

# La sollicitation au cisaillement des rails par des forces de cisaillement verticales

par le Dr. Ing. Karl Otto EDEL - Zentrales Forschungsinstitut des Verkehrsweisen, Zentrum für Material und Energieökonomie, Brandenburg-Kirchmöser (DDR)

2781

## RESUME

*Sur la base des relations traditionnelles, appliquées dans le domaine de la théorie des résistances, l'on a calculé les valeurs maximales et l'allure des efforts de cisaillement dans l'âme et dans la semelle du patin de 20 types de rails différents. L'étude fait apparaître des différences en partie importantes dans les valeurs des efforts de cisaillement maxima et ce sur des rails présentant une coupe transversale de surface identique. Les efforts de cisaillement maxima se situent entre 320 et 420% de l'effort de cisaillement moyen.*

## 1. Réflexions générales sur la sollicitation des rails

Les rails sont des constructions porteuses dont la hauteur comparée à la longueur est très réduite. Compte tenu des expériences acquises dans le domaine de la mécanique technique, il apparaît que la résistance aux contraintes et la stabilité du rail doivent être définies au travers des tensions normales résultant de la sollicitation à la flexion. Dans les cas où l'on compare différents types de rails quant à leur résistance aux contraintes, l'on compare en général la grandeur de la surface de leur coupe transversale, les couples de résistance au niveau du patin et du champignon et, le cas échéant, les rapports de ces couples de résistance. Les sollicitations au cisaillement des rails sont rarement prises en compte de manière que, dans les processus de dimensionnement standard des rails en général, ces données sont pratiquement ignorées.



L'absence quasi-générale de ces indications relatives à la sollicitation au cisaillement a conduit Schramm [1] à préciser, dans le cadre de la définition des profils des rails: "L'âme doit présenter une épaisseur suffisante pour répondre aux exigences de la portance, de la résistance à la flexion et aux attaques de la rouille" - "Le patin du rail doit présenter une épaisseur suffisante pour garantir une rigidité suffisante et pour résister aux attaques de la rouille".

La portance de l'âme du rail citée par Schramm prend toute son importance à partir du moment où cette âme se trouve affaiblie sous l'effet d'un phénomène quelconque. Parmi ces phénomènes susceptibles de réduire la portance, l'on peut citer:

- la réduction de l'épaisseur de l'axe par la rouille,
- les concentrations de tensions provoquées soit par la perforation de l'âme [2], soit encore par des avaries mécaniques ou thermiques,
- les augmentations de tensions provoquées par des défauts en forme de fissures (défauts d'adhérence transversaux dans les soudures - fissures horizontales dans le sens longitudinal [3] des amorces de fissures à évolution oblique [4] des amorces de fissures à la hauteur des perforations [5]).

Parmi les phénomènes réduisant la portance du patin, l'on peut citer:

- la réduction de l'épaisseur du patin par la rouille,
- les concentrations de tensions provoquées soit par la réduction de la largeur du patin à la hauteur des lames des appareils de voie, soit par des évidements pratiqués sur la face inférieure du patin pour la mise en place des éléments anticheminants, soit encore par des avaries,
- les augmentations de tensions provoquées par des défauts en forme de fissures (défauts d'adhérence dans le sens transversal, ou fissures de fatigue, fissures verticales évoluant dans le sens longitudinal).

Pour un certain nombre de ces contraintes, les répercussions des efforts de cisaillement, rapportées aux contraintes normales, ne peuvent plus être négligées. Pour expliquer p.ex. la défaillance des rails accusant des fissures longitudinales dans l'âme ou dans le patin, il y a lieu essentiellement d'analyser l'effet des efforts de cisaillement.

## 2. La répartition des efforts de cisaillement dans le rail

### 2.1 Le calcul des efforts de cisaillement générés par les efforts transversaux

Les efforts de cisaillement résultant des efforts transversaux dans les porteurs à parois relativement peu épaisses peuvent être déterminées au travers de l'équation:

$$\tau = \frac{F_Q(x) \cdot S_y}{I_y \cdot t}$$

dans laquelle

- $F_Q(x)$  = la force de cisaillement verticale, fonction de l'axe des  $x$
- $I_y$  = moment d'inertie principal de la surface de la coupe transversale autour de l'axe horizontal du centre de gravité
- $S_y$  = le moment statique de la fraction de la coupe transversale au-dessous ou au-dessus de la surface de cisaillement, sur laquelle l'effort de cisaillement devra être calculé par rapport à l'axe horizontal du centre de gravité de la coupe transversale,
- $t$  = l'épaisseur de l'élément porteur, c'est-à-dire du rail à la hauteur de l'endroit où l'effort de cisaillement devra être calculé.

L'application de l'équation (1) est liée aux conditions suivantes:

- L'effort de cisaillement agit en direction de l'un des axes d'inertie principaux de la coupe transversale du rail (élément porteur).
- L'épaisseur de la paroi de l'élément porteur est relativement faible ce qui fait que la répartition des efforts de cisaillement sur l'épaisseur de la paroi peut être considérée comme constante.
- L'épaisseur de la paroi de l'élément porteur ne varie que très légèrement, ce qui permet de considérer que les faces extérieures des parois sont parallèles entre elles.
- Les efforts de cisaillement agissent parallèlement à la médiane et à fortiori parallèlement à la face extérieure.

Si l'on néglige les dissymétries provoquées par les phénomènes d'usure, qui apparaissent sur le champignon du rail, l'on peut appliquer l'équation (1) tant à l'âme qu'à la zone extérieure de la semelle du patin. Par contre, l'équation (1) ne fournit aucun résultat probant, ni pour ce qui concerne le champignon, ni pour ce qui concerne le congé de raccordement âme-patin.

### 2.2 Calcul numérique des sollicitations au cisaillement

Etant donné que:

- la force transversale peut être calculée selon la méthode de la technique mécanique (voir [6]),
- le moment d'inertie géométrique  $I_y$  est une valeur constante,
- la largeur de la coupe transversale à la hauteur de la surface de cisaillement peut être déterminée sans difficulté,

Il apparaît que le travail essentiel en vue de la détermination de la répartition de l'effort de cisaillement se situe dans la détermination mathématique du moment statique de la fraction de la surface sectionnée.

Par le fait que la complexité du pourtour du rail s'oppose à un calcul direct du moment statique des surfaces partielles, l'on reproduit la totalité de la coupe transversale sur un dessin à l'échelle, que l'on décompose en un nombre quelconque de surfaces

trapézoïdales. Pour chacune des coupes entre les différents éléments, l'on détermine les coordonnées des coupes exprimées par  $z_i$  et  $y_i$ , ainsi que la longueur des arêtes parallèles de l'élément trapézoïdal exprimée par  $b_i$  et  $t_i$ . Les paramètres de la coupe transversale de la surface A du moment statique S et du moment d'inertie géométrique I peuvent être obtenus par l'addition des valeurs correspondantes des éléments des surfaces jusqu'à la hauteur d'une coupe donnée, ainsi que pour la totalité du profil du rail [7].

Le calcul des efforts de cisaillement dans l'âme du rail s'effectue au travers des équations suivantes:

$$A = \sum \frac{1}{2} \cdot (z_{oi} - z_{ui})(b_{oi} + b_{ui}) \quad (2)$$

$$S_o = \sum \frac{1}{2} \cdot (z_{oi} - z_{ui})(b_{oi} + b_{ui}) \quad (3)$$

$$\left( z_{ui} + \frac{z_{oi} - z_{ui}}{3} \cdot \frac{b_{ui} + 2b_{oi}}{b_{ui} + b_{oi}} \right)$$

$$I_o = \sum \left[ \frac{(z_{oi} - z_{ui})^3}{36} \cdot \left( b_{ui} + b_{oi} + \frac{2 \cdot b_{ui} \cdot b_{oi}}{b_{ui} + b_{oi}} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (z_{oi} - z_{ui})(b_{oi} + b_{ui}) \cdot \left( z_{ui} + \frac{z_{oi} - z_{ui}}{3} \cdot \frac{b_{ui} + 2b_{oi}}{b_{ui} + b_{oi}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

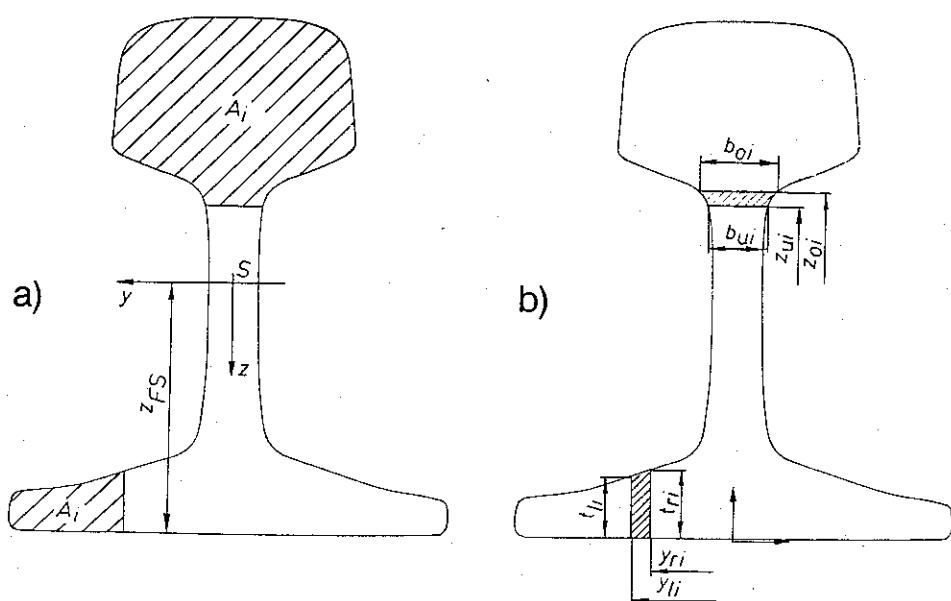


Fig. 1 : La subdivision de la surface de la coupe transversale des rails :  
a) en vue de la définition des surfaces partielles de la coupe transversale,  
b) en vue de la détermination des éléments de la surface.

Pour le calcul des paramètres de la coupe transversale, l'on peut partir d'un axe de référence O. Si cet axe est identique à la face inférieure du patin du rail, l'on obtient les valeurs rapportées à l'axe horizontal du centre de gravité, c'est-à-dire:

$$z_{FS} = S_{Oges.}/A \quad (5)$$

$$I_y = I_0 - A \cdot z_{FS}^2 \quad (6)$$

$$S_y = S_{Og.} - A_i \cdot z_{FS} \quad (7)$$

L'équation

$$\bar{\tau} = F_0/A \quad (8)$$

qui détermine l'effort de cisaillement moyen dans la coupe transversale conduit à la fonction de dispersion des efforts de cisaillement dans la coupe transversale du rail et notamment dans l'âme, c'est-à-dire

$$\frac{\tau_{xz}}{\bar{\tau}} = \frac{S_{Og.} - A_i \cdot z_{FS}}{b_i} \cdot \frac{A}{I_y} \quad (9)$$

Le calcul des efforts de cisaillement dans la semelle du patin s'effectue au travers des équations:

$$A_i = \sum \frac{t_{ii} + t_{ii}}{2} \cdot (y_{ii} - y_{ii}) \quad (10)$$

et

$$S_{Og.} = \sum \left[ \frac{t_{ii} \cdot (y_{ii} - y_{ii})}{2} + \frac{1}{2} \cdot (t_{ii} - t_{ii}) \cdot (y_{ii} - y_{ii}) \right. \\ \left. \left( t_{ii} + \frac{t_{ii} - t_{ii}}{3} \right) \right] \quad (11)$$

Les valeurs des équations (10) et (11) conduisent au calcul du moment statique de la surface A autour de l'axe de gravitation du rail, soit

$$S_y = -S_{Og.} + A_i \cdot z_{FS} \quad (12)$$

L'équation finale pour le calcul de la dispersion de l'effort de cisaillement dans la semelle du patin s'établit comme suit:

$$\frac{\tau_{xy}}{\bar{\tau}} = \frac{A_i \cdot z_{FS} - S_{Og.} \cdot A}{t_i} \quad (13)$$

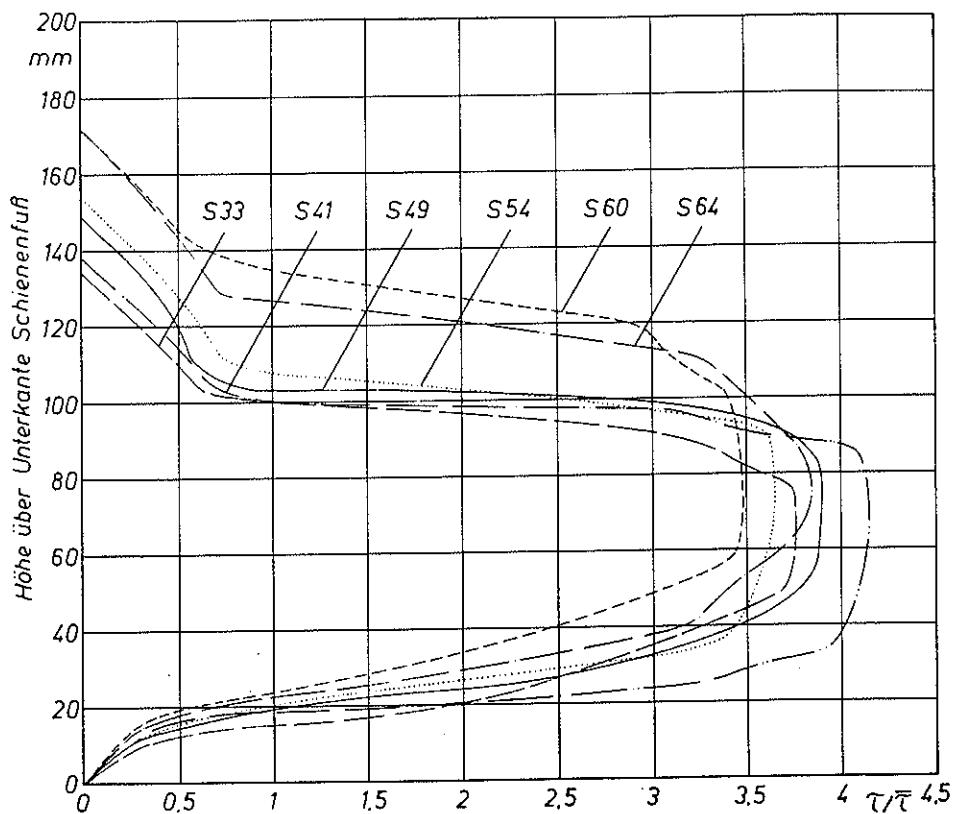


Fig. 2 : Les efforts de cisaillement  $\tau/\bar{\tau}$  dans l'âme des rails S33 à S64.

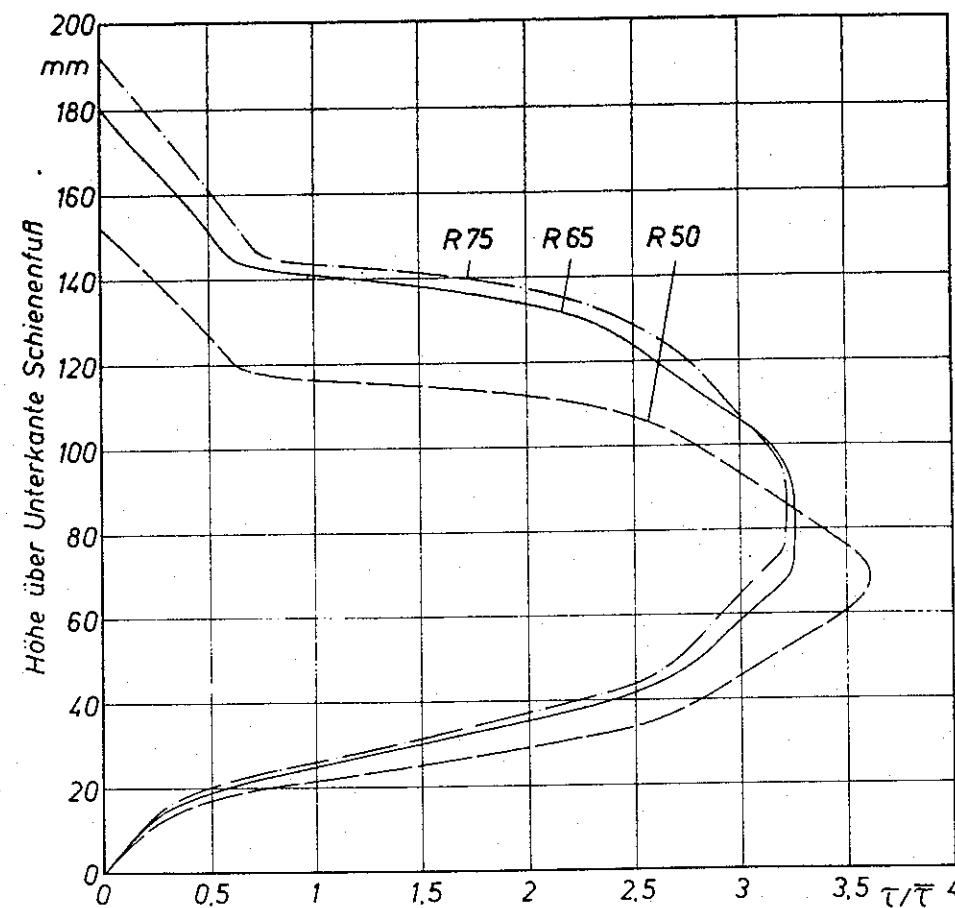


Fig. 3 : Les efforts de cisaillement  $\tau/\bar{\tau}$  dans l'âme des rails, R50, R65 et R75.

### 3. Exemples de calcul des efforts de cisaillement de différents types de rails en fonction de la force transversale.

A l'heure actuelle, la Deutsche Reichsbahn utilise les rails des types S49 et R65. Par contre, d'autres réseaux utilisent un certain nombre de types de rails différents de ceux-ci, qui n'ont d'ailleurs qu'un intérêt limité pour la DR. Or, pour pouvoir reporter sur les conditions de la DR les résultats ou les conclusions obtenues, soit par l'expérimentation d'autres types de rails, soit par un procédé mathématique appliqué à ces rails, il y a lieu de connaître le dimensionnement des rails utilisés par ces autres réseaux. A cet effet, les types de rails énumérés ci-après seront analysés en vue de connaître les valeurs maximales des efforts de cisaillement dans la plage de l'âme.

S33 [8], S41 [1], S49 [9], S54 [1], S60 [1], S64 [1];  
 R50 [10], R65 [10], [11], R75 [10], [12];  
 UIC54 [13], UIC60 [13], ORE71 [14];  
 132RE [12], 140RE [12];  
 JRS40N [15], JRS50PS [16],  
 JRS50N [15], JRS60 [15];  
 NP46 [17];  
 U36 [17].

Les résultats des calculs ont été récapitulés dans les figures 2 à 7 et dans le tableau 1. Les valeurs calculées des surfaces des coupes transversales, de la position des centres de gravité et des moments d'inertie géométrique ont été rapportées dans toute la mesure du possible aux valeurs standards. Les différences par rapport aux valeurs contrôlées se situent dans un ordre de grandeur d'environ 2%. Ainsi, pour les besoins d'ordre pratique, les valeurs maximales calculées de la dispersion des efforts de cisaillement dans l'âme et dans le patin du rail peuvent être considérés comme suffisamment précis.

### 4. Conclusion

Les efforts de cisaillement, généralement ignorés lors du calcul de la solidité et de la résistance des rails, présentent des valeurs maximales, tant dans la zone centrale de l'âme à la hauteur de la fibre neutre, c'est-à-dire à la hauteur des perforations que dans

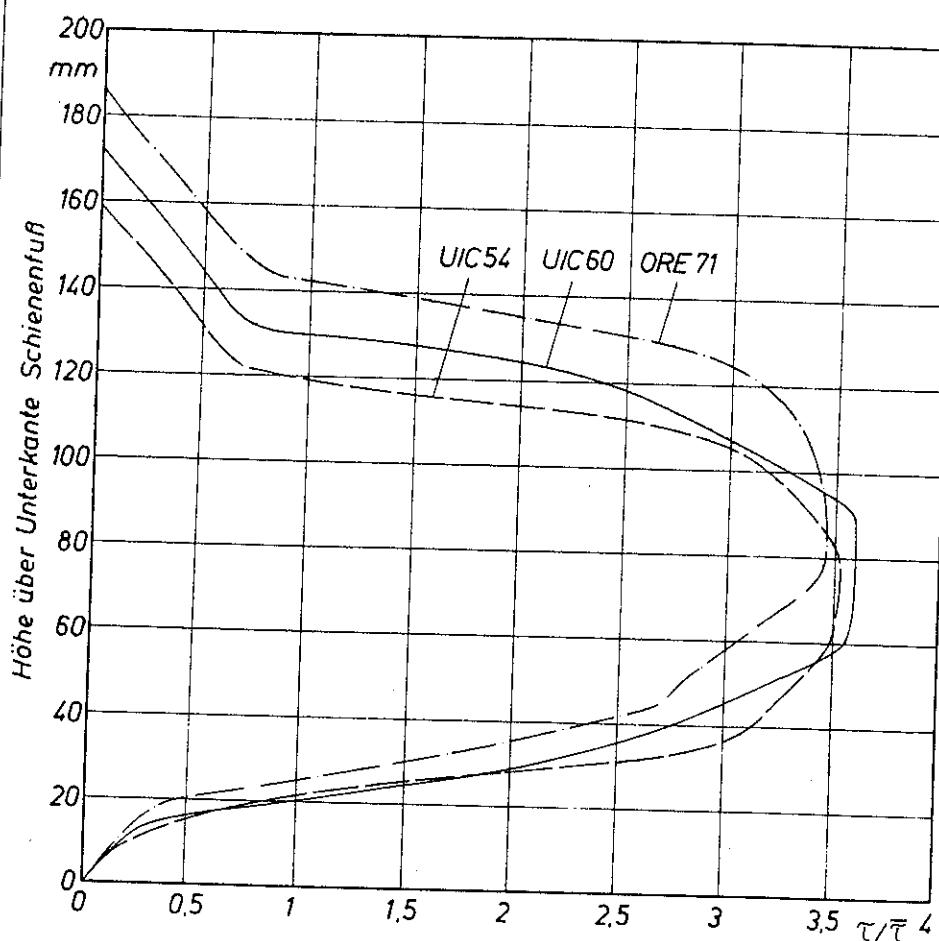


Fig. 4 : Les efforts de cisaillement  $\tau/\bar{\tau}$  dans l'âme des rails UIC 54, UIC 60 et ORE 71.

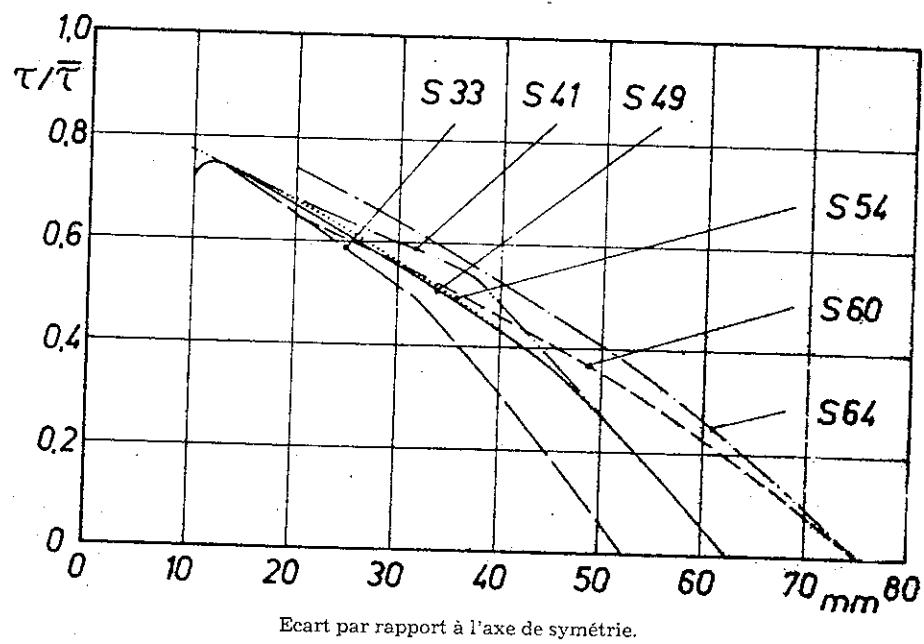


Fig. 5 : Les efforts de cisaillement dans le semelle du patin des rails S33 à S64.

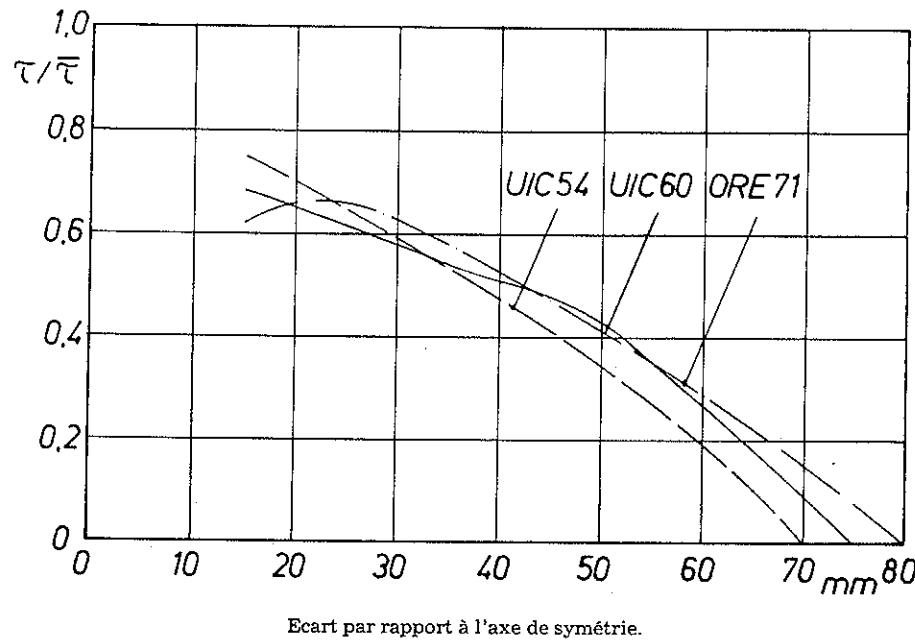


Fig. 7 : Les efforts de cisaillement dans la semelle du patin des rails UIC 54, UIC 60 et ORE 71.

## Bibliographie

- [1] Schramm G.: Oberbautechnik und Oberbauwirtschaft. Otto Elsner Verlag - Darmstadt - 3<sup>e</sup> édition 1973.
- [2] Edel K.-O.: Der Spannungszustand an Stegbohrungen in Eisenbahnschienen bei ebener Beanspruchung des Steges. DET - Die Eisenbahntechnik Berlin 31 (1983) 5 - pages 195-200.
- [3] Edel K.-O., Korn, M.: Ursachen und Bewertung horizontaler Steglängsrisse in Eisenbahnschienen. DET - Die Eisenbahntechnik 30 (1982) 6, pages 240 - 245.
- [4] Edel K.-O.: Die kritische Grösse schräger Stegdurchrisse in Eisenbahnschienen lückenloser Gleise. DET - Die Eisenbahntechnik Berlin 30 (1982) 11 - pages 569 - 572.
- [5] Edel K.-O.: Bruchmechanische Bewertung von Anrisse an Stegbohrungen in Eisenbahnschienen lückenloser Gleise. DET - Die Eisenbahntechnik - Berlin 31 (1983) 6, S 254-259.
- [6] Führer G.: Oberbauberechnung. Berlin - Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen - 1979.
- [7] Edel K.-O.: Berechnung von Flächenträgheitsmomenten mit dem Taschenrechner. ZIS-Mitteilungen - Halle/Saale 21 (1979) 10 - pages 1167 - 1172.
- [8] Normes techniques RDA TGL 27655 "Rails": DDR-Standard TGL 27 655: Schienen. Abmessungen für die Typen S10, S18, S33 und R24. Edition Janvier 1973.
- [9] Normes techniques RDA RGL 24 965 "Rail S49": DDR-Standard TGL 24 965: Schiene S49. Abmessungen. Edition Janvier 1971.
- [10] Zolotarsky A. F., Rauzin, Ya. R.: Erhöhung der Festigkeit und Gebrauchssicherheit der Schienen bei den Eisenbahnen der UdSSR. Schienen der Welt - Bruxelles 3 (1972) 3 pages 216 à 223.
- [11] Normes techniques RDA TGL 24966 "Rail R65": DDR Standard TGL 24 966: Schiene R65. Abmessungen. Edition Janvier 1971.
- [12] Herbst W.: Sind Breitfusschienen auch für die Eisenbahn der Zukunft optimal? Der Eisenbahningenieur - Darmstadt - 30 (1979) - 9 - pages 383 - 394.
- [13] Zimmermann K.: Schienenbrücke, ihre Ursachen und ihre Verhütung. Deutsche Eisenbahntechnik - Berlin 4 (1956) 6, pages 225 à 232 - 8, pages 324 à 328 - 12, pages 463 à 476.
- [14] ORE Question D 141: Überarbeitung der Technischen Lieferbedingungen für Schienen. RP 1: Vorläufige Toleranzen für die Schiene ORE 71 - Messprogramm. Utrecht 1976.
- [15] Kurihara R.: Present state and future of railway rails. Quarterly reports of the Railway Technical Research Institute. Tokyo 20 (1979) 3 pages 97 à 105.
- [16] Satoh, Y., Sato Y.: On the life of rail. Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute - Tokyo 7 (1966) 1 pages 28 à 31.
- [17] ORE Question D 117: ORE D 117: Optimale Anpassung des klassischen Oberbaus an den künftigen Verkehr. RP 3: Das Verhalten der Schienen in Abhängigkeit von den Verkehrsbedingungen. Utrecht-Avril 1973.
- [18] Eisenmann J.: Die Schiene als Träger und Fahrbahn - theoretische Grundlagen und praktische Beispiele. Publ. F. Fastenrath: Die Eisenbahnschiene - Berlin, München, Düsseldorf - Verlag W. Ernst und Sohn 1977 pages 9 à 78.

From gerard Thu Aug 26 17:41:01 1993  
Date: Thu, 26 Aug 93 17:40:59 +0200  
From: gerard (Gerard\_tual\_2)  
To: dutram  
Subject: lurdes  
Content-Length: 27396

2780

## APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES AU METRO LEGER

### RESUME

Cet article s'agit de faire connaitre l'applicabilite de la technique statistique appelee "Plan d'expériences" aux transports urbains, dans ce cas concret au systeme Metro Leger.

Le metro leger est un systeme de transport ferroviaire a traction electrique, qui doit etre construit en fonction des donnees d'urbanisme, des objectifs du developpement urbain ainsi que du contexte economique et ecologique (U.I.T.P....).

L'exploitation du metro leger qui roule dans des conditions de trafic mixte, se deteriore rapidement, etant donne qu'il augment la congestion de la circulation avec les autres vehicules. Ainsi, les efforts en vue d'ameliorer la circulation du metro leger se concentrent sur le developpement de nouveaux materiels roulants, la separation de la circulation generale et l'extension renforcee de l'infrastructure.

Nous pensons que cette technologie n'est pas exploree a fond dans la pratique. En effet elle devrait pouvoir transporter des quantites superieures de voyageurs a celles qu'elle transporte aujourd'hui. Il y a un grand nombre d'auteurs qui decrivent la performance theorique de ce systeme avec une capacite de 30000 voy/h/sens. Par contre, dans la pratique on ne trouve pas aucun systeme qui soit exploite avec une demande superieure a 16000 voy/h/sens.

En appliquant la methode des Plans d'expériences, on cherche a savoir quels sont les facteurs plus importants sur la vitesse commerciale, permettant de decrir un troncon de metro leger de facon a ce qu'il ait les meilleures caracteristiques d'exploitation

Tout d'abord il faut savoir quels sont les facteurs a etudier et les respectives valeurs des niveaux attribuees a chaque facteur pour resoudre le probleme.

Au but de cet etude on n'a pas eu de surprises avec les resultats obtenus, car ils sont ceux qu'on attendait, d'apres l'experience dans le domaine des transports. Donc, ces resultats sont la confirmation theorique de la pratique.

### 1. INTRODUCTION

#### 1.1 Le Metro Leger

Le Metro Leger ou Tramway moderne qui circulant en site separee constitue aujourd'hui un important systeme de transport ferroviaire dans le sec XX. L'evolution des dernieres annees en ce qui concerne le materiel roulant, l'infrastructure et les methodes d'exploitation explique un grand morceau de cette importance.

Le metro leger, etant donne qu'il est un systeme de capacite moyenne, se trouve confronte directement avec le systeme d'autobus circulant en site separee, soit conventionnels (circulant en convois ordonnes ou pas, soit pour systemes guides (O-BAHN, GLT) dans les pays en developpement.

Dans des pays developpes, la confrontation ne se realise pas seulement avec les systemes d'autobus, mais aussi avec des systemes plus modernes, tels comme le systeme de metro automatique (VAL).

L'importance de ce systeme a ete renforcee avec la creation d'une commission special U.I.T.P. depuis 1979 qui vient publant divers articles sur ce domaine.

Il y a divers travaux qui decrivent, d'une facon generale, le systeme Metro Leger, non seulement dans l'aspect operationnel mais aussi sur les questions financieres, d'infrastructure et de vehicules, voir etudes... D'autres etudes, comme par exemple, de Mr. HUGONNARD (1992), Lindau (1992), font la comparaison entre le metro leger et autres systemes de transport.

#### 1.2 Objectif

Aujourd'hui la plupart des publications disent que le metro leger est capable de transporter une grande demande (30000 voy/h/sens) avec une

vitesse commerciale elevee, vers les 30 Km/h. Par contre, dans la pratique, il y a des informations que les volumes ne depassent pas les 15000 voy/h/sens, transportes a une vitesse egale a 15 Km/h. Et pour les systemes avec des vitesses elevees (25 Km/h), dans les heures de pointe, les volumes ne depassent pas les 7500 voy/h/sens (Lindau, 1992).

L'objectif de ce projet est d'utiliser un modele de simulation (BUSWAY, Lindau1983, Lindau 1989) pour analyser la potentialite du systeme de metro leger, etant donnee qu'il n'y a pas dans le monde une ligne dans la superficie des avenues urbaines qui soit exploitee avec des flux eleves.

### 1.3 Les objets utilises

#### A) Le modele de simulation BUSWAY.

Le but de cette methode de simulation est d'engendrer individuellement des vehicules en leur attribuant les caracteristiques de distribution de trafic.

La methode de simulation a aussi besoin d'informations concernant l'agencement physique du troncon correspondant a la simulation.

BUSWAY a ete developpe, precedemment pour simuler les couloirs d'autobus avec un grand flux, sur sites proteges, dans les conditions bresiliennes. Aujourd'hui, il est modifie pour pouvoir aussi simuler une ligne de metro leger. Pour la simulation, une ligne de metro leger se caracterise par la presence uniquement d'un point d'entree et d'un point de sortie des vehicules.

Cette simulation est realisee pendant un periode de temps, en general d'une heure, pendant lequel a chaque seconde le modele reevalue toutes les caracteristiques cinematiques des vehicules. Ainsi, pour chaque vehicule qui entre dans le systeme ( a partir de flux preetablis ) le modele determine, a partir de fonctions probabilistiques, leurs caracteristiques de degagement (comme vitesse d'insertion, vitesse maximum desiree, acceleration, desacceleration) et les procedures basees sur le comportement du vehicule qui suit sont utilisees pour reevaluer la position de chaque vehicule a chaque seconde. BUSWAY peut donc evaluer, par exemple, pour chaque vehicule, toutes les modifications du controle des feux, toutes les influences provenant d'un autre vehicule, representant des trajectoires sensibles a ces modifications.

On peut dire que le modele presente trois fonctions de base pour la simulation qui se rapportent a la modelisation de l'arret du vehicule dans les stations, au passage des vehicules aux feux et a la determination des differentes vitesses auxquelles les vehicules roulent dans le deroulement de la simulation. Ce temps est calcule en fonction d'une distribution de volume de voyageurs dans chaque vehicule, du temps moyen de montee et de descente d'un voyageur et en fonction du temps mort en station.

Tous les calculs prennent en compte, au dela des caracteristiques cinematiques de chaque vehicule, la position de celui-ci par rapport a la station la plus proche, au premier feu ou le vehicule doit s'arreter (feu rouge) et la position du vehicule qui est devant lui.

Une des principales caracteristiques du BUSWAY est de permettre l'evaluation des effets de l'adoption de diverses configurations. Celles-ci sont rapportees tant dans les conditions geometriques de la voie (par exemple, etudier la distance entre feux ou entre stations), que dans les conditions de controle de feux (priorite au metro leger dans les intersections), dans les conditions de montee/descente (par exemple, l'influence de la difference de niveau entre le vehicule et la station), comme aussi dans les conditions de trafic.

#### Resultats de la Simulation

- Moyenne de la vitesse commerciale.
- Ecart type de la vitesse commerciale.
- Flux total de vehicules.

En ce qui concerne les donnees de sortie, le modele permet diverses options de details des resultats, depuis la creation de fichiers pouvant etre utilises pour les sorties graphiques, jusqu'a suivre un vehicule pendant tout le temps de simulation.

#### B) La technique statistique "Plans d'experience"

Un plan d'expériences compte une serie d'expériences structuree de maniere a traduire les objectifs (a court terme) d'une strategie experimentale prealablement definie. Son efficacite, en termes d'information, est superieure a celle de toute autre sequence experimentale non structuree de meme taille.

Les plans d'experience sont la base d'une methodologie destinee a optimiser

la conduite et l'interpretation de l'experimentation. En effet, les decisions importantes prises a partir des resultats experimentaux, le cout croissant des experiences interdit de laisser a la seule intuition la recherche de la solution d'un probleme quelconque.

Cette methodologie permet notamment de repondre clairement et au moindre cout aux questions que se pose l'expérimentateur, a savoir :

-- Quels sont les facteurs influents ?

-- Comment determiner une solution repandant aux objectifs vises ?

La mise en oeuvre de cette methodologie conduit notamment a des informations fiables, synthetiques et previsionnelles. Elle repond au souci de minimiser et de quantifier la part prise par le hasard, tout en reduisant le travail experimental.

Basee sur l'utilisation rigoureuse de techniques scientifiques, la methodologie se caracterise par une phase determinante d'analyse du probleme. Elle donne ainsi la priorite au travail de conception, dans lequel s'exprime l'intuition ou la creativite de l'expérimentateur.

Tres souvent, une meme experience fait intervenir simultanement deux ou plusieurs facteurs, qualitatifs ou quantitatifs. Pour chacun d'eux, la determination du nombre de niveaux et le choix des differents niveaux vient obligatoire. Mais en ce qui concerne la maniere dont les differents facteurs sont associes l'un a l'autre, une distinction doit etre faite entre les experiences factorielles et les experiences non factorielles. L'enonce de la liste des facteurs consiste a decrir l'ensemble des causes a priori possibles des variations du phenomene etudie. Les reponses concernent les manifestations de ce phenomene.

La matrice d'expériences est la traduction formalisee du plan d'expériences. Elle se represente par un tableau dont chaque ligne est un traitement et chaque colonne une variable explicative.

Elle fournit a l'expérimentateur la structure des donnees necessaires a la realisation de l'expérimentation.

## 2. DESCRIPTION DU METRO LEGER

### 2.1 Definition

Ce couloir est un troncon de 7 Km de longueur, construit pour le Metro Leger circulant en site propre, qui doit avoir les caracteristiques geometriques et d'exploitation les plus proches de la realite, mais ou on peut obtenir les meilleurs resultats, en ce qui concerne l'efficacite du systeme.

Ce couloir doit faire la liaison d'un centre-ville a une banlieue, ensuite la simulation sera effectuee pendant une heure de pointe, dans le sens le plus charge. Ce cas est le plus interessant a etudier, parce qu'on connaît ainsi les possibilites du systeme dans les cas extremes.

### 2.2 Les Parametres fixes

Pour commencer, il faut decider quelles sont les valeurs des divers facteurs qui influencent dans l'exploitation d'un systeme de transport comme celui-ci, de facon a ce qu'on ne soit pas tres loin des valeurs possibles dans la realite, puisque dans le cas contraire cette etude n'aurait aucun sens.

Apres une recherche de donnees de toutes les caracteristiques geometriques et d'exploitation de lignes, pour ce systeme de transport, deja en exploitation dans le monde, on a reussi a trouver les valeurs de parametres suffisantes pour la realisation de l'etude envisage.

Les parametres fixes dans le modele de simulation pour effectuer la simulation sont :

-- La prise en compte des vehicules aux feux.

-- Les caracteristiques des vehicules : Acceleration, desacceleration, ...

### 2.3. Description des facteurs

En utilisant l'expérimentation pour la mise en oeuvre (simulation) du couloir, on a les facteurs necessaires suivants pour caracteriser un troncon de metro leger et a partir desquels on souhaite connaitre les effets respectifs sur la VECO. Les facteurs concernes sont les suivants:

F1 - Vitesse moyenne desiree ("Vde");

F2 - Le temps mort dans les stations ("Tmor");

F3 - Le temps moyen de montee par voyageur ("Tmon");

F4 - La demande maximum de passagers par heure ("Dem");

F5 - Le flux de vehicules a l'heure ("Flux");

F6 - Distance moyenne entre stations ("Dst");

F7 - Distance moyenne entre feux ("Dfeu");

F8 - La longueur du vehicule ("Lgv").

Pour chaque facteur F1, ... F7, on definit 5 niveaux uniformement

distribues dans l'intervalle des respectives valeurs extremes trouves. Le facteur "Lgv" est definit a 2 niveaux : "-1"=30m et "+1"=60m.  
Nous presentons ci-dessous le tableau des correspondants 5 niveaux pour les facteurs F1, ..., F7.

## 2.4 La variable Reponse

La variable REPONSE est la VITESSE COMMERCIALE (VECO).

La vitesse commerciale ( VECO ) se calcule en divisant la longueur totale du parcours ( Ss )  
$$\text{VECO} = \frac{\text{Ss}}{\text{St} + t \text{ S do5(h)}}$$

## 3. L'ANALYSE DES RESULTATS

### 3.1. Pourquoi l'utilisation du BUSWAY ?

L'application des plans d'experience dans les transports, ne peut pas suivre les memes etapes que dans les autres sciences (biologie, chimie, ....), puisque pour faire l'experimentation, en utilisant des observations realisees en place, il faut des grands investissements financiers. Il n'est pas possible de construire pour chaque traitement different une ligne de metro leger, ou n'importe quel moyen de transport, etant donne que cela necessiterait des infrastructures d'un cout tres eleve et aussi, causerait de grandes perturbations dans les villes ou on voudrait faire l'experimentation. Donc, il est difficile d'effectuer des essais en vrai grandeur, ainsi est-il interessant d'utiliser les techniques mathematiques de simulation a travers les modeles informatiques dument calibres et valides de facon a obtenir les resultats necessaires, sans faire l'experimentation dans la realite, mais de telle sorte que les resultats soient valables. Ces modeles utilisent toutes les caracteristiques d'une experience proprement dite.

Dans ce travail, nous utilisons le modele de simulation BUSWAY pour obtenir les resultats necessaires a la concretisation des plans d'experience.

### 3.2. Pourquoi l'utilisation de ce plan d'expériences ?

On est interesse a estimer :

-- les effets lineaires et les effets quadratiques des facteurs Vde, Tmor, Tmon, Dem, Dst, Flux et Dfeu.

-- Les interactions suivantes de 2 facteurs :

Les interactions qui enveloppent Vde, Tmor, Tmon :  $Vde * Tmor$

$Vde * Tmon$   
 $Tmon * Tmor$

Les interactions qui enveloppent Flux :  $Flux * Dst$

$Flux * Dfeu$   
 $Flux * Lgv$

Interactions qui enveloppent Lgv : diverses.

Toutes les autres interactions avec 2 facteurs et les interactions a 3 facteurs ou plus sont supposees non significatives.

Tous les facteurs peuvent etre analyses a plusieurs niveaux, sauf Lgv qui peut etre analyse que a 2 niveaux (vehicules de longueur 30m et 60m).

Donc pour etudier les facteurs Vde, Tmor, Tmon, Dem, Dst, Flux et Dfeu, on a decide d'utiliser un plan d'expériences qui suive l'idee du plan "Second Order Composite Designs" qui presente un cube fortement fractionne.

Ces projets constituent une combinaison entre un Plan Factoriel  $2^{(k-p)}$ , d'un "cube" ( les traitements avec les niveaux  $(-1, +1, -1, \dots, +1, -1)$  ) plus une etoile ( les traitements avec les niveaux  $(0, 0, -2, +2, 0, \dots)$  ) et encore quelques points centres  $(0, 0, \dots, 0)$ . En general, ces plans sont utilises quand on veut etudier tous les termes lineaires et quadratiques (entre les termes quadratiques on inclue les interactions de deux facteurs) . Pour evaluer toutes les interactions de deux facteurs le "cube" est presente complet ou faiblement fractionne. Dans cette etude le cube est presente fortement fractionne.

Dans ce cas en etude, pour former le "cube", on a effectue un plan factoriel  $2^{(7-3)}$ . Le fractionnement a ete effectue de facon a assurer que les interactions interessantes ne soient pas confondues entre eux.

Pour savoir plus details a propos des plans factoriels  $2^k$  ou des plans fractionnes  $2^{(k-p)}$ , il faut voir Montgomery (1976) ou Nanni et Ribeiro (1991). Pour plus details sur S.O.C.D. voir Box et Draper (1987).

Comme on est interesse a analyser Lgv et divers interactions qui enveloppent Lgv (  $Lgv * Flux$ ,  $Lgv * Tmor$ ,  $Lgv * Tmon$ , ... ), on a decide de

repetier la matrice pour Lgv=-1 et Lgv=+1. Le plan resultant (64 traitements). Ce plan est bien adapte a cette etude, puisque il permet d'estimer tous les termes d'interesse avant mentionnes.

Pour obtenir une meilleur estimation du terme d'erreur et des coefficients de regression, on a effectue 3 repetitions de chaque traitement. Le tableau 1 presente aussi les valeurs de la VECO obtenus dans chaque traitement.

La regression multiple et l'analyse de la variance associees sont les methodes de base pour l'analyse, puisque la regression multiple est pratique a l'utilisation et flexible, c'est a dire, on peut additionner des nouvelles donnees et l'analyse peut etre completee sans aucun probleme.

L'analyse de la variance est pratique pour indiquer quel est l'importance relative de chaque facteur sur la VECO.

**DESAVANTAGE :** Les interactions ne peuvent pas etre toutes evaluees.

**AVANTAGE :** Le nombre d'essais exige est considerablement petit.

### 3.3. La matrice d'expériences et les observations.

La matrice d'expériences utilisee pour cette etude est:

Trait.	Vde	Tmor	Tmon	Dem	Flux	Dst	Dfeu	Lgv	VECO (Km/h)			21,5	21
									R1	R2	R3		
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	21,5	21
2		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	18,9	19
3		1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	26	25
4		-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	20,8	20
5		1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	23,1	23
6		-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	20	20
7		1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	21,8	22
8		-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	16	14
9		1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	18,4	20
10		-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	23,4	24
11		1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	27,6	27
12		-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	18,7	18
13		1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	19	19
14		-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	19,3	19
15		1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	20,5	21
16		-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	15,3	18
17		1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	18,7	20
18		2	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	24,1	24
19		-2	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	16,7	16
20		0	2	0	0	0	0	0	0	0	-1	18,6	19
21		0	-2	0	0	0	0	0	0	0	-1	24,3	24
22		0	0	2	0	0	0	0	0	0	-1	18	19
23		0	0	-2	0	0	0	0	0	0	-1	23,1	22
24		0	0	0	0	2	0	0	0	0	-1	21,3	21
25		0	0	0	0	-2	0	0	0	0	-1	22,2	21
26		0	0	0	0	0	2	0	0	0	-1	18,9	18
27		0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-1	15,4	16
28		0	0	0	0	0	0	2	0	0	-1	23,4	23
29		0	0	0	0	0	0	-2	0	0	-1	16,9	16
30		0	0	0	0	0	0	0	2	-1	-1	22,2	22
31		0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-1	20,5	20
32		0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	21,5	21
33		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22,9	23
34		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	21,2	20
35		1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	27,2	26
36		-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	21,9	20
37		1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	25,8	25
38		-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	23,1	23
39		1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	26,8	26
40		-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	18,3	18
41		1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	22	22
42		-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	24,2	22
43		1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	29,1	29
44		-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	19,5	18
45		1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	21,5	21
46		-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	18,7	18
47		1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	24,1	23
48		-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	19,7	19
49		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24,4	26
50		2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	27,1	27

51	-2	0	0	0	0	0	1	18,2	17	
52	0	2	0	0	0	0	1	20,8	20	
53	0	-2	0	0	0	0	1	27,2	26	
54	0	0	2	0	0	0	1	22,5	22	
55	0	0	-2	0	0	0	1	24,1	23	
56	0	0	0	2	0	0	1	23,3	22	
57	0	0	0	-2	0	0	1	23,6	23	
58	0	0	0	0	2	0	1	21,8	22	
59	0	0	0	0	-2	0	1	19,7	20	
60	0	0	0	0	0	2	1	25,5	24	
61	0	0	0	0	0	-2	1	17,9	17	
62	0	0	0	0	0	0	1	24,1	23	
63	0	0	0	0	0	0	-2	1	21,6	21
64	0	0	0	0	0	0	1	22,9	23	

Dans cette matrice on a l'avantage que tous les niveaux extremes ne se croisent pas, seulement les 3 niveaux du milieu se croisent, puisqu'il est impossible de faire un plan factoriel complet, etant donne qu'il y a des traitements qui ne seraient pas possible a realiser a cause des contraintes existantes dans l'exploitation d'un metro leger. Ainsi, cette matrice rassemble les cas le plus importants et tous les traitements peuvent etre simules.

Pour ce plan on a besoin de definir 9 couloirs differents, tous de la meme longueur, mais avec des nombres differents de stations et de feux, suivant les distances entre stations et les distances entre feux differentes. Les coordonnees d'emplacement des feux et des stations ont ete choisies aleatoirement pour chaque couloir, mais en n'obliant pas que dans le centre les stations et les feux sont plus proches que dans la banlieue.

#### 3.4. Obtention des resultats.

Apres une analyse preliminaire des donnees, en utilisant la methode par regression multiple, nous avons constate que dans l'intervalle en etude, les facteurs "Vde" et "Lgv" ont un effet a peu pres lineaire, par contre les facteurs "Tmor", "Flux", "Tmon", "Dst", "Dfeu" et "Dem" ont un effet a peu pres carre. Les interactions, d'une facon generale, ont des effets faibles. Pour savoir quelle est la relation entre chaque facteur et la VECO, c'est a dire, si chaque facteur a un effet lineaire ou carre, on s'est base sur les termes qui sont significatifs.

La simulation a ete realisee pour chaque traitement, ou il a ete effectue 3 repetitions pour chacun.

Apres application de la methode par regression lineaire multiple, le modele obtenu est le suivant :

$$\text{VECO} = 21,44 + 2,05 * \text{Vde} - 1,41 * \text{Tmor} + 0,338 * \text{Tmor}^2 + 1,42 * \text{Dst} - 0,131 * \text{Dst}^2 + 0,99 * \text{Lgv} - 0,951 * \text{Tmon} + 0,133 * \text{Tmon}^2 + 0,51 * \text{Flux} - 0,517 * \text{Flux}^2 + 0,376 * \text{Lgv} * \text{Tmon} + 0,342 * \text{Dfeu} + 0,158 * \text{Dfeu}^2 - 0,166 * \text{Dem} + 0,283 * \text{Dem}^2 + 0,339 * \text{Lgv} * \text{Vde} - 0,274 * \text{Vde} * \text{Tmor} + 0,259 * \text{Tmor} * \text{Tmon} - 0,218 * \text{Flux} * \text{Tmon} + 0,151 * \text{Lgv} * \text{Dst}$$

(1)

$$R S up7(2) = 0,9348$$

Les termes qui n'apparaissent pas dans le tableau, comme par exemple "Vde^2" ou "Vde \* Tmor" ont un effet non significatif et peuvent etre alors consideres comme nuls.

A partir du "Coefficient" de chaque facteur, on peut voir si l'effet du facteur respectif sur la VECO est positif ou negatif et aussi mesurer l'importance des facteurs sur la variable reponse.

#### 3.5. Presentation des resultats.

Ce modele peut etre utilise pour prevoir la VECO pour nimporte quelle combinaison de traitements. Il faut introduire les valeurs des niveaux correspondantes a la valeur de chaque facteur "Vde", ..., "Lgv" dans l'equation (1)

L'importance de chaque facteur peut etre observee dans la figure suivante :

Facteur (effet lineaire + quadratique)	"Ef
Vde	*****
Tmor	*****
Dst	*****
Lgv	*****

Tmon	*****
Flux	*****
Lgv * Tmon	*****
Dfeu	*****
Dem	*****
Lgv * Vde	*****
Vde * Tmor	*****
Tmor * Tmon	*****
Flux * Dfeu	****
Lgv * Dst	****

11,6

9,6

4,

La valeur "Effet" calculee est egale a la racine carre de la variance, cette valeur est proportionnelle a l'effet du terme correspondant. Ainsi la figure ci-dessus nous donne une tres bonne idee de l'importance des facteurs sur la VECO.

Cet "Effet" ne correspond pas a celui obtenu quand on applique la technique des plans d'experience pour l'analyse des resultats, puisque cet "Effet" ne nous dit pas si les facteurs ont une influence negative ou positive sur la VECO, et il ne mesure pas, pour chacun des facteurs, la variation de la VECO quand on passe du niveau bas au niveau haut ou vice-versa. Donc cette valeur nous aide simplement a connaitre la relation entre les differents effets de chaque facteur sur la VECO.

### 3.6 Les valeurs optimales.

Comme on s'y attendait les facteurs "Vde", "Tmor", "Tmon", "Flux", "Dst" et "Lgv" ont un effet important sur la VECO, tous les termes restants qui sont dans la figure ci-dessus ont un effet modere sur la VECO et les termes qui n'apparaissent pas ont un effet moindre sur la VECO.

Il est aussi interessant de verifier quelles sont les valeurs de les facteurs qui maximisent la VECO, en utilisant des procedures d'optimisation standards.

Ils nous parait etre les suivants :

"Vde"	= maximum	(16 m/s)
"Tmor"	= minimum	(4 s)
"Tmon"	= minimum	(1,5 s/voy)
"Dem"	= minimum	(7500 voy/h/sens)
"Flux"	= 0,087	(36 veh/h)
"Dst"	= maximum	(1000 m)
"Dfeu"	= maximum	(1000 m)
"Lgv"	= maximum	(60 m)

Donc, si dans le couloir de 7 Km de longueur a chaque facteur sont attribuees les valeurs obtenues ci-dessus, on aurait un troncon de metro leger ou la vitesse commerciale est maximum. En utilisant les niveaux correspondants de chaque facteur aux valeurs optimales, trouvees ci-dessus, dans le modele obtenu precedemment, on calcule la valeur maximale pour la VECO egale a 40,47 Km/h.

### 3.7. Analyse des resultats.

On n'a pas eu de surprises avec les resultats obtenus, puisqu'on s'attendait deja l'importance de "Vde" et de "Dst". Par contre, l'effet du temps mort se trouve au meme niveau que l'effet de la distance entre stations, ce fait appelle notre attention!

On pourrait discuter les niveaux choisis pour le facteur "Tmor", mais une recente etude du TRL sur le metro leger attribue a ce facteur, a partir d'une relation entre le nombre de passagers qui monte et le temps d'arret dans la station, des valeurs dans l'intervalle [8;25] secondes, tant pour les autobus que pour le metro leger. Donc, en considerant la grand decalage entre les niveaux de ce facteur on constate que son effet sur la VECO est tout a fait raisonnable.

Un autre fait qui appelle l'attention dans les resultats obtenus est le petit effet du facteur "Dfeu" sur la VECO, en effet dans cette etude on a considere que les véhicules ont presque la priorite absolue, les feux n'influencent pas dans la performance du metro, puisque il n'y a pas temps perdu aux feux.

Pour les autres facteurs, nous n'avons pas de remarques a faire, puisque les resultats sont semblables a ceux obtenus dans l'etude du metro de Tunis. Ils sont semblables a ceux qu'on attendait en nous basant sur ce qui se passe en realite sur d'autres reseaux.

### 3.8. Les suggestions.

### 4. CONCLUSIONS

### BIBLIOGRAPHIE

- Gardner G., Kuhn F. (1993) The Performance and Potential of light rail transit in Developing cities, T.R.L.(Transport and Research Laboratory), p.17 (unpublished).
- Snell F. D., Bertschmann H., Bonz M., Kosiek B. et Von Rohr J. (1985), Attractivite' et e'economie du me'tro le'ger de l'avenir, 7, 46 Congr'es de U.I.T.P., Bruxelles, p.41.
- Pallmann W. (1981), Le me'tro le'ger moderne, 7, 44 Congr'es de U.I.T.P., Dublin, p.22.
- Hugonnard J.C. (1992), Perspectives d'avenir du me'tro le'ger, Revue Ge'n'rale des Chemins de Fer-11 Anne'e, 71-75 p.
- Groche G. (1984), Les me'tros le'gers dans le monde, 1, U.I.T.P. Revue, 40 p.
- Box G. E. P., Draper N. R. (1987), Empirical model-building and response surfaces, John Wiley & Sons, New York.
- Nanni L. F., Ribeiro J. L. (1992), Planeamento e Avaliacao de Experimentos, Caderno de Engenharia, Curso de Pod Graduacao enm Engenharia Civil, Porto Alegre, 194 p.
- Montgomery