,006	999,975	0,007	999,968	0,006	999,971	999,972	0,039	-0,028	0,009	-
3,560	0,007	999,970	0,007	999,966	0,007	999,962	0,005	999,980	0,006	999,972	0,008	999,960	0,007	999,966	999,968	0,040	-0,026	0,004	-
3,570	0,006	999,971	0,007	999,964	0,008	999,958	0,003	999,992	0,006	999,973	0,008	999,956	0,007	999,967	999,969	0,046	-0,029	0,001	-
3,580	0,007	999,969	0,007	999,968	0,007	999,964	0,003	999,992	0,006	999,972	0,008	999,959	0,007	999,963	999,970	0,041	-0,025	0,001	-
3,590	0,007	999,965	0,007	999,961	0,008	999,960	0,004	999,990	0,008	999,960	0,008	999,958	0,007	999,967	999,966	0,040	-0,035	0,004	-
3,600	0,007	999,969	0,007	999,970	0,007	999,968	0,003	999,993	0,006	999,976	0,008	999,958	0,007	999,969	999,972	0,038	-0,027	0,006	-
3,610	0,006	999,972	0,007	999,965	0,007	999,961	0,003	999,994	0,006	999,978	0,007	999,966	0,007	999,969	999,972	0,036	-0,030	0,000	-
3,620	0,006	999,976	0,006	999,971	0,007	999,969	0,003	999,993	0,006	999,977	0,008	999,957	0,007	999,969	999,973	0,034	-0,027	0,001	-
3,630	0,006	999,974	0,006	999,974	0,007	999,968	0,004	999,991	0,006	999,973	0,007	999,964	0,006	999,973	999,974	0,033	-0,027	0,001	-
3,640	0,006	999,977	0,006	999,972	0,007	999,967	0,007	999,965	0,006	999,975	0,007	999,965	0,007	999,965	999,969	0,043	-0,022	0,004	-
3,650	0,006	999,974	0,007	999,968	0,007	999,966	0,004	999,989	0,006	999,974	0,008	999,959	0,006	999,971	999,972	0,034	-0,029	0,002	-
3,660	0,006	999,976	0,006	999,975	0,006	999,972	0,003	999,993	0,006	999,978	0,007	999,962	0,006	999,973	999,976	0,027	-0,029	0,004	-
3,670	0,006	999,978	0,006	999,972	0,007	999,969	0,003	999,993	0,006	999,976	0,008	999,952	0,007	999,967	999,972	0,035	-0,069	0,003	-
3,680	0,006	999,975	0,007	999,962	0,008	999,960	0,003	999,991	0,007	999,968	0,009	999,945	0,007	999,962	999,966	0,035	-0,029	0,006	-
3,690	0,007	999,966	0,008	999,957	0,007	999,963	0,004	999,991	0,007	999,968	0,008	999,950	0,007	999,963	999,966	0,033	-0,030	0,001	-
3,700	0,006	999,971	0,007	999,961	0,008	999,960	0,004	999,991	0,007	999,970	0,009	999,942	0,007	999,962	999,965	0,038	-0,035	0,000	-
3,710	0,006	999,972	0,008	999,958	0,007	999,962	0,004	999,991	0,007	999,963	0,009	999,941	0,007	999,966	999,965	0,041	-0,030	0,001	-
3,720	0,006	999,973	0,007	999,961	0,007	999,962	0,004	999,989	0,007	999,963	0,009	999,940	0,007	999,966	999,965	0,032	-0,031	0,000	-
3,730	0,006	999,974	0,007	999,963	0,008	999,960	0,004	999,989	0,006	999,972	0,009	999,949	0,007	999,963	999,967	0,032	-0,030	0,002	-
3,740	0,007	999,969	0,007	999,961	0,007	999,967	0,003	999,992	0,006	999,972	0,009	999,948	0,007	999,965	999,968	0,033	-0,030	0,001	-
3,750	0,007	999,967	0,008	999,960	0,008	999,960	0,004	999,991	0,006	999,972	0,010	999,933	0,008	999,958	999,963	0,040	-0,028	0,005	-
3,760	0,007	999,968	0,007	999,961	0,007	999,963	0,003	999,993	0,007	999,968	0,009	999,949	0,007	999,964	999,967	0,035	-0,040	0,003	-
3,770	0,006	999,972	0,007	999,961	0,007	999,962	0,004	999,991	0,007	999,966	0,009	999,943	0,007	999,963	999,965	0,035	-0,034	0,001	-
3,780	0,006	999,975	0,008	999,954	0,008	999,960	0,003	999,993	0,006	999,972	0,009	999,948	0,007	999,963	999,966	0,032	-0,027	0,001	-
3,790	0,007	999,970	0,007	999,968	0,007	999,965	0,003	999,992	0,006	999,971	0,009	999,949	0,007	999,963	999,968	0,032	-0,032	0,002	-
3,800	0,006	999,971	0,007	999,966	0,008	999,960	0,004	999,987	0,007	999,962	0,010	999,924	0,008	999,951	999,960	0,044	-0,056	0,008	-
3,810	0,008	999,960	0,008	999,957	0,008	999,953	0,004	999,990	0,007	999,967	0,009	999,948	0,007	999,964	999,963	0,048	-0,037	0,002	-
3,820	0,007	999,963	0,007	999,965	0,007	999,963	0,004	999,990	0,007	999,967	0,008	999,949	0,007	999,970	999,967	0,042	-0,030	0,004	-
3,830	0,007	999,965	0,007	999,967	0,007	999,964	0,007	999,964	0,009	999,941	0,013	999,889	0,010	999,929	999,946	0,067	-0,091	0,021	-
3,840	0,011	999,919	0,011	999,915	0,011	999,909	0,006	999,971	0,009	999,938	0,012	999,896	0,010	999,931	999,925	0,088	-0,076	0,020	-
3,850	0,012	999,899	0,012	999,897	0,013	999,886	0,005	999,980	0,009	999,941	0,011	999,914	0,010	999,928	999,921	0,091	-0,057	0,005	-
3,860	0,010	999,925	0,011	999,923	0,012	999,896	0,005	999,979	0,011	999,921	0,014	999,869	0,011	999,920	999,919	0,074	-0,065	0,002	-
3,870	0,011	999,920	0,012	999,891	0,013	999,885	0,006	999,975	0,011	999,919	0,014	999,855	0,011	999,920	999,909	0,053	-0,056	0,010	-
3,880	0,013	999,886	0,012	999,900	0,012	999,902	0,006	999,975	0,012	999,901	0,013	999,876	0,011	999,921	999,909	0,076	-0,066	0,001	-
3,890	0,013	999,880	0,013	999,881	0,012	999,894	0,007	999,961	0,014	999,868	0,020	999,713	0,014	999,855	999,865	0,086	-0,081	0,044	-
3,900	0,013	999,886	0,014	999,865	0,015	999,843	0,007	999,965	0,014	999,871	0,016	999,818	0,014	999,854	999,872	0,067	-0,060	0,007	-

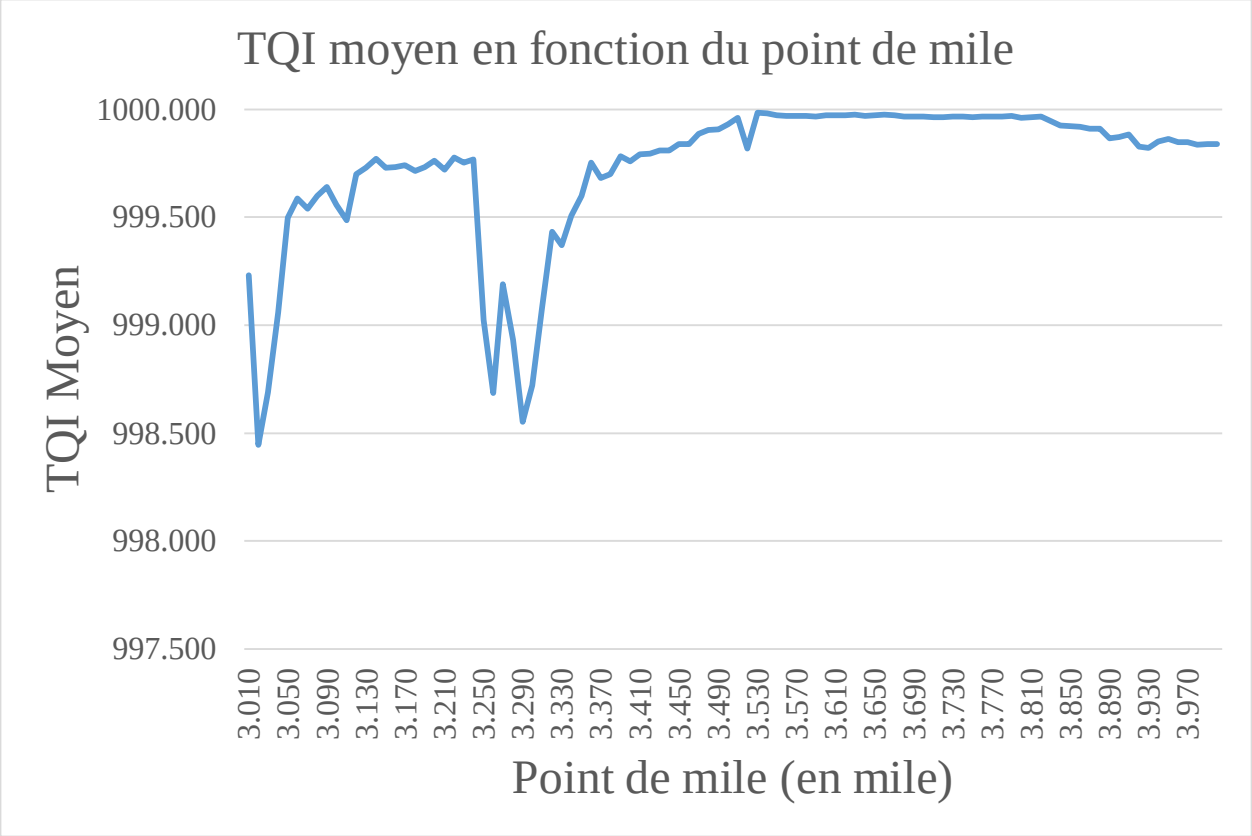

Figure A-2 : TQI Moyen entre le point de mile 3 et 4

Tableau A.3 : Calcul du TQI du point de 5 au point de mile 6

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta > .315	Niveau de criticité
5,010	999,616	999,408	999,313	999,905	999,436	999,380	999,554	999,516	0,082	-0,095		-
5,020	999,438	999,326	999,105	999,911	999,524	999,468	999,700	999,496	0,083	-0,095	0,020	-
5,030	999,473	999,255	999,199	999,918	999,499	999,498	999,616	999,494	0,088	-0,097	0,002	-
5,040	999,610	999,579	999,206	999,907	999,455	999,551	999,611	999,560	0,109	-0,079	0,066	-
5,050	999,353	999,437	999,282	999,937	999,527	999,551	999,688	999,539	0,101	-0,091	0,021	-
5,060	999,655	999,474	999,443	999,886	998,754	999,184	999,528	999,418	0,231	-0,341	0,122	-
5,070	999,652	999,427	999,051	999,865	998,905	999,036	999,673	999,373	0,177	-0,122	0,045	-
5,080	999,087	999,107	998,903	999,863	999,106	999,334	999,423	999,260	0,168	-0,104	0,112	-
5,090	999,222	998,990	998,455	999,862	998,885	998,945	999,429	999,113	0,156	-0,241	0,148	-
5,100	999,064	999,087	998,536	999,828	999,248	999,036	999,424	999,175	0,137	-0,133	0,062	-
5,110	999,167	999,090	998,570	999,814	999,278	998,917	999,449	999,184	0,157	-0,100	0,009	-
5,120	999,181	998,564	998,124	999,831	999,572	999,301	999,609	999,169	0,127	-0,124	0,015	-
5,130	999,432	999,195	998,653	999,894	998,408	998,933	999,434	999,135	0,180	-0,283	0,034	-
5,140	999,077	998,842	999,015	999,872	999,339	999,121	999,539	999,258	0,122	-0,112	0,122	-
5,150	999,394	999,026	998,731	999,907	998,936	998,952	999,565	999,216	0,137	-0,117	0,042	-
5,160	999,557	999,284	999,248	999,902	999,646	999,293	999,498	999,490	0,083	-0,099	0,274	P
5,170	999,576	999,264	999,208	999,881	999,631	999,266	999,514	999,477	0,094	-0,123	0,012	-
5,180	999,581	999,388	998,940	999,922	999,648	999,530	999,513	999,503	0,097	-0,109	0,026	-
5,190	999,562	999,477	999,469	999,929	999,634	999,621	999,806	999,643	0,091	-0,081	0,140	-
5,200	999,677	999,581	999,424	999,938	999,687	999,611	999,686	999,657	0,086	-0,090	0,015	-
5,210	999,568	999,574	999,360	999,916	999,522	999,457	999,628	999,575	0,101	-0,073	0,083	-
5,220	999,677	999,546	999,409	999,909	999,555	999,392	999,487	999,568	0,099	-0,089	0,007	-
5,230	999,618	999,426	999,183	999,933	999,711	999,369	999,322	999,509	0,090	-0,095	0,059	-
5,240	999,541	999,391	999,354	999,913	999,643	999,541	999,676	999,580	0,082	-0,086	0,071	-
5,250	999,351	999,612	999,292	999,926	999,551	999,464	999,535	999,533	0,098	-0,092	0,046	-
5,260	999,294	999,317	999,080	999,923	999,539	999,580	999,603	999,477	0,099	-0,075	0,056	-
5,270	999,282	999,294	998,993	999,904	999,362	999,384	999,416	999,377	0,100	-0,125	0,100	-
5,280	999,510	999,240	999,074	999,932	999,668	999,400	999,617	999,492	0,120	-0,080	0,115	-
5,290	999,493	999,273	999,155	999,866	998,503	998,685	999,295	999,182	0,179	-0,193	0,310	P
5,300	999,374	999,181	999,171	999,922	999,294	999,408	999,656	999,429	0,093	-0,105	0,248	-
5,310	999,393	999,280	999,370	999,929	999,188	999,265	999,525	999,421	0,107	-0,119	0,008	-
5,320	999,377	999,265	999,025	999,926	999,668	999,391	999,599	999,464	0,105	-0,101	0,043	-
5,330	999,530	999,506	999,285	999,933	999,695	999,416	999,695	999,580	0,084	-0,104	0,116	-
5,340	999,486	999,229	999,243	999,920	999,759	999,394	999,614	999,521	0,110	-0,083	0,059	-
5,350	999,447	999,402	999,204	999,929	999,415	999,558	999,666	999,517	0,120	-0,091	0,003	-
5,360	999,536	999,476	999,466	999,925	999,464	999,501	999,482	999,550	0,086	-0,079	0,033	-
5,370	999,502	999,582	999,371	999,941	999,681	999,512	999,677	999,609	0,086	-0,094	0,059	-
5,380	999,707	999,563	999,257	999,924	999,501	999,339	999,675	999,566	0,084	-0,088	0,043	-
5,390	999,687	999,492	999,354	999,922	999,338	999,394	999,514	999,529	0,089	-0,089	0,038	-
5,400	999,606	999,201	999,409	999,912	999,114	999,436	999,671	999,478	0,089	-0,104	0,050	-
5,410	999,315	999,513	999,463	999,906	999,479	999,378	999,753	999,544	0,078	-0,092	0,066	-
5,420	999,509	999,381	998,912	999,910	999,286	999,520	999,677	999,456	0,081	-0,106	0,088	-
5,430	999,722	999,514	999,395	999,931	999,478	999,494	999,472	999,572	0,083	-0,101	0,116	-
5,440	999,634	999,455	999,343	999,903	999,617	999,265	999,497	999,531	0,088	-0,103	0,042	-
5,450	999,527	999,476	999,255	999,926	999,309	999,494	999,512	999,500	0,098	-0,103	0,031	-
5,460	999,386	999,416	999,267	999,935	999,225	999,410	999,493	999,448	0,087	-0,095	0,052	-
5,470	999,532	999,421	999,397	999,921	999,297	999,172	999,696	999,491	0,119	-0,103	0,043	-
5,480	999,599	999,410	999,296	999,917	999,553	999,550	999,712	999,577	0,084	-0,093	0,086	-
5,490	999,549	999,495	999,320	999,918	999,511	999,506	999,678	999,568	0,082	-0,097	0,009	-
5,500	999,543	999,366	999,465	999,912	999,468	999,401	999,713	999,552	0,091	-0,092	0,016	-
5,510	999,612	999,693	999,406	999,886	998,946	999,285	999,087	999,416	0,110	-0,115	0,136	-
5,520	999,427	999,193	998,842	999,868	999,431	998,619	998,988	999,196	0,129	-0,116	0,221	-
5,530	999,628	999,106	999,362	999,894	999,547	999,455	999,718	999,530	0,085	-0,119	0,334	P
5,540	999,608	999,413	999,305	999,910	999,752	999,499	999,620	999,586	0,092	-0,098	0,057	-
5,550	999,641	999,548	999,465	999,914	999,627	999,252	999,596	999,578	0,085	-0,104	0,009	-
5,560	999,683	999,275	999,312	999,923	999,470	998,983	999,149	999,399	0,096	-0,115	0,178	-
5,570	999,438	999,437	999,175	999,914	999,388	999,284	999,466	999,443	0,092	-0,090	0,044	-
5,580	999,410	999,248	999,128	999,920	999,041	999,072	999,148	999,281	0,131	-0,106	0,162	-
5,590	999,227	999,558	999,005	999,902	999,276	999,510	999,534	999,431	0,111	-0,089	0,150	-
5,600	999,273	999,078	999,413	999,928	999,411	999,406	999,376	999,412	0,098	-0,097	0,018	-
5,610	999,442	999,359	999,351	999,908	999,536	999,461	999,642	999,528	0,084	-0,090	0,116	-
5,620	999,685	999,506	999,312	999,915	999,627	999,460	999,603	999,587	0,103	-0,096	0,058	-
5,630	999,553	999,340	999,255	999,936	999,709	999,544	999,683	999,574	0,100	-0,081	0,013	-
5,640	999,483	999,561	999,577	999,920	999,420	999,446	999,540	999,564	0,084	-0,094	0,010	-
5,650	999,436	999,551	999,504	999,926	999,643	999,515	999,644	999,603	0,128	-0,096	0,039	-
5,660	999,586	999,407	999,524	999,937	999,710	999,554	999,215	999,562	0,087	-0,084	0,041	-
5,670	999,477	999,476	999,114	999,913	999,523	999,146	998,839	999,355	0,107	-0,103	0,207	-
5,680	999,600	999,037	998,549	999,841	999,283	999,284	999,040	999,233	0,110	-0,100	0,122	-
5,690	999,607	999,234	998,958	999,898	998,965	998,462	999,191	999,188	0,104	-0,150	0,045	-
5,700	999,027	999,043	999,153	999,868	998,979	998,544	999,197	999,116	0,191	-0,103	0,072	-
5,710	999,118	998,844	998,933	999,762	999,228	995,355	996,112	998,193	0,166	-0,165	0,923	P
5,720	999,171	997,505	996,321	999,863	999,537	998,566	999,020	998,569	0,162	-0,173	0,376	P
5,730	999,201	997,876	998,268	999,715	998,926	998,501	998,198	998,669	0,184	-0,186	0,100	-
5,740	999,068	998,559	997,920	999,834	999,420	999,276	999,500	999,082	0,140	-0,106	0,413	P
5,750	999,497	999,304	999,257	999,902	999,493	999,137	999,434	999,432	0,105	-0,107	0,350	P
5,760	999,460	999,091	999,298	999,917	999,567	999,292	999,546	999,453	0,116	-0,138	0,021	-
5,770	999,531	999,301	999,026	999,928	999,411	999,206	999,653	999,437	0,102	-0,083	0,017	-
5,780	999,422	999,240	999,164	999,939	999,676	999,546	999,677	999,523	0,106	-0,082	0,087	-
5,790	999,604	999,452	999,032	999,927	999,549	999,151	999,531	999,464	0,107	-0,101	0,059	-
5,800	999,639	999,199	998,873	999,903	999,474	999,218	999,535	999,406	0,118	-0,081	0,058	-
5,810	999,516	998,891	999,274	999,880	999,411	998,942	999,503	999,345	0,121	-0,111	0,061	-
5,820	999,381	998,672	999,119	999,887	999,302	999,172	999,158	999,242	0,115	-0,107	0,103	-
5,830	999,430	999,184	999,107	999,905	999,461	999,325	999,219	999,376	0,109	-0,104	0,134	-
5,840	999,518	999,384	999,061	999,914	999,392	999,065	999,241	999,368	0,086	-0,112	0,008	-

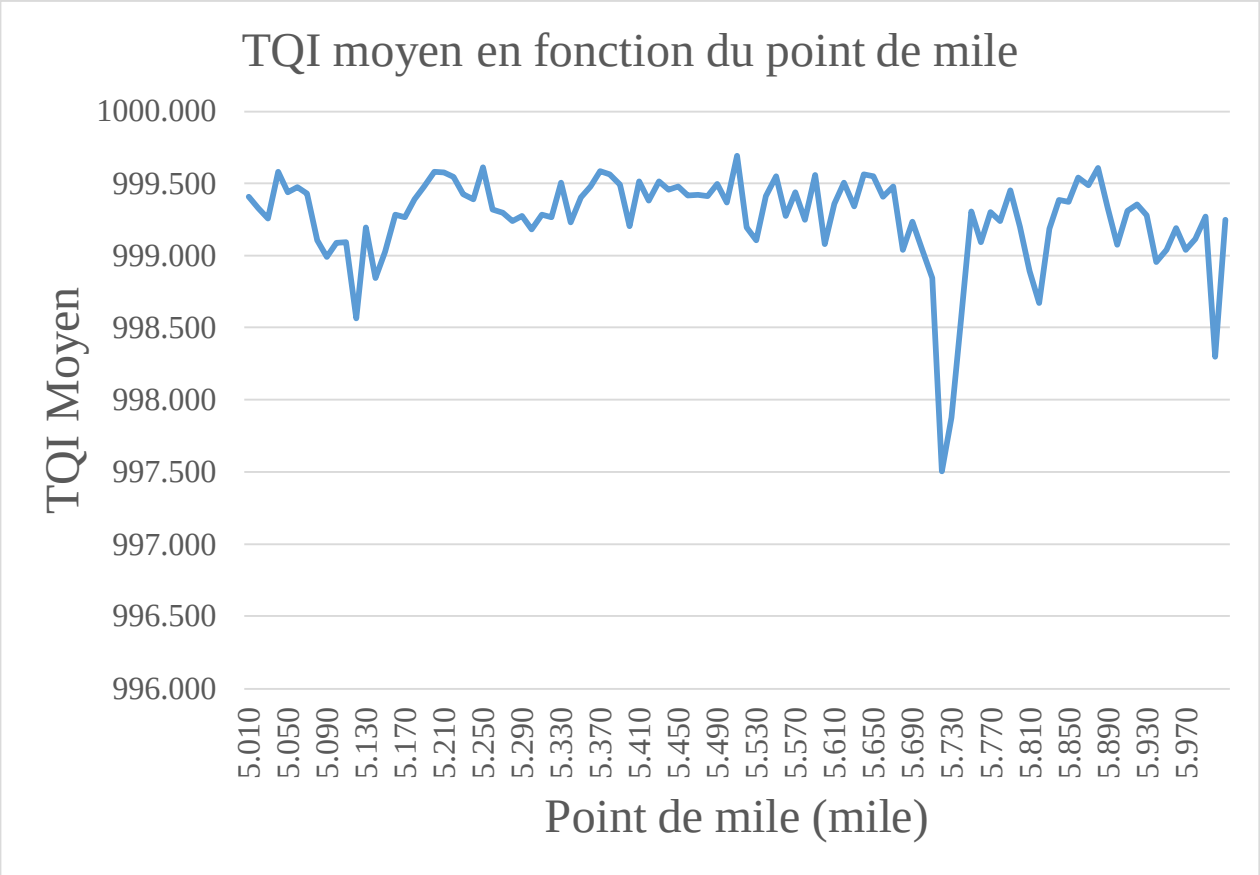

Figure A-3 : TQI Moyen entre le point de mile 5 et 6

Tableau A.4 : Calcul du TQI du point de 6 au point de mile 7

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta > .100	Niveau de criticité
6,010	999,063	998,924	999,047	999,842	998,829	999,104	999,140	999,136	0,262574	-0,143095		-
6,020	999,161	999,029	999,129	999,891	999,331	999,500	999,626	999,381	0,101985	-0,156022	0,246	-
6,030	999,315	999,270	999,150	999,902	999,666	999,632	999,564	999,500	0,117011	-0,136729	0,119	-
6,040	999,338	999,390	999,192	999,904	998,982	999,335	999,575	999,388	0,17581	-0,226803	0,112	-
6,050	999,456	999,335	999,421	999,910	999,430	999,597	999,520	999,524	0,187988	-0,148411	0,136	-
6,060	999,453	999,411	999,383	999,915	999,618	999,623	999,435	999,548	0,101384	-0,107104	0,024	-
6,070	999,472	999,431	999,265	999,906	999,400	999,616	999,671	999,537	0,1545	-0,12634	0,011	-
6,080	999,444	999,422	999,447	999,916	999,739	999,556	999,632	999,593	0,107952	-0,121896	0,056	-
6,090	999,555	999,325	999,213	999,869	999,572	999,540	999,631	999,529	0,101224	-0,124818	0,064	-
6,100	999,581	999,610	999,528	999,838	999,594	999,321	999,605	999,582	0,108944	-0,07851	0,053	-
6,110	999,213	999,357	999,097	999,899	999,631	999,493	999,565	999,465	0,132864	-0,103422	0,117	-
6,120	999,232	999,476	999,251	999,902	999,578	999,519	999,618	999,511	0,114746	-0,117011	0,046	-
6,130	999,427	999,498	999,340	999,926	999,721	999,648	999,714	999,610	0,119276	-0,077001	0,100	-
6,140	999,237	999,456	999,053	999,913	999,683	999,413	999,510	999,466	0,088583	-0,102668	0,144	-
6,150	999,358	999,480	999,395	999,923	999,498	999,416	999,427	999,499	0,098893	-0,104482	0,033	-
6,160	999,479	998,971	999,454	999,928	999,268	999,030	999,441	999,367	0,089834	-0,101431	0,132	-
6,170	999,412	999,038	999,202	999,925	999,548	999,157	999,656	999,420	0,090161	-0,09647	0,052	-
6,180	999,614	999,333	999,089	999,918	999,694	999,553	999,747	999,564	0,093609	-0,091912	0,144	-
6,190	999,606	999,451	999,372	999,911	999,765	999,556	999,586	999,607	0,091344	-0,104932	0,043	-
6,200	999,336	999,545	999,280	999,934	999,670	999,622	999,592	999,569	0,083795	-0,094364	0,038	-
6,210	999,599	999,520	999,406	999,937	999,638	999,675	999,585	999,623	0,083283	-0,072163	0,054	-
6,220	999,507	999,541	999,588	999,921	999,429	999,443	999,627	999,580	0,086311	-0,084316	0,043	-
6,230	999,496	999,675	999,444	999,933	999,581	999,679	999,561	999,624	0,079265	-0,078392	0,045	-
6,240	999,404	999,515	999,195	999,929	999,600	999,660	999,589	999,556	0,08153	-0,101913	0,068	-
6,250	999,624	999,106	999,381	999,923	999,257	999,607	999,273	999,453	0,098402	-0,101787	0,103	-
6,260	999,379	999,540	999,034	999,926	999,582	999,692	999,643	999,542	0,110217	-0,08404	0,089	-
6,270	999,061	999,277	998,764	999,915	999,630	999,022	999,675	999,335	0,110972	-0,107864	0,207	-
6,280	999,593	999,615	999,486	999,928	999,549	999,603	999,505	999,611	0,089079	-0,080255	0,277	P
6,290	999,162	999,342	999,394	999,918	999,450	998,977	999,442	999,383	0,117209	-0,099508	0,228	-
6,300	999,102	999,330	998,380	999,922	999,460	999,269	999,413	999,268	0,101431	-0,176649	0,116	-
6,310	999,419	999,368	998,865	999,893	999,454	999,632	999,392	999,432	0,12305	-0,089633	0,164	-
6,320	999,605	999,326	999,033	999,898	999,643	999,461	999,454	999,489	0,094669	-0,110217	0,057	-
6,330	999,564	999,269	999,092	999,911	999,482	999,391	999,137	999,406	0,089409	-0,110902	0,082	-
6,340	999,539	998,950	999,196	999,923	999,372	999,135	999,469	999,369	0,114955	-0,089047	0,037	-
6,350	999,392	999,315	999,252	999,930	999,425	999,474	999,509	999,471	0,104177	-0,076869	0,102	-
6,360	999,217	999,210	999,034	999,922	999,585	999,536	999,472	999,425	0,109462	-0,098893	0,046	-
6,370	999,453	999,423	999,446	999,922	999,503	999,324	999,638	999,530	0,101985	-0,093918	0,105	-
6,380	999,652	999,468	999,344	999,926	999,490	999,554	999,563	999,571	0,109462	-0,079914	0,041	-
6,390	999,645	999,358	999,495	999,944	999,385	999,465	999,652	999,563	0,115501	-0,103306	0,008	-
6,400	999,382	999,498	999,335	999,932	999,469	999,476	999,652	999,535	0,088324	-0,103685	0,028	-
6,410	999,334	999,505	999,170	999,927	999,597	999,556	999,567	999,522	0,082285	-0,110972	0,013	-
6,420	999,422	999,513	999,339	999,894	999,437	999,400	999,530	999,505	0,086814	-0,08455	0,017	-
6,430	999,381	999,559	999,285	999,905	999,414	999,290	999,581	999,488	0,108707	-0,096658	0,017	-
6,440	999,486	999,334	999,337	999,918	999,691	999,550	999,503	999,545	0,092099	-0,079642	0,058	-
6,450	999,546	999,202	998,924	999,913	999,642	999,082	999,400	999,387	0,110143	-0,120785	0,158	-
6,460	999,483	999,349	999,030	999,923	999,625	999,589	999,516	999,502	0,092099	-0,107952	0,115	-
6,470	999,582	999,408	999,386	999,908	999,682	999,533	999,611	999,587	0,08002	-0,079497	0,085	-
6,480	999,610	999,433	999,502	999,924	999,754	999,561	999,791	999,654	0,094951	-0,075961	0,067	-
6,490	999,602	999,282	999,316	999,940	999,636	999,673	999,739	999,598	0,089079	-0,084316	0,055	-
6,500	999,617	999,512	999,629	999,916	999,708	999,619	999,684	999,669	0,085076	-0,074383	0,071	-
6,510	999,666	999,393	999,583	999,917	999,761	999,626	999,635	999,654	0,082797	-0,082797	0,015	-
6,520	999,588	999,636	999,523	999,932	999,768	999,582	999,458	999,641	0,098138	-0,08455	0,013	-
6,530	999,649	999,466	999,371	999,936	999,773	999,561	999,647	999,629	0,079265	-0,091153	0,012	-
6,540	999,698	999,672	999,476	999,892	999,737	999,528	999,542	999,649	0,076038	-0,08002	0,021	-
6,550	999,627	999,221	998,954	999,923	999,594	999,440	999,597	999,479	0,112481	-0,091344	0,170	-
6,560	999,500	999,436	999,179	999,873	999,699	999,570	999,596	999,550	0,097383	-0,101913	0,071	-
6,570	999,588	999,460	999,310	999,873	999,720	999,557	999,673	999,597	0,085305	-0,07851	0,047	-
6,580	999,546	999,503	999,373	999,872	999,750	999,285	999,323	999,522	0,092438	-0,084901	0,075	-
6,590	999,647	999,280	999,246	999,888	999,716	998,506	998,840	999,303	0,104932	-0,108944	0,219	-
6,600	999,545	998,739	999,087	999,905	999,551	999,352	999,629	999,401	0,082797	-0,104826	0,098	-
6,610	999,606	999,221	999,134	999,907	999,387	999,427	999,712	999,485	0,095397	-0,089633	0,084	-
6,620	999,115	999,307	999,302	999,883	999,591	998,082	999,133	999,202	0,124722	-0,131485	0,283	P
6,630	999,051	998,358	998,302	999,877	999,261	999,284	999,169	999,043	0,157776	-0,129384	0,159	-
6,640	998,677	998,723	998,326	999,916	999,174	999,420	998,941	999,025	0,128373	-0,137393	0,018	-
6,650	998,068	999,378	998,949	999,912	999,312	999,319	999,205	999,163	0,114746	-0,126439	0,138	-
6,660	998,929	999,589	999,197	999,915	999,498	999,376	999,407	999,416	0,127953	-0,079914	0,253	P
6,670	999,408	999,367	999,263	999,915	998,972	999,027	999,028	999,283	0,265618	-0,138517	0,133	-
6,680	998,107	998,613	997,361	999,916	999,749	999,087	999,722	998,936	0,141168	-0,16155	0,347	P
6,690	998,822	999,553	999,458	999,882	999,506	999,481	999,770	999,496	0,095397	-0,127196	0,560	P
6,700	999,603	999,413	999,443	999,892	999,498	999,424	999,530	999,543	0,115706	-0,094951	0,047	-
6,710	999,447	999,456	999,334	999,930	999,465	999,461	999,546	999,520	0,086814	-0,08304	0,023	-
6,720	999,455	999,401	999,331	999,926	999,580	999,466	999,528	999,527	0,105585	-0,099183	0,007	-
6,730	999,477	999,606	999,369	999,916	999,642	999,530	999,339	999,554	0,074547	-0,094674	0,027	-
6,740	999,621	999,468	999,222	999,940	999,598	999,390	999,624	999,552	0,090161	-0,105585	0,002	-
6,750	999,568	999,430	999,376	999,940	999,613	999,602	999,677	999,601	0,100403	-0,082285	0,049	-
6,760	999,505	999,510	999,544	999,932	999,524	999,595	999,610	999,603	0,076637	-0,078999	0,002	-
6,770	999,600	999,479	999,289	999,887	999,374	999,369	999,659	999,522	0,092415	-0,086404	0,081	-
6,780	999,465	999,440	999,530	999,923	999,368	999,473	999,682	999,555	0,086311	-0,07763	0,032	-
6,790	999,637	999,457	999,459	999,907	999,188	999,435	999,505	999,513	0,172005	-0,128623	0,042	-
6,800	999,391	999,365	999,352	999,838	998,719	998,601	999,131	999,200	0,1683	-0,319655	0,313	P
6,810	999,456	998,841	998,345	999,808	999,100	998,609	999,146	999,044	0,149172	-0,14576	0,156	-
6,820	998,940	999,048	998,783	999,709	999,140	998,139	997,926	998,812	0,172203	-0,162512	0,232	-
6,830	999,186	998,723	998,530	999,784	999,432	998,669	998,965	999,041	0,175139	-0,154025	0,229	-
6,840	999,257	998,859	998,552	999,905	999,474	999,530	999,661	999,320	0,101913	-0,118521	0,278	P
6,850	999,402	999,712	999,348	999,916	999,358	999,634	999,764	999,591	0,096911	-0,075347	0,271	P
6,860	999,600	999,598	999,203	999,893	999,362	999,336	999,702	999,528	0,085241	-0,098426	0,063	-
6,870	999,623	999,644	999,497	999,927	998,882	999,480	999,656	999,530	0,092854	-0,095135	0,002	-
6,880	999,012	999,548	999,408	999,888	999,473	999,480	999,533	999,477	0,1408	-0,197882	0,052	-
6,890	999,328	999,407	999,099	999,901	999,393	999,455	999,427	999,430	0,092368	-0,107313	0,047	-
6,900	999,442	999,575	999,437	999,906	999,585	999,609	999,453	999,572	0,081256	-0,08606	0,142	-
6,910	999,475	999,469	999,385	999,884	999,542	999,668	999,734	999,594	0,088114	-0,092854	0,022	-
6,920	999,330	999,470	999,397	999,931	999,601	999,588	999,747	999,581	0,08606	-0,08404	0,013	-
6,930	999,552	999,485	999,511	999,910	999,660	999,595	999,576	999,613	0,087069	-0,089633	0,032	-
6,940	999,416	999,047	999,223	999,899	999,292	999,547	999,557	999,426	0,117739	-0,093432	0,187	-
6,950	999,250	999,341	999,247	999,897	999,496	999,435	999,666	999,476	0,085835	-0,106345	0,050	-
6,960	999,354	999,592	999,553	999,928	999,405	999,658	999,656	999,592	0,08934	-0,075961	0,116	-
6,970	999,387	999,500	999,252	999,897	999,329	999,315	999,463	999,449	0,093929	-0,082747	0,143	-
6,980	999,484	999,344	999,572	999,903	999,350	999,340	999,728	999,532	0,088583	-0,087155	0,083	-
6,990	999,429	999,129	999,437	999,859	999,604	999,500	999,599	999,508	0,079642	-0,092672	0,024	-
7,000	999,525	999,302	999,162	999,909	999,505	999,487	999,650	999,506	0,114746	-0,079759	0,002	-
Grand Total	999,323	999,330	999,197	999,901	999,470	999,377	999,484	999,440	0,265618	-0,319655		

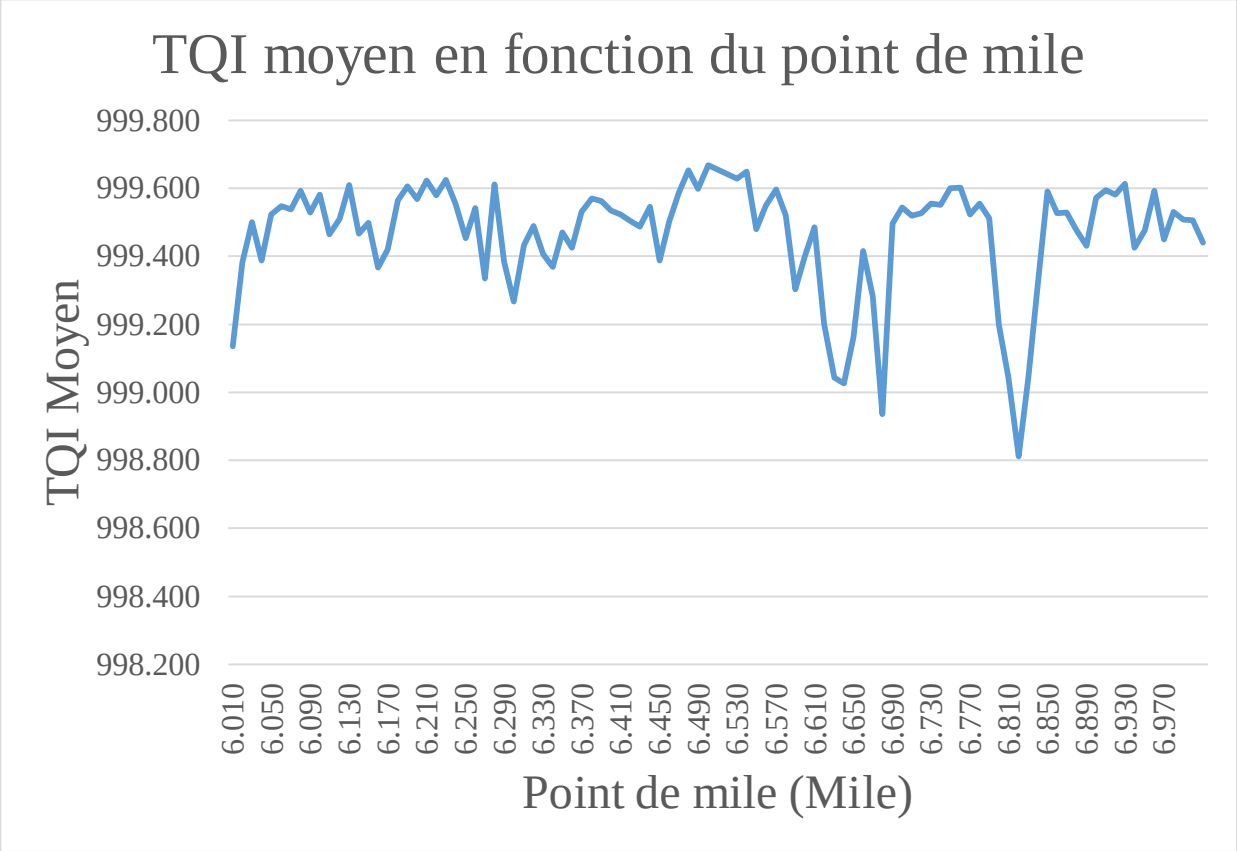

Figure A-4 : TQI Moyen entre le point de mile 6 et 7

Tableau A.5 : Calcul du TQI du point de 7 au point de mile 8

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI aCBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta >.100	Niveau de criticité
7,010	999,468	999,558	999,390	999,929	999,619	999,564	999,349	999,554	0,120	-0,079		-
7,020	999,558	999,505	999,195	999,934	999,390	999,622	999,417	999,517	0,093	-0,103	0,037	-
7,030	999,510	999,484	999,233	999,932	999,147	999,487	999,299	999,441	0,106	-0,099	0,076	-
7,040	999,416	999,498	998,913	999,923	999,123	999,119	999,423	999,345	0,106	-0,112	0,096	-
7,050	998,588	999,244	999,014	999,892	999,566	999,556	999,569	999,347	0,107	-0,134	0,002	-
7,060	999,245	999,485	999,400	999,933	999,529	999,687	999,591	999,553	0,085	-0,101	0,206	-
7,070	999,626	999,592	999,556	999,857	999,597	999,495	999,690	999,631	0,088	-0,080	0,078	-
7,080	999,482	999,532	999,339	999,835	999,301	999,630	999,757	999,554	0,089	-0,080	0,077	-
7,090	999,336	999,508	999,374	999,808	999,439	999,701	999,561	999,532	0,095	-0,080	0,021	-
7,100	998,558	999,514	999,345	999,815	999,529	999,353	999,376	999,356	0,098	-0,087	0,177	-
7,110	999,572	999,513	999,414	999,737	999,414	998,757	999,266	999,382	0,083	-0,101	0,026	-
7,120	999,544	999,084	998,697	999,865	999,552	998,392	997,843	998,997	0,130	-0,126	0,385	P
7,130	999,194	998,798	996,994	999,340	997,660	995,325	994,743	997,436	0,289	-0,263	1,561	P
7,140	998,224	997,357	995,655	999,734	998,815	997,577	996,019	997,626	0,206	-0,184	0,190	-
7,150	998,800	997,562	996,520	999,850	999,099	998,638	999,181	998,521	0,139	-0,196	0,896	P
7,160	998,565	998,162	997,795	999,824	999,425	997,754	998,133	998,522	0,190	-0,131	0,001	-
7,170	999,535	997,197	997,251	999,829	999,301	999,217	999,346	998,811	0,178	-0,127	0,288	P
7,180	999,312	999,285	998,911	999,807	999,210	996,165	996,140	998,404	0,180	-0,142	0,407	P
7,190	998,697	997,430	997,138	999,843	999,258	998,408	998,565	998,477	0,217	-0,123	0,073	-
7,200	999,293	998,485	998,422	999,910	999,569	998,853	998,840	999,053	0,131	-0,111	0,576	P
7,210	999,255	999,365	998,870	999,884	999,717	998,750	998,040	999,126	0,116	-0,128	0,073	-
7,220	999,312	999,155	999,054	999,894	999,602	999,327	999,455	999,400	0,123	-0,122	0,274	P
7,230	999,595	999,352	999,140	999,878	999,395	999,431	999,634	999,489	0,086	-0,100	0,089	-
7,240	999,452	999,377	998,879	999,871	999,303	999,319	999,633	999,405	0,095	-0,100	0,084	-
7,250	999,385	999,465	999,381	999,833	999,331	999,523	999,548	999,495	0,099	-0,082	0,090	-
7,260	998,916	999,433	999,209	999,862	999,689	999,541	999,497	999,450	0,094	-0,098	0,046	-
7,270	999,227	999,206	999,162	999,879	999,603	999,523	999,485	999,441	0,090	-0,117	0,009	-
7,280	999,575	999,546	999,350	999,884	999,391	999,550	999,766	999,580	0,109	-0,090	0,140	-
7,290	999,411	999,576	999,492	999,878	999,470	999,515	999,768	999,587	0,089	-0,102	0,007	-
7,300	999,514	999,499	999,215	999,905	999,508	998,904	998,763	999,330	0,111	-0,094	0,257	P
7,310	999,381	999,173	998,816	999,892	999,758	999,430	999,398	999,407	0,120	-0,094	0,077	-
7,320	999,249	999,201	999,305	999,905	999,569	999,364	999,557	999,450	0,095	-0,087	0,043	-
7,330	999,646	999,543	999,434	999,880	999,526	999,426	999,640	999,585	0,106	-0,091	0,135	-
7,340	999,423	999,479	999,387	999,924	999,652	999,439	999,411	999,531	0,080	-0,094	0,054	-
7,350	999,593	999,428	999,313	999,934	999,761	999,672	999,550	999,607	0,081	-0,084	0,076	-
7,360	999,557	999,534	999,387	999,894	999,570	999,504	999,572	999,574	0,092	-0,098	0,033	-
7,370	999,717	999,563	999,454	999,895	999,516	999,281	999,519	999,563	0,100	-0,105	0,011	-
7,380	999,441	999,369	999,440	999,926	999,464	999,065	999,332	999,434	0,125	-0,114	0,129	-
7,390	999,526	999,481	999,346	999,899	999,171	999,086	999,059	999,367	0,113	-0,077	0,067	-
7,400	999,047	999,455	999,125	999,906	999,778	999,237	999,047	999,371	0,112	-0,094	0,004	-
7,410	999,210	999,303	998,964	999,907	999,551	999,372	999,412	999,388	0,102	-0,101	0,018	-
7,420	999,632	999,506	998,894	999,925	999,269	999,271	999,067	999,366	0,114	-0,124	0,022	-
7,430	998,948	998,866	998,821	999,895	999,089	999,113	999,181	999,130	0,109	-0,114	0,236	-
7,440	999,065	999,067	999,369	999,883	999,489	999,423	999,440	999,391	0,089	-0,083	0,261	P
7,450	999,688	998,967	999,484	999,882	998,931	999,291	998,688	999,276	0,112	-0,094	0,115	-
7,460	999,230	999,108	998,716	999,778	998,816	999,272	999,574	999,213	0,109	-0,112	0,063	-
7,470	998,793	999,297	998,741	999,762	999,350	999,342	999,606	999,270	0,101	-0,121	0,057	-
7,480	998,706	999,413	999,103	999,674	998,961	999,188	999,339	999,198	0,093	-0,096	0,073	-
7,490	999,176	999,454	999,201	999,837	998,752	998,909	998,593	999,132	0,123	-0,103	0,066	-
7,500	999,322	999,457	999,124	999,892	999,042	997,785	996,395	998,717	0,129	-0,157	0,415	P
7,510	998,729	998,610	998,737	999,897	998,942	998,717	998,511	998,878	0,132	-0,127	0,161	-
7,520	999,113	998,129	999,117	999,882	999,379	998,698	997,696	998,859	0,126	-0,168	0,018	-
7,530	999,158	998,973	998,580	999,867	999,758	996,210	996,311	998,408	0,163	-0,123	0,451	P
7,540	999,455	997,726	997,746	999,872	999,443	996,727	996,901	998,267	0,177	-0,136	0,141	-
7,550	999,272	999,416	999,084	999,902	999,402	998,454	997,655	999,026	0,099	-0,161	0,759	P
7,560	999,156	998,990	999,050	999,874	999,593	998,944	999,152	999,251	0,097	-0,114	0,225	-
7,570	999,653	999,544	999,488	999,903	999,216	999,447	999,338	999,513	0,082	-0,090	0,261	P
7,580	999,405	998,986	999,146	999,901	999,507	999,392	999,173	999,359	0,113	-0,123	0,154	-
7,590	999,471	999,380	999,248	999,854	999,523	999,414	999,344	999,462	0,097	-0,083	0,103	-
7,600	999,620	999,371	999,491	999,890	999,632	999,520	999,639	999,595	0,084	-0,092	0,133	-
7,610	999,503	999,456	999,397	999,880	999,262	999,307	999,495	999,471	0,094	-0,116	0,123	-
7,620	999,366	999,232	999,231	999,912	999,616	999,137	999,160	999,379	0,101	-0,096	0,092	-
7,630	999,490	999,477	999,128	999,947	999,574	999,357	999,326	999,471	0,119	-0,107	0,092	-
7,640	999,375	999,399	999,072	999,903	999,613	998,758	999,003	999,303	0,111	-0,102	0,168	-
7,650	999,322	999,349	999,095	999,914	999,585	999,202	999,109	999,368	0,125	-0,113	0,064	-
7,660	999,369	999,366	998,885	999,927	999,666	999,050	999,016	999,326	0,134	-0,093	0,042	-
7,670	999,526	999,478	999,309	999,925	999,662	999,381	999,224	999,501	0,101	-0,090	0,175	-
7,680	999,472	999,182	999,217	999,869	999,541	999,253	999,244	999,397	0,116	-0,096	0,104	-
7,690	999,457	999,450	999,197	999,913	999,502	999,245	998,891	999,379	0,092	-0,107	0,017	-
7,700	999,400	999,511	999,082	999,896	999,597	999,179	999,451	999,445	0,102	-0,087	0,066	-
7,710	999,533	999,507	999,194	999,887	999,169	999,561	999,190	999,434	0,097	-0,099	0,011	-
7,720	999,300	999,292	998,897	999,886	999,491	998,604	999,401	999,267	0,104	-0,119	0,167	-
7,730	998,756	999,328	998,914	999,882	999,708	999,157	999,361	999,301	0,101	-0,099	0,034	-
7,740	999,010	999,135	999,214	999,810	999,599	999,470	998,890	999,304	0,104	-0,105	0,003	-
7,750	999,296	998,768	999,006	999,731	998,728	998,235	998,552	998,902	0,156	-0,135	0,402	P
7,760	998,821	999,119	998,887	999,836	999,253	999,115	998,700	999,104	0,134	-0,115	0,202	-
7,770	999,334	999,125	999,236	999,877	999,433	999,199	999,139	999,335	0,107	-0,109	0,231	-
7,780	999,676	999,305	999,351	999,921	999,440	998,968	999,212	999,410	0,094	-0,109	0,076	-
7,790	999,619	999,354	999,338	999,928	999,518	999,374	999,408	999,506	0,107	-0,085	0,095	-
7,800	999,600	999,331	999,206	999,898	999,457	999,318	999,239	999,436	0,108	-0,090	0,070	-
7,810	999,392	999,215	999,274	999,917	999,664	999,411	999,092	999,424	0,098	-0,090	0,012	-
7,820	999,484	999,230	998,710	999,839	999,602	999,214	999,412	999,356	0,108	-0,098	0,068	-
7,830	999,338	999,360	999,235	999,892	999,532	999,040	999,076	999,353	0,112	-0,107	0,003	-
7,840	999,194	998,942	999,136	999,883	999,450	999,471	999,543	999,374	0,119	-0,101	0,021	-
7,850	999,418	999,448	999,219	999,866	999,372	999,568	999,383	999,468	0,100	-0,109	0,094	-
7,860	999,302	999,221	999,050	999,899	999,228	999,259	999,324	999,326	0,106	-0,115	0,142	-
7,870	999,505	999,530	999,180	999,901	999,224	999,559	999,532	999,490	0,091	-0,082	0,164	-
7,880	999,243	999,413	999,111	999,846	999,626	998,988	999,167	999,342	0,152	-0,099	0,148	-
7,890	999,314	999,299	999,271	999,829	999,623	999,452	999,561	999,478	0,115	-0,087	0,136	-
7,900	999,316	999,434	998,889	999,623	999,450	999,226	999,517	999,351	0,135	-0,119	0,127	-
7,910	999,443	999,378	999,145	999,751	999,133	999,385	999,547	999,397	0,122	-0,127	0,046	-
7,920	999,177	999,199	999,218	999,652	999,525	999,157	999,211	999,305	0,114	-0,110	0,092	-
7,930	999,136	999,057	999,002	999,746	999,469	998,648	998,809	999,124	0,139	-0,163	0,182	-
7,940	999,545	999,208	999,045	999,527	998,703	989,926	990,207	996,594	0,273	-0,248	2,529	P
7,950	999,055	995,305	994,161	999,077	998,526	994,558	994,598	996,469	0,265	-0,240	0,126	-
7,960	998,297	996,715	997,225	999,609	997,859	993,706	992,090	996,500	0,216	-0,212	0,031	-
7,970	998,332	997,042	996,254	999,721	999,013	998,450	998,252	998,152	0,204	-0,145	1,652	P
7,980	998,448	999,018	999,143	999,896	999,639	999,355	998,501	999,143	0,134	-0,122	0,991	P
7,990	999,479	999,407	999,387	999,902	999,519	998,953	998,767	999,345	0,116	-0,099	0,202	-
8,000	999,552	999,421	998,865	999,854	999,225	999,045	999,248	999,316	0,207	-0,119	0,029	-
8,010	999,474	999,361	998,867	999,798	999,485	998,986	997,658	999,090	0,124	-0,116	0,226	-
8,020	999,213	998,937	998,868	999,844	998,976	998,965	999,070	999,125	0,138	-0,134	0,035	-
Grand Total	999,247	999,034	998,796	999,810	999,338	998,789	998,728	999,106	0,289	-0,263		

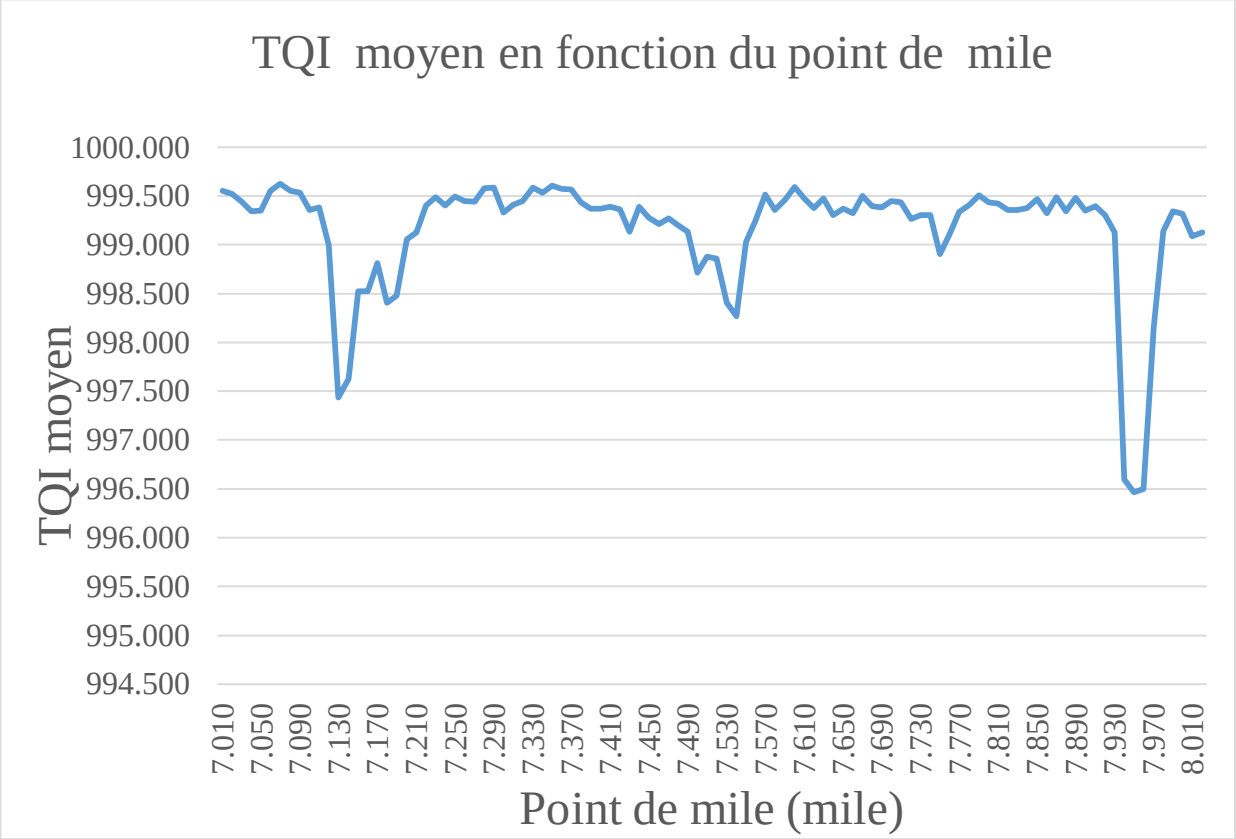

Figure A-5 : TQI Moyen entre le point de mile 7 et 8

Tableau A.6 Calcul du TQI du point de 9 au point de mile 10

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta > .100	Niveau de criticité
9,010	999,227	999,396	999,309	999,844	999,569	998,629	999,238	999,316	0,110	-0,101		-
9,020	999,473	998,870	998,910	999,732	999,401	998,201	998,449	999,005	0,106	-0,135	0,311	P
9,030	998,969	999,110	998,429	999,763	999,203	998,707	997,592	998,825	0,162	-0,149	0,180	-
9,040	998,143	999,436	998,733	999,829	999,474	999,184	998,935	999,105	0,117	-0,143	0,280	P
9,050	999,448	999,500	999,229	999,818	999,033	998,455	999,278	999,252	0,130	-0,122	0,147	-
9,060	999,372	998,954	999,026	999,860	999,219	998,512	998,878	999,117	0,118	-0,142	0,135	-
9,070	999,316	999,050	999,275	999,846	999,308	998,573	999,249	999,231	0,126	-0,147	0,114	-
9,080	999,040	999,143	999,433	999,777	999,458	998,586	999,091	999,218	0,138	-0,114	0,013	-
9,090	999,225	999,216	999,281	999,755	999,422	998,629	998,338	999,124	0,114	-0,143	0,095	-
9,100	999,534	999,386	999,037	999,814	999,580	999,354	999,450	999,451	0,097	-0,087	0,327	P
9,110	999,418	999,326	999,306	999,786	999,515	998,737	999,181	999,324	0,120	-0,111	0,127	-
9,120	999,364	999,064	999,088	999,814	999,551	998,530	998,793	999,172	0,137	-0,099	0,152	-
9,130	999,550	999,240	999,313	999,772	999,533	998,723	999,263	999,342	0,102	-0,131	0,170	-
9,140	999,333	999,335	999,237	999,843	998,979	999,051	999,224	999,286	0,090	-0,118	0,056	-
9,150	998,311	999,307	999,273	999,839	999,496	998,981	999,246	999,208	0,148	-0,111	0,078	-
9,160	999,418	999,249	999,372	999,831	999,246	998,999	998,805	999,274	0,106	-0,132	0,066	-
9,170	999,486	999,052	999,139	999,606	999,370	999,076	998,614	999,192	0,150	-0,108	0,082	-
9,180	999,115	999,080	998,840	999,747	999,282	998,641	999,349	999,151	0,140	-0,148	0,041	-
9,190	999,467	999,001	999,317	999,855	998,998	998,715	999,168	999,217	0,104	-0,151	0,067	-
9,200	998,743	999,231	999,061	999,830	999,475	998,597	998,970	999,130	0,106	-0,129	0,088	-
9,210	998,936	998,985	998,564	999,707	999,244	996,980	998,513	998,704	0,167	-0,104	0,426	P
9,220	998,733	998,703	999,049	999,588	998,869	997,927	997,814	998,669	0,138	-0,138	0,035	-
9,230	998,554	999,261	999,043	999,559	999,313	998,960	998,951	999,092	0,101	-0,122	0,423	P
9,240	999,267	999,327	999,123	999,480	999,294	998,480	999,279	999,179	0,204	-0,139	0,087	-
9,250	999,182	999,133	998,730	999,698	999,265	998,843	999,410	999,180	0,115	-0,109	0,002	-
9,260	999,319	999,137	999,297	999,738	997,467	997,667	998,074	998,671	0,244	-0,282	0,509	P
9,270	998,754	998,176	998,775	999,580	998,721	993,774	995,064	997,549	0,168	-0,249	1,122	P
9,280	999,226	997,681	997,169	999,496	998,193	996,194	996,309	997,753	0,243	-0,178	0,204	-
9,290	998,865	996,908	996,213	999,730	998,055	994,787	996,929	997,355	0,202	-0,384	0,397	P
9,300	998,995	999,164	999,160	999,764	999,383	997,739	996,661	998,695	0,171	-0,129	1,340	P
9,310	998,961	999,365	999,066	999,780	999,493	998,513	998,895	999,153	0,125	-0,105	0,458	P
9,320	999,403	999,194	999,183	999,821	999,456	998,767	999,189	999,288	0,108	-0,122	0,134	-
9,330	999,348	999,093	999,096	999,823	999,463	998,387	999,100	999,187	0,153	-0,133	0,100	-
9,340	999,545	999,133	999,405	999,860	999,281	999,292	999,418	999,419	0,109	-0,088	0,232	-
9,350	999,448	999,381	999,324	999,761	998,851	998,977	998,889	999,233	0,144	-0,101	0,186	-
9,360	998,908	999,030	999,276	999,815	999,415	998,241	999,137	999,117	0,128	-0,168	0,116	-
9,370	999,155	999,187	999,303	999,823	999,418	998,415	998,423	999,103	0,124	-0,137	0,014	-
9,380	999,352	999,330	999,060	999,809	999,490	998,227	998,745	999,145	0,158	-0,098	0,041	-
9,390	999,401	999,045	999,017	999,705	999,282	998,142	998,621	999,030	0,127	-0,154	0,114	-
9,400	998,710	999,421	998,915	999,819	999,174	998,734	999,288	999,152	0,130	-0,126	0,121	-
9,410	998,487	999,170	998,974	999,872	999,242	999,000	999,360	999,158	0,108	-0,141	0,006	-
9,420	999,078	999,221	999,349	999,796	999,022	999,047	998,888	999,200	0,112	-0,111	0,042	-
9,430	999,193	999,238	999,021	999,753	999,038	999,111	999,139	999,213	0,106	-0,125	0,013	-
9,440	997,731	998,935	998,870	999,734	999,503	998,751	998,945	998,924	0,149	-0,119	0,289	P
9,450	999,404	999,379	999,389	999,737	999,228	998,459	999,048	999,235	0,136	-0,112	0,311	P
9,460	999,238	999,088	999,094	999,676	999,349	998,449	999,194	999,155	0,112	-0,159	0,079	-
9,470	999,132	999,162	999,114	999,668	999,237	998,574	998,755	999,092	0,111	-0,111	0,064	-
9,480	999,411	998,979	998,885	999,741	999,445	998,980	999,185	999,232	0,119	-0,106	0,140	-
9,490	999,220	998,504	998,405	999,688	999,104	997,169	998,909	998,714	0,133	-0,184	0,518	P
9,500	998,657	999,124	998,824	999,688	998,980	998,260	998,426	998,851	0,131	-0,160	0,137	-
9,510	998,672	999,372	998,526	999,806	999,503	997,117	998,390	998,769	0,154	-0,114	0,082	-
9,520	999,298	998,976	998,901	999,837	999,152	998,041	998,602	998,972	0,179	-0,174	0,203	-
9,530	998,523	998,733	998,121	999,844	999,536	998,800	999,486	999,006	0,141	-0,189	0,034	-
9,540	998,889	999,356	998,836	999,823	999,281	998,524	998,864	999,082	0,126	-0,169	0,076	-
9,550	999,314	999,029	999,033	999,859	999,489	998,878	999,216	999,260	0,133	-0,127	0,178	-
9,560	999,288	999,337	999,347	999,812	999,498	998,741	999,031	999,293	0,110	-0,114	0,034	-
9,570	999,435	998,778	999,023	999,823	999,386	998,992	998,925	999,194	0,140	-0,133	0,099	-
9,580	998,925	999,230	999,362	999,745	999,400	999,218	999,153	999,290	0,114	-0,105	0,096	-
9,590	998,763	999,266	998,758	999,751	998,880	998,966	999,422	999,115	0,115	-0,131	0,175	-
9,600	998,818	999,332	999,297	999,792	999,140	999,008	999,452	999,263	0,107	-0,104	0,148	-
9,610	997,530	998,774	999,001	999,706	999,513	999,232	998,909	998,952	0,135	-0,124	0,310	P
9,620	999,135	999,054	998,942	999,712	998,422	998,167	998,575	998,858	0,203	-0,255	0,094	-
9,630	999,384	998,771	998,714	999,201	997,992	996,632	997,648	998,335	0,183	-0,245	0,523	P
9,640	998,941	998,639	998,765	999,502	997,090	994,796	997,168	997,843	0,263	-0,241	0,491	P
9,650	997,137	996,995	998,024	999,297	996,714	993,415	996,724	996,901	0,213	-0,366	0,942	P
9,660	996,211	997,579	998,088	999,443	996,052	996,977	995,699	997,150	0,288	-0,210	0,249	-
9,670	995,701	998,127	998,202	999,545	998,791	997,582	996,987	997,848	0,248	-0,253	0,698	P
9,680	999,228	999,193	998,890	999,628	999,327	998,696	999,149	999,159	0,131	-0,128	1,311	P
9,690	999,434	999,268	999,212	999,746	999,320	998,781	999,038	999,257	0,104	-0,116	0,098	-
9,700	999,363	999,446	999,493	999,710	999,597	998,971	999,407	999,427	0,087	-0,086	0,170	-
9,710	999,094	999,383	999,259	999,672	999,063	997,816	997,908	998,885	0,197	-0,172	0,542	P
9,720	999,343	998,457	998,582	999,811	997,934	994,311	993,168	997,373	0,181	-0,185	1,512	P
9,730	997,236	996,319	996,919	999,670	998,428	992,446	989,221	995,748	0,299	-0,274	1,624	P
9,740	999,065	998,218	995,767	999,687	998,077	996,460	997,263	997,791	0,231	-0,215	2,043	P
9,750	999,036	998,094	998,549	999,819	999,285	997,527	998,771	998,726	0,154	-0,159	0,935	P
9,760	999,164	998,849	998,669	999,777	999,027	998,037	999,026	998,935	0,113	-0,153	0,210	-
9,770	999,062	999,202	999,055	999,711	999,250	998,537	999,031	999,121	0,118	-0,116	0,186	-
9,780	998,940	998,880	998,832	999,840	999,250	998,349	998,420	998,930	0,134	-0,118	0,191	-
9,790	999,212	999,042	999,162	999,885	999,367	998,755	999,009	999,205	0,131	-0,101	0,274	P
9,800	999,041	999,058	999,207	999,772	999,450	999,057	999,261	999,264	0,137	-0,105	0,059	-
9,810	999,103	998,934	998,723	999,783	999,196	998,524	998,693	998,994	0,124	-0,141	0,270	P
9,820	998,519	999,117	998,748	999,863	999,692	999,150	999,475	999,223	0,114	-0,096	0,230	-
9,830	998,763	999,285	999,068	999,796	999,462	998,702	999,554	999,233	0,117	-0,140	0,010	-
9,840	999,002	999,238	999,309	999,786	999,332	999,183	999,412	999,323	0,156	-0,105	0,090	-
9,850	999,040	998,964	998,530	999,473	999,319	998,327	999,198	998,979	0,128	-0,119	0,344	P
9,860	999,416	999,226	999,135	999,600	999,464	999,228	999,303	999,339	0,120	-0,094	0,360	P
9,870	999,506	999,424	999,379	999,661	999,341	998,829	999,348	999,356	0,122	-0,086	0,017	-
9,880	999,175	998,894	999,135	999,609	999,154	997,449	998,147	998,795	0,209	-0,111	0,561	P
9,890	999,065	998,360	998,443	999,588	997,637	997,018	995,962	998,010	0,208	-0,248	0,784	P
9,900	997,777	996,827	995,877	999,514	998,709	985,366	988,775	994,692	0,264	-0,302	3,318	P
9,910	996,528	991,988	994,684	999,790	998,748	996,921	996,025	996,384	0,201	-0,220	1,691	P
9,920	997,142	997,556	996,346	999,704	999,431	998,641	997,437	998,037	0,188	-0,205	1,653	P
9,930	998,713	999,285	998,911	999,800	999,602	997,391	998,944	998,949	0,122	-0,166	0,913	P
9,940	999,252	998,918	998,774	999,669	999,248	998,368	998,820	999,007	0,155	-0,119	0,058	-
9,950	999,024	998,677	998,843	999,840	999,471	998,798	999,431	999,155	0,133	-0,139	0,148	-
9,960	999,042	998,978	998,898	999,807	999,106	998,544	999,221	999,085	0,134	-0,164	0,070	-
9,980	999,349	999,220	998,938	999,689	999,493	998,893	999,449	999,290	0,113	-0,098	0,205	-
9,990	997,988	998,880	998,705	999,851	999,242	998,529	999,198	998,913	0,122	-0,181	0,377	P
10,000	998,269	999,194	999,307	999,829	999,438	998,708	998,615	999,051	0,110	-0,120	0,138	-
10,010	999,254	999,237	999,152	999,859	999,686	999,126	999,399	999,387	0,137	-0,106	0,336	P
10,020	999,393	999,177	999,097	999,795	999,682	999,132	999,393	999,381	0,103	-0,095	0,006	-

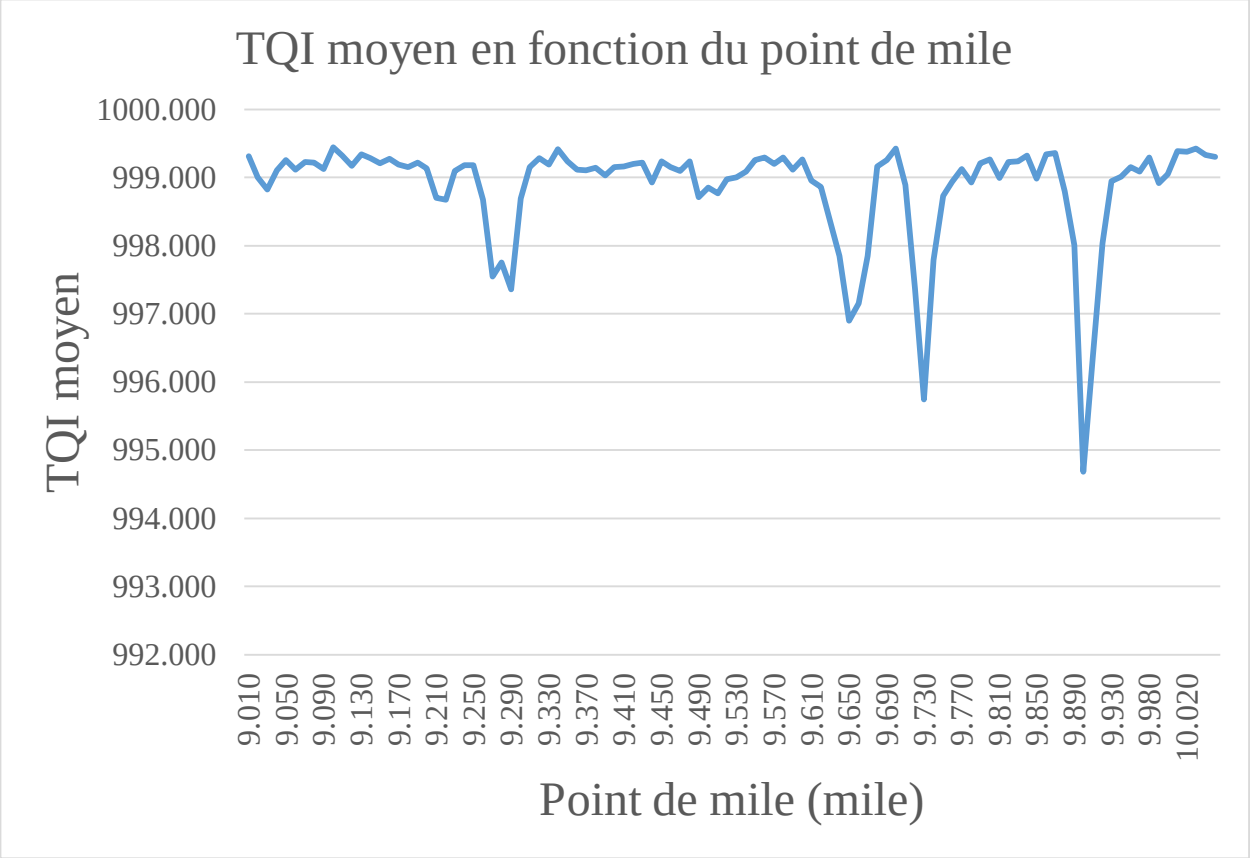

Figure A-6 : TQI Moyen entre le point de mile 9 et 10

Tableau A.7 : Calcul du TQI du point de 11 à point de mile 12

Segment de voie	TQI aCACLT	TQI aCALVT	TQI aCARVT	TQI aCBCLN	TQI aCBCLT	TQI aCBLVT	TQI CBRVT	TQI moyen	Valeur Maximum	Valeur Mimimum	Delta > .315	Niveau de criticité
11,01	999,218	999,311	999,047	999,858	999,252	998,408	999,374	999,210	0,111198	-0,114924		
11,02	999,410	999,408	999,041	999,841	999,258	999,233	999,269	999,351	0,106602	-0,093883	0,142	-
11,03	999,432	999,203	999,095	999,839	999,096	999,156	999,164	999,284	0,110902	-0,110357	0,068	-
11,04	999,378	999,438	999,167	999,728	999,259	999,373	999,407	999,393	0,08722	-0,113991	0,109	-
11,05	999,140	999,361	999,298	999,827	999,555	999,296	999,327	999,401	0,114955	-0,100403	0,008	-
11,06	999,498	999,027	999,143	999,848	999,086	999,142	999,073	999,260	0,101158	-0,102182	0,141	-
11,07	998,793	999,311	998,855	999,875	999,142	998,636	999,392	999,144	0,097383	-0,12607	0,116	-
11,08	998,258	998,677	998,832	999,846	999,486	999,207	999,307	999,088	0,136638	-0,112481	0,056	-
11,09	999,172	999,226	999,080	999,880	999,376	998,223	998,383	999,049	0,137166	-0,118521	0,039	-
11,1	999,347	998,931	999,140	999,863	999,492	998,060	997,722	998,936	0,141252	-0,096172	0,112	-
11,11	999,122	998,976	999,120	999,856	999,747	999,073	998,915	999,258	0,10362	-0,124722	0,322	P
11,12	999,277	999,087	999,149	999,859	999,711	998,819	998,600	999,215	0,121511	-0,113941	0,044	-
11,13	999,411	998,892	999,217	999,861	999,470	998,479	998,920	999,179	0,120966	-0,122468	0,036	-
11,14	999,559	999,294	999,302	999,875	999,416	999,398	999,340	999,455	0,091664	-0,082037	0,276	P
11,15	999,161	998,919	999,227	999,848	999,153	999,345	999,315	999,281	0,116256	-0,104268	0,174	-
11,16	999,438	999,204	999,130	999,862	999,384	998,599	999,307	999,275	0,10068	-0,109696	0,006	-
11,17	999,352	999,122	998,936	999,846	999,318	998,777	999,047	999,200	0,114955	-0,099928	0,075	-
11,18	999,048	998,886	998,975	999,828	999,442	999,013	999,384	999,225	0,113991	-0,088583	0,025	-
11,19	999,401	999,397	999,470	999,887	999,651	999,343	999,534	999,526	0,081769	-0,090912	0,301	P
11,2	999,271	999,284	999,299	999,882	999,350	998,516	999,393	999,285	0,11195	-0,106345	0,241	-
11,21	999,244	999,207	999,261	999,912	999,451	999,318	999,350	999,392	0,089834	-0,092852	0,107	-
11,22	997,828	998,911	998,985	999,912	999,584	999,075	998,832	999,018	0,12871	-0,144942	0,374	P
11,23	998,842	998,641	998,745	999,841	999,222	999,054	999,636	999,140	0,118499	-0,123056	0,122	-
11,24	999,354	999,256	999,140	999,801	999,511	999,116	999,451	999,375	0,105997	-0,110217	0,235	-
11,25	999,143	999,216	999,211	999,891	999,336	999,451	999,376	999,375	0,120018	-0,093432	0,000	-
11,26	999,334	999,115	999,137	999,832	999,234	999,184	999,319	999,308	0,102129	-0,120018	0,067	-
11,27	999,100	998,943	998,878	999,738	999,486	998,999	999,229	999,196	0,119463	-0,11195	0,112	-
11,28	999,133	998,719	998,073	999,774	999,483	998,740	998,989	998,987	0,140413	-0,132864	0,209	-
11,29	998,890	999,402	998,901	999,887	999,622	999,503	999,488	999,385	0,125315	-0,11811	0,397	P
11,3	999,319	999,421	999,491	999,896	999,278	999,294	999,607	999,472	0,09647	-0,093883	0,088	-
11,31	999,259	999,167	999,019	999,807	999,662	998,332	999,000	999,178	0,110447	-0,10068	0,294	P
11,32	999,195	999,231	998,936	999,855	999,637	999,469	999,126	999,350	0,126439	-0,117784	0,172	-
11,33	999,587	999,331	999,355	999,883	999,560	999,245	999,235	999,456	0,094674	-0,070626	0,106	-
11,34	999,006	999,219	999,298	999,857	999,636	998,908	999,411	999,334	0,108707	-0,109696	0,123	-
11,35	999,420	998,968	999,277	999,869	999,453	999,339	999,434	999,394	0,103422	-0,125335	0,061	-
11,36	999,529	999,365	999,129	999,817	999,309	999,429	999,362	999,420	0,12003	-0,076038	0,026	-
11,37	999,098	998,978	999,346	999,862	999,366	999,268	999,440	999,337	0,119258	-0,112422	0,083	-
11,38	999,456	999,258	998,908	999,878	999,160	998,795	999,394	999,264	0,117766	-0,117209	0,073	-
11,39	999,310	999,276	999,213	999,852	999,469	999,342	999,110	999,367	0,099893	-0,092854	0,103	-
11,4	999,403	999,164	999,083	999,773	999,535	999,312	999,551	999,403	0,107104	-0,097383	0,035	-
11,41	999,218	999,259	999,080	999,852	999,553	999,226	999,452	999,377	0,099928	-0,117011	0,026	-
11,42	999,565	999,436	999,309	999,855	999,610	998,952	998,612	999,334	0,118529	-0,101384	0,043	-
11,43	999,466	999,126	999,451	999,876	999,605	999,138	999,573	999,462	0,100403	-0,111662	0,128	-
11,44	999,415	999,015	998,934	999,871	999,559	999,163	999,440	999,343	0,118499	-0,108707	0,120	-
11,45	999,323	998,922	998,926	999,821	999,474	999,170	999,233	999,267	0,101913	-0,122295	0,076	-
11,46	999,470	999,168	999,169	999,798	999,569	999,363	999,589	999,446	0,101913	-0,1147	0,180	-
11,47	999,399	999,355	999,378	999,880	999,431	998,486	998,513	999,206	0,127728	-0,107442	0,240	-
11,48	998,759	998,513	998,127	999,871	999,513	998,615	999,296	998,956	0,17319	-0,147207	0,250	-
11,49	999,433	999,379	999,237	999,866	999,494	999,062	999,386	999,408	0,112701	-0,086311	0,452	P
11,5	999,182	999,237	999,152	999,882	999,636	999,542	999,619	999,464	0,093883	-0,107952	0,056	-
11,51	999,615	999,380	999,514	999,908	999,625	999,319	999,362	999,532	0,104066	-0,084901	0,067	-
11,52	999,644	999,332	999,301	999,904	999,552	999,185	999,519	999,491	0,127728	-0,090589	0,041	-
11,53	999,456	999,238	999,014	999,839	999,228	998,646	999,505	999,275	0,113941	-0,138998	0,216	-
11,54	999,171	998,930	999,349	999,875	999,238	999,449	999,549	999,366	0,139008	-0,100697	0,091	-
11,55	999,302	999,122	999,358	999,844	999,275	999,347	999,089	999,334	0,101913	-0,107104	0,032	-
11,56	998,896	999,288	999,119	999,846	999,468	999,029	999,193	999,263	0,093609	-0,138553	0,071	-
11,57	999,432	999,369	999,178	999,791	999,525	999,015	999,366	999,382	0,111198	-0,092854	0,119	-
11,58	999,577	999,298	999,326	999,829	999,527	999,519	999,454	999,504	0,101913	-0,070626	0,122	-
11,59	999,585	999,468	999,453	999,764	999,582	999,396	999,401	999,521	0,110329	-0,092852	0,017	-
11,6	999,408	999,269	999,324	999,769	999,471	999,592	999,596	999,490	0,113941	-0,082797	0,032	-
11,61	999,422	999,244	999,317	999,774	999,525	999,348	999,473	999,443	0,111296	-0,086595	0,047	-
11,62	999,264	999,006	999,104	999,655	999,503	999,112	999,166	999,259	0,107864	-0,103507	0,185	-
11,63	999,298	999,000	998,863	999,705	999,654	998,739	999,216	999,211	0,099648	-0,105585	0,048	-
11,64	999,369	998,856	998,884	999,808	999,427	998,124	999,103	999,081	0,138247	-0,120766	0,129	-
11,65	999,357	999,331	999,023	999,856	999,535	997,908	998,662	999,096	0,136744	-0,147603	0,015	-
11,66	999,406	998,523	999,009	999,768	998,981	994,629	996,297	998,088	0,249445	-0,143506	1,008	P
11,67	998,459	997,252	997,214	999,284	999,249	996,669	998,179	998,044	0,208132	-0,216386	0,044	-
11,68	998,878	997,410	997,282	999,791	999,520	998,425	998,883	998,598	0,188603	-0,163815	0,555	P
11,69	999,249	998,864	998,725	999,765	999,383	999,034	998,848	999,124	0,139767	-0,144942	0,526	P
11,7	999,385	998,961	999,039	999,880	999,511	998,583	999,393	999,250	0,12322	-0,116979	0,126	-
11,71	999,369	999,178	999,035	999,884	999,518	998,913	999,576	999,353	0,115501	-0,096172	0,103	-
11,72	999,298	999,330	999,037	999,816	999,570	998,942	999,154	999,307	0,115501	-0,106602	0,046	-
11,73	999,163	998,837	998,938	999,829	998,996	998,456	998,926	999,021	0,14461	-0,113452	0,286	P
11,74	999,037	999,116	998,888	999,694	998,920	997,855	997,847	998,765	0,169221	-0,16896	0,256	P
11,75	999,024	998,635	998,475	999,718	998,770	997,377	999,086	998,726	0,178819	-0,132428	0,039	-
11,76	999,056	998,070	998,182	999,773	999,113	998,449	998,547	998,741	0,157021	-0,1683	0,015	-
11,77	999,101	998,030	998,895	999,829	998,938	998,091	997,215	998,585	0,168476	-0,130599	0,156	-
11,78	999,123	998,457	998,417	999,795	999,474	998,705	998,900	998,982	0,182688	-0,12322	0,396	P
11,79	999,257	999,193	999,297	999,824	999,582	998,803	999,125	999,297	0,120214	-0,110902	0,316	P
11,8	999,424	999,456	999,489	999,795	999,411	999,207	999,337	999,446	0,112811	-0,096172	0,148	-
11,81	999,252	999,149	998,934	999,856	999,317	999,112	999,022	999,235	0,13521	-0,123805	0,211	-
11,82	999,269	999,397	998,956	999,832	999,305	998,802	999,285	999,264	0,139658	-0,105188	0,029	-
11,83	999,087	999,409	999,094	999,848	999,597	998,884	998,674	999,227	0,096911	-0,123971	0,036	-
11,84	999,194	999,261	999,012	999,867	999,445	998,897	999,146	999,260	0,107864	-0,12456	0,033	-
11,85	999,158	999,245	998,916	999,784	999,163	998,382	998,427	999,011	0,119275	-0,124493	0,250	-
11,86	998,978	999,225	999,098	999,835	999,632	999,206	999,163	999,305	0,110972	-0,113181	0,295	P
11,87	999,385	999,435	999,404	999,858	999,486	999,621	999,527	999,531	0,110972	-0,093609	0,226	-
11,88	999,305	999,369	999,409	999,841	999,493	999,090	999,519	999,432	0,114204	-0,090097	0,099	-
11,89	999,282	999,222	999,007	999,615	999,423	999,170	999,368	999,298	0,112481	-0,093166	0,134	-
11,9	999,543	999,336	998,883	999,872	999,608	999,267	999,400	999,416	0,103685	-0,095118	0,118	-
11,91	999,205	999,346	999,317	999,779	999,242	999,186	999,274	999,335	0,100697	-0,106754	0,080	-
11,92	998,983	998,670	998,410	999,553	996,265	996,499	998,752	998,162	0,26372	-0,207015	1,174	P
11,93	995,283	998,438	998,009	999,582	997,392	994,975	994,342	996,860	0,214264	-0,458933	1,302	P
11,94	998,318	997,683	996,844	999,533	998,727	996,774	995,640	997,645	0,231757	-0,260449	0,785	P
11,95	998,141	997,633	998,765	999,444	997,016	995,275	995,541	997,402	0,298282	-0,244308	0,243	-
11,96	994,195	997,293	996,895	999,731	997,216	997,877	998,768	997,425	0,286167	-0,334646	0,023	-
11,97	998,063	997,895	996,885	999,716	998,609	997,571	998,903	998,235	0,172119	-0,149152	0,809	P
11,98	999,034	998,988	998,027	999,843	998,304	998,688	999,008	998,842	0,149172	-0,277795	0,607	P
11,99	998,603	998,519	998,960	999,857	998,778	999,190	999,317	999,032	0,112811	-0,127614	0,190	-
12	998,576	998,255	998,543	999,745	999,078	997,821	999,214	998,748	0,159752	-0,166046	0,285	P
Grand Total	998,971	998,864	998,767	999,805	999,176	998,452	998,761	998,971	0,298282	-0,458933	0,223	-

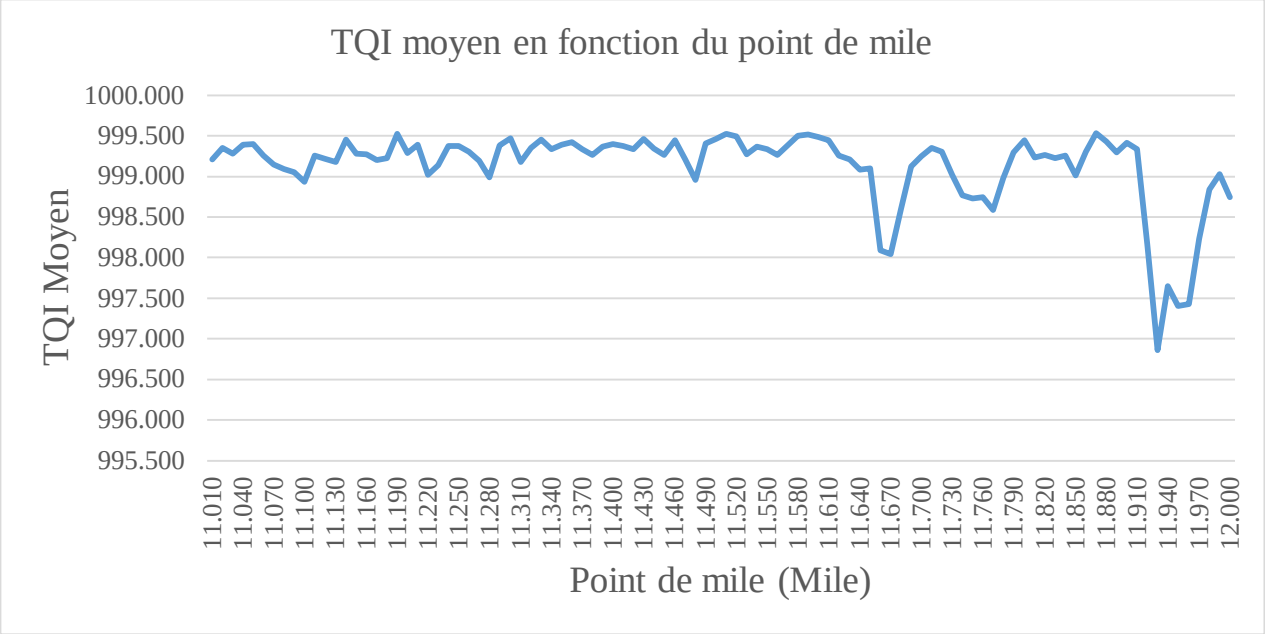

Figure A-7 : TQI Moyen entre le point de mile 11 et 12

Tableau A.8 : Valeurs minimales et maximales des accélérations (aCACLT, aCALVT aCARVT, aCBCLN, aCBCLT, aCBLVT, aCBRVT) associées aux défauts géométriques R et L PROF 62

Défaut	maximale detectée par le train d'évaluation de la voie ferrée	Point de mile sur la voie ferrée			Axes du bogie instrumenté													
					aCACLT		aCALVT		aCARVT		aCBCLN		aCBCLT		aCBLVT		aCBRVT	
		Entre le point de mile	et	Le point de mile	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale
R Prof 62	-0,79	1,614	1,624	1,633	-0,07	0,12	-0,12	0,12	-0,11	0,16	-0,06	0,04	-0,39	0,3	-0,14	0,17	-0,13	0,16
R Prof 62	0,78	3,014	3,023	3,033	-0,13	0,12	-0,13	0,14	-0,15	0,16	-0,07	0,01	-0,11	0,11	-0,14	0,19	-0,11	0,19
R Prof 62	-0,95	3,021	3,031	3,040	-0,11	0,11	-0,13	0,08	-0,19	0,16	-0,07	-0,01	-0,09	0,07	-0,12	0,1	-0,11	0,12
R Prof 62	-0,88	3,250	3,259	3,269	-0,12	0,07	-0,13	0,11	-0,13	0,14	-0,07	0,02	-0,1	0,08	-0,16	0,12	-0,12	0,11
R Prof 62	-0,82	3,272	3,282	3,291	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,18	-0,09	0,05	-0,08	0,15	-0,15	0,14	-0,14	0,12
R Prof 62	-0,83	3,280	3,289	3,298	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,18	0,02	-0,07	-0,08	0,09	-0,08	0,14	-0,11	0,12
R Prof 62	-0,83	3,281	3,290	3,300	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,18	0,02	-0,07	-0,08	0,09	-0,08	0,14	-0,11	0,12
R Prof 62	-1,03	3,283	3,292	3,302	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,18	0,02	-0,07	-0,08	0,09	-0,08	0,11	-0,11	0,12
R Prof 62	0,88	3,285	3,295	3,304	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,18	0,02	-0,07	-0,08	0,09	-0,08	0,11	-0,11	0,11
R Prof 62	0,83	3,286	3,295	3,305	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,17	0,02	-0,07	-0,08	0,09	-0,08	0,11	-0,11	0,11
R Prof 62	1,09	3,295	3,305	3,314	-0,06	0,09	-0,13	0,13	-0,13	0,17	0,06	-0,07	-0,21	0,24	-0,11	0,16	-0,08	0,13
R Prof 62	-0,87	3,860	3,870	3,879	-0,07	0,08	-0,04	0,05	-0,05	0,06	-0,01	0,04	-0,05	0,04	-0,06	0,05	-0,04	0,05
R Prof 62	-1,01	3,878	3,888	3,897	-0,06	0,06	-0,05	0,05	-0,05	0,05	0	0,06	-0,05	0,05	-0,08	0,09	-0,05	0,07
R Prof 62	1,09	3,883	3,893	3,902	-0,06	0,06	-0,05	0,05	-0,05	0,05	0,01	0,06	-0,05	0,05	-0,06	0,07	-0,04	0,06
R Prof 62	-0,85	5,723	5,733	5,742	-0,09	0,12	-0,13	0,11	-0,11	0,14	-0,06	0,05	-0,09	0,13	-0,11	0,17	-0,12	0,18
R Prof 62	-0,8	5,725	5,734	5,744	-0,09	0,12	-0,13	0,09	-0,11	0,14	-0,04	0,04	-0,09	0,07	-0,11	0,1	-0,08	0,09
R Prof 62	0,95	5,731	5,740	5,750	-0,09	0,11	-0,13	0,09	-0,11	0,14	-0,04	0,04	-0,08	0,07	-0,11	0,1	-0,07	0,09
R Prof 62	-1,14	5,742	5,751	5,761	-0,08	0,09	-0,14	0,1	-0,09	0,1	-0,04	0,03	-0,08	0,07	-0,09	0,12	-0,07	0,08
R Prof 62	-0,8	6,691	6,701	6,710	-0,06	0,07	-0,09	0,09	-0,08	0,09	-0,04	0,03	-0,08	0,08	-0,08	0,1	-0,06	0,08
R Prof 62	-0,79	6,828	6,838	6,847	-0,15	0,1	-0,09	0,11	-0,14	0,18	-0,04	0,04	-0,08	0,07	-0,08	0,08	-0,05	0,06
R Prof 62	-0,82	6,843	6,852	6,862	-0,07	0,07	-0,06	0,07	-0,14	0,18	-0,04	0,04	-0,1	0,09	-0,08	0,1	-0,04	0,06
R Prof 62	-0,79	6,848	6,857	6,866	-0,08	0,07	-0,06	0,07	-0,08	0,07	-0,04	0,04	-0,1	0,09	-0,1	0,08	-0,04	0,06
R Prof 62	1,12	7,163	7,172	7,182	-0,09	0,09	-0,12	0,14	-0,14	0,18	-0,05	0,06	-0,13	0,07	-0,13	0,18	-0,11	0,16
R Prof 62	-0,86	7,189	7,199	7,208	-0,08	0,1	-0,1	0,11	-0,11	0,13	-0,02	0,05	-0,06	0,08	-0,11	0,18	-0,13	0,11
R Prof 62	-0,97	7,207	7,216	7,226	-0,09	0,12	0,08	-0,1	-0,12	0,1	-0,03	0,05	-0,07	0,07	-0,1	0,08	-0,09	0,1
R Prof 62	-1,21	7,970	7,979	7,988	-0,12	0,09	-0,1	0,09	-0,09	0,12	-0,04	0,03	-0,08	0,09	-0,09	0,11	-0,1	0,13
R Prof 62	0,91	7,979	7,988	7,998	-0,09	0,07	-0,06	0,1	-0,1	0,12	-0,05	0,03	-0,08	0,09	0,1	-0,09	-0,1	0,09
R Prof 62	0,93	7,981	7,991	8,000	-0,06	0,07	-0,06	0,1	-0,1	0,12	-0,05	0,03	-0,12	0,21	-0,1	0,1	-0,1	0,09
R Prof 62	1,07	9,399	9,408	9,418	-0,11	0,1	-0,1	0,1	-0,14	0,11	-0,03	0,06	-0,11	0,09	-0,1	0,11	-0,07	0,11
R Prof 62	1,11	9,557	9,567	9,576	-0,08	0,11	-0,11	0,14	-0,13	0,12	-0,07	0,05	-0,11	0,09	-0,09	0,1	-0,11	0,08
R Prof 62	1,08	9,569	9,578	9,588	-0,1	0,11	-0,12	0,11	-0,11	0,11	-0,07	0,06	-0,11	0,08	-0,09	0,11	-0,09	0,1
R Prof 62	0,92	9,571	9,581	9,590	-0,13	0,11	-0,12	0,11	-0,11	0,11	-0,07	0,06	-0,09	0,08	-0,09	0,11	-0,06	0,1
R Prof 62	-0,79	9,759	9,768	9,778	-0,12	0,11	-0,12	0,13	-0,11	0,1	-0,05	0,06	-0,09	0,09	-0,09	0,12	-0,11	0,12
R Prof 62	0,79	9,766	9,775	9,784	-0,12	0,11	-0,08	0,13	-0,11	0,09	-0,05	0,05	-0,09	0,09	-0,09	0,13	-0,11	0,12
R Prof 62	0,98	9,770	9,779	9,789	-0,12	0,11	-0,12	0,13	-0,11	0,09	-0,04	0,05	-0,09	0,09	-0,09	0,13	-0,11	0,12
R Prof 62	1,2	9,773	9,782	9,791	-0,08	0,11	-0,12	0,11	-0,11	0,09	-0,03	0,05	-0,09	0,09	-0,09	0,13	-0,1	0,12
R Prof 62	1,03	9,845	9,854	9,863	-0,07	0,1	-0,09	0,09	-0,08	0,12	-0,06	0,08	-0,09	0,09	-0,12	0,13	-0,08	0,1
R Prof 62	1,11	9,856	9,866	9,875	-0,11	0,08	-0,11	0,09	-0,07	0,1	-0,06	0,08	-0,09	0,06	-0,09	0,12	-0,08	0,1
L Prof 62	1,07	1,620	1,630	1,639	-0,07	0,12	-0,09	0,12	-0,11	0,16	-0,06	0,06	-0,39	0,3	-0,14	0,17	-0,13	0,13
L Prof 62	-0,95	3,021	3,030	3,040	-0,11	0,11	-0,13	0,14	-0,19	0,16	-0,07	-0,01	-0,09	0,07	-0,12	0,1	-0,11	0,12
L Prof 62	-1,27	3,251	3,260	3,270	-0,12	0,07	-0,13	0,15	-0,13	0,14	-0,08	0,02	-0,1	0,08	-0,16	0,12	-0,12	0,11
L Prof 62	-1,25	3,252	3,261	3,270	-0,12	0,07	-0,13	0,15	-0,13	0,14	-0,08	0,02	-0,1	0,08	-0,16	0,12	-0,12	0,09
L Prof 62	1,17	3,259	3,268	3,278	-0,07	0,08	-0,13	0,11	-0,13	0,12	-0,09	0,05	-0,1	0,15	-0,16	0,12	-0,13	0,11
L Prof 62	-1,33	3,265	3,274	3,284	-0,06	0,08	-0,13	0,11	-0,12	0,1	-0,09	0,05	-0,08	0,15	-0,15	0,14	-0,14	0,12
L Prof 62	-0,84	3,266	3,276	3,285	-0,06	0,08	-0,13	0,1	-0,12	0,1	-0,09	0,05	-0,08	0,15	-0,15	0,14	-0,14	0,12
L Prof 62	1,03	3,271	3,280	3,290	-0,06	0,09	-0,16	0,16	-0,15	0,18	-0,09	0,05	-0,08	0,15	-0,15	0,14	-0,14	0,12
L Prof 62	0,88	5,425	5,434	5,444	-0,07	0,08	-0,09	0,08	-0,08	0,09	-0,04	0,03	-0,08	0,07	-0,1	0,08	-0,09	0,08
L Prof 62	1,06	5,437	5,446	5,456	-0,07	0,09	-0,09	0,09	-0,1	0,08	-0,03	0,02	-0,08	0,08	-0,1	0,08	-0,06	0,1
L Prof 62	1,07	5,603	5,612	5,622	-0,08	0,07	-0,08	0,07	-0,09	0,1	-0,03	0,04	-0,08	0,05	-0,1	0,08	-0,05	0,08
L Prof 62	-0,8	5,723	5,732	5,742	-0,09	0,12	-0,11	0,13	-0,11	0,14	0,05	-0,06	-0,09	0,13	-0,11	0,17	-0,12	0,18
L Prof 62	0,85	5,731	5,740	5,750	-0,09	0,11	-0,09	0,13	-0,11	0,14	-0,04	0,04	-0,08	0,07	-0,11	0,1	-0,07	0,09
L Prof 62	-0,95	5,742	5,752	5,761	-0,08	0,09	-0,14	0,1	-0,09	0,1	-0,04	0,03	-0,08	0,07	-0,09	0,12	-0,07	0,08
L Prof 62	-1	5,747	5,756	5,766	-0,08	0,09	-0,14	0,1	-0,09	0,1	-0,04	0,03	-0,08	0,06	-0,07	0,12	-0,07	0,08
L Prof 62	-0,78	6,643	6,652	6,662	-0,13	0,13	-0,08	0,09	-0,12	0,11	-0,04	0,03	-0,08	0,1	-0,07	0,09	-0,08	0,11
L Prof 62	-1,08	6,828	6,837	6,847	-0,15	0,1	-0,11	0,09	-0,14	0,18	-0,04	0,04	-0,08	0,07	-0,08	0,08	-0,05	0,06
L Prof 62	1,01	6,837	6,847	6,856	-0,07	0,1	-0,06	0,08	-0,08	0,1	-0,04	0,04	-0,09	0,07	-0,08	0,08	-0,05	0,06
L Prof 62	-0,93	6,843	6,853	6,862	-0,07	0,07	-0,06	0,07	-0,08	0,08	-0,04	0,04	-0,1	0,09	-0,08	0,1	-0,04	0,06
L Prof 62	-0,85	6,848	6,857	6,866	-0,08	0,07	-0,06	0,07	-0,08	0,07	-0,04	0,04	-0,1	0,09	-0,1	0,08	-0,04	0,06
L Prof 62	-0,89	6,850	6,860	6,869	-0,08	0,06	-0,06	0,07	-0,08	0,09	-0,04	0,04	-0,1	0,09	-0,1	0,08	-0,04	0,06
L Prof 62	0,77	6,856	6,866	6,875	-0,1	0,06	-0,06	0,07	-0,09	0,07	-0,04	0,04	-0,2	0,14	-0,1	0,08	-0,09	0,06
L Prof 62	0,88	7,183	7,192	7,202	-0,11	0,14	-0,1	0,17	-0,11	0,22	-0,03	0,05	-0,12	0,08	-0,11	0,14	-0,09	0,16
L Prof 62	0,78	7,201	7,210	7,220	-0,09	0,12	-0,08	0,09	-0,12	0,1	-0,03	0,05	-0,07	0,07	-0,1	0,12	-0,13	0,1
L Prof 62	-0,85	7,207	7,216	7,226	-0,09	0,12	-0,1	0,08	-0,12	0,1	-0,03	0,05	-0,07	0,07	-0,1	0,08	-0,09	0,1
L Prof 62	0,87	7,979	7,988	7,998	-0,09	0,07	-0,06	0,1	-0,12	0,1	-0,03	0,05	-0,08	0,09	-0,09	0,1	-0,1	0,09
L Prof 62	0,98	7,981	7,991	8,000	-0,06	0,07	-0,06	0,1	-0,12	0,1	-0,03	0,05	-0,12	0,21	-0,1	0,1	-0,1	0,09
L Prof 62	-1,26	7,985	7,994	8,004	-0,06	0,07	-0,08	0,1	-0,12	0,11	-0,03	0,05	-0,12	0,21	-0,12	0,1	-0,1	0,09
L Prof 62	-1,6	7,994	8,004	8,013	-0,08	0,09	-0,09	0,09	-0,09	0,11	-0,03	0,06	-0,12	0,21	-0,12	0,14	-0,12	0,12
L Prof 62	0,78	9,313	9,322	9,332	-0,08	0,08	-0,12	0,09	-0,09	0,12	-0,05	0,05	-0,07	0,08	-0,13	0,12	-0,08	0,15
L Prof 62	0,8	9,937	9,947	9,956	-0,1	0,1	-0,1	0,13	-0,14	0,15	-0,06	0,04	-0,09	0,08	-0,16	0,13	-0,09	0,1
L Prof 62	-0,93	9,943	9,952	9,962	-0,1	0,12	-0,1	0,1	-0,14	0,13	-0,06	0,04	-0,09	0,08	-0,16	0,13	-0,09	0,1