Etude du comportement dynamique des trains pendulaires et conséquences sur l'élaboration de nouvelles règles de conditions de circulation

Oriol Negrell i Vila

Andrés López Pita (UPC), Patrick Dupont (SNCF), Valérie Bodin (ENPC)

ITT

Transports

Avril 2004

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement…

Patrick DUPONT, chef de la Section Conditions de Circulation du Département Études Voie de la SNCF, et conseiller scientifique de ce projet, pour m'avoir fait confiance, pour tout le temps qu'il m'a consacré, ainsi que pour ses conseils et explications sans lesquels je n'aurais pas pu réussir ce projet ;

Andrés LÓPEZ PITA, professeur de chemins de fer à l'Université Polytechnique de Catalogne, et tuteur de ma "tesina" de fin d'études pour l'"Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports" de Barcelone, pour me transmettre son absolu soutien, il y a déjà presque deux ans, en réaliser la présente "tesina" en France et pour avoir éveiller, dans mon esprit, un grand intérêt et admiration pour le monde ferroviaire.

Valérie BODIN, professeur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et responsable pédagogique de ce projet à l'ENPC, pour avoir accepté avec enthousiasme de diriger ce projet de fin d'études et pour son soutien et ses conseils toujours intéressants ;

Toute l'équipe du département Etudes Voie de la SNCF, notamment Mireille LACOURARIE, Emmanuel LAURANS et Brice SCHMIDLIN, non seulement pour leur accueil et leur collaboration pendant ces mois de stage, mais aussi pour avoir été réceptifs à mes questions et demandes ;

Ma famille et mes amis, pour leur soutien moral et leur compréhension dans les moments difficiles pendant ces années d'étude et surtout Núria BELENGUER VICENTE pour avoir accepté de partager ensemble cette magnifique année à Paris ;

Merci a tous.

Résumé

La nécessité d'élever la qualité de l'offre en transport de voyageurs par train commença à arriver en Europe à partir des années 50 en réaction au rapide développement des infrastructures routières et la généralisation de l'avion dans les déplacements de moyenne et longue distance. Le succès, tant technique qu'économique, de la nouvelle ligne à grande vitesse Paris-Lyon entraîna une certaine euphorie autour des possibilités que la grande vitesse ouvrait au train pour récupérer les parts de marché perdues. Mais après la récession de 1993 et le succès plus mitigé des autres lignes nouvelles à grande vitesse, il est apparu nécessaire d'imaginer d'autres solutions permettant, à moindre coût, d'améliorer les performances techniques des relations ferroviaires à potentiel commercial moyen. Le souci de limiter les coûts des infrastructures, tout en permettant une exploitation des lignes à conditions égales de confort et à des vitesses plus élevées, suggère une réflexion approfondie sur les possibilités offertes par les trains à caisse inclinable dans le domaine de vitesses supérieures ou égales à 200 km/h ainsi que pour des gammes inférieures.

Cette étude est le point de départ pour l'élaboration de nouvelles règles relatives aux conditions de circulation des trains avec la technologie de la caisse inclinable qui doivent permettre leur circulation d'une façon plus performante et plus compétitive que la situation actuelle sans pénaliser l'infrastructure. Dans cette optique, cette étude aura pour objectif de définir une nouvelle méthodologie d'analyse plus adaptée à la nature de la technique pendulaire. Cette méthodologie sera fondée sur l'approfondissement de l'interaction entre la voie et le véhicule pendulaire mené à partir du comportement dynamique de différents véhicules représentatifs de cette technologie et des résultats obtenus lors de différents essais réalisés en France avec du matériel pendulaire (ETR 460, TGV Pendulaire, XTER Pendulaire).

Dans une première partie on fait une présentation à grands traits de la technique de la pendulation et de la dynamique ferroviaire, afin d'introduire le lecteur dans le domaine ferroviaire et, plus précisément, dans la technique de la caisse inclinable.

Dans une seconde partie on présente et illustre, à travers l'étude des trois véhicules choisis pour l'étude, la méthodologie qui servira de base pour définir les nouvelles règles. L'objectif final de cette étude étant l'obtention de lois expérimentales exprimant les forces exercées par le véhicule sur la voie à partir des caractéristiques du tracé de la ligne, des conditions de circulation du véhicule, ainsi que de la qualité géométrique de la voie, on a adopté deux conceptions différentes d'étude. La première consiste en une étude ponctuelle de l'interaction voie-véhicule, qui permet de connaître de façon précise les facteurs intervenants pour chaque force étudiée, et la deuxième consiste en une approche synthétique de la dynamique ferroviaire, par tronçon de voie.

La troisième partie commence avec une analyse comparative des véhicules étudiés à partir des résultats statistiques obtenus. Cette première partie comparative commence à définir ce qui ensuite est présenté comme une proposition de référentiel pendulaire en définissant les différentes conditions de circulation.

Un des apports essentiels de cette étude est d'avoir montré l'interdépendance du tracé de la ligne (rayon ou courbure), de la qualité géométrique de la voie (dressage) et des conditions de circulation (insuffisance de dévers), et la nécessité d'une meilleure prise en compte des conditions de tracé dans le référentiel, par introduction des restrictions d'insuffisance de dévers en courbes de faible rayon. Les résultats obtenus montrent que la faible charge par essieu permet de limiter la sollicitation de l'infrastructure, et une bonne répartition des efforts transversaux entre les deux essieux du bogie permet d'obtenir des conditions d'inscription favorables en courbes de faible rayon. Pour de tels trains optimisés a priori pour la pendulation, une fois la limitation liée au confort est levée par l'inclinaison de caisse, l'infrastructure pourrait donc supporter un relèvement des limites actuelles d'insuffisance de dévers.

La méthodologie utilisée permet une optimisation du véhicule pendulaire en établissant les limitations de circulation en fonction de l'agressivité du véhicule. Il serait donc intéressant d'établir des conditions de circulation pour les trains pendulaires non pas globalement mais en particularisant pour chacun d'eux.

Resum

La necessitat d'elevar la qualitat de l'oferta en transport de viatgers per tren començà a arribar a Europa a partir de la dècada dels 50 com a reacció al ràpid desenvolupament de les infrastructures viàries i la generalització de l'avió dins dels desplaçaments de mitjana i llarga distància. L'èxit, tant tècnic com econòmic, de la nova línia d'alta velocitat Paris-Lyon suscità una certa eufòria entorn de les possibilitats que l'alta velocitat obria al tren per recuperar les parts de mercat perdudes. Però després de la recessió de 1993 i l'èxit més moderat de les següents línies d'alta velocitat, comportà la necessitat d'imaginar d'altres solucions que permetessin, a menor cost, millorar les prestacions tècniques de les relacions ferroviàries amb potencial comercial mitjà. La preocupació de limitar els costos d'infrastructura, tot permetent una explotació de les línies a condicions iguals de confort i amb velocitats més elevades, suggereix una reflexió aprofundida sobre les possibilitats ofertes pels trens a caixa inclinada dins del rang de velocitats superiors o iguals a 200 km/h, així com per a ordres inferiors.

Aquest estudi és el punt de partida per a l'elaboració de noves regles relatives a les condicions de circulació dels trens amb la tecnologia de la caixa inclinable que han de permetre la seva circulació d'una manera més competitiva que la situació actual sense penalitzar la infrastructura. Dins d'aquesta òptica, aquest estudi té per objectiu definir una nova metodologia d'anàlisi més adaptada a la naturalesa de la tècnica pendular. Aquesta metodologia es fonamentarà sobre l'aprofundiment de la interacció entre la via i el vehicle pendular dirigida a partir del comportament dinàmic de diferents vehicles representatius d'aquesta tecnologia i dels resultats obtinguts al llarg de diferents assaigs realitzats a França amb material pendular (ETR 460, TGV Pendular, XTER Pendular).

En una primera part, es presenta a grans trets la tècnica de la pendulació i de la dinàmica ferroviària, a fi d'introduir el lector dins del camp ferroviari i, més precisament, dins de la tècnica de la caixa inclinable.

En una segona part, es presenta i s'il·lustra, a través de l'estudi dels tres vehicles escollits, la metodologia que servirà de base per definir les noves regles. L'objectiu final d'aquest estudi, essent l'obtenció de lleis experimentals exprimint les forces exercides pel vehicle sobre la via a partir de les característiques de traçat de la línia, de les condicions de circulació del vehicle, així com de la qualitat geomètrica de la via, s'han adoptat dues concepcions diferents d'estudi. La primera consisteix en un estudi puntual de la interacció via-vehicle, que permet conèixer d'una manera precisa els factors que intervenen per a cada força estudiada, i la segona que consisteix en un apropament sintètic de la dinàmica ferroviària, per trams de via.

La tercera part comença amb una anàlisi comparativa dels vehicles estudiats a partir dels resultats estadístics obtinguts. Aquesta primera part comparativa comença a definir el que a continuació és presentat com una proposta de normativa pendular, definint les diferents regles de condicions de circulació.

Una de les aportacions essencials d'aquest estudi és haver mostrat la interdependència del traçat de la línia (radi o curvatura), de la qualitat geomètrica de la via (alineació) i de les condicions de circulació (insuficiència de peralt), i la necessitat d'una millor presa en compte de les condicions de traçat dins de la normativa, introduint restriccions d'insuficiència de peralt en corbes de radi feble. Els resultats obtinguts mostren que una feble càrrega per eix permet limitar la sol·licitació de la infrastructura, i un bon repartiment dels esforços transversals entre els dos eixos del bogie permet obtenir condicions d'inscripció favorables en corbes de radi feble. Per a aquells trens optimitzats a priori per a la pendulació, un cop la limitació lligada al confort del viatge és elevada per la inclinació de la caixa, la infrastructura podria suportar, doncs, una elevació dels límits actuals d'insuficiència de peralt.

La metodologia utilitzada permet una optimització del vehicle pendular en establir les limitacions de circulació en funció de l'agressivitat del vehicle. Seria, doncs, interessant establir les condicions de circulació per als trens pendulars no pas globalment sinó particularitzant per a cadascun d'ells.

Abstract

The necessity of improving quality in the passenger transport offer by train arise in Europe in the 50's as a reaction to the rapid development of road infrastructures and the generalization of the aeroplane in middle and long distance displacements. The not only technical but also economical success of the new high speed line Paris-Lyon involved a certain euphoria around the possibilities that high speed trains could open in order to recover the other time's rates of market. But after the recession of 1993, and the rather modest success of other new high speed lines, it appeared to be necessary to imagine new solutions that could improve with lower cost the technical matters of those railway connections with a middle commercial potential. The concern of limiting the cost of the infrastructures, while allowing an exploitation of the lines in equal conditions of comfort and higher speeds, suggests to think carefully of the possibilities offered by the tilting trains for speeds higher, equal or lower than 200 km/h.

This study is the starting point for the development of new rules relating to the circulation conditions of trains with tilting carbody technology which must allow their circulation in a way more competitive than the current situation without penalizing the infrastructure. According to this idea, this study will aim to define a new methodology of analysis more adapted to the nature of the tilting technique. This methodology will be founded on going deeply into the interaction between the rail track and the tilting vehicle carried out starting from the of various representative vehicles of this technology and the results obtained in several tests carried out in France with tilting trains (ETR 460, Tilting TGV, XTER Tilting Train).

The first part is a general foreword of tilting technique and railway dynamics to introduce the reader into the railway field and, more precisely, into the tilting carbody technique.

In a second part it will be presented and illustrated the methodology used as a basis to define the new rules from the examination of the three vehicles chosen for the study. The final goal of this study is to obtain experimental laws expressing the forces exerted by the vehicle on the rail track starting from the characteristics of the layout of the line, of the conditions of traffic, as well as of geometrical quality of the rail track. Two different study branches will be adopted. The first one consists of a specific study related to the interaction railway-vehicle, which allows to know in a precise way the intervening factors for each studied force. The second one consists of a synthetic approach of railway dynamics, section per section of the rail track.

The third part set off with a comparative analysis of the considered vehicles from the obtained statistical results. This first comparative part begins to define what will be next presented as a proposal for a tilting reference frame by defining the different circulation conditions.

One of the essential contributions of this study is to have shown the interdependence of the layout of the line (radius or curvature), the geometrical quality of the rail track (alignment), the circulation conditions (cant deficiency), and the convenience of including the conditions of layout in the reference norm, by the introduction of restrictions of cant deficiency in short radius curve. The results obtained show that a weak weight per axle allows to limit the request of the infrastructure, and that a good distribution of the transverse efforts between the two axles of the bogie permits to obtain favourable conditions of inscription in short radius curves. For such trains optimized a priori for the tilting technique, once the limitation related to comfort is raised by the slope of the case, the infrastructure could support an elevation of the current limits of cant deficiency.

Methodology used allows an optimization of the tilting vehicle by establishing the limitations of circulation according to the aggressiveness of the vehicle. It would be therefore interesting to establish circulation conditions not in general for tilting trains but particularizing for each one of them.

Table des Matières

REMERCIEMENTS ..... **iii**

RESUME ..... **iv**

RESUM ..... **vi**

ABSTRACT ..... **vii**

1 INTRODUCTION **1**

1.1 LA PENDULATION COMME COMPLEMENT DE LA GRANDE VITESSE 1

1.2 QUELQUES REFERENCES HISTORIQUES 2

1.3 OBJECTIF DE LA PRESENTE ETUDE 3

1.4 A PROPOS DE CE DOCUMENT 4

2 PRINCIPES ET OBJECTIFS DE LA PENDULATION **5**

2.1 LE CONFORT DES VOYAGEURS 5

2.2 LA RESISTANCE TRANSVERSALE DE LA VOIE 7

2.3 LE RISQUE DE DERAILLEMENT DU VEHICULE 7

2.4 LA PENDULATION 8

3 DYNAMIQUE FERROVIAIRE **10**

3.1 SYSTEME DES FORCES D'INTERACTION ROUE-RAIL 10

3.2 FORCES RETENUES POUR L'HOMOLOGATION. CODE UIC 518 11

3.2.1 Sécurité *11*

3.2.2 Fatigue de la voie *12*

4 ETUDE STATISTIQUE DES EFFORTS **13**

4.1 OBTENTION DES DONNEES 14

4.2 PARAMETRES CONSIDERES DANS L'ETUDE 16
4.3 ANALYSE STATISTIQUE 17

5 ETR 460 21

5.1 CARACTERISTIQUES DU MATERIEL 21
5.2 DONNEES UTILISEES POUR L'ETUDE 21
5.3 LOIS DU COMPORTEMENT DU VEHICULE 24
5.3.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$) 24
5.3.2 Forces verticales maximales sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) 26
5.3.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) 28
5.3.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) 30
5.3.5 Forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$) 31
5.3.6 Somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$) 32
5.4 ETUDES EN CONSIDERANT L'ETAT DU RAIL 33
5.4.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$) 33
5.4.2 Forces verticales maximales ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) 33
5.4.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) 33
5.4.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) 34
5.4.5 Forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$) 34
5.4.6 Somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$) 34

6 TGV P01 38

6.1 CARACTERISTIQUES DU MATERIEL 38
6.2 DONNEES UTILISEES POUR L'ETUDE 39
6.3 LOIS DU COMPORTEMENT DU VEHICULE 41
6.3.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$) 41
6.3.2 Forces verticales maximales sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) 43
6.3.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) 45
6.3.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) 47

7 DEMONSTRATEUR X-TER PENDULAIRE 50

7.1 CARACTERISTIQUES DU MATERIEL 50
7.2 DONNEES UTILISEES POUR L'ETUDE 50
7.3 LOIS DU COMPORTEMENT DU VEHICULE 52
7.3.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$) 52
7.3.2 Forces verticales maximales sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) 54
7.3.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) 56

7.3.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) ... 58
7.3.5 Forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$) ... 60
7.3.6 Somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$) ... 61

8 COMPARAISON ENTRE VEHICULES ... 62

8.1 SOLLICITATIONS EN DIRECTION VERTICALE ... 62
8.2 SOLLICITATIONS EN DIRECTION TRANSVERSALE ... 66

9 CONSEQUENCES SUR LES CONDITIONS DE CIRCULATION ... 73

9.1 RAPPEL DES REGLES ACTUELLES DE LA SNCF ... 73
9.2 PRINCIPES DES NOUVELLES REGLES ENVISAGEES ... 76
9.3 REGLES DE CIRCULATION POUR L'ETR 460 ... 78
9.3.1 Limitations liées à la fatigue de la voie ... 79
9.3.2 Limitations liées à la sécurité ... 81
9.3.3 Règles synthétiques de circulation de l'ETR 460 ... 84
9.4 REGLES DE CIRCULATION POUR LE TGV P01 ... 85
9.4.1 Limitations liées à la fatigue de la voie ... 86
9.4.2 Limitations liées à la sécurité ... 87
9.4.3 Règles synthétiques de circulation du TGV P01 ... 89
9.5 REGLES DE CIRCULATION POUR LE X-TER PENDULAIRE ... 91
9.5.1 Limitations liées à la fatigue de la voie ... 91
9.5.2 Limitations liées à la sécurité ... 93
9.5.3 Règles synthétiques de circulation du X-TER Pendulaire ... 95

10 CONCLUSIONS ... 97

BIBLIOGRAPHIE ... 100

TABLE DES ILLUSTRATIONS ... 104

ANNEXES ... 110

A VEHICULES OBJETS DE LA PRESENTE ETUDE ... 111
B RESUME DES DONNEES UTILISEES POUR LA PRESENTE ETUDE ... 114
B.1 Tableau des données disponibles pour l'ETR 460. ... 115
B.2 Valeurs caractéristiques des conditions tracé et circulation des marches retenues pour l'ETR 460. 116
B.3 Valeurs caractéristiques de la qualité géométrique de la voie pour les marches retenues pour l'ETR 460. MAUZIN. ... 117

B.4 Valeurs caractéristiques de la qualité géométrique de la voie pour les marches retenues pour l'ETR 460. STS..... 118

B.5 Valeurs moyennes des efforts obtenus des bandes d'essais des marches retenues pour l'ETR 460. 119

B.6 Tableau des données disponibles pour le TGV P01..... 120

B.7 Valeurs caractéristiques des conditions tracé et circulation des marches retenues pour le TGV P01. 121

B.8 Valeurs moyennes des efforts obtenus du rapport d'essai des marches retenues pour le TGV P01.122

B.9 Valeurs caractéristiques de la qualité géométrique de la voie pour les marches retenues pour le TGV P01. STS. 123

B.10 Tableau des données disponibles pour le X-TER Pendulaire. 124

B.11 Valeurs caractéristiques des conditions tracé, circulation et qualité géométrique STS des marches retenues pour le X-TER Pendulaire..... 125

B.12 Valeurs moyennes des efforts obtenus des bandes d'essais des marches retenues pour le X-TER Pendulaire. 126

C COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS EN PRENANT SOIT LE RAYON SOIT LA COURBURE COMME PARAMETRE D'ENTREE POUR L'ETR 460..... 127

C.1 Meilleures régressions obtenues pour l'estimation de $(\Sigma Y_1)_{max}$ pour différentes marches en prenant le rayon ou la courbure. 128

C.2 Meilleures régressions obtenues pour l'estimation de $(\Sigma Y_2)_{max}$ pour différentes marches en prenant le rayon ou la courbure. 129

C.3 Meilleures régressions obtenues pour l'estimation de $(Q_{1_ext})_{qst}$ pour différentes marches en prenant le rayon ou la courbure. 130

D CORRELATIONS DES DONNEES D'ENTREE POUR L'ETR 460..... 131

E PROCESSUS D'ANALYSE STATISTIQUE D'UNE MARCHE (EXEMPLE)..... 136

E.1 Analyse statistique de l'effort $(Q_{2_ext})_{max}$ de l'ETR 460 à partir des données des marches 20+99+100 137

1 Introduction

1.1 La pendulation comme complément de la grande vitesse

La nécessité d'élever la qualité de l'offre en transport de voyageurs par train commença à arriver en Europe à partir des années 50 en réaction au rapide développement des infrastructures routières et la généralisation de l'avion dans les déplacements de moyenne et longue distance.

Le succès, tant technique qu'économique, de la nouvelle ligne Paris-Lyon ouverte en totalité en 1983 entraîna une certaine euphorie autour des possibilités que la grande vitesse ouvrait au train pour récupérer les parts de marché perdues, euphorie traduite par le schéma directeur de 1991. Mais après la récession de 1993 et le succès plus mitigé des autres lignes nouvelles à grande vitesse, il est apparu nécessaire d'imaginer d'autres solutions permettant, à moindre coût, d'améliorer les performances techniques des relations ferroviaires à potentiel commercial moyen.

Le souci de limiter les coûts des infrastructures, tout en permettant une exploitation des lignes à conditions égales de confort et à des vitesses plus élevées, suggère une réflexion approfondie sur les possibilités offertes par les trains à caisse inclinable dans le domaine de vitesses supérieures ou égales à 200 km/h ainsi que pour des gammes inférieures. Cela est particulièrement vrai quand les prévisions de trafic et la capacité des lignes existantes ne justifient pas la construction de lignes complètement nouvelles, mais conseillent plutôt quelques interventions sur les lignes existantes. On imagine donc l'utilisation de trains à caisse inclinable plutôt comme un complément aux trains a grande vitesse que comme une alternative.

Il apparaît par conséquent comme primordial d'explorer les possibilités technologiques et l'intérêt économique des trains à caisse inclinable et d'en promouvoir l'utilisation et le développement dans leur domaine de pertinence. Et c'est dans cet intérêt primordial d'explorer les possibilités de la technologie de la caisse inclinable que ce projet trouve sa raison d'être.

1.2 Quelques références historiques

Pendant plus de cent ans, les possibilités d'élever la vitesse de circulation en courbe dans les tracés ferroviaires ont été limitées à l'optimisation du dévers, là où la coexistence de trains rapides et de trains lents pénalisait les prestations des premiers.

Les réflexions, ainsi que les expérimentations sur l'application de la technique pendulaire comme instrument apte à réduire les nuisances liées à l'accélération non compensée et donc à permettre une augmentation des vitesses en courbe, datent de la fin des années 40.

C'est en 1957 que la SNCF a construit un véhicule dont l'inclinaison pouvait atteindre les 18° avec une forme ovoïdale pour maintenir le gabarit même lors de la pendulation.

A l'occasion du Salon International des Transports de 1965 à Munich la Deutsche Bundesbahn (DB) a équipé une rame automotrice diesel de la série 624 de suspensions pneumatiques avec système pendulaire. L'inclinaison était assurée au moyen d'un transfert par pompage de l'air du soufflet situé à l'intérieur de la courbe vers le soufflet situé à l'extérieur. Le pilotage était effectué par un appareil combinant un gyroscope et un balancier.

A la fin des années 1960 les FS, en collaboration avec FIAT, ont équipé une automotrice d'un système qui permettait l'inclinaison en courbe d'un fauteuil isolé au lieu de la caisse. Ces essais ont mené à la construction d'un prototype d'automotrice à caisse pendulaire le Y 0160 qui est l'ancêtre du Pendolino. Il était conçu pour atteindre une vitesse maximale de 250 km/h et être susceptible de s'incliner en courbes jusqu'à 10°. Les essais réalisés ont mis en évidence que, par exemple, pour une courbe de rayon 800 m, le train pendulaire pourrait circuler au-dessus de 180 km/h quand les véhicules conventionnels ne dépassaient pas 140 km/h. De plus, les sollicitations transversales, même pour des accélérations non compensées de 2 m/s^2, restaient loin des limites de résistance transversale de la voie [1].

En Grande Bretagne les BR ont construit, après de longues études théoriques, un véhicule à inclinaison active, l'APT-E (Advanced Passenger Train-Experimental) qui fut livré en 1972. Ont suivi trois prototypes APT-P dont l'utilisation commerciale fut en définitive abandonnée.

En Suède les premières expérimentations d'un système à inclinaison active de la caisse se sont développées à travers une collaboration entre SJ et ASEA, à partir de 1970, et ont conduit à la réalisation d'une rame prototype X15 en 1973. Elle sera le prédécesseur de l'X 2000, qui assure la liaison entre Stockholm et Göteborg inaugurée en 1990.

C'est en 1974 que le premier prototype de Talgo Pendular est testé en Espagne. Après plusieurs années de développement il est mis en service commercial en 1980. Il s'agit d'un véhicule Talgo doté de pendulation naturelle, permettant jusqu'à 4° d'inclinaison, et c'est le seul système avec caisse inclinable exploité d'une façon ininterrompue pendant plus de vingt ans.

Mais c'est dans les années 1980-90 qu'ont lieu les développements les plus spectaculaires de la technologie de la caisse inclinable.

En Italie, le prototype du Pendolino, l'ETR 401, a été commandé en 1974. Les rames ETR 450 entrent en service commercial en 1988 sur la ligne Rome-Milan. Des séries successives de ETR 460, destinées à des relations internes italiennes, et de ETR 470, utilisées dans le service Cisalpino entre la Suisse et l'Italie à travers les Alpes, entrent en service entre 1995 et 1997.

En Allemagne, la DB a mis le matériel VT 610 en service en 1993, et à partir de 1994, roule en Allemagne le Talgo Pendular, assurant les services IC-Night.

En Amérique, à partir de 1994, des rames Talgo Pendular assurent les services de jour sur les relations Seattle-Portland et Seattle-Vancouver.

C'est en 1996 que la SNCF annonce la construction d'un prototype de TGV Pendulaire, le TGV-P, avec l'idée de combiner les avantages des deux techniques et d'orienter les décisions d'investissement dans les chemins de fer.

La technique de la caisse inclinable est donc toujours une technologie d'actualité dans tous les réseaux européens [2]. En effet, de plus en plus de pays l'adoptent pour les liaisons ferroviaires sur lignes conventionnelles aménagées, permettant une plus grande compétitivité du train tout en évitant des investissements importants non justifiables du point de vue de la rentabilité.

1.3 Objectif de la présente étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre plus étendu d'une commande passée par Réseau Ferré de France à la Direction de l'Ingénierie de la SNCF et visant à définir les conditions de circulation du matériel pendulaire sur les lignes classiques du Réseau Ferré National. Cette étude est le point de départ pour la rédaction d'un nouveau référentiel pendulaire qui doit permettre la circulation des trains avec la technologie de la caisse inclinable d'une façon plus performante et plus compétitive que la situation actuelle sans pénaliser l'infrastructure. C'est par conséquent dans cette optique que sera mené notre travail.

Cette étude a pour objectif de poser les jalons de ce nouveau référentiel, en définissant une nouvelle méthodologie d'analyse plus adaptée à la nature de la technique pendulaire. Cette méthodologie sera fondée sur l'approfondissement de l'interaction entre la voie et le véhicule pendulaire mené à partir du comportement dynamique de différents véhicules représentatifs de cette technologie.

1.4 A propos de ce document

Ce document est divisé en trois parties distinctes.

Dans une première partie on fait une présentation à grands traits de la technique de la pendulation et de la dynamique ferroviaire, afin d'introduire le lecteur dans le domaine ferroviaire et, plus précisément, dans la technique de la caisse inclinable.

Dans une seconde partie on présente et illustre, à travers l'étude des trois véhicules choisis pour l'étude, la méthodologie qui servira de base pour définir le nouveau référentiel.

La troisième partie commence avec une analyse comparative des véhicules étudiés à partir des résultats statistiques obtenus. Cette première partie comparative commence à définir ce qui ensuite est présenté comme une proposition de référentiel pendulaire en définissant les différentes conditions de circulation.

Enfin, le lecteur trouvera en annexe les données répertoriées utilisées, ainsi que tout un suivi de calculs complémentaires à l'étude statistique qu'on a cru opportun d'inclure.

2 Principes et objectifs de la pendulation

En circulation ferroviaire, les limitations de vitesse sont déterminées par la circulation en courbe du véhicule. Les principaux aspects qui doivent être pris en compte dans la limitation de la vitesse en courbe sont :

- le confort des voyageurs,
- la résistance transversale de la voie,
- le risque de déraillement du véhicule.

2.1 Le confort des voyageurs

Le confort des voyageurs est, en général, la limite la plus basse et conditionne souvent la vitesse limite des trains. Durant la circulation en courbe d'un véhicule, l'accélération transversale non compensée dans le plan de la voie est donnée par l'expression :

$$\gamma_{NC} = \frac{V^2}{R} - \frac{D}{E} g \qquad [1]$$

Avec :

γ_{NC} = accélération transversale non compensée

V = vitesse de circulation du véhicule

R = rayon de la courbe

D = dévers existant

E = distance entre les cercles de roulement des roues d'un essieu

g = accélération de la gravité

Pour annuler l'accélération non compensée, le dévers de la voie devrait être :

$$D = \frac{V^2 E}{R\, g} \qquad [2]$$

Par exemple, pour une courbe de rayon 300 m on aurait besoin d'un dévers supérieur à 300 mm pour une vitesse de circulation de 100 km/h [3]. Etant donné que l'expérience déconseille de poser la voie avec un dévers supérieur à 160 mm, une partie de l'accélération centrifuge ne sera pas compensée. La différence entre le dévers nécessaire pour annuler les effets de la force centrifuge et le dévers existant en voie est appelée insuffisance de dévers :

$$I = \frac{V^2 E}{R\,g} - D \qquad [3]$$

Et le voyageur perçoit une accélération transversale non compensée :

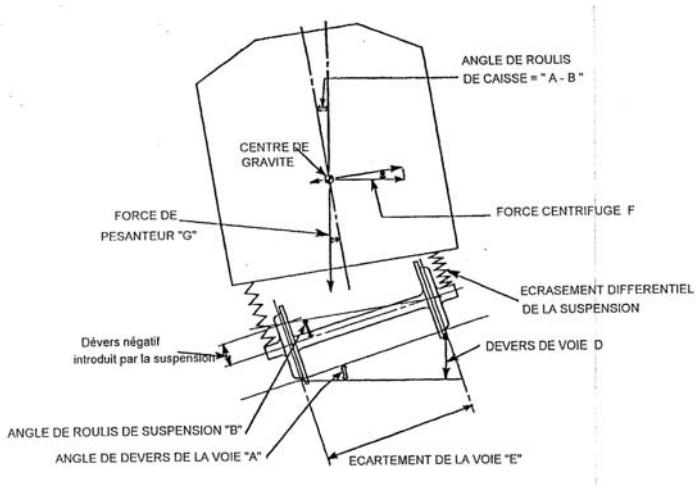
$$\gamma_T = (1+s)\frac{I}{E} \qquad [4]$$

où :

- I est l'insuffisance de dévers
- γ_T est l'accélération centrifuge ressentie par le voyageur
- s est le coefficient de souplesse de la suspension, c'est à dire la diminution relative de l'angle de roulis de caisse due à l'affaissement différentiel de la suspension

Pour l'instant, on a considéré exclusivement l'action de la force centrifuge. Mais l'accélération totale ressentie par le voyageur n'est pas seulement due à l'accélération transversale permanente supportée en caisse par les voyageurs, mais aussi aux variations de celle-ci dans les raccordements de courbes, et aux variations aléatoires dues aux défauts de géométrie de la voie. D'où le fait que pour accepter des valeurs élevées de l'insuffisance de dévers il faille assurer une bonne qualité géométrique de la voie.

Figure 2-1 : Comportement de la suspension d'un véhicule en courbe



Source : SNCF [4]

2.2 La résistance transversale de la voie

Durant la circulation, le matériel ferroviaire exerce des efforts transversaux qui ne doivent pas dépasser la capacité résistante de la voie. Cette limite de résistance transversale de la voie s'exprime par la limite dite de Prud'homme,

$$H_{\lim} = 10 + \frac{P_0}{3} \quad [5]$$

P_0 étant la charge statique de l'essieu (en kN)

où $H_{\lim}$ est la limite d'effort transversal que peut exercer un essieu sur la voie sans ripage, et P_0 (en kN) est la charge statique par essieu. Cette formule de Prud'homme est la limite applicable à une voie en traverses bois, rail U33 et immédiatement après une opération de bourrage. Cette limite de résistance latérale varie non seulement avec l'état de stabilisation de la voie, qui peut atteindre à peu près 1,9 fois la résistance restant après le bourrage après avoir attendu 300000 tonnes de trafic, mais aussi avec le type de voie, et en particulier avec le type de traverse [5].

Les efforts transversaux exercés par un essieu dans la voie viennent de l'insuffisance de dévers qui participe au travers d'un effort quasi-statique, des défauts de géométrie de la voie et des mouvements d'instabilité. Les défauts de géométrie créent des accélérations transversales des différents éléments du véhicule (essieux, bogie, caisse) qui forment une composante aléatoire de ces efforts au travers des systèmes de suspension et du contact roue-rail. Ces liaisons se raidissent en fonction de l'insuffisance de dévers, ce qui explique que cette part aléatoire des efforts soit une fonction croissante de la vitesse et de l'insuffisance de dévers, et décroissante de la qualité géométrique de la voie.

D'autre part, les mouvements d'instabilité, c'est à dire les mouvements transversaux autogénérés par l'énergie d'avancement, entraînent en général des accélérations transversales de bogie très élevées, qui ne sont pas supportables par la voie. La conception des bogies et de leurs liaisons avec la caisse (amortisseurs anti-lacet) protège de ces effets.

2.3 Le risque de déraillement du véhicule

Lorsqu'un essieu directeur (essieu assurant le guidage latéral, en contact avec le rail extérieur) rencontre un défaut de géométrie important, la roue guidante extérieure exerce un effort latéral de roue important pour le ramener sur sa trajectoire normale ; si cet effort latéral Y à la roue guidante dépasse une valeur fonction de la charge verticale Q de cette roue, cette dernière peut monter sur le

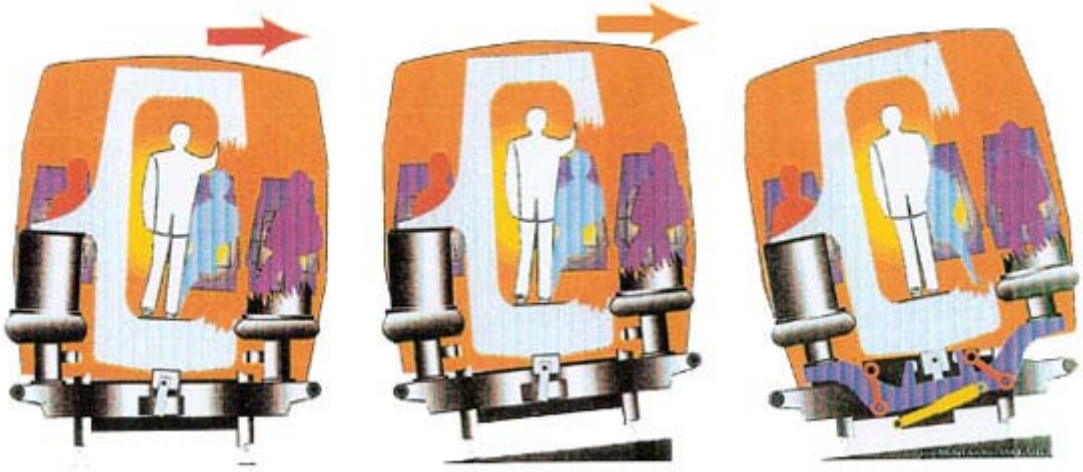
rail, ce qui entraîne le déraillement. On constate donc que le déraillement est en général postérieur à la création d'un défaut de géométrie de voie, et donc à la limite de ripage.

2.4 La pendulation

En général, il existe une marge importante entre la limite de confort, directement liée à l'insuffisance de dévers, et la limite de ripage. C'est à dire que le critère de résistance transversale de la voie permettrait d'adopter des valeurs de l'insuffisance de dévers notablement plus élevées que la valeur exigée par la condition de confort. Penduler, ou compenser l'insuffisance de dévers, a pour objectif d'exploiter cette gamme de vitesses de circulation, où le système est limité par le confort du voyageur pour des insuffisances de dévers élevées, mais où les limites de ripage ne sont pas encore atteintes.

Sur un véhicule pendulaire on cherche à limiter la force centrifuge à laquelle le voyageur est soumis, en inclinant la caisse du coté intérieur à la courbe. C'est à dire, on cherche que la caisse inclinable agisse en générant un dévers supplémentaire qui améliore le confort du voyageur.

Figure 2-2 : L'insuffisance de dévers et la pendulation



Sous l'influence de la force centrifuge, les voyageurs sont tirés vers l'extérieur de la courbe ce qui diminue leur confort

A vitesse élevée et malgré le dévers de la voie, les voyageurs sont encore tirés vers l'extérieur de la courbe, c'est la notion d'insuffisance de dévers

Avec le même dévers initial, la technique du pendulaire permet d'augmenter la vitesse, les voyageurs sont plus confortablement assis

Source : SNCF

L'inclinaison de caisse peut être obtenue par pendulation naturelle (cas du TALGO) : la caisse est susceptible d'osciller en roulis autour d'un axe placé assez haut dans le véhicule, ce qui entraîne une

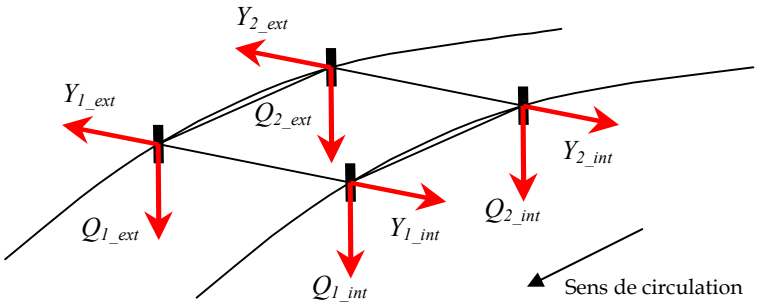
inclinaison de roulis dans le bon sens (intérieur de courbe) sous l'effet des accélérations transversales, au contraire des véhicules normaux. Cependant, dans la plupart des cas, la pendulation est obtenue au moyen de vérins placés en série avec le système de suspension primaire ou secondaire. Dans ce cas le constructeur a le choix de la hauteur du centre de rotation de la caisse, qui conditionne d'une certaine façon un déplacement transversal de caisse en courbe mais aussi parce qu'il permet une gestion limitée de la répartition des efforts entre les deux essieux d'un bogie.

3 Dynamique ferroviaire.

3.1 Système des forces d'interaction roue-rail

L'interaction roue-rail est étudiée dans le plan transversal de la voie et dans la direction verticale. En dynamique ferroviaire on représente pour chaque roue du bogie la force ponctuelle verticale et la force ponctuelle transversale dirigée vers l'extérieur de la voie. En courbe, le système des forces est décrit par le dessin ci-dessous :

Figure 3-1 : Système des forces



Source : SNCF [6]

Avec :

Y_{1_ext} = effort transversal exercé par la roue extérieure du premier essieu

Y_{1_int} = effort transversal exercé par la roue intérieure du premier essieu

Y_{2_ext} = effort transversal exercé par la roue extérieure du deuxième essieu

Y_{2_int} = effort transversal exercé par la roue intérieure du deuxième essieu

Q_{1_ext} = effort vertical exercé par la roue extérieure du premier essieu

Q_{1_int} = effort vertical exercé par la roue intérieure du premier essieu

Q_{2_ext} = effort vertical exercé par la roue extérieure du deuxième essieu

Q_{2_int} = effort vertical exercé par la roue intérieure du deuxième essieu

3.2 Forces retenues pour l'homologation. Code UIC 518

La fiche UIC 518 [7] a pour objet de donner des prescriptions relatives à la réalisation des essais des véhicules ferroviaires du point de vue du comportement dynamique : sécurité, fatigue de la voie et qualité de marche et à l'analyse des résultats en vue de l'homologation des véhicules ferroviaires. Les limites imposées par la voie sont de deux natures : celles qui concernent la sécurité des circulations (ripage de voie et déraillement) et celles qui concernent la fatigue ou l'usure de la voie.

3.2.1 Sécurité

Du point de vue de la sécurité, la fiche UIC 518 retient :

- **Somme des forces de guidage :**

La somme des forces de guidage est donnée par la valeur maximale de la somme des efforts transversaux des roues de chaque essieu du bogie ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$). C'est à dire, en suivant les notations du système des forces :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = (Y_{1_ext} - Y_{1_int})_{max} \quad [6]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = (Y_{2_ext} - Y_{2_int})_{max} \quad [7]$$

La somme des forces de guidage représente donc les efforts transversaux exercés par les essieux sur la voie, et qui affectent donc la stabilité transversale de la voie. La résistance transversale d'une voie classique résulte essentiellement du frottement des traverses sur le ballast. Elle augmente donc avec la charge verticale appliquée. Cette loi se traduit par une formule très simple qui donne, en fonction de la charge P de l'essieu, la valeur limite $H_{\lim}$ de la force transversale admissible pour une voie non stabilisée :

$$H_{\lim} = 10 + \frac{P_0}{3} \quad [8]$$

P_0 étant la charge statique de l'essieu (en kN)

- **Quotient $\left(Y_1 / Q_1\right)_{ext}$:**

Ce quotient est une mesure du risque de déraillement par montée de roue sur le rail. Lors des essais en ligne, on considère que la sécurité est assurée tant que le rapport Y/Q à la roue guidante (roue extérieure du premier essieu du bogie) ne dépasse pas 0,8.

Les véhicules pendulaires ne présentent pas de criticité particulière vis-à-vis de ce critère, qui d'autre part n'est pas une limite propre à l'infrastructure [3]. C'est pourquoi ce paramètre n'est pas étudié ici.

3.2.2 Fatigue de la voie

Du point de vue de la fatigue de la voie, la fiche UIC 518 retient les sollicitations verticales et transversales les plus restrictives:

- **Sollicitations verticales :**

La dégradation de la superstructure de voie est à peu près proportionnelle au cube de la charge instantanée de roue Q. Les sollicitations verticales de la voie ont une influence directe sur les rails de la voie. Afin de limiter ces sollicitations, la fiche UIC 518 indique les limites suivantes :

La valeur limite de la force verticale maximale, Q_{lim} :

$Q_{lim} = 90 + Q_0$; où Q_{lim} et Q_0 sont exprimés en kN, Q_0 étant la charge statique par roue.

La valeur limite de la force verticale quasi-statique en courbe, $(Q_{qst})_{lim}$

$(Q_{qst})_{lim}$ = 145 kN dans les courbes de faible rayon en excluant les raccordements.

Selon les notations du système des forces, les efforts retenus sont donc :

- les efforts verticaux maximaux de la roue extérieure du premier essieu du bogie ($(Q_{1_ext})_{max}$) et de la roue extérieure du deuxième essieu du bogie ($(Q_{2_ext})_{max}$)
- les efforts verticaux quasi-statiques de la roue extérieure du premier essieu du bogie ($(Q_{1_ext})_{qst}$) et de la roue extérieure du deuxième essieu du bogie ($(Q_{2_ext})_{qst}$)

- **Sollicitations transversales :**

Les sollicitations transversales affectent notamment les attaches et les rails de la voie. La limitation indiquée par la fiche UIC 518 concerne les forces transversales quasi-statiques en courbes de faible rayon en excluant les raccordements.

$$(Y_{qst})_{lim} = 60 \text{ kN}$$

Les valeurs maximales de ces forces transversales sont exercées par la roue extérieure dans la courbe. On retiendra donc les valeurs des efforts transversaux quasi-statiques des roues extérieures du premier et du deuxième essieu ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$)

4 Etude statistique des efforts

L'étude statistique se fonde sur des résultats obtenus lors de différents essais réalisés en France avec du matériel pendulaire. Malgré l'existence de données de différents types de véhicules, on a considéré que les rames les plus représentatives étaient l'ETR 460, le TGV P01 et X-TER Pendulaire. Les raisons qui nous ont poussés à considérer ces trois véhicules comme les plus indiqués pour l'étude sont les nombreuses données disponibles, bien souvent issues d'essais sur les mêmes lignes, et la conception très différente de ces rames. En effet, l'ETR 460 est un matériel de conception pendulaire et de caractéristiques optimisées pour cette finalité, tandis que le TGV P01 et le X-TER Pendulaire sont des adaptations à la pendulation de matériels représentatifs du parc SNCF.

Les essais qui ont été pris en compte sont ceux réalisés de février à mai 1997 avec l'ETR 460 pour son homologation en France [8], les essais réalisés depuis septembre 1998 jusqu'à octobre 1999 pour l'homologation du démonstrateur TGV pendulaire [9] et entre octobre 1999 et février 2000 pour le X-TER Pendulaire [10]. Dans les deux premiers cas les essais ont été faits sur la ligne Paris-Toulouse et sur les lignes de la région de Chambéry et pour le cas du X-TER Pendulaire, sur les lignes Clermont Ferrand–Issoire, Marseille–Toulon et Rennes–Montreuil sur Ille. Dans les trois cas en suivant la fiche UIC 518 pour l'homologation de véhicules ferroviaires du point de vue du comportement dynamique.

L'objectif final de cette étude étant l'obtention de lois expérimentales exprimant les forces exercées par le véhicule sur la voie à partir des caractéristiques du tracé de la ligne, des conditions de circulation du véhicule, ainsi que de la qualité géométrique de la voie, on a adopté deux conceptions différentes d'étude. La première consiste en une étude ponctuelle de l'interaction voie-véhicule et la deuxième consiste en une approche synthétique de la dynamique ferroviaire, par tronçon de voie.

L'étude ponctuelle consiste à mettre en relation les forces exercées par le véhicule en un point déterminé de la voie avec la qualité géométrique de la voie en ce point, définie par l'amplitude des défauts ponctuels. Cette approche permet de connaître de façon précise les facteurs intervenants pour chaque force étudiée. Cependant, les données nécessaires sont souvent indisponibles ou difficiles à manipuler.

Aussi a-t-on considéré intéressant de compléter l'information par une étude synthétique, en mettant en relation les forces avec les caractéristiques synthétiques de la qualité géométrique de la voie.

Ces paramètres synthétiques de qualité géométrique de la voie ou STS (Système de Traitement Synthétique) [11] sont les données utilisées normalement dans le domaine ferroviaire pour caractériser la qualité de la voie ou planifier sa maintenance, et sont donc des données facilement disponibles et utilisables.

4.1 Obtention des données

Les données utilisées étant obtenues lors d'essais d'homologation, on a suivi un processus de recueil des données parallèle à celui décrit par la fiche UIC 518 d'homologation des véhicules ferroviaires.

- **Découpage des voies en tronçons.**

  Les lignes étudiées ont été découpées en tronçons en suivant les indications de la fiche UIC 518, qui établit la longueur des tronçons par classe de rayons de courbe et en excluant les courbes de transition d'entrée et de sortie.

  Souvent on a pris en compte le découpage que l'Agence d'Essai Ferroviaire (AEF) lors de l'homologation des véhicules.

- **Extraction des valeurs**

  Sur chaque tronçon on mesure la valeur maximale de chaque effort à partir des bandes d'essai disponibles (enregistrements graphiques en continu) ou les valeurs maximales à 99,85% données par les graphiques-barres dans les rapports des essais d'homologation. Ces valeurs maximales sont associées à la qualité géométrique locale relevée sur les bandes du Mauzin graphique [12] (amplitude des défauts ponctuels) ou du STS (moyenne glissante sur 200 mètres centrée au point d'effort maximal) selon le type d'étude, ponctuelle ou synthétique.

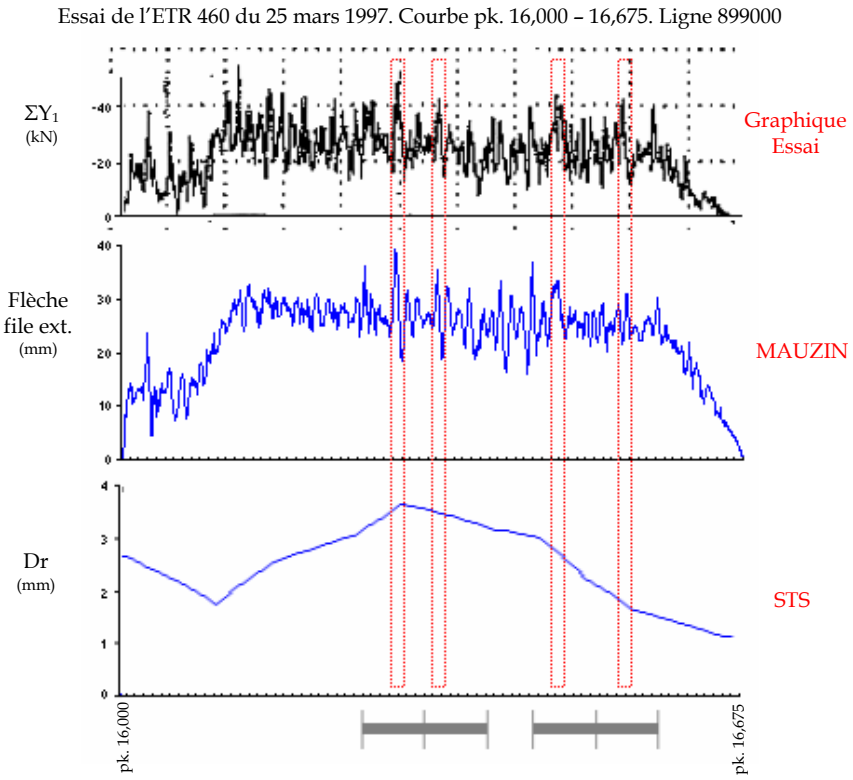
  La figure ci-dessous montre le processus d'extraction des valeurs :

  - A partir des bandes graphiques d'essais on repère la valeur maximale de l'effort dans chaque tronçon.

- On associe les valeurs des autres paramètres au point précis où a été enregistré l'effort maximal avec les bandes du Mauzin graphique et du STS disponibles.

  Pour les bandes du Mauzin graphique on prend comme valeurs représentatives de la qualité géométrique de la voie les amplitudes des défauts ponctuels. Dans le cas du STS, qui donne la moyenne glissante sur 200 mètres des écarts des défauts géométriques, on prend la valeur centrée au point considéré.

Figure 4-1 :Représentation du processus d'extraction des valeurs utilisé



Source : Élaboration propre à partir de donnés SNCF

Les bandes du Mauzin et du STS ont été prises au plus près de la date des essais pour représenter la qualité de la voie au moment des essais. Le tableau ci-après compare les dates des essais et des enregistrements Mauzin et STS.

Tableau 4-1 : Comparaison des dates des essais d'homologation et des enregistrements Mauzin et STS

Véhicule	Lignes	Essais	Mauzin	STS
ETR 460	590.000	02 – 03 / 1997	01 / 1997	09 / 1997
	899.000	03 / 1997	10 / 1997	10 / 1997
	900.000	03 – 04 / 1997	10 / 1997	10 / 1997
TGV P01	590.000	11 / 1998	-	09 / 1998
	890.000	09 / 1998	-	10 / 1998
	899.000	10 / 1998	-	10 / 1998
	900.000	09 / 1998	-	10 / 1998
X-TER " DXP "	441.000	11 / 1999	-	10 / 1999
	930.000	10 / 1999	-	10 / 1999
	790000	11 / 1999	-	10 / 1999

Source : Élaboration propre

En annexe figure un tableau détaillé des données prises en compte pour chaque véhicule.

4.2 Paramètres considérés dans l'étude

Pour décrire les forces exercées par le véhicule, on a considéré quatre groupes de paramètres comme facteurs d'influence pertinents :

Tracé de la voie :

- **Rayon R** (en mètres),
- **Dévers D** (en millimètres).

Conditions de circulation :

- **Vitesse V** (en km/h),
- **Insuffisance de dévers I** (en millimètres).

Qualité géométrique de voie :

- **Nivellement Longitudinal (NL)** : défaut de géométrie, situé dans le plan vertical, représenté par l'écart (en millimètres) d'un point du dessus du rail, au niveau du plan de roulement, par rapport à la ligne moyenne idéale du profil en long,

- **Nivellement Transversal (NT)** : défaut de géométrie, situé dans le plan vertical dans la direction transversale, représenté par la différence (en millimètres) des nivellements longitudinaux des deux files de rails (≈ irrégularité du dévers)

- **Dressage (Dr)** : défaut de géométrie, situé dans le plan horizontal dans la direction transversale, représenté par l'écart (en millimètres) d'un point du côté du rail, à une hauteur d'environ 15 mm en dessous du plan de roulement, par rapport à la ligne moyenne idéale du tracé en plan.

- **Ecartement de la voie (Ec)** : distance (en millimètres) entre les deux faces internes des rails, à une hauteur approximative de 15 mm au-dessous du plan de roulement.

- **Variation de l'Ecartement (Var. Ec)** : défaut de géométrie, situé dans le plan horizontal, représenté par l'écart (en millimètres) de la distance entre les deux faces internes des rails par rapport à l'écartement moyen de la voie.

Autres :

- **Etat du rail** : on peut l'évaluer à partir du coefficient de frottement à la file basse, rapport entre les efforts horizontaux et verticaux sur la file intérieure de la courbe ($(Y/Q)_{1_int}$)

4.3 Analyse Statistique

Pour toutes les forces étudiées l'analyse statistique a été conduite de manière identique.

L'analyse statistique commence par une régression multiple tenant compte de tous les paramètres disponibles. Afin d'assurer des résultats représentatifs pour toute condition de circulation (vitesse, insuffisance de dévers) et pour n'importe quel tracé (rayon, dévers), on a choisi de mélanger les données recueillies sur différentes. Ainsi on peut obtenir des lois valides pour une large gamme de tracés (courbes de 400 à 1000m) et de conditions de circulation (insuffisances de dévers de 200 à 300 mm). Notons qu'on a tenu compte des différentes configurations de la rame lors des essais, non

seulement le sens de la marche mais aussi le bogie de mesure utilisé. C'est à dire qu'on n'a pas mélangé des valeurs obtenues avec des bogies ou des sens de circulation du véhicule différents.

Cette première analyse a été réalisée avec les données ponctuelles des forces et des amplitudes des défauts ponctuelles de la qualité géométrique de la voie, en vue de définir précisément les paramètres qui influent sur les différentes forces.

A partir d'une première régression multiple de toutes les valeurs on continue par élimination successive des paramètres les moins influents dans la régression afin de trouver la meilleure régression linéaire possible. La signification de chaque paramètre dans la régression multiple est mesurée par l'indicateur " t " de Student. Les paramètres les moins significatifs sont ceux qui ont un $|t| \approx 0$, et on considère que les paramètres significatifs sont ceux qui ont un $|t|>2$. Dans chaque élimination successive, à travers l'analyse de la variance on évalue la représentativité de la régression. Pour illustrer ce processus on présente de façon détaillée l'analyse d'une marche dans les annexes.

Pour chaque force on fait cette analyse avec différentes combinaisons de marches pour quantifier l'influence des différents paramètres. Notons que pour les combinaisons de marches avec des caractéristiques de tracé similaires (courbes de rayons homogènes), les résultats ne peuvent pas être considérés extrapolables comme résultats généraux car toutes les possibilités n'y sont pas représentées. Il est donc préférable de mélanger les données d'un vaste domaine de caractéristiques, distribuées de façon homogène sur toute la gamme des valeurs.

A partir des régressions linéaires obtenues par l'élimination successive de paramètres et par comparaison entre elles, , on met en évidence les paramètres qui ont une influence significative sur chaque effort étudié. . Ce sont ceux qui se répètent le plus souvent dans les meilleures régressions obtenues. Afin de ne pas avoir d'information redondante dans les régressions finales, on a vérifié que les paramètres finaux soient indépendants entre eux, c'est-à-dire, que les corrélations entre eux ne soient pas élevées. Des paramètres d'entrée trop fortement corrélés rendent difficile l'utilisation des lois obtenues, nécessitant beaucoup plus d'information sans fournir une meilleure description du phénomène.

Avec les paramètres influents on cherche le poids de chacun dans la loi. Avec les données ponctuelles et les données synthétiques on étudie chaque effort à partir des régressions linéaires multiples des paramètres choisis.

En faisant une étude parallèle de l'analyse ponctuelle et de l'analyse synthétique on établit une loi statistique type pour chaque effort. Cette loi type permet d'estimer, de façon simple, l'effort (exprimé

en kN) que le véhicule exerce, à partir des données de circulation, de tracé et des données synthétiques de la qualité de la voie.

Pour compléter l'analyse statistique et tirer des lois de prédiction, on a appliqué une méthode de traitement statistique multidimensionnel. La méthode a été appliquée afin d'obtenir une loi d'estimation des valeurs maximales, d'accord avec la fiche UIC 518. C'est à dire, la valeur maximale estimée est égale à la valeur supérieure de l'intervalle de confiance choisi. Cet intervalle de confiance est fixé par l'écart type des différences entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs estimées par la régression obtenue ($S_{(Y_i - Y_R)}$) :

$$S_{(Y_i - Y_R)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\left(Y_i(X_j) - Y_R(X_j) \right) - M \right)^2}{(n-1)}} \qquad [9]$$

où

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_i(X_j) - Y_R(X_j) \right)}{n} \qquad [10]$$

Avec :

$Y_i(X_j)$ = valeur donnée par la régression obtenue $Y_i(X_j) = a + \sum_{j=1}^{m} b_j X_j$

$Y_R(X_j)$ = valeur réelle mesurée

X_j = variables indépendantes

n = nombre total de valeurs de la série

M = moyenne arithmétique

En fonction de l'intervalle de confiance choisi (grandeurs de fatigue de la voie: 95% , de sécurité: 99%), la valeur du coefficient t de Student à appliquer est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-2 : Coefficients de la distribution " t " de Student

Nombre de degrés de liberté	25	40	100	∞
Intervalle de confiance à 95%	2,060	2,021	1,984	1,960
Intervalle de confiance à 99%	2,787	2,704	2,626	2,576

Source : UIC

La valeur maximale estimée est égale à la valeur supérieure de l'intervalle soit :

$$\hat{Y}(X_j) = Y_P = Y_i(X_j) + t \cdot S_{(Y_i - Y_R)} \quad [11]$$

Avec :

$\hat{Y}(X_j)$ est la valeur maximale estimée ou valeur prédite Y_P

L'intervalle de confiance est choisi en fonction de la nature des efforts étudiés. Ainsi, pour les paramètres de sécurité l'intervalle de confiance choisi est à 99% et pour les paramètres de fatigue de la voie on prend l'intervalle de confiance à 95% (par cohérence avec la fiche UIC 518).

Pour les paramètres quasi-statiques, la valeur estimée est égale à la valeur moyenne de la régression linéaire

$$Y_P = Y_i(X_j) = a + \sum_{j=1}^{m} b_j X_j \quad [12]$$

5 ETR 460

5.1 Caractéristiques du matériel

Les rames ETR 460 constituent la deuxième génération des trains italiens à caisse inclinable. Ce sont également des automoteurs électriques à traction répartie, avec une composition de 9 voitures, dont 6 motrices et 3 remorques. La disposition des différents éléments, motrices et remorques, est M + M + R + R + M + M + R + M + M, et un tiers des essieux de la rame sont moteurs [13].

La vitesse maximale en service est de 250 km/h.

L'inclinaison est du type actif, avec des vérins hydrauliques. L'angle maximal en opération est de 8° (6,5° par rapport à la voie). La masse totale à vide de la rame est de 434 tonnes, avec une masse maximale (en charge normale) par essieu de 12-12,5 tonnes, et la longueur totale est de 237 m.

D'autres caractéristiques de la rame :

Charge moyenne à l'essieu : 125 kN en charge normale
Empattement de bogie : 2700 mm
Entraxe des pivots de bogies : 19 m
Diamètre des roues : 890 mm

5.2 Données utilisées pour l'étude

Pour étudier l'influence de différents paramètres relatifs au tracé, à la qualité géométrique de la voie et aux conditions de circulation, les études statistiques ont été menées à partir du dépouillement manuel des résultats de 8 marches, en suivant le processus décrit au §4, c'est-à-dire en commençant par une étude ponctuelle et en mettant en relation les résultats avec une étude synthétique.

Les données ont été prises sur le bogie moteur situé en tête de la rame pour les deux sens de marche. Les lois qui ont été trouvées sont donc valables pour les efforts exercés par le premier bogie. Bien que ce soit souvent le premier bogie qui exerce les efforts d'inscription les plus grands sur la voie, il peut arriver que pour d'autres efforts un autre bogie soit prépondérant. C'est le cas des bogies porteurs du TGV pour les forces verticales puisque la charge à l'essieu est plus élevée que dans le bogie moteur. Ici, s'agissant d'une rame à motorisation répartie, on peut émettre l'hypothèse que tous les bogies auront un comportement similaire en termes de forces verticales transmises à la voie, puisque le poids de la rame est plus équitablement reparti entre tous les bogies.

Les marches utilisées ont été choisies parmi celles effectuées en 1997 pour les études d'homologation du point de vue du comportement dynamique de l'ETR 460. Ces marches ont été choisies selon des critères d'une plus grande représentativité des conditions de circulation (insuffisance de dévers entre 200 et 300 mm) et de typologies de tracé (courbes d'entre 400 et 1000 m) :

Tableau 5-1 : Caractéristiques moyennes des marches choisies

Marche	Ligne	Nb tronçons	Rayon moyen (m)	Insuffisance de dévers moyenne (mm)
965-19	Limoges - Argenton	107	1000	276
965-20	Argenton - Limoges	90	1016	275
965-33	Brive - Cahors	254	498	287
965-34	Cahors - Brive	236	502	286
965-70	Chambéry - Modane	42	526	257
965-78	St. Pierre d'Albigny - Albertville	9	383	283
965-99	Culoz - Chambéry	20	534	261
965-100	Chambéry - Culoz	18	532	262

Source :Élaboration propre à partir des donnés SNCF

Dans la fiche UIC 518, qui a été le référentiel suivi dans la présente étude, on inclut comme efforts à analyser du point de vue de la sécurité et de la fatigue de la voie : la somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$), les forces verticales maximales ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) et les forces quasi statiques transversales ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) et verticales ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) sur la roue extérieure, ces dernières en courbes de faible rayon. Dans cette étude, puisqu'on disposait d'autres informations, et afin de tirer des lois les plus générales possibles, on a étudié les forces quasi statiques transversales et verticales sur la roue extérieure en courbes de faible et grand rayon. De plus, on a étudié les forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$) et la somme

des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$). Il faut noter que les forces transversales maximales sur la roue extérieure peuvent être, dans certains cas, la cause de dégâts ponctuels sur l'infrastructure comme des ruptures d'attaches. En outre, la somme des forces de guidage quasi statiques permet une caractérisation détaillée de la répartition des forces entre les essieux du bogie du véhicule selon le tracé.

Comme donnée d'entrée, on a choisi d'utiliser la courbure plutôt que le rayon comme paramètre de tracé. Cette décision a été prise par cohérence avec la formulation théorique où le rayon intervient de façon inversement proportionnelle dans l'expression des forces, c'est à dire que les forces sont plus grandes pour les rayons plus petits.

$$\Sigma Y = \frac{PV}{1000} + \frac{P}{g}\left[\frac{V^2}{R} - \frac{D}{E}g\right] \qquad [13]$$

avec :

ΣY = somme des forces transversales exercées par un essieu

P = charge à l'essieu

V = vitesse de circulation du véhicule

R = rayon de la courbe

D = dévers existant

E = distance entre les cercles de roulement des roues d'un essieu

g = accélération de la pesanteur

C'était une convention qui permet obtenir, dans certains cas, des résultats même plus fiables. En annexe on adjoint une comparaison entre certains résultats obtenus avec le rayon et avec la courbure. Cette convention de prendre la courbure au lieu du rayon comme paramètre d'entrée a été également prise en compte pour le TGV P01 et l'X TER.

Dans l'étude de l'ETR 460 on a inclus comme paramètre additionnel l'état du rail (sec ou humide), en l'évaluant à partir du rapport entre les efforts horizontaux et verticaux sur la file intérieure de la courbe ($(Y/Q)_{1_int}$). Bien que celui-ci ne soit pas un paramètre prédictible a priori puisqu'il dépend des conditions ambiantes, on a considéré opportun d'étudier son rôle en profitant du fait qu'on disposait de cette information.

Enfin, il faut noter que les valeurs synthétiques de la qualité géométrique de la voie ont subi une variation de cotation entre 1997 et 1998. C'est à dire, les valeurs synthétiques de la qualité géométrique de la voie au moment des essais sur l'ETR 460 étaient calculées selon des règles différentes des actuelles. Ce changement entraîne de petites différences entre les valeurs anciennes et nouvelles de la qualité géométrique. Afin de pouvoir comparer les résultats entre les différents véhicules et avec

l'objectif que les lois obtenues pour l'ETR 460 soient utilisables actuellement, on a effectué le passage des données synthétiques de l'ETR 460 de l'ancienne cotation à la nouvelle, en appliquant les coefficients suivants :

Tableau 5-2 : Coefficients de passage de l'ancienne à la nouvelle cotation du STS

Paramètre	LGV	Ligne classique
NL	1,50	1,30
NT	1,43	1,20
Dr	0,90	0,90
Var. Ec	1,10	1,10

Source : SNCF

Il convient de souligner que ces coefficients représentent des valeurs moyennes calculées à partir de résultats obtenus sur plusieurs lignes de qualités diverses et leur utilisation pour des traitements statistiques sur plusieurs dizaines de kilomètres de voie sont parfaitement utilisables.

Dans toute la suite de ce document, le terme " Dr " utilisé, tant pour l'ETR 460 que pour le TGV P01 et l'X TER, représente le Dr du " nouveau STS "

5.3 Lois du comportement du véhicule

5.3.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$)

Dans le plan horizontal, les sommes des forces d'inscription maximales en courbe sont représentées par les lois :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = -4{,}5 + 2200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}075 \times \text{Insuf} + 7{,}7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5830 \qquad [14]$$

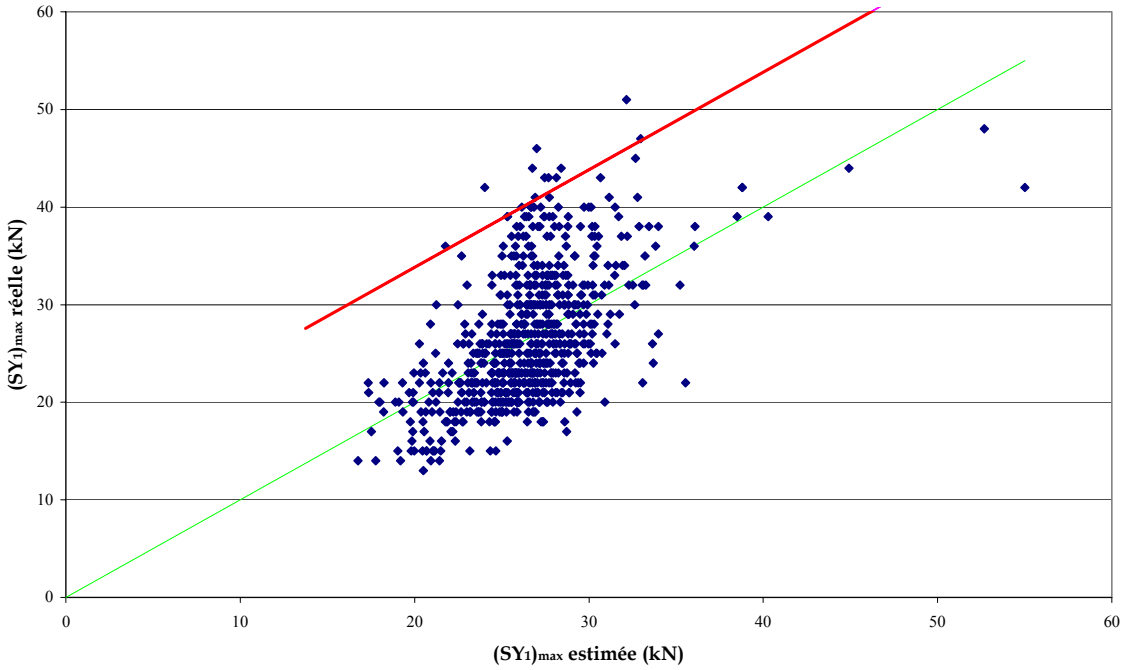
$$(\Sigma Y_2)_{max} = 16 - 4000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6779 \qquad [15]$$

Ces lois globales ont été obtenues en synthétisant l'information qui résulte du processus statistique précédemment décrit. Comme les régressions obtenues pour différentes marches et sens de circulation n'ont pas montré de claires différences entre les deux bogies de mesure (le bogie de mesure, lors des essais de l'ETR 460, était toujours celui situé en tête), on a choisi de tirer une loi caractéristique globale.

Les deux graphiques ci-après représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues, et l'intervalle de confiance à 99%. Les valeurs au-dessus de l'intervalle de confiance, non représentées correctement par les lois retenues, sont des points qui en raison de

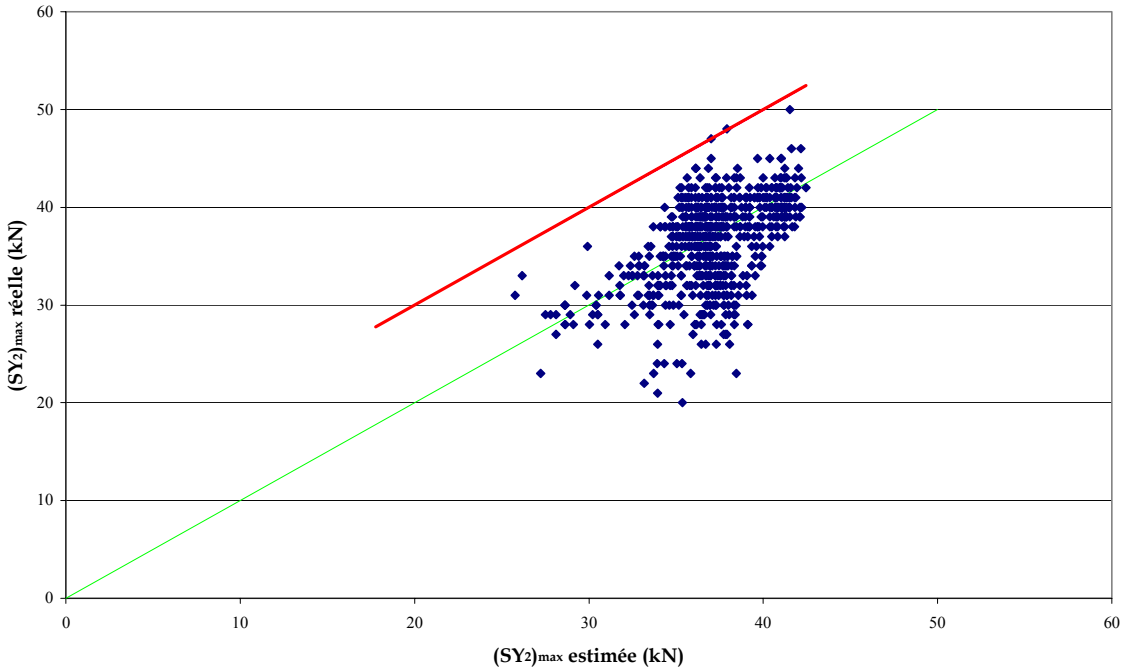
caractéristiques géométriques de la voie sortent du cadre de la présente étude, en raison de la présence d'appareils de voie ou de défauts importants de l'infrastructure.

Graphique 5-1 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 5-2 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En résumé les lois d'estimation des valeurs maximales peuvent s'écrire, en prenant en compte la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 99% :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 9{,}3 + 2200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}075 \times \text{Insuf} + 7{,}7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5830 \qquad [16]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 26 - 4000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6779 \qquad [17]$$

A partir de ces lois obtenues on peut tirer différentes conclusions :

- Le dressage a une influence notoire sur les forces d'inscription en courbe exercées par le premier essieu du bogie [14].

- Le deuxième essieu du bogie n'est pas sensible à la qualité géométrique de la voie. Ce sont donc, le tracé et les conditions de circulation qui déterminent la somme des forces horizontales exercées par le deuxième essieu du bogie.

- Le tracé de la voie, qui est représenté dans la loi par la courbure, intervient de façon contraire sur le premier et le deuxième essieu. Ce comportement est dû, en grande partie, à l'interaction bogie-caisse.

5.3.2 Forces verticales maximales sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$)

Dans le plan vertical, les forces maximales exercées sur la file extérieure sont régies par les lois :

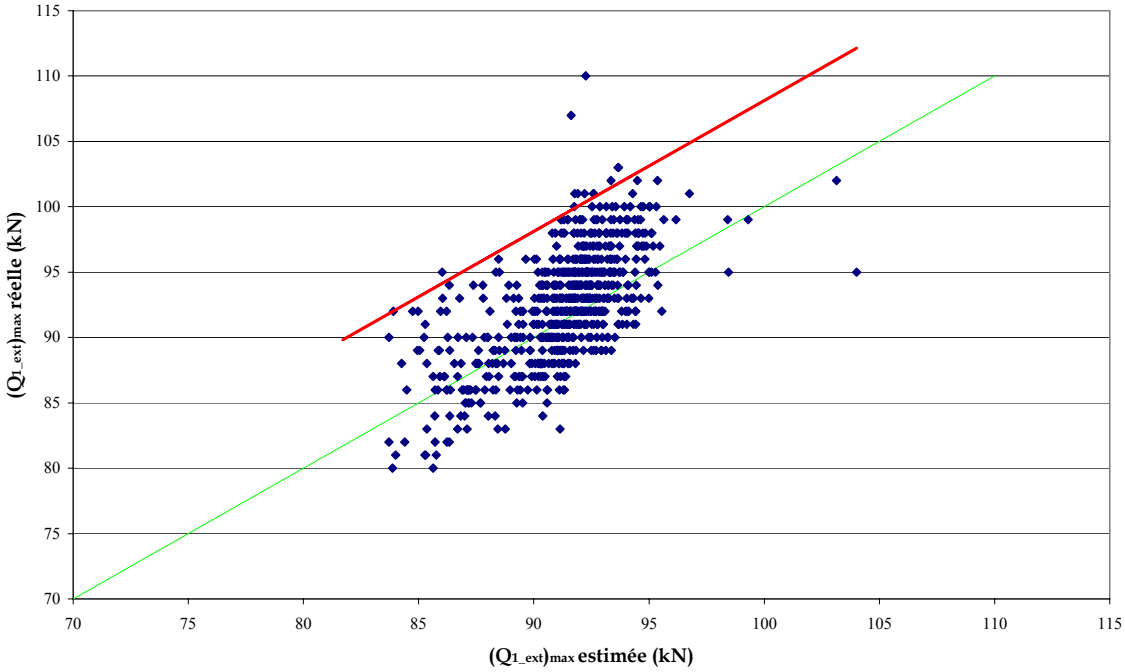
$$(Q_{1_ext})_{max} = 64 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 2{,}9 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5028 \qquad [18]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 65 + 1250 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} + 1{,}4 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5586 \qquad [19]$$

Ces lois synthétisent aussi les résultats donnés par les deux bogies de mesure dans les deux sens de circulation, puisque la différence de comportement entre les deux bogies est presque inexistante.

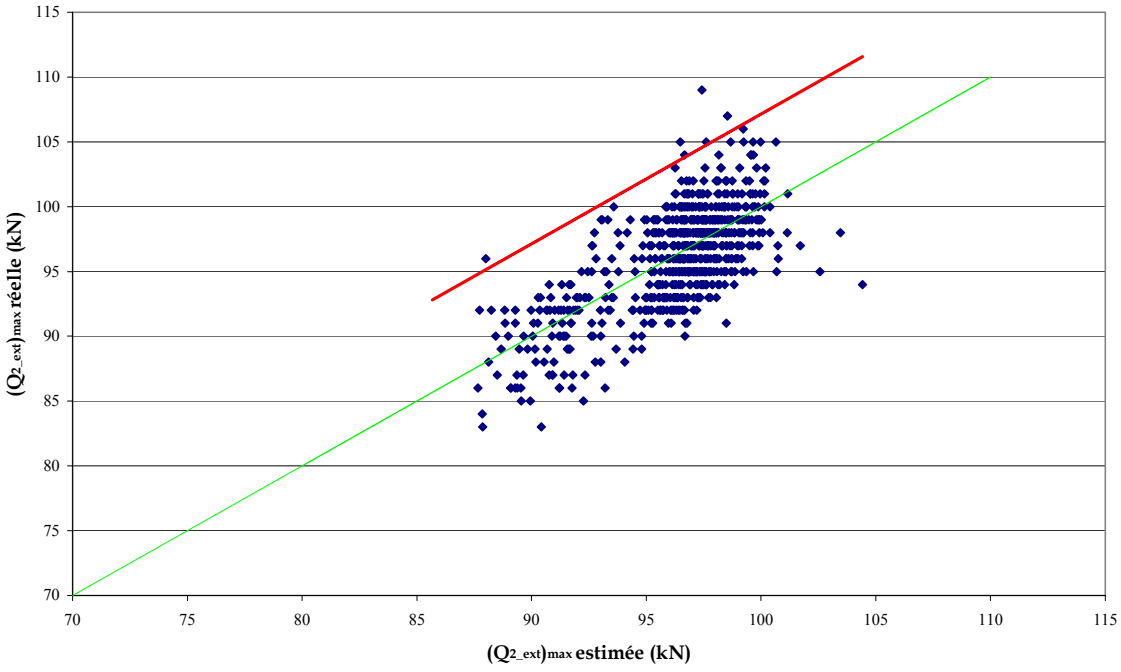
Les deux graphiques ci-après représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues, et l'intervalle de confiance à 95%. Les valeurs au-dessus de l'intervalle de confiance, non représentées correctement par les lois retenues, sont des points qui en raison de caractéristiques géométriques de la voie sortent du cadre de la présente étude, en raison de la présence d'appareils de voie ou de défauts importants de l'infrastructure.

Graphique 5-3 : $(Q_{1_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 5-4 : $(Q_{2_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En résumé les lois d'estimation des valeurs maximales, en prenant en compte ma borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95%, peuvent s'écrire comme :

$$(Q_{1_ext})_{max} = 70{,}2 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 2{,}9 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5028 \qquad [20]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 72{,}4 + 1250 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} + 1{,}4 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5586 \qquad [21]$$

On peut en déduire que :

- La charge dynamique par roue est déterminée en grande mesure par la charge statique. Ce fait est mis en évidence par les valeurs des constantes des lois. La charge statique par roue sur l'ETR 460 est environ 65 kN, valeur proche de la constante des lois expérimentales.

- Le dressage est le paramètre de la qualité géométrique de la voie ayant la plus claire influence sur la charge verticale sur la roue extérieure, plus encore que le nivellement longitudinal. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que la circulation de trains pendulaires est réalisée avec des insuffisances de dévers très importantes. C'est à dire, on roule avec le véhicule très déplacé vers la file extérieure. L'appui des roues sur la file extérieure a pour résultat une grande sensibilité du véhicule devant un défaut consistant en un changement brusque du tracé de la voie, défaut mesuré par le dressage, par rapport à un défaut de nivellement longitudinal de la voie. Il faut aussi souligner que les paramètres décrivant la qualité géométrique de la voie (nivellement longitudinal, nivellement transversal, dressage) sont statistiquement très corrélés entre eux.

5.3.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$)

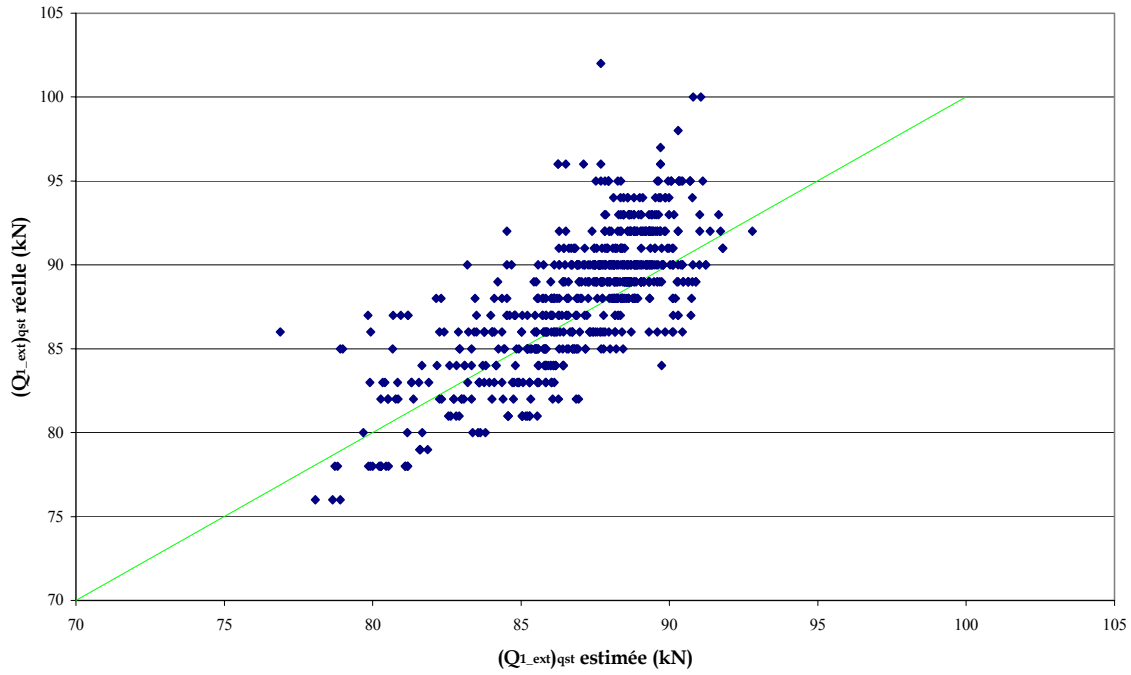
La composante quasi statique des forces verticales de la roue extérieure est en grande mesure déterminée par deux termes. Un premier terme est la charge statique par roue qui est constante tant en alignement qu'en courbe, et un deuxième terme est donné par les conditions de tracé et de circulation, c'est à dire, le rayon et l'insuffisance de dévers. Dans les lois retenues, synthétisant le comportement des deux bogies, on peut reconnaître ces deux termes :

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 58 + 2900 \times 1/\text{rayon} + 0{,}085 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6286 \qquad [22]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 61 + 3500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6360 \qquad [23]$$

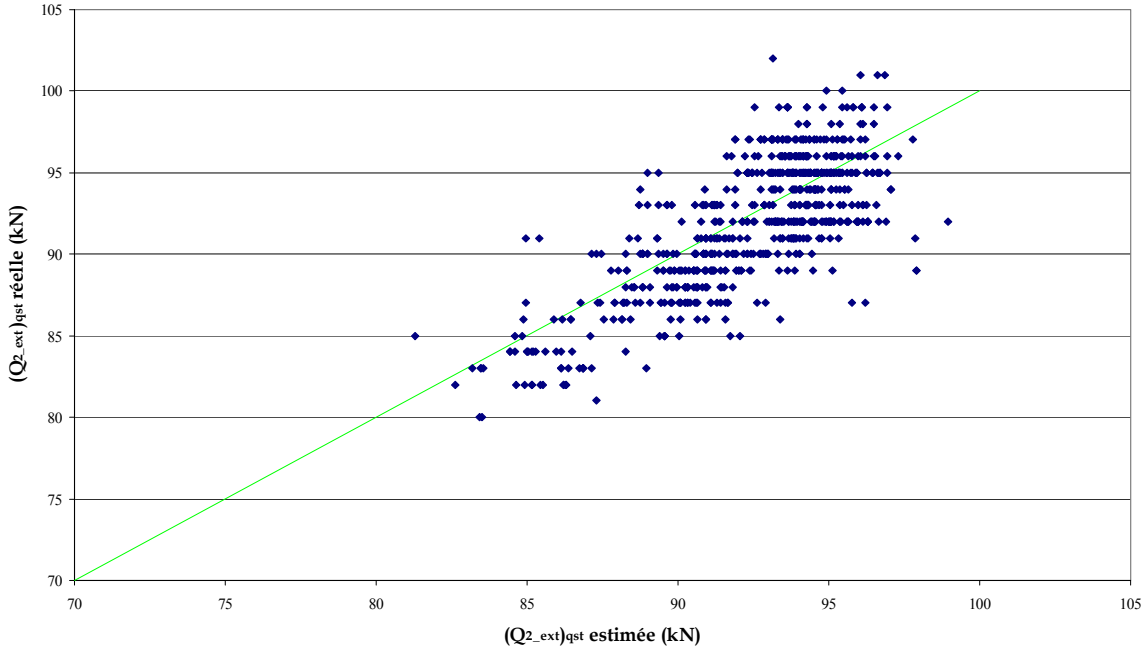
Les graphiques suivants représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues.

Graphique 5-5 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 5-6 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En conclusion, les valeurs quasi statiques des forces verticales sur la roue extérieure comprennent un terme constant proche de la valeur de la charge statique par roue du véhicule (65 kN environ) plus une partie due à la circulation en courbe, caractérisée par la géométrie du tracé et par les conditions de circulation.

5.3.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$)

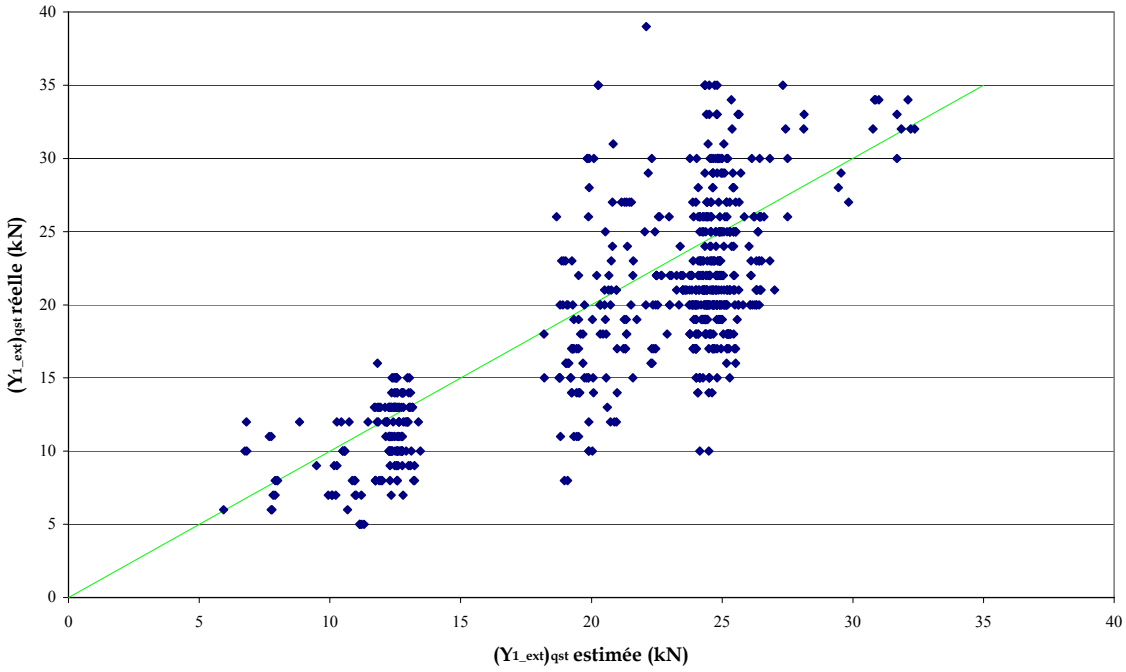
Les forces transversales quasi-statiques exercées par les roues extérieures du bogie de tête de l'ETR 460 sont représentées par les lois suivantes:

$$(Y_{1_ext})_{qst} = -7{,}2 + 12000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}025 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6159 \qquad [24]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = 1 - 1000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}3732 \qquad [25]$$

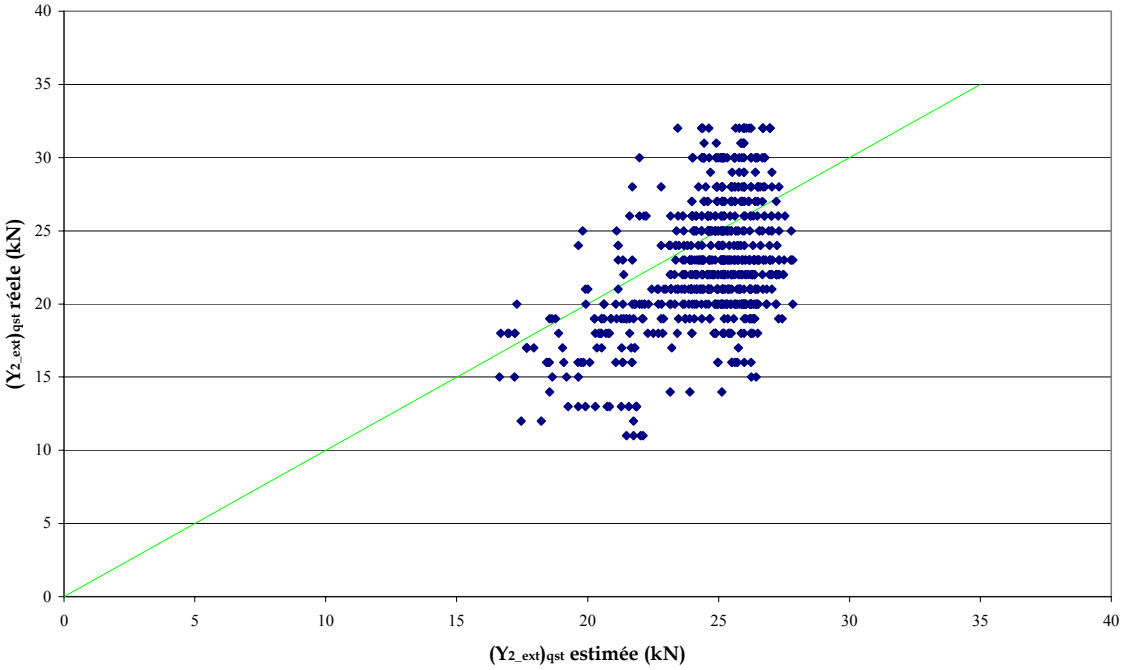
Les graphiques suivants représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées.

Graphique 5-7 : $(Y_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 5-8 : $(Y_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Des lois obtenues on peut tirer diverses conclusions :

- La courbure a une influence notoire sur la force exercée par la roue extérieure du premier essieu du bogie et, en revanche, l'influence sur le deuxième essieu est plus faible. De plus la courbure intervient de façon contraire sur le premier et le deuxième essieu. Ce comportement est expliqué par l'interaction bogie-caisse.

- Les conditions de circulation représentées par l'insuffisance de dévers ont une forte influence sur la force exercée par la roue extérieure du deuxième essieu du bogie et, en revanche, elles n'interviennent pas de façon significative dans le cas de la roue extérieure du premier essieu.

5.3.5 Forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$)

Dans le cas des forces transversales maximales sur la roue extérieure, la différence d'influence de la courbure et de l'insuffisance de dévers entre la force exercée par la roue extérieure du premier essieu du bogie et par la deuxième roue est encore plus évidente. Les lois retenues sont les suivantes :

$$(Y_{1_ext})_{max} = -7 + 13000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}035 \times \text{Insuf} + 9 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}7430 \qquad [26]$$

$$(Y_{2_ext})_{max} = 3 - 4500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}11 \times \text{Insuf} + 4{,}1 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5410 \qquad [27]$$

Les forces transversales maximales exercées par la roue extérieure, qui ne sont pas l'objet d'étude lors des essais d'homologation de véhicules en suivant la fiche UIC 518, peuvent être, dans certains cas, la cause de dégâts ponctuels par fatigue sur l'infrastructure comme des ruptures d'attaches. Ces situations apparaissent surtout en voies avec défauts géométriques ponctuels très importants, comme par exemple, en courbe de faible rayon de voie avec joints, où les défauts de dressage sont souvent importants.

Les lois d'estimation des valeurs maximales des forces transversales sur la file extérieure, en prenant l'intervalle de confiance à 95%, sont :

$$(Y_{1_ext})_{max} = 4{,}6 + 13000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}035 \times \text{Insuf} + 9 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}7430 \qquad [28]$$

$$(Y_{2_ext})_{max} = 11{,}4 - 4500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}11 \times \text{Insuf} + 4{,}1 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5410 \qquad [29]$$

5.3.6 Somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$)

La somme des forces de guidage quasi statiques d'un véhicule n'est pas prise en compte pour l'homologation du véhicule. C'est pour cette raison qu'elle n'est pas objet d'étude par la fiche UIC 518. Cependant la répartition des composantes quasi statiques et aléatoires des forces de guidage entre le premier et le deuxième essieu n'est pas toujours la même pour n'importe quel rayon de courbe. Les véhicules présentent un rayon caractéristique où on trouve un changement de répartition des composantes quasi statiques entre les deux essieux d'un bogie.

Vu qu'on disposait des enregistrements de ces forces, on a estimé intéressant de les inclure dans la présente étude. Dans la partie de comparaison entre les véhicules objets de l'étude, on étudiera cette répartition des composantes quasi-statiques et aléatoires de la somme des forces de guidage.

Les lois qui ont été considérées valables pour représenter la somme des forces de guidage quasi statiques sont :

$$(\Sigma Y_1)_{qst} = -8 + 3000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}4837 \qquad [30]$$

$$(\Sigma Y_2)_{qst} = 9 - 1300 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}5515 \qquad [31]$$

On en déduit que comme dans le cas de la somme maximale des forces de guidage, le tracé de la voie, représenté par la courbure, intervient de façon opposée sur les deux essieux. Ce comportement est dû, en grande partie, à l'interaction bogie-caisse.

5.4 Etudes en considérant l'état du rail

Le ratio Y/Q sur la file intérieure (coefficient de frottement) permet d'évaluer le degré d'humidité du rail. Puisque les essais qui avaient été faits pour l'homologation de l'ETR 460 présentaient des données relatives à l'état du rail, on a considéré opportun de faire une étude parallèle en le considérant comme paramètre d'entrée. Cette étude a été faite puisque dans les résultats initiaux on a constaté une forte influence de ce paramètre dans les forces exercées par le véhicule (résultat conforme aux attentes). Malgré tout, étant un paramètre imprédictible, puisqu'il dépend directement des conditions ambiantes, il ne peut pas être introduit dans les lois générales de caractérisation de la circulation des véhicules pendulaires. Ci-dessous on présente les lois obtenues pour chaque force étudiée en tenant compte de l'état du rail, représenté par le coefficient de frottement $(Y/Q)_{1_int}$, et sans en tenir compte (résultats déjà présentés) . Pour les valeurs maximales, ces lois prennent en compte la limite supérieure :

- l'intervalle de confiance à 99% pour $(\Sigma Y)_{max}$
- l'intervalle de confiance à 95% pour $(Q_{ext})_{max}$ et $(Y_{ext})_{max}$

5.4.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$)

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 9{,}7 + 1000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}075 \times \text{Insuf} + 6{,}8 \times \text{Dr} + 20 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6154 \qquad [32]$$

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 9{,}3 + 2200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}075 \times \text{Insuf} + 7{,}7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5830 \qquad [33]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 25{,}9 - 3000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} - 9{,}5 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6924 \qquad [34]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 26 - 4000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6779 \qquad [35]$$

5.4.2 Forces verticales maximales ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$)

$$(Q_{1_ext})_{max} = 69{,}9 + 2400 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 3{,}4 \times \text{Dr} - 11 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}5231 \qquad [36]$$

$$(Q_{1_ext})_{max} = 70{,}2 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 2{,}9 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5028 \qquad [37]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 70{,}2 + 2000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} + 1{,}8 \times \text{Dr} - 10 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}5768 \qquad [38]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 72{,}4 + 1250 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} + 1{,}4 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5586 \qquad [39]$$

5.4.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$)

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 58 + 3500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}085 \times \text{Insuf} - 6{,}8 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6402 \qquad [40]$$

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 58 + 2900 \times 1/\text{rayon} + 0{,}085 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6286 \qquad [41]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 61 + 4200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} - 10 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6609 \qquad [42]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 61 + 3500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6360 \qquad [43]$$

5.4.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$)

$$(Y_{1_ext})_{qst} = -7{,}2 + 11000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}025 \times \text{Insuf} + 15 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6605 \qquad [44]$$

$$(Y_{1_ext})_{qst} = -7{,}2 + 12000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}025 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6159 \qquad [45]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = -1 + 1200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} - 23 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}5906 \qquad [46]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = 1 - 1000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}3732 \qquad [47]$$

5.4.5 Forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$)

$$(Y_{1_ext})_{max} = 4{,}3 + 12000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}035 \times \text{Insuf} + 8{,}6 \times \text{Dr} + 15 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}7477 \qquad [48]$$

$$(Y_{1_ext})_{max} = 4{,}6 + 13000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}035 \times \text{Insuf} + 9 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}7430 \qquad [49]$$

$$(Y_{2_ext})_{max} = 10{,}7 - 3000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}11 \times \text{Insuf} + 4{,}1 \times \text{Dr} - 25 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6719 \qquad [50]$$

$$(Y_{2_ext})_{max} = 11{,}4 - 4500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}11 \times \text{Insuf} + 4{,}1 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5410 \qquad [51]$$

5.4.6 Somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$).

$$(\Sigma Y_1)_{qst} = -8 + 1000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 30 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6315 \qquad [52]$$

$$(\Sigma Y_1)_{qst} = -8 + 3000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}4837 \qquad [53]$$

$$(\Sigma Y_2)_{qst} = 9 + 500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} - 20 \times (Y/Q)_{1_int} \qquad r^2 = 0{,}6479 \qquad [54]$$

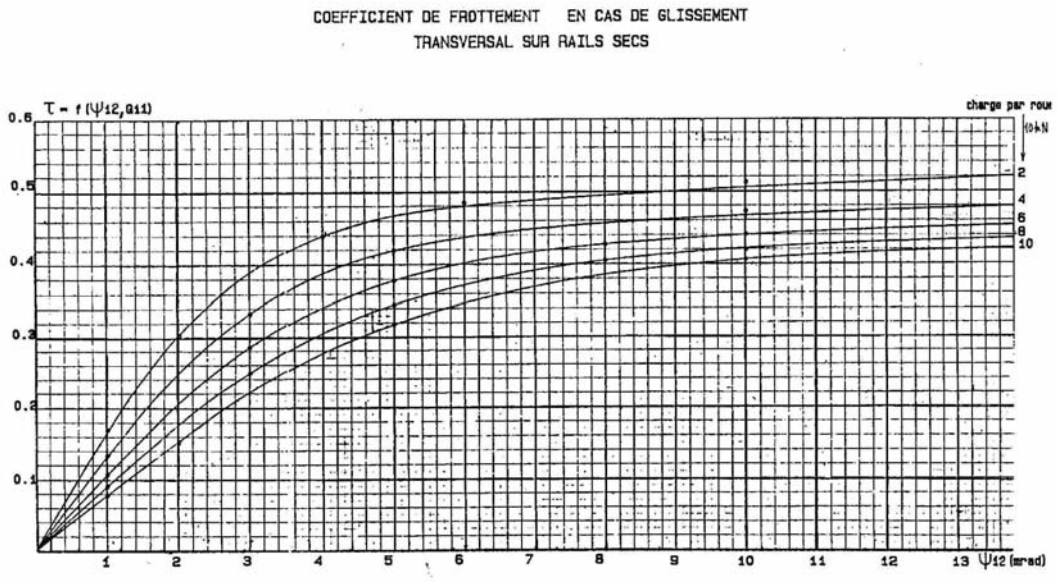
$$(\Sigma Y_2)_{qst} = 9 - 1300 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}5515 \qquad [55]$$

Devant ces résultats et en comparant les lois obtenues pour chaque force selon que l'on considère ou non le coefficient de frottement, on peut tirer certaines conclusions :

- Le coefficient de frottement intervient de façon contraire sur le premier et le deuxième essieu, dans les lois représentatives des forces dans le plan transversal. Ce comportement est dû à l'interaction bogie-caisse.

- Le coefficient de frottement est étroitement lié au rayon de la courbe. Cette relation est mise en évidence en voyant que seul le coefficient de la courbure dans les différentes lois est modifié d'une façon significative en ajoutant le paramètre de l'état du rail dans l'étude. On explique cette relation étroite entre le coefficient de frottement et le rayon à travers l'angle de braquage du bogie en courbe. L'angle de braquage du bogie en courbe déterminera le coefficient de frottement maximal, c'est à dire, le coefficient de frottement en cas de glissement transversal sur rails secs. Cette relation décrite par la fiche UIC 510-2 [15] se résume au graphique suivant, où en connaissant l'angle de braquage du bogie et la charge par roue du véhicule on obtient la valeur maximale du coefficient de frottement :

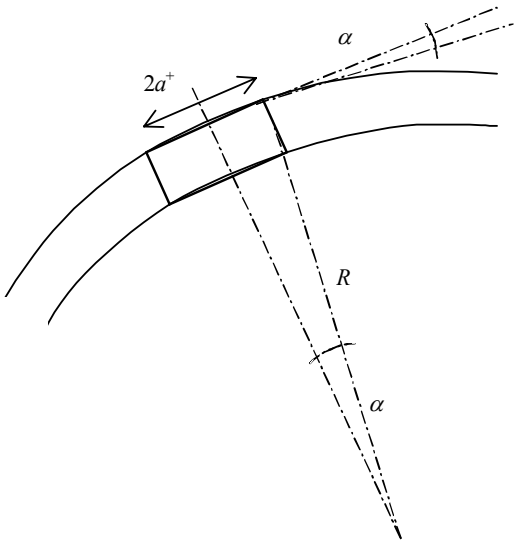
Figure 5-1 : Courbes adhérence – glissement transversal sur rails secs



Source : UIC

D'autre part, l'angle d'attaque du premier essieu en courbe est étroitement lié par une relation géométrique avec le rayon de la courbe. En l'absence d'orientation des essieux et de jeux entre essieux et bogies on aurait :

Figure 5-2 : Relation géométrique entre l'angle d'attaque et le rayon de courbure



$$\alpha = \frac{\frac{2a^{+}}{2}}{R}$$

Source : Élaboration propre

$2a^{+}$ étant l'empattement du bogie du véhicule, qui pour l'ETR 460 est de 2,70 m.

Dans les marches étudiées on peut trouver cette variation du coefficient de frottement en fonction du rayon. En prenant 3 marches avec des rayons moyens différents et en calculant selon la fiche UIC 510–2 la valeur d'un coefficient de frottement maximal, on obtient les résultats suivants :

Tableau 5-3 : Valeurs moyennes du coefficient de frottement dans différentes marches

marche	rayon moyen (m)	$(Y/Q)_{1_int}$ moyenne	$(Y/Q)_{1_int}$ selon UIC 510-2
965-20	1000	0,10	0,12
965-99	530	0,15	0,24
965-78	380	0,25	0,33

Source : Élaboration propre

Les valeurs obtenues suivent la progression indiquée par la fiche UIC 510-2. Ces valeurs expérimentales représentent 66% des valeurs indiquées par la fiche, c'est-à-dire des valeurs maximales du coefficient de frottement, pour des rails totalement secs. Cette différence est due à l'intervention d'autres facteurs comme :

- les angles de braquage de la caisse du véhicule avec la direction du tracé de la voie,
- les différents jeux entre essieux et bogie, qui diminuent l'angle d'attaque,
- l'état du rail, sec ou humide.

S'agissant de la prise en compte du coefficient de frottement $(Y/Q)_{1_int}$ dans les lois retenues comme représentatives des différents efforts, deux approches étaient possibles pour tenir compte du caractère non prédictible de ce paramètre :

- exprimer chaque effort en tenant compte de ce paramètre, puis remplacer le terme $(Y/Q)_{1_int}$ par la valeur maximale qu'il peut prendre, en fonction du rayon (formule de type " a+b/R "), ce qui conduit à augmenter le terme constant et le terme en 1/R de la régression retenue ;
- exprimer directement chaque effort sans tenir compte de ce paramètre, puisqu'il est de toute manière amené à disparaître.

La seconde méthode a été retenue ; on pourrait penser que, ne tenant pas compte du coefficient de frottement maximal possible mais de la valeur effective lors de l'essai, elle se traduise par une sous-estimation des efforts maximaux envisageables.

En réalité il n'est rien car la variabilité de ce paramètre au cours des essais induit en quelque sorte un écart-type supplémentaire, introduit dans le processus de formation retenu pour l'expression des efforts maximaux. En outre, l'obtention de la constante et du coefficient de 1/R de façon directe

(régression) est plus fiable que la méthode introduisant un paramètre intermédiaire ensuite remplacé par son estimation sous forme " a+b/R ".

6 TGV P01

6.1 Caractéristiques du matériel

Le démonstrateur pendulaire TGV P01 est un prototype, résultant de l'installation du système actif d'inclinaison de caisse sur une rame classique de TGV Sud-Est datant de 1981. La rame a été transformée dans un atelier de la SNCF en 1997.

Il s'agit d'une rame composée de 8 remorques intermédiaires (toutes dépourvues de traction), encadrées par deux motrices électriques. Contrairement à l'ETR 460, le TGV est une rame articulée ; chaque motrice repose sur 2 bogies mais les 8 remorques reposent sur seulement 9 bogies au total (chacun des 7 bogies intermédiaires supporte les extrémités de 2 voitures adjacentes).

La vitesse maximale du train a été portée, par rapport aux TGV Sud-Est d'origine, jusqu'à 300 km/h.

Le mécanisme d'inclinaison des caisses qui concerne seulement les voitures remorquées, utilise un système hydraulique FIAT. L'inclinaison des caisses est de 6,3° (5° par rapport à la voie), avec une limitation de 3° entre caisses successives, en raison du système d'articulation entre elles réalisé par les anneaux.

La masse totale, à vide, de la rame est de 325 tonnes, la charge maximale par essieu de 17 tonnes et la longueur de 200 mètres.

D'autres caractéristiques de la rame :

Charge maximale à l'essieu : 170 kN
Empattement de bogie : 3000 mm
Entraxe des pivots de bogies : 18,7 m
Diamètre des roues : 920 mm

6.2 Données utilisées pour l'étude

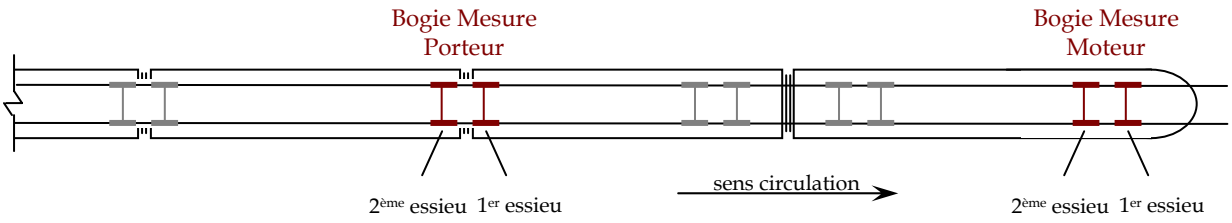
Les données utilisées pour la présente étude ont été obtenues lors des essais d'homologation du démonstrateur TGV pendulaire effectués d'octobre 1998 à janvier 1999 sur la ligne Paris-Toulouse et sur des lignes de la région de Chambéry [16].

Durant les essais d'homologation et en suivant les indications de la fiche UIC 518 on avait équipé deux bogies de mesure ; un bogie porteur et un bogie moteur. En plus, les essais ont été faits suivant deux états de charge :

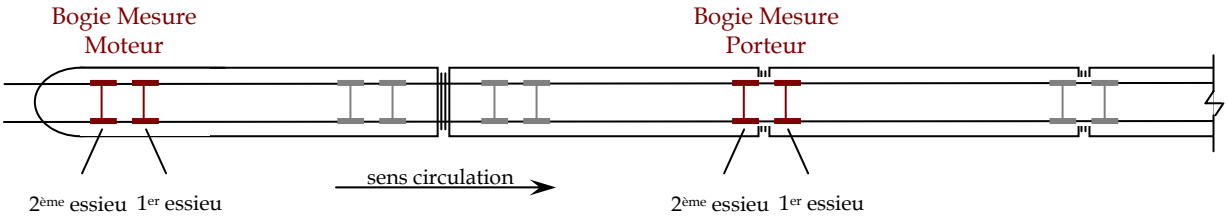
- Vide en ordre de marche (VOM) : état dans lequel se trouve le véhicule, vide de toute charge utile à transporter, mais équipé de tous les éléments et occupé de tout le personnel dont il a besoin pour assurer sa fonction.
- Etat de charge normale (CN) : état dans lequel se trouve un véhicule, en charge, tous les emplacements étant occupés dans des conditions normales d'utilisation, c'est à dire, dans le cas des voyageurs, ceux-ci étant transportés avec un certain confort relatif quant à la fonction considérée (banlieue, omnibus, longue distance).

Figure 6-1 : Numérotation des essieux des Bogies Mesure selon le sens de la marche

Bogies Mesure en tête de rame :



Bogies Mesure en queue de rame :



Source : Élaboration propre

Avec toutes ces données disponibles, et comme l'objectif final de l'étude est de tirer des lois qui représentent les forces maximales exercées par les véhicules, on a considéré opportun de prendre pour chaque force analysée la configuration et le bogie de mesure qui présentaient les valeurs les plus élevées. Pour cette raison, pour chaque force analysée on précise le bogie de mesure qui a été considéré ainsi que l'état de charge de la rame et le sens de marche.

Dans le cas de l'ETR 460 on a estimé que pour une rame à motorisation répartie, on peut considérer que la charge transmise par chaque bogie sur la voie est approximativement égale. Pour le TGV P01 cette hypothèse ne peut pas être admise. Si on compare les valeurs moyennes obtenues de la force verticale maximale sur la roue extérieure exercée par le bogie porteur ou par le bogie moteur, et selon l'état de charge, les résultats sont les suivants:

Tableau 6-1 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure

Configuration	Bogie de mesure	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)
Etat de charge normale et motrice 1 en tête	Moteur	146	136
	Porteur	149	141
Vide en ordre de marche et motrice 1 en tête	Moteur		
	Porteur	139	131

Source : Élaboration propre

Les valeurs du bogie porteur en état de charge normale sont supérieures aux valeurs du bogie moteur. Ainsi donc, les valeurs les plus élevées de la force verticale maximale sur la roue extérieure sont appliquées par le bogie porteur. On devra, donc, considérer ce bogie pour tirer la loi qui explique cette force. D'autre part les valeurs des forces en état de charge normale sont, dans tous les cas, supérieures aux valeurs en état vide en ordre de marche.

Les enregistrements graphiques n'ayant pas été conservés, les données dont on dispose pour faire l'étude sont les données incluses dans le rapport d'essais. Ces données représentent les valeurs à 99,85% de chaque force sur les tronçons que l'Agence d'Essai Ferroviaire a considérés.

Bien que la valeur répertoriée soit proche du maximum, l'impossibilité de connaître avec exactitude le point où elle a été mesurée et par conséquent de la mettre en relation avec les paramètres ponctuels de géométrie de la voie enregistrés par le Mauzin, nous a conduit à ne pas utiliser l'évaluation ponctuelle, comme dans le cas de l'ETR 460, et à faire l'étude à partir des données synthétiques (STS).

Les forces étudiées dans le cas du TGV P01 sont celles indiquées par la fiche UIC 518 du point de vue de la sécurité et de la fatigue de la voie : la somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et

$(\Sigma Y_2)_{max}$), les forces verticales maximales ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) et les forces quasi statiques transversales ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) et verticales ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) sur la roue extérieure, ces dernières en courbes de faible rayon.

Dans les paramètres d'entrée, on a pris la convention de considérer la courbure au lieu du rayon comme paramètre du tracé comme dans le cas de l'ETR 460.

6.3 Lois du comportement du véhicule

6.3.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$)

Dans le plan horizontal, les valeurs les plus élevées de la somme des forces de guidage maximales sur le premier essieu sont exercées par le bogie moteur avec la motrice 1 en tête de rame. Par contre, sur le deuxième essieu elles sont exercées par le même bogie mais avec la motrice 1 en queue de rame.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes de la somme maximale des forces de guidage, selon la configuration de la rame.

Tableau 6-2 : Valeurs moyennes de $(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure

Configuration	Bogie de mesure	$(\Sigma Y_1)_{max}$ (kN)	$(\Sigma Y_2)_{max}$ (kN)
Etat de charge normale et motrice 1 en tête	Moteur	46	32
	Porteur	40	35
Etat de charge normale et motrice 1 en queue	Moteur	33	41
	Porteur	38	37

Source : Élaboration propre

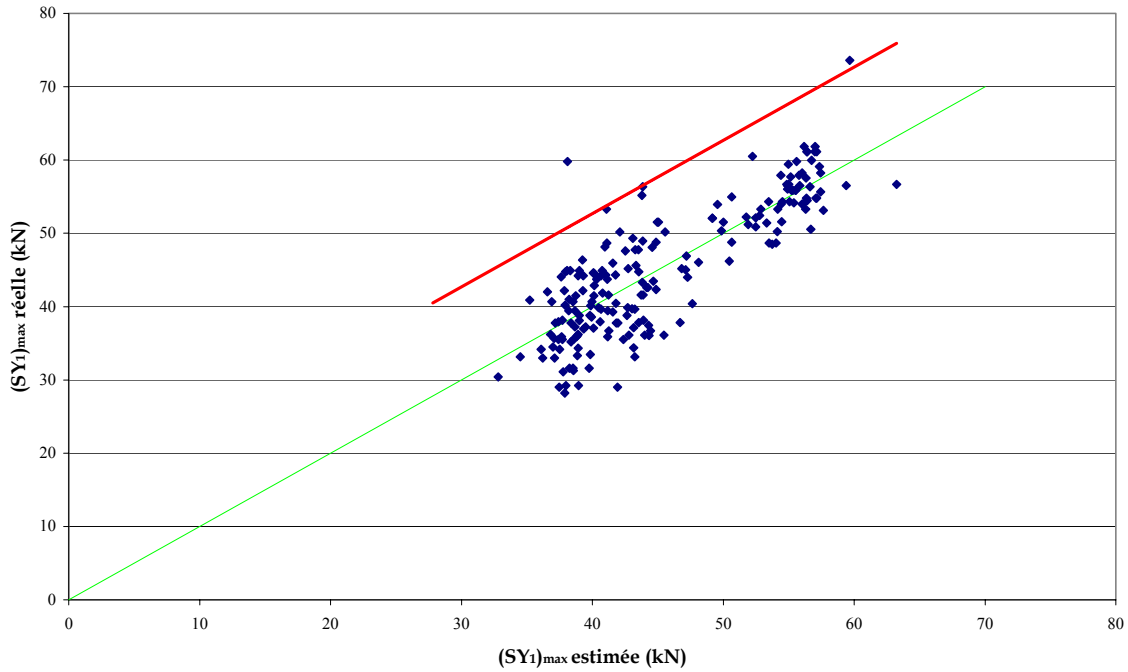
Les sommes des forces d'inscription maximales en courbe sont représentées par les lois :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 11{,}5 + 7200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}055 \times \text{Insuf} + 6{,}5 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6690 \qquad [56]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 24 - 11000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}115 \times \text{Insuf} + 3 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6132 \qquad [57]$$

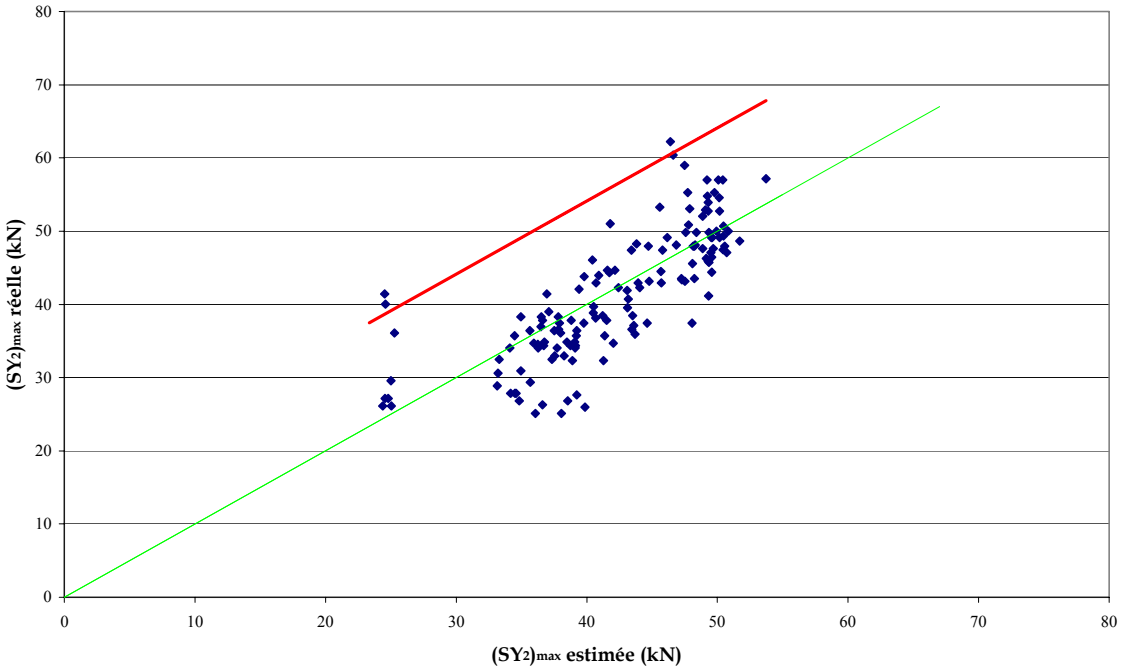
Les deux graphiques ci-après représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues, et l'intervalle de confiance à 99%. Les valeurs au-dessus de l'intervalle de confiance, non représentées correctement par les lois retenues, sont des points qui en raison de caractéristiques géométriques de la voie sortent du cadre de la présente étude, en raison de la présence d'appareils de voie ou de défauts importants de l'infrastructure.

Graphique 6-1 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 6-2 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En résumé les lois d'estimation des valeurs maximales peuvent s'écrire (valeurs supérieures de l'intervalle de confiance à 99%) :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 24{,}2 + 7200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}055 \times \text{Insuf} + 6{,}5 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6690 \qquad [58]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 38{,}1 - 11000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}115 \times \text{Insuf} + 3 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6132 \qquad [59]$$

6.3.2 Forces verticales maximales sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$)

Dans le plan vertical, comme on l'a déjà indiqué, c'est le bogie porteur en charge normale qui exerce les forces maximales les plus élevées sur la file extérieure. Dans le cas du premier essieu les valeurs les plus élevées arrivent quand le bogie se trouve vers la tête de rame, en revanche, pour les efforts du deuxième essieu, les valeurs les plus élevées arrivent quand il se trouve vers la queue de rame.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des forces verticales maximales sur la file extérieure, selon la configuration de la rame.

Tableau 6-3 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure

Configuration	Bogie de mesure	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)
Etat de charge normale et motrice 1 en tête	Moteur	146	136
	Porteur	149	141
Etat de charge normale et motrice 1 en queue	Moteur	137	139
	Porteur	141	148

Source : Élaboration propre

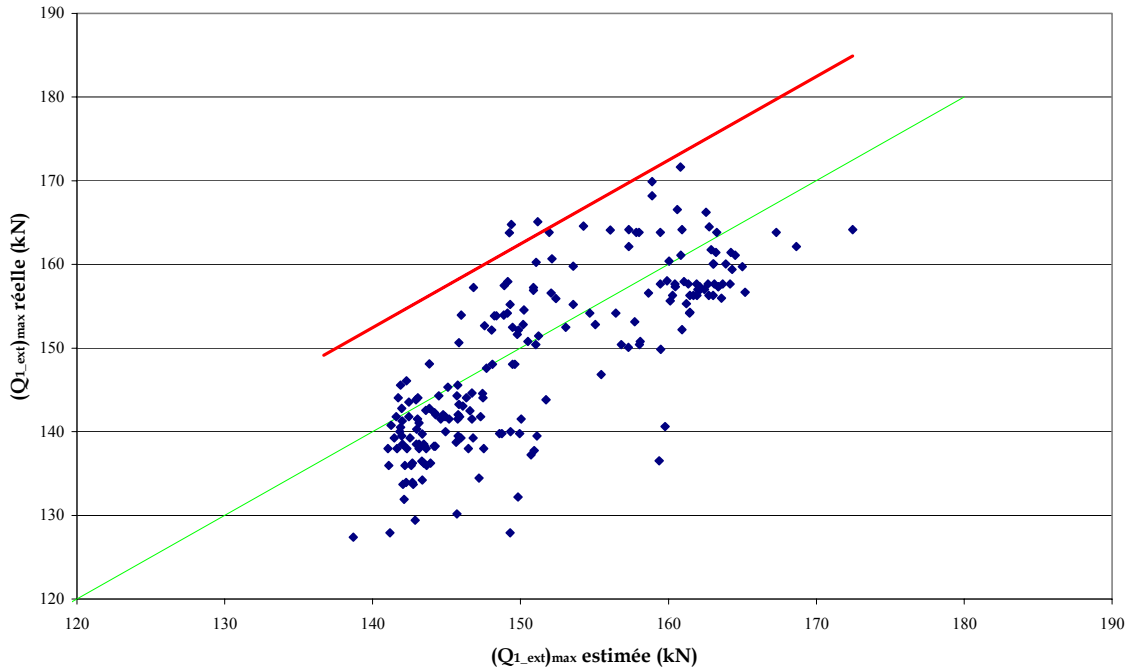
Les forces maximales exercées sur la file extérieure sont régies par les lois :

$$(Q_{1_ext})_{max} = 120 + 8000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}03 \times \text{Insuf} + 10{,}5 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6126 \qquad [60]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 105 + 11000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}077 \times \text{Insuf} + 8 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}4416 \qquad [61]$$

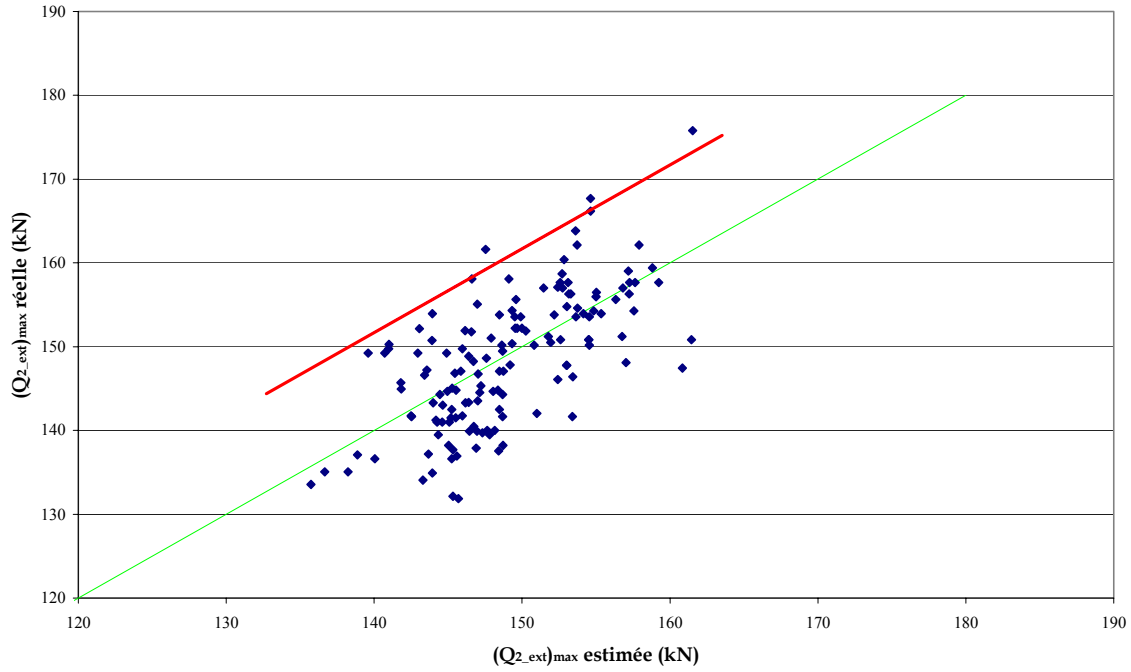
Les deux graphiques ci-après représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues, et l'intervalle de confiance à 95%.

Graphique 6-3 : $(Q_{1_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 6-4 : $(Q_{2_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En résumé les lois d'estimation des valeurs maximales, en prenant en compte la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95%, peuvent s'écrire :

$$(Q_{1_ext})_{max} = 132{,}5 + 8000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}03 \times \text{Insuf} + 10{,}5 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6126 \qquad [62]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 116{,}7 + 11000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}077 \times \text{Insuf} + 8 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}4416 \qquad [63]$$

6.3.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$)

Comme dans le cas des forces verticales maximales exercées sur la file extérieure, le bogie porteur est aussi celui qui exerce les forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure les plus élevées (conformément aux attentes). Le premier essieu exerce des forces verticales plus élevées quand la motrice 1 est en tête et, par contre, le deuxième essieu présente des valeurs plus hautes des forces exercées quand la motrice 1 est en queue de rame. On présente ci-dessous un tableau avec les valeurs moyennes des forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure selon la configuration de la rame.

Tableau 6-4 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure

Configuration	Bogie de mesure	$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)
Etat de charge normale et motrice 1 en tête	Moteur	135	121
	Porteur	144	132
Etat de charge normale et motrice 1 en queue	Moteur	120	127
	Porteur	129	140

Source : Élaboration propre

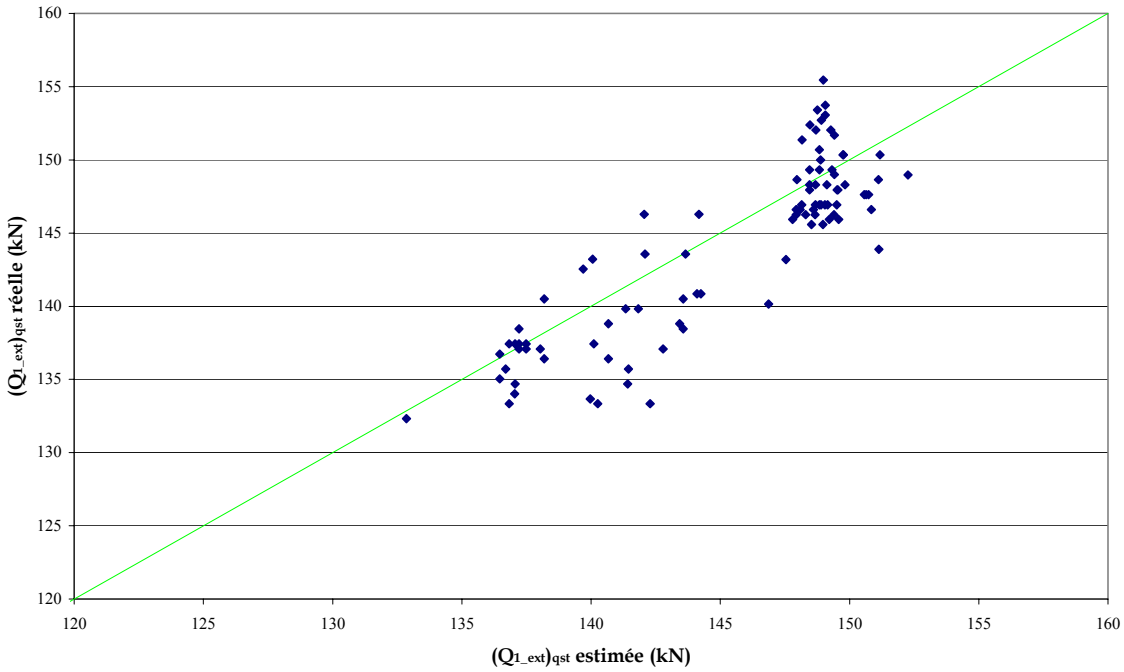
Les forces verticales quasi-statiques sur la file extérieure sont représentées par les lois :

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 100 + 5100 \times 1/\text{rayon} + 0{,}11 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}5782 \qquad [64]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 99 + 9000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}3302 \qquad [65]$$

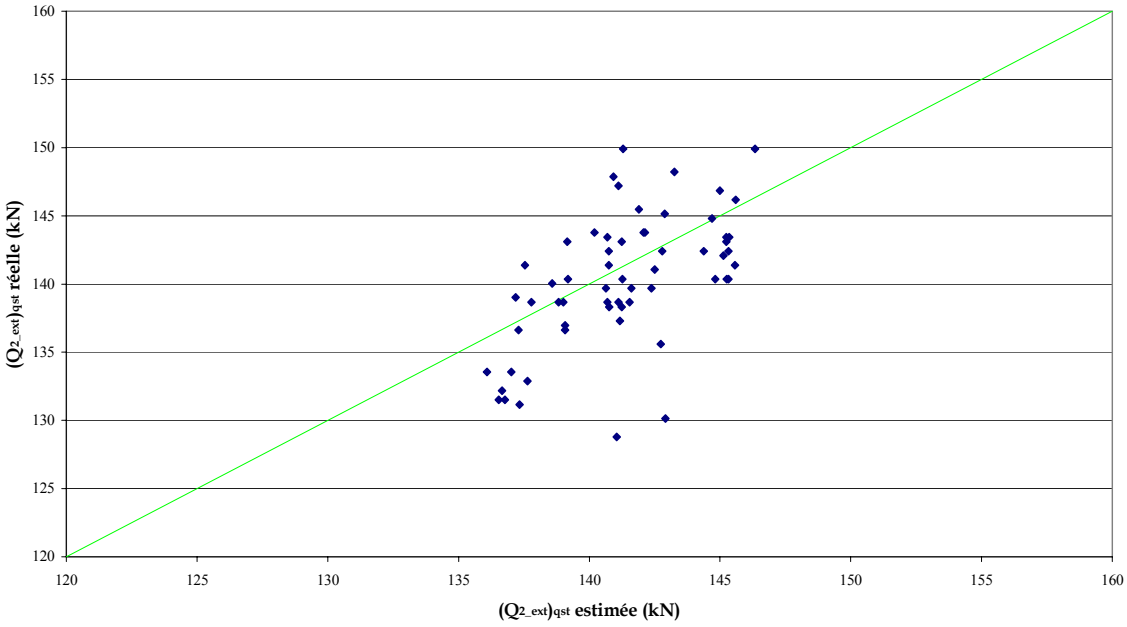
Les graphiques suivants représentent les valeurs réelles mesurées en essai, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues.

Graphique 6-5 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 6-6 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

6.3.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$)

Ci dessous on présente les valeurs moyennes des forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure selon le bogie de mesure et le sens de marche. On met donc en évidence que le bogie qui exerce les forces transversales les plus élevées sur le rail extérieur est le bogie moteur en tête de rame pour les forces transmises par le premier essieu et le bogie moteur en queue de rame pour les forces exercées par le deuxième essieu. On présente ci-dessous un tableau avec les valeurs moyennes des forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure selon la configuration de la rame.

Tableau 6-5 : Valeurs moyennes de $(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure

Configuration	Bogie de mesure	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)
Etat de charge normale et motrice 1 en tête	Moteur	53	16
	Porteur	52	21
Etat de charge normale et motrice 1 en queue	Moteur	44	22
	Porteur	49	18

Source : Élaboration propre

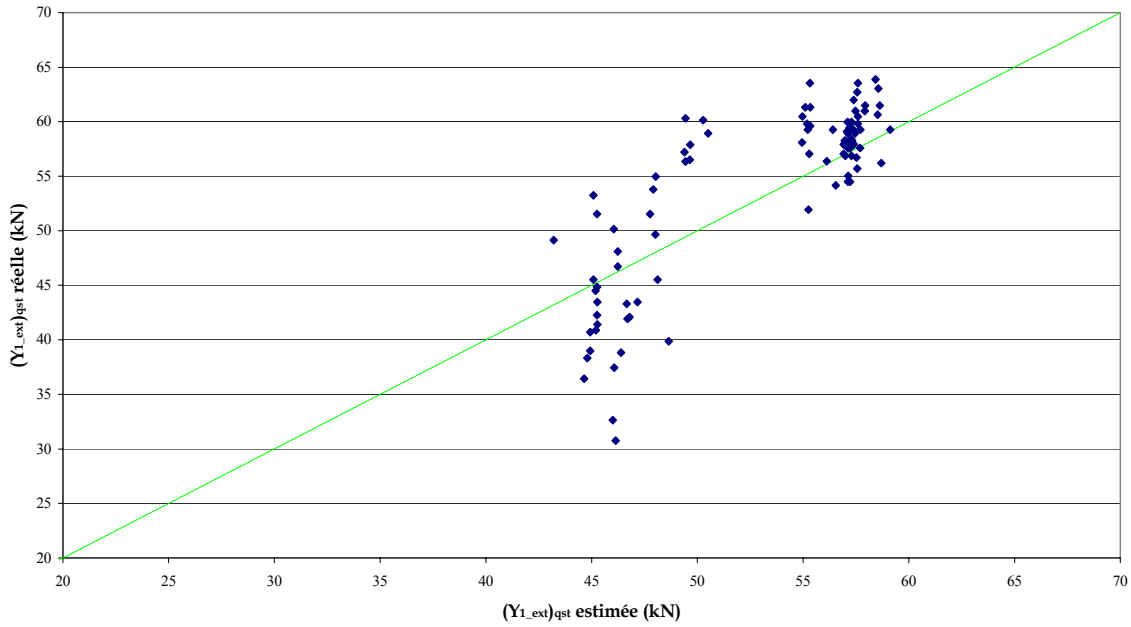
Les lois retenues qui expliquent le comportement du véhicule TGV P01 en termes de forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure sont :

$$(Y_{1_ext})_{qst} = 22 + 6500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}046 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}3621 \qquad [66]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = -11{,}4 - 600 \times 1/\text{rayon} + 0{,}12 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}4303 \qquad [67]$$

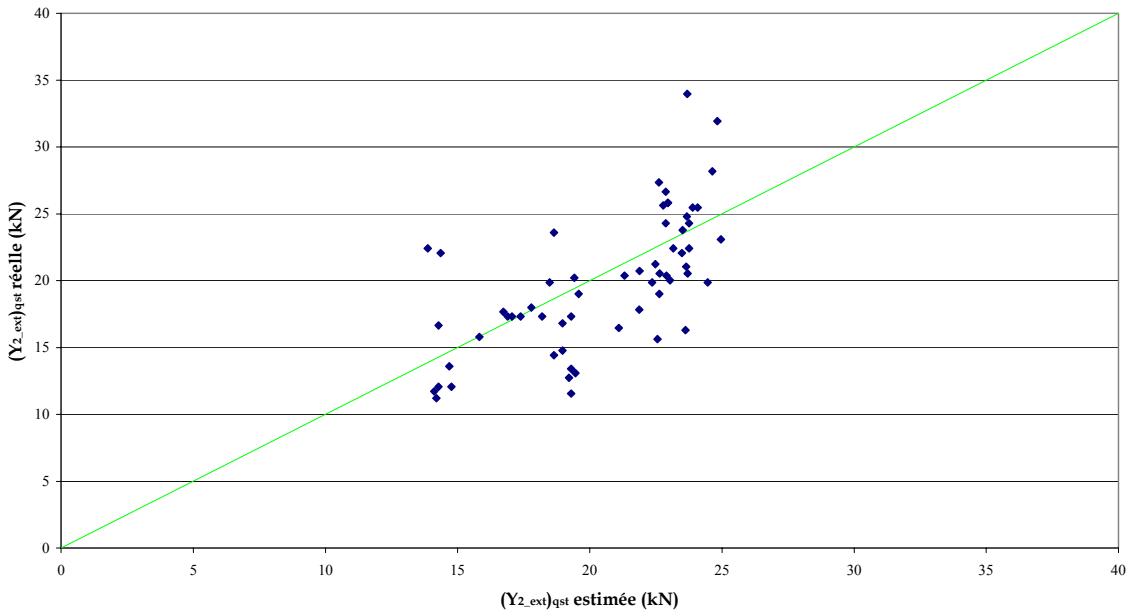
Ci-après la représentation graphique des valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées.

Graphique 6-7 : $(Y_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 6-8 : $(Y_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

A partir des résultats obtenus pour les forces transversales quasi-statiques on peut conclure que dans le plan horizontal, le premier essieu exerce des forces plus élevées quand il se trouve en tête de rame

et, en revanche, sur le deuxième essieu, les forces sont plus importantes quand le bogie se trouve en queue de rame.

Ces résultats, valables aussi bien pour la somme des forces de guidage maximales que pour les forces transversales quasi-statiques de la seule roue extérieure, peuvent être expliqués par les efforts d'inscription du bogie en courbe et l'influence des défauts de la voie sur le véhicule. L'inscription du véhicule en courbe est assurée en premier ressort par le premier essieu de la rame, qui en outre est le plus sensible à l'influence des défauts de la voie.

Quant aux derniers véhicules, ils sont affectés de mouvements transversaux de caisse qui vont en s'amplifiant vers l'arrière de la rame et se répercutent sur les bogies. Le dernier bogie, sur lequel ne repose qu'une seule extrémité de caisse, est particulièrement sujet à ces mouvements de lacet.

7 Démonstrateur X-TER Pendulaire

7.1 Caractéristiques du matériel

Le démonstrateur X-TER Pendulaire est un prototype, résultant de l'installation d'un système actif d'inclinaison de caisse sur un automoteur diesel prélevé sur le parc TER Aquitaine. La rame a été transformée dans un atelier de la SNCF en 1999.

Il s'agit d'une rame composée de 2 motrices diesel qui reposent sur 2 bogies chacune.

Les modifications essentielles réalisées sont l'adaptation des caisses aux nouveaux bogies équipés d'une traverse de pendulation située au-dessus de la suspension secondaire, et la mise en place d'un dispositif de pendulation FIAT fonctionnant avec des vérins hydrauliques et une suspension transversale active.

La masse totale, à vide, de la rame est de 132 tonnes, la charge maximale par essieu de 17,5 tonnes et la longueur de 52,9 mètres.

D'autres caractéristiques de la rame :

Charge maximale à l'essieu : 175 kN
Empattement de bogie : 2600 mm
Entraxe des pivots de bogies : 19 m

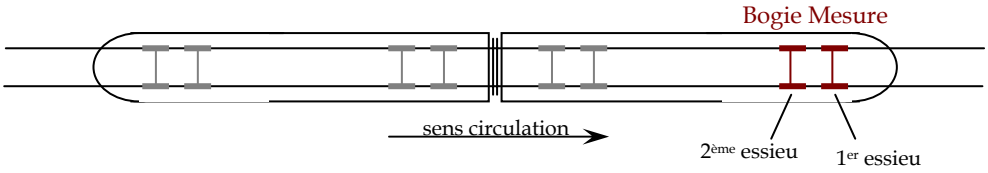
7.2 Données utilisées pour l'étude

Les données utilisées du X-TER Pendulaire par la présente étude ont été obtenues à partir des essais qui ont été faits entre octobre 1999 et février 2000 sur les lignes Clermont Ferrand–Issoire, Marseille–Toulon et Rennes–Montreuil sur Ille.

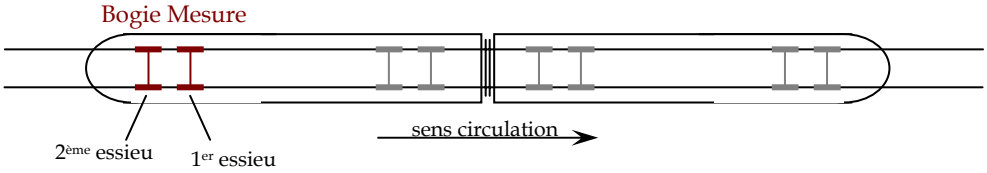
Durant les essais on avait équipé d'essieux de mesure un bogie d'extrémité et les essais ont été faits dans les deux sens de marche du véhicule, c'est-à-dire qu'on dispose des enregistrements du bogie en tête et en queue de rame.

Figure 7-1 : Numérotation des essieux du Bogie Mesure selon le sens de la marche

Bogie Mesure en tête de rame :



Bogie Mesure en queue de rame :



Source : Élaboration propre

Avec toutes ces données disponibles, et comme l'objectif de l'étude est de tirer des lois représentant les forces maximales exercées par les véhicules, on a considéré opportun de prendre pour chaque force analysée la position du bogie de mesure présentant les valeurs les plus élevées. Pour cette raison, pour chaque force analysée on précise la position du bogie de mesure prise en compte.

Les études statistiques ont été menées à partir du dépouillement manuel des résultats de 6 marches (3 marches par sens de circulation) et des données synthétiques de la qualité géométrique (STS).

Dans la fiche UIC 518, qui a été le référentiel suivi dans la présente étude, on inclut comme efforts à analyser du point de vue de la sécurité et de la fatigue de la voie : la somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$), les forces verticales maximales ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$) et les forces quasi statiques transversales ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$) et verticales ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$) sur la roue extérieure, ces dernières en courbes de faible rayon. Dans cette étude, puisqu'on disposait d'autres informations, et afin de tirer des lois les plus générales possibles, on a étudié les forces quasi statiques transversales et verticales sur la roue extérieure en courbes de faible et grand rayon. De plus, on a étudié les forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$) et la somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$). Il faut noter que les forces transversales maximales sur la roue extérieure peuvent être, dans certains cas, la cause de dégâts ponctuels sur l'infrastructure comme des ruptures d'attaches. En outre, la somme des forces de guidage quasi

statiques permet une caractérisation détaillée de la répartition des forces entre les essieux du bogie du véhicule selon le tracé.

Dans les paramètres d'entrée, on a pris la convention de considérer la courbure au lieu du rayon comme paramètre du tracé comme dans les cas de l'ETR 460 et du TGV P01.

7.3 Lois du comportement du véhicule

7.3.1 Somme des forces de guidage maximales ($(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$)

Les valeurs les plus élevées de la somme maximale des forces de guidage du premier essieu sont relevées lorsque le bogie est en tête de rame. Par contre, sur le deuxième essieu elles sont obtenues lorsque le bogie se trouve en queue de rame.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes de la somme maximale des forces de guidage, selon le sens de circulation de la rame.

Tableau 7-1 : Valeurs moyennes de $(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$ selon le sens de circulation de la rame

Sens de circulation	$(\Sigma Y_1)_{max}$ (kN)	$(\Sigma Y_2)_{max}$ (kN)
Bogie Mesure en tête de rame	33,4	42,2
Bogie Mesure en queue de rame	32,2	43 ,3

Source : Élaboration propre

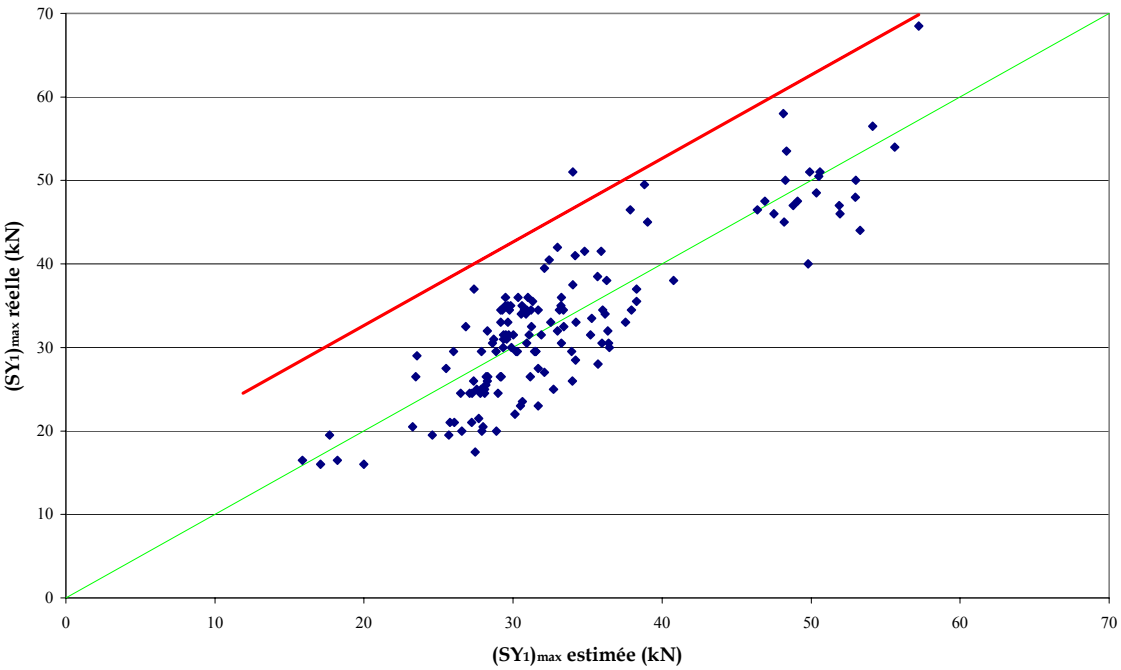
Les sommes des forces d'inscription maximales en courbe sont représentées par les lois :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = -27{,}7 + 8200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}145 \times \text{Insuf} + 7{,}5 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}7504$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 1{,}8 - 7200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}17 \times \text{Insuf} + 10 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6695$$

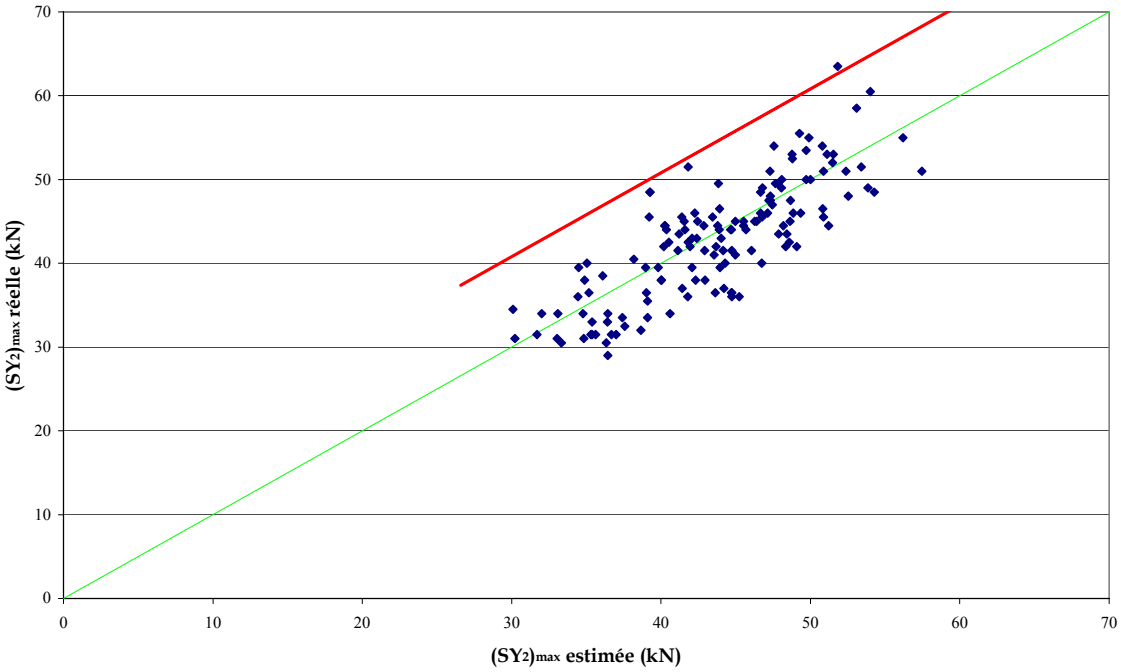
Les deux graphiques ci-après représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues, et l'intervalle de confiance à 99%. Les valeurs au-dessus de l'intervalle de confiance, non représentées correctement par les lois retenues, sont des points qui en raison de caractéristiques géométriques de la voie sortent du cadre de la présente étude, en raison de la présence d'appareils de voie ou de défauts importants de l'infrastructure.

Graphique 7-1 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 7-2 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En résumé les lois d'estimation des valeurs maximales peuvent s'écrire (valeurs supérieures de l'intervalle de confiance à 99%) :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = -15 + 8200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}145 \times \text{Insuf} + 7{,}5 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}7504 \qquad [68]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 12{,}6 - 7200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}17 \times \text{Insuf} + 10 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}6695 \qquad [69]$$

Des lois obtenues on peut tirer différentes conclusions :

- Le dressage a une influence notoire sur les forces d'inscription en courbe exercées par le premier essieu du bogie en tête et sur les forces exercées par le deuxième essieu du bogie en queue.
- Le tracé de la voie, qui est représenté dans la loi par la courbure, intervient de façon contraire sur le premier et le deuxième essieu, dû, en une grande partie, à l'interaction bogie-caisse.

7.3.2 Forces verticales maximales sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$)

Dans le plan vertical, les valeurs les plus élevées des forces verticales maximales sur la file extérieure arrivent quand le bogie mesure se trouve en tête de rame, tant pour le premier essieu que pour le deuxième.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des forces verticales maximales sur la file extérieure, selon le sens de circulation de la rame.

Tableau 7-2 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$ selon le sens de circulation de la rame

Sens de circulation	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)
Bogie Mesure en tête de rame	147	144
Bogie Mesure en queue de rame	144	143

Source : Élaboration propre

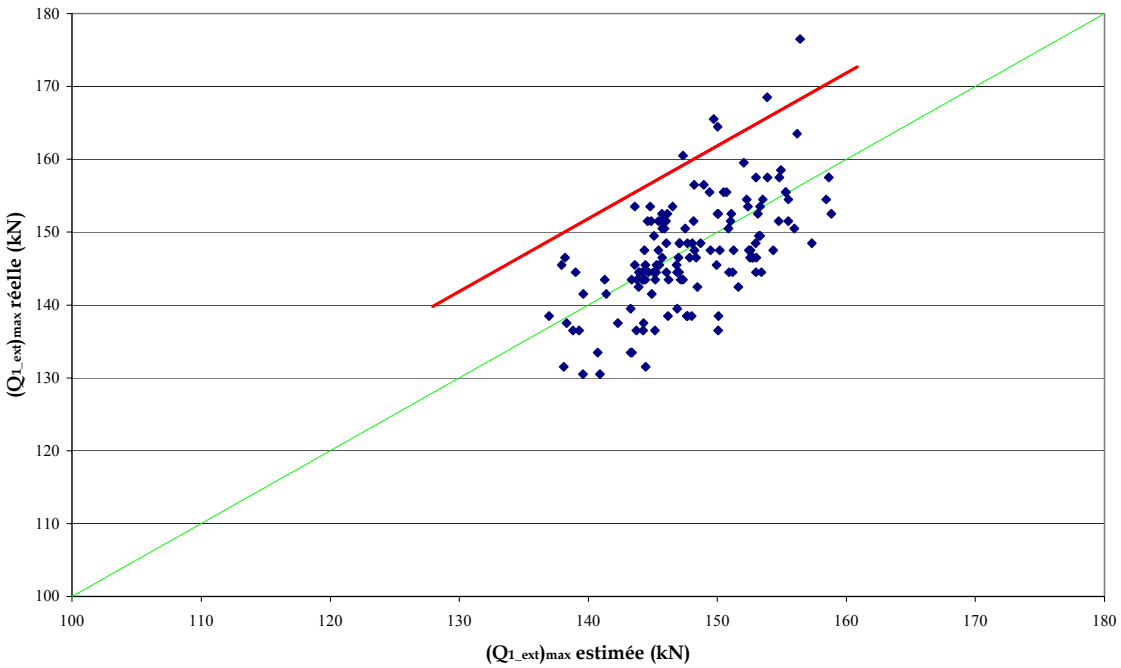
Les forces maximales exercées sur la file extérieure sont régies par les lois :

$$(Q_{1_ext})_{max} = 105 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}124 \times \text{Insuf} + 7{,}1 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}4203 \qquad [70]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 107 - 9900 \times 1/\text{rayon} + 0{,}175 \times \text{Insuf} + 8{,}7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5625 \qquad [71]$$

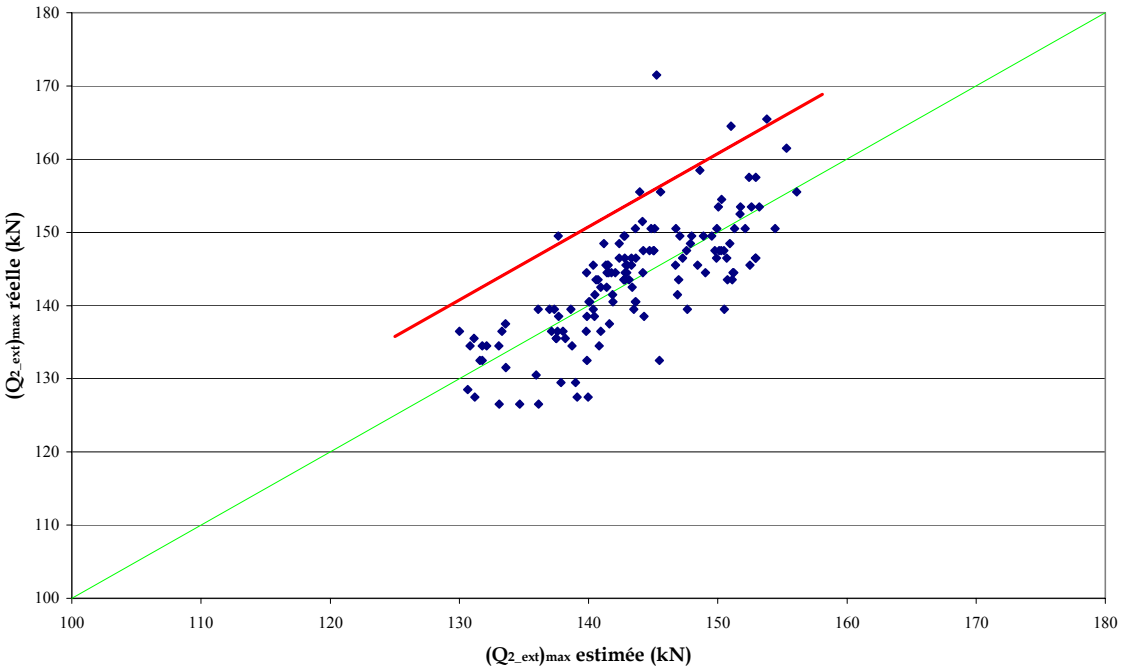
Les deux graphiques ci-après représentent les valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues, et l'intervalle de confiance à 95%.

Graphique 7-3 : $(Q_{1_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 7-4 : $(Q_{2_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

En résumé les lois d'estimation des valeurs maximales, en prenant en compte la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95%, peuvent s'écrire :

$$(Q_{1_ext})_{max} = 114{,}5 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}124 \times \text{Insuf} + 7{,}1 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}4203 \qquad [72]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 117{,}8 - 9900 \times 1/\text{rayon} + 0{,}175 \times \text{Insuf} + 8{,}7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0{,}5625 \qquad [73]$$

7.3.3 Forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$)

Comme dans le cas des forces verticales maximales exercées sur la file extérieure, les valeurs les plus élevées des forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure sont exercées par le bogie en tête de rame, tant pour le premier essieu que pour le deuxième essieu. On présente ci-dessous un tableau avec les valeurs moyennes des forces verticales quasi-statiques sur la roue extérieure selon le sens de circulation de la rame.

Tableau 7-3 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$ selon le sens de circulation de la rame

Sens de circulation	$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)
Bogie Mesure en tête de rame	134	132
Bogie Mesure en queue de rame	130	130

Source : Élaboration propre

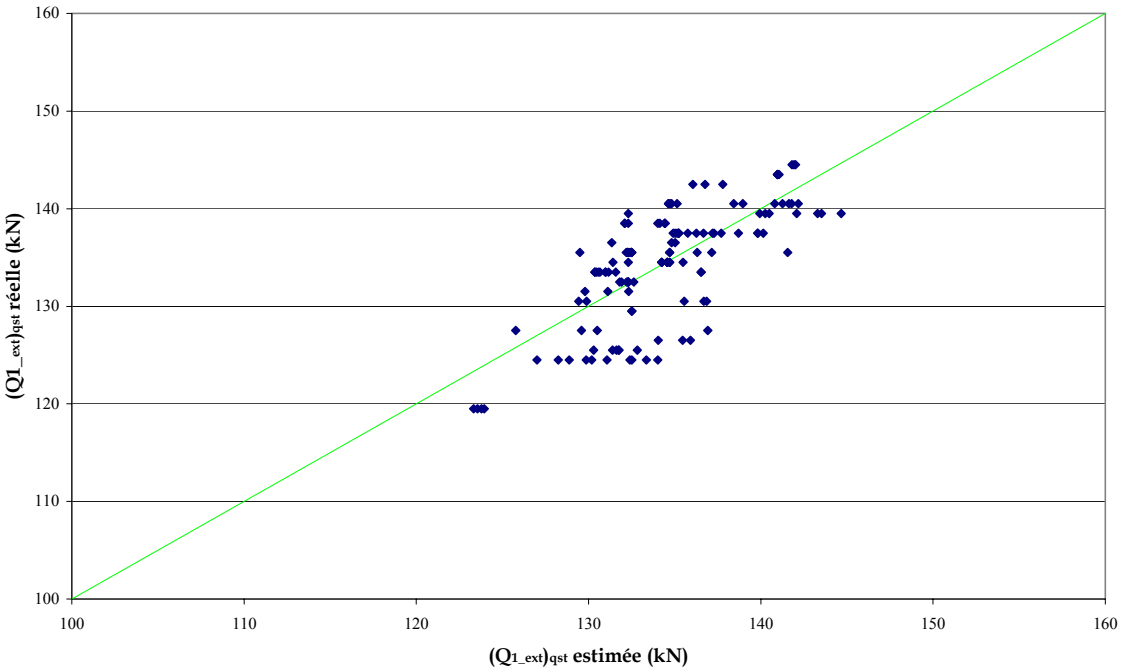
Les forces verticales quasi-statiques sur la file extérieure sont représentées par les lois :

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 86 + 5300 \times 1/\text{rayon} + 0{,}15 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}5387 \qquad [74]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 91{,}5 - 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}166 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}5584 \qquad [75]$$

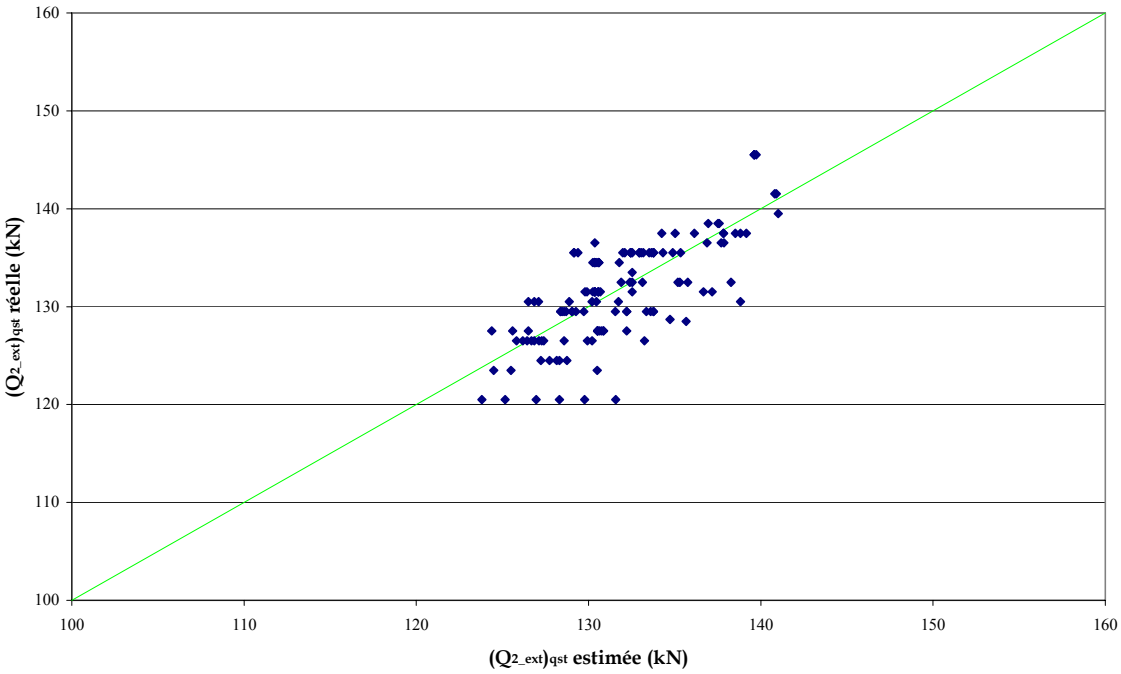
Les graphiques suivants représentent les valeurs réelles obtenues en essai, par rapport aux valeurs estimées par les lois retenues.

Graphique 7-5 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 7-6 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

7.3.4 Forces transversales quasi-statiques sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$)

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des forces transversales quasi-statiques de la roue extérieure selon le sens de marche. Il montre que le bogie qui exerce les forces transversales les plus élevées sur le rail extérieur est le bogie en tête de rame pour les forces transmises par le premier essieu et le bogie en queue de rame pour les forces exercées par le deuxième essieu.

Tableau 7-4 : Valeurs moyennes de $(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$ selon le sens de circulation de la rame

Sens de circulation	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)
Bogie Mesure en tête de rame	33,6	26,3
Bogie Mesure en queue de rame	33,3	27,4

Source : Élaboration propre

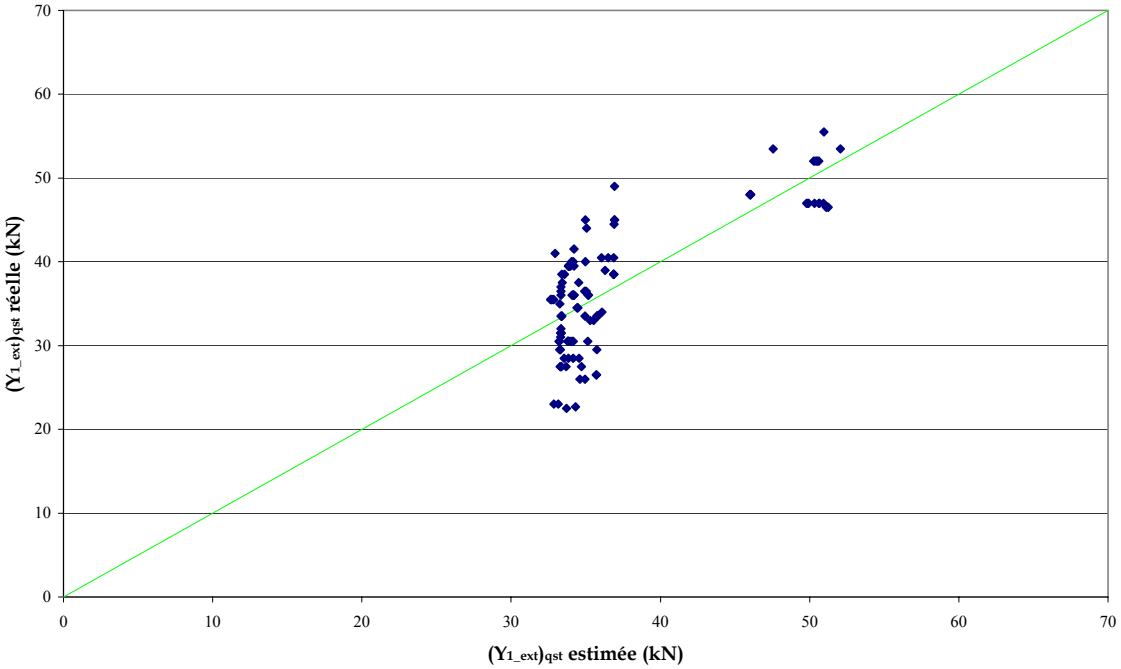
Les lois retenues qui expliquent le comportement du véhicule X-TER Pendulaire en termes de forces transversales quasi-statiques sur la file extérieure sont :

$$(Y_{1_ext})_{qst} = 7{,}4 + 10000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}036 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}6097 \qquad [76]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = -18{,}3 - 1150 \times 1/\text{rayon} + 0{,}177 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0{,}8725 \qquad [77]$$

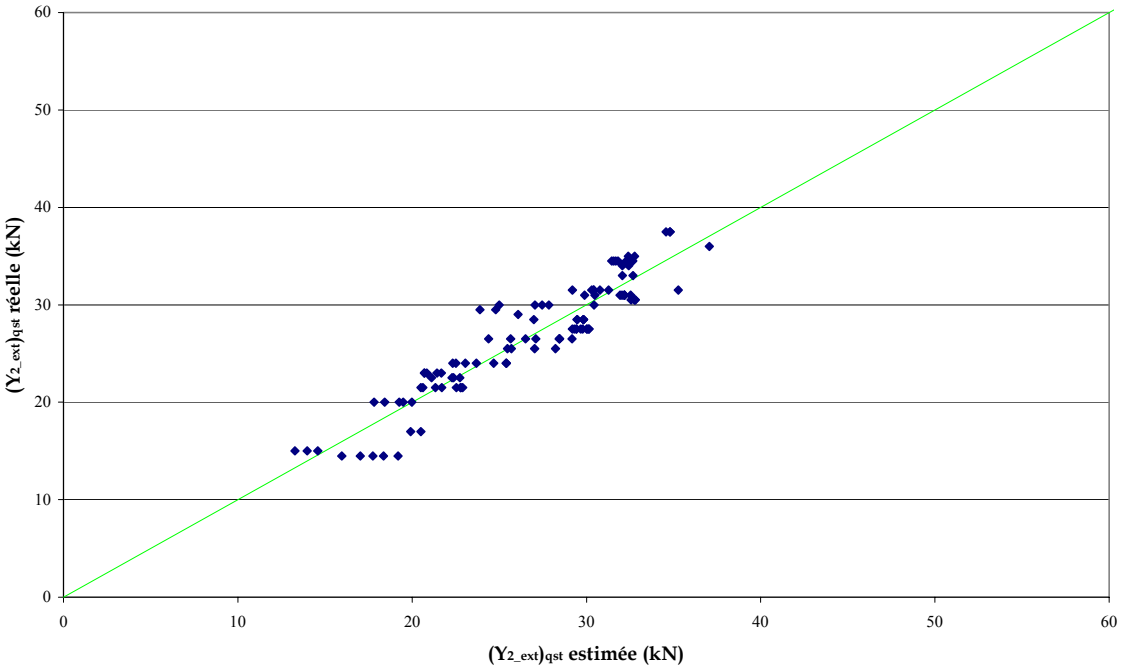
Ci-après la représentation graphique des valeurs réelles mesurées, par rapport aux valeurs estimées.

Graphique 7-7 : $(Y_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Graphique 7-8 : $(Y_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi



Source : Élaboration propre

Des résultats obtenus pour les forces transversales quasi-statiques, on peut conclure que dans le plan horizontal, le premier essieu du bogie en tête de rame exerce des forces plus élevées et, en revanche, sur le deuxième essieu, les forces sont plus importantes pour le bogie qui se trouve en queue de rame.

Ces résultats, valables aussi bien pour la somme maximale des forces de guidage que pour les forces transversales quasi-statiques, peuvent être expliqués par les efforts d'inscription du bogie en courbe et l'influence des défauts de la voie sur le véhicule. L'inscription du véhicule en courbe est assurée en premier ressort par le premier essieu de la rame, qui en outre est le plus sensible à l'influence des défauts de la voie.

Quant aux derniers véhicules, ils sont affectés de mouvements transversaux de caisse qui vont en s'amplifiant vers l'arrière de la rame et se répercutent sur les bogies. Le dernier bogie est particulièrement sujet à ces mouvements de lacet.

7.3.5 Forces transversales maximales sur la roue extérieure ($(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$)

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des forces transversales maximales sur la file extérieure selon le sens de marche. Il montre que le bogie qui exerce les forces transversales les plus élevées sur le rail extérieur est le bogie en tête de rame pour les forces transmises par le premier essieu et le bogie en queue de rame pour les forces exercées par le deuxième essieu.

Tableau 7-5 : Valeurs moyennes de $(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$ selon le sens de circulation de la rame

Sens de circulation	$(Y_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{max}$ (kN)
Bogie Mesure en tête de rame	45,3	32,4
Bogie Mesure en queue de rame	45,1	36,7

Source : Élaboration propre

Les lois retenues qui expliquent le comportement de l'automoteur X-TER Pendulaire en termes de forces transversales maximales sur la file extérieure sont :

$$(Y_{1_ext})_{max} = -14,7 + 13600 \times 1/\text{rayon} + 0,1 \times \text{Insuf} + 7,7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0,6956 \qquad [78]$$

$$(Y_{2_ext})_{max} = -14 - 9900 \times 1/\text{rayon} + 0,215 \times \text{Insuf} + 12 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0,7504 \qquad [79]$$

Les forces transversales maximales exercées par la roue extérieure, qui ne sont pas objet d'étude dans les essais d'homologation de véhicules en suivant la fiche UIC 518, peuvent être, dans certains cas, la

cause de dégâts ponctuels par fatigue sur l'infrastructure comme des ruptures d'attaches. Ces situations apparaissent surtout en voies avec défauts géométriques ponctuels très importants, comme par exemple, en courbe de faible rayon de voie avec joints, où les défauts de dressage sont souvent importants.

Les lois d'estimation des valeurs maximales des forces transversales sur la file extérieure, en prenant l'intervalle de confiance à 95%, sont :

$$(Y_{1_ext})_{max} = 0,3 + 13600 \times 1/\text{rayon} + 0,1 \times \text{Insuf} + 7,7 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0,6956 \qquad [80]$$

$$(Y_{2_ext})_{max} = -5,3 - 9900 \times 1/\text{rayon} + 0,215 \times \text{Insuf} + 12 \times \text{Dr} \qquad r^2 = 0,7504 \qquad [81]$$

7.3.6 Somme des forces de guidage quasi statiques ($(\Sigma Y_1)_{qst}$ et $(\Sigma Y_2)_{qst}$)

La somme des forces de guidage quasi statiques d'un véhicule n'est pas prise en compte pour l'homologation du véhicule. C'est pour cette raison qu'elle n'est pas objet d'étude par la fiche UIC 518. Cependant la répartition des composantes quasi statiques et aléatoires des forces de guidage entre le premier et le deuxième essieu n'est pas toujours la même pour n'importe quel rayon de courbe. Les véhicules présentent un rayon caractéristique où on trouve un changement de répartition des composantes quasi statiques entre les deux essieux d'un bogie.

Vu qu'on disposait des enregistrements de ces forces, on a estimé intéressant de les inclure dans la présente étude. Dans la partie du comportement du véhicule, on étudiera cette répartition des composantes quasi-statiques et aléatoires de la somme des forces de guidage.

Les lois qui ont été considérées valables pour représenter la somme des forces de guidage quasi statiques du bogie en tête de rame sont :

$$(\Sigma Y_1)_{qst} = -11,8 + 7100 \times 1/\text{rayon} + 0,09 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0,6623 \qquad [82]$$

$$(\Sigma Y_2)_{qst} = 12 - 5000 \times 1/\text{rayon} + 0,13 \times \text{Insuf} \qquad r^2 = 0,6961 \qquad [83]$$

On peut conclure que comme dans le cas de la somme des forces de guidage maximales, le tracé de la voie, représenté par la courbure, intervient de façon contraire sur le premier et le deuxième essieu. Ce comportement est dû, en grande partie, à l'interaction bogie-caisse.

8 Comparaison entre véhicules

A partir des résultats issus de l'étude individuelle de chaque véhicule, il est intéressant d'établir une comparaison de leurs comportements et de leurs influences respectives sur l'infrastructure.

Comme dans le cas de l'ETR 460 les données dont on disposait pour faire l'étude ont été mesurées sur le bogie moteur en tête de la rame, pour la présente étude on a pris les données enregistrées sur le bogie moteur en tête de la rame du TGV P01 et du X-TER Pendulaire, afin d'obtenir des résultats véritablement comparables.

La comparaison a été réalisée à partir des deux directions des sollicitations du véhicule ; les sollicitations en direction verticale, et les sollicitations en direction transversale :

8.1 Sollicitations en direction verticale

La différence de charge par essieu que présentent les trois véhicules détermine en grande partie les sollicitations exercées par le véhicule en direction verticale. Rappelons que la configuration du TGV P01 avec un bogie supportant deux voitures consécutives et le fait que tant le TGV P01 comme le X-TER Pendulaire s'agitent des véhicules non conçus a priori pour la pendulation par rapport à la conception pendulaire de l'ETR 460 ont pour résultat une charge à l'essieu beaucoup plus élevée que la charge à l'essieu de l'ETR 460 (170 kN dans le cas du TGV P01 et 175 kN dans le cas du X-TER Pendulaire par rapport aux 125 kN de l'ETR 460).

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des efforts exercés par les roues extérieures des bogies moteurs en tête de la rame des trois rames. Il donne les valeurs moyennes de marches avec différentes caractéristiques de tracé, définies par le rayon moyen des tronçons choisis.

Tableau 8-1 : Valeurs moyennes des efforts verticaux du bogie moteur en tête de rame du TGV P01, de l'ETR 460 et du X-TER Pendulaire

TGV P01	**Rayon (m)**	$(Q_{1_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Q_{2_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Q_{1_ext})_{qst}$ *(kN)*	$(Q_{2_ext})_{qst}$ *(kN)*
CGR*	972	142	140	- **	- **
CRM*	783	144	139	- **	- **
CPR*	544	147	137	130	121
CTPR*	302	151	127	127	121
GLOBAL	556	146	136	128	121

ETR 460	**Rayon (m)**	$(Q_{1_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Q_{2_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Q_{1_ext})_{qst}$ *(kN)*	$(Q_{2_ext})_{qst}$ *(kN)*
CGR*	1000	90,9	93,9	85,5	88,0
CPR*	502	94,1	97,0	89,8	93,4
CTPR*	383	96,9	97,2	87,2	90,2
GLOBAL	633	92,6	96,2	88,0***	91,9***

X-TER " DXP "	**Rayon (m)**	$(Q_{1_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Q_{2_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Q_{1_ext})_{qst}$ *(kN)*	$(Q_{2_ext})_{qst}$ *(kN)*
CGR*	870	147	151	128	132
CPR*	575	146	143	135	132
CTPR*	300	154	135	140	128
GLOBAL	598	147	144	137***	130***

* CGR : courbes de grand rayon
CRM : courbes de rayon moyen
CPR : courbes de petit rayon
CTPR : courbes de très petit rayon

** valeurs non disponibles
*** valeurs CPR + CTPR

Source : Élaboration propre

Au tableau précédent on voit clairement la plus grande sollicitation verticale du TGV et du X-TER pour des caractéristiques de tracé comparables. On verra par la suite comment cette plus grande sollicitation verticale influe sur les limitations de circulation à imposer.

En comparant les lois qui régissent ces sollicitations pour le bogie moteur en tête de rame de chaque véhicule :

- **$(Q_{1_ext})_{max}$**

TGV P01 : $(Q_{1_ext})_{max}$ = 105,4 + 4000 x 1/rayon + 0,12 x Insuf + 10,5 x Dr r^2 = 0,5636 [84]

ETR 460 : $(Q_{1_ext})_{max}$ = 70,2 + 1500 x 1/rayon + 0,08 x Insuf + 2,9 x Dr r^2 = 0,5028 [85]

X-TER P : $(Q_{1_ext})_{max}$ = 114,5 + 1500 x 1/rayon + 0,124 x Insuf + 7,1 x Dr r^2 = 0,4203 [86]

- **$(Q_{2_ext})_{max}$**

TGV P01 : $(Q_{2_ext})_{max}$ = 117,8 - 6200 x 1/rayon + 0,125 x Insuf + 7 x Dr r^2 = 0,5365 [87]

ETR 460 : $(Q_{2_ext})_{max}$ = 72,4 + 1250 x 1/rayon + 0,1 x Insuf + 1,4 x Dr r^2 = 0,5586 [88]

X-TER P : $(Q_{2_ext})_{max}$ = 117,8 - 9900 x 1/rayon + 0,175 x Insuf + 8,7 x Dr r^2 = 0,5625 [89]

- **$(Q_{1_ext})_{qst}$**

TGV P01 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ = 95 + 6500 x 1/rayon + 0,085 x Insuf r^2 = 0,6900 [90]

ETR 460 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ = 58 + 2900 x 1/rayon + 0,085 x Insuf r^2 = 0,6286 [91]

X-TER P : $(Q_{1_ext})_{qst}$ = 86 + 5300 x 1/rayon + 0,15 x Insuf r^2 = 0,5387 [92]

- **$(Q_{2_ext})_{qst}$**

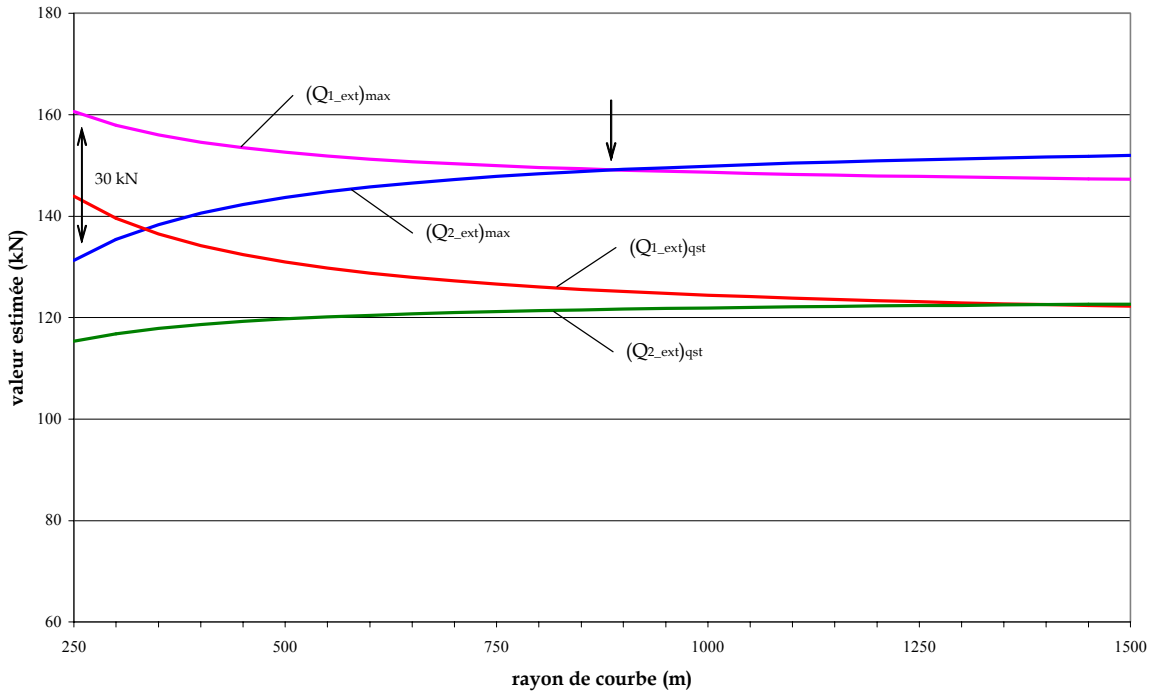
TGV P01 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ = 85 - 2200 x 1/rayon + 0,145 x Insuf r^2 = 0,3362 [93]

ETR 460 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ = 61 + 3500 x 1/rayon + 0,09 x Insuf r^2 = 0,6360 [94]

X-TER P : $(Q_{2_ext})_{qst}$ = 91,5 - 1500 x 1/rayon + 0,166 x Insuf r^2 = 0,5584 [95]

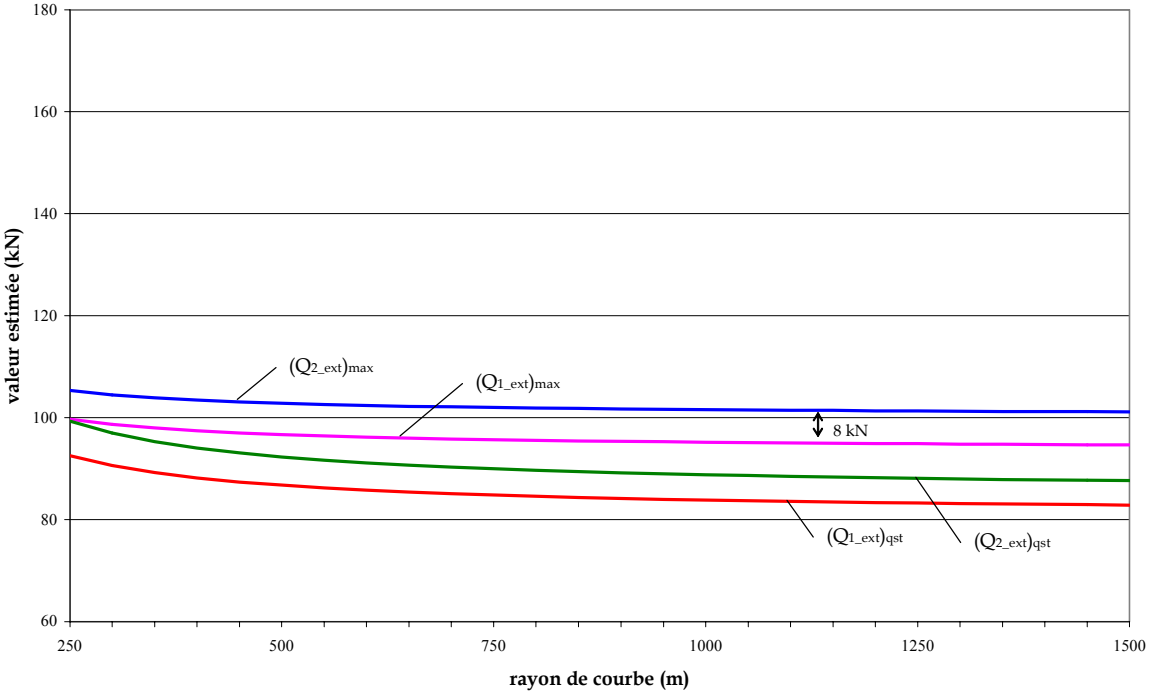
Outre une plus grande sollicitation verticale en valeur absolue, la répartition de cette sollicitation entre les deux essieux du bogie est assez différente entre les trois véhicules. Pour l'ETR 460 la répartition des efforts verticaux entre le premier et le deuxième essieu du bogie est peu dépendante du rayon de courbe. Par contre, dans le cas du TGV P01 la répartition est assez différente selon les caractéristiques du tracé. Ainsi, pour les courbes de rayon plus faible, les plus contraignantes, la force verticale maximale transmise par le premier essieu du bogie est nettement supérieure à celle transmise par le deuxième essieu du bogie. Par exemple, pour des rayons d'à peu près 260 m, la différence entre les deux essieux est de 30 kN. A mesure que le rayon de la courbe croît, cette différence s'atténue et s'annule vers 900 m de rayon où les forces sont égales. Cette différence de répartitions entre le premier et le deuxième essieu du bogie peut être observée en représentant les valeurs des efforts exercés par les véhicules en fonction du rayon de la courbe. On a considéré une qualité géométrique de la voie moyenne (dressage = 0,65) et une insuffisance de dévers de 260 mm, valeur maximale permise pour la circulation de trains pendulaires

Graphique 8-1 : Répartition des efforts verticaux entre les deux essieux du bogie de tête du TGV P01 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,65 et I=260 mm)



Source : Élaboration propre

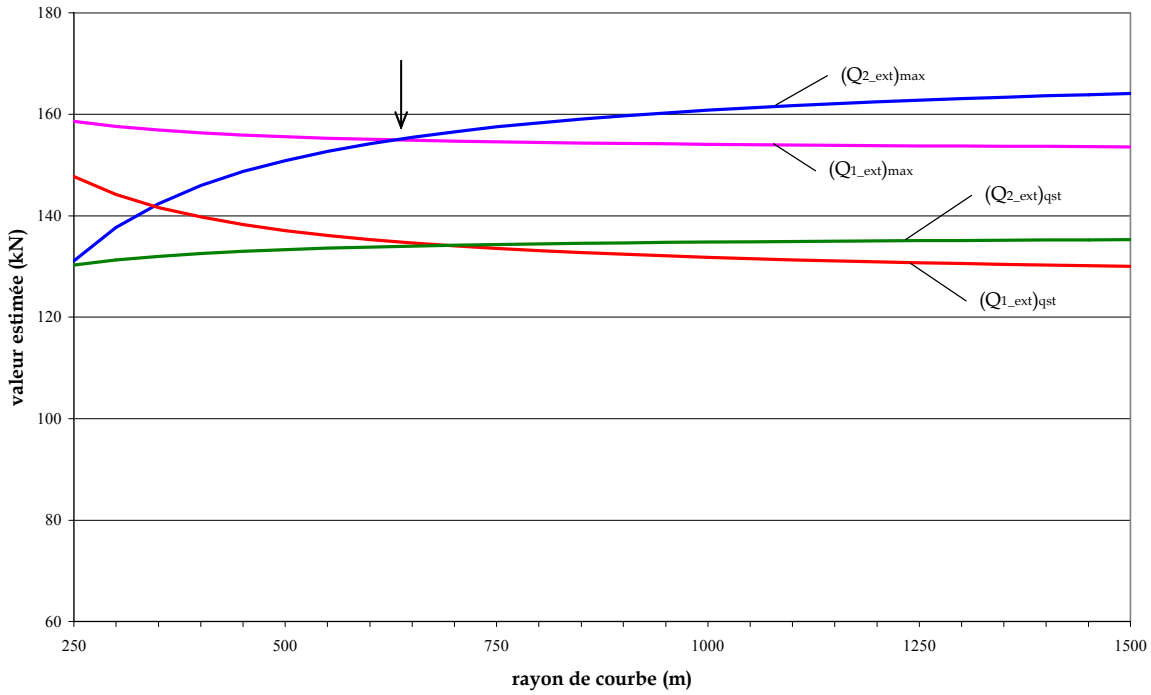
Graphique 8-2 : Répartition des efforts verticaux entre les deux essieux du bogie de tête de l'ETR 460 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,65 et I=260 mm)



Source : Élaboration propre

Les sollicitations exercées par la roue extérieure du deuxième essieu du bogie sont pour n'importe quel rayon supérieures de 8 kN à la sollicitation exercée par la roue extérieure du premier essieu. De plus, les efforts verticaux ne varient pas substantiellement selon le rayon de courbe. Ceci est mis en évidence par l'expression des lois, dans lesquelles le coefficient de la courbure est, dans tous les cas, plus élevé pour le TGV P01 que pour l'ETR 460.

Graphique 8-3 : Répartition des efforts verticaux entre les deux essieux du bogie de tête du X-TER Pendulaire pour différents rayons de courbe (Dr = 0,65 et I=260 mm)



Source : Élaboration propre

Pour le X-TER Pendulaire la répartition des efforts verticaux entre le premier et le deuxième essieu du bogie est peu dépendante du rayon de courbe. Bien que pour des rayons d'à peu près 260 m, la différence entre les deux essieux est de 20 kN, à mesure que le rayon de la courbe croît, cette différence s'atténue pour s'annuler vers 650 m de rayon où les forces sont égales. Nonobstant, la dépendance assez importante de la force verticale quasi-statique du premier essieu peu entraîner des limitations importantes pour les courbes de faible rayon.

8.2 Sollicitations en direction transversale

Dans le cas des sollicitations transversales, la différence de conception des trois matériels étudiés est mise en évidence dans les résultats obtenus.

Le tableau ci-après montre les valeurs moyennes de la somme des forces de guidage maximales et quasi-statiques exercées par les trois véhicules selon les caractéristiques du tracé (valeurs moyennes des rayons des courbes considérées), ainsi que des forces transversales exercées par la roue extérieure.

Tableau 8-2 : Valeurs moyennes des efforts transversaux du bogie moteur en tête de rame du TGV P01, de l'ETR 460 et du X-TER Pendulaire.

TGV P01	**Rayon (m)**	$(\Sigma Y_1)_{max}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_2)_{max}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_1)_{qst}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_2)_{qst}$ *(kN)*	$(Y_{1_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Y_{2_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Y_{1_ext})_{qst}$ *(kN)*	$(Y_{2_ext})_{qst}$ *(kN)*
CGR*	972	39	38	- **	- **	- **	- **	- **	- **
CRM*	783	46	32	- **	- **	- **	- **	- **	- **
CPR*	544	45	32	- **	- **	- **	- **	45	19
CTPR*	302	56	24	- **	- **	- **	- **	58	14
GLOBAL	556	46	32	- **	- **	- **	- **	53	16

ETR 460	**Rayon (m)**	$(\Sigma Y_1)_{max}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_2)_{max}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_1)_{qst}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_2)_{qst}$ *(kN)*	$(Y_{1_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Y_{2_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Y_{1_ext})_{qst}$ *(kN)*	$(Y_{2_ext})_{qst}$ *(kN)*
CGR*	1000	22,5	39,2	15,9	23,6	20	33,5	11,1	24,9
CPR*	502	29,9	34,4	21,9	30,5	32,9	29,1	22,7	23,6
CTPR*	383	37,8	33,4	24,9	27,3	50	26,3	31,8	19,7
GLOBAL	633	26,3	36,5	19	31,6	28,5	28,2	27,3 ***	21,7 ***

X-TER " DXP "	**Rayon (m)**	$(\Sigma Y_1)_{max}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_2)_{max}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_1)_{qst}$ *(kN)*	$(\Sigma Y_2)_{qst}$ *(kN)*	$(Y_{1_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Y_{2_ext})_{max}$ *(kN)*	$(Y_{1_ext})_{qst}$ *(kN)*	$(Y_{2_ext})_{qst}$ *(kN)*
CGR*	870	24	47	18	40	26	40	17	31
CPR*	575	32	42	24	37	45	31	34	26
CTPR*	300	48	37	33	29	66	32	49	23
GLOBAL	598	32,2	42,4	23,9	36,8	43,8	32,6	41,5***	24,6***

* CGR : courbes de grand rayon
CRM : courbes de rayon moyen
CPR : courbes de petit rayon
CTPR : courbes de très petit rayon

** valeurs non disponibles
*** valeurs CPR + CTPR

Source : Élaboration propre

L'étude essieu par essieu des forces transversales quasi-statiques exercées par le véhicule sur la file extérieure met en évidence le comportement différent des véhicules.

Sur l'ETR 460 ces efforts sont d'amplitude comparable pour les deux essieux (27,3 et 21,7 kN de valeur moyenne en courbes de faible rayon, respectivement). Par contre, la roue extérieure du premier essieu du bogie du TGV P01 reprend la majeure partie de l'effort quasi-statique (53 kN et 16 kN de valeur moyenne en courbes de faible rayon, respectivement). Sur l'X-TER Pendulaire la répartition entre les essieux n'est pas aussi déséquilibrée (41,5 kN au premier essieu et 24,6 kN au deuxième essieu, en courbes de faible rayon)

Cette différence entre les efforts exercés par la roue extérieure des deux essieux, se retrouve sur la somme des forces de guidage maximale. Si pour le deuxième essieu la somme des forces de guidage de l'ETR 460 est de 36,5 kN de valeur moyenne, et pour le TGV P01 de 32 kN de valeur moyenne, pour la somme des forces de guidage exercées par le premier essieu les valeurs sont assez différentes. Si pour le TGV P01 le premier essieu prend toujours la plus grande partie de la somme des forces transversales maximale (valeur moyenne 46 kN), pour l'ETR 460 c'est seulement dans le cas des courbes de plus faible rayon que le premier essieu donne une valeur plus élevée de la force maximale exercée par l'essieu (37,8 kN pour le premier essieu et 33,4 kN pour le deuxième essieu). Pour les rayons plus grands, le deuxième essieu reprend une partie plus grande de l'effort (26,3 kN au premier essieu par rapport à 36,5 kN au deuxième essieu tous rayons confondus). Le X-TER Pendulaire a un comportement similaire à l'ETR 460, ainsi la sommes des forces de guidage sont reprises en major partie par le deuxième essieu du bogie (valeur moyenne de 32,2 kN pour le premier essieu et 42,4 kN pour le deuxième essieu). C'est seulement dans le cas des courbes de plus faible rayon que le premier essieu donne une valeur plus élevée de la force maximale exercée par l'essieu (48 kN pour le premier essieu et 37 kN pour le deuxième essieu). Pour les rayons plus grands, le deuxième essieu reprend une partie plus grande de l'effort (24 kN au premier essieu par rapport à 47 kN au deuxième essieu). Cette différence est mise en évidence par les graphiques ci-après, qui représentent les lois obtenues pour la somme maximale des forces de guidage sur le bogie moteur de tête des deux véhicules :

- **$(\Sigma Y_1)_{max}$**

TGV P01 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ = 24,2 + 7200 x 1/rayon + 0,055 x Insuf + 6,5 x Dr r^2 = 0,6690 [96]

ETR 460 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ = 9,3 + 2200 x 1/rayon + 0,075 x Insuf + 7,7 x Dr r^2 = 0,5830 [97]

X-TER P : $(\Sigma Y_1)_{max}$ = -15 + 8200 x 1/rayon + 0,145 x Insuf + 7,5 x Dr r^2 = 0,7504 [98]

- **$(\Sigma Y_2)_{max}$**

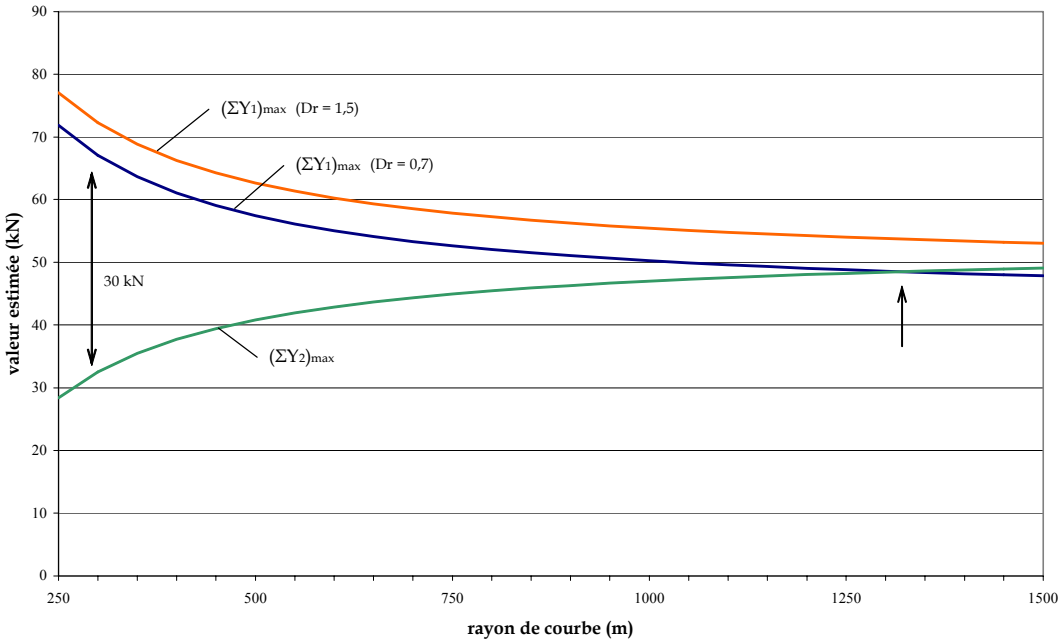
TGV P01 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ = 24,6 - 6200 x 1/rayon + 0,11 x Insuf r^2 = 0,6203 [99]

ETR 460 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ = 26 - 4000 x 1/rayon + 0,1 x Insuf r^2 = 0,6779 [100]

X-TER P : $(\Sigma Y_2)_{max}$ = 18,3 - 5700 x 1/rayon + 0,15 x Insuf + 3,7 x Dr r^2 = 0,6569 [101]

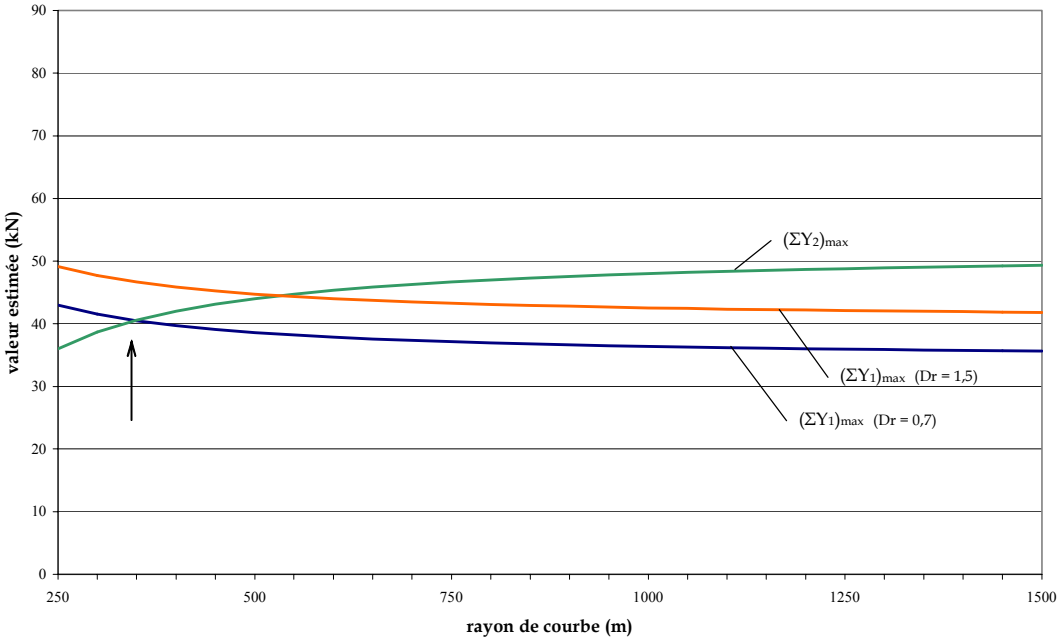
La représentation est faite pour deux qualités géométriques différentes : valeurs du dressage moyenne (Dr=0,7) et élevée (Dr=1,5), pour une circulation avec 260 mm d'insuffisance de dévers.

Graphique 8-4 : Répartition des sommes des forces de guidage maximales entre les deux essieux du bogie de tête du TGV P01 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,7 et 1,5 et l=260 mm)



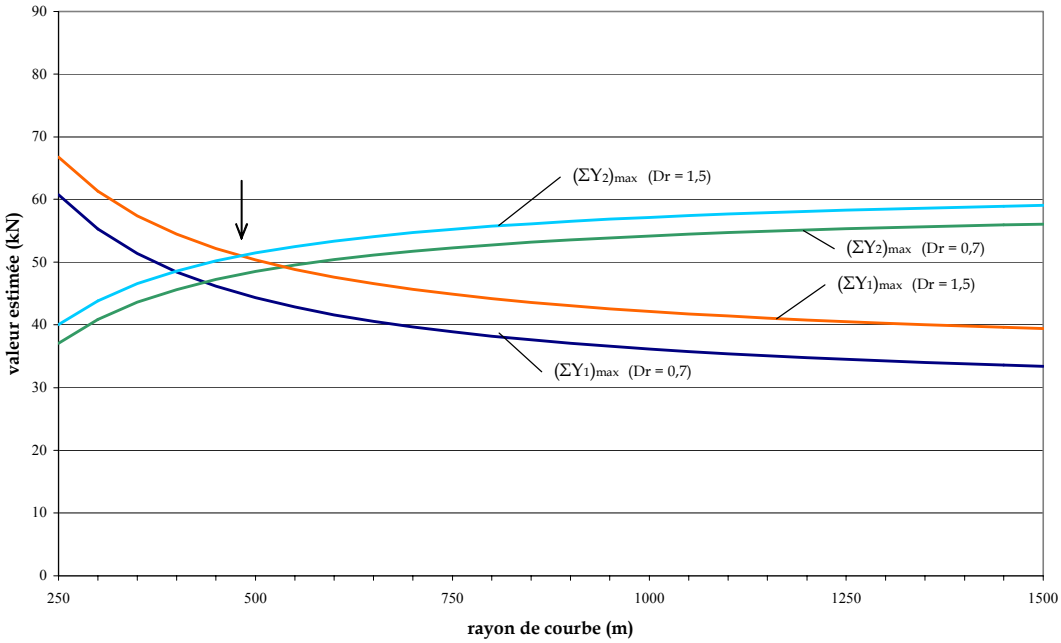
Source : Élaboration propre

Graphique 8-5 : Répartition des sommes des forces de guidage maximales entre les deux essieux du bogie de tête de l'ETR 460 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,7 et 1,5 et l=260 mm)



Source : Élaboration propre

Graphique 8-6 : Répartition des sommes des forces de guidage maximales entre les deux essieux du bogie de tête du X-TER Pendulaire pour différents rayons de courbe (Dr = 0,7 et 1,5 et I=260 mm)



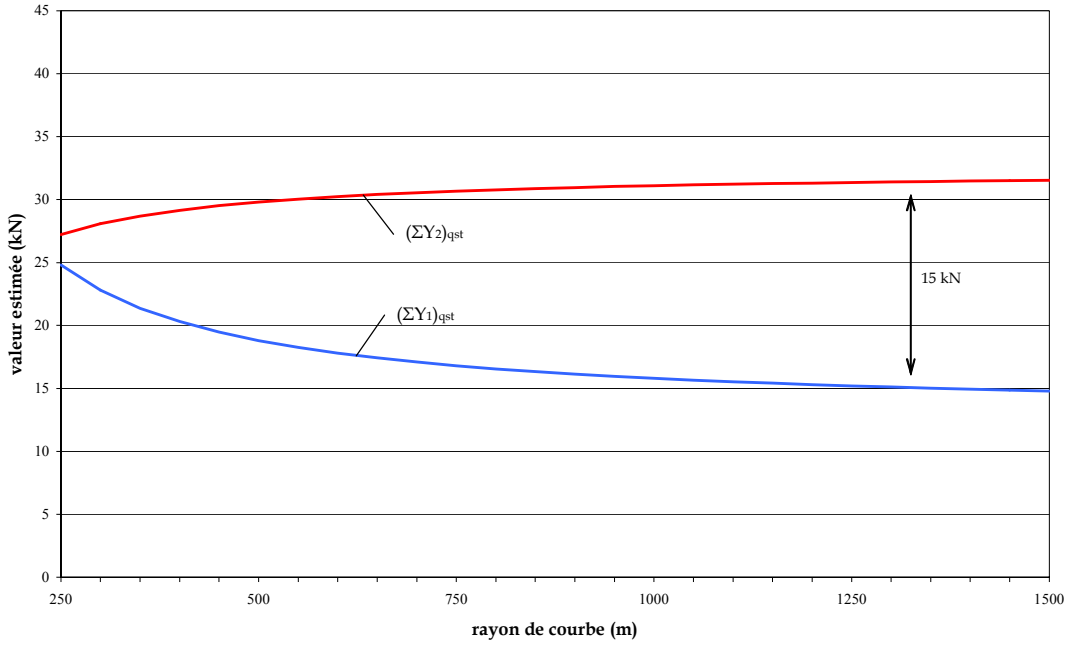
Source : Élaboration propre

On constate que l'ETR 460 présente une répartition plus uniforme entre les deux essieux du bogie pour différents rayons de courbure. En revanche, le premier essieu du TGV P01 exerce jusqu'à 30 kN plus d'effort que le deuxième en courbes de très faible rayon (R=300 m). L'égalisation des sommes des forces de guidage entre le premier et le deuxième essieu n'intervient que pour des rayons d'environ 1000 m. Par contre, pour l'ETR 460 l'égalisation arrive pour des rayons beaucoup plus faibles (environ 400-500 m, selon le dressage). Le X-TER Pendulaire présente une répartition assez uniforme entre les deux essieux du bogie pour différents rayons de courbure. Bien que le premier essieu exerce jusqu'à 20 kN plus d'effort que le deuxième essieu en courbes de très faible rayon (R=250 m), l'égalisation des sommes des forces de guidage entre le premier et le deuxième essieu intervient pour des rayons assez petits, d'environ 450 m.

La sollicitation par le deuxième essieu du bogie est comparable pour les trois véhicules. Par contre le premier essieu du TGV P01 et de l'X-TER dans une moindre mesure exercent des efforts très élevés comparés à ceux de l'ETR 460. Cette mauvaise répartition des forces de guidage pénalise ces rames en courbes de faible rayon, en imposant une limitation de la vitesse de circulation en tracés très sinueux.

Cette différence de comportement entre véhicules se retrouve dans la valeur de la somme des forces de guidage quasi-statique. On peut observer dans la représentation, ci-dessous, des lois obtenues pour l'ETR, comment la partie quasi-statique des forces de guidage, à mesure que le rayon de la courbe augmente, est reprise en plus grande mesure par le deuxième essieu du bogie (différence de 15 kN entre la force du premier essieu et du deuxième essieu en courbes de 1200 m), mais surtout, comment l'égalité entre les sommes des forces de guidage quasi-statiques des deux essieux arrive pour des rayons très petits.

Graphique 8-7 : Répartition des sommes des forces de guidage quasi-statiques entre les deux essieux du bogie de l'ETR 460 pour différents rayons de courbe (I=260 mm)



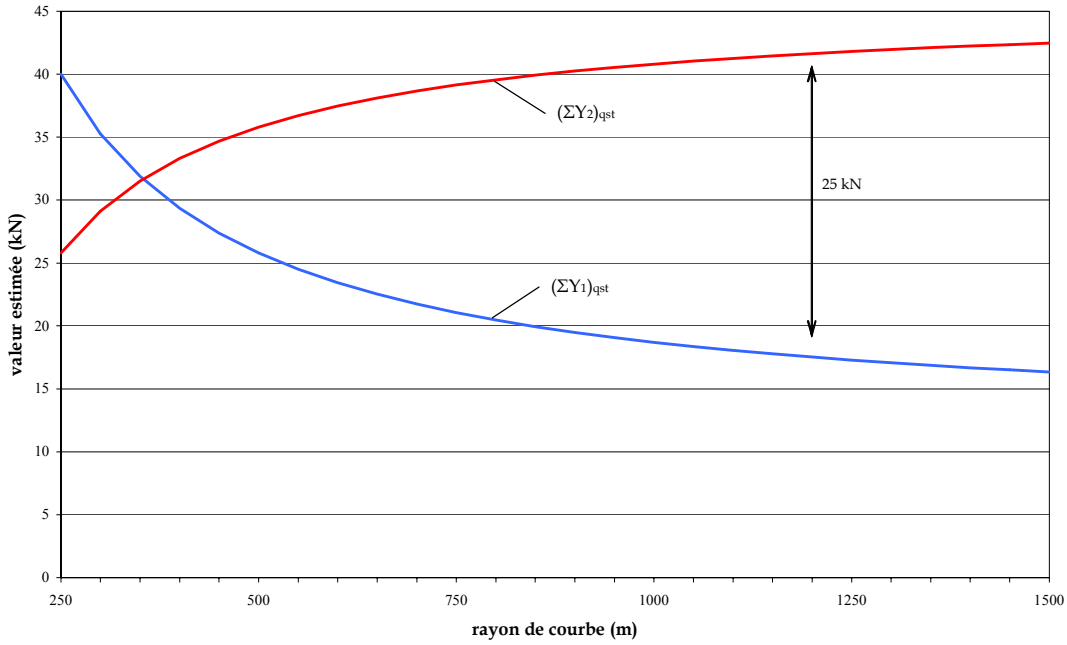
Source : Élaboration propre

Le premier essieu du bogie, qui est plus sensible à l'influence des défauts de la voie, peut reprendre la partie aléatoire de la force sans présenter de valeurs totales beaucoup plus élevées que le deuxième essieu, dans les tracés de courbes plus serrées. Il faut noter que la partie aléatoire est, en grande mesure, due aux défauts géométriques de la voie.

Pour le X-TER Pendulaire on peut observer dans la représentation, ci-dessous, comment la partie quasi-statique des forces de guidage, à mesure que le rayon de la courbe augmente, est reprise en plus grande mesure par le deuxième essieu du bogie (différence de 25 kN entre la force du premier essieu et du deuxième essieu en courbes de 1200 m), mais surtout, comment l'égalité entre les sommes des

forces de guidage quasi-statiques des deux essieux arrive pour des rayons assez petits (350 m environ), en donnant au véhicule un comportement moins bon que l'ETR 460 mais assez performante.

Graphique 8-8 : Répartition des sommes des forces de guidage quasi-statiques entre les deux essieux du bogie de l'X-TER Pendulaire pour différents rayons de courbe (I=260 mm)



Source : Élaboration propre

Le premier essieu du bogie, plus sensible à l'influence des défauts de la voie, peut reprendre la partie aléatoire des efforts sans qu'il en résulte des valeurs totales plus élevées que pour le deuxième essieu, sauf en tracé sinueux (courbes de rayon inférieur à 450 m environ, comme on l'a vu précédemment).

Si on disposait des données correspondantes du TGV P01, on observerait que l'égalité des sommes des forces de guidage quasi-statiques des deux essieux est atteinte pour un rayon beaucoup plus grand (une étude réalisée en 1999 a situé ce point d'équilibre vers 600 m, au lieu des 230 m (?) de l'ETR 460 et des 350 m de l'X-TER), ce qui fait qu'en ajoutant la composante aléatoire des efforts, beaucoup plus importante pour le premier essieu que pour le second, on obtient une importante différence des forces totales entre les essieux pour les faibles rayons.

9 Conséquences sur les conditions de circulation

Jusqu'ici, on a analysé le comportement de trois véhicules pendulaires à partir des lois statistiques tirées des données expérimentales. Maintenant, à partir des résultats obtenus et puisque l'objectif final du projet où s'inscrit cette étude est la rédaction d'un nouveau référentiel pendulaire, on propose de nouvelles règles d'utilisation des trains pendulaires ou de nouvelles conditions de circulation pour les trains étudiés. En mettant en relation les résultats tirés de l'analyse précédente avec les caractéristiques mécaniques de la voie, on peut déduire un certain nombre de règles relatives aux conditions de circulation de ces trains.

Mais rappelons d'abord quelques points essentiels des règles actuelles de la SNCF concernant les conditions de circulation des trains, qu'ils soient conventionnels ou pendulaires.

9.1 Rappel des règles actuelles de la SNCF

Aujourd'hui, sur le réseau français, les conditions de circulation des trains (charge par essieu, vitesse, insuffisance de dévers) dépendent du tracé et de l'armement de la voie.

La vitesse maximale permise sur une ligne détermine à son tour les normes de qualité géométrique de la voie à respecter par les responsables de la maintenance.

Voyons plus en détail les différentes règles appliquées.

- **Tracé de la voie (limites normales, pour les trains conventionnels)**

Equation fondamentale:

$$D_{th} = D + I = 11{,}8\frac{V^2}{R} \qquad [102]$$

où :

D_{th} est le dévers d'équilibre en mm

D est le dévers réel de la voie en mm

I est l'insuffisance de dévers en mm

V est la vitesse en km/h

R est le rayon en m

Le dévers réel D de la voie résulte d'un compromis entre les dévers d'équilibre des trains les plus lents (fret) et les plus rapides (voyageurs); en outre, l'arrêt accidentel d'un train est toujours possible en tout point du réseau, ce qui interdit d'utiliser des dévers trop élevés.

Le dévers D est généralement limité à 160 mm.

D'autre part, dans les raccordements d'entrée et de sortie des courbes, la variation de dévers par unité de longueur dD/dl (en mm/m) est limitée pour des raisons de confort à 180/V, ce qui revient à limiter à 50 mm/s sa variation par unité de temps, c'est-à-dire la vitesse de rotation de la caisse du véhicule autour de son axe longitudinal en entrée et sortie de courbe.

A cette limitation se superposent, afin d'éviter le déraillement par montée de roue en courbes de faible rayon, des règles limitant mutuellement D et dD/dl, en fonction du rayon R.

L'insuffisance de dévers est limitée à 110 mm pour les trains de fret et 160 mm pour les trains de voyageurs les plus rapides.

D'autre part, pour des raisons de confort, la variation d'insuffisance de dévers en raccordement par unité de temps dI/dt est limitée à 75 mm/s.

En conclusion, en fonction du rayon R d'une courbe et de la longueur de ses raccordements d'entrée et de sortie, les limitations portant sur D, dD/dl, I et dI/dt se traduisent par une vitesse maximale admissible au franchissement de cette courbe, variable selon le type de train.

Commentaire: contrairement au dévers, limité par des règles liant D, dD/dl et R, l'insuffisance de dévers n'est pas réduite en courbes de très faible rayon.

- **Armement de la voie**

D'après leur armement, les voies sont classées en 5 groupes dits "Demaux" selon la valeur du paramètre I/v/l (en mm^2), où :

I est l'inertie verticale du profil de rail à demi-usure (mm^4),

v est la distance entre la fibre extérieure du rail à demi-usure et la fibre neutre (mm),

l est l'espacement entre axes des traverses successives (mm).

Ce paramètre est donc proportionnel à la charge verticale que peut supporter un rail, pour un niveau déterminé de contrainte de flexion maximale du rail.

Comme les forces verticales transmises par les roues aux rails croissent avec:

- la masse par essieu des véhicules,
- la vitesse de circulation,

Les règles appliquées consistent à limiter la vitesse de chaque type de véhicule (selon sa masse par essieu) en fonction du rapport I/v/l de la voie.

Commentaire: ces règles ne prennent en compte que la fatigue du rail sous l'effet de forces verticales.

- **Qualité géométrique de la voie**

La maintenance de la géométrie de la voie, essentiellement assurée par bourrage mécanique lourd au moyen de machines appelées bourreuses, est fondée sur le respect de plusieurs niveaux de qualité dénommés:

- valeur d'objectif VO (à atteindre à la pose ou après une opération de maintenance),
- valeur d'alerte VA,
- valeur d'intervention VI (imposant une intervention dans un délai donné),
- valeur de ralentissement VR (imposant une limitation de la vitesse des trains).

Ces niveaux s'appliquent aux valeurs des défauts:

- de nivellement longitudinal (NL), variations d'altitude de chaque rail,
- de nivellement transversal (NT), variations relatives d'altitude entre les deux rails,
- de dressage (Dr), déviations transversales par rapport au tracé théorique.

Pour ces 3 types de défauts, les valeurs caractéristiques VO, VA, VI et VR sont définies en fonction de la vitesse des trains les plus rapides.

Commentaire: il existe donc bien une relation entre la vitesse maximale sur une voie donnée et sa qualité géométrique; cependant cette relation est indépendante du tracé et de l'armement de la voie.

- **Cas des trains pendulaires**

Pour la circulation de trains pendulaires (type ETR 460) entre LYON et MODANE, la SNCF a élaboré en 1996 un référentiel [17] adaptant les règles précitées à la circulation de ces rames.

Ces règles ont été revues dans le cadre du projet POLT (circulation de TGV pendulaires sur l'axe PARIS-ORLEANS-LIMOGES-TOULOUSE).

Les principes retenus sont les suivants:

- concernant le tracé de la voie, le train pendulaire peut circuler avec 260 mm d'insuffisance de dévers; les valeurs de dD/dl et dI/dt des trains conventionnels sont alors dépassées, mais la pendulation permet de s'affranchir de ces limites liées au confort;

- cependant, l'insuffisance de dévers peut être limitée à une valeur inférieure, fonction de:

    - l'armement de la voie,

    - la qualité géométrique que l'on estime pouvoir maintenir.

Cette restriction constitue une nouveauté par rapport au cas des trains conventionnels, pour lesquels l'insuffisance de dévers ne dépend pas de la qualité géométrique.

9.2 Principes des nouvelles règles envisagées

Les lois statistiques obtenues mettent en évidence l'étroite relation existante entre d'une part les efforts exercés par un véhicule sur la voie et d'autre part le tracé de la voie, les conditions de circulation du véhicule et la qualité géométrique de cette voie.

Ces efforts doivent être supportables par l'infrastructure, c'est à dire que l'armement de la voie déterminera avec le tracé et la qualité géométrique de la voie les conditions de circulation des trains pendulaires

Dans les règles actuelles la limitation de l'insuffisance de dévers est imposée par le confort du voyageur et non par l'infrastructure, car pour les trains conventionnels, la limite de confort est plus restrictive que la résistance de l'infrastructure. Cependant, pour les trains pendulaires, la limite du confort ressenti par le voyageur est repoussée puisque l'insuffisance de dévers est compensée par le système d'inclinaison de la caisse. En outre, le véhicule circule à vitesses plus élevées que les trains conventionnels, en exerçant donc des efforts transversaux et verticaux beaucoup plus importants. Les limites liées à la résistance de la voie peuvent alors devenir prépondérantes.

En outre, les règles pour les trains conventionnels ne prennent pas en compte d'une façon simultanée tous ces paramètres pour limiter les conditions de circulation :

- le tracé est pris en compte vis-à-vis des conditions de confort mais n'intervient pas, ou très peu, dans les règles liées à l'armement de la voie,

- les limitations dues à l'armement de la voie prennent seulement en compte la fatigue du rail sous l'effet de forces verticales, et non les autres sollicitations que le véhicule exerce sur l'infrastructure.

Le premier " référentiel pendulaire " mettait déjà en exergue la relation entre la qualité géométrique de la voie et son armement pour limiter l'insuffisance de dévers, et par conséquent la vitesse des trains. Ce premier référentiel prenait comme paramètre de valorisation de la qualité géométrique de la voie l'indicateur global U =2NT+Dr [18]. La présente étude montre que le nivellement transversal n'a pas une influence déterminante sur le comportement des véhicules pendulaires : dans la gamme des fortes insuffisances de dévers en tout cas, le dressage de la voie est le paramètre qui explique le mieux le comportement du véhicule. La forte insuffisance de dévers fait qu'en courbe les essieux sont plaqués sur la file extérieure. Ce fort couplage avec la file extérieure explique qu'une déviation transversale par rapport au tracé théorique ait plus d'influence sur le comportement du véhicule que les variations relatives d'altitude entre les deux rails.

Ce premier référentiel ne tenait pas compte du tracé comme paramètre déterminant de la circulation des véhicules. La présente étude, par contre, a permis de quantifier l'influence propre de la courbure sur les sollicitations ponctuelles exercées par le véhicule, notamment en courbes de très faible rayon.

Ces résultats vont nous permettre d'établir de nouvelles lois de limitation de l'insuffisance de dévers tenant compte simultanément de l'armement de la voie, de son tracé et de la qualité géométrique que l'on estime pouvoir maintenir.

Le texte qui suit ne vise qu'à donner, à partir de ces résultats, de premières indications sur la nature des futures règles et limitations liées à la circulation de trains pendulaires sur le RFN. La réflexion qui reste a mener permettra de les affiner et de les harmoniser, en vue de la rédaction du nouveau référentiel pendulaire.

Tous les résultats et limitations qu'on va présenter sont établis pour une voie normalement armée, c'est à dire, une voie en traverses bois, espacées au plus de 65 cm, ballast en pierres cassées et rail de masse linéaire ≥ 46 kg/m. Pour des autres types de voie il sera intéressant de réviser les valeurs limites retenues des efforts. On se propose de tirer des nouvelles conditions de circulation des trains pendulaires sur voie normale selon le tracé et la qualité géométrique de la voie.

A partir des lois de comportement des véhicules, on impose comme valeurs maximales des efforts exercés par le véhicule les valeurs retenues par la fiche UIC 518 pour l'homologation des véhicules, qui représentent la résistance d'une voie normale. On rappelle ci-après les limites utilisées dans la fiche UIC 518 :

Dans la domaine de la sécurité on limite la valeur de la somme des forces de guidage à la valeur de la résistance transversale de la voie selon la formule de Prud'homme. La loi de Prud'homme pour une voie normale a comme coefficients : A=10 et B=1/3.

$$(\Sigma Y)_{\lim} = 10 + \frac{P_0}{3} \quad ; \quad P_0 \text{ étant la charge par essieu en kN} \qquad [103]$$

Cependant, pour une voie stabilisée, la résistance peut être notablement supérieure H=25+0,6P.

Dans le domaine de la fatigue de la voie, la fiche impose des limitations sur les efforts verticaux maximaux et quasi-statiques et sur les efforts transversaux quasi-statiques.

Les sollicitations verticales de la voie ont une influence directe sur les rails. Afin de limiter ces sollicitations, la fiche UIC 518 indique les limites suivantes :

La valeur limite de la force verticale maximale $Q_{\lim}$:

$Q_{\lim} = 90 + Q_0$; où $Q_{\lim}$ et Q_0 sont exprimés en kN, Q_0 étant la charge statique par roue.

La valeur limite de la force verticale quasi-statique en courbe $(Q_{qst})_{\lim}$:

$(Q_{qst})_{\lim} = 145\ kN$ dans les courbes de faible rayon.

Les sollicitations transversales affectent notamment les attaches et les rails. La limitation indiquée par la fiche UIC 518 concerne les forces transversales quasi-statiques en courbes de faible rayon.

$$(Y_{qst})_{\lim} = 60\ kN$$

A partir des lois de comportement des véhicules tirées de l'étude statistique, en limitant les sollicitations exercées aux limites imposées par la fiche UIC 518 pour une voie normalement armée, on obtient des lois définissant les conditions de circulation maximales du véhicule en fonction du tracé et la qualité géométrique de la voie. Ainsi donc, en connaissant la qualité géométrique de la voie que l'on estime pouvoir maintenir et selon le tracé de la ligne, on détermine les conditions de circulation maximales permises par l'infrastructure existante.

9.3 Règles de circulation pour l'ETR 460

Comme on l'a vu précédemment, l'ETR 460, étant un matériel optimisé pour la pendulation, présente une charge par essieu assez faible, d'où il résulte une plus faible agressivité sur la voie. En raison de la

faible charge par essieu, on comprend bien que les sollicitations verticales exercées par le véhicule ne seront pas les contraintes de limitation de circulation. Cependant, cette faible charge par essieu influe d'une manière importante dans la résistance transversale de la voie déterminée par la limite de Prud'homme. Les sollicitations transversales seront donc celles qui détermineront finalement les conditions de circulation des véhicules.

9.3.1 Limitations liées à la fatigue de la voie

Dans le cas de l'ETR 460 les lois qui régissent les sollicitations verticales et transversales liées à la fatigue de la voie, tirées de l'étude statistique et déjà présentées, sont :

$$(Y_{1_ext})_{qst} = -7{,}2 + 12000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}025 \times \text{Insuf} \quad [104]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = 1 - 1000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \quad [105]$$

$$(Q_{1_ext})_{max} = 70{,}2 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 2{,}9 \times \text{Dr} \quad [106]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 72{,}4 + 1250 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} + 1{,}4 \times \text{Dr} \quad [107]$$

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 58 + 2900 \times 1/\text{rayon} + 0{,}085 \times \text{Insuf} \quad [108]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 61 + 3500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} \quad [109]$$

Si on impose comme valeur limite des charges les limitations données par la fiche d'homologation, on doit respecter :

$$\left(Y_{qst}\right)_{\lim} = 60\ kN$$

$Q_{\lim} = 90 + Q_0$, où Q_0 = 67,5 kN pour l'ETR 460, soit : $Q_{\lim} = 153\ kN$

et $\left(Q_{qst}\right)_{\lim} = 145\ kN$

Les lois sont donc :

$$(Y_{1_ext})_{qst} = -7{,}2 + 12000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}025 \times \text{Insuf} < 60\ \text{kN} \quad [110]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = 1 - 1000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} < 60\ \text{kN} \quad [111]$$

$$(Q_{1_ext})_{max} = 70{,}2 + 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}08 \times \text{Insuf} + 2{,}9 \times \text{Dr} < 153\ \text{kN} \quad [112]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 72{,}4 + 1250 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} + 1{,}4 \times \text{Dr} < 153\ \text{kN} \quad [113]$$

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 58 + 2900 \times 1/\text{rayon} + 0{,}085 \times \text{Insuf} < 145\ \text{kN} \quad [114]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 61 + 3500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} < 145\ \text{kN} \quad [115]$$

On obtient des lois limites de l'insuffisance de dévers, c'est à dire, des conditions de circulation, en fonction du tracé et de la qualité géométrique de la voie.

On présente, dans le tableau suivant, quelques valeurs de l'insuffisance maximale admissible selon le rayon et la qualité géométrique de la voie. On a choisi trois valeurs de qualité géométrique de la voie représentatives de la qualité des voies SNCF. C'est à dire, une valeur de qualité faible de la voie (Dr=1,5 mm), une valeur de bonne qualité de la voie (Dr=0,3) et une valeur moyenne de qualité géométrique de la voie (Dr=0,7 mm).

Tableau 9-1 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la résistance à la fatigue de la voie, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie

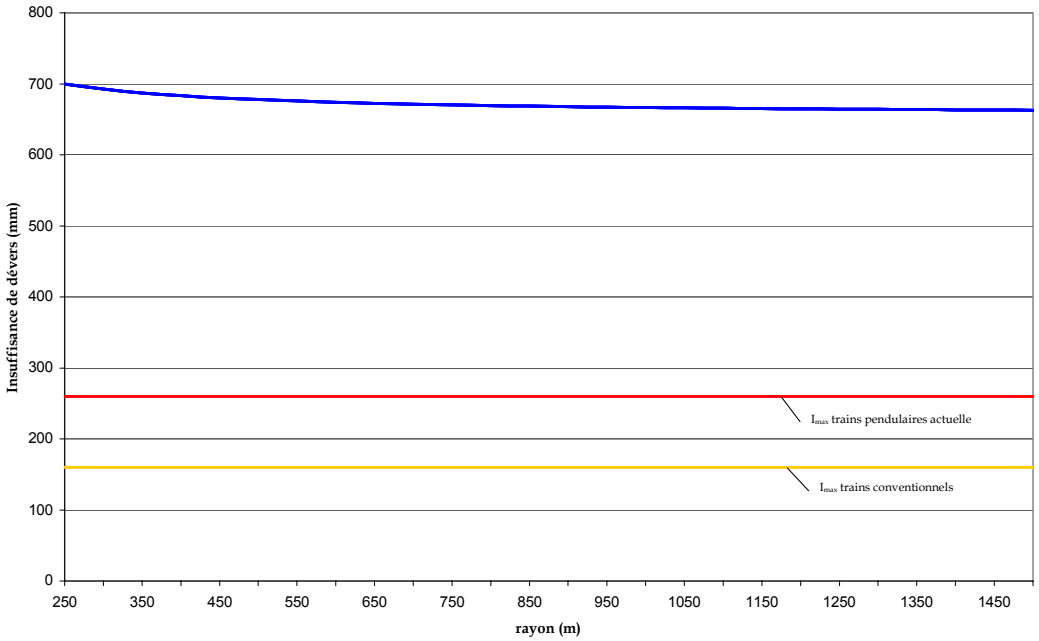
Rayon (m)	**Insuffisance de dévers maximale (mm)**									
	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)			$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)			$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)
			Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5		
250	768	700	943	928	899	746	741	730	887	777
500	1728	678	980	966	937	772	766	755	955	855
750	2048	670	993	978	949	780	775	763	978	881
1000	2208	667	999	984	956	784	779	768	989	894
1250	2304	664	1003	988	959	787	781	770	996	902
1500	2368	663	1005	991	962	788	783	772	1001	907

Source : Élaboration propre

On notera que ces valeurs de l'insuffisance de dévers sont très élevées (et même irréalistes), en raison des faibles sollicitations verticales qui sont exercées par le véhicule sur l'infrastructure. C'est à dire, le véhicule devrait circuler avec une insuffisance de dévers extrême pour exercer des efforts verticaux et transversaux critiques pour la fatigue de la voie. Le graphique ci-dessous met en évidence cette faible sollicitation verticale et transversale en illustrant ces règles de circulation.

Ce graphique, comme le tableau précédent, indique la valeur maximale de l'insuffisance de dévers acceptable du point de vue de la fatigue de la voie pour l'ETR 460, en fonction du rayon de courbure. Il traduit la limitation la plus restrictive d'insuffisance de dévers obtenue par les six lois pré-établies, celle liée à $(Y_{2_ext})_{qst}$, indépendante de la qualité géométrique. On y joint en trame rouge et jaune les limitations actuelles d'insuffisance de dévers pour trains pendulaires et conventionnels respectivement.

Graphique 9-1 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue des sollicitations liées à la fatigue de la voie, selon le rayon de courbe



Source : Élaboration propre

9.3.2 Limitations liées à la sécurité

Comme on l'a dit précédemment, la faible charge par essieu de l'ETR 460 donne, en revanche, une faible résistance latérale à la voie. La limite de la résistance transversale de la voie donnée par Prud'homme est de 52 kN pour l'ETR 460 :

$$(\Sigma Y)_{\lim} = 10 + \frac{P_0}{3}$$, où P_0=125 kN pour l'ETR 460, soit : $(\Sigma Y)_{\lim} = 52\ kN$

En faisant le même processus que pour les sollicitations liées à la fatigue de la voie, en introduisant cette valeur dans les lois obtenues de comportement du véhicule par rapport aux sommes des forces de guidage de l'essieu, on va obtenir des règles de limitation de l'insuffisance de dévers par rapport à la sécurité de la circulation :

Les lois de comportement du véhicule par rapport aux sommes des forces de guidage de l'essieu sont :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 9{,}3 + 2200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}075 \times \text{Insuf} + 7{,}7 \times \text{Dr} \quad [116]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 26 - 4000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} \quad [117]$$

En imposant les limites aux sollicitations, les conditions de circulation sont déterminées par :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 9{,}3 + 2200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}075 \times \text{Insuf} + 7{,}7 \times \text{Dr} < 52\ \text{kN} \quad [118]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 26 - 4000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}1 \times \text{Insuf} < 52\ \text{kN} \quad [119]$$

Ces lois sont beaucoup plus restrictives que celles relatives à la fatigue de la voie, et se traduisent oar les valeurs maximales suivantes de l'insuffisance de dévers.

Tableau 9-2 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la sécurité, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie

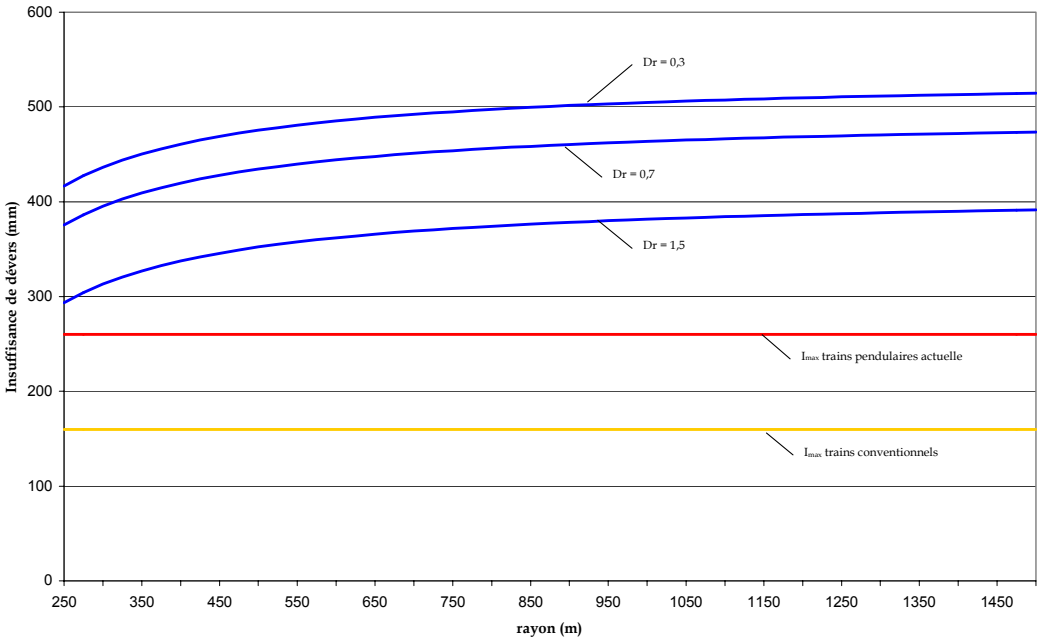
Rayon (m)	**Insuffisance de dévers maximale (mm)**			
	$(\Sigma Y_1)_{max}$ (kN)			$(\Sigma Y_2)_{max}$ (kN)
	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5	
250	417	376	294	417
500	475	434	352	337
750	495	454	372	310
1000	505	464	382	297
1250	511	470	387	289
1500	515	473	391	283

Source : Élaboration propre

La somme des forces de guidage du premier essieu limite la circulation pour des tracés avec des faibles rayons et, en revanche, celle du deuxième essieu limite la circulation en courbes de grand rayon. Toutefois l'insuffisance de dévers maximale résultant de ces lois reste supérieure à la valeur de 260 mm prise comme référence en France. Notons qu'il aurait été intéressant de connaître le comportement du 2ème essieu d'un bogie situé en queue de train (dernier essieu de la rame). Hélas, ces efforts n'ont pas été enregistrés.

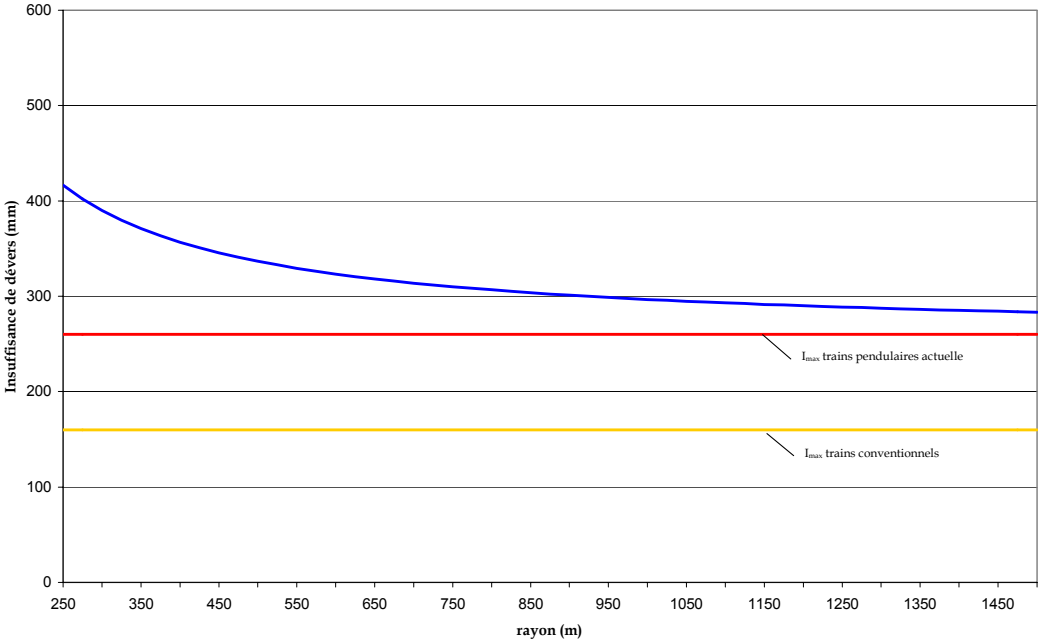
Dans les graphiques suivants, on représente pour trois valeurs représentatives de la qualité géométrique de la voie (Dr=1,5 mm, 0,7 et 0,3) la valeur maximale de l'insuffisance de dévers acceptable eu égard aux sommes des forces de guidage pour l'ETR 460, selon le rayon de courbe. On y joint en trame rouge et jaune les limitations actuelles d'insuffisance de dévers pour trains pendulaires et conventionnels respectivement.

Graphique 9-2 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la sécurité ($(\Sigma Y_1)_{max}$), selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

Graphique 9-3 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la sécurité ($(\Sigma Y_2)_{max}$), selon le rayon de courbe



Source : Élaboration propre

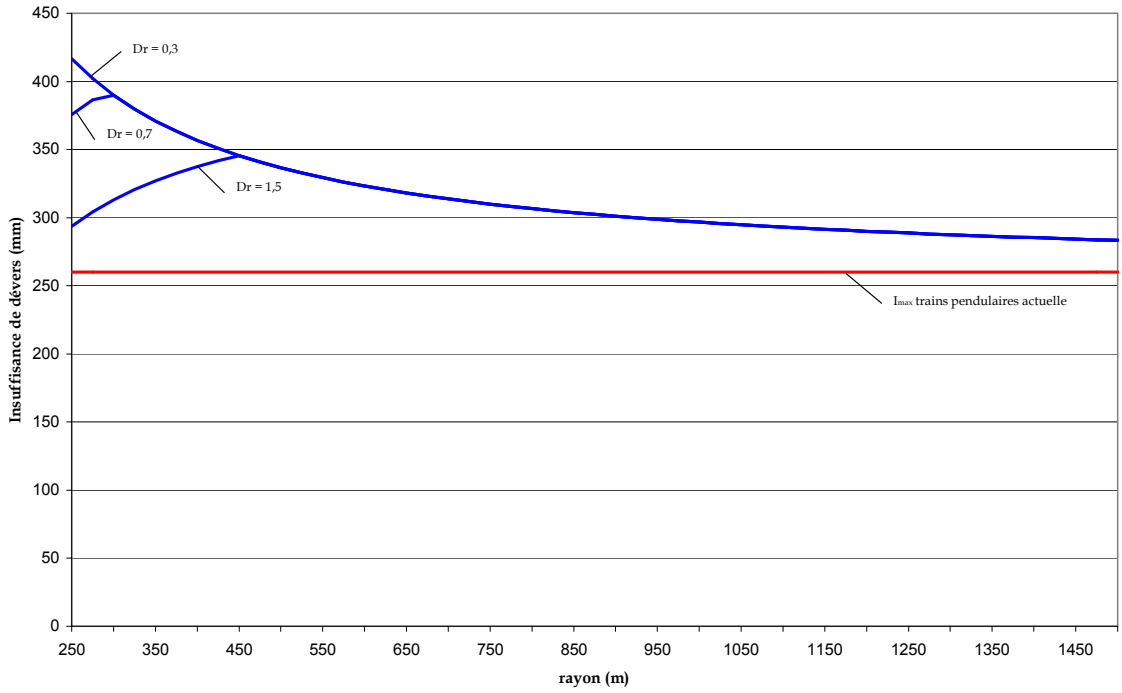
9.3.3 Règles synthétiques de circulation de l'ETR 460

Les règles de circulation de l'ETR 460 résultent de la limite la plus restrictive parmi celles examinées ci-avant, pour chaque couple (rayon, dressage) ; elles peuvent être représentées par le graphique ci-dessous, qui permet de déterminer les conditions de circulation limites de l'ETR 460 selon le tracé et la qualité géométrique de la voie.

Selon le tracé de la voie (rayon de courbe) et la qualité géométrique (valeur du dressage) que l'on estime pouvoir maintenir, ce graphique donne la valeur maximale de l'insuffisance de dévers pour l'ETR 460 sur une voie normalement armée (voie en traverses bois, espacées au plus de 65 cm, ballast en pierres cassées et rails de masse linéaire ≥ 46 kg/m). A titre de comparaison, on indique la valeur maximale de l'insuffisance de dévers permise actuellement par la réglementation pendulaire en France.

NOTA : les règles actuelles n'admettent toutefois la valeur de 260 mm que sur des voies d'armement supérieure à cette " voie de référence ".

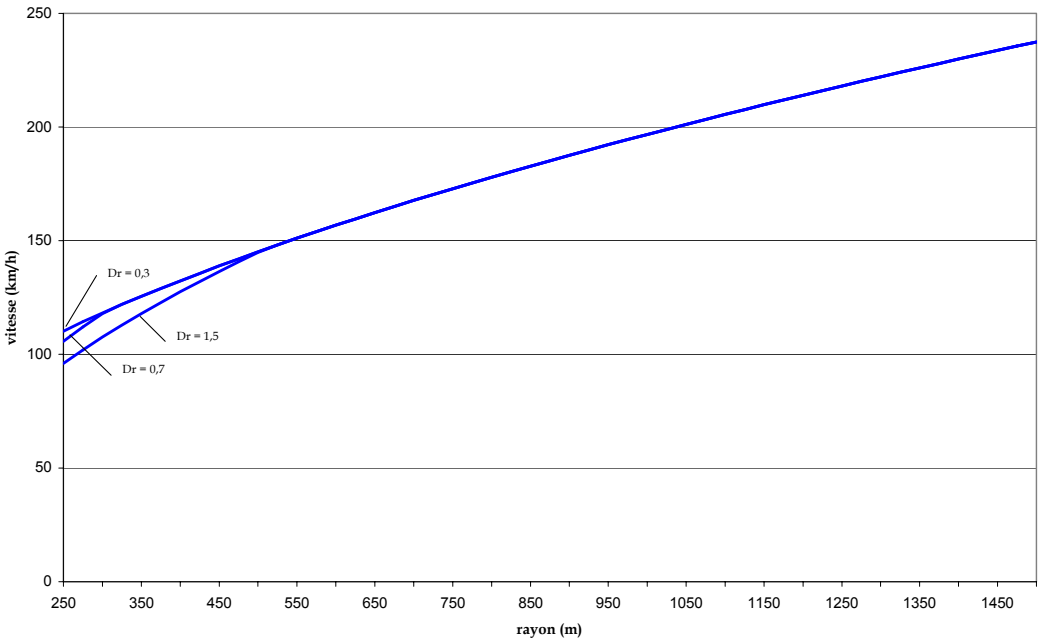
Graphique 9-4 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

A titre d'illustration, le graphique suivant donne la vitesse maximale pour les courbes de dévers maximal : 160 mm. Ce sont donc les valeurs maximales de la vitesse, auxquelles on pourrait circuler sur une voie avec un armement normal.

Graphique 9-5 : Vitesse maximale admissible pour l'ETR 460 selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

NOTA : du fait des lois de limitation mutuelle de D, dD/dI et R, un dévers de 160 mm n'est possible que pour des rayons > 400 m environ. La vitesse ci-dessus est donc surestimée pour R < 400 m.

9.4 Règles de circulation pour le TGV P01

Comme on l'a vu précédemment, le comportement du TGV P01 est assez différent du comportement de l'ETR 460, pour diverses raisons (rame articulée, charge par essieu supérieure, empattement de bogie plus grand…). Cette différence de charge par essieu entre un véhicule et un autre implique des sollicitations verticales beaucoup plus élevées pour le TGV P01 que pour l'ETR 460. En revanche, cette charge par essieu plus élevée permet d'avoir à la voie une résistance latérale plus importante.

Contrairement au chapitre précédent, où on a pris en étude le bogie moteur en tête de rame, en ce cas là, on va prendre l'essieu (moteur ou porteur, en tête ou en queue) le plus agressif pour chaque force.

9.4.1 Limitations liées à la fatigue de la voie

La charge par essieu plus élevée génère des sollicitations verticales tant maximales que quasi-statiques assez importantes en circulation avec forte insuffisance de dévers, comme c'est le cas des trains pendulaires. Les limitations des efforts imposées par la fatigue de l'infrastructure sont de 60 kN pour les forces transversales quasi-statiques, de 145 kN pour les efforts verticaux quasi-statiques et de 175 kN pour les efforts verticaux maximaux en suivant la formule :

$$Q_{\lim} = 90 + Q_0 \text{ , où } Q_0 = 85 \text{ kN pour le TGV P01, soit : } Q_{\lim} = 175\ kN$$

Ces limitations liées à la fatigue de la voie supposent les limitations suivantes dans la circulation du véhicule :

$$(Y_{1_ext})_{qst} = 22 + 6500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}046 \times \text{Insuf} < 60 \text{ kN} \quad [120]$$

$$(Y_{2_ext})_{qst} = -11{,}4 - 600 \times 1/\text{rayon} + 0{,}12 \times \text{Insuf} < 60 \text{ kN} \quad [121]$$

$$(Q_{1_ext})_{max} = 132{,}5 + 8000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}03 \times \text{Insuf} + 10{,}5 \times \text{Dr} < 175 \text{ kN} \quad [122]$$

$$(Q_{2_ext})_{max} = 116{,}7 + 11000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}077 \times \text{Insuf} + 8 \times \text{Dr} < 175 \text{ kN} \quad [123]$$

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 100 + 5100 \times 1/\text{rayon} + 0{,}11 \times \text{Insuf} < 145 \text{ kN} \quad [124]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 99 + 9000 \times 1/\text{rayon} + 0{,}09 \times \text{Insuf} < 145 \text{ kN} \quad [125]$$

Dans le tableau suivant, on remarque la forte limitation de l'insuffisance de dévers pour la circulation en courbes de faible rayon, surtout due aux sollicitations verticales maximales. On verra que ces limitations sont même plus restrictives que celles liées aux sommes des forces de guidage.

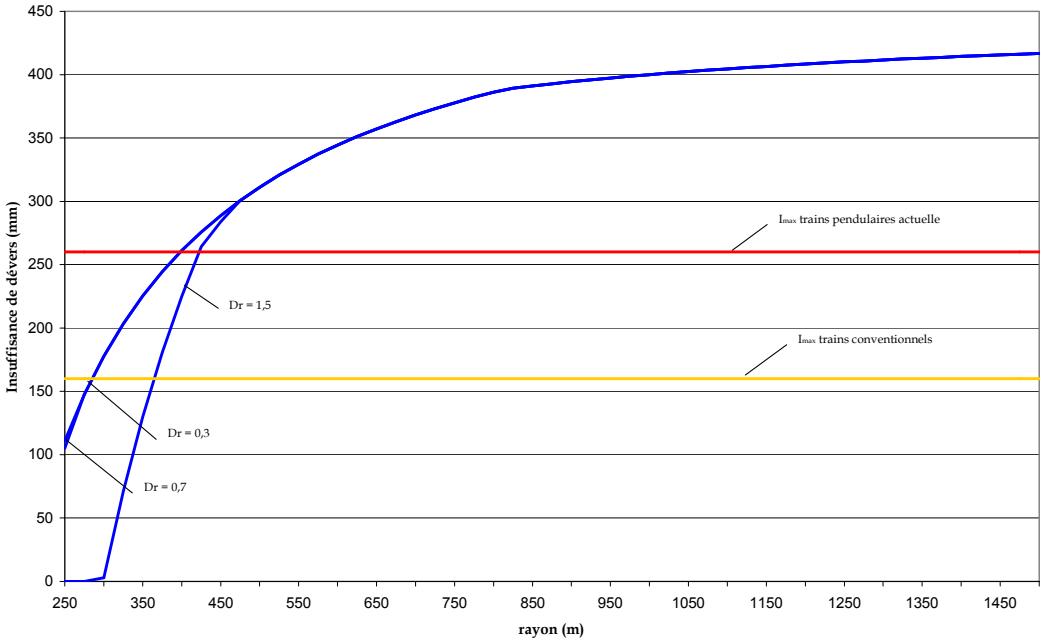
Tableau 9-3 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue de la résistance à la fatigue de la voie, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie

Rayon (m)	Insuffisance de dévers maximale (mm)									
	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)			$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)			$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)
			Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5		
250	261	615	245	105	0	155	113	30	250	111
500	543	605	778	638	358	440	399	316	350	311
750	638	602	956	816	536	535	494	411	383	378
1000	685	600	1045	905	625	583	542	458	400	411
1250	713	599	1098	958	678	612	570	487	410	431
1500	732	598	1134	994	714	631	589	506	417	444

Source : Élaboration propre

Le graphique suivant, comme le tableau ci-dessus, indique la valeur maximale de l'insuffisance de dévers acceptable du point de vue de la fatigue de la voie pour le TGV P01, en fonction du rayon de courbure et de la qualité géométrique (valeur du dressage). Il traduit la limitation la plus restrictive d'insuffisance de dévers obtenue par les six lois pré-établies, on peut observer plus clairement les fortes restrictions en courbes de faible rayon. On y joint en trame rouge et jaune les limitations actuelles d'insuffisance de dévers pour trains pendulaires et non pendulaires respectivement.

Graphique 9-6 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue des sollicitations liées à la fatigue de la voie, selon le rayon de la courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

9.4.2 Limitations liées à la sécurité

Pour les sollicitations liées à la sécurité de la circulation, la fiche UIC 518 impose la valeur limite de la résistance transversale de la voie donnée par la formule de Prud'homme. Cette limite de résistance transversale pour une voie normalement armée, et pour la charge à l'essieu de 170 kN du TGV, est :

$$(\Sigma Y)_{\lim} = 10 + \frac{P_0}{3}$$, où P_0=170 kN pour le TGV P01, soit : $(\Sigma Y)_{\lim} = 67\ kN$

Ainsi donc, les règles de circulation du TGV P01 obtenues à partir des lois de comportement transversal et des limitations des sollicitations sont :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = 24{,}2 + 7200 \text{ x } 1/\text{rayon} + 0{,}055 \text{ x Insuf} + 6{,}5 \text{ x Dr} < 67 \text{ kN} \quad [126]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 38{,}1 - 11000 \text{ x } 1/\text{rayon} + 0{,}115 \text{ x Insuf} + 3 \text{ x Dr} < 67 \text{ kN} \quad [127]$$

Dans le tableau ci-dessous on peut observer le même phénomène que pour l'ETR 460 : la somme des forces de guidage du premier essieu limite la circulation dans les courbes de plus faible rayon et, en revanche, pour des courbes de grand rayon, le deuxième essieu est celui qui présente les sollicitations les plus restrictives. Les premiers résultats (§6) indiquaient déjà la criticité du TGV P01 pour la circulation en tracés très sinueux du fait de la répartition des efforts entre les essieux du bogie, assez déséquilibrée en courbes de très faible rayon. Cette répartition inégale des forces entre les deux essieux du bogie pour des rayons très petits impose des limitations plus sévères pour ce type de tracé que dans le cas de l'ETR 460.

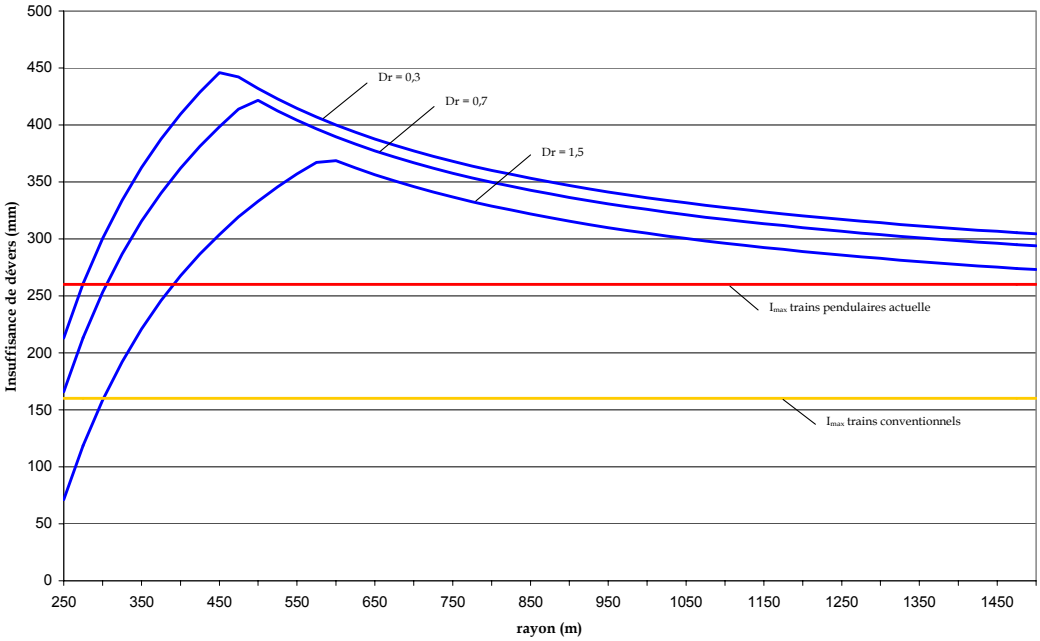
Tableau 9-4 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue de la sécurité, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie

Rayon (m)	**Insuffisance de dévers maximale (mm)**					
	$(\Sigma Y_1)_{max}$ (kN)			$(\Sigma Y_2)_{max}$ (kN)		
	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5
250	213	166	71	623	613	592
500	475	428	333	432	421	401
750	562	515	420	368	358	337
1000	606	558	464	336	326	305
1250	632	585	490	317	307	286
1500	649	602	508	304	294	273

Source : Élaboration propre

Le graphique ci-dessous synthétise les limitations de circulation données par les sommes des forces de guidage de l'essieu en représentant les valeurs les plus restrictives de l'insuffisance de dévers pour trois qualités géométriques de la voie (Dr=1,5 mm, 0,7 et 0,3) selon le tracé (rayon de courbe).

Graphique 9-7 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue de la sécurité, selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

On y joint en trame rouge et jaune les limitations actuelles d'insuffisance de dévers pour trains pendulaires et non pendulaires respectivement.

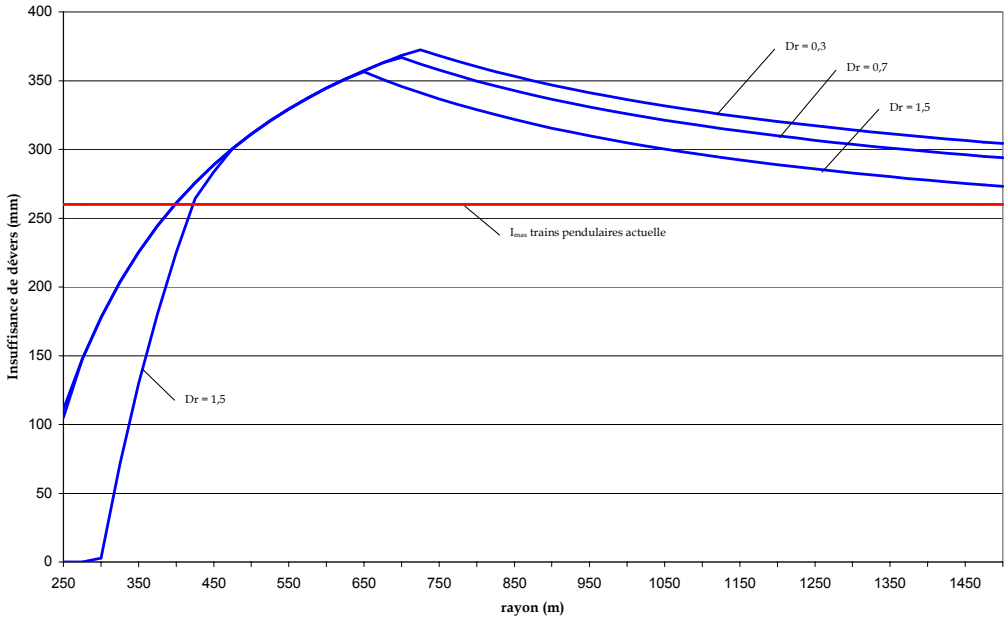
9.4.3 Règles synthétiques de circulation du TGV P01

Les règles de circulation du TGV P01 résultent de la limite la plus restrictive parmi celles examinées ci-avant, pour chaque couple (rayon, dressage) ; elles peuvent être représentées par le graphique ci-dessous, qui permet de déterminer les conditions de circulation limites du TGV P01 selon le tracé et la qualité géométrique de la voie.

Selon le tracé de la voie (rayon de courbe) et la qualité géométrique (valeur du dressage) que l'on estime pouvoir maintenir, ce graphique donne la valeur maximale de l'insuffisance de dévers pour le TGV P01 sur une voie normalement armée (voie en traverses bois, espacées au plus de 65 cm, ballast en pierres cassées et rails de masse linéaire ≥ 46 kg/m). A titre de comparaison, on indique la valeur maximale de l'insuffisance de dévers permise actuellement par la réglementation pendulaire en France. On peut voir que dans le cas du TGV P01, il y aurait lieu d'imposer des limitations de l'insuffisance de dévers en courbes de faible rayon, qui ne sont pas prises en compte par la réglementation actuelle.

NOTA : les règles actuelles n'admettent toutefois la valeur de 260 mm que sur des voies d'armement supérieur à cette " voie de référence ".

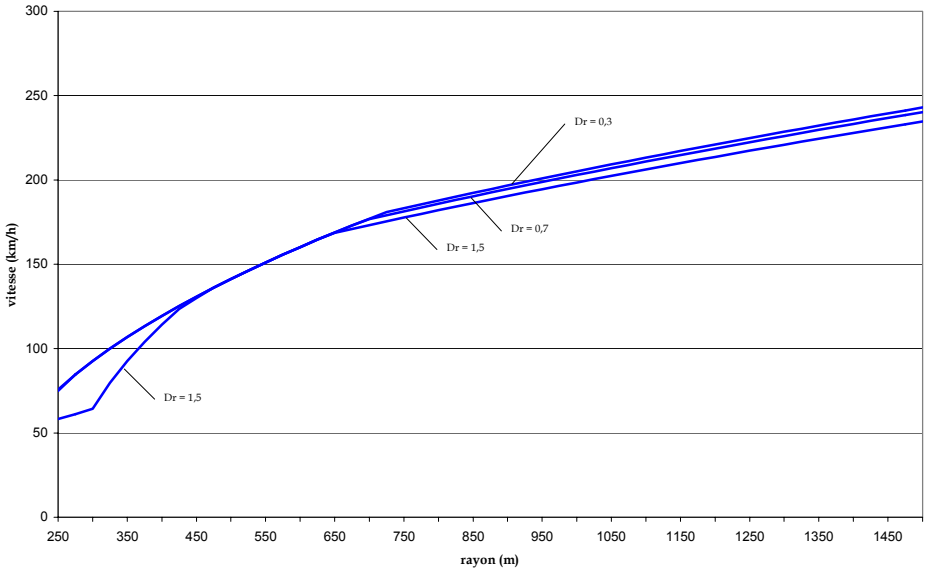
Graphique 9-8 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

A titre d'illustration on présente un graphique donnant la vitesse maximale pour les courbes de dévers maximal : 160 mm. Ce sont donc les valeurs maximales de la vitesse, auxquelles on pourrait circuler sur une voie avec un armement normal.

Graphique 9-9 : Vitesse maximale admissible pour le TGV P01 selon le rayon de la courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

NOTA : du fait des lois de limitation mutuelle de D, dD/dI et R, un dévers de 160 mm n'est possible que pour des rayons > 400 m environ. La vitesse ci-dessus est donc surestimée pour R < 400 m.

9.5 Règles de circulation pour le X-TER Pendulaire

Bien que l'X-TER ne soit pas un véhicule conçu a priori pour la pendulation, l'étude précédente (§7) a mis en évidence un assez bon comportement en forte insuffisance de dévers. Cependante, la forte charge à l'essieu du véhicule peut entraîner des restrictions des conditions de circulation.

9.5.1 Limitations liées à la fatigue de la voie

Dans le cas de l'X-TER Pendulaire les lois qui régissent les sollicitations verticales et transversales liées à la fatigue de la voie, tirées de l'étude statistique et déjà présentées, sont :

$(Y_{1_ext})_{qst}$ = 7,4 + 10000 x 1/rayon + 0,036 x Insuf [128]

$(Y_{2_ext})_{qst}$ = - 18,3 - 1150 x 1/rayon + 0,177 x Insuf [129]

$(Q_{1_ext})_{max}$ = 114,5 + 1500 x 1/rayon + 0,124 x Insuf + 7,1 x Dr [130]

$(Q_{2_ext})_{max}$ = 117,8 - 9900 x 1/rayon + 0,175 x Insuf + 8,7 x Dr [131]

$(Q_{1_ext})_{qst}$ = 86 + 5300 x 1/rayon + 0,15 x Insuf [132]

$(Q_{2_ext})_{qst}$ = 91,5 - 1500 x 1/rayon + 0,166 x Insuf [133]

Si on impose comme valeur limite des charges les limitations données par la fiche d'homologation, on doit respecter :

$$\left(Y_{qst}\right)_{\lim} = 60\ kN$$

$Q_{\lim} = 90 + Q_0$, où Q_0 = 87,5 kN pour l'XTER, soit : $Q_{\lim} = 177{,}5\ kN$

et $\left(Q_{qst}\right)_{\lim} = 145\ kN$

Les lois sont donc :

$(Y_{1_ext})_{qst}$ = 7,4 + 10000 x 1/rayon + 0,036 x Insuf < 60 kN [134]

$(Y_{2_ext})_{qst}$ = - 18,3 - 1150 x 1/rayon + 0,177 x Insuf < 60 kN [135]

$(Q_{1_ext})_{max}$ = 114,5 + 1500 x 1/rayon + 0,124 x Insuf + 7,1 x Dr < 177,5 kN [136]

$(Q_{2_ext})_{max}$ = 117,8 - 9900 x 1/rayon + 0,175 x Insuf + 8,7 x Dr < 177,5 kN [137]

$$(Q_{1_ext})_{qst} = 86 + 5300 \times 1/\text{rayon} + 0{,}15 \times \text{Insuf} < 145 \text{ kN} \quad [138]$$

$$(Q_{2_ext})_{qst} = 91{,}5 - 1500 \times 1/\text{rayon} + 0{,}166 \times \text{Insuf} < 145 \text{ kN} \quad [139]$$

On obtient des lois limites de l'insuffisance de dévers, c'est à dire, des conditions de circulation, en fonction du tracé et de la qualité géométrique de la voie.

Le tableau suivant indique l'insuffisance de dévers maximale admissible selon le rayon et la qualité géométrique de la voie, pour trois valeurs de qualité géométrique représentatives des voies SNCF : bonne (Dr=0,3), moyenne (Dr=0,7) et mauvaise (Dr=1,5).

Tableau 9-5 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue de la résistance à la fatigue de la voie, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie

Rayon (m)	**Insuffisance de dévers maximale (mm)**									
	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)			$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)			$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)
			Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5		
250	350	468	443	420	374	553	533	493	252	358
500	906	455	467	444	398	439	419	380	323	340
750	1091	451	475	452	406	402	382	342	346	334
1000	1183	449	479	456	410	383	363	323	358	331
1250	1239	448	481	458	413	371	352	312	365	330
1500	1276	447	483	460	414	364	344	304	370	328

Source : Élaboration propre

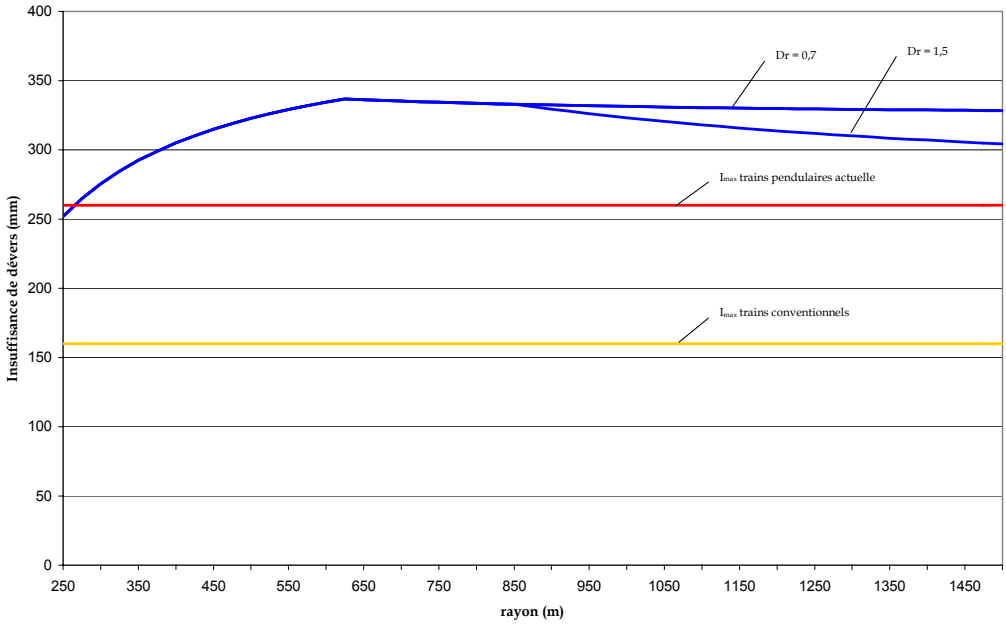
Bien que les valeurs limites de l'insuffisance de dévers soient assez élevées, il faut remarquer la limitation due à la charge verticale quasi-statique du premier essieu.

On avait déjà noté lors de l'étude du comportement du véhicule que la dépendance assez importante de la force verticale quasi-statique du premier essieu pouvait entraîner des restrictions en courbes de faible rayon. Pour les autres efforts, la charge par essieu élevée du véhicule entraîne des limitations de l'ordre de 350 et 400 mm de l'insuffisance de dévers.

Dans le graphique ci-dessous on synthétise les limitations données par les sollicitations liées à la fatigue de la voie, en représentant les valeurs les plus restrictives de l'insuffisance de dévers pour trois qualités géométriques de la voie (dressage=1,5 mm, 0,7 et 0,3) et selon le tracé (rayon de la courbe).

On y joint en trame rouge et jaune les limitations actuelles d'insuffisance de dévers pour trains pendulaires et conventionnels respectivement.

Graphique 9-10 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue des sollicitations liées à la fatigue de la voie selon le rayon de courbe



Source : Élaboration propre

9.5.2 Limitations liées à la sécurité

Pour les sollicitations liées à la sécurité de la circulation, la fiche UIC 518 impose la valeur limite de la résistance transversale de la voie donnée par la formule de Prud'homme. Cette limite de résistance transversale pour une voie normalement armée, et pour la charge à l'essieu de 175 kN du X-TER, est :

$$(\Sigma Y)_{\lim} = 10 + \frac{P_0}{3}$$, où P_0=175 kN pour le X-TER, soit : $(\Sigma Y)_{\lim} = 68\ kN$

En faisant le même processus que pour les sollicitations liées à la fatigue de la voie, en introduisant cette valeur dans les lois obtenues de comportement du véhicule par rapport aux sommes des forces de guidage de l'essieu, on va obtenir des règles de limitation de l'insuffisance de dévers par rapport à la sécurité de la circulation :

Les lois de comportement du véhicule par rapport aux sommes des forces de guidage de l'essieu sont :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = -15 + 8200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}145 \times \text{Insuf} + 7{,}5 \times \text{Dr} \quad [140]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 12{,}6 - 7200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}17 \times \text{Insuf} + 10 \times \text{Dr} \quad [141]$$

En imposant les limites aux sollicitations, les conditions de circulation sont déterminées par :

$$(\Sigma Y_1)_{max} = -15 + 8200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}145 \times \text{Insuf} + 7{,}5 \times \text{Dr} < 68\ \text{kN} \quad [142]$$

$$(\Sigma Y_2)_{max} = 12{,}6 - 7200 \times 1/\text{rayon} + 0{,}17 \times \text{Insuf} + 10 \times \text{Dr} < 68\ \text{kN} \quad [143]$$

Le tableau ci-après montre le même phénomène que précédemment : la somme des forces de guidage du premier essieu limite la circulation en courbes de faible rayon et, en revanche, celle du deuxième essieu limite la circulation en courbes de grand rayon.

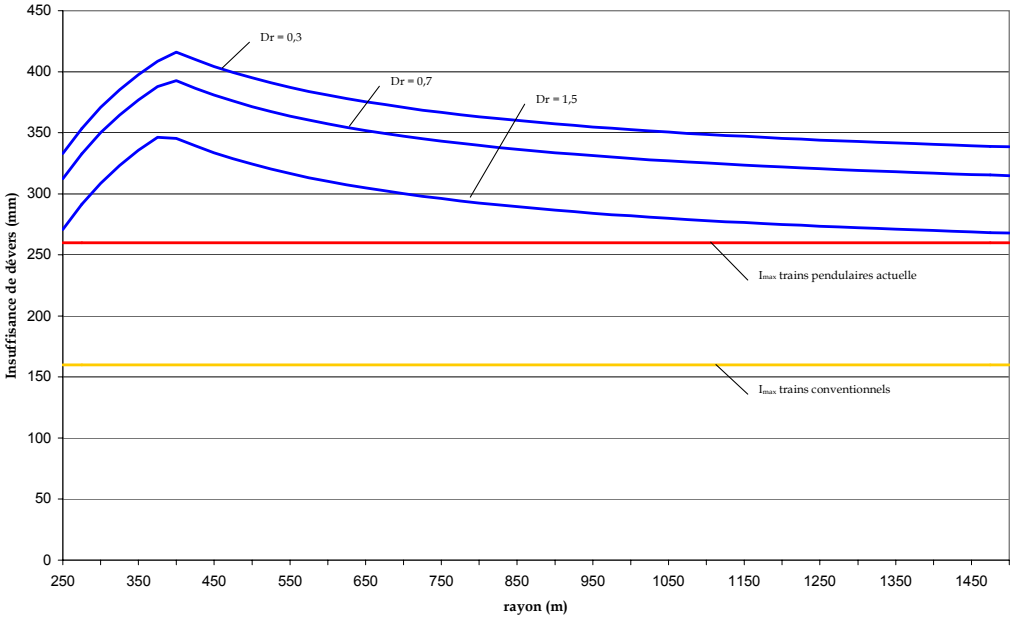
Tableau 9-6 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue de la sécurité, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie

Rayon (m)	**Insuffisance de dévers maximale (mm)**					
	$(\Sigma Y_1)_{max}$ (kN)			$(\Sigma Y_2)_{max}$ (kN)		
	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5	Dr = 0,3	Dr = 0,7	Dr = 1,5
250	333	312	271	480	456	409
500	446	425	384	395	371	324
750	484	463	422	367	343	296
1000	503	482	441	353	329	282
1250	514	493	452	344	321	273
1500	521	501	459	338	315	268

Source : Élaboration propre

Le graphique ci-dessous synthétise les limitations de circulation données par les sommes des forces de guidage de l'essieu en représentant les valeurs les plus restrictives de l'insuffisance de dévers pour trois qualités géométriques de la voie (dressage=1,5 mm, 0,7 et 0,3) selon le tracé (rayon de courbe).

Graphique 9-11 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue de la sécurité, selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

On y joint en trame rouge et jaune les limitations actuelles d'insuffisance de dévers pour trains pendulaires et conventionnels respectivement.

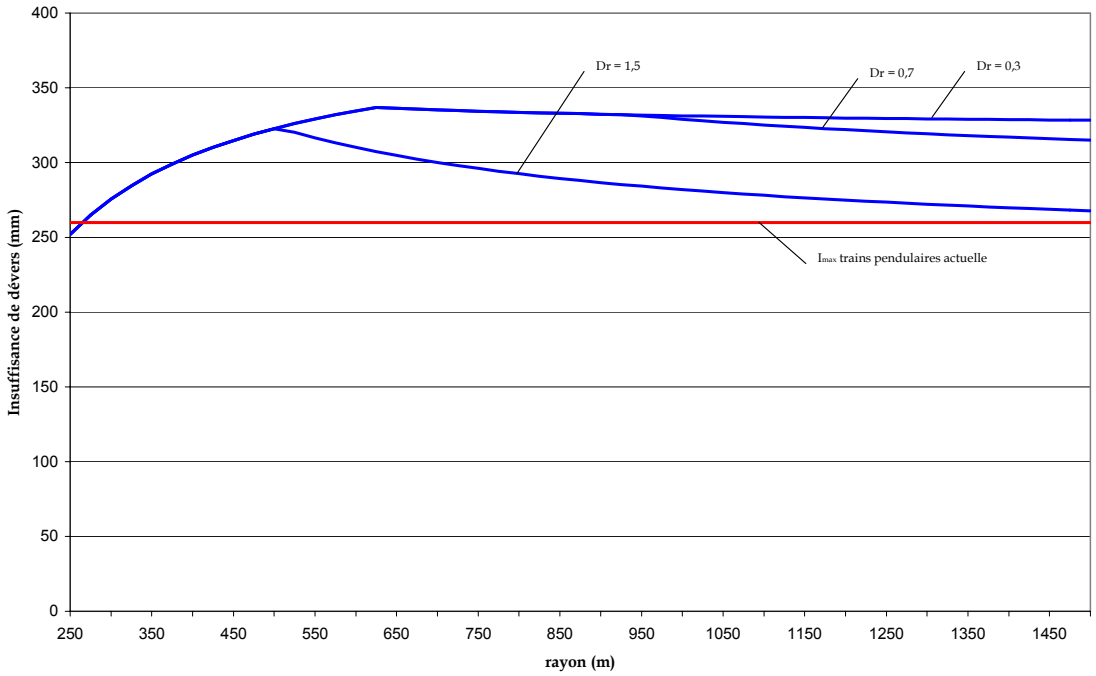
9.5.3 Règles synthétiques de circulation du X-TER Pendulaire

Les règles de circulation de l'X-TER Pendulaire résultent de la limite la plus restrictive parmi celles examinées ci-avant, pour chaque couple (rayon, dressage) ; elles peuvent être représentées par le graphique ci-dessous, qui permet de déterminer les conditions de circulation limites de l'X-TER Pendulaire selon le tracé et la qualité géométrique de la voie.

Selon le tracé de la voie (rayon de courbe) et la qualité géométrique (valeur du dressage) que l'on estime pouvoir maintenir, ce graphique donne la valeur maximale d'insuffisance de dévers pour l'X-TER Pendulaire sur une voie normalement armée (voie en traverses bois, espacées au plus de 65 cm, ballast en pierres cassées et rails de masse linéaire ≥ 46 kg/m). On y a joint la valeur maximale de l'insuffisance de dévers permise actuellement par la réglementation pendulaire en France à titre comparatif.

NOTA : les règles actuelles ne permettent toutefois la valeur de 260 mm que sur des voies d'armement supérieure à cette " voie de référence ".

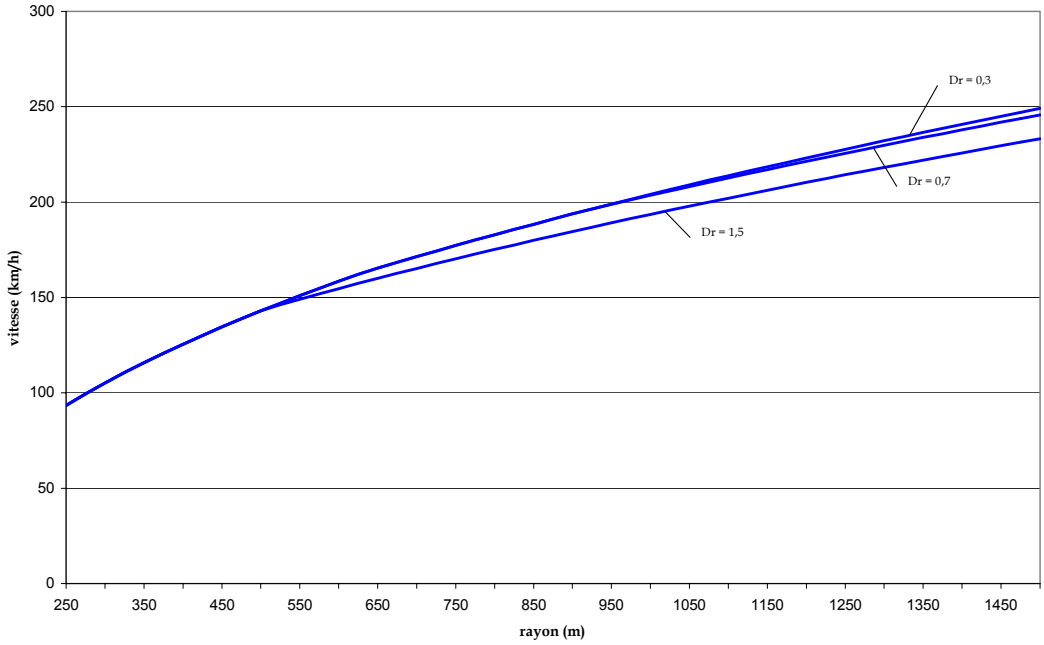
Graphique 9-12 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire selon le rayon de courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

A titre d'illustration on présente un graphique donnant la vitesse maximale pour les courbes de dévers maximal : 160 mm. Ce sont donc les valeurs maximales de la vitesse, auxquelles on pourrait circuler sur une voie avec un armement normal.

Graphique 9-13 : Vitesse maximale admissible pour le X-TER Pendulaire selon le rayon de la courbe et la qualité géométrique



Source : Élaboration propre

NOTA : du fait des lois de limitation mutuelle de D, dD/dI et R, un dévers de 160 mm n'est possible que pour des rayons > 400 m environ. La vitesse ci-dessus est donc surestimée pour R < 400 m.

10 Conclusions

Un des apports essentiels de cette étude est d'avoir montré l'interdépendance de 3 types de facteurs :

- tracé de la ligne (rayon R ou courbure 1/R),
- qualité géométrique de la voie (ici représentée par le dressage Dr),
- conditions de circulation (insuffisance de dévers I),

et la nécessité d'une meilleure prise en compte des conditions de tracé dans le référentiel, par introduction des restrictions d'insuffisance de dévers en courbes de faible rayon. Notons que celles-ce sont de surcroît, très souvent, de qualité géométrique médiocre et présentent un armement plus faible que la moyenne du réseau.

Les résultats obtenus montrent que l'ETR 460 est un matériel bien adapté à la circulation en forte insuffisance de dévers: la faible charge par essieu permet de limiter la sollicitation de l'infrastructure, et une bonne répartition des efforts transversaux entre les deux essieux du bogie permet d'obtenir des conditions d'inscription favorables en courbes de faible rayon. Pour de tels trains optimisés a priori pour la pendulation, une fois la limitation liée au confort levée par l'inclinaison de caisse, l'infrastructure pourrait donc supporter un relèvement des limites actuelles d'insuffisance de dévers.

Ce constat reste valable, dans une moindre mesure, pour l'X-TER Pendulaire, malgré une charge à l'essieu plus élevée.

Dans le cas du TGV P01, en courbes de très faible rayon et lorsque la qualité géométrique de la voie est assez mauvaise (conditions souvent combinées, la vitesse étant plus basse en courbes de faible rayon et donc les normes de géométrie moins strictes), les sollicitations verticales (critères de fatigue de la voie) et la somme des forces de guidage du premier essieu ΣY_{1max} (critère de sécurité) imposent une limitation sévère de l'insuffisance de dévers. Notons toutefois qu'on ne disposait pas de données expérimentales pour ces situations combinant un très faible rayon et une mauvaise qualité de la voie. Ces limitations, résultant de l'extrapolation des lois statistiques obtenues, mériteront d'être affinées.

Comme on l'a mis en évidence, une fois la limitation liée au confort levée par la pendulation de la caisse, cas des trains pendulaires, l'infrastructure permettrait un relèvement des limites actuelles permises d'insuffisance de dévers pour les trains avec une bonne conception. Mais il faut noter que tous les résultats ont été donnés pour une voie normalement armée. Une voie d'armement lourd (LRS UIC 60 sur traverses en béton) autoriserait des limites moins restrictives. A l'inverse, la circulation sur des lignes secondaires faiblement armées imposerait des limitations plus sévères.

On propose donc, pour la rédaction du nouveau référentiel pendulaire de prolonger l'étude pour différents armements de la voie, ainsi que pour différents matériels pendulaires. La méthodologie utilisée permet une optimisation du véhicule pendulaire en établissant les limitations de circulation en fonction de l'agressivité du véhicule. Il serait donc intéressant d'établir des conditions de circulation pour les trains pendulaires non pas globalement mais en particularisant pour chacun d'eux. De cette façon, on éviterait de pénaliser par une loi globale, prenant le comportement le plus restrictif observé pour définir les limitations des conditions de circulation, les véhicules pendulaires bien conçus et beaucoup moins agressifs sur l'infrastructure.

Cependant, d'autres types de contraintes, liées en particulier à la signalisation, s'opposent à la multiplicité des taux de vitesse limite sur une même ligne.

Bibliographie

[1] LÓPEZ PITA Andrés. *Pendulación, Basculación y Construcción de Infraestructuras Ferroviarias. Opciones alternativas y complementarias*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1998.

[2] U.I.C. Union Internationale des Chemins de fer, Direction Grande Vitesse. *Premier Rapport sur l'État de l'Art de la Technologie de la Caisse Inclinable*. Paris. 1998.

[3] S.N.C.F., Direction de l'Équipement, Département des Etudes et Recherches " Voie ". *Circulation CID avec différents Engins*. Paris. 1995.

[4] S.N.C.F., Direction de l'Équipement, Département des Etudes et Recherches " Voie ". *La compensation d'Insuffisance de Dévers (autrement désignée " pendulation ").* Paris. 1995.

[5] S.N.C.F., Direction de l'Ingénierie, Département Etudes Voie. *Influence des particularités voie ou véhicule sur les sollicitations de la voie. Référentiel d'évaluation des conséquences de l'amélioration des performances de la superstructure de la voie*. Paris. 2002.

[6] MOREAU Alain. *Dynamique Ferroviaire. Note Technique*. S.N.C.F. Paris. 1993.

[7] U.I.C. Union Internationale des Chemins de fer. *Fiche n°518 : Essais et homologation des véhicules ferroviaires du point de vue du comportement dynamique. Sécurité – Fatigue de la Voie – Qualité de Marche.* Paris. 1999.

[8] Ferrovie dello Stato, A.S.A. Materiale Rotabile e Trazione. *ETR 460. Homologation du point de vue du comportement dynamique à 200 km/h sur le réseau SNCF. Rapport d'essai*. Firenze. 1997.

[9] S.N.C.F., Agence d'Essai Ferroviaire. *Démonstrateur TGV Pendulaire. Homologation sécurité – fatigue de la voie – qualité de marche. Rapport d'essai*. Vitry-sur-Seine. 1998.

[10] S.N.C.F., Agence d'Essai Ferroviaire. *Démonstrateur X-TER Pendulaire " DXP ". Comportement Dynamique. Evaluation du confort vibratoire. Rapport d'essai*. Vitry-sur-Seine. 1999.

[11] S.N.C.F., Direction de l'Équipement, Département des Etudes et Recherches " Voie ". *Mise en service du STS (Système de Traitement Synthétique) sur les véhicules d'enregistrement de la géométrie de la voie*. Paris. 1997.

[12] S.N.C.F., Direction de l'Équipement, Département des Etudes et Recherches " Voie ". *Contrôle de l'État des Voies*. Paris. 1975.

[13] S.N.C.F., Agence d'Essai Ferroviaire. *Synthèse des résultats d'essai des matériels pendulaires effectués à la SNCF entre 1998 et 2000. Rapport d'essai*. Vitry-sur-Seine. 2000.

[14] S.N.C.F., Direction de l'Ingénierie, Département Etudes Voie. *ETR 460 – Etude statistique des efforts transversaux Y1 et Y2*. Paris. 1997.

[15] U.I.C. Union Internationale des Chemins de fer. *Fiche n°510-2 : Matériel remorqué : Roues et essieux montés – Conditions concernant l'utilisation de roues de différents diamètres*. Paris. 1978.

[16] S.N.C.F., Direction de l'Ingénierie, Département Etudes Voie. *Démonstrateur pendulaire TGV P01 – Essais sur la région de Chambéry. Analyse statistique des efforts transversaux ΣY1max du premier essieu de la motrice*. Paris. 1999.

[17] Réseau Ferré de France / S.N.C.F., Direction Générale Déléguée Exploitation. *Etudes d'adaptation de l'Infrastructure à la circulation des trains pendulaires. Référentiel Infrastructure*. Paris. 2002.

[18] S.N.C.F., Direction de l'Équipement, Département des Etudes et Recherches " Voie ". *Etude des conditions de circulation de l'Autorail DB VT 610 en fonction de la qualité géométrique de la voie.* Paris. 1994.

Table des Illustrations

Figure 2-1 : Comportement de la suspension d'un véhicule en courbe 6

Figure 2-2 : L'insuffisance de dévers et la pendulation 8

Figure 3-1 : Système des forces 10

Figure 4-1 :Représentation du processus d'extraction des valeurs utilisé 15

Figure 5-1 : Courbes adhérence – glissement transversal sur rails secs 35

Figure 5-2 : Relation géométrique entre l'angle d'attaque et le rayon de courbure 35

Figure 7-1 : Numérotation des essieux du Bogie Mesure selon le sens de la marche 51

Tableau 4-1 : Comparaison des dates des essais d'homologation et des enregistrements Mauzin et STS 16

Tableau 4-2 : Coefficients de la distribution " t " de Student 19

Tableau 5-1 : Caractéristiques moyennes des marches choisies 22

Tableau 5-2 : Coefficients de passage de l'ancienne à la nouvelle cotation du STS 24

Tableau 5-3 : Valeurs moyennes du coefficient de frottement dans différentes marches 36

Tableau 6-1 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure 40

Tableau 6-2 : Valeurs moyennes de $(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure 41

Tableau 6-3 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure 43

Tableau 6-4 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure 45

Tableau 6-5 : Valeurs moyennes de $(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$ selon la configuration de la rame et le bogie de mesure 47

Tableau 7-1 : Valeurs moyennes de $(\Sigma Y_1)_{max}$ et $(\Sigma Y_2)_{max}$ selon le sens de circulation de la rame..... 52

Tableau 7-2 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{max}$ et $(Q_{2_ext})_{max}$ selon le sens de circulation de la rame..... 54

Tableau 7-3 : Valeurs moyennes de $(Q_{1_ext})_{qst}$ et $(Q_{2_ext})_{qst}$ selon le sens de circulation de la rame..... 56

Tableau 7-4 : Valeurs moyennes de $(Y_{1_ext})_{qst}$ et $(Y_{2_ext})_{qst}$ selon le sens de circulation de la rame..... 58

Tableau 7-5 : Valeurs moyennes de $(Y_{1_ext})_{max}$ et $(Y_{2_ext})_{max}$ selon le sens de circulation de la rame 60

Tableau 8-1 : Valeurs moyennes des efforts verticaux du bogie moteur en tête de rame du TGV P01, de l'ETR 460 et du X-TER Pendulaire 63

Tableau 8-2 : Valeurs moyennes des efforts transversaux du bogie moteur en tête de rame du TGV P01, de l'ETR 460 et du X-TER Pendulaire. 67

Tableau 9-1 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la résistance à la fatigue de la voie, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie..... 80

Tableau 9-2 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la sécurité, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie..... 82

Tableau 9-3 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue de la résistance à la fatigue de la voie, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie..... 86

Tableau 9-4 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue de la sécurité, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie..... 88

Tableau 9-5 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue de la résistance à la fatigue de la voie, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie 92

Tableau 9-6 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue de la sécurité, selon le tracé et la qualité géométrique de la voie 94

Graphique 5-1 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 25

Graphique 5-2 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 25

Graphique 5-3 : $(Q_{1_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 27

Graphique 5-4 : $(Q_{2_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 27

Graphique 5-5 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 29

Graphique 5-6 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 29

Graphique 5-7 : $(Y_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 30

Graphique 5-8 : $(Y_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 31

Graphique 6-1 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 42

Graphique 6-2 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 42

Graphique 6-3 : $(Q_{1_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 44

Graphique 6-4 : $(Q_{2_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 44

Graphique 6-5 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 46

Graphique 6-6 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 46

Graphique 6-7 : $(Y_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 48

Graphique 6-8 : $(Y_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 48

Graphique 7-1 : $(\Sigma Y_1)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 53

Graphique 7-2 : $(\Sigma Y_2)_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 53

Graphique 7-3 : $(Q_{1_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 55

Graphique 7-4 : $(Q_{2_ext})_{max}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 55

Graphique 7-5 : $(Q_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi..... 57

Graphique 7-6 : $(Q_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi..... 57

Graphique 7-7 : $(Y_{1_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 59

Graphique 7-8 : $(Y_{2_ext})_{qst}$ réelles par rapport aux valeurs estimées par la loi 59

Graphique 8-1 : Répartition des efforts verticaux entre les deux essieux du bogie de tête du TGV P01 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,65 et I=260 mm) 65

Graphique 8-2 : Répartition des efforts verticaux entre les deux essieux du bogie de tête de l'ETR 460 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,65 et I=260 mm) 65

Graphique 8-3 : Répartition des efforts verticaux entre les deux essieux du bogie de tête du X-TER Pendulaire pour différents rayons de courbe (Dr = 0,65 et I=260 mm) 66

Graphique 8-4 : Répartition des sommes des forces de guidage maximales entre les deux essieux du bogie de tête du TGV P01 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,7 et 1,5 et I=260 mm) 69

Graphique 8-5 : Répartition des sommes des forces de guidage maximales entre les deux essieux du bogie de tête de l'ETR 460 pour différents rayons de courbe (Dr = 0,7 et 1,5 et I=260 mm)..... 69

Graphique 8-6 : Répartition des sommes des forces de guidage maximales entre les deux essieux du bogie de tête du X-TER Pendulaire pour différents rayons de courbe (Dr = 0,7 et 1,5 et I=260 mm) 70

Graphique 8-7 : Répartition des sommes des forces de guidage quasi-statiques entre les deux essieux du bogie de l'ETR 460 pour différents rayons de courbe (I=260 mm) 71

Graphique 8-8 : Répartition des sommes des forces de guidage quasi-statiques entre les deux essieux du bogie de l'X-TER Pendulaire pour différents rayons de courbe (I=260 mm)..... 72

Graphique 9-1 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue des sollicitations liées à la fatigue de la voie selon le rayon de courbe..... 81

Graphique 9-2 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la sécurité ($(\Sigma Y_1)_{max}$) selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 83

Graphique 9-3 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 du point de vue de la sécurité ($(\Sigma Y_2)_{max}$) selon le rayon de courbe 83

Graphique 9-4 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour l'ETR 460 selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 84

Graphique 9-5 : Vitesse maximale admissible pour l'ETR 460 selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 85

Graphique 9-6 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue des sollicitations liées à la fatigue de la voie selon le rayon de la courbe et la qualité géométrique 87

Graphique 9-7 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 du point de vue de la sécurité, selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 89

Graphique 9-8 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le TGV P01 selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 90

Graphique 9-9 : Vitesse maximale admissible pour le TGV P01 selon le rayon de la courbe et la qualité géométrique 90

Graphique 9-10 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue des sollicitations liées à la fatigue de la voie selon le rayon de courbe 93

Graphique 9-11 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire du point de vue de la sécurité, selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 94

Graphique 9-12 : Insuffisance de dévers maximale admissible pour le X-TER Pendulaire selon le rayon de courbe et la qualité géométrique 95

Graphique 9-13 : Vitesse maximale admissible pour le X-TER Pendulaire selon le rayon de la courbe et la qualité géométrique 96

Annexes

A Véhicules objets de la présente étude

ETR 460 / FS Spa

Constructeur : FIAT Ferroviaria

Source : Ferrovie dello Stato

TGV P01 / SNCF

Constructeur : Alstom. Adaptation pour la pendulation faite par la SNCF avec le concours de Alstom.

Source : SNCF

X-TER Pendulaire / SNCF

Constructeur : Alstom. Adaptation pour la pendulation faite par la SNCF avec le concours de Alstom.

Source : SNCF

B Résumé des données utilisées pour la présente étude

B.1 Tableau des données disponibles pour l'ETR 460.

Marche	Données extraites du rapport de l'AEF																Données extraites des enregistrements graphiques des essais												Données extraites du Mauzin					Données extraites du STS				
	pk origine	pk fin	longueur	sens	rayon	dévers	vitesse	Insuf	$(SY_1)_{max}$	$(SY_2)_{max}$	$(Q_{1_ext})_{max}$	$(Q_{2_ext})_{max}$	$(Q_{1_ext})_{qst}$	$(Q_{2_ext})_{qst}$	$(Y_{1_ext})_{qst}$	$(Y_{2_ext})_{qst}$	$(Y/Q)_{1_int}$	$(SY_1)_{max}$	$(SY_2)_{max}$	$(Q_{1_ext})_{max}$	$(Q_{2_ext})_{max}$	$(Q_{1_ext})_{qst}$	$(Q_{2_ext})_{qst}$	$(Y_{1_ext})_{qst}$	$(Y_{2_ext})_{qst}$	$(Y_{1_ext})_{max}$	$(Y_{2_ext})_{max}$	$(SY_1)_{qst}$	$(SY_2)_{qst}$	NL	NT	Dr	Var. Ec	Ec	NL	NT	Dr	Var. Ec	Ec
19	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
33	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	□	■
34	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	□	■
70	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■
78	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■
99	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■
100	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■

■ Données disponibles
□ Données non disponibles

B.2 Valeurs caractéristiques des conditions tracé et circulation des marches retenues pour l'ETR 460.

marche	ligne	pk origine	pk fin	voie	sens	Nb tronçons	rayon (m)			dévers (mm)			vitesse (km/h)			Insuf. dévers (mm)			$(Y/Q)_{1_int}$		
							max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.
19	Limoges-Argenton	383,981	298,617	2	pair	107	1471	909	1000	161	80	125	198	169	183	303	197	276	0,11	0,00	0,02
20	Argenton-Limoges	305,402	385,049	1	impair	90	1493	909	1016	158	75	121	201	170	184	304	205	275	0,18	0,02	0,10
33	Brive-Cahors	502,944	596,975	1	impair	254	599	457	498	161	102	151	148	121	136	318	197	287	0,36	0,00	0,08
34	Cahors-Brive	590,270	503,132	2	pair	236	595	455	502	161	101	149	145	128	136	321	199	286	0,24	0,00	0,07
70	Chambéry-Modane	159,447	229,283	1	impair	42	592	377	526	161	72	127	152	111	130	317	208	257	0,28	0,00	0,12
78	St. Pierre d'Albigny-Albertville	9,922	16,628	VU	impair	9	391	376	383	156	140	147	122	106	118	320	203	283	0,30	0,17	0,25
99	Culoz-Chambéry	114,410	131,035	1	impair	20	592	410	548	161	58	139	150	108	136	312	210	265	0,38	0,02	0,15
100	Chambéry-Culoz	131,054	114,410	2	pair	18	591	410	531	159	123	134	148	111	133	301	223	263	0,22	0,02	0,07
70+78						51	592	376	501	161	72	131	152	106	128	320	203	262	0,30	0,00	0,14
90+100						38	592	410	540	161	58	137	150	108	135	312	210	264	0,38	0,02	0,11
19+70+78						158	1471	376	839	161	72	127	198	106	165	320	197	271	0,30	0,00	0,06
20+99+100						128	1493	410	875	161	58	126	201	108	169	312	205	272	0,38	0,02	0,10
19+34+70+78						394	1471	376	637	161	72	140	198	106	148	321	197	280	0,30	0,00	0,07
20+33+99+100						382	1493	410	624	161	58	143	201	108	147	318	197	282	0,38	0,00	0,09

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine, les pk fin, la voie et le sens sont décrits dans les marches prises.

Définition des marches:

70+78 : ensemble des marches 70 et 78

max. : valeur maximale du paramètre dans la marche

min. : valeur minimale du paramètre dans la marche

moy. : valeur moyenne du paramètre dans la marche

B.3 Valeurs caractéristiques de la qualité géométrique de la voie pour les marches retenues pour l'ETR 460. MAUZIN.

marche	ligne	pk origine	pk fin	voie	sens	Nb tronçons	NL (mm)			NT (mm)			Dr (mm)			Var. Ec (mm)			Ec (mm)		
							max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.
19	Limoges-Argenton	383,981	298,617	2	pair	107	6,5	0,5	2,4	7,5	0,2	1,8	9,5	0,7	2,3	16,0	0,4	3,0	1453	1435	1446
20	Argenton-Limoges	305,402	385,049	1	impair	90	10,5	0,5	2,9	10,0	0,8	2,4	8,5	0,9	2,6	12,5	1,0	3,5	1455	1437	1447
33	Brive-Cahors	502,944	596,975	1	impair	254	6,3	1,0	2,8	5,5	0,3	1,8	7,3	0,7	1,9	8,0	0,3	2,2	1454	1437	1445
34	Cahors-Brive	590,270	503,132	2	pair	236	7,4	0,6	3,1	6,5	0,1	1,8	5,5	0,4	1,7	6,5	0,5	2,0	1455	1438	1446
70	Chambéry-Modane	159,447	229,283	1	impair	42	4,8	0,2	1,7				6,2	0,7	2,2	5,1	0,0	1,3	1449	1428	1439
78	St. Pierre d'Albigny-Albertville	9,922	16,628	VU	impair	9	4,7	0,9	2,2				12,6	1,4	5,2	1,9	0,1	1,1	1443	1431	1437
99	Culoz-Chambéry	114,410	131,035	1	impair	20	5,4	0,7	2,2				8,8	0,8	1,9	4,0	0,0	1,0	1444	1430	1435
100	Chambéry-Culoz	131,054	114,410	2	pair	18	4,3	0,6	2,2				5,5	0,5	1,5	6,3	0,0	0,7	1442	1433	1436
70+78						51	4,8	0,2	1,8				12,6	0,7	2,7	5,1	0,0	1,2	1449	1428	1439
90+100						38	5,4	0,6	2,2				8,8	0,5	1,7	6,3	0,0	0,8	1444	1430	1435
19+70+78						158	6,5	0,2	2,2				12,6	0,7	2,4	16,0	0,0	2,4	1453	1428	1443
20+99+100						128	10,5	0,5	2,7				8,8	0,5	2,3	12,5	0,0	2,7	1455	1430	1444
19+34+70+78						394	7,4	0,2	2,8				12,6	0,4	2,0	16,0	0,0	2,2	1455	1428	1445
20+33+99+100						382	10,5	0,5	2,7				8,8	0,5	2,0	12,5	0,0	2,4	1455	1430	1445

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine, les pk fin, la voie et le sens sont décrits dans les marches prises.

Données non disponibles

max. : valeur maximale du paramètre dans la marche
min. : valeur minimale du paramètre dans la marche
moy. : valeur moyenne du paramètre dans la marche

B.4 Valeurs caractéristiques de la qualité géométrique de la voie pour les marches retenues pour l'ETR 460. STS.

marche	ligne	pk origine	pk fin	voie	sens	Nb tronçons	NL (mm)			NT (mm)			Dr (mm)			Var. Ec (mm)			Ec (mm)		
							max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.
19	Limoges-Argenton	383,981	298,617	2	pair	93	1,3	0,4	0,8	0,9	0,3	0,5	1,8	0,3	0,6	2,3	0,5	1,0	1452	1433	1446
20	Argenton-Limoges	305,402	385,049	1	impair	90	1,7	0,5	0,9	3,6	0,4	0,6	2,0	0,3	0,7	2,8	0,6	1,2	1453	1436	1446
33	Brive-Cahors	502,944	596,975	1	impair	251	1,7	0,5	0,9				1,7	0,1	0,7				1454	1437	1444
34	Cahors-Brive	590,270	503,132	2	pair	231	1,6	0,5	1,0				1,2	0,3	0,7				1456	1436	1445
70	Chambéry-Modane	159,447	229,283	1	impair	43	1,8	0,5	1,1	1,2	0,4	0,7	1,6	0,4	0,8	2,3	0,6	1,2	1455	1438	1448
78	St. Pierre d'Albigny-Albertville	9,922	16,628	VU	impair	10	2,5	0,7	1,5	1,7	0,4	1,1	3,6	0,7	1,9	2,0	0,7	1,6	1451	1440	1446
99	Culoz-Chambéry	114,410	131,035	1	impair	21	2,2	0,6	1,2	1,3	0,4	0,7	2,2	0,4	0,7	2,8	0,5	1,0	1448	1440	1444
100	Chambéry-Culoz	131,054	114,410	2	pair	20	2,1	0,5	1,0	1,2	0,5	0,7	1,3	0,3	0,6	1,6	0,5	0,7	1450	1443	1445
70+78						53	2,5	0,5	1,1	1,7	0,4	0,8	3,6	0,4	1,0	2,8	0,5	1,3	1455	1438	1448
90+100						41	2,2	0,5	1,1	1,3	0,4	0,7	2,2	0,3	0,6	2,8	0,5	0,9	1450	1440	1445
19+70+78						146	2,5	0,4	0,9	1,7	0,3	0,6	3,6	0,3	0,8	2,3	0,5	1,1	1455	1433	1447
20+99+100						131	2,2	0,5	1,0	3,6	0,4	0,7	2,2	0,3	0,7	2,8	0,5	1,1	1453	1436	1445
19+34+70+78						377	2,5	0,4	0,9				3,6	0,3	0,7				1456	1433	1446
20+33+99+100						382	2,2	0,5	0,9				2,2	0,1	0,7				1454	1436	1445

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine, les pk fin, la voie et le sens sont décrits dans les marches prises.

Données non disponibles

max. : valeur maximale du paramètre dans la marche
min. : valeur minimale du paramètre dans la marche
moy. : valeur moyenne du paramètre dans la marche

B.5 Valeurs moyennes des efforts obtenus des bandes d'essais des marches retenues pour l'ETR 460.

marche	ligne	$(SY_1)_{max}$ (kN)	$(SY_2)_{max}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{max}$ (kN)	$(SY_1)_{qst}$ (kN)	$(SY_2)_{qst}$ (kN)
19	Limoges-Argenton	22,5	39,3	90,9	93,9	11,1	24,9	85,5	88,0	20,0	33,5	15,9	23,6
20	Argenton-Limoges	24,0	39,0	88,2	93,7	10,7	18,7	82,8	87,5	18,6	27,5	17,6	30,9
33	Brive-Cahors	25,7	37,3	94,1	98,0	21,1	23,5	89,9	94,3	30,0	21,1	18,5	33,3
34	Cahors-Brive	29,9	34,4	94,1	97,0	22,7	23,6	89,8	93,4	32,9	29,1	21,9	30,5
70	Chambéry-Modane	23,7	34,3	89,6	93,4	20,7	19,5	84,7	89,2	31,5	22,8	16,4	29,9
78	St. Pierre d'Albigny-Albertville	37,8	33,4	96,9	97,2	31,8	19,7	87,2	90,2	50,0	26,3	24,9	27,3
99	Culoz-Chambéry	24,1	33,9	90,0	94,2	21,8	19,2	86,7	90,9	31,3	22,0	16,8	30,9
100	Chambéry-Culoz	25,3	33,2	89,9	94,7	22,1	22,1	86,2	91,2	28,9	24,8	19,1	29,3
70+78		26,3	34,2	91,0	94,1	22,8	19,5	85,8	89,5	35,0	23,5	18,0	29,4
90+100		24,7	33,5	90,0	94,5	21,9	20,6	86,4	91,0	30,1	23,3	17,9	30,1
19+70+78		23,8	37,6	90,9	94,0	15,0	23,1	85,6	88,5	25,0	30,2	16,6	31,4
20+99+100		24,2	37,3	88,8	94,0	14,2	19,3	83,9	88,6	22,2	26,2	17,7	30,6
19+34+70+78		27,4	35,7	92,8	95,8	19,5	23,4	88,0	91,4	29,7	29,6	19,8	30,9
20+33+99+100		25,2	37,3	92,3	96,6	18,8	22,1	87,9	92,4	27,3	26,8	18,2	32,4

* Pour les ensembles des marches, les lignes sont décrites dans les marches prises.

B.6 Tableau des données disponibles pour le TGV P01.

Marche	Données extraites du rapport de l'AEF																							
									BOGIE MOTEUR								BOGIE PORTEUR							
	pk origine	pk fin	longueur	sens *	rayon	dévers *	vitesse	Insuf	$(SY_1)_{max}$	$(SY_2)_{max}$	$(Q_{1_ext})_{max}$	$(Q_{2_ext})_{max}$	$(Q_{1_ext})_{qst}$	$(Q_{2_ext})_{qst}$	$(Y_{1_ext})_{qst}$	$(Y_{2_ext})_{qst}$	$(SY_1)_{max}$	$(SY_2)_{max}$	$(Q_{1_ext})_{max}$	$(Q_{2_ext})_{max}$	$(Q_{1_ext})_{qst}$	$(Q_{2_ext})_{qst}$	$(Y_{1_ext})_{qst}$	$(Y_{2_ext})_{qst}$
CN Mot 1 tête CGR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■				
CN Mot 1 tête CRM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■				
CN Mot 1 tête CPR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CN Mot 1 tête CTPR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CN Mot 1 queue CGR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■				
CN Mot 1 queue CRM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■				
CN Mot 1 queue CPR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
VOM Mot 1 tête CRM	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■				
VOM Mot 1 tête CPR	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■	■	■
VOM Mot 1 tête CTPR	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■	■	■
VOM Mot 1 queue CRM	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■				
VOM Mot 1 queue CPR	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■	■	■

* données obtenues à partir des fichiers tracé (VOP ou OFELIUS)

Définition des marches:

CN : charge normale

VOM : vide en ordre de marche

Mot 1 tête : motrice 1 en tête de rame

Mot 1 queue : motrice 1 en queue de rame

CGR : courbes de grand rayon

CRM : courbes de rayon moyen

CPR : courbes de petit rayon

CTPR : courbes de très petit rayon

■ Données disponibles

□ Données non disponibles

B.7 Valeurs caractéristiques des conditions tracé et circulation des marches retenues pour le TGV P01.

marche	ligne	pk origine	pk fin	Nb tronçons	rayon (m)			dévers (mm)			vitesse (km/h)			Insuf. dévers (mm)		
					max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.
CN Mot 1 tête CGR	Limoges - Argenton	364,150	298,600	87	1273	928	972	160	96	128	192	175	185	312	214	287
CN Mot 1 tête CRM	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu	150,900 106,800	198,560 114,690	25	962	603	762	160	50	124	170	136	154	291	209	251
CN Mot 1 tête CPR	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu Bourg St Mautice - Moutiers	159,460 86,320 42,280	196,910 131,030 38,540	43	599	436	539	160	92	139	151	130	141	304	219	276
CN Mot 1 tête CTPR	Chambéry - Ambérieu Bourg St Mautice - Moutiers	117,470 77,190	118,170 52,430	55	340	282	302	160	106	136	111	97	102	313	272	293
CN Mot 1 tête GLOBAL				210	1273	282	683	160	50	132	192	97	151	313	209	282
CN Mot 1 queue CGR	Limoges - Argenton	313,100	363,910	49	1045	925	963	158	111	128	188	181	186	318	268	295
CN Mot 1 queue CRM	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu	198,480 126,770	150,890 91,300	35	983	680	808	115	97	104	172	137	159	296	184	253
CN Mot 1 queue CPR	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu	196,750 131,070	159,420 85,830	60	599	411	523	160	92	137	153	111	136	313	223	275
CN Mot 1 queue GLOBAL				144	1045	411	742	160	92	126	188	111	159	318	184	276
VOM Mot 1 tête CRM	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu	150,940 93,300	198,610 114,710	29	964	623	780	160	98	132	171	142	157	291	201	249
VOM Mot 1 tête CTPR	Chambéry - Ambérieu Bourg St Mautice - Moutiers	117,480 77,130	118,180 55,680	45	408	282	322	160	121	146	112	98	103	314	271	294
VOM Mot 1 tête GLOBAL				74	964	282	501	160	98	141	171	98	124	314	201	276
VOM Mot 1 queue CRM	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu	198,540 126,810	150,950 91,360	29	939	676	791	153	81	112	171	135	157	291	189	247
VOM Mot 1 queue CPR	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu	197,010 131,110	178,360 85,910	66	601	411	531	160	111	142	152	110	136	329	215	275
VOM Mot 1 queue GLOBAL				95	939	411	610	160	81	133	171	110	142	329	189	266

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine et les pk fin sont décrits dans les marches prises.

Définition des marches:

CN : charge normale
VOM : vide en ordre de marche

Mot 1 tête : motrice 1 en tête de rame
Mot 1 queue : motrice 1 en queue de rame

CGR : courbes de grand rayon
CRM : courbes de rayon moyen
CPR : courbes de petit rayon
CTPR : courbes de très petit rayon
GLOBAL : tous les types de courbes

max. : valeur maximale du paramètre dans la marche
min. : valeur minimale du paramètre dans la marche
moy. : valeur moyenne du paramètre dans la marche

B.8 Valeurs moyennes des efforts obtenus du rapport d'essai des marches retenues pour le TGV P01.

marche	Bogie mesure [1]	Nb tronçons	$(SY_1)_{max}$ (kN)	$(SY_2)_{max}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)
CN Mot 1 tête CGR	BM	87	39	38	142	140				
	BP	87	35	37	139	136				
CN Mot 1 tête CRM	BM	25	46	32	144	139				
	BP	25	40	36	152	145				
CN Mot 1 tête CPR	BM	43	45	32	147	137	45	19	130	121
	BP	43	44	33	156	147	47	20	139	132
CN Mot 1 tête CTPR	BM	55	56	24	151	127	58	14	127	121
	BP	55	45	31	158	140	56	21	148	133
CN Mot 1 tête GLOBAL	BM	210	46	32	146	136	53	16	128	121
	BP	210	40	35	149	141	52	21	144	132
CN Mot 1 queue CGR	BM	49	34	50	145	141				
	BP	49	34	43	143	143				
CN Mot 1 queue CRM	BM	35	31	41	133	136				
	BP	35	38	35	139	149				
CN Mot 1 queue CPR	BM	60	34	35	132	140	44	22	120	127
	BP	60	41	32	140	153	49	18	129	140
CN Mot 1 queue GLOBAL	BM	144	33	41	137	139	44	22	120	127
	BP	144	38	37	141	148	49	18	129	140
VOM Mot 1 tête CRM	BP	29	35	34	135	127				
VOM Mot 1 tête CTPR	BP	45	42	33	141	134	42	25	129	124
VOM Mot 1 tête GLOBAL	BP	74	39	34	139	131	42	25	129	124
VOM Mot 1 queue CRM	BP	29	31	37	127	131				
VOM Mot 1 queue CPR	BP	66	32	35	129	134	40	18	118	123
VOM Mot 1 queue GLOBAL	BP	95	32	36	128	133	40	18	118	123

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine et les pk fin sont décrits dans les marches prises.

[1] Bogie mesure:
BM : bogie moteur
BP : bogie porteur

Données non disponibles

B.9 Valeurs caractéristiques de la qualité géométrique de la voie pour les marches retenues pour le TGV P01. STS.

marche	ligne	pk origine	pk fin	Nb tronçons	NL (mm)			NT (mm)			Dr (mm)			Var. Ec (mm)		
					max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.
CN Mot 1 tête CGR	Limoges -Argenton	364,150	298,600	87	1,32	0,43	0,82	0,90	0,36	0,59	1,34	0,38	0,73	1,58	0,38	0,88
CN Mot 1 tête CRM	Chambéry-St Jean de Maurienne Chambéry-Ambérieu	150,900 106,800	198,560 114,690	25	2,50	0,77	1,53	1,32	0,55	0,95	1,67	0,53	1,03	2,39	0,72	1,31
CN Mot 1 tête CPR	Chambéry - St Jean de Maurienne Chambéry - Ambérieu Bourg St Mautice - Moutiers	159,460 86,320 42,280	196,910 131,030 38,540	39	2,41	0,89	1,47	1,75	0,59	1,00	1,66	0,48	0,93	2,98	0,47	1,24
CN Mot 1 tête CTPR	Chambéry-Ambérieu Bourg St Mautice-Moutiers	117,470 77,190	118,170 52,430	55	1,48	0,39	0,79	1,02	0,29	0,50	1,44	0,38	0,65	1,37	0,36	0,70
CN Mot 1 tête GLOBAL				206	2,50	0,39	1,02	1,75	0,29	0,69	1,67	0,38	0,78	2,98	0,36	0,95
CN Mot 1 queue CGR	Limoges -Argenton	313,100	363,910	49	1,68	0,63	0,95	1,20	0,41	0,69	1,77	0,46	0,89	2,54	0,65	1,36
CN Mot 1 queue CRM	Chambéry-St Jean de Maurienne Chambéry-Ambérieu	198,480 126,770	150,890 91,300	35	2,19	0,52	1,12	1,52	0,44	0,77	1,72	0,40	0,84	2,62	0,71	1,28
CN Mot 1 queue CPR	Chambéry-St Jean de Maurienne Chambéry-Ambérieu	196,750 131,070	159,420 85,830	60	2,03	0,49	1,11	1,57	0,41	0,82	1,75	0,38	0,71	1,90	0,43	0,85
CN Mot 1 queue GLOBAL				144	2,19	0,49	1,06	1,57	0,41	0,76	1,77	0,38	0,80	2,62	0,43	1,13

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine et les pk fin sont décrits dans les marches prises.

max. : valeur maximale du paramètre dans la marche
min. : valeur minimale du paramètre dans la marche
moy. : valeur moyenne du paramètre dans la marche

B.10 Tableau des données disponibles pour le X-TER Pendulaire.

Marche	Données extraites du rapport de l'AEF								Données extraites des enregistrements graphiques des essais											
	pk origine	pk fin	longueur	sens	rayon	vitesse	Insuf	Dr *	$(SY_1)_{max}$	$(SY_2)_{max}$	$(Q_{1_ext})_{max}$	$(Q_{2_ext})_{max}$	$(Y_{1_ext})_{qst}$	$(Y_{2_ext})_{qst}$	$(Q_{1_ext})_{qst}$	$(Q_{2_ext})_{qst}$	$(Y_{1_ext})_{max}$	$(Y_{2_ext})_{max}$	$(SY_1)_{qst}$	$(SY_2)_{qst}$
E.M. tête Mot. 2 tête CGR																				
E.M. tête Mot. 2 tête CPR																				
E.M. tête Mot. 2 tête CTPR																				
E.M. queue Mot. 1 tête CGR																				
E.M. queue Mot. 1 tête CPR																				
E.M. queue Mot. 1 tête CTPR																				

* Donnée extraites de l'STS

Définition des marches:

E.M. tête : essieux mesure en tête de rame

Mot 1 tête : motrice 1 en tête de rame
Mot 2 tête : motrice 2 en tête de rame

CGR : courbes de grand rayon
CPR : courbes de petit rayon
CTPR : courbes de très petit rayon

Données disponibles
Données non disponibles

B.11 Valeurs caractéristiques des conditions tracé, circulation et qualité géométrique STS des marches retenues pour le X-TER Pendulaire.

marche	ligne	pk origine	pk fin	Nb tronçons	rayon (m)			vitesse (km/h)			Insuf. dévers (mm)			Dr (mm)		
					max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.
E.M. tête Mot 2 tête CGR	Montreuil sur Île - Rennes	395,950	381,260	23	1109	743	870	172	155	169	295	217	264	1,29	0,55	0,88
E.M. tête Mot 2 tête CPR	Toulon - Marseille	52,400	18,830	105	602	483	575	150	125	142	314	211	258	2,31	0,44	0,96
E.M. tête Mot 2 tête CTPR	Issoire - Clermont Ferrand	446,450	439,500	22	339	287	307	100	92	96	286	241	254	2,89	1,32	1,95
E.M. tête Mot 2 tête GLOBAL				150	1109	287	581	172	92	139	314	211	258	2,89	0,44	1,09
E.M. queue Mot 1 tête CGR	Rennes - Montreuil sur Île	381,100	399,920	28	1113	746	847	171	158	166	306	217	256	1,51	0,67	0,94
E.M. queue Mot 1 tête CPR	Marseille - Toulon	18,550	51,600	87	602	473	564	150	125	142	324	190	268	1,89	0,53	0,89
E.M. queue Mot 1 tête CTPR	Clermont Ferrand - Issoire	439,550	446,290	25	320	290	302	100	94	98	297	243	272	2,17	1,30	1,74
E.M. queue Mot 1 tête GLOBAL				140	1113	290	574	171	94	139	324	190	266	2,17	0,53	1,05

* Pour les ensembles des marches, les lignes et les pk origine et les pk fin sont décrits dans les marches prises.

Définition des marches:

E.M. tête : essieux mesure en tête de rame

Mot 1 tête : motrice 1 en tête de rame
Mot 2 tête : motrice 2 en tête de rame

CGR : courbes de grand rayon
CPR : courbes de petit rayon
CTPR : courbes de très petit rayon
GLOBAL : tous les types de courbes

max. : valeur maximale du paramètre dans la marche
min. : valeur minimale du paramètre dans la marche
moy. : valeur moyenne du paramètre dans la marche

B.12 Valeurs moyennes des efforts obtenus des bandes d'essais des marches retenues pour le X-TER Pendulaire.

marche	Nb tronçons	$(SY_1)_{max}$ (kN)	$(SY_2)_{max}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{max}$ (kN)	$(Y_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{1_ext})_{qst}$ (kN)	$(Q_{2_ext})_{qst}$ (kN)	$(Y_{1_ext})_{max}$ (kN)	$(Y_{2_ext})_{max}$ (kN)	$(SY_1)_{qst}$ (kN)	$(SY_2)_{qst}$ (kN)
E.M. tête Mot 2 tête CGR	23	24	47	147	151	17	31	128	132	26	40	18	40
E.M. tête Mot 2 tête CPR	105	32	42	146	143	34	26	135	132	45	31	24	37
E.M. tête Mot 2 tête CTPR	22	50	38	154 *	135 *	49	23	140 *	128 *	67	31	34	29
E.M. tête Mot 2 tête GLOBAL	150	33	42	147	144	34	26	134	132	45	32	25	36
E.M. queue Mot 1 tête CGR	28	29	45	141	147	19	30	125	131	31	42	20	34
E.M. queue Mot 1 tête CPR	87	31	43	144	142	34	27	131	130	45	36	24	35
E.M. queue Mot 1 tête CTPR	25	40	41	151*	142 *	47	26	136 *	129 *	61	33	28	33
E.M. queue Mot 1 tête GLOBAL	140	32	43	144	143	33	27	130	130	45	37	24	34

* données des courbes a gauche éliminées dû à un problème d'enregistrement pendant les essais

C Comparaison des résultats obtenus en prenant soit le rayon soit la courbure comme paramètre d'entrée pour l'ETR 460

C.1 Meilleures régressions obtenues pour l'estimation de $(\Sigma Y_1)_{max}$ pour différentes marches en prenant le rayon ou la courbure.

	70+78	99+100	19+70+78	20+99+100	19+34+70+78	20+33+99+100
Constante	19,3987	31,5807	-4,2876	-344,81	16,567	5,305
	3,0086	2,681	-1,6245	-2,2484	4,327	1,724
rayon		-0,1757		0,0353		
		-6,8029		3,467		
dévers		-0,3265		0,0696		
		-4,6475		2,1447		
vitesse	-0,2264	0,965		-0,4449	-0,174	-0,051
	-3,4632	4,7432		-4,0244	-11,579	-4,755
Insuf	0,1183		0,083	0,161	0,127	0,075
	4,9411		8,5513	5,731	11,872	8,181
NL						
NT						
Dr	1,7627		1,4684	1,6512	1,5	1,903
	4,7988		7,3814	6,98	6,626	9,552
Var. Ec		2,5816				
		4,3595				
Ec				0,2454		
				2,2421		
$(Y/Q)_{1_int}$			31,9692	27,9829	-31,347	26,885
			7,4022	4,2935	-5,758	7,828
Observations	53	40	160	130	388	376
R^2	0,6888	0,7162	0,6231	0,5724	0,4332	0,3903
Erreur-type	4,6420	4,2292	3,8620	3,8256	5,4466	4,2401
Valeur critique de F	1,8E-12	4E-09	7E-33	7E-20	5E-46	1,0E-38

	70+78	99+100	19+70+78	20+99+100	19+34+70+78	20+33+99+100
Constante	-35,773	-62,757	-40,352	-61,854	-10,74	-3,485
	-2,792	-2,841	-3,393	-4,555	-3,441	-1,336
1/rayon	14496,4	19391,4	15286,4	21881,8	9962,2	2689,5
	5,014	5,014	4,283	5,728	11,555	5,134
dévers			-0,054	-0,058	-0,052	
			-2,73	-2,231	-2,779	
vitesse	0,212	0,337	0,217	0,351		
	3,251	2,759	3,051	5,448		
Insuf			0,04		0,1	0,063
			2,493		8,266	6,533
NL						
NT						
Dr	1,856	3,255	1,461	1,74	1,347	1,922
	5,232	7,168	7,373	7,234	5,952	9,691
Var. Ec						
Ec						
$(Y/Q)_{1_int}$				22,96	-37,302	27,029
				3,232	-6,616	7,905
Observations	53	40	160	130	388	376
R^2	0,6919	0,7040	0,6458	0,5430	0,4454	0,3960
Erreur-type	4,6194	4,2586	3,7686	3,9227	5,3945	4,2200
Valeur critique de F	1,4E-12	1E-09	5E-33	1E-19	8E-47	1,8E-39

Il faut préciser que pour chaque paramètre :

- La 1ère ligne donne le coefficient du paramètre dans l'expression de $(\Sigma Y_1)_{max}$
- La 2ème ligne donne la valeur du " t " de Student

Et que seuls les paramètres avec $|t| \geq 2$ ont été retenus.

C.2 Meilleures régressions obtenues pour l'estimation de $(\Sigma Y_2)_{max}$ pour différentes marches en prenant le rayon ou la courbure.

	70+78	99+100	19+70+78	20+99+100	19+34+70+78	20+33+99+100
Constante	302,043	15,818	14,759	-338,824	0,664	-125,661
	2,7271	4,6652	10,166	-5,6392	0,243	-2,398
rayon	-0,071					-0,009
	-6,2286					-2,39
dévers	-0,06					
	-2,3346					
vitesse	0,4321				0,125	0,146
	5,7964				12,097	3,574
Insuf		0,0648	0,086	0,0835	0,055	0,05
		4,8429	16,72	9,5204	7,206	4,577
NL				0,3659		
				2,1848		
NT						
Dr		1,2899		0,7307		0,67
		4,1844		4,3982		5,631
Var. Ec	0,6907		0,407			
	2,7228		3,699			
Ec	-0,1919			0,2443		0,093
	-2,5471			5,7826		2,509
$(Y/Q)_{1_int}$	-33,4912	-10,8236	-24,316	-16,737	14,979	-24,857
	-3,7558	-2,6302	-10,994	-4,4107	4,112	-11,045
Observations	53	40	160	130	388	376
R^2	0,7796	0,6153	0,7730	0,7212	0,3591	0,5567
Erreur-type	2,3965	2,1334	2,11	2,4268	3,8996	2,6809

	70+78	99+100	19+70+78	20+99+100	19+34+70+78	20+33+99+100
Constante	275,512	15,815	14,759	-338,824	21,806	-156,801
	2,488	4,665	10,166	-5,639	9,966	-3,045
1/rayon					-6323,53	-2430,97
					-12,069	-7,0074
dévers						
vitesse						
Insuf	0,078	0,065	0,086	0,084	0,085	0,083
	8,107	4,843	16,72	9,52	10,535	12,47
NL				0,366		
				2,185		
NT						
Dr		1,29		0,731		0,649
		4,184		4,398		5,41
Var. Ec	0,675		0,407			
	2,62		3,699			
Ec	-0,18			0,244		0,122
	-2,355			5,783		3,39
$(Y/Q)_{1_int}$	-24,413	-10,824	-24,316	-16,737	17,932	-25,652
	-5,39	-2,63	-10,994	-4,411	4,735	-11,495
Observations	53	40	160	130	388	376
R^2	0,7471	0,6153	0,7730	0,7212	0,3583	0,5506
Erreur-type	2,513185	2,133434	2,110023	2,426834	3,902131	2,69569

Il faut préciser que pour chaque paramètre :

- La 1ère ligne donne le coefficient du paramètre dans l'expression de $(\Sigma Y_2)_{max}$
- La 2ème ligne donne la valeur du " t " de Student

Et que seuls les paramètres avec $|t| \geq 2$ ont été retenus.

C.3 Meilleures régressions obtenues pour l'estimation de $(Q_{1_ext})_{qst}$ pour différentes marches en prenant le rayon ou la courbure.

	70+ 78	99+ 100	19+ 70+ 78	20+ 99+ 100	19+ 34+ 70+ 78	20+ 33+ 99+ 100
Constante	67,142	72,773	61,976	71,784	-40,071	83,557
	25,339	17,735	38,679	32,392	-0,982	53,396
rayon	-0,089		0,016	0,012	0,016	
	-11,42		4,297	2,853	3,94	
dévers	-0,071		0,03	0,041	0,027	
	-3,498		2,65	2,803	2,662	
vitesse	0,565	-0,129	-0,186	-0,211	-0,231	-0,13
	10,091	-3,664	-5,071	-4,934	-5,899	-22,921
Insuf		0,114	0,135	0,114	0,138	0,081
		12,933	13,335	9,286	14,031	17,429
NL						
NT						
Dr						
Var. Ec						
Ec						
$(Y/Q)_{1_int}$		8,792		9,845	-16,437	
		2,932		3,394	-7,039	
Observations	53	40	160	130	388	376
R^2	0,8224	0,8830	0,7263	0,7541	0,6536	0,7100
Erreur-type	1,9798	1,2239	1,9336	1,7109	2,3861	2,1363
Valeur critique de F	2,1E-18	7,8E-17	1,4E-42	3E-34	1,5E-84	1,4E-99

	70+ 78	99+ 100	19+ 70+ 78	20+ 99+ 100	19+ 34+ 70+ 78	20+ 33+ 99+ 100
Constante	98,066	72,773	57,212	57,663	56,719	83,557
	1,315	17,735	39,396	34,445	41,918	53,396
1/rayon	34125,67		2036,985	5062,561	3825,397	
	5,665		6,39	12,399	11,393	
dévers	-0,171					
	-4,486					
vitesse	1,02	-0,129				-0,13
	5,132	-3,664				-22,921
Insuf	-0,081	0,114	0,092	0,068	0,089	0,081
	-2,411	12,933	19,484	11,787	17,953	17,429
NL						
NT						
Dr						
Var. Ec						
Ec						
$(Y/Q)_{1_int}$		8,792		9,089	-17,018	
		2,932		3,291	-6,954	
Observations	53	40	160	130	388	376
R^2	0,8908	0,8830	0,7205	0,7416	0,6470	0,7100
Erreur-type	1,5850	1,2239	1,9476	1,7329	2,4024	2,1363
Valeur critique de F	2,0E-21	7,8E-17	6E-43	9E-36	3E-85	1E-99

Il faut préciser que pour chaque paramètre :

- La 1ère ligne donne le coefficient du paramètre dans l'expression de $(Q_{1_ext})_{qst}$
- La 2ème ligne donne la valeur du " t " de Student

Et que seuls les paramètres avec $|t| \geq 2$ ont été retenus.

D Corrélations des données d'entrée pour l'ETR 460.

marche 19

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	NT	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000									
devers	0,579	1,000								
vitesse	-0,245	0,089	1,000							
Insuf	0,686	0,197	0,396	1,000						
NL	-0,190	-0,312	-0,138	-0,156	1,000					
NT	-0,212	-0,324	-0,087	-0,135	0,606	1,000				
Dr	-0,105	-0,270	0,042	0,051	0,116	0,296	1,000			
Var. Ec	-0,290	-0,367	-0,077	-0,197	0,086	0,251	0,680	1,000		
Ec	0,314	-0,313	-0,016	0,549	0,028	0,066	0,062	0,048	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	-0,156	0,148	0,427	0,042	-0,112	-0,098	0,209	0,124	-0,209	1,000

marche 20

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	NT	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000									
devers	0,699	1,000								
vitesse	-0,536	-0,257	1,000							
Insuf	0,678	0,224	0,107	1,000						
NL	0,004	-0,221	-0,141	0,034	1,000					
NT	-0,035	-0,244	-0,224	-0,065	0,738	1,000				
Dr	0,008	-0,022	-0,073	-0,052	0,212	0,399	1,000			
Var. Ec	-0,050	-0,131	-0,168	-0,122	0,394	0,479	0,672	1,000		
Ec	0,388	0,414	0,028	0,352	-0,126	-0,164	-0,069	-0,131	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	-0,054	-0,343	-0,007	0,155	-0,038	0,017	-0,161	-0,081	-0,237	1,000

marche 33

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	NT	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000									
devers	0,897	1,000								
vitesse	-0,375	-0,177	1,000							
Insuf	0,422	0,438	0,647	1,000						
NL	0,185	0,176	0,008	0,147	1,000					
NT	0,103	0,087	0,122	0,208	0,444	1,000				
Dr	0,001	0,036	0,062	0,049	0,256	0,216	1,000			
Var. Ec	0,061	0,108	-0,006	0,014	0,066	0,013	0,364	1,000		
Ec	0,092	0,145	-0,059	-0,029	-0,073	-0,021	-0,056	-0,002	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,092	-0,022	0,000	0,148	-0,058	-0,009	-0,172	-0,145	-0,074	1,000

marche 34

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	NT	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000									
devers	0,879	1,000								
vitesse	-0,525	-0,349	1,000							
Insuf	0,428	0,338	0,483	1,000						
NL	0,017	0,013	0,011	0,029	1,000					
NT	-0,004	-0,005	0,044	0,052	0,429	1,000				
Dr	0,130	0,102	-0,143	-0,025	0,123	0,206	1,000			
Var. Ec	0,228	0,183	-0,133	0,086	-0,024	0,017	0,297	1,000		
Ec	0,012	0,053	-0,073	-0,115	0,070	0,038	-0,090	0,028	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,281	0,189	-0,296	-0,013	-0,129	-0,148	0,134	0,198	-0,105	1,000

marche 70

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	-0,316	1,000							
vitesse	-0,686	0,827	1,000						
Insuf	-0,063	0,681	0,728	1,000					
NL	-0,101	0,202	0,228	0,251	1,000				
Dr	0,248	-0,276	-0,145	0,133	0,079	1,000			
Var. Ec	-0,011	-0,356	-0,191	-0,170	0,039	0,575	1,000		
Ec	0,324	-0,261	-0,438	-0,416	0,059	-0,150	0,008	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,753	-0,565	-0,813	-0,441	-0,202	0,229	0,263	0,290	1,000

marche 78

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	-0,344	1,000							
vitesse	-0,397	-0,162	1,000						
Insuf	-0,220	-0,370	0,971	1,000					
NL	-0,284	0,582	0,390	0,239	1,000				
Dr	-0,094	0,121	0,432	0,401	0,389	1,000			
Var. Ec	-0,047	0,338	0,057	-0,001	0,553	0,460	1,000		
Ec	-0,203	0,477	0,440	0,338	0,578	0,764	0,393	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,247	-0,518	0,114	0,243	-0,348	0,590	0,040	0,273	1,000

marche 99

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,429	1,000							
vitesse	-0,559	0,378	1,000						
Insuf	0,512	0,507	0,301	1,000					
NL	0,097	0,216	0,096	0,168	1,000				
Dr	0,073	-0,561	-0,229	0,271	0,020	1,000			
Var. Ec	-0,159	-0,261	0,127	0,145	-0,104	0,637	1,000		
Ec	-0,022	0,108	0,124	-0,003	-0,161	0,163	0,555	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,591	-0,231	-0,636	0,199	-0,111	0,478	0,063	0,075	1,000

marche 100

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,284	1,000							
vitesse	-0,817	0,268	1,000						
Insuf	0,157	0,868	0,437	1,000					
NL	0,115	0,123	-0,023	0,130	1,000				
Dr	0,250	0,398	0,012	0,420	0,073	1,000			
Var. Ec	0,072	0,344	0,090	0,257	-0,081	0,833	1,000		
Ec	0,217	0,301	-0,001	0,307	-0,129	0,668	0,738	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,792	0,224	-0,618	0,197	0,098	0,344	-0,040	0,008	1,000

marche 70+78

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,040	1,000							
vitesse	-0,677	0,608	1,000						
Insuf	0,167	0,612	0,553	1,000					
NL	0,096	0,254	0,142	0,288	1,000				
Dr	0,505	0,041	-0,212	0,326	0,260	1,000			
Var. Ec	-0,051	-0,337	-0,146	-0,155	0,080	0,325	1,000		
Ec	0,072	-0,256	-0,286	-0,308	0,108	0,030	0,050	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,844	-0,220	-0,773	-0,086	-0,037	0,523	0,155	0,127	1,000

marche 99+100

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,353	1,000							
vitesse	-0,708	0,307	1,000						
Insuf	0,338	0,610	0,362	1,000					
NL	0,104	0,186	0,035	0,153	1,000				
Dr	0,131	-0,324	-0,119	0,310	0,034	1,000			
Var. Ec	-0,022	-0,004	0,100	0,194	-0,090	0,672	1,000		
Ec	0,078	0,161	0,067	0,102	-0,143	0,258	0,549	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,565	-0,121	-0,539	0,169	-0,046	0,458	0,066	-0,041	1,000

marche 19+70+78

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,183	1,000							
vitesse	-0,947	0,011	1,000						
Insuf	-0,076	0,369	0,334	1,000					
NL	-0,243	-0,114	0,250	0,052	1,000				
Dr	0,245	-0,083	-0,163	0,155	0,123	1,000			
Var. Ec	-0,435	-0,347	0,385	-0,068	0,186	0,411	1,000		
Ec	-0,540	-0,301	0,554	0,256	0,204	-0,046	0,304	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,879	0,032	-0,834	-0,177	-0,235	0,359	-0,268	-0,477	1,000

marche 20+99+100

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,449	1,000							
vitesse	-0,961	-0,308	1,000						
Insuf	-0,068	0,244	0,283	1,000					
NL	-0,209	-0,172	0,217	0,123	1,000				
Dr	-0,225	-0,191	0,235	0,126	0,213	1,000			
Var. Ec	-0,510	-0,250	0,501	0,081	0,377	0,670	1,000		
Ec	-0,766	-0,100	0,838	0,347	0,144	0,237	0,449	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,251	-0,162	-0,197	0,116	-0,065	0,111	-0,084	-0,169	1,000

marche 19+34+70+78

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,541	1,000							
vitesse	-0,953	-0,354	1,000						
Insuf	0,181	0,436	0,066	1,000					
NL	0,133	0,150	-0,109	0,128	1,000				
Dr	-0,042	-0,186	0,080	0,016	-0,004	1,000			
Var. Ec	-0,335	-0,224	0,333	-0,063	0,032	0,403	1,000		
Ec	-0,083	0,036	0,120	0,209	0,225	-0,149	0,161	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	0,565	0,112	-0,553	-0,098	-0,142	0,250	-0,122	-0,296	1,000

marche 20+33+99+100

	1/rayon	devers	vitesse	Insuf	NL	Dr	Var. Ec	Ec	$(Y/Q)_{1_int}$
1/rayon	1,000								
devers	0,750	1,000							
vitesse	-0,956	-0,596	1,000						
Insuf	0,290	0,449	-0,051	1,000					
NL	-0,017	0,025	0,067	0,143	1,000				
Dr	-0,239	-0,188	0,256	0,027	0,218	1,000			
Var. Ec	-0,349	-0,181	0,382	0,008	0,239	0,577	1,000		
Ec	-0,192	0,127	0,307	0,253	0,066	0,097	0,290	1,000	
$(Y/Q)_{1_int}$	-0,045	-0,174	0,061	0,065	-0,067	-0,009	-0,075	-0,145	1,000

E Processus d'analyse statistique d'une marche (exemple)

E.1 Analyse statistique de l'effort $(Q_{2_ext})_{max}$ de l'ETR 460 à partir des données des marches 20+99+100

Pour illustrer le processus d'analyse statistique, on présente de façon détaillée l'analyse des marches 20+99+100 pour la force $(Q_{2_ext})_{max}$.

L'analyse statistique commence par une régression multiple tenant compte de tous les paramètres.

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,741247075
Coefficient de détermination R^2	0,549447226
Coefficient de détermination R^2	0,515655768
Erreur-type	2,413565989
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9	852,4715981	94,71906646	16,25994433	3,53806E-17
Résidus	120	699,0360942	5,825300785		
Total	129	1551,507692			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95,0%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95,0%*
Constante	36,973	93,784	0,394	0,694	-148,712	222,658	-148,712	222,658
1/rayon	1831,739	3344,774	0,548	0,585	-4790,677	8454,154	-4790,677	8454,154
dévers	0,004	0,017	0,263	0,793	-0,029	0,037	-0,029	0,037
vitesse	-0,008	0,062	-0,123	0,902	-0,131	0,116	-0,131	0,116
Insuf	0,085	0,014	6,328	0,000	0,059	0,112	0,059	0,112
NL	0,118	0,175	0,676	0,501	-0,228	0,465	-0,228	0,465
Dr	0,517	0,225	2,300	0,023	0,072	0,961	0,072	0,961
Var. Ec	-0,091	0,151	-0,606	0,546	-0,390	0,207	-0,390	0,207
Ec	0,022	0,067	0,329	0,743	-0,110	0,154	-0,110	0,154
(Y/Q)1_ int	-6,562	4,382	-1,497	0,137	-15,237	2,114	-15,237	2,114

Avec les résultats de la première régression multiple on constate quels sont les paramètres les plus significatifs. La signification est indiquée par l'indicateur " t " de Student. Dans ce cas là, l'Insuffisance de dévers et le Dressage sont les paramètres les plus significatifs pour l'estimation de $(Q_{2_ext})_{max}$.

A partir de cette première régression on continue par élimination successive des paramètres les moins influents dans la régression (ceux qui présentent la valeur absolue de l'indicateur " t " la plus basse). Dans chaque élimination successive, à travers l'analyse de la variance on évalue la représentativité de la régression. La régression la plus représentative est celle avec la valeur critique de F la plus faible. Pour chaque élimination on a marqué en rouge le paramètre le moins significatif et qui sera donc éliminé pour la régression suivante. En bleu on a marqué l'erreur type et la valeur critique de F.

- **1ère élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,741
Coefficient de détermination R^2	0,549
Coefficient de détermination R^2	0,516
Erreur-type	2,414
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9	852,472	94,719	16,260	3,54E-17
Résidus	120	699,036	5,825		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	36,973	93,784	0,394
1/rayon	1831,739	3344,774	0,548
dévers	0,004	0,017	0,263
vitesse	-0,008	0,062	**-0,123**
Insuf	0,085	0,014	6,328
NL	0,118	0,175	0,676
Dr	0,517	0,225	2,300
Var. Ec	-0,091	0,151	-0,606
Ec	0,022	0,067	0,329
(Y/Q)1_ int	-6,562	4,382	-1,497

- **2ème élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,741
Coefficient de détermination R^2	0,549
Coefficient de détermination R^2	0,520
Erreur-type	2,404
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	8	852,384	106,548	18,441	7,97E-18
Résidus	121	699,124	5,778		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	38,274	92,803	0,412
1/rayon	2225,711	941,953	2,363
dévers	0,004	0,015	**0,234**
Insuf	0,084	0,009	8,936
NL	0,121	0,173	0,703
Dr	0,520	0,222	2,341
Var. Ec	-0,094	0,148	-0,635
Ec	0,020	0,065	0,310
(Y/Q)1_ int	-6,706	4,205	-1,595

- **3ème élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,741
Coefficient de détermination R^2	0,549
Coefficient de détermination R^2	0,523
Erreur-type	2,394
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	7	852,067	121,724	21,232	1,70E-18
Résidus	122	699,441	5,733		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	30,583	86,461	0,354
1/rayon	2357,408	752,787	3,132
Insuf	0,085	0,009	9,192
NL	0,119	0,172	0,695
Dr	0,517	0,221	2,341
Var. Ec	-0,093	0,148	-0,632
Ec	0,026	0,060	**0,425**
(Y/Q)1_ int	-7,108	3,824	-1,859

- **4ème élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,741
Coefficient de détermination R^2	0,549
Coefficient de détermination R^2	0,526
Erreur-type	2,386
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	6	851,033	141,839	24,906	3,53E-19
Résidus	123	700,475	5,695		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	67,291	2,311	29,114
1/rayon	2140,234	550,633	3,887
Insuf	0,087	0,008	10,744
NL	0,113	0,170	0,662
Dr	0,522	0,220	2,376
Var. Ec	-0,086	0,146	**-0,590**
(Y/Q)1_ int	-7,100	3,811	-1,863

- **5ème élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,740
Coefficient de détermination R^2	0,547
Coefficient de détermination R^2	0,529
Erreur-type	2,380
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5	849,052	169,810	29,976	7,20E-20
Résidus	124	702,456	5,665		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	67,044	2,267	29,575
1/rayon	2258,468	511,489	4,415
Insuf	0,087	0,008	10,881
NL	0,092	0,166	**0,552**
Dr	0,434	0,160	2,705
(Y/Q)1_ int	-7,232	3,795	-1,906

- **6ème élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,739
Coefficient de détermination R^2	0,546
Coefficient de détermination R^2	0,532
Erreur-type	2,373
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	4	847,324	211,831	37,602	1,27E-20
Résidus	125	704,184	5,633		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	67,213	2,240	30,006
1/rayon	2211,176	502,865	4,397
Insuf	0,087	0,008	10,971
Dr	0,455	0,155	2,935
(Y/Q)1_ int	-7,219	3,784	**-1,908**

- **7ème élimination**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,730
Coefficient de détermination R^2	0,533
Coefficient de détermination R^2	0,522
Erreur-type	2,398
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	3	826,818	275,606	47,919	9,84E-21
Résidus	126	724,689	5,752		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	67,368	2,262	29,785
1/rayon	1949,961	488,911	3,988
Insuf	0,085	0,008	10,708
Dr	0,432	0,156	2,762

On a éliminé tous les paramètres avec la signification la plus faible. Si on continue l'élimination, la valeur critique de F remonte et la valeur du coefficient de détermination R^2 commence à descendre rapidement. Ce fait indique que le dernièr paramètre éliminé avait une forte signification dans la régression. La régression antérieure était donc la meilleure régression.

- **8ème régression**

RAPPORT DÉTAILLÉ

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,710
Coefficient de détermination R^2	0,505
Coefficient de détermination R^2	0,497
Erreur-type	2,460
Observations	130

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	2	782,958	391,479	64,690	4,24E-20
Résidus	127	768,550	6,052		
Total	129	1551,508			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*
Constante	67,737	2,316	29,247
1/rayon	1574,886	481,762	3,269
Insuf	0,089	0,008	11,093