

Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères

Tout d'abord à Hugues CHOLLET, chargé de recherche du pôle de recherche dynamique des véhicules guidés, de m'avoir proposé ce stage ainsi que son aide et ses connaissances.

A Patrice AKNIN, directeur de recherche du pôle diagnostic et maintenance des systèmes de transport guidé, pour avoir présenté ma candidature de stage à l'équipe de la LTN.

Puis à Michel SEBES, ingénieur de recherche au sein de ce pôle, pour sa collaboration de façon continue à m'aider à résoudre la plus part des problèmes rencontrés.

A Jean Bernard AYASSE, responsable du pôle de recherche dynamique des véhicules guidés, pour son aide et ses connaissances qui m'ont été d'une grande utilité.

Enfin à Francis KUHN, ingénieur de recherche, pour son soutien académique et humain, et son accueil si chaleureux.

Index

Introduction.....	4
I. Présentation du cadre du stage.....	
I.1.Présentation de l'INRETS.....	
I.1.1.Présentation générale.....	
I.1.2.Description du pôle « Dynamique des véhicules guidés ».....	
I.2.Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).....	
I.3.Le projet DEVIN (Durabilité et interaction véhicule-infrastructure).....	
I.4.Le Translohr.....	
I.4.1 Présentation du Translohr.....	
I.4.2 Caractéristiques techniques et de service du tram.....	
II. Modélisation sur VOCOLIN.....	
II.1.Modèle véhicule.....	
II.2.Création de l'algorithme d'asservissement de vitesse.....	
II.2.1 Conception.....	
II.2.2 Paramètres de voie et de confort.....	
II.2.3 Paramètres véhicule.....	
II.3.Analyse des efforts sur VOCOLIN.....	
III. Application et analyse des résultats dans un modèle de durée de vie de chaussée.....	
III.1.Introduction.....	
III.2.Dimensionnement des chaussées.....	
III.2.1.Base et description du modèle rationnel routier LCPC-SETRA (Alizé)....	
III.2.1.1 Généralités sur la méthode de dimensionnement.....	
III.2.1.2 Calcul mécanique des sollicitations créées par le trafic.....	
III.2.2.Adaptations nécessaires pour l'étude tramway sur pneus.....	
III.2.2.1 Modèle de calcul de la structure.....	
III.2.2.2 Performances des matériaux.....	
III.2.2.3 Trafic.....	
III.3.Calcul de valeurs admissibles	
Annexes.....	
Annexe A : Contact pneu-voie.....	
A.1. Angle de dérive.....	
A.2. Couple d'auto alignement	
A.3. Pseudo-glissements longitudinal et transversal.....	
A.3 .1. Pseudo-glissement longitudinal	
A.3 .2. Pseudoglissement transversal.....	
Annexe B : Création de l'algorithme d'asservissement de vitesse sur Matlab.....	
Annexe C : Tracé de Clermont-Ferrand.....	
Annexe D : Définition des chaussées souples.....	

Annexe E : Résultats des calculs des chaussées pour le Translohr.....	
E.1 Profil réel de la chaussée.....	
E.2Vérification de la chaussée avec Alizé.....	
E.3 Vérification avec d' autres types de matériaux et épaisseurs de chaussées...	
E.3.1 Chaussée bitumineuse.....	
E.3.2 Chaussée en béton.....	
Conclusion.....	
Références.....	

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du stage de « fin de l'année », marquant la fin de la période d'études à l'ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), effectué en été 2007 à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS) au sein du pôle « dynamique des véhicules guidés » du Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) en coordination avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Le sujet consiste à calculer les efforts au contact entre pneumatiques et bandes de roulement du tramway sur pneus de LOHR INDUSTRIE, le Translohr, lors de l'apparition de problèmes d'orniérage dans la chaussée. Cela dans le cadre du projet DEVIN (Durabilité et interaction véhicule infrastructure) au PREDIT¹

Le sujet du stage peut se diviser en deux parties :

-Une première, dans laquelle on va créer un algorithme sur MATLAB qui calcule le profil de vitesse maximal du tram, un vecteur de vitesse de consigne déduit de la voie, théorique ou mesurée, et de paramètres ergonomiques liés au confort (jerk, accélération transversale et longitudinale...). Une fois qu'on a le profil de vitesse maximale définie, on va l'introduire dans le logiciel de dynamique nommé VOCOLIN, sur interface MATLAB, qui permet de réaliser une modélisation sous FORTRAN d'un véhicule ferroviaire, pour sortir différents paramètres liés au déplacement du tramway, parmi eux, les efforts au contact entre pneus et chaussée.

-La deuxième partie consiste à l'application et à l'analyse de ces résultats du calcul dynamique dans un modèle de durée de vie de chaussée (Alizé) mis à disposition par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) de Nantes où nous nous sommes déplacés pour réaliser différents calculs avec ce modèle et le catalogue des chaussées et l'aide des connaissances de M. J-M Balay, chef de section MSFR² de la division MSC³.

¹ PREDIT : Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres

² MFSR : Manège de Fatigue des Structures Routières

³MSC : Matériaux et Structures de Chaussées

I. Présentation du cadre du stage

I.1.Presentation de l'INRETS

I.1.1.Presentation générale

Créé par décret interministériel du 18 septembre 1985, l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur sécurité (INRETS) est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST), placé sous la double tutelle du Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables et du Ministère en charge de la recherche.

Il intervient principalement chargé dans les transports terrestres avec des interfaces aérienne et maritime. Les trois grandes missions de l'INRETS sont :

- la recherche, caractérisée par une approche globale du système des transports,
- l'expertise et le conseil,
- la valorisation des résultats des travaux de recherche et la diffusion des connaissances

L'INRETS présente un réseau de partenaires diversifiés :

- Avec des équipes universitaires (créations d'unités mixtes, ...) et des organismes de recherche (CNRS, INSERM, LCPC, CSTB, ...)
- Avec les industriels et les professionnels du transport (PSA, Renault, Alstom, SNCF, RATP, ...)
- Avec les collectivités locales

Ces coopérations se développent le plus souvent dans le cadre de grands programmes et réseaux nationaux (exemple : le PREDIT) ou européens (EUREKA, PCRD, COST).

Les missions de l'INRETS :

Les principaux objectifs scientifiques et techniques de l'INRETS sont :

- Evolution des transports de voyageurs,
- Organisation des transports de marchandises,
- Régulation du trafic automobile et aérien,
- Innovation et automatismes dans les transports guidés,
- Amélioration de la sécurité routière au niveau des infrastructures, des véhicules et des usagers,
- Conditions de travail des professionnels,
- Confort des déplacements,
- Consommation énergétique et effets des transports sur l'environnement,
- Electrotechnique et électronique appliquées à la traction ferroviaire,
- Informatique et microprocesseurs dans les transports.

Les moyens humains :

L'INRETS regroupe 17 unités de recherche réparties sur cinq sites.

Il compte 426 personnes (2001) réparties de la manière suivante :

- 246 ingénieurs et techniciens,
- 158 chercheurs,
- 22 fonctionnaires non affectés à la recherche.

Le Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) est une des 7 unités de recherche localisées sur le site d'Arcueil. (Fig.1)



Fig 1. Les différents sites de l'INRETS

Présentation du Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) :

Les compétences du Laboratoire des Technologies Nouvelles concernent d'une part les aspects électromécaniques des transports guidés, « sustentation, guidage, propulsion », avec une approche technologique sur les composants et les méthodes innovantes de diagnostic, et d'autre part une approche globale des systèmes de transport, plus particulièrement des systèmes guidés.

Les pôles de recherche correspondent plus précisément aux types d'activités suivantes :

- « Transport et transformation de l'énergie pour la traction électrique »,
- « Dynamique des véhicules guidés »,
- « Diagnostic et maintenance des systèmes de transports guidés »,
- « Systèmes de transport guidé urbains et interurbains ».

C'est au sein du pôle « Dynamique des véhicules guidés » que j'ai effectué mon stage.

I.1.2 Description du pôle « Dynamique des véhicules guidés »

Ce pôle s'intéresse à la stabilité, la sécurité, le confort, la durabilité des véhicules de transports guidés, essentiellement ferroviaires, domaine où le bruit, l'usure et la fatigue des rails sont les sujets de recherche en cours.

Une des activités du laboratoire est dédiée à la simulation de la dynamique des véhicules.

Le laboratoire a développé un logiciel de dynamique nommé VOCOLIN permettant de réaliser une modélisation sous FORTRAN d'un véhicule ferroviaire.

Ce logiciel permet outre la modélisation de liaisons non linéaires (butée, frottement sec) de définir les consignes de trajectoires et les diverses perturbations (vent, défauts de voie) pouvant intervenir sur le mouvement d'un train.

Il est ainsi à noter qu'un formalisme adapté à la modélisation des véhicules guidés sur un réseau sinueux a été mis au point, celui-ci se traduisant par l'utilisation d'un repère dit « ferroviaire » pour l'expression des équations de la dynamique (cf. [Dynamique ferroviaire en coordonnées curvilignes]).

Le laboratoire est également spécialisé dans la modélisation du contact roue-rail. Ces modèles sont destinés au calcul dynamique et ont été développés à partir des modèles de J.J. KALKER (Université de DELFT).

Ainsi dans VOCOLIN, le contact roue/rail qui constitue un asservissement non linéaire pour le guidage, se base sur l'analyse de « l'Angle du Plan Tangent » pour apprécier qualitativement le couple roue-rail (cf. [Paramètres caractéristiques du contact roue-rail]).

D'autres approches basées sur l'interpénétration élastique de Hertz ont été développées (contact multi Hertzien, semi Hertzien)

L'activité de modélisation se base sur de fréquentes comparaisons aux expériences en grandeur réelle de la RATP ou de la SNCF.

Pour soutenir ces expérimentations, l'équipe réalise des mesures classiques d'accélérométrie ainsi que des mesures plus spécifiques avec des appareils de sa conception : relevés de profils de roues et rails (Profilomètre), relevés de géométrie de voies (chariot CATA, fig.2), mesure du déplacement transversal essieu-rail (capteurs CCF-TR). Ces mesures impliquent, bien entendu, des traitements spécifiques (EXPRO, etc...).



Fig 2. Chariot « CATA » INRETS

Pour calculer les efforts de guidage dans le contact pneu-chaussée, le LTN a mis au point divers modèles analytiques de contact pneu-chaussée dérivés du modèle de PACEJKA : la " magique formula ", mais en tenant compte de la flexibilité transversale du pneu. Ces modèles sont proches de la formulation du contact ferroviaire, ce qui permet d'exprimer les effets de l'adhérence et de la charge de façon explicite.

I.2 Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

Organisme national français de recherche appliquée et de développement, le LCPC est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), placé sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables et du ministère chargé de la Recherche.

Le LCPC se concentre sur les thèmes de recherche comme la sécurité routière, l'environnement, les risques naturels et le développement durable et enfin les infrastructures. Ses activités sont notamment centrées sur le génie civil en général et plus particulièrement sur les infrastructures de transport et les ouvrages d'art.

Les missions du LCPC se définissent ainsi :

Conduire des recherches et des études méthodologiques dans le domaine des infrastructures et de leur usage, de la géotechnique, des ouvrages d'art, du génie civil, du génie urbain et de leurs conséquences sur l'environnement,

- Orienter, programmer, évaluer, dans ses domaines de compétences, la recherche-développement des centres d'études techniques de l'Équipement (CETE) et animer le comité inter-Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC),
- Assurer la coordination avec la recherche européenne et internationale, participer à la promotion des techniques françaises à l'étranger et au soutien à l'innovation,
- Mettre en œuvre une politique d'information scientifique et technique et assurer la diffusion des connaissances acquises, la réglementation et la normalisation.

Il est à la tête du réseau scientifique et technique de l'équipement, constitué par les huit centres d'études techniques - CETE, installés dans les grandes régions françaises, avec leur 17 laboratoires régionaux et leurs quatre centres spécialisés (Paris , Marne la Vallée, *Nantes* (Fig.3) et Satory-Versailles) qui favorisent la recherche articulée au terrain.



Fig.3.Manège de fatigue de chaussées du LCPC, Nantes

I.3.Le projet DEVIN (Durabilité et interaction véhicule-infrastructure)

Ce projet porte sur la durabilité des infrastructures urbaines utilisées par les systèmes de transport en commun sur pneumatiques : bus, bus articulés, trolleybus, dans le contexte de l'arrivée de nouveaux systèmes de tramways sur pneumatiques. Les investissements nécessaires pour réaliser les infrastructures routières urbaines aussi bien que les systèmes de transport en commun sont publics et importants dans toutes les villes et dans toutes les régions.

Comme tout système nouveau, le développement des tramways sur pneus s'accompagne de quelques incertitudes sur leur durée de vie ou celle de l'infrastructure qui les reçoit. Le Translohr rencontre différentes difficultés, parmi lesquelles on trouve l'orniérage des parties de voie en enrobé, problème commun aux bus et trolleybus. Cet endommagement de la couche superficielles de la chaussée est le principal point sur lequel se concentre le projet de DEVIN.

L'optimisation d'un système de transport ne se limite pas à optimiser un véhicule sur voie parfaite ou dimensionner la chaussée avec une charge statique car le système véhicule-voie est un système couplé. Les aspects comme le confort vibratoire en caisse, la fatigue de ces caisses, l'usure des pneumatiques, celle des organes de guidage, la conception du tracé, tous ces aspects sont en interaction et ramènent à la qualité des interfaces de roulement et de guidage. Le projet DEVIN s'intéresse particulièrement à ce stade de développement des systèmes nouveaux en exploitation stabilisé.

I.4 Le Translohr

I.4.1 Présentation du Translohr

Translohr est le nom d'un système de tramway sur pneus développé par la société Lohr Industrie. Il est placé sur la ville de Clermont-Ferrand, au centre de la France (Fig.4) (elle a 150.000 hab.) et il dessert depuis octobre 2006 l'axe nord-sud de la ville.

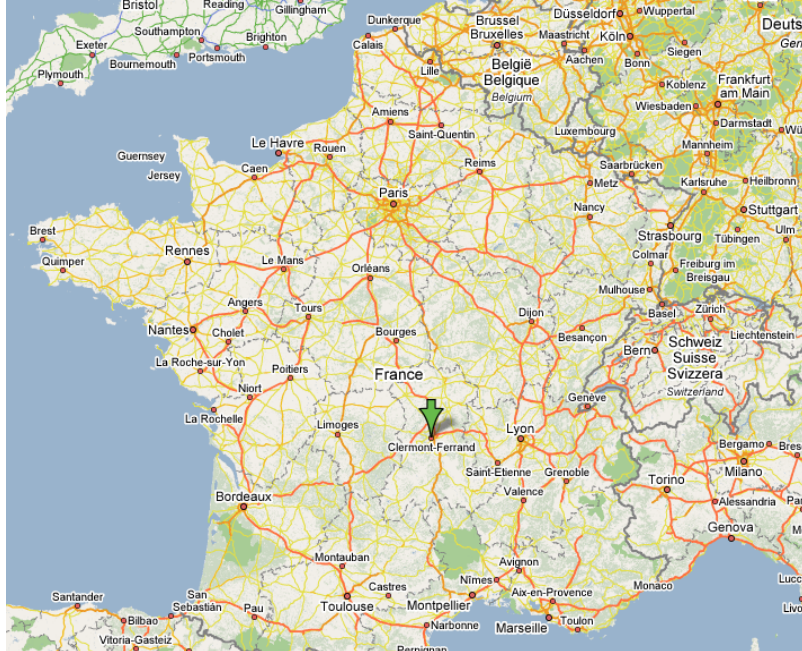


Fig.4.Emplacement de la ville Clermont-Ferrand

Il a été conçu pour favoriser la mobilité urbaine d'une manière économique, capacitaire, écologique, avec une insertion optimisée et avec une emprise au sol minimum, en s'appuyant sur une ligne principale LEO (ligne est-ouest⁴) de bus pour bien répondre aux besoins de la demande de transport de la ville et de sa banlieue (Fig.5) en complétant le système existant déficitaire en capacité.

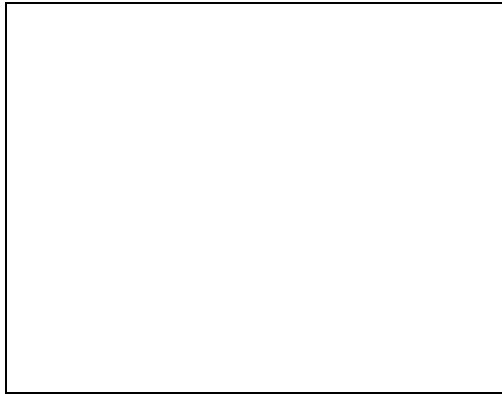


Fig.7 Dimensions du Translohr

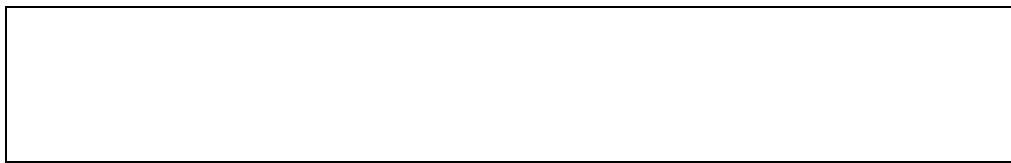


Fig. 8. Rame STE 4 (32m)

Ses équipements électriques sont installés en la toiture.

Il est guidé par un rail central, permettant une architecture et une homologation de type ferroviaire. Il garantit la précision de la trajectoire et l'accostage aux stations. Grâce à leur forme et leur inclinaison en "V", les charges, limitées à 75 kg par galet, s'exercent sur le rail, les pneus seuls absorbant les contraintes latérales et verticales. Les faces internes des galets sont recouvertes d'un bandage en composite qui évite le contact fer sur fer et contribue à optimiser le silence de roulement, sans provoquer l'usure du rail.

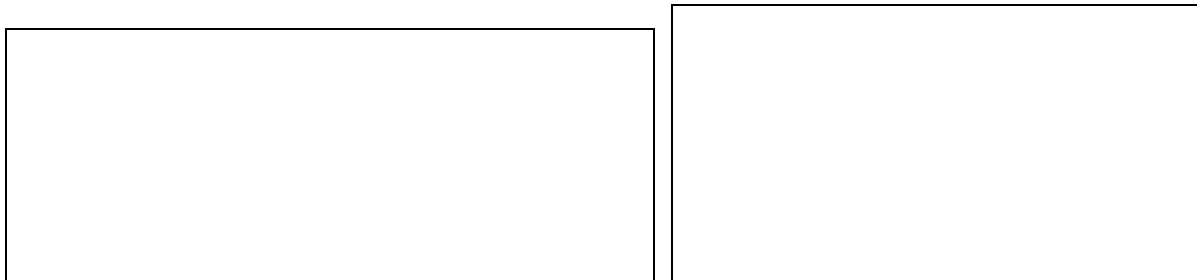


Fig.9. Détail du système de guidage en V du Translohr

Le pneu a été choisi en collaboration avec le fabricant pour respecter les pressions au sol de 6b dans tous les cas de charge ; il s'agit d'un pneu MICHELIN.

La sculpture retenue tient compte de l'utilisation du pneu :

- Type : 385/65 R 22,5 TUBELESS
- Sculpture : XF A 1
- Pression interne : environ 8b
- Volume intérieur : 170 l.



Fig.10. Pneus et système de guidage du tram

Les pneus vont offrir une grande adhérence, surtout en accélération/freinages et un faible niveau de bruit de roulement aux vitesses d'exploitation d'un réseau urbain.

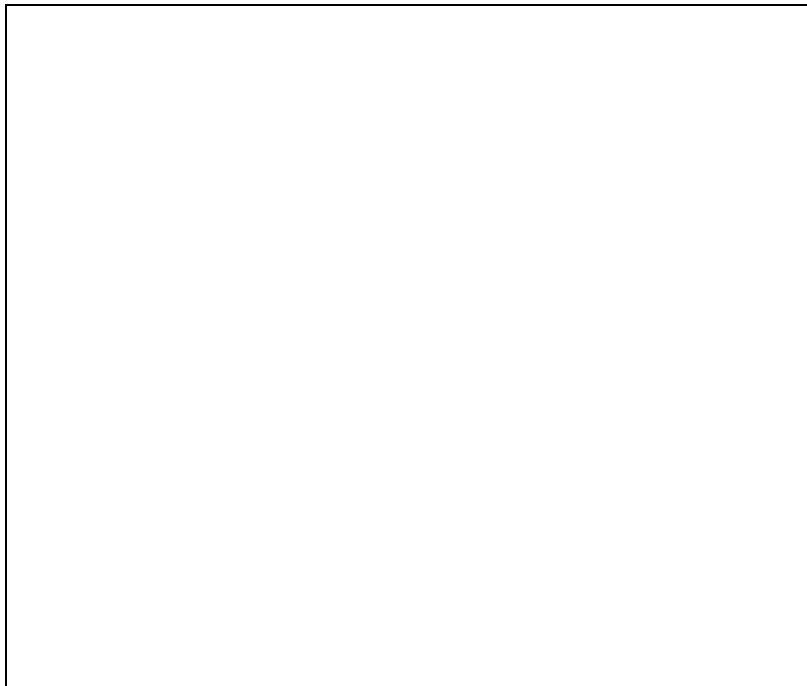


Fig.11.Dessin du système de guidage avec pneu

De plus il est capable de virer avec un rayon de giration de 10.5m, il peut franchir des rampes de 13% et un gabarit limité à 5.40m en voie double.

Il est planifié pour des passages en station toutes les 6 minutes par sens, en heures de pointe et toutes les 9 minutes en heures de creuse. Cela peut varier tout au long de la journée.

II. Modélisation sur VOCOLIN

II.1 Modèle véhicule (Annexe A)

On va choisir comme modèle de calcul le Translohr STE 4 de 32 m de longueur. On considère les changements faits qui sont caractéristiques entre le contact pneu-chaussée. Les poids, en Kg, des caisses, essieux et structures sont spécifiés ci-dessous.

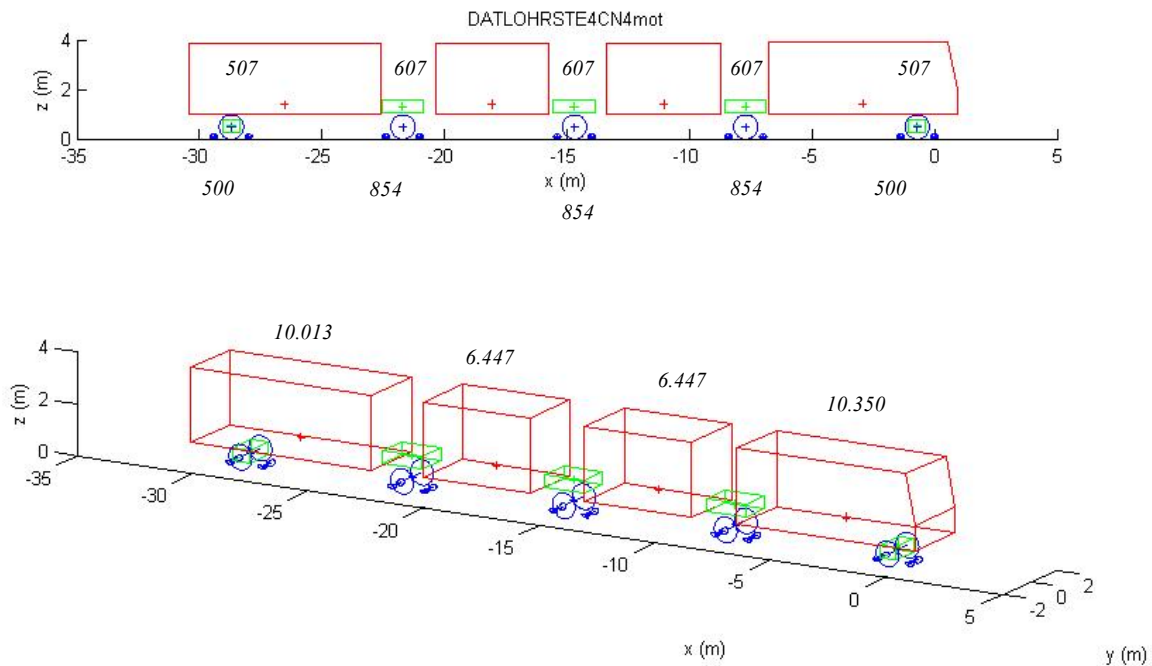


Fig.11 Poids en Kg des essieux, structures et caisses.

Chaque pair de galets de guidage va peser 152 kg. .

On a deux essieux moteurs, placés l'un dans le premier essieu (tête du tram) et l'autre dans le dernier (queue du tram).

Les inerties et les éléments de jonction sont implicites dans le programme.

II.2 Création de l'algorithme d'asservissement de vitesse (Annexe B)

II.2.1 Conception

Le logiciel en Fortran VOCOLIN comporte depuis longtemps une sous-routine d'asservissement de la vitesse par le biais d'un couple de consigne.

Les chercheurs de l'équipe ont entamé une série de modification des sources du simulateur pour le Translohr, pour tenir compte de :

- l'existence d'essieux moteurs et d'autres porteurs,
- l'existence d'essieux freinés,

- la possibilité de suivre une loi de vitesse définie à l'extérieur du code
- cela par asservissement ou par vitesse imposée.

En l'occurrence, pour le Translohr tous les essieux sont freinés mais on a tenu à conserver la possibilité de défreiner un essieu, car en ferroviaire on utilise souvent un essieu défreiné comme référence de vitesse.

La méthode par asservissement a pour but de calculer l'effort de traction et de freinage au contact pneu-chaussée, car le projet DEVIN se concentre sur la prise en compte correcte des efforts tangents du pneu sur la chaussée.

II.2.2 Paramètres de voie et de confort

On va mettre au point un algorithme qui calcule le profil de vitesse maximal, un vecteur de vitesse de consigne déduit de la voie, théorique ou mesurée, et de paramètres ergonomiques liés au confort :

- d'une vitesse de départ : celle déjà définie dans les conditions de simulation des projets existants ;
- éventuellement : d'un point d'arrivée en station, ou de départ arrêté, bien que le logiciel ne gère pas bien les petites vitesses ;
- d'une accélération transversale non compensée limitée (paramétrable, implicite +/- 1.3 m/s²) ;
- d'un jerk longitudinal (variation de l'accélération long.) limité (paramétrable, implicite +/- 1 m/s³).
- d'une accélération longitudinale limitée (paramétrable, implicite +/- 1.3 m/s²) ;
- des courbures transversales et du dévers ;
- d'une accélération transversale limitée (paramétrable, implicite +/- 1.3 m/s²) ;
- d'un jerk transversal limité (paramétrable, implicite +/- 0.4 m/s³) ;
- de la longueur du véhicule. (STE 4, L= 32m)

Il peut être plus simple d'itérer plusieurs fois par une méthode numérique pour obtenir le bon profil de vitesse, plutôt que d'essayer de calculer le profil « idéal » par une méthode analytique.

On a essayé d'ajuster le plus possible un profil de loi vitesse réaliste, après différents essais échoués ou de plus complexité avec des processus d'itération.

Après l'introduction à partir des commandes, des paramètres propres, on donne le choix de laisser à l'algorithme faire une loi vitesse ou sinon on a la possibilité de mettre « à la main » un nombre de points qui vont s'ajuster à la loi vitesse qu'on veut chercher.

En tenant en compte des différents paramètres considérés, on ne va jamais dépasser, grâce aux différents commandes introduits dans l'algorithme, les accélérations max, puissance max. ...

Ensuite, on définit dans l'algorithme, une fonction auxiliaire pour bien approcher, avec nos données, des décélérations qui s'ajustent à nos critères et pouvoir maintenir les conditions établies en freinage. Donc cette fonction va être utile quand on veut freiner pour l'arrêt en station ou simplement décélérer dans l'approche d'une courbe.

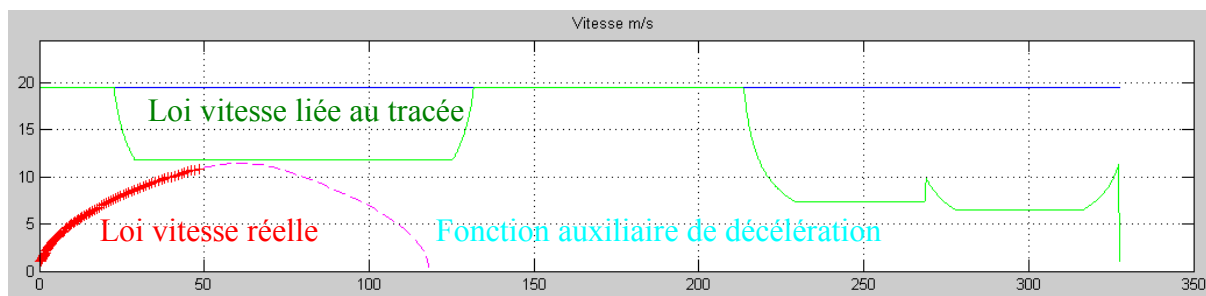


Fig..12 **Loi vitesse** maximale limitée par le tracée, **loi vitesse** réel qui suit un tram qui démarre d'un station avec son **prolongement** (fonction auxiliaire) qui nous indique à chaque point, lors de son avancement, comment va être notre décélération théorique dans le cas où on aura besoin de diminuer la vitesse, bien soit à l'entrée en courbe ou bien soit à l'arrivée en station.

Une fois qu'on a la loi de vitesse calculée, un nouveau fichier de vitesse et d'accélération en fonction du Pk ,va être créé pour que VOCOLIN puisse le lire.

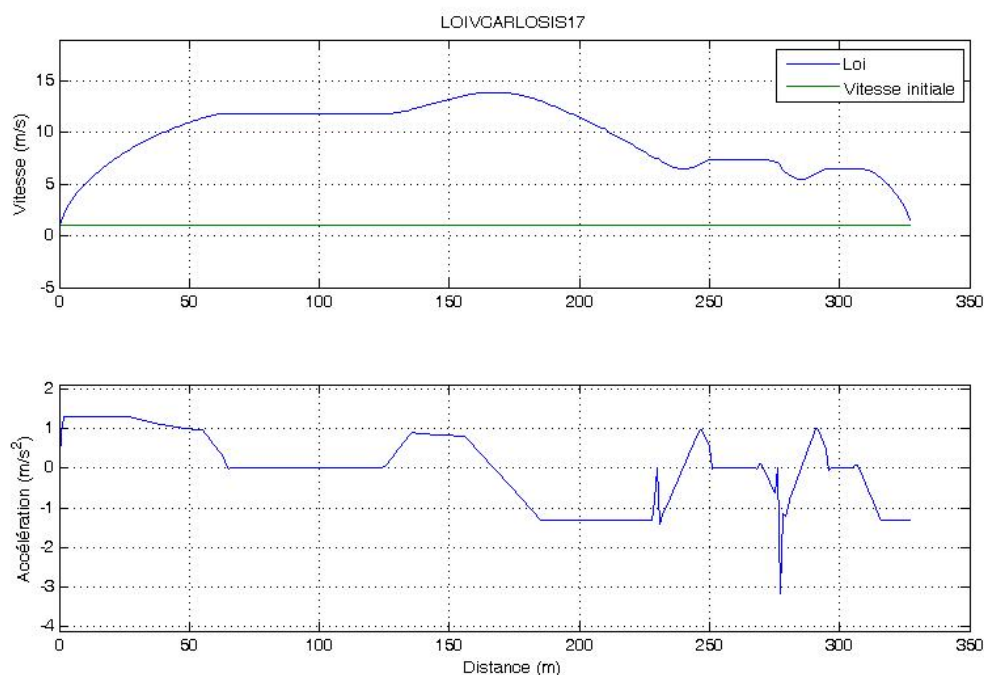


Fig. 13. Loi vitesse et d'accélération sorties de l'algorithme

Le choix de l'asservissement à ce profil de vitesse maximale sera ajouté dans la liste déroulante du menu accélération imposée/accélération libre du menu « simulation » + « paramètres ».

Une difficulté apparue avec ce projet Translohr a été que la plupart du temps, en ferroviaire, les simulations se satisfont d'une vitesse constante ou d'une phase de décélération ou d'accélération uniforme. Avec ce système urbain assez sinueux, le conducteur est amené à moduler fortement la vitesse sur une interstation, c'est pour cela l'importance de cette loi vitesse.

II 2.3 Paramètres véhicule

Après la voie, les facteurs limitant la vitesse viennent du véhicule. D'abord des capacités de traction, mais aussi de freinage, avant une courbe par exemple. Au freinage comme en traction, la limite d'adhérence est liée à la fois à la voie et au véhicule, c'est pourquoi il existe une rubrique adhérence séparée dans le menu « modélisation » de VOCOLIN :

- tenir compte de données de puissance max : cela fait plafonner l'accélération au-delà de la « vitesse de définition » du véhicule ; ceci est à prendre en compte dans l'asservissement, car un véhicule n'aura pas la même vitesse de définition dans une montée qu'à plat ; ($P_{max} = 400 \times 10^3 \text{ W}$)
- idem en freinage : tenir compte d'une limite de serrage de freins qui serait inférieure à la limite d'adhérence
- Vitesse maximale de consigne ($V_{max} = 70 \text{ km/h}$)

En ferroviaire, seuls certains essieux permettent de tracter, tandis qu'en freinage, tous les essieux freinent (sauf parfois un essieu non freiné qui sert de référence pour la vitesse absolue), dans notre cas on a deux essieux moteurs (l'un à l'avant et l'autre à l'arrière du tramway) tandis que les autres vont rester porteurs. En freinage on considère que tous les essieux freinent.

II.3 Analyse des efforts sur VOCOLIN (Annexe C)

Il s'agit, à partir du tronçon de voie choisi avec sa loi de vitesse associée et son accélération, de mettre ces données dans VOCOLIN et interpréter les résultats des efforts par rapport à ceux du calcul statique.

Il faut les mettre les coordonnées de la voie dans le modèle pour qu'il puisse les lire.

Avec ce tronçon et notre algorithme de calcul, on va obtenir la loi de vitesse d'asservissement et son accélération que l'on va introduire ensuite aussi dans le modèle.

Pour la sortie des résultats, on a décidé de simplifier et de considérer les tronçons de voie de Clermont-Ferrand, les plus chargés et les plus défavorables, au niveau des efforts générés lors du roulement, c'est-à-dire, des voies qui correspondent à des virages serrés dans le centre ville (rames avec grande affluence de voyageurs).

On a pris les tronçons correspondants aux interstations IS17, IS19, IS21.

Intersation 17

Pour le tracé ci-dessous on aura les différents efforts dans les trois directions de l'espace, X (direction longitudinal), Y (direction transversale) et Z (direction normale au plan de roulement) résultats du déplacement du tramway, soit en alignement droit, soit en courbe. Leur allure en fonction du P.k. va être montré dans le tableau qui suit.

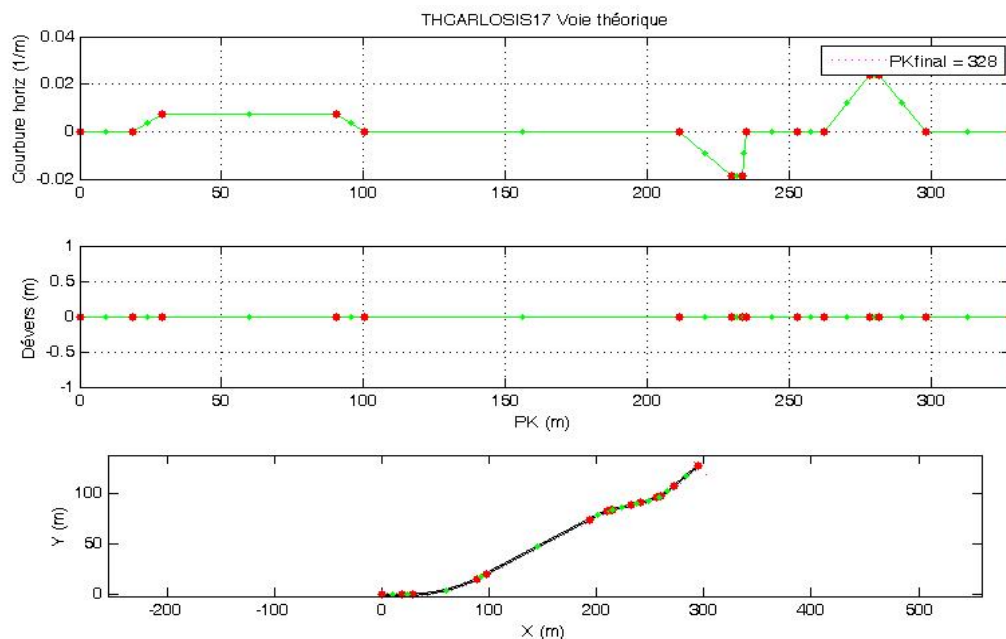


Fig.14. Courbure horizontale en fonction du P.k., dévers et tracé de voie IS 17

Le tracé a été fait pour un essieu de référence, dans ce cas-ci, le plus chargé, c'est-à-dire, le numéro 2. On représente les efforts obtenus dans deux roues (gauche et droite)
On voit une courbe à gauche, ensuite un alignement droit et finalement un virage à droite pour vite fait virer à gauche.

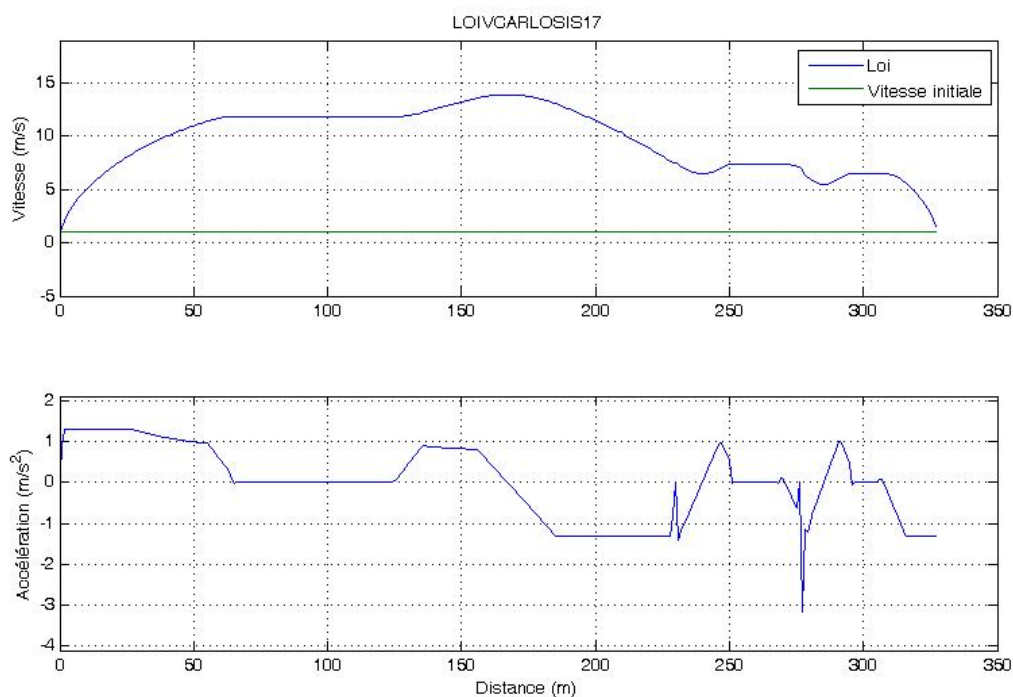


Fig.15. Loi vitesse et d'accélération du tramway sur le tracé représenté

On peut remarquer que dans les zones de virage, la loi de vitesse diminue selon les paramètres de freinage imposés du jerk et de la décélération.

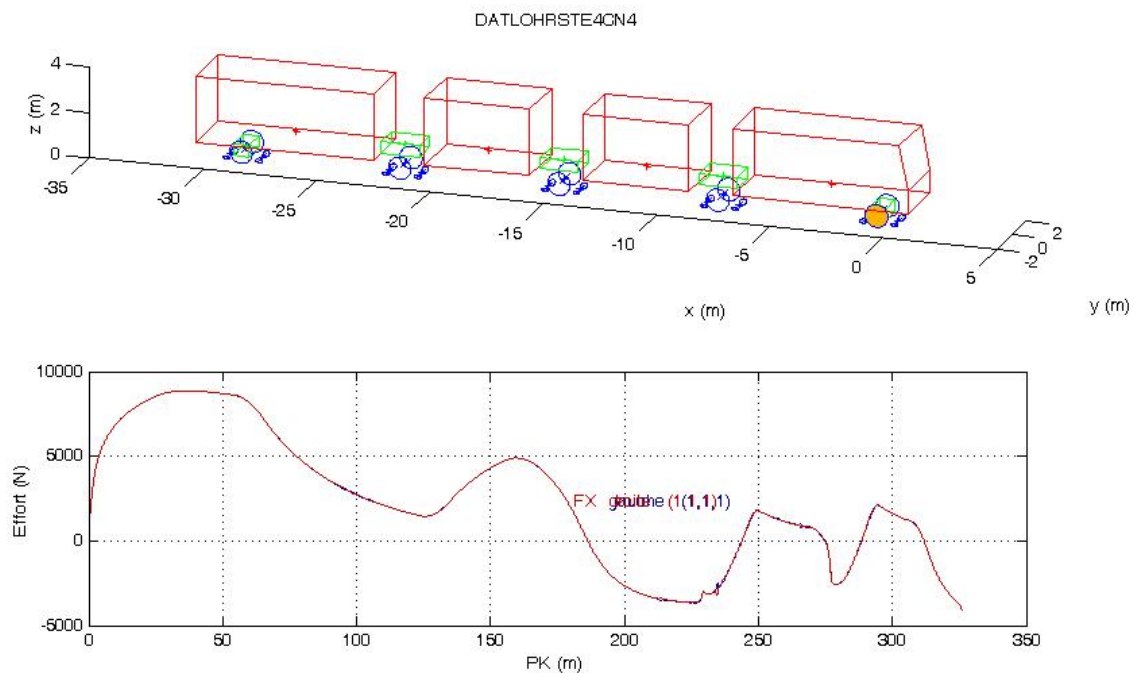


Fig.16. Efforts dans l'axe longitudinal. Positif en accélération et négatif en freinage

On peut remarquer les fortes variations dues aux accélérations et décélérations ou zones de non acc. , de vitesse constante.

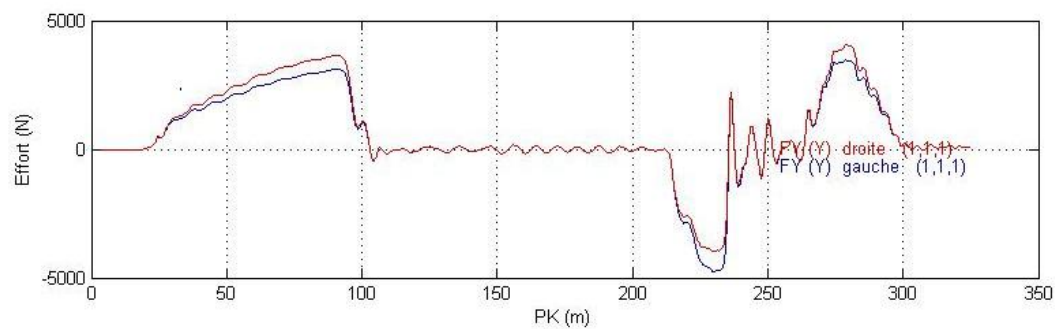


Fig.17. Efforts transversaux. Positifs avec des virages à gauche

Voir comment augmente l'effort dans la roue droite lorsqu'on tourne à gauche
On obtient des valeurs pics de 40KN pour la fin du virage à droite sur la roue droite et précédemment une valeur de -48KN pour le virage à droite sur la roue gauche.

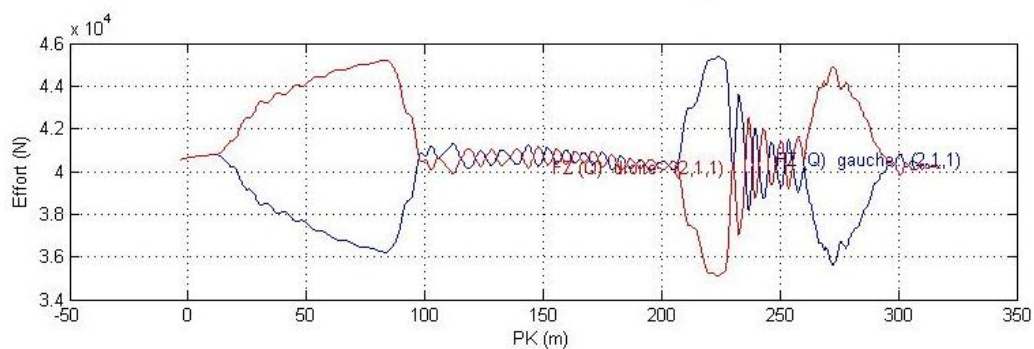


Fig .18.Efforts normaux

On peut dire, sans doute, dans les virages à droite, la roue extérieure, c'est-à-dire, celle de gauche est chargée de manière symétrique et au détriment de sa roue opposée. On arrive à des valeurs de 46KN dans la zone la plus chargée et symétriquement à des valeurs d'environ 35KN pour la roue la plus déchargée.

Intersation 19

Comme pour l'autre tracé, on représente les différentes valeurs des efforts du contact entre la roue et la chaussée dans les trois directions de l'espace. Pour mieux comprendre ces efforts il faut contrôler à chaque Pk le profil vitesse et le tracé qui vont établir le comportement du train.

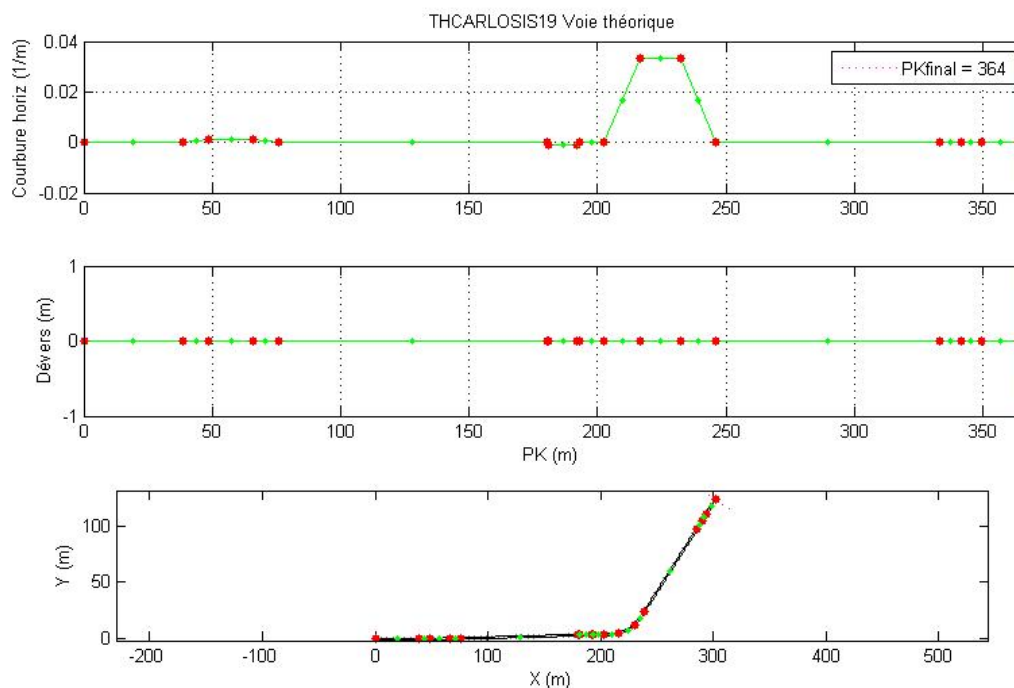


Fig.19. Courbure horizontale en fonction du Pk., dévers et tracé de voie IS 19

On a une courbe à gauche de moins de 30m de rayon courbure.

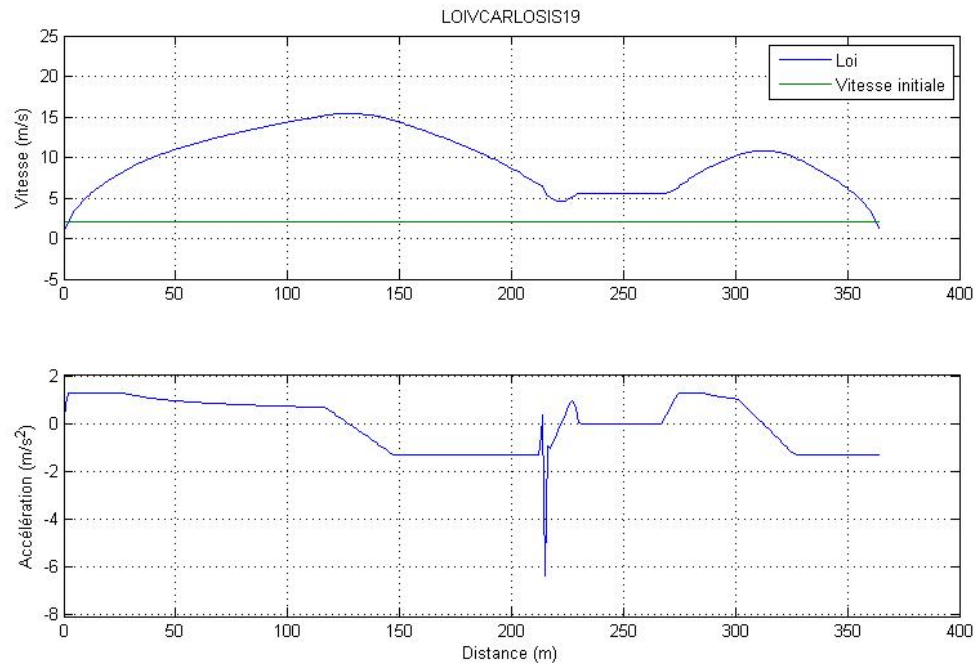


Fig.20. Loi de vitesse et d'accélération du tramway sur le tracé représenté

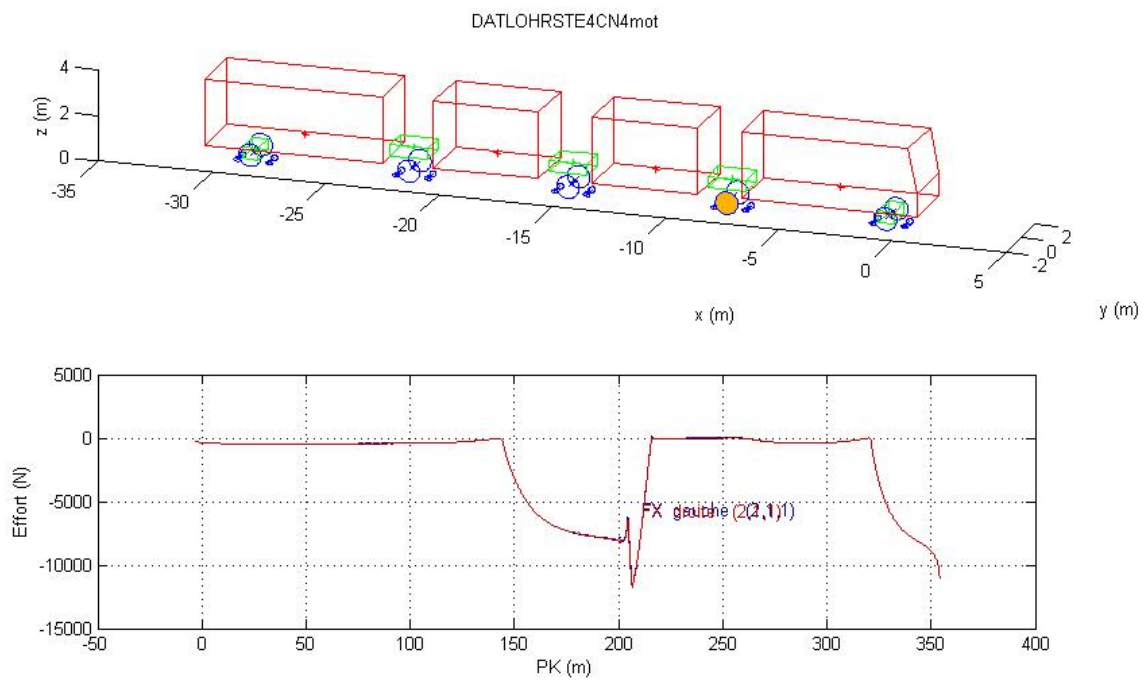


Fig.21. Efforts dans l'axe longitudinal. Positif en accélération et négatif en freinage

On obtient des valeurs de l'ordre de 12KN en freinage, quand on arrive au virage à gauche.

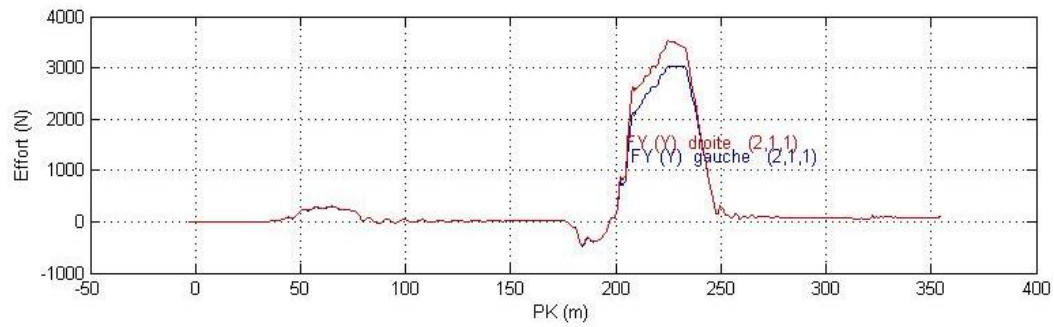


Fig.22. Efforts transversaux. Positifs avec des virages à gauche

On remarque une surcharge sur la roue droite dans le virage à gauche de 3,5KN

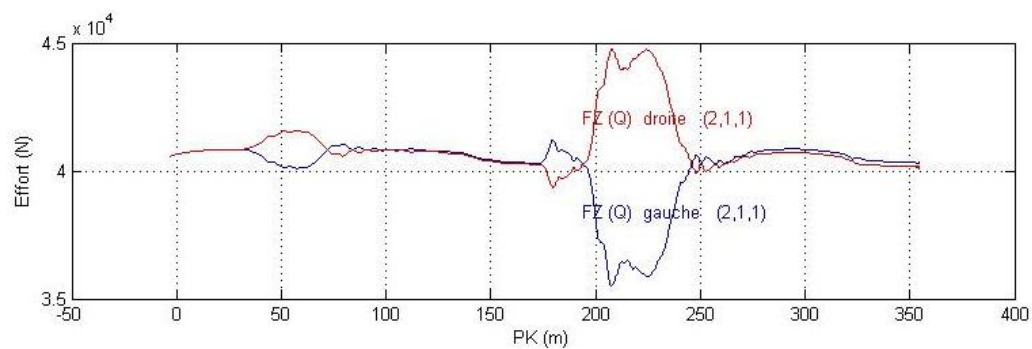


Fig .23. Efforts normaux

On arrive à des valeurs pic en courbe de presque 45KN

Intersation 21

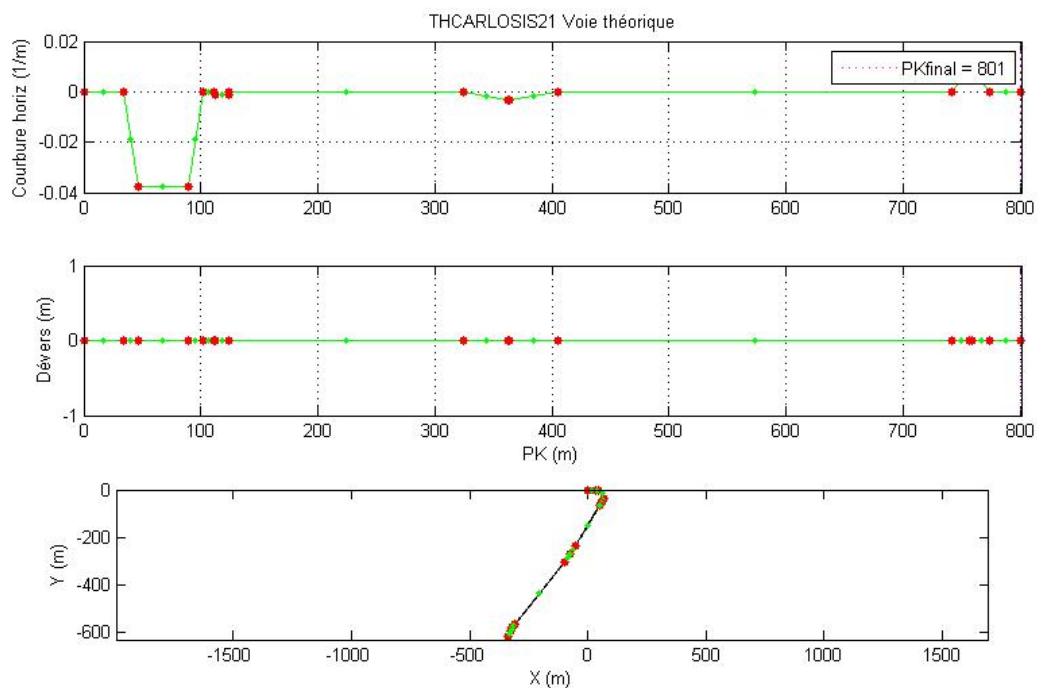


Fig.24. Courbure horizontale en fonction du Pk., dévers et tracé de voie IS 19

Il faut prendre en compte la partie la plus défavorable, la courbe à droite de 26m de rayon juste après le démarrage en station.

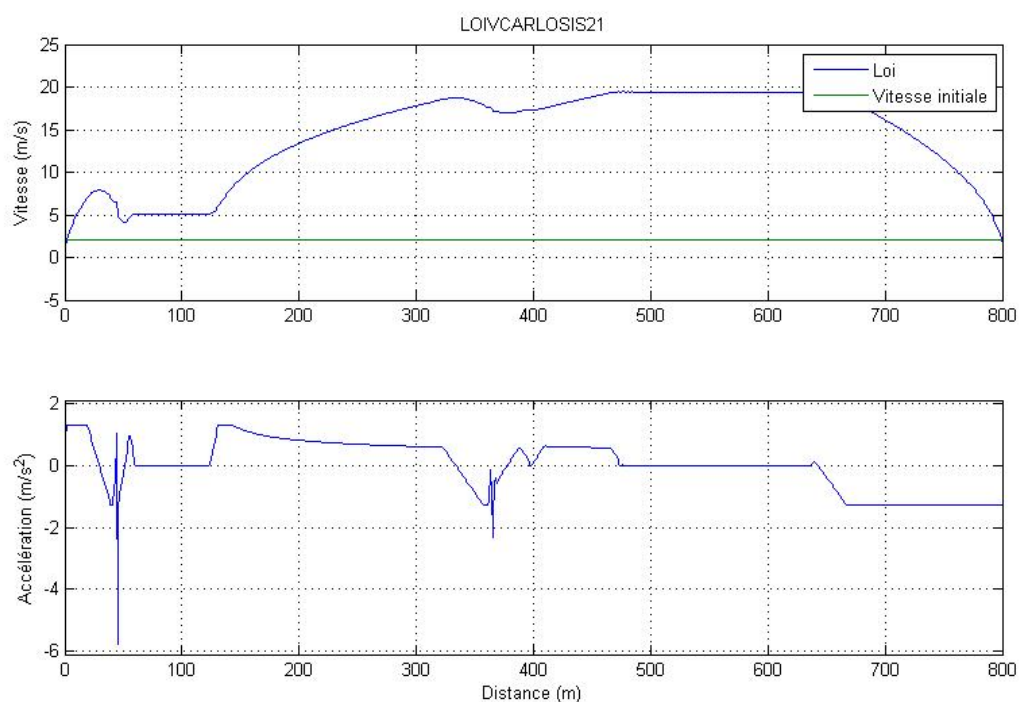


Fig.25. Loi de vitesse et d'accélération du tramway sur le tracé représenté

Après cette courbe là, on a la possibilité d'accélérer jusqu'à attendre la vitesse max.

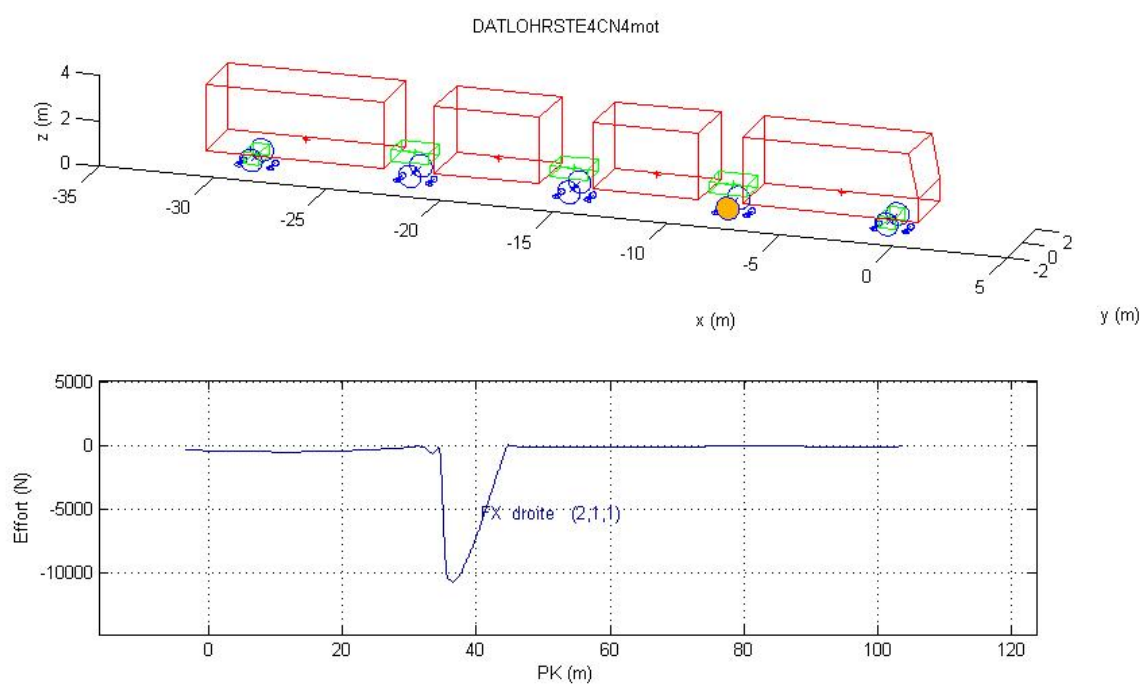


Fig.26. Efforts dans l'axe longitudinal. Positif en accélération et négatif en freinage

On ne considère que la partie en courbe, là on atteint des valeurs de 10KN en freinage avant d'entrer en courbe

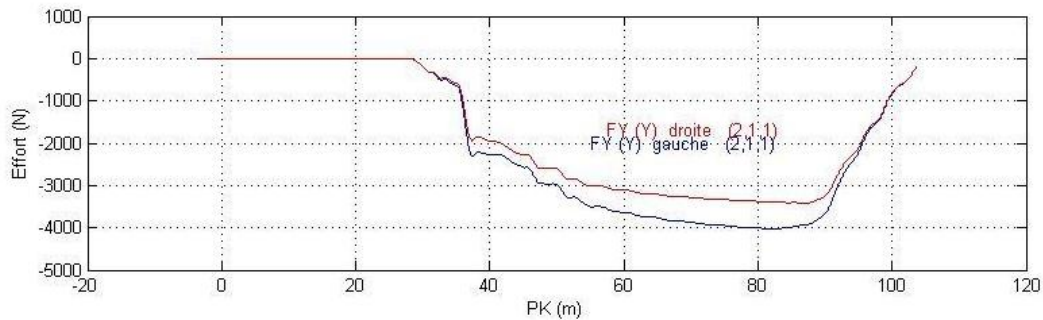


Fig.27. Efforts transversaux. Positifs avec des virages à gauche

On arrive à des valeurs max. dans la roue gauche de -4KN

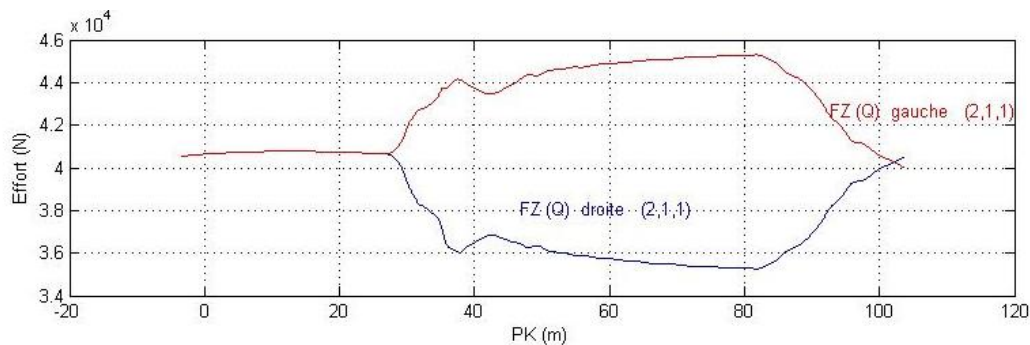


Fig .28. Efforts normaux

En courbe à droite on a des valeurs sur la roue gauche de presque 46KN.

III. Application et analyse des résultats dans un modèle de durée de vie de chaussée (Annexe D)

III.1 Introduction

Pour réaliser une analyse plus exhaustive du comportement de la chaussée sur laquelle roule le Translohr, on s'est déplacé à Nantes, au LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées) accueillis par M. Jean-Maurice Balay, où on est resté deux jours pour travailler avec le modèle Alizé, développé par ce laboratoire, en nous permettant, d'une part, de contrôler la durabilité de notre profil de chaussée et d' autre part, d'essayer d'autres matériaux et épaisseurs de chaussées qui puissent nous intéresser dans le cas du projet de Clermont-Ferrand.

III.2 Dimensionnement des chaussées

La méthode de calcul employée sera directement prise du logiciel Alizé, d'un autre outil basé sur le travail de calcul, mené par le LCPC, du dimensionnement de plateformes de chaussées pour les projets de tramways sur pneus de la région Île-de-France et ceux-ci,

soutenus et guidés par l'expérience sur ce domaine, de M. Balay. Cela va nous être utile pour travailler plus vite et en même temps, comparer et vérifier des résultats.

Le dimensionnement des structures de chaussées routières et autoroutières du réseau routier national s'effectue en France selon la méthode rationnelle LCPC-SETRA. L'ensemble des hypothèses et des modalités de mise œuvre de la méthode rationnelle est décrit dans le Guide technique Conception et dimensionnement des chaussées (LCPC-SETRA, décembre 1994). La méthode rationnelle est également d'utilisation courante pour le dimensionnement d'autres types de chaussées comme celles relevant des régions, des départements ou des communes. Pour le dimensionnement des structures de chaussées pour tramways sur pneus on utilise cette méthode générale de dimensionnement, moyennant diverses adaptations.

III2.1 Base et description du modèle rationnel routier LCPC-SETRA (Alizé)

La méthode rationnelle relève d'une démarche combinant les apports de la mécanique rationnelle et des éléments expérimentaux :

- les méthodes de la mécanique sont employées pour simuler numériquement la structure de chaussée et calculer les sollicitations créées dans les différentes couches de matériaux par une charge standard de référence, correspondant à l'essieu légal français,
- les résultats d'essais en laboratoire sur l'endommagement sous chargements répétés des matériaux de chaussées sont utilisés pour apprécier leur résistance vis-à-vis de la fatigue, au moyen d'un modèle de fatigue (modèle de Wöhler) et un principe d'additivité des dommages (principe de Miner) ,
- les enseignements résultant de l'observation du comportement de chaussées réelles interviennent enfin pour préciser le critère de vérification vis-à-vis des déformations permanentes du sol support et des couches non liées et pour caler les résultats du modèle de calcul.

III 2.1.1 Généralités sur la méthode de dimensionnement

La méthode de dimensionnement prend en compte les facteurs suivants :

- le trafic,
- l'environnement (données climatiques),
- la plate-forme support de chaussée,
- les matériaux de chaussée,
- la qualité de la réalisation de la chaussée,
- l'exigence de niveau de service fixée par la maîtrise d'ouvrage, qui est directement traduite dans le dimensionnement par une valeur de risque de rupture à l'issue de la durée de service de la chaussée.

Le trafic

Les chaussées sont dimensionnées vis-à-vis du trafic poids lourd. Il est exprimé en terme de trafic poids lourd cumulé sur toute la durée de service de la chaussée (TC), qui est calculé par la formule suivante :



MJA : nombre journalier de poids lourds par sens de circulation sur la voie la plus chargée à la mise en service (moyenne journalière annuelle),

t : taux annuel de croissance linéaire du trafic,

d : durée de vie, en années.

Ce trafic poids lourds est constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieux différentes. La méthode de calcul implique la conversion de ce trafic composite, en un nombre cumulé d'essieux de référence, NE, équivalent au trafic cumulé TC en terme d'endommagement de la chaussée. En France, l'essieu de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de poids total 130 kN (32.5 kN par roue). Le coefficient d'agressivité moyenne du trafic (CAM) permet d'effectuer cette conversion :

$$NE = TC \times CAM$$

L'agressivité des essieux ne s'exprime pas par une relation unique, les valeurs du coefficient d'agressivité dépendent, outre la consistance du trafic, du matériau et de la structure de chaussée. Sur le réseau national, les valeurs du coefficient CAM résultent d'études d'analyses du trafic routier mise à jour périodiquement, et correspondent à des valeurs moyennes nationales.

L'environnement – les données climatiques

La température influence le comportement des différents types de chaussées :

- par son influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux, en raison de leur comportement thermo-visco-élastique,
- par les variations d'ouverture des fissures dans les matériaux traités aux liants hydrauliques, qui accompagnent les variations cycliques de température,
- par les déformations de dalles dues aux gradients thermiques dans les chaussées rigides.

Pour les matériaux bitumineux, les calculs sont faits en considérant une température du matériau de chaussée constante, appelée température équivalente. En France métropolitaine, la température équivalente utilisée pour le dimensionnement courant est de 15°C, valeur résultant d'histogrammes types de distributions annuelles des températures dans les chaussées bitumineuses.

La structure de chaussée qui résulte du dimensionnement mécanique fait également l'objet de vérification au gel - dégel. En présence de sols sensibles au gel, cette vérification vise à s'assurer que le maintien du trafic poids lourd pendant les périodes de dégel ne se traduira pas par une dégradation accélérée de la chaussée.

La plate-forme support

Le Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme (LCPC-SETRA Septembre 1992) caractérise les sols supports, le choix des matériaux utilisables pour la couche de forme et leurs conditions de mise en œuvre. Pour le dimensionnement de la

structure de chaussée, le sol support est décrit par une valeur de module d'Young et du coefficient de poisson.

Les matériaux de chaussée

Un ensemble de normes codifie les différentes familles de matériaux de chaussée, définissant pour chacune d'elles des classes selon la qualité des constituants et certaines propriétés physiques et mécaniques des mélanges. Pour les matériaux normalisés, les valeurs de résistance mécanique et de déformabilité retenues sont déduites des valeurs moyennes obtenues sur la formule de base, établie conformément aux dispositions des normes définissant les méthodologies d'étude. La détermination des sollicitations admissibles vis à vis de la fatigue par les matériaux prend en compte la dispersion qui caractérise les résultats des essais de fatigue en laboratoire.

La qualité de la réalisation des travaux de construction

La méthode de dimensionnement s'applique à des situations pour lesquelles les prescriptions et les règles de l'art concernant la fabrication et la mise en œuvre des matériaux sont totalement respectées. Elle permet d'intégrer cependant des écarts entre les épaisseurs nominales des couches de matériaux et les épaisseurs réellement mises en œuvre. Ceci s'effectue à partir d'hypothèses sur les dispersions d'épaisseur, issues des observations sur chaussées.

III. 2.1.2 Calcul mécanique des sollicitations créées par le trafic

On considère les matériaux de chaussées envisagés pour la réalisation des plates-formes de tramways sur pneus. Le dimensionnement consistera à déterminer :

- d'une part, les sollicitations créées par le trafic dans les différentes couches de matériaux. Cette évaluation repose sur un modèle théorique dans lequel la chaussée est assimilée à un massif multi-couche semi-infini, en adoptant pour les matériaux un comportement linéaire-élastique et isotrope,
- d'autre part, les sollicitations admissibles par les matériaux constituant la chaussée, vis à vis de l'endommagement par fatigue. La détermination des valeurs admissibles repose sur les résultats d'essais de fatigue normalisés réalisés en laboratoire.

Les matériaux bitumineux

La définition des spécifications sur les performances s'appuie sur une gamme parfaitement définie d'essais de laboratoire, dont en particulier la presse à cisaillement giratoire, l'essai d'orniérage et les essais de module et de fatigue. La caractérisation mécanique porte sur :

- la susceptibilité du module d'Young vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement. Cette susceptibilité est évaluée par les essais de module et de perte de linéarité ou de flexion dynamique,
- le comportement en fatigue.

Le comportement en fatigue est apprécié par l'essai de fatigue en flexion pratiqué à la température de 10°C et la fréquence de 25 Hz. La courbe de fatigue du matériau exprime la relation entre la déformation de traction par flexion ϵ_6 supportée par l'échantillon, et le nombre de chargements N, pour lequel sa rupture par fatigue est observée. Cette courbe de fatigue est représentée par une relation de la forme ci-dessous, correspondant à une droite dans le repère bi-logarithmique (modèle de fatigue de Wöhler) :



avec :

- b : pente de la droite de fatigue,
- ϵ_6 : déformation de traction par flexion pour laquelle la rupture est obtenue sous 1 million d'applications du chargement, dans les conditions 10°C, 25Hz.

Les résultats des essais de fatigue sur les matériaux granulaires liés se caractérisent par la forte dispersion des résultats, qui est décrite par l'écart type σ_N sur le logarithme de N.

Pour le dimensionnement, la détermination des sollicitations admissibles par les matériaux découle directement de la courbe de fatigue obtenue en laboratoire, pondérée par divers coefficients permettant de prendre en compte les facteurs tels que la température de la chaussée en service, le risque de rupture admis à l'issue de la durée de service, etc. L'expression des déformations admissibles est la suivante :



où k_ϵ , k_c , k_r et k_s sont des coefficients pondérateurs.

Le béton de ciment

En termes de performances mécaniques, les bétons sont classés suivant la valeur caractéristique de la résistance mécanique à 28 jours, déterminée par l'essai de fendage ou par l'essai de compression.

Les paramètres de comportement mécanique nécessaires au dimensionnement des structures de chaussées en béton de ciment sont :

- E : module d'Young,
- ϵ_6 : contrainte de rupture en traction par flexion à 10^6 cycles,
- b : pente de la droite de fatigue
- N : écart type sur la loi de fatigue.

La courbe de fatigue est également une droite dans le repère bi-logarithmique, avec pour expression :



ϵ_6 peut être déduit d'essais de résistance en fendage (compression diamétrale), f_t , par la formule :



La contrainte admissible de dimensionnement est donnée par la formule :



où k_c , k_f et k_d sont les coefficients pondérateurs.

III.2.2 Adaptations nécessaires pour l'étude tramway sur pneus

La démarche du dimensionnement rationnelle appliquée au cas des plate-formes de tramways sur pneus nécessitent diverses adaptations, qui seront simplement listées dans cette partie. Elles concernent le calcul de structure, les performances des matériaux et les données trafic.

III.2.2.1 Modèle de calcul de la structure

Prise en compte de la longrine

Dans les chaussées bitumineuses, la présence de la longrine béton support du rail de guidage sera prise en compte. Les conditions de liaison longrine/chaussée devront être précisées.

Prise en compte des effets de bords

Ce point concerne principalement les chaussées en béton, en relation avec la réponse à la question Q2 relative au mode de réalisation de la plate-forme : réalisation en une dalle unique ou deux dalles indépendantes.

III.2.2.2 Performances des matériaux

Le choix d'une classe de performances réduites Q2 permettra de tenir compte des conditions particulières de réalisation de chantier en milieu urbain,

Par ailleurs, pour les matériaux bitumineux, les valeurs des modules de Young tiendront compte de la vitesse de circulation en milieu urbain, réduite par rapport aux vitesses sur routes ou autoroutes.

III.2.2.3 Trafic

Calcul de l'agressivité du trafic tramway

Connaissant l'histogramme de charges par type d'essieu pour un trafic donné, son agressivité est donnée par le coefficient CAM :



avec :

NPL : nombre de poids lourds

K : coefficient caractéristique du type d'essieu (simple, tandem, tridem, ...)

n_j : nombre d'essieux élémentaires de type j et de classe de charge P_j .

Absence de balayage ou canalisation totale

L'une des caractéristiques de la circulation des tramways sur pneus est la canalisation totale de la circulation, se traduisant par une majoration de son agressivité. Cet effet sera pris en compte par un coefficient d'agressivité additionnelle.

Son calcul repose sur le calcul, à l'aide du modèle mécanique, du profil en travers des sollicitations supportées par le matériau, et sur la donnée de l'histogramme de balayage latéral standard du trafic. Le calcul du coefficient d'agressivité additionnelle C_{Ac} s'effectue en appliquant le principe d'additivité des dommages (principe de Miner), son expression est la suivante :



avec :

i : indice d'une série finie décrivant l'excentrement latéral de la charge par rapport à l'axe longitudinal moyen de circulation,

σ_i : sollicitation dans le matériau, correspondant à l'excentrement d'indice i de la charge,

p_i : pourcentage du trafic appliqué avec l'excentrement d'indice i.

Prise en compte des croisements

Le dimensionnement de la structure de chaussée dans les zones de carrefour devra tenir compte du trafic routier traversant, dont les effets s'additionnent à ceux des tramways sur pneus.

Deux situations de dimensionnement seront donc examinées :

- sections courantes en alignement droit ou en courbe, et zones de station,
- zones de carrefour, en prenant les effets cumulés de la circulation tramways, et d'une circulation transversale par un trafic routier donné.

Dans les parties en courbe de la voie ou dans les zones d'accélération ou de freinage, la chaussée supporte des sollicitations de nature tangentielle, additionnelles à celles supportées en situation courante (alignement droit et vitesse constante). Comme cela est le cas pour le dimensionnement des structures routières, et notamment des chaussées urbaines, nous considérerons que les effets de ces efforts additionnels se limitent à la couche superficielle de roulement, et qu'ils sont sans influence sur le dimensionnement structural de la chaussée (couche de base et couche de fondation), en raison de la forte diffusion des contraintes

tangentielles dans l'épaisseur de la structure. Dans ces zones particulières, une attention particulière devra donc porter sur le choix de la couche de roulement pour les structures bitumineuses (principalement vis-à-vis des risques d'arrachement et d'orniérage). Par contre, le revêtement en béton ne devrait pas nécessiter de dispositions particulières.

III.3 Calcul de valeurs admissibles (Annexe E)

Tout d'abord, on va vérifier que la chaussée du projet de tramway de Clermont-Ferrand est appropriée pour le type de charges qu'elle doit supporter. Pour emmener ce calcul on va considérer deux types de qualité de réalisation des chaussées puisque lorsqu'on construit une surface de roulement, l'efficacité des machines et l'endroit même du chantier ne donnent pas les mêmes conditions de travail et bien entendu, de qualité. Le but sera la comparaison des deux résultats et à la fin faire un bilan des considérations. Donc on aura une qualité Q1 pour les chantiers bien mis en place (comme on fait pour les autoroutes) et une autre, Q2 dans laquelle on tiendra compte de la perte de qualité due aux défauts dans la construction du chantier (ouvrages en villes où, par endroit, l'absence de place, nuisances, etc...ne permettent pas l'utilisation des machines qui rendent possible une réalisation des travaux de manière aussi précise.

On a les données de passage du tramway toutes les 6 minutes dans les heures de pointe et toutes les 9 minutes dans les heures creuses, donc après calcul on aura 1019 passages de rames par semaine/ par sens et on va extrapoler les résultats pour une période de 30 ans. De plus on a la charge à l'essieu, comparé avec les résultats dynamiques de VOCOLIN et ceux de Lohr Industries.

Dans l'annexe on peut suivre la méthode de calcul d'une manière plus détaillée, ci-dessous on montre un peu afin de mieux comprendre comment se déroule celle-ci.

On démarre l'étude en définissant le profil de chaussée bitumineuse qu'on veut étudier. On définit les différents types de couches avec l'aide d'Alizé qui a une bibliothèque avec toutes les caractéristiques de matériaux les plus utilisés. Lorsqu'on utilise des structures bitumineuses toutes les couches sont considérées bien collées, pas glissantes. **Voir Fig.**

Ensuite on va prendre la déformation de référence sur la couche EME2, avec la charge de l'essieu jumelé de référence français.

Après on va calculer la déformation produite par notre roue de référence du tramway (0,035MN par roue et 0,6 MPa de pression) qui va nous permettre d'établir une relation entre le poids à l'essieu du tramway et ce qu'on vient de calculer (proportionnalité). On divise par 7 pour avoir la déformation unitaire et puis on multiplie par le poids de l'essieu qu'on a.

Pour obtenir notre poids à l'essieu, représentatif du passage de notre tramway, on a fait la moyenne pondérée de la charge des essieux de chaque type de rame, en sachant combien de rames passent à l'heure (assis, 2, 4, 6, 8 personnes/m²) et la moyenne pondérée de passages des 5 essieux de chacune des rames.

On aura donc le nombre total d'essieux qui passent sur notre chaussée.

Pour le calcul du CAM (coefficient d'agressivité moyenne), on prendra en compte d'autres paramètres :

- Coefficient dynamique (k_{dyn}) pour considérer les efforts dynamiques vues sur VOCOLIN par rapport au calcul statique,

- Coefficient de canalisation (C_{ac}), qui va faire une moyenne de la déformation dans notre point de calcul à partir d'une référence statistique de différents passages d'essieux déplacés de quelques cm,

- Coefficient de croisement (C_{rt}), qui tient compte du pourcentage de croisements du trafic en station, alignement droit et carrefour. La distance minimale entre les axes de circulation des roues de deux rames au moment des croisements est de 0,93 mètre en l'absence de poteau central, et de 1,33 mètres en présence de poteau.

On calculera le CAM (coefficient d'agressivité moyenne), c'est-à-dire, quelle va être l'agressivité équivalente générée par ces essieux emmenés au modèle de référence, de sorte qu'on aura à tenir compte des trois coefficients qu'on vient de montrer ci-dessus.

Ensuite on passe, avec l'aide d'Alizé, au calcul des valeurs de déformation admissibles de notre couche EME2 ajustée pour chaque type de trafic.

Une fois avoir calculé les différentes déformations admissibles, elles vont nous indiquer la limite de déformation qu'on ne pourra pas dépasser dans notre chaussée, donc on va recalculer notre profil de chaussée, en ajoutant différentes épaisseurs de notre couche jusqu'à trouver une épaisseur suffisante pour ne pas dépasser la déformation maxi admissible.

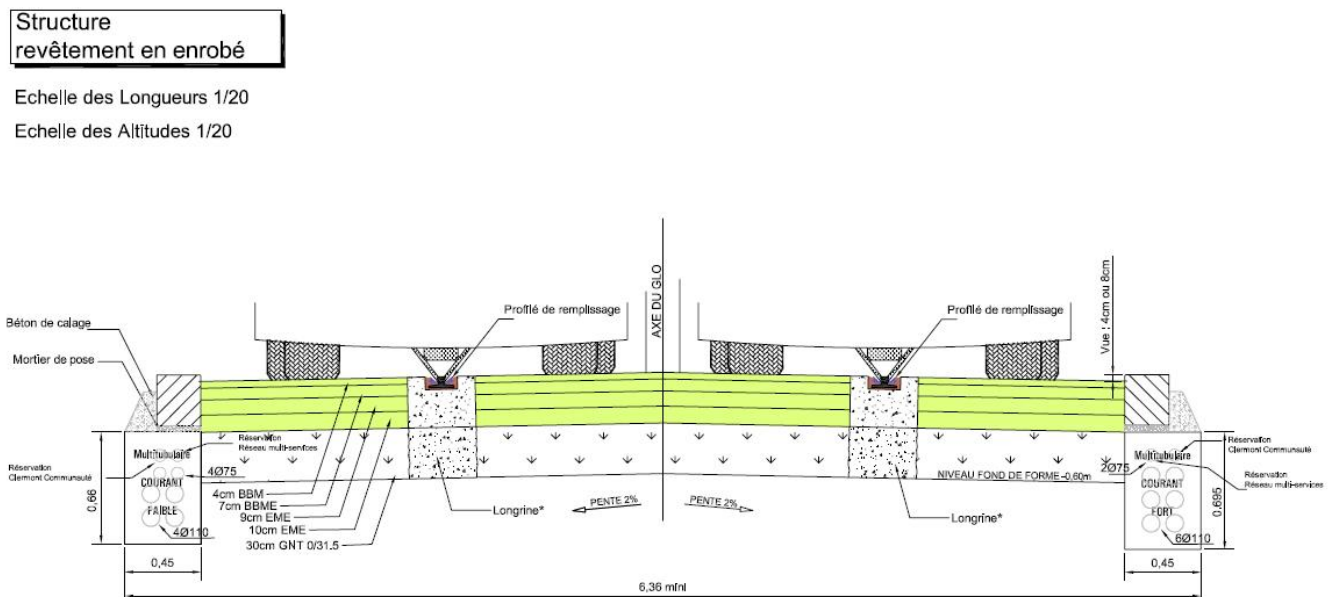


Fig.29 Profil de la chaussée du Translohr

Après la sortie des résultats, on vérifie que notre chaussée donnée et suffisamment dimensionnée pour supporter les charges du trafic avec une couche d'assise de 9cm type EME2 (4BB/7BBME/10+9EME2/25+5GNT/PF2). On prend cette couche puisque elle va être pour Alizé la couche la plus défavorable et donc celle de la référence.

Pour les autres hypothèses de calcul, on obtient, en considérant un trafic, le plus défavorable pour une chaussée de profil Q1, 9BB/21EME2/30GNT/PF2 ou pour le profil de qualité Q2, 9BB/25EME2/30GNT/PF2.

Lorsqu'on a une chaussée en béton, on voit que le comportement de la structure est meilleur mais l'emploi de ce matériau et sa mise en œuvre sont en général plus chers par rapport aux autres. On obtient dans ce cas, une chaussée de type : 22BC5/18BC3/PF2.

Annexes

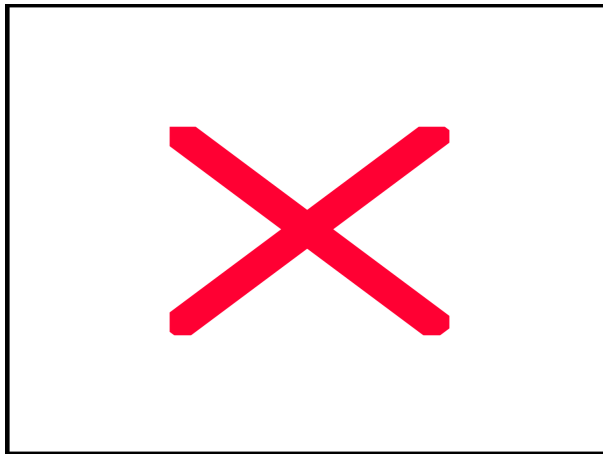
Annexe A : Contact pneu-voie

A.1 Angle de dérive :

L'adhérence au sol d'un pneumatique en mouvement ne constitue pas une liaison rigide. En effet, l'application d'une force transversale (vent ou force centrifuge...) provoque un léger glissement latéral. La roue se déplace transversalement dans la direction de la force sans prendre d'angle.

Ceci a pour conséquence que la trajectoire effectivement parcourue tend à s'écarter de la direction médiane en donnant lieu à un angle qui augmente avec la force latérale appliquée.

Cet angle défini par l'orientation du vecteur vitesse par rapport à l'axe longitudinal de la roue est appelé **angle de dérive**.



V_x : est la vitesse d'avancement du véhicule.

F_{yc} : est appelé poussée de dérive, c'est la force créée au point de contact.

dy : représente la déformation transversale du pneumatique (jante-bandage).

Figure A.1: Mise en évidence de l'angle de dérive

D'évidence ce phénomène ne peut être isolé. La dérive dépend donc, pour chaque pneumatique, de sa conception (taille basse...) , mais aussi :

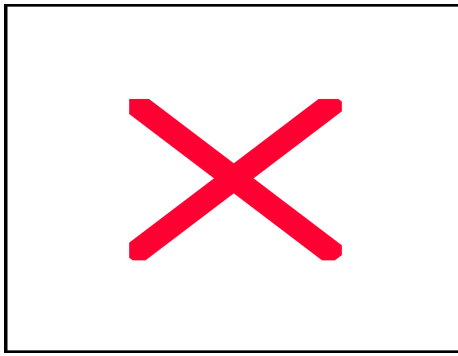
- de la façon dont il est monté, gonflé ;
- d'autres sollicitations qu'il subit simultanément : surcharge, effort moteur, carrossage.

A.2 Couple d'auto alignement

Il est dû au fait que le point d'application des forces au contact n'appartient pas à l'axe vertical passant par le centre de gravité G de la roue, mais est en arrière de la surface de contact. Ceci est valable pour une dérive limite (c'est-à-dire avant de dérapage), on constate que le couple d'auto alignement change de signe en dérapage. Pour des fortes dérives le moment d'auto alignement chute, car il apparaît une perte d'adhérence à l'arrière de l'aire de contact.

Ce phénomène se traduit aussi par l'avancée du point d'application de la résultante des forces de contact.

La poussée de dérive crée également avec la déformée dy un couple qui rend le véhicule sur ou sous-vireur ce qui par réaction dynamique modifiera à son tour l'angle de dérive.



* La zone (1) dite « de **pseudo glissement** » pour laquelle le pneu adhère au sol. L'effort transmis est dû à l'élasticité du caoutchouc.

* La zone (2) dite « de **décrochage** (adhérence et simultanément glissement) » pour laquelle on atteint un effort transmis maximal suivi d'une diminution rapide de celui-ci.

* La zone (3) dite « de **dérapiage** (glissement total) » caractérisée par le frottement du caoutchouc sur le sol et une baisse de l'effort transmis.

Figure A.2: Evolution de la poussée de dérive et du couple d'auto alignement en fonction de la dérive.

Remarque : Dans notre étude on s'intéresse uniquement à des situations de la première zone, qui correspond au pseudo glissement. C'est pourquoi les modèles utilisés ne simulent pas la décroissance de la force, ce qui a quelques avantages numériques.

A.3 Pseudo-glissements longitudinal et transversal

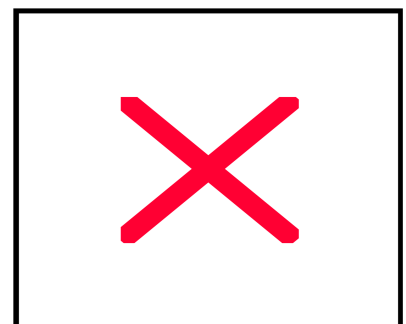
« Pseudo-glissement » est un terme ferroviaire traduisant le mot anglais « creepage » ; en routier : on utilisera le terme « envirement » qui correspond à la dérive. Le pseudo-glissement est la vitesse relative de la surface de la roue par rapport à la surface de la chaussée. Les vitesses considérées sont celles de corps rigides. Pour simplifier les expressions, nous nous plaçons en ligne droite, les roues sont repérées dans le trièdre Oxyz, la vitesse longitudinale étant V_x

A.3.1 Pseudo-glissement longitudinal

La roue animée au niveau de son centre de gravité G par une vitesse V_x , tourne à la vitesse ω correspondant à la vitesse longitudinale V_{x0} , différente de V_x s'il y a pseudo-glissement.

Dans le cas du pneumatique, nous supposons que les roues sont fixées par des liaisons rigides en translation. Le pseudo-glissement est égal $\epsilon = \frac{V_x - V_{x0}}{V_x}$

- Si les roues sont bloquées ($\omega = 0$), le pseudo-glissement vaut 1
- Si les roues patinent ($\omega = +\frac{V_x}{R}$), le pseudo-glissement devient fortement négatif



A.3.2 Pseudoglissement transversal

Durant le temps Δt , la roue se déplace longitudinalement de $V_x \Delta t$ et transversalement de $V_y \Delta t$, selon une trajectoire caractérisée par l'angle α .



Figure A.3.2: Paramètres du pseudo-glisement transverse

Le pseudoglisement transversal sera égal à la différence des deux angles:



Ce glissement est nul si les deux angles sont égaux.

Annexe B : Création de l'algorithme d'asservissement de vitesse sur Matlab

```
%Carlos AREVALO REY + H CHOLLET, juillet 2007

%Création d'une matrice de vitesse correspondant à un tracé de voie
%TRANSLOHR ou autre véhicule VOCOLIN en général

%clear all

%2 objectifs :
%A) fournir un graphe Vx de base pour limiter la vitesse,
%VOCO étant asservi

%A bis : option limitation par ginput de points à la souris
option=1; %si 2 par clic souris

%B) fournir le graphe précis de Vx en tenant compte de toutes les
%limitations, VOCO non asservi suivra exactement cette vitesse avec tous
%ses essieux

%0) paramètres :

%===== paramètres système=====
%vitesse max autorisée
Vmax=70/3.6; %m/s %ou 30 en site partagé (piétonnier, carrefour)
%accélération longitudinale MAX
Xppmax=1.3; %m/s^2
%accélération latérale MAX :
Yppmax=1.0; %m/s^2
%Jerk maxi
Xpppmax=1.0; Ypppmax=0.4; %m/s^3

%Puissance maximale
Pmax=400e3; %W, totale pour le train de masse M

%Masse du train
Mtotale=37e3; %Kg; récupérer masse totale du train somme de parasol(i,j,k)

%longueur du train (récupérer automatiquement la distance entre 1er et
%dernier essieu du véhicule dans parasol(1,1,1), parasol(n,n,n)
%en attendant :
Lmax=-32; %32 m pour un Translohr STE4
%===== fin paramètres système=====

%+++++ paramétrage de la méthode de calcul :
%vitesse départ et arrivée 1 m/s ou autre
Vxun=1; Vxend=1;

%intervalle entre 2 points du vecteur pk :
ds=0.1;
%pas de temps méthode B :
```

```

dt=1e-1; %pas de temps arbitraire
Tmax=5000; %durée arbitraire longue

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% fin paramétrages
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%A) graphe Vx de base

%1) chargement tracé de voie à étudier

%recherche du nom dans une liste des voies disponibles

nomtrac=uigetfile('t*', 'Nom du fichier de données voie'); % nom du fichier voie
%fenêtre de contrôle de VOCO :
%infotracVOCOLIN(nomtrac,cheminEXPRO);

%chargement des tableaux de base
[ntra,dotrac]=readtracVOCOLIN(nomtrac);

%création des données détaillées
[xx,yy,s,beta,pk,Cy,pkmax2,dev,deltcart,pkv,Cv,zz,sv0,zz0,xx0,yy0,pkmin,pkmax,ind0,indv
0,s0,maxpas,maxpasv,theta]=...
    caltracVOCOLIN(ntra,dotrac,0,100,0);

% xxx: composante x trajectoire
% yyy: composante y trajectoire
% s : pk abscisse curviligne
% beta : angle autour de z absolu
% pk : pk des pts de discontinuité en horizontal
% Cy : courbure des pts de discontinuité en horizontal
% pkmax2 :
% dev : devers aux pts de discontinuités en horizontal
% deltcart % delta écartement aux pts de discontinuités en horizontal
% pkv : pk des pts de discontinuités en vertical
% Cv : courbure des pts de discontinuités en vertical
% zzz : composante z trajectoire
% ...
% theta : angle autour de y ferroviaire
%
% pkmin= pk min des plot
% pkmax= pk max des plot

%interpolation de paramètres
PK=0:ds:max(pk);

Cy=interp1(pk,Cy,PK); %courbure transversale
dev=interp1(pk,dev,PK); %dévers
pk=PK;

figure(1)

```

```

subplot 311
plot(pk,Cy);
title('Courbure (points qui dépassent la Yppmax) ')
Xlabel('pk(m)')
% hold on

%2) limitation selon critères paramétrés en 0)

%C1 : premier critère : Vmax
VMAX=ones(size(pk))*Vmax;

subplot 312
plot(pk,VMAX)
% hold on

%C2 : accélération latérale limite due à la courbure
Ypp=(VMAX.^2).*Cy+dev*9.81;
% subplot 212
% plot(pk,Ypp,'g')
% hold on
% plot(pk,dev*9.81,'r') %c'est le bon signe, dévers compensé
% plot(pk,(VMAX.^2).*Cy,'m')

%C1 appliqué à Vx : comparaison à valeur max autorisée
YppMAX=ones(size(Ypp))*Yppmax; %vecteur

ind=find(abs(Ypp)>abs(YppMAX));

subplot 311
plot(pk(ind),Cy(ind),'*r')
hold off

%détermination de la bonne vitesse de passage :
Vx=sqrt(YppMAX./abs(Cy)); %Vx autorisée par le tracé transversal, le dévers

%C1 : limitation de vitesse à Vmax
%attention problème 1/0 : courbures presque infinies mais 1e30 avec procédure de création
VOCO
%ind=find(abs(Cy)<1/1e5); Vx(ind)=ones(size(Vx(ind)))*Vmax; %évite points de courbure
nulle
%ne marche pas ? utile ?

%problème V>Vmax
ind=find(Vx>Vmax);
Vx(ind)=ones(size(Vx(ind)))*Vmax; %limite la vitesse partout à <Vmax

%C3 : prise en compte longueur du train, déplacement de la loi vitesse la longueur du train
n=abs(Lmax)/ds;
%initialisation matrice VX
VX=Vmax*ones(n,length(Vx));
for i=1:n

```

```

    VX(i,i:end-n+i-1)=Vx(1:end-n);
end
%mini :
Vx=min(VX);

subplot 312
plot(pk,Vx,'g')
title('Vitesse limite')
%break

if option==2;
    %+++++++ introduction de points limites additionnels
    AAA=axis;
    axis([AAA(1) AAA(2) 0 Vmax+5])
    title('Vitesse limite,introduction de points-creation loi adaptable m/s')
    Xlabel('pk(m)')
    %button=1;
    %while button==1
    [pk1,Vx1,button]=ginput;%choix de n points d'un champ vitesse qui s'approche au réel
    %jusqu'à ce qu'on utilise un autre bouton que le clic souris
    %end

    %trier les points par pk croissants'il y a eu un clic en arrière
    %problème au démarrage :
    % % % apres ginput on a les valeurs de vitesse pour chaque pk
    % pk1 =[
    %     0
    %     0.1
    %     48.2143
    %     163.3065
    %     240.0346
    %     430.0000];

    %on ajoute un point à 10 cm du départ :
    pk1=[pk(1);pk(1)+0.1; pk1 ;pk(end)-0.1;pk(end) ];
    Vx1=[Vx1(1);Vx1(1);Vx1 ;Vx1(end);Vx1(end) ];
    sort(pk1); %trier les points par pk croissants pour s'il y a un clic en arrière
    % Vx1 =[
    %     0
    %     8.6053
    %     8.6053
    %     8.7632
    %     10.5000
    %     0];

    plot(pk,Vx,'g',pk1,Vx1,'g--')
    hold off

    Vx2=interp1(pk1,Vx1,pk); %Interpolation entre points de Ginput

    %plot(pk,Vx,pk1,Vx1,pk,Vx2)

```

```

    Vx=min(Vx2,Vx);
    %+++++++ fin en ginput
end

plot(pk,Vx,'-g')
grid on

%%%%%%%%%%%% fin méthode A), voco asservi

%%%%%%%%%%%% début conditions supplémentaires pour méthode B)

%C4 vitesse départ et fin nulles, ou autre
Vx(1)=Vxun; Vx(end)=Vxend;

%B2) méthode par cheminement et intégration
%puis limitation à chaque pas de temps (ou d'espace) pour respecter les
%différents critères : courbes enveloppe Accx et Vx

sens=1;  %-1 Change le sens du dessin du graphe

%Valeurs initiales
J=zeros(Tmax/dt,1);
A=zeros(size(J));
V=ones(size(J))*Vxun;
X=zeros(size(J));
F=zeros(size(J));
P=zeros(size(J));

i=1;
while i<Tmax/dt      %for i=2:Tmax/dt; %sur Tmax secondes au plus
    i=i+1;
    %limite de jerk
    J(i)=Xpppmax;      %permet d'accélérer mais pas de décélérer
    A(i)=A(i-1)+J(i)*dt;
    V(i)=V(i-1)+1/2*(A(i-1)+A(i))*dt; %Euler : acc moyenne sur le pas de temps
    X(i)=X(i-1)+sens*1/2*(V(i-1)+V(i))*dt; %idem sur V

    %Limitations puissance - accélération
    %Puissance

    F(i)=Mtotale*A(i);
    P(i)=V(i).*F(i);
    %limitation de la puissance
    if P(i)>Pmax
        P(i)=Pmax;
        F(i)=P(i)/V(i);
        A(i)=F(i)/Mtotale;
        V(i)=V(i-1)+1/2*(A(i-1)+A(i))*dt; %Euler : acc moyenne sur le pas de temps
        X(i)=X(i-1)+sens*1/2*(V(i-1)+V(i))*dt; %idem sur V
    end
end

```

```

end
if P(i)<-Pmax
    P(i)=-Pmax;
    F(i)=P(i)/V(i);
    A(i)=F(i)/Mtotale;
    V(i)=V(i-1)+1/2*(A(i-1)+A(i))*dt; %Euler : acc moyenne sur le pas de temps
    X(i)=X(i-1)+sens*1/2*(V(i-1)+V(i))*dt; %idem sur V
end

%limitation de l'accélération
if abs(A(i))>Xppmax %gammamax sur l'accélération
    A(i)=Xppmax*sign(A(i));
end
V(i)=V(i-1)+1/2*(A(i-1)+A(i))*dt;
X(i)=X(i-1)+sens*1/2*(V(i-1)+V(i))*dt;

%recalcul force et puissance
F(i)=Mtotale*A(i);
P(i)=V(i)*F(i);

%definition d'une fonction auxiliaire de calcul, pour approcher
%notre loi dans la zone de vitesse décroissante après le point i
[pkex,Vex,Aex]=extravit(A(i),V(i),X(i),Xppmax,Xppmax,pk,dt,sens);

%zone après le point i et avant le dernier pk
inex=find(pk>=pkex(1)& pk<=pkex(end));
if ~isempty(inex);
    %recalcul de la loi de vitesse extrapolée sur les points de pk
    Vexi=interp1(pkex,Vex,pk(inex));
    Aexi=interp1(pkex,Aex,pk(inex));
    pkexi=interp1(pkex,pkex,pk(inex));

    %Si dépassement du point final :
    if pkex(end)>pk(end)
        %valeurs calculées dans extravit.m
        ind=i+length(Aexi)-1;
        A(ind)=Aexi;
        V(ind)=Vexi;
        X(ind)=pkexi;
        F(ind)=Mtotale.*A(ind);
        P(ind)=V(ind).*F(ind);

        i=Tmax/dt; %fait sortir %boucle for : break
    end

    %Si dépassement de vitesse dans la zone en aval
    if any(Vexi>=Vx(inex)); %si notre loi théorique de variation maxi dépasse notre loi
    vitesse maxi, on reste avec la loi qui define la variation extreme.
        ind=find(Vexi>=Vx(inex)); %trouver les points entre i et le premier dépassement
        ind=ind(1);

```

```

A(i:i+ind-1)=Aexi(1:ind); %départ avec valeur calculée dans extravit.m
V(i:i+ind-1)=Vexi(1:ind);
X(i:i+ind-1)=pkexi(1:ind);
%recalcul force et puissance
F(i:i-1+ind)=Mtotale*A(i:i-1+ind);
P(i:i-1+ind)=V(i:i-1+ind).*F(i:i-1+ind);

%saut vers le point j=i+ind-1 :
j=i+ind-1;
%disp('vitesse limite intermédiaire atteinte, secteur sauté')

if ~isempty(inex);
    if V(j)>Vx(inex(ind))
        V(j)=Vx(inex(ind));
        disp(['V(j)= ',num2str(V(j))])
        A(j)=(V(j)-V(j-1))/dt;
        %verifier l'accélération
        X(j)=X(j-1)+sens*1/2*(V(j-1)+V(j))*dt;
    end
end

    i=j;
end
end

%affichage de l'évolution
subplot 311
plot([pk(1) pk(end) NaN pk(1) pk(end)],...
[-Xppmax -Xppmax NaN Xppmax Xppmax],X,A,'+r')
AAA=axis;
axis([AAA(1) AAA(2) -Xppmax-2.5 Xppmax+2.5])
title('Accélération m/s^2')
%Xlabel('pk(m)')
grid on

subplot 312

if option==1
    plot(pk,VMAX,pk,Vx,'-g',X,V,'+r',pkex,Vex,'m--')
else
    plot(pk,VMAX,pk,Vx,'-g',X,V,'+r',pk1,Vx1,'g--')
end
axis([AAA(1) AAA(2) 0 VMAX(1)+5])
title('Vitesse m/s ')
%Xlabel('pk(m)')
grid on

```

```

subplot 313
plot([pk(1) pk(end) NaN pk(1) pk(end)],...
     [-Pmax -Pmax NaN Pmax Pmax],X,P,'+r')
axis([AAA(1) AAA(2) -Pmax-100 Pmax+100])
title('Puissance W')
xlabel('pk(m)')
grid on

drawnow
end

%troncature sur partie déterminée
ind=find(X==0);
ind=1:ind(2)-1; %V(1)=0, c'est normal
X=X(ind); A=A(ind); V=V(ind);P=P(ind);

%interpolation sur pk régulier :
pk=pk(1:10:end); %échantillonnage pas trop fin
Pi=interp1(X,P,pk,'spline',0);
Vi=interp1(X,V,pk,'spline',0);
Ai=interp1(X,A,pk,'spline',0);

ind=find(Vi<1);

subplot 311
hold on; plot(pk,Ai)
subplot 312
hold on; plot(pk,Vi)
subplot 313
hold on; plot(pk,Pi)

%%%%%%%%%%%%%% sortie finale et dérivation de vitesse, on a change intervalles
de pas de temps, ds... :

nomfic=['LOIV',nomtrac(3:end)];

fid=fopen(nomfic,'wt');
fprintf(fid,'%s\n',num2str(length(Vi))); %en tete nombre de points
for i=1:length(Vi)
    fprintf(fid,'%d %e %e \n',pk(i),Vi(i),Ai(i)); %ensuite matrice
end
fclose(fid);

disp(['fichier ',nomfic,' enregistré dans VOCO / VOCOLIN'])

plot(pk,Vi,'g')
grid on
title(['Vitesse de consigne, fichier ',nomfic])
xlabel('pk'); ylabel('V consigne')

```

Annexe C : Tracé de Clermont-Ferrand



IS 17



IS 19, 20 et 21

Annexe D : Définition des chaussées souples

Selon l'importance du trafic, on définit quatre grands types de chaussées (Guide Technique 94), les chaussées souples pour les trafics faibles à moyens ($\leq T2$), les chaussées bitumineuses épaisses et les chaussées semi-rigides (à assises traitées aux liants hydrauliques) pour les forts trafics ($T2 \leq T_i \leq T0$), et les chaussées rigides, généralement utilisées pour les très forts trafics ($\geq T0$). Les valeurs T_i sont définies en classes de trafic par le nombre de poids lourds journalier moyen (MJA) qui circuleront sur la chaussée pendant la durée de service de l'ouvrage. Tableau.D.

<i>Définition des classes de trafic</i>											
Classe	T5	T4	T3 T3 ⁻ T3 ⁺	T2 T2 ⁻ T2 ⁺	T1 T1 ⁻ T1 ⁺	T0 T0 ⁻ T0 ⁺	TS TS ⁻ TS ⁺	TEX			
MJA	0	25	50 85	150 200	300 500	750 1200	2000 3000	5000			

Tableau .D. Définition des classes de trafic

Un trafic $T2 = 200 \text{ PL/J}$ correspond à un trafic cumulé sur 15 ans de plus de 10^6 PL , ce qui justifie que les critères de fatigue soient essentiels lors du dimensionnement des chaussées. La répétition des charges peut aussi provoquer une accumulation des déformations dans les matériaux constituant la chaussée.

Le corps de chaussée est constitué par la superposition de trois types de couches (Figure.D.1), la couche de surface, la couche d'assise, et la plate-forme support de chaussée, constituée du sol généralement surmonté d'une couche de forme (la couche de surface peut être divisée en une couche de liaison et une couche de roulement, et la couche d'assise en une couche de fondation et une couche de base). La Figure D.1 représente une coupe verticale d'un corps de chaussée.



Figure.D.1: Coupe verticale d'un corps de chaussée

Une structure souple, principalement utilisée pour la réalisation des routes secondaires peu empruntées par les poids lourds (ce qui représente environ 60% du réseau routier français), est constituée d'une couche bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm)

reposant sur une ou plusieurs couches de graves non traitées (entre 20 et 50 cm, compactées par couches de 20 à 30 cm). Les différentes couches sont disposées par ordre croissant de rigidité, du sol vers la surface de la chaussée. Les ordres de grandeur des modules sont de 50 MPa environ pour le sol et de 5000 MPa environ pour l'enrobé.

Le principal mode de dégradation de ces chaussées est l'orniérage. Il résulte de la déformation de la chaussée dans l'axe du passage des roues, qui est due, en plus de la déformation de l'enrobé, soit à la déformation de la couche de GNT (b), soit à celle du sol (c), ou bien à la déformation cumulée des deux (d). La Figure D.2 illustre ces différents cas d'orniérage.

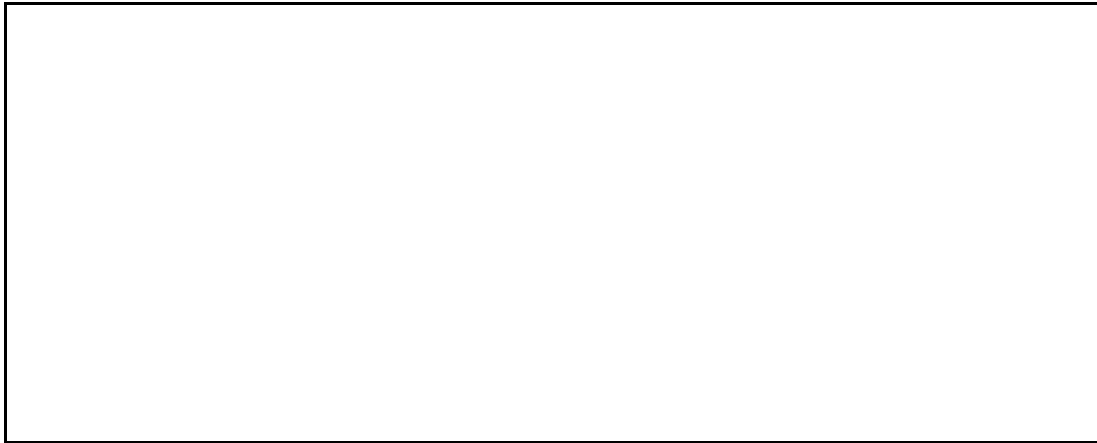


Figure.D.2: Evolution de l'ornière

- (a) chaussée initiale
- (b) L'ornière est due à la déformation du corps de la chaussée, le sol ne se déforme que très faiblement.
- (c) L'ornière est dû à la déformation du sol, le corps de la chaussée ne se déforme que très faiblement.
- (d) L'orniérage est dû à la déformation cumulée du sol et du grave non traité.

En France, la profondeur d'orniérage maximale tolérée sur le réseau national est d'environ 15 mm. Un "bon dimensionnement" doit assurer que cette valeur ne sera pas atteinte durant la vie de l'ouvrage, par exemple 7 ans pour les tramways sur pneus.

- *BBM- Béton bitumineux
- BBME- Béton bitumineux à module élevé
- EME- Enrobé à module élevé
- GNT –Couche de granulats
- BC –Béton de ciment
- PF2 – Plateforme type 2

E.2Vérification de la chaussée avec Alizé

Etude CLERMONT FERRAND - Tramways sur Pneus TRANSLOHR							
Partie Dimensionnement de la solution Bitumineuse en EME2							
Qualité Q1 et Q2							
1- Calcul de l'agressivité propre de la rame moyenne							
			Structure Q1 4BB/7BBME/10+9EME2/25+5GNT/PF2	Structure Q2 9BB/16EME2/30GNT/PF2			
MODULE BB (MPa)=			5400	4320	Définition des couches de la chaussée		
MODULE BBME (MPa)=			9000	7200			
MODULE EME2 (Mpa)=			14000	11200			
MODULE EME2 (Mpa)=			14000	11200			
MODULE GNT SUP(5cm)=			360	360			
MODULE GNT1 INF (25cm)=			150	150			
					Calculs avec Alizé		
Alizé ESJ: EpsilonT=			14,2	80	Déformation produite		
Alizé RS 3.5t Q=6bars EpsilonT=			10,3	53	par l'essieu de référence français		
Poids essieu RS de			7	7	Déformation produite par la roue de référence		

référence=							
kdyn =			1,15	1,15			
Pessieu	nbre	%	Epsilon*kdyn				
6,20	1357200,00	17,1%	10,5	54,0	Déformation produite par chaque essieu		
6,99	2 597 400	32,7%	11,8	60,9	(proportionnalité par rapport au Epsilon de la roue de réf.)		
7,78	2 730 000	34,3%	13,2	67,7	de la roue de réf.		
8,52	982 800	12,4%	14,4	74,2	en cosiderant le coeff.dynamique kdyn		
9,29	280 800	3,5%	15,7	80,9			
total=	7 948 200	100,0%					
	CAM essieux =		0,60	0,38			
2- Calcul du coefficient de canalisation Cac							
Excentrement	Pourcentage de trafic						
-0,75	2,0%	EpsilonT=	4,5	28,4	Calculs avec Alizé		
-0,50	6,0%	EpsilonT=	7,1	45,1			
-0,25	18,0%	EpsilonT=	13,3	72,5	Déformation par différentes positions		
0,00	26,0%	EpsilonT=	14,2	80,0	de l'essieu de jumelage de réf. français.		
0,25	25,0%	EpsilonT=	13,3	72,5			
0,50	15,0%	EpsilonT=	7,1	45,1			
0,75	6,0%	EpsilonT=	4,5	28,4			
1,00	3,0%	EpsilonT=	3,2	18,9			
Déformation équivalente EpsilonTeq=			12,7	70,6			

Cac=			1,73	1,87		
3- Calcul du coefficient de croisement Crt						
Calcul Alizé pour le chargement 1 ou 2 Roues simples 3.5 t Q=6bars					On tient en compte les croisement de trafic en station, ligne droit ou carrefour	
Déformation Alizé RS isolée			10,30	53,00		
Déformation Alizé en croisement avec RS isolée à 93 cm			12,1	63,8	Introduire la valeur de séparation	
Pourcentage des rames en croisement=			10%	10%		
Coefficient d'agressivité Crtt pour 10% de croisement			1,12	1,15	% de croisement de trafic	
4- Synthèse : Agressivité moyenne de l'essieu Tram					Agressivité équivalent	
	CAM essieu global =		1,16	0,82	<i>de chaque essieu pour le modèle de ref</i>	
	Agressivité moyenne rame =		5,80	4,08	<i>d'une rame pour le modèle de ref.</i>	
5- Trafics équivalents NE pour les dimensionnements						
trafic cumulé Tramway de référence (100%) en essieux =			7 948 200	7 948 200		
trafic cumulé PL classe 1 (1000PL/j) 30 ans 3% =			15 713 000	15 713 000	CALCUL ALIZE(VALEURS ADMISIBLES)	
trafic cumulé PL classe 2 (400PL/j) 30 ans 3%			6 285 000	6 285 000		

Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse a =			0,80	0,80			
Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse b =			0,50	0,50	Différents coeff.d'agressivité pour nos PL		
	%Trafic Tram	trafic PL	Q1	Q2			
	100%	0	9 227 182	6 482 760	Passage de référence pour notre trafic cumulé		
	100%	classe 1a	21 797 582	19 053 160	(On multiplie le passage de nos essieux		
	100%	classe 1b	17 083 682	14 339 260	par le CAM par essieu)		
	100%	classe 2a	14 255 182	11 510 760			
	100%	classe 2b	12 369 682	9 625 260			
6- Valeurs admissibles EME2 (μdef) et dimensionnement							
Kcalage=	1						
-1/b=	5						
Epsilon6 (μdef)=	130						
E15°C-10Hz (Mpa)=	11200						
E10°C-10Hz (Mpa)=	13600						
SN=	0,25						
Sh=	0,025						
Delta=	0,3536						
1/Ks=	1,10						
Risque=	2%						
U=	-2,0537						
Kr=	0,7158						
			Qualité Q1 et Q2		EpsiT on peut le		

					faire avec Alize ou Excel	
	%Trafic Tram	trafic PL	EpsiT adm	H EME2 (cm)	valeurs admissibles de deformation	
	100%	0	59,8	9,0	pour chaque tipe de trafic sur notre couche.	
	100%	classe 1a	50,3	9,0	On essai avec differents eppaisseurs	
	100%	classe 1b	52,8	9,0	de notre couche de EME2 et la charge	
	100%	classe 2a	54,8	9,0	jumelage standard jusqu'au ne pas depasser	
	100%	classe 2b	56,4	9,0	les deformations admissibles	

E.3 Vérification avec des autres types de matériaux et épaisseurs de chaussées

E.3.1 Chaussée bitumineuse

Etude CLERMONT FERRAND - Tramways sur Pneus TRANSLOHR							
Partie Dimensionnement de la solution Bitumineuse en EME2							
Qualité Q1 et Q2							
1- Calcul de l'agressivité propre de la rame moyenne							
			Structure Q1 9BB/16EME2/30GNT/PF2	Structure Q2 9BB/16EME2/30GNT/PF2			
MODULE BB (MPa)=			5400	4320	Définition des couches de la chaussée		
MODULE EME2 (Mpa)=			14000	11200			
MODULE GNT SUP(5cm)=			360	360			
MODULE GNT1 INF (25cm)=			150	150			
					Calculs avec Alizé		
Alizé ESJ: EpsilonT=			67,8	80	Déformation produite		
Alizé RS 3.5t Q=6bars EpsilonT=			44,5	53	par l'essieu de référence français		
Poids essieu RS de référence=			7	7	Déformation produite par la roue de référence		

kdyn =			1,15	1,15			
Pessieu	nbre	%	Epsilon*kdyn				
6,20	1357200,00	17,1%	45,3	54,0	Déformation produite par chaque essieu		
6,99	2 597 400	32,7%	51,1	60,9	(proportionnalité par rapport au Epsilon de la roue de réf.)		
7,78	2 730 000	34,3%	56,9	67,7	de la roue de réf.		
8,52	982 800	12,4%	62,3	74,2	en cosiderant le coeff.dynamique kdyn		
9,29	280 800	3,5%	67,9	80,9			
total=	7 948 200	100,0%					
	CAM essieux =		0,36	0,38			
2- Calcul du coefficient de canalisation Cac							
Excentrement	Pourcentage de trafic						
-0,75	2,0%	EpsilonT=	23,7	28,4	Calculs avec Alizé		
-0,50	6,0%	EpsilonT=	39,3	45,1			
-0,25	18,0%	EpsilonT=	61,6	72,5	Déformation par différentes positions		
0,00	26,0%	EpsilonT=	67,8	80,0	de l'essieu de jumelage de réf. français.		
0,25	25,0%	EpsilonT=	61,6	72,5			
0,50	15,0%	EpsilonT=	39,3	45,1			
0,75	6,0%	EpsilonT=	23,7	28,4			
1,00	3,0%	EpsilonT=	17,3	18,9			
Déformation équivalente EpsilonTeq=			59,9	70,6			
Cac=			1,85	1,87			

3- Calcul du coefficient de croisement Crt							
Calcul Alizé pour le chargement 1 ou 2 Roues simples 3.5 t Q=6bars					On tient en compte les croisement de trafic en station, ligne droit ou carrefour		
Déformation Alizé RS isolée		44,50	53,00				
Déformation Alizé en croisement avec RS isolée à 93 cm		54,4	63,8		Introduire la valeur de séparation		
Pourcentage des rames en croisement=		10%	10%				
Coefficient d'agressivité Crtt pour 10% de croisement		1,17	1,15		% de croisement de trafic		
4- Synthèse : Agressivité moyenne de l'essieu Tram					Agressivité équivalent		
	CAM essieu global =	0,78	0,82		de chaque essieu pour le modèle de ref		
	Agressivité moyenne rame =	3,92	4,08		d'une rame pour le modèle de ref.		
5- Trafics équivalents NE pour les dimensionnements							
trafic cumulé Tramway de référence (100%) en essieux =		7 948 200	7 948 200				
trafic cumulé PL classe 1 (1000PL/j) 30 ans 3% =		15 713 000	15 713 000		CALCUL ALIZE(VALEURS ADMISIBLES)		
trafic cumulé PL classe 2 (400PL/j) 30 ans 3% =		6 285 000	6 285 000				
Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse a =		0,80	0,80				

Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse b =			0,50	0,50	Différents coeff.d'agressivité pour nos PL		
	%Trafic Tram	trafic PL	Q1	Q2			
	100%	0	6 236 072	6 482 760	Passage de référence pour notre trafic cumulé		
	100%	classe 1a	18 806 472	19 053 160	(On multiplie le passage de nos essieux		
	100%	classe 1b	14 092 572	14 339 260	par le CAM par essieu)		
	100%	classe 2a	11 264 072	11 510 760			
	100%	classe 2b	9 378 572	9 625 260			
6- Valeurs admissibles EME2 (µdef) et dimensionnement							
Kcalage=	1						
-1/b=	5						
Epsilon6 (µdef)=	130						
E15°C-10Hz (Mpa)=	11200						
E10°C-10Hz (Mpa)=	13600						
SN=	0,25						
Sh=	0,025						
Delta=	0,3536						
1/Ks=	1,10						
Risque=	2%						
U=	-2,0537						
Kr=	0,7158						
			Qualité Q1		EpsiT on peut le faire avec Alize ou Excel		
	%Trafic Tram	trafic PL	EpsiT adm	H EME2 (cm)	valeurs admissibles de		

					deformation	
	100%	0	64,6	17,0	pour chaque tipe de trafic sur notre couche.	
	100%	classe 1a	51,8	21,0	On essai avec differents eppaisseurs	
	100%	classe 1b	54,9	20,0	de notre couche de EME2 et la charge	
	100%	classe 2a	57,4	19,0	jumelage standard jusqu'au ne pas dépasser	
	100%	classe 2b	59,6	19,0	les deformations admissibles	
			Qualité Q2			
	%Trafic Tram	trafic PL	EpsiT adm	H EME2 (cm)	EN APPLICANT UN COEFF 0,9 A EpsiT de Q1	
	100%	0	64,2	20	AVEC ALIZE	
	100%	classe 1a	51,7	25		
	100%	classe 1b	54,7	24		
	100%	classe 2a	57,2	23,0		
	100%	classe 2b	59,3	22,0		

E.3.2 Chaussée en béton

Etude CLERMONT FERRAND - Tramways sur Pneus TRANSLOHR				
Partie Dimensionnement de la solution Béton BC5/BC3			(dalles béton goudonnées)	
Qualité Q1 et Q2				
Béton: -1/b=		16		
1- Calcul de l'agressivité propre de la rame moyenne				
			Structure Q1: 20BC5/18BC3/PF2	Structure Q2: 20BC5/18BC3/PF2
MODULE BC5 (MPa)=			35000	28000
MODULE BC3 (Mpa)=			24000	19200
Alizé ESJ:SigmaT=			1,378	1,329
Alizé RS 3.5t Q=6bars SigmaT=			0,938	0,912
Poids essieu RS de référence=			7	7
kdyn =			1,15	1,15
Pessieu	nbre	%	SigmaT*kdyn	
6,20	1357200,00	17,1%	0,955	0,929
6,99	2 597 400	32,7%	1,077	1,047
7,78	2 730 000	34,3%	1,199	1,166
8,52	982 800	12,4%	1,313	1,276
9,29	280 800	3,5%	1,432	1,392
total=		7 948 200	100,0%	
		CAM essieux =		0,17
2- Calcul du coefficient de canalisation Cac				0,19
Excentrement		Pourcentage de trafic		
-0,75	2,0%	SigmaT	0,567	0,526

-0,50	6,0%	SigmaT	0,829	0,784
-0,25	18,0%	SigmaT	0,801	1,246
0,00	26,0%	SigmaT	1,378	1,329
0,25	25,0%	SigmaT	0,801	1,246
0,50	15,0%	SigmaT	0,829	0,784
0,75	6,0%	SigmaT	0,567	0,526
1,00	3,0%	SigmaT	0,407	0,370
Contrainte équivalente SigmaT _{eq} =			1,267	1,258
Cac=			3,84	2,42
3- Calcul du coefficient de croisement Crt				
Calcul Alizé pour le chargement 1 ou 2 Roues simples 3.5 t Q=6bars				
Contrainte Alizé RS isolée			0,94	0,91
Contrainte Alizé en croisement avec RS isolée à 93 cm			1,2	1,1
Pourcentage des rames en croisement=			10%	10%
Coefficient d'agressivité Crtt pour 10% de croisement			4,33	3,69
4- Synthèse : Agressivité moyenne de l'essieu Tram				
	CAM essieu global =		2,76	1,69
	Agressivité moyenne rame =		13,80	8,43
5- Trafics équivalents NE pour les dimensionnements				
trafic cumulé Tramway de référence (100%) en essieux =			7 948 200	7 948 200
trafic cumulé PL classe 1 (1000PL/j) 30 ans 3% =			15 713 000	15 713 000
trafic cumulé PL classe 2 (400PL/j) 30 ans 3% =			6 285 000	6 285 000
Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse a =			0,80	0,80
Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse b =			0,50	0,50
	%Trafic Tram	trafic PL	Q1	Q2
	100%	0	21 941 688	13 399 785

	100%	classe 1a	34 512 088	25 970 185
	100%	classe 1b	29 798 188	21 256 285
	100%	classe 2a	26 969 688	18 427 785
	100%	classe 2b	25 084 188	16 542 285
6- Valeurs admissibles BC5 (MPa) et dimensionnement				
Kcalage=	1,5			
-1/b=	16			
Sigma6 (MPa)=	2,15			
SN=	1			
Sh=	0,01			
Delta=	1,0500			
1/Ks=	1,00			
Risque=	2%			
U=	-2,0537			
Kr=	0,7332			
coeff 1/Kd=	1,47		Qualité Q1	
	%Trafic Tram	trafic PL	SigmaT adm	H BC5g (cm)
	100%	0	1,326	21,0
	100%	classe 1a	1,289	22,0
	100%	classe 1b	1,301	22,0
	100%	classe 2a	1,309	22,0
	100%	classe 2b	1,315	22,0
			Qualité Q2	
	%Trafic Tram	trafic PL	EpsiT adm	H BC5g (cm)
	100%	0	1,367	20,0
	100%	classe 1a	1,312	21,0
	100%	classe 1b	1,328	21,0
	100%	classe 2a	1,340	20,0
	100%	classe 2b	1,349	20,0

Conclusion

Dans le cadre du stage, j'ai été amené à programmer un algorithme d'asservissement de vitesse et ensuite à l'application de celui-ci sur le logiciel VOCOLIN pour qu'il puisse sortir les valeurs des efforts générés lors du roulement du tramway sur pneus Translohr, on peut considérer les résultats comme satisfaisants puisque les simulations effectuées avec le modèle semblent montrer un comportement cohérent avec la réalité.

Ce stage a été très enrichissant car il m'a permis d'aborder le domaine de la dynamique, en abordant d'autres domaines appliqués à notre étude, comme par exemple les calculs des chaussées avec l'emploi d'Alizé, grâce auquel on a pu vérifier le bon profil de la chaussée et calculer des autres couches possibles comme solutions alternatives.

De par la nature même du stage proposant une collaboration entre l'INRETS et le LCPC, j'ai pu avoir une double approche du sujet basé sur l'expérience respective de ces deux organismes.

Le fait d'avoir effectué mon stage au sein de l'INRETS m'a également permis d'aborder le projet de modélisation du métro sur pneumatiques du point de vue de la recherche. J'ai ainsi été sensibilisé à quelques étapes qui ont marqué le développement du modèle du Translohr sur le logiciel VOCOLIN dont on continuera à faire des améliorations pour les différents cas particuliers qui pourraient se présenter.

Ce stage m'a également permis de mettre en pratique mes connaissances dans le domaine de la dynamique et des routes et d'approfondir mes connaissances en programmation.

Grâce à ce stage, j'ai pu aborder le projet d'un tramway sur pneumatiques, nouveau dans son domaine. Il m'a permis de faire le lien entre les dernières avancées faites par l'INRETS en matière de dynamique ferroviaire avec un matériel actuellement en service ainsi que la mise en contact avec le LCPC et M. J-M. Balay, expert dans le domaine des chaussées. J'ai ainsi pu avoir accès à une quantité importante de connaissances et de savoir-faire à l'INRETS autant qu'au LCPC.

Pour conclure, je dirai que j'ai trouvé ce stage particulièrement intéressant et bénéfique de par les connaissances pratiques et théoriques que j'ai pu acquérir.

Références

Bibliographie

Chollet H. Projet PREDIT DEVIN – phase 2

« Modélisation dynamique et simulations de la rame TRANSLOHR STE4 ». INRETS (2007)

Kim H. « Enjeux de la mobilité urbaine à Séoul à l'horizon 2010 et 2015 : Risques et Opportunités pour les services de mobilité ». Master ParisTech Fondation Renault en Transport et développement durable. Mission professionnelle de fin d'études. INRETS (2005)

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). « Notice d'utilisation ALIZE ». (Février 2005).

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). « Conception et dimensionnement des structures de chaussée ». (Décembre 1994)

Lépée P. « Modélisation du métro sur pneumatiques ». Rapport de stage de fin d'études. INRETS-RATP. (2003).

Lohr Industries. « Spécifications techniques du Translohr ». (2003-2004)

Nouira H. « Dimensionnement des chaussées en tenant en compte des efforts tangentiels ». Rapport de stage de fin d'études. INRETS-LMT. (2004)

Sites Internet

Site de l'INRETS : Laboratoire des Technologies Nouvelles :
<http://www.inrets.fr/ur/ltn/index.html>

Site du LCPC :
<http://www.lcpc.fr/fr/home.dml>

Site de Lohr Industrie :
<http://www.lohr.fr/transport-public.htm>

Site de Michelin:
<http://www.michelin.fr/>

Site de Rail 21 regroupant diverses informations sur le ferroviaire :
<http://perso.wanadoo.fr/florent.brisou/>

Site non-officiel des Transports en Commun de l'Agglomération Clermontoise :
<http://transclermont.itrams.net/letram.html>

Site officiel des Transports en Commun de l'Agglomération Clermontoise :
<http://www.letram-clermontferrand.com/index.php>