

**GROUPE INTERDISCIPLINAIRE DE RÉFLEXION
SUR LES TRAVERSÉES SUD-ALPINES
ET L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE MARALPIN**

*Association Loi de 1901 enregistrée au J.O. du 13 mars 1996
Membre de la Commission Internationale pour la Protection des Alpes (CIPRA)*

*SECRETARIAT : Jacques Molinari 49 avenue Cernuschi - F - 06500 MENTON
Tél/Fax : (33) 04 93 35 35 17 - Messagerie électronique : gir.maralpin@wanadoo.fr*

**ÉLÉMENTS
DE MÉCANIQUE FERROVIAIRE**

**RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES DE VOIE,
SÉCURITÉ ET VITESSES DE CIRCULATION**

Jacques Molinari
Ingénieur honoraire du CEA

Juillet 1999

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce cahier qui aborde des aspects peu familiers des techniques ferroviaires, n'aurait pu être entreprise sans les bienveillantes recommandations de Monsieur Jean-Pierre PRONOST, Directeur général délégué de Réseau Ferré de France (RFF), de Monsieur Emilio MARAINI, Directeur du département Grandes vitesses de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC), et de Monsieur LAGNEAU, Secrétaire de l'European Rail Research Institute (ERRI), et sans les documents techniques qu'ont bien voulu nous communiquer leurs auteurs, Monsieur Pierre-Etienne GAUTIER, Chef de la Physique des systèmes ferroviaires au Département de la Recherche de la SNCF, et Monsieur l'Ingénieur Mario TESTA, responsable du Bureau de Technique de la voie aux FS, avant publication dans les actes du très récent séminaire UIC-UNIFE-ERRI (mai 1999) sur les techniques pendulaires.

Nous tenons également à associer à ces remerciements les Services de documentation de l'UIE et de la Revue Générale des Chemins de Fer, pour leur aide précieuse, aussi diligente que pertinente.

PRÉSENTATION

Le présent cahier constitue l'un des volets d'un dossier réalisé par le GIR Maralpin dans le cadre d'une étude comparative des potentialités des percées ferroviaires alpines franco-italiennes (Fréjus et Col de Tende) existantes.

Son objectif consiste à situer brièvement, dans le cadre théorique de la mécanique ferroviaire, les récentes avancées techniques et leurs éventuelles perspectives, perspectives évidemment contraintes par la géométrie des lignes et leurs conditions d'exploitation. Ces aspects sont précisément abordés dans le Cahier 6A "*Rappels sur les critères de performance d'une ligne ferroviaire de montagne*", cahier auquel le lecteur intéressé pourra se reporter.

AVERTISSEMENT

Le présent dossier n'ayant aucune prétention à l'exhaustivité, les données et analyses qui y figurent appellent donc des compléments d'information que nous sollicitons, auprès notamment des administrations ferroviaires.

Afin d'en permettre l'examen critique et de faciliter des investigations ultérieures, un grand soin a été attaché à mentionner avec précision chacune des sources, qu'elles relèvent de publications, de "littérature grise", de courriers ou de simples entretiens.

Les références correspondantes, toutes inventoriées selon les cas, soit en tête, soit en fin de chacune des sections de ce document, devraient grandement faciliter les indispensables compléments, révisions, mises à jour, sinon refontes, de ce document de travail.

Ainsi présenté, ce dossier, inévitablement sommaire et incomplet, semble néanmoins devoir constituer une base valide pour des investigations plus systématiques et une analyse plus approfondie.

REMARQUES SUR LA PRÉSENTATION DES RÉFÉRENCES

Le mode d'identification retenu est du type "Harvard", avec quelques nuances toutefois, du fait de notre choix d'un classement catégoriel de ces références, par nature et par sources.

Tandis que, pour les publications traditionnelles (et, dans le cas présent, pour les communications ou articles de revues), la notation est constituée, en premier lieu des noms d'auteurs, et, en second lieu, du millésime de publication (par exemple [TESTA (1999)]), dans le cas des ouvrages collectifs, les noms des auteurs cèdent quelquefois leur rang aux acronymes des organismes auxquels ils ressortissent, c'est ici le cas du rapport de l'UIC sur l'état de la technologie pendulaire répertorié [UIC (1998-06)].

ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE FERROVIAIRE

RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES DE VOIE, SÉCURITÉ ET VITESSES DE CIRCULATION

TABLE DES MATIÈRES

1. RAPPELS GÉNÉRAUX SUR LA MÉCANIQUE VOIE-VÉHICULE

- 1.1. Le cadre d'un renouveau des études de mécanique ferroviaire**
- 1.2. Nature des efforts à prendre en compte**
- 1.3. La résistance aux efforts verticaux**
 - (a) Considérations statiques
 - (b) Considérations dynamiques
- 1.4. La résistance aux efforts transversaux**
 - (a) Le phénomène de lacet
 - (b) Relations entre efforts verticaux et transversaux : dérapage, déraillement, et renversement
 - Le dérapage
 - Le déraillement
 - Le renversement ou basculement

2. FRANCHISSEMENT DES COURBES ET EFFORTS TRANSVERSAUX SUR LA VOIE

- 2.1. Les principes de l'analyse**
 - (a) Accélération latérale centrifuge et composante totale de l'accélération latérale
 - (b) Dévers théorique optimal
- 2.2. Accélération latérale non compensée**
 - (a) Insuffisance de dévers
 - (b) Excès de dévers
- 2.3. Dévers, accélérations latérales et vitesses**
 - (a) Relation entre l'accélération latérale non compensée et l'insuffisance de dévers
 - (b) Relation unitaire entre paramètres de voie et vitesse maximale de circulation
 - (c) Exemple d'application

3. TENUE DES VÉHICULES SUR LA VOIE

- 3.1. Risque de déraillement**
- 3.2. Risque de renversement ou basculement**

4. RÉSISTANCE DE LA VOIE

- 4.1. Considérations quasi-statiques**
 - (a) Résistance aux efforts verticaux
 - Relation entre poids métrique du rail et charge par essieu
 - (b) Résistance aux efforts latéraux
 - (c) Défauts géométriques de la voie
- 4.2. Réactions dynamiques aux mouvements verticaux**
 - (a) Masses non suspendues
 - (b) Masses suspendues
- 4.3. Réactions dynamiques aux mouvements transversaux**
- 4.4. Quantification approchée des effets dynamiques transversaux**

5. CONDITIONS DE CONFORT ET CONDITIONS TECHNIQUES DE TRACÉ

- 5.1. Voitures classiques**
- 5.2. Caisses inclinables**

6. L'ÉTAT DE L'ART – QUELQUES ASPECTS

- 6.1. Conditions à respecter pour assurer la sécurité et le confort des circulations (France)**
 - (a) Paramètres principaux

- (b) Contraintes majeures
- 6.2. Confrontation de quelques spécifications et usages dans les principales administrations ferroviaires et notamment française et italienne**
 - (a) Voie
 - (b) Interaction matériel roulant - infrastructure
 - (c) Confort
- 6.3. Etat de l'art en matière de pendulation**
- 6.4. Classification et réglementation italiennes en matière de vitesses de circulation**
 - (a) Vitesse limite nominale de ligne
 - (b) Vitesses limites de circulation et catégories correspondantes
 - (c) Ouverture de lignes aux circulations pendulaires
- 6.5. Vers une classification française**

FIGURES ET TABLEAUX (Dans l'ordre de présentation)

Figure 1

(a) Absence de dévers - (b) Dévers avec compensation parfaite - (c) Insuffisance de dévers avec pendulation

Figure 2

Renversement d'un véhicule

Tableau 1

Valeur limite de l'insuffisance de dévers pour le risque de renversement

Tableau 2

Condition de sécurité(II) pour une voie sur traverses en béton

Tableau 3

Rayons (R) et longueurs de raccordement (λ) minimaux imposés par la condition (I)

Tableaux 4 (a) et (b)

Classement des lignes ferroviaires italiennes

Figure 3

Efforts transversaux respectivement exercés sur la voie par les essieux d'une locomotive (22,5 t/essieu) et d'une rame pendulaire

Tableau 5

Valeurs provisoires des insuffisances de dévers envisageables sur le réseau SNCF

BIBLIOGRAPHIE

ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE FERROVIAIRE

RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES DE VOIE, SÉCURITÉ ET VITESSES DE CIRCULATION

1. RAPPELS GÉNÉRAUX SUR LA MÉCANIQUE VOIE-VÉHICULE

1.1. Le cadre d'un renouveau des études de mécanique ferroviaire

Dans la perspective de construction de lignes TGV, il apparut nécessaire à la SNCF de procéder à une analyse approfondie des relations dynamiques entre les véhicules et la voie, notamment en raison du fait que certains réseaux étrangers estimaient la pose classique sur traverses inadaptée aux grandes vitesses. Ces réserves levées de manière magistrale, notamment sous la conduite de PRUD'HOMME (1967 ; 1970), d'autres investigations allaient se poursuivre à l'échelle européenne [UIC (1998-06)], cette fois aux fins de valider les avancées spectaculaires des chemins de fer italiens (FS) dans le domaine de la pendulation ferroviaire.

Les notes qui suivent rassemblent sous une forme panoramique et, on l'espère, suffisamment explicite, les grandes lignes de l'état des connaissances ainsi acquises, aux fins d'en permettre une lecture aisée et une transposition à des domaines ne ressortissant pas nécessairement à la grande vitesse.

1.2. Nature des efforts à prendre en compte [ALIAS (1998)]

Les efforts à prendre en compte sont essentiellement verticaux et transversaux. Les efforts longitudinaux, liés aux problèmes des longs rails soudés (LRS), aujourd'hui bien maîtrisés, ne sont pas examinés ici.

Selon ALIAS (1998), l'approche analytique de la mécanique voie-véhicule s'articule sur les observations suivantes :

- les efforts verticaux et horizontaux peuvent être découplés sans inconvénient ;
- l'étude des efforts verticaux peut se faire sans erreur grave dans le domaine élastique, ce qui n'est pas le cas pour les efforts transversaux, caractérisés par leur non-linéarité.

Pour les premiers en effet, la plate-forme résiste élastiquement dans une certaine limite, et les phénomènes de fatigue dus à la répétition des efforts jouent un rôle essentiel ; en revanche, la réponse du châssis de la voie aux efforts transversaux qu'il supporte n'est pas élastique et, au-delà d'une certaine valeur, apparaît le risque d'une déformation dangereuse.

Il en résulte que le problème des efforts verticaux est plus aisément abordable par le calcul que celui des efforts transversaux.

1.3. La résistance aux efforts verticaux [ALIAS (1998)]

(a) Considérations statiques

La résistance statique aux efforts verticaux peut être correctement cernée par un simple calcul de résistance des matériaux qui donne des indications intéressantes sur les facteurs sur lesquels l'on peut agir (résistance du ballast, densité de travelage, masse linéaire du rail, etc.) pour améliorer une situation donnée.

(b) Considérations dynamiques

Les progrès dans la résistance de la voie se situent cependant dans le calcul de la fatigue de la plate-forme due aux surcharges dynamiques aléatoires : les imperfections du nivellement de la voie et de rotondité des roues peuvent être caractérisées mathématiquement par des spectres de puissance de ces défauts ; s'y

superposent des spectres de raies dues en particulier aux joints et aux soudures de rails, ainsi qu'aux divers types d'usure ondulatoire du rail. Certains de ces défauts sont redoutables dans la mesure où ils entrent en résonance à la vitesse de circulation avec certaines fréquences propres du véhicule.

L'ensemble voie-véhicule peut être considéré comme un système linéaire et invariant dans lequel, à tout signal d'entrée connu par l'expression mathématique de son spectre (le profil de la voie par exemple), correspond une réponse (accélération ou effort) calculable par transformation de Fourier.

Trois types de couplage doivent être distingués ; avec les masses non suspendues (les essieux), les masses semi-suspendues (les bogies), et les masses suspendues (la caisse).

L'importance des charges dynamiques engendrées par l'action des masses non-suspendues (en gros, l'essieu d'un véhicule), et leur proportionnalité avec la vitesse, confère à ces dernières une importance de loin la plus importante ; la valeur quadratique moyenne σ des efforts exercés sur la voie, et par conséquent sur la plate-forme, s'exprime alors par une formule remarquablement simple [cf. § 4.2.(a)] :

$$\sigma = k V \sqrt{m.h}$$

Du fait des autres facteurs sur lesquels les projeteurs ont peu de maîtrise, la masse non suspendue est le paramètre primordial de l'augmentation des vitesses de circulation.

1.4. La résistance aux efforts transversaux [ALIAS (1998)]

La résistance de la voie aux efforts transversaux est caractérisée par sa non-linéarité.

(a) Le phénomène de lacet

Le phénomène de lacet fait l'objet d'analyses complexes devant tenir compte des défauts transversaux de la voie.

Sous l'effet de la conicité des bandages et de l'inclinaison du rail, le véhicule prend un mouvement d'oscillations transversales amorties ou contre-amorties ; le coefficient d'amortissement croît avec la vitesse, de sorte qu'à partir d'une certaine vitesse, dite critique, l'amplitude du mouvement s'amplifie au lieu de s'atténuer et les efforts transversaux augmentent, ce qui risque d'entraîner la déformation de la voie. Les formules mathématiques ne permettent pas de calculer la vitesse critique d'un bogie donné mais indiquent la manière d'agir sur ces paramètres pour augmenter cette vitesse.

(b) Relations entre efforts verticaux et transversaux : dérapage, déraillement, et renversement

Les risques dérapage, déraillement et renversement, provoqués par les efforts transversaux sont étroitement liés aux efforts verticaux : un essieu est, en effet, soumis à la fois à une charge verticale totale P et transversale H , une roue à un effort vertical Q et transversal Y , avec, bien évidemment, $H = Y_1 + Y_2$ et $P = Q_1 + Q_2$.

Ces trois types de risques appellent les mesures de sûreté les plus restrictives.

Le dérapage

C'est le déplacement latéral (et en conséquence la déformation irréversible) de la voie.

Le dérapage provient d'une valeur excessive du rapport H/P . Les essais conduits par la SNCF ont permis à Prud'homme d'établir sa formule unanimement admise, laquelle recommande, pour éviter tout risque de déformation irréversible, des valeurs maximales de H suivantes :

- 0,85 (1 + $P/3$) dans le cas de poses sur traverses en bois
- 0,85 (1,5 + $P/3$) dans le cas de poses sur traverses en béton.

Le déraillement

Il provient d'une valeur excessive de l'un des deux rapports Y/Q . Il nécessite cette valeur pendant un minimum de temps, celui nécessaire à la montée du boudin sur le rail, risque très faible, hormis le cas d'un gauchissement excessif de la voie.

Les règles de sécurité contre le déraillement figurent dans la Fiche UIC 518. La SNCF, s'impose, comme la plupart des autres administrations européennes [UIC (1998-06)], le respect de la condition :

$$Y/Q < 0,8$$

Le renversement ou basculement

Il est la conséquence d'un allègement excessif des charges s'exerçant sur les roues intérieures des essieux, sous l'effet de poussées transversales (forces centrifuges et vents).

2. FRANCHISSEMENT DES COURBES ET EFFORTS TRANSVERSAUX SUR LA VOIE

2.1. Les principes de l'analyse [UIC (1998-06) ; GAUTIER (1999)]

L'analyse qui suit du franchissement des courbes est de caractère qualifié de quasi-statique du fait qu'elle repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- la voie est inscrite dans une courbe circulaire parfaite,
- le véhicule est parfait.

Ainsi donc, il n'est tenu compte d'aucun type de défauts dans le système voie/véhicule, comme par exemple les défauts d'alignement des rails, les anomalies dans le dévers de la voie, les irrégularités d'élasticité de la voie, les méplats, etc., défauts qui produiraient des efforts entre le rail et la roue, efforts qui seraient variables et aléatoires et se superposeraient aux efforts et aux accélérations quasi-statiques de valeur constante.

L'analyse est donc essentiellement axée sur la formulation des accélérations latérales non compensées, au niveau de la voie, c'est-à-dire entre la roue et le rail.

N'y interviennent, ni la suspension du véhicule, ni l'éventualité que la caisse du véhicule soit inclinable. Par conséquent, la formule établie est indépendante du fait qu'il s'agisse d'un véhicule classique sans inclinaison de caisse, ou d'un éventuel système qui puisse incliner la caisse du véhicule.

(a) Accélération latérale centrifuge et composante totale de l'accélération latérale

Lorsqu'un véhicule franchit une courbe circulaire sans dévers (Figure 1), il se trouve soumis à deux types d'accélération appliqués sur son centre de gravité :

- l'accélération de gravité $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, en direction verticale et dirigée vers le bas ;
- l'accélération latérale centrifuge γ , horizontale et dirigée vers l'extérieur de la courbe ; cette dernière, s'exprime ainsi :

$$\gamma = V^2 / R$$

L'accélération totale Γ à laquelle est soumis le véhicule est la somme vectorielle des deux accélérations considérées g et γ .

Dans ce cas précis d'une courbe sans dévers, l'accélération latérale γ_v exercée au niveau de la voie est égale à γ .

(b) Dévers théorique optimal

Le dévers théorique optimal est celui pour lequel la composante totale de l'accélération transversale s'exerçant sur le véhicule est perpendiculaire au plan de voie. Dans ce cas, l'accélération latérale au niveau de la voie, et parallèle à son propre plan, devient nulle ; elle est dite parfaitement compensée par le dévers.

L'angle de dévers théorique de la voie α est défini par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= d / B \\ \text{tg } \alpha &= V^2 / Rg\end{aligned}$$

avec :

- d : dévers théorique (en mm)
- B : distance entre les cercles de roulement [dans le cas de voies à écartement international (1,435 m), $B = 1500 \text{ mm}$]
- V : vitesse dite d'équilibre dynamique

L'angle de dévers étant faible, $\text{tg } \alpha$, $\sin \alpha$ et α ont des valeurs en radians presque identiques, et dans ces conditions théoriques idéales où vitesse et dévers sont ajustés de manière à annuler l'accélération latérale au niveau de la voie, l'équilibre s'écrit :

$$d / B = V^2 / Rg$$

ou encore :

$$d / B - V^2 / Rg = 0$$

l'expression du dévers théorique s'écrivant :

$$d = V^2 B / Rg$$

2.2. Accélération latérale non compensée [UIC (1998-06) ; GAUTIER (1999)]

La compensation théorique ne pouvant être atteinte que pour un seul couple vitesse-dévers, l'inévitable diversité de vitesses de circulation donnera lieu, sur un tronçon de voie dont le dévers d a été fixé une fois pour toutes, à des accélérations latérales non compensées γ_{nc} au niveau de la voie. Ces effets peuvent s'exprimer sous la forme d'insuffisances ou d'excès de dévers, selon le sens de l'écart avec le dévers réel d .

(a) Insuffisance de dévers

Pour une vitesse de circulation donnée, l'insuffisance de dévers I est, par définition, la différence existante entre le dévers théorique D pour cette vitesse et le dévers effectif d de la voie :

$$I = D - d$$

En d'autres termes, l'ajout de l'insuffisance de dévers au dévers réel permettrait d'atteindre la compensation, ce qui s'écrit, en procédant à la même approximation angulaire que précédemment :

$$D = I + d = BV^2/Rg$$

soit :

$$I = BV^2/Rg - d$$

(b) Excès de dévers

L'accélération latérale non compensée peut être dirigée vers l'intérieur de la courbe ; elle est dite négative et résulte d'un excès de dévers ; les roues du véhicule exercent alors leur effort sur le rail intérieur.

Pour les lignes où circulent des trains de marchandises lents [PRUD'HOMME (1970)], une limite est fixée à cet excès de dévers, afin de diminuer l'écrasement des rails en file basse qui se trouvent systématiquement et notablement surchargés avec des wagons lourds dont le centre de gravité est relativement haut. Cette limite est fonction du tonnage marchandises journalier.

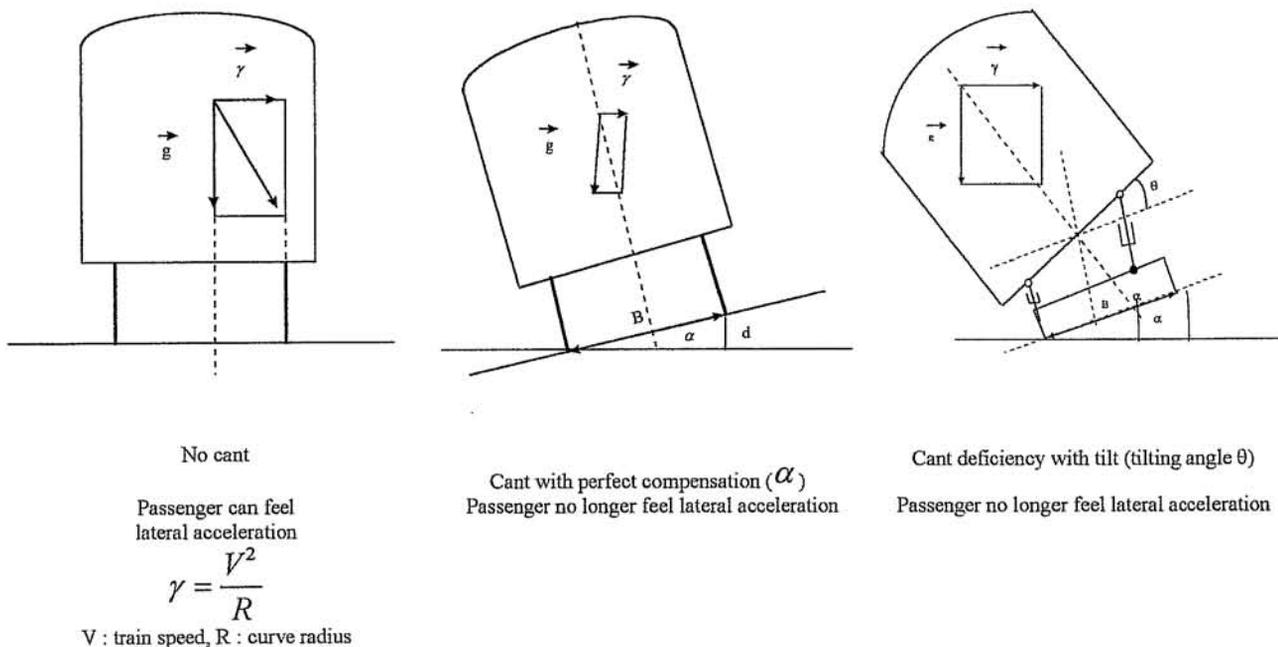


Figure 1 - (a) Absence de dévers - (b) Dévers avec compensation parfaite - (c) Insuffisance de dévers avec pendulation [GAUTIER (1999)]

2.3. Dévers, accélérations latérales et vitesses [UIC (1998-06) ; GAUTIER (1999)]

(a) Relation entre l'accélération latérale non compensée et l'insuffisance de dévers

La relation entre l'accélération latérale non compensée γ_{nc} et l'insuffisance de dévers I s'écrit évidemment :

$$\gamma_{nc} / g = I / B$$

soit encore, en valeurs numériques :

$$\gamma_{nc} \text{ (m/s}^2\text{)} = I \text{ (mm)} \times 9,81/1500 = \sim I / 153$$

ou bien :

$$I = 153 \gamma_{nc}$$

(b) Relation unitaire entre paramètres de voie et vitesse maximale de circulation

L'accélération latérale non compensée γ_{nc} pouvant s'exprimer comme la différence entre l'accélération latérale centrifuge et l'accélération compensée, on peut écrire :

$$\gamma_{nc} = V^2/13R - g d/B$$

Cette expression relie tous les paramètres fondamentaux de l'équilibre quasi-statique d'un véhicule au niveau de la voie au cours du franchissement d'une courbe, lesquels sont :

- la vitesse V
- la géométrie de la courbe, exprimée par le rayon R de la courbe, le dévers d, et l'écartement B entre les cercles de roulement
- l'accélération latérale non compensée γ_{nc} .

Il importe de souligner que l'équilibre quasi-statique d'un véhicule au niveau de la voie, durant le franchissement d'une courbe, est indépendant du fait qu'il y ait ou non des caisses inclinables, et également des caractéristiques de sa suspension.

(c) Exemple d'application [UIC (1998-06)]

On déduit de la précédente relation :

$$V^2 = 13 R (\gamma_{nc} + g d/B)$$

ou encore :

$$V = 3,6 \sqrt{R(\gamma_{nc} + g d/B)}$$

La vitesse maximale permmissible sur une voie donnée étant principalement dictée par l'accélération latérale admissible, ainsi que par le dévers maximal de la voie, l'expression ci-dessus permet d'exprimer la vitesse maximale en fonction du rayon des courbes.

En reprenant l'exemple fourni par [UIC (1998-06)], dont les données sont les suivantes :

- $\gamma_{nc} = 0,65 \text{ m/s}^2$ (ce qui autorise une insuffisance de dévers $I = 153 \times 0,65 \sim 100 \text{ mm}$)
- $d = 160 \text{ mm}$
- $B = 1500 \text{ mm}$,

la relation ci-dessus devient :

$$V = 4,7 \sqrt{R} \text{ (avec R exprimé en mètres et V en km/h).}$$

Dans ces conditions précises, la vitesse maximale de circulation sur une telle ligne serait, pour des courbes de 300 m de rayon, de 81 km/h.

3. TENUE DES VÉHICULES SUR LA VOIE

3.1. Risque de déraillement

Il provient d'une valeur excessive de l'un des deux rapports Y/Q. Il nécessite cette valeur pendant un minimum de temps, celui nécessaire à la montée du boudin sur le rail, risque très faible, hormis le cas d'un gauchage excessif de la voie [ALIAS (1998)].

Ce risque est imputable à une augmentation de la force transversale Y, provenant d'une contribution de la force centrifuge non compensée : $H = M \cdot \gamma_{nc}$ [GAUTIER (1999)].

Les règles de sécurité contre le déraillement figurent dans la Fiche UIC 518. La SNCF, s'impose, comme la plupart des autres administrations européennes [UIC (1998-06)], le respect de la condition :

$$Y/Q < 0,8$$

3.2. Risque de renversement ou basculement [GAUTIER (1999)]

Il peut résulter d'un délestage de la roue intérieure, sous l'effet de la force centrifuge [cf. Figure 2].

L'équation du moment quasi-statique s'écrit :

$$\begin{aligned} M \cdot h \cdot \gamma_{nc} &= \Delta Q \cdot B \\ \Delta Q/Q^0 &= 2 h I / B^2 \end{aligned}$$

où h est la hauteur du centre de gravité par rapport au plan de roulement.

La valeur minimale à retenir pour limite $(\Delta Q/Q^0)_{lim}$ ne fait pas encore l'unanimité. Certaines administrations recommandent la valeur 0,7 afin d'assurer une marge de sécurité pour d'autres facteurs (comme des vents transverses) ; d'autres administrations se satisfont de la valeur 0,9.

De ces conventions résulte la possibilité de définir une valeur limite de I (cf. Tableau 1)

$$I \leq [B^2/2h] (\Delta Q/Q^0)_{lim}$$

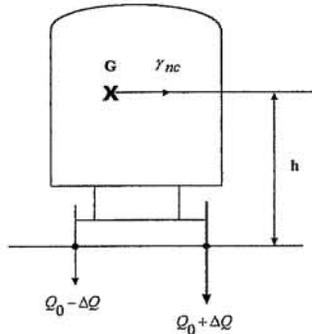


Figure 2 - Remversement d'un véhicule [GAUTIER (1999)]

Hauteur (h) du centre de gravité du véhicule	1750 mm	2500 mm
DQ/Q = 0,7	I lim = 450 mm	I lim = 315 mm
DQ/Q = 0,9	I lim = 580 mm	I lim = 400 mm

Tableau 1 – Valeur limite de l'insuffisance de dévers pour le risque de renversement [GAUTIER (1999)]

Par ailleurs, cette fois pour l'équilibre statique, une condition de dévers maximal : $D \leq D_{max}$ doit être respectée pour le cas de détresse (immobilisation d'une rame) en courbe. La valeur fixée actuellement [PRUD'HOMME (1970)] est $D_{max} = 180$ mm.

4. RÉSISTANCE DE LA VOIE

4.1. Considérations quasi-statiques

(a) Résistance aux efforts verticaux [ALIAS (1998)]

La résistance aux efforts verticaux est paramétrée par plusieurs coefficients :

- le module de voie (rapport de la charge supportée par la voie à son enfoncement),
- la réaction de traverse r (rapport de la charge d'une traverse à son enfoncement),
- le coefficient de ballast qui traduit la pression moyenne sur la surface d'appui de la traverse.

En statique, la représentation assez schématique de l'équation de Zimmermann, simple calcul de résistance des matériaux, donne cependant des indications intéressantes sur les facteurs sur lesquels l'on peut agir pour améliorer une situation donnée : un bon coefficient de ballast est plus important pour la tenue du nivellement que pour la fatigue du rail ; l'augmentation du travelage améliore la tenue du nivellement ; l'augmentation du poids du rail permet de lutter contre sa fatigue et de résister aux effets de l'augmentation de la charge par essieu.

Relation entre poids métrique du rail et charge par essieu [ALIAS (1998)]

ALIAS (1998), se basant sur les statistiques de nombreux réseaux, propose la relation empirique suivante entre la charge par essieu P (en tonnes) et le poids métrique du rail R (en kg) :

$$R = 2,25 P + 3$$

Son auteur fait cependant observer que cette relation ne s'applique pas aux circulations à grande vitesse, du fait de la nécessité, en ces circonstances, de limiter au maximum le fléchissement du rail entre supports, et d'adopter pour ce faire des rails lourds (profil 60 kg).

(b) Résistance aux efforts latéraux

La résistance limite de la voie a été une des préoccupations importantes de la SNCF. Les longues études conduites par PRUD'HOMME (1967) ont permis de formuler analytiquement cette dernière.

Il est en effet possible de représenter cette résistance L par le modèle mathématique suivant, dont les coefficients sont maintenant bien connus :

$$L = [a + bP] [1 + c \log (1 + T)]$$

avec :

- P : charge d'essieu
- T : tonnage ayant circulé sur la voie depuis la dernière opération de nivellement
- a, b, et c sont des coefficients caractéristiques, à la fois de l'armement et de la méthode d'entretien utilisée pour le nivellement.

Les règles de circulation sur une ligne à grand trafic ne pouvant s'accommoder de restrictions de vitesse sur un chantier d'entretien, on doit considérer qu'un train rapide peut être le premier à franchir une zone venant d'être nivelée. La condition de sécurité à retenir étant la valeur la plus faible, la résistance limite minimale est donnée par :

$$L = a + bP$$

Cette résistance limite a, selon le travelage, deux expressions (L et P étant exprimées en tonnes) :

- $L = 1 + P/3$ (pour une voie sur traverses en bois entretenue par bourrage)
- $L = 1,5 + P/3$ (pour une voie sur traverses en béton entretenue par bourrage)

Dans sa présentation des résultats expérimentaux, PRUD'HOMME (1967) suggère d'appliquer à ces expressions un coefficient 0,85, de manière à éloigner la valeur limite proposée de plus de trois écarts-type des résultats expérimentaux les plus sévères.

Ainsi, l'expression la plus sécuritaire est-elle :

$$L = 0,85 (1 + P/3)$$

L'ensemble de ces expressions et de leurs variantes est universellement connu sous le terme de formule de Prud'homme dont la formulation générique est :

$$\Sigma Y = \alpha (10 + P/3)$$

avec :

- ΣY : somme des efforts latéraux sur la voie (kN)
- P : masse par essieu (kN)
- α : variable de 0,85 à 1,00 avec tendance à être unifié à 1,00 [UIC (1998-06)].

(c) Défauts géométriques de la voie

Les mesures systématiques effectuées plus récemment (1994) à l'occasion des essais en ligne du pendulaire VT 610 de la DB-AG, ont permis d'établir l'existence d'une étroite corrélation entre les forces latérales exercées sur la voie et ses défauts.

La qualité de la voie est, pour ce faire, exprimée par l'indicateur de défauts U :

$$U = 2NT + D$$

avec :

- NT : écart-type des défauts d'alignement,
- D : écart-type des défauts de dévers.

Quand les défauts s'amplifient, U croît et l'insuffisance de dévers autorisé décroît [GAUTIER (1999)].

C'est à partir de l'analyse harmonique des défauts de nivellement et de dressage entreprise par les équipes de recherche de la SNCF qu'ont été menées à bien l'ensemble des recherches sur la résistance de la voie conduites en vue de circulations à grande vitesse.

Ces spectres se présentent sous la forme d'un fond continu s'ajustant à des courbes régulières et auquel se superposent des raies à 18 mètres de longueur d'onde (qui correspondent aux soudures de coupons de rail) et leur harmonique à 9 mètres [PRUD'HOMME (1970)].

4.2. Réactions dynamiques aux mouvements verticaux [PRUD'HOMME (1970)]

A partir des spectres de défauts, la théorie des vibrations aléatoires, appliquée aux mouvements des masses non suspendues et suspendues des véhicules, permet de calculer les mouvements des accélérations ou des efforts, et pratiquement de saisir leur évolution.

L'étude de ces mouvements permet d'évaluer, d'une part les surcharges dynamiques verticales sur les rails, d'autre part les accélérations verticales de caisse ou de bogies.

(a) Masses non suspendues

L'étude des mouvements verticaux des masses non suspendues fait apparaître que les surcharges dynamiques en résultant augmentent proportionnellement à la vitesse, à l'amplitude des défauts, et à la racine carrée de la masse et de la rigidité verticale de la voie [PRUD'HOMME (1970)].

Ainsi, la valeur quadratique moyenne σ des efforts exercés sur la voie, et par conséquent sur la plateforme, par une formule remarquablement simple [ALIAS (1998)] :

$$\sigma = k V \sqrt{m h}$$

avec :

- k : coefficient lié à la qualité géométrique de la voie,
- V : vitesse
- m : masse non suspendue
- h : rigidité verticale de la voie.

Ces surcharges dynamiques atteignent plusieurs tonnes aux vitesses élevées. Pour les limiter, il est de la plus haute importance de chercher, au fur et à mesure que la vitesse s'élève, à réduire les masses non suspendues [PRUD'HOMME (1970)].

Par ailleurs, du fait des autres facteurs sur lesquels les projeteurs ont peu de maîtrise, la masse non suspendue est le paramètre primordial de l'augmentation des vitesses de circulation.

Ainsi, la formule montre que l'on peut passer de la vitesse de 200 km/h à celle de 300 km/h sans aggraver la fatigue de la voie en adoptant, pour les TGV, une masse non suspendue moitié moindre (poids d'essieu de 0,8 tonne) que celle d'une locomotive de vitesse (1,6 tonne).

La qualité k de la voie jouant également un grand rôle, il y a avantage, sur les lignes à grande vitesse, de s'affranchir de circulations marchandises aux essieux trop lourds et aux suspensions rustiques [ALIAS (1998)] ; corrélativement PRUD'HOMME (1970) appelle l'attention sur l'intérêt, pour atténuer les effets des surcharges dynamiques verticales, d'augmenter, dans toute la mesure du possible, l'élasticité verticale de la voie (par épaissement du ballast et l'interposition, entre rail et traverse, de semelles élastiques).

(b) Masses suspendues

Les enseignements essentiels des études sur les oscillations des masses suspendues sont, selon PRUD'HOMME (1970), les suivants :

1. Les accélérations verticales des masses suspendues dues aux défauts géométriques de la voie, représentés par leur spectre de fond continu, croissent avec la vitesse, mais moins vite qu'elle.
2. Cette croissance est d'autant moins rapide que la fréquence propre des oscillations verticales est plus faible. L'influence de cette fréquence propre est considérable, car une réduction relativement modique de cette fréquence propre peut annuler facilement l'effet de l'augmentation de vitesse.
3. L'effet d'une amélioration de la qualité géométrique de la voie va s'atténuant au delà d'une certaine vitesse (liée à la fréquence propre). Les travaux d'entretien deviennent alors de moins en moins efficaces.

Ainsi, le résultat obtenu par une faible diminution de la fréquence propre du véhicule (de l'ordre de 1 Hz pour les voitures modernes) est bien supérieur aux effets de l'élévation à grands frais de la qualité de voie. Avec cette fréquence propre de 1 Hz, les résonances pour les longueurs d'onde de 18 et 9 mètres évoquées en 4.1. se produisent à 32 et 65 km/h, et on constate au delà, à vitesse élevée et en régime supercritique, l'absence de perception de ces joints ou soudures.

Subsiste toutefois le problème des masses semi-suspendues dont la fréquence propre est plus élevée que celle de la caisse. C'est essentiellement le galop du bogie qui est à craindre, dont la fréquence propre se situe entre 5 et 10 Hz, selon qu'il s'agit d'un bogie moteur lourd ou d'un bogie porteur plus léger.

On notera par exemple, pour ce qui concerne les circulations à grande vitesse, qu'avec une fréquence propre de 5 Hz, la résonance se produit à 160 km/h pour la raie de 9 m, et à 320 km/h pour la raie de 18 mètres ; l'avantage des longues barres soudées sur la voie traditionnelle est ici particulièrement évident du fait de la modicité d'amplitude d'un défaut de soudure en regard de celle d'un joint de rail.

Avec la réduction de masse des bogies et l'amélioration de la suspension primaire, la part des surcharges dynamiques due aux oscillations des masses non suspendues reste dans des limites acceptables sur une voie équipée de longs rails soudés [PRUD'HOMME (1970)].

4.3. Réactions dynamiques aux mouvements transversaux

Le problème des oscillations transversales est plus difficile que le précédent, du fait du mouvement complexe que constitue le lacet de bogie résultant du jeu des roues dans la voie.

Ce lacet de bogie est certes influencé par les défauts de tracé de voie, mais présente une fréquence sensiblement proportionnelle à la vitesse. C'est le lacet de bogie qui constitue l'excitation des mouvements de ballant et de roulis de la caisse.

Les principes adoptés pour les véhicules modernes consistent à conférer au lacet de caisse (et aux fréquences couplées de ballant/roulis) une valeur basse pour, qu'au dessus d'une certaine vitesse critique (assez faible), la fréquence du lacet de bogie s'éloigne des fréquences de caisse.

Le problème est donc celui de la stabilité du bogie. Pour que cette condition soit satisfaite (amortissement de ses mouvements oscillatoires), il faut que sa vitesse critique propre soit suffisamment élevée par rapport à celles pratiquées [PRUD'HOMME (1970)].

Bien que les formules mathématiques ne permettent pas de calculer la vitesse critique d'un bogie donné, elles indiquent la manière d'agir sur ces paramètres pour augmenter cette vitesse, savoir :

- diminution de la conicité équivalente (réduction à 1/40 du profil de bandage, lequel tend cependant rapidement vers le profil d'usure) ;
- diminution de la masse du bogie ;
- augmentation de l'empattement du bogie (malheureusement contradictoire avec la mesure précédente) ;
- augmentation de la raideur du couple de rappel du bogie [ce qui rend plus difficile la circulation dans les courbes de faible rayon (voies de gare ou de garages)] [ALIAS (1998)].

4.4. Quantification approchée des effets dynamiques transversaux [PRUD'HOMME (1970)]

Les efforts dynamiques transversaux H se présentent sous la forme d'une somme de deux termes :

- un terme quasi-statique H_c qui est dû à la part non compensée de la force centrifuge, proportionnel à l'insuffisance de dévers et au poids de l'essieu.
- un terme aléatoire H_a qui dépend (a) des caractéristiques du véhicule et de sa stabilité propre, (b) de la qualité géométrique de la voie en nivellement, dressage et écartement, (c) des caractéristiques mécaniques de la voie en vertical et en transversal.

Le terme quasi-statique H_c s'écrit :

$$H_c = P (I / B) : = (P \cdot I) / 1500$$

Le terme aléatoire H_a a ses valeurs de crête sensiblement majorées, en alignement comme en courbes, par :

$$H_a = (P \cdot V) / 1000$$

où V est exprimé en km/h et P comme H_a en tonnes.

La condition de stabilité s'écrit [pour le cas des traverses en béton et un coefficient de Prud'homme égal à l'unité (cf § 4.1.b)] :

$$H_c + H_a < 1,5 + P/3$$

$$\frac{PI}{1500} + \frac{PV}{1000} \leq 1,5 + \frac{P}{3}$$

$$\text{soit encore : } (I / 1500) + (V / 1000) < 1,5/P + 1/3$$

5. CONDITIONS DE CONFORT ET CONDITIONS TECHNIQUES DE TRACÉ

5.1. Voitures classiques [PRUD'HOMME (1970)]

La notion de confort fait intervenir non seulement les mouvements imposés au corps humain par le véhicule, mais aussi tout l'environnement, notamment le bruit ; mais le problème essentiel est celui de la fatigue provoquée par les mouvements des véhicules.

Deux cas sont à considérer : celui du voyageur assis et celui d'un voyageur debout (se déplaçant dans le couloir par exemple).

Dans le cas d'un voyageur assis, ce sont les accélérations aléatoires ressenties qui interviennent essentiellement. En adoptant comme critère l'espace de temps au bout duquel le voyageur commence à ressentir une sensation nette de fatigue, on constate qu'un régime d'accélération de 0,05 g de moyenne

quadratique à une fréquence de 1,4 Hz peut être supporté pendant 5 h 30 mn s'il n'agit que dans un plan vertical, et pendant 3 h 30 mn s'il agit dans un plan transversal.

Les valeurs moyennes atteintes dans les véhicules modernes circulant à vitesses élevées sont au plus de l'ordre de 0,025 g, et les valeurs de crête correspondantes sont inférieures à 0,07 g.

Dans le cas d'un voyageur debout, la situation est très différente. Un régime d'accélération aléatoire de 0,025 g est fort peu sensible, en revanche les valeurs d'accélération quasi-statiques résultant, soit, en vertical, des rayons de changement de pente, soit, en transversal, de la force centrifuge non compensée, et la vitesse à laquelle ces accélérations sont appliquées, créent une impression désagréable qu'il convient de limiter.

Les limites retenues à la SNCF sont fondées sur la constatation suivante : les accélérations dans le plan vertical agissent surtout au niveau viscéral et peuvent assez rapidement provoquer des nausées (surtout si elles sont dirigées vers le haut), tandis que, dans le plan transversal, ce sont surtout des problèmes d'équilibre qui interviennent et sont plus aisément supportés.

En résultent les limites suivantes :

- dans le plan vertical : $\gamma_v \leq 0,05$ g
- dans le plan transversal : $\gamma_t \leq 0,15$ g ; avec $d(\gamma_t)/dt \leq 0,10$ g/s.

Les limitations correspondantes pour le tracé de la voie ont été évaluées de la manière qui suit par PRUD'HOMME (1970).

(a) En ce qui concerne l'accélération, intervient sous la forme suivante le coefficient de souplesse s des voitures

$$\gamma_T = \frac{I}{1500}(1+s)$$

s étant voisin de 0,4, la limitation sur γ_t entraîne $I \leq 160$ mm.

(b) En ce qui concerne la variation d'accélération, qui se produit dans les entrées et les sorties de courbes, l'évaluation est plus complexe en raison du grand nombre de paramètres (variation du dévers, variation d'insuffisance, forme géométrique du raccordement et caractéristiques du véhicule). Une approche simplifiée aboutit cependant à l'expression (en g/s):

$$\frac{d\gamma_T}{dt} \leq \frac{1}{1500} \left[\frac{dI}{dt} + \frac{dD}{dt} \right]$$

La condition $(d\gamma_t)/dt \leq 0,10$ g/s conduit donc à faire en sorte que la variation totale de dévers soit inférieure à 150 mm/s ; les limites pour chacune de ces variations étant respectivement fixées ainsi :

$$dI/dt \leq 90 \text{ mm/s} ; dD/dt \leq 60 \text{ mm/s}$$

5.2. Caisses inclinables [GAUTIER (1999)]

Pour autant que les efforts dynamiques exercés sur la voie l'autorisent, la pendulation permet de relever les vitesses de circulation en courbe tout maintenant l'accélération transversale subie par le passager à des valeurs acceptables [cf. Figure 1].

Ce relèvement des vitesses entraîne inéluctablement une amplification des effets de défauts de voie sur le confort, défauts de voie auxquels on se doit de remédier par avance, et auxquels on ne peut totalement échapper. Cet état de fait explique en partie les sensations d'inconfort éprouvées par une partie des passagers des rames pendulaires.

Il est apparu cependant que la gêne éprouvée pouvait également résulter de la pendulation elle-même, du fait de l'amplitude des mouvements de balancement et d'une perception perturbée de l'horizon.

Les recherches en cours dans les administrations ferroviaires devraient permettre de mieux cerner ces phénomènes et d'en atténuer si possible les effets.

6. L'ÉTAT DE L'ART – QUELQUES ASPECTS

6.1. Conditions à respecter pour assurer la sécurité et le confort des circulations (règles françaises)

(a) Paramètres principaux

Dans le panorama qu'il dresse de la dynamique voie-véhicule, PRUD'HOMME (1970) recense les six conditions suivantes à respecter.

(I) Condition d'équilibre dynamique

$$R_{\min} = \frac{11,8 V^2}{I + D}$$

(II) Condition de sécurité [cf. Tableau 2]

$$I \leq 500 + \frac{2250}{P} - 1,5 V$$

(III) Condition de confort

$$I \leq 160 \text{ mm}$$

(IV) Condition de dévers maximal

$$D \leq 180 \text{ mm}$$

(V & VI) Conditions de progressivité des dévers

$$\frac{dI}{dt} \leq 90 \text{ mm/s} ; \quad \frac{dD}{dt} \leq 60 \text{ mm/s}$$

A ces conditions doit être adjointe la condition explicitée en [3.2.] [GAUTIER (1999)]

(VII) Condition de stabilité transversale dynamique

$$I \leq \frac{B^2}{2h} \left(\frac{\Delta Q}{Q_0} \right)_{\text{lim}}$$

P \ V	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h
	16 t	I < 415 mm R > 450 m	I < 340 mm R > 770 m	I < 265 mm R > 1400 m
20 t	I < 387 mm R > 470 m	I < 312 mm R > 820 m	I < 237 mm R > 1500 m	I < 162 mm R > 3100 m

Tableau 2 – Condition de sécurité(II) pour une voie sur traverses en béton [PRUD'HOMME (1970)]

(b) Contraintes majeures

En se référant au Tableau 2 des conditions de sécurité pour une voie sur traverses de béton relatif à la condition (II), PRUD'HOMME (1970) souligne combien la condition de confort $I \leq 160 \text{ mm}$ est plus restrictive que la condition de sécurité qui ne la rejoint que pour $P = 20 \text{ t}$ et $V = 300 \text{ km/h}$.

Il précise à cette occasion que, pour les lignes TGV (alors encore à l'état de projet), le rayon nominal des courbes fixé à 4000 m (les courbes minimales, considérées comme exceptionnelles, ayant leur rayon arrêté à 3200 m) réserve une marge considérable. Ainsi, dans ce cas où $I + D = 265 \text{ mm}$ (condition I), la répartition est annoncée comme devant être la suivante : $D = 180 \text{ mm}$ & $I = 85 \text{ mm}$. La faible valeur de I retire tout intérêt à la mise en oeuvre de véhicules pendulaires, excepté pour des prolongations de parcours au delà des lignes nouvelles.

Ce sont encore les conditions de confort qui, en régime transitoire, sont susceptibles d'inférer sur les conditions de circulation et de tracé. Ainsi que l'atteste le Tableau 3 des longueurs minimales de raccordement requises par la limitation de gradient de dévers, ces conditions semblent quelque peu restrictives pour des tracés sinueux et conduire à modifications pour certains d'entre eux.

V	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h
R	800 m	1400 m	2200 m	3200 m
λ	125 m	170 m	210 m	250 m

Tableau 3 – Rayons (R) et longueurs de raccordement (λ) minimaux imposés par la condition (I) [PRUD'HOMME (1970)]

6.2. Confrontation de quelques spécifications et usages dans les principales administrations ferroviaires et notamment française et italienne

Les indications et valeurs citées ci-après sont, sauf mention particulière, transcrites de UIC (1998-06).

(a) Voie

- (1) Rayon minimal pour pratiquer l'insuffisance de dévers
SNCF : 340 m ; FS : 250 m ; CFF & DB-AG : pas de rayon minimal
- (2) Dévers maximal
SNCF : 160 mm ; 180 mm (lignes TGV) [PRUD'HOMME (1970)]
FS : 160 mm ; CFF : 150 mm (exceptionnellement 180 mm) ; DG-AG : 180 mm
- (3) Pente maximale des dévers
SNCF : 2,1 mm/m ; FS : 2,5 mm/m ; CFF : 2 mm/m
- (4) Forme théorique du raccordement progressif
SNCF & FS : parabole cubique ; CFF & DB-AG : clothoïde
- (5) Longueur (forme analytique) des raccordements progressifs
SNCF, FS & DB-AG : absence de normes ; CFF : $L \leq 7,7 \text{ VD}/1000$ (6,7 exceptionnel)

(b) Interaction matériel roulant - infrastructure

- (1) Insuffisance de dévers normal (autorisée en exploitation, sur voie stabilisée)
SNCF : 500 mm (théoriquement), 390 mm (pratiquement)
FS : ~ 500 mm (700 mm pour renversement)
CFF : 275 mm ; DB-AG : 300 mm
- (2) Accélération transversale (m/s^2)
SNCF : 2,55 – 3,57 ; FS : ~ 3,27 ; CFF : 1,8 ; DB-AG : 1,9 ($V < 176 \text{ km/h}$)
- (3) Ordre de priorité des critères de sécurité (en cas de forte insuffisance de dévers)
Toutes ces administrations placent en tête le *déplacement latéral de la voie* (Prud'homme)
La SNCF place en second rang le *déraillement*, et au troisième le *renversement*, tandis que FS et CF font le choix inverse ; la DB-AG ne se prononce pas sur les second et troisième rangs.

(c) Confort

- (1) Accélération latérale au niveau du passager (m/s^2) [le premier chiffre indique la valeur théorique, le second la valeur pratique]
SNCF : 1,23 ; FS : 1,0 – 1,2 ; CFF : 1,0 ; DB-AG : 1,0 – 1,3
- (2) Accélération verticale (m/s^2) [réponse au questionnaire partant sur les matériels pendulaires]
SNCF & CFF : absence de réponse ; FS : 0,4 ; DB-AG : 0,24

On remarquera que, pour ce qui concerne la SNCF, la valeur indiquée correspond à une insuffisance de dévers de $I = 188 \text{ mm}$.

6.3. Etat de l'art en matière de pendulation [UIC (1998-06)]

Le premier rapport sur l'état de l'art de la technologie de la caisse inclinable (dressé par l'Union Internationale des Chemins de fer) présente une utile synthèse des connaissances en la matière dont ont été dégagées les analyses et recommandations qui suivent.

- (1) L'introduction de trains à caisse inclinable est subordonnée au respect des contraintes (limitations d'efforts sur la voie ou limitations de vitesse) imposées pour des raisons de sécurité par le tracé et la résistance de la voie.
- (2) L'augmentation de vitesse accordée au matériel pendulaire résulte de sa libération des contraintes liées au respect du confort des passagers ; elle est rendue possible par les caractéristiques soignées (allègement et suspension) de ces matériels.
- (3) L'inclinaison de la caisse par rapport au plan de la voie n'a des effets que sur le confort des passagers, et non sur la sécurité de marche du train.
- (4) L'efficacité de la caisse inclinable, en termes de réduction des temps de parcours à confort égal, est faible si l'accélération non compensée (ou son équivalent l'insuffisance de dévers) admise pour les

trains conventionnels sur le ligne est déjà forte [la variation entre 0,5 (pour les BV-SJ) à 1,23 m/s² (pour la SNCF), des limites admises pour les accélérations non compensées, explique le différences d'intérêt des utilisateurs potentiels de la pendulation].

Les potentialités d'accroissement de vitesses en courbes restent néanmoins substantielles puisque les insuffisances de dévers praticables avec les trains à technologie pendulaire existants peuvent être presque doubles (245 à 300 mm) de celles admises pour les trains conventionnels (77 à 188 mm).

- (5) A accélération non compensée égale pour le voyageur, et sans modification de la vitesse nominale de ligne, la vitesse dans une courbe de rayon donné peut être augmentée d'environ 15-20 % ; l'augmentation des vitesses commerciales en résultant peut, en conséquence, atteindre 10 à 15 % sur des lignes sinueuses.
- (6) Comme conséquence de l'accroissement des vitesses en courbe et afin de limiter l'agression du rail, les trains à caisses inclinables doivent faire l'objet de perfectionnements en matière de bogies à essieux orientables, suspension latérale active, réduction de masses non suspendues, et réduction de masse par essieu.

6.4. Classification et réglementation italiennes en matière de vitesses de circulation [TESTA (1999)]

(a) Vitesse limite nominale de ligne

La vitesse limite nominale dans une courbe est définie comme la vitesse correspondant à une accélération non compensée de 0,6 m/s² avec un dévers de 160 mm, valeur maximale admise.

La vitesse limite nominale V_t d'une section de ligne est la vitesse limite correspondant à celle de sa courbe de plus petit rayon.

(b) Vitesses limites de circulation et catégories correspondantes

En satisfaisant à certaines conditions, certaines lignes sont ouvertes à des circulations dont les vitesses limites sont supérieures aux vitesses limites nominales.

Ces conditions sont précisées par classes désignées "Rang A", "Rang B", "Rang C", classes auxquelles a été adjointe une classe nouvelle relative aux circulations pendulaires désignée "Rang P" [cf. Tableaux 4].

[synthesis]		
Rang A	Rang B	Rang C
$VA \leq V_t$	$VB \leq 1,06 V_t$	$VC \leq 1,11 V_t$
a.n.c max = 0,6 m/s ²	a.n.c max = 0,8 m/s ²	a.n.c max = 1,0 m/s ²
$VA \leq 140 \text{ km/h}$	$VB \leq 160 \text{ km/h}$	$VC \leq 200 \text{ km/h}$
$\psi \leq 0,25 \text{ m/s}^3$	$\psi \leq 0,35 \text{ m/s}^3$	$\psi \leq 0,40-0,60 \text{ m/s}^3$
$\omega \leq 0,036 \text{ rad/s}$	$\omega \leq 0,038 \text{ rad/s}$	$\omega \leq 0,040 \text{ rad/s}$

Rang P
$VP \leq 1,18 VC$
a.n.c. max = 1,8 m/s ²
$VP \leq 200 \text{ km/h}$
(in "Direttissima" Rome - Florence $VC = VP = 250 \text{ km/h}$)

Tableaux 4 (a) et (b) – Classement des lignes ferroviaires italiennes [TESTA (1999)]

Ces classes sont essentiellement définies à partir des valeurs maximales admises pour l'accélération transversale non compensée (a.n.c.), selon une progression dont l'échelonnement des vitesses limites maximales autorisées (VA, VB, VC et VP) est reproduit ci-après.

- "Rang A" : a.n.c. max : 0,6 m/s² ; $VA \leq V_t$
- "Rang B" : a.n.c. max : 0,8 m/s² ; $VB \leq 1,06 V_t$
- "Rang C" : a.n.c. max : 1,0 m/s² ; $VC \leq 1,11 V_t$
- "Rang P" : a.n.c. max : 1,8 m/s² ; $VP \leq 1,18 V_t$

On remarquera par ailleurs qu'à chacune de ces classes est associée une vitesse plafond.

L'ensemble des lignes des chemins de fer italiens relève de cette classification (auxquelles des limitations peuvent être apportées à titre permanent ou temporaire en fonction de circonstances particulières) ; ainsi, si la totalité des lignes ressortit au "Rang A" (correspondant à la vitesse nominale spécifique), seules les plus importantes d'entre elles sont ouvertes aux deux dernières des quatre catégories.

(c) Ouverture de lignes aux circulations pendulaires

Les principes ayant régi aux FS la conception du matériel à caisse inclinable résident dans l'allègement du matériel et des charges dynamiques, de manière à n'impliquer aucune disposition ou contrainte d'exploitation, ni aménagement particulier de la voie.

La faible charge par essieu (de l'ordre de 12 t pour les essieux porteurs à 14 t pour les essieux moteurs), les dispositifs de suspension, ainsi que le recours à la suspension active, atténuent les efforts transversaux sur la voie qui restent largement inférieurs à ceux exercés par des circulations classiques lourdes [cf diagramme de la Figure 3].

L'ouverture d'une ligne à l'exploitation pendulaire en est facilitée d'autant, la condition fondamentale n'étant autre que d'être ouverte à la circulation de trains de qualité à la vitesse maximale autorisée, en respectant les paramètres fondamentaux définis dans la Fiche UIC 518 (notamment lignes de "Rang C" correspondant à une insuffisance de dévers de 153 mm et à une accélération transversale non compensée de $1,0 \text{ m/s}^2$).

6.5. Vers une classification française [GAUTIER (1999)]

En France, la SNCF a entrepris, sur 5000 km de lignes, des investigations qui semblent conduire à des gains de temps globaux par pendulation de l'ordre de 11 à 15 %.

A ce stade des investigations, les valeurs-limite globales retenues sur le réseau SNCF pour l'insuffisance de dévers sont sommairement résumées par le Tableau 5.

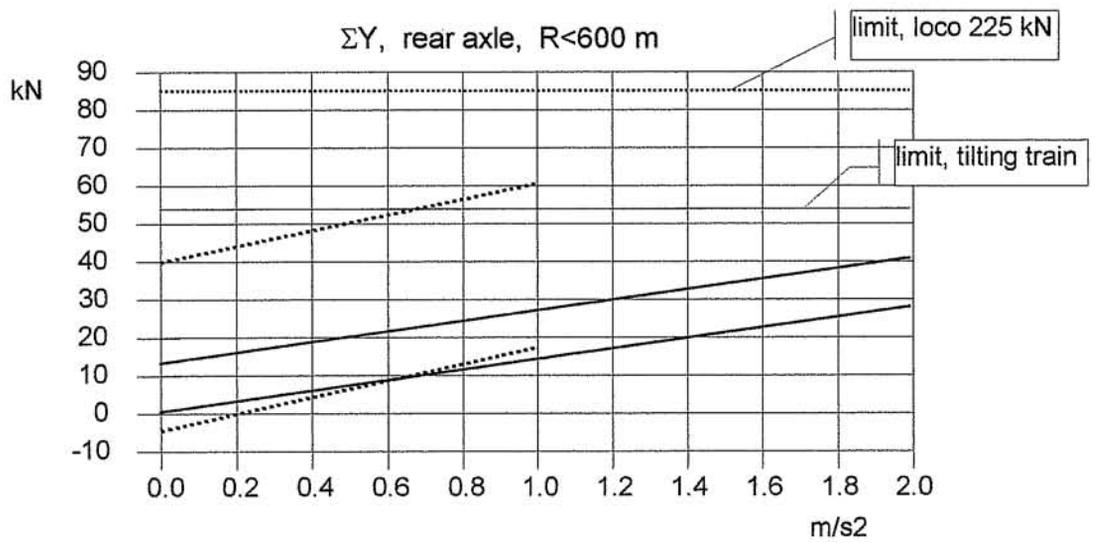
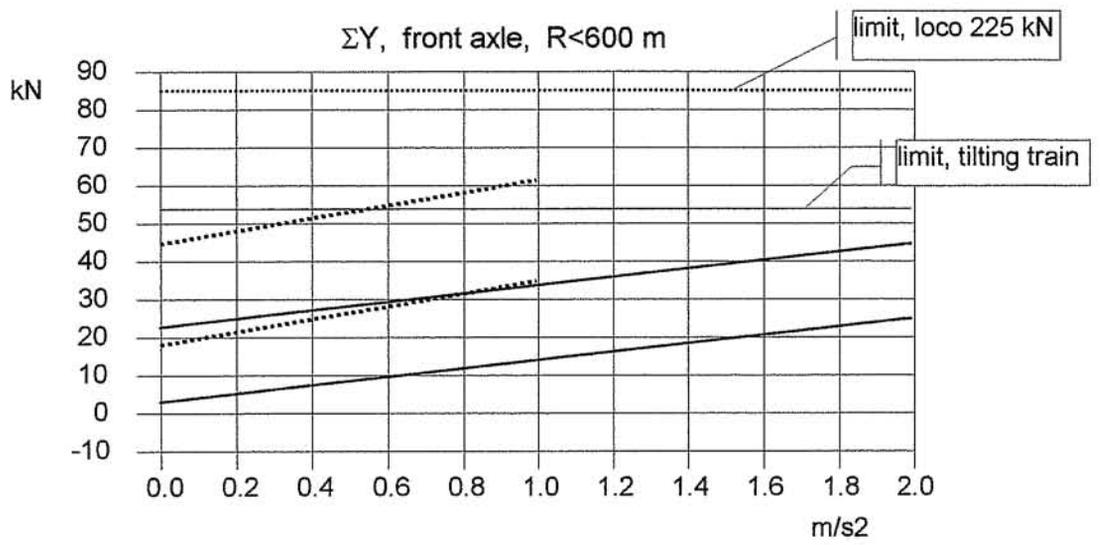


Figure 3 – Efforts transversaux respectivement exercés sur la voie par les essieux (frontal et arrière) d'une locomotive (22,5 t/essieu) et d'une rame pendulaire

[TESTA (1999)]

	Track class as defined by present speed limit (km/h)	Maximum allowable cant deficiency for tilting trains (mm)
Heavy concrete sleepers rail > 50 kg/m	220	260
	160	260
	140	250
	120	240
	100	230
Rail < 50 km/m, wooden sleepers, lighter concrete sleepers Lighter track equipment	Same as above	as above per class, but - 20 mm
	160 - 100	200

Tableau 5 – Valeurs provisoires des insuffisances de dévers envisageables sur le réseau SNCF [GAUTIER (1999)]

RÉFÉRENCES

ALIAS Jean (1998)

Cent vingt ans de voie ferrée

Revue Générale des Chemins de Fer ; ISSN 0035-3183 ; Elsevier, Paris ; n° 7-8 "120^{ème} anniversaire", juillet-août 1998 ; pp. 39-49.

GAUTIER Pierre-Etienne (1999)

[Directeur de l'Unité de recherches « Physique du système ferroviaire et confort » à la SNCF]

Review of relations between track parameters, running safety and passenger comfort

UIC-UNIFE-ERRI Interactive Seminar « Can your railway benefit from tilting train technology » ; Paris 6-7 May 1999.

European Rail Research Institute, Utrecht (NL) ; preprint 10 pages.

PRUD'HOMME André (1967)

La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant

Revue Générale des Chemins de Fer ; Paris 1967 ; 86^o année ; pp. 1-23.

PRUD'HOMME André (1970)

La Voie

Revue Générale des Chemins de Fer ; Paris 1970 ; 89^o année ; pp. 56-72.

TESTA Mario (1999)

[Armamento e Opere d'Arte, Direzione tecnica, Divisione Infrastrutture ; FS Roma]

Requirements on infrastructure maintenance and track geometry by higher curving speed

UIC-UNIFE-ERRI Interactive Seminar « Can your railway benefit from tilting train technology » ; Paris 6-7 May 1999.

European Rail Research Institute, Utrecht (NL) ; preprint 8 pages.

UIC (1998-06)

Premier rapport sur l'état de la technologie de la caisse inclinable

Union Internationale des Chemins de fer (UIC) ; Direction Grande Vitesse ; Paris, juin 1998 ; 123 pages.

