

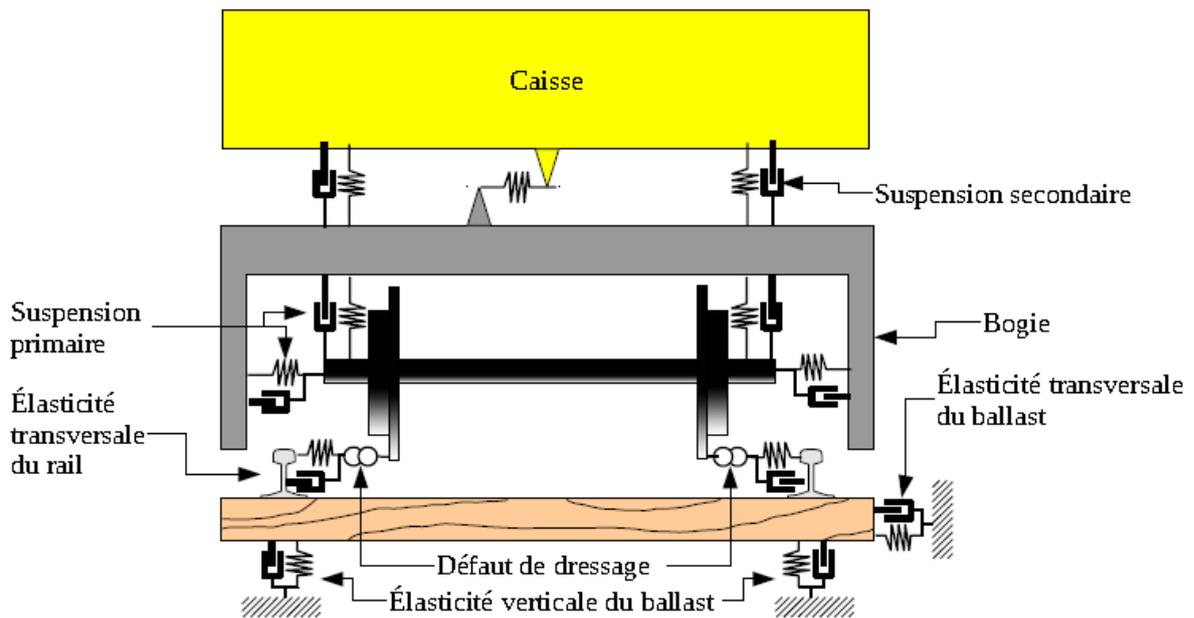
Mécanique et pose de la voie

GÉNÉRALITÉS

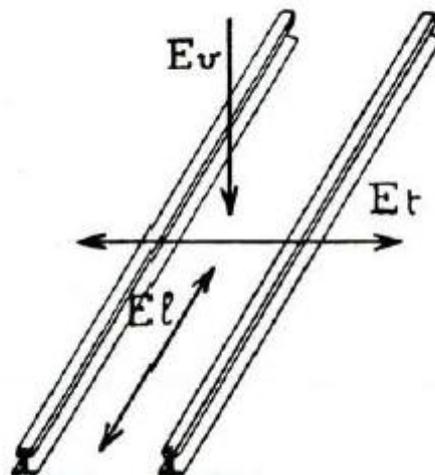
La voie est constituée par un assemblage d'éléments d'élasticités et amortissements variables qui transmettent à la plateforme, elle-même déformable, la charge dynamique des roues.

La voie supporte des efforts verticaux, transversaux et longitudinaux (voir la figure).

Le système ferroviaire peut être représenté comme suit :



Les rails reçoivent directement les efforts qui s'exercent sur la voie, ces efforts sont de deux origines ;



Efforts d'origine mécanique :

- Les efforts verticaux **Ev** : Les efforts statiques dus à la charge des roues des véhicules, et les efforts dynamiques.
- Les efforts transversaux **Et** : Ces efforts transversaux sont provoqués par la circulation en courbe et par les mouvements de lacet. De tous ces efforts transversaux, ce sont les chocs qui sont les plus dangereux.
- Les efforts longitudinaux **El** : Le mouvement de progression de la locomotive obtenu par l'adhérence des roues motrices sur le rail provoque une réaction qui tend à faire cheminer le rail en sens contraire du mouvement. ainsi des efforts longitudinaux sont dus aux effets du freinage.

Aux joints, les chocs de toutes les roues du train sur le bout des rails tendent au contraire à déplacer le rail vers l'avant.

Efforts d'origine thermique :

- Les efforts d'origine thermique sont dus aux effets de la dilatation provoquée par la variation de température, ils s'exercent dans le sens longitudinal.

A) Les efforts verticaux Ev : sont de deux types :

1) Les efforts statiques :

Les efforts statiques dus à la charge des roues des véhicules. La charge maximum par essieu c'est-à-dire la charge maximale qui peut être admise sur chaque essieu du véhicule en fonction des caractéristiques de l'infrastructure.

2) Les efforts dynamiques:

Les efforts dynamiques dans une locomotive à vapeur en mouvement, la charge statique peut s'accroître considérablement:

- par l'action de la composante verticale de l'effort oblique des bielles motrices
- par les effets d'inertie des pièces en mouvement liées à la roue (équibrage éventuellement insuffisant des pièces à mouvement rotatif, effet des contrepoids rotatifs d'équilibre des pièces à mouvement alternatif) ;
- la répartition du poids de la locomotive entre les essieux varie par suite des dénivellations accidentelles des rails ;
- en courbe, sous l'effet de la force centrifuge (généralement incomplètement équilibrée par le dévers), la charge d'un même essieu se répartit inégalement entre les deux roues.

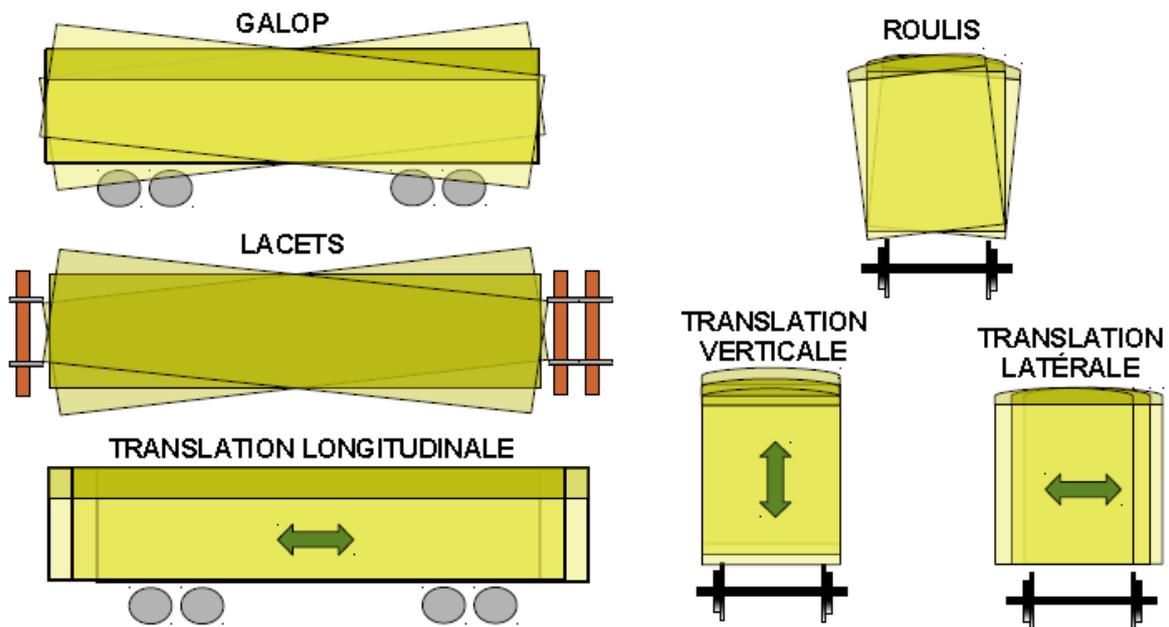
Pour tenir compte de la vitesse (effets d'impact), l'ingénieur hollandais Driessen applique un coefficient de vitesse (impact dynamique) C_v : $C_v = 1 + (V^2 / 30000)$; V (km/h)

B) Les efforts transversaux E_v :

- Ces efforts transversaux sont provoqués par la circulation en courbe et par les mouvements de lacet.
- Quand ces efforts transversaux sont suffisants pour vaincre le frottement, la roue glisse sur le rail et c'est alors un choc du mentonnet du bandage qui se produit contre la face latérale du bourrelet du rail.
- De tous ces efforts transversaux, ce sont les chocs qui sont les plus dangereux.

C) Les effort longitudinaux E_l :

- Le mouvement de progression de la locomotive obtenu par l'adhérence des roues motrices sur le rail provoque une réaction qui tend à faire cheminer le rail en sens contraire du mouvement.
- Aux joints, les chocs de toutes les roues du train sur le bout des rails tendent au contraire à déplacer le rail vers l'avant.
- Les effets de la dilatation s'exercent également dans le sens longitudinal.

Principaux mouvements affectant un véhicule ferroviaire :**Efforts supportés par la voie – phénomènes d'interaction véhicule – voie**

La voie supporte des efforts verticaux, transversaux et longitudinaux. Les efforts longitudinaux n'ont que peu d'influence sur la superstructure, les autres (efforts verticaux, transversaux) ont des actions déterminantes sur les éléments constitutifs.

Charge par essieu :

La charge par essieu, la charge totale annuelle et la vitesse constituent les paramètres fondamentaux dans l'étude des efforts et de la fatigue supportés par la voie.

En fonction des caractéristiques qui leur sont propres (masse du rail, espacement des traverses), les voies sont classées en catégories par l'U.I.C. :

- A : 16 t par essieu.
- B : 18 t par essieu.
- C : 20 t par essieu.
- D : 22,5 t par essieu.
- E : 25 t par essieu.

D'autres réseaux admettent des charges supérieures : 25 à 32 t voir 35 tonnes.

Ces catégories sont elles-mêmes décomposées chacune en sous-groupes d'indices 2, 3, 4,5 et 6, caractérisant la charge répartie au mètre linéaire sur les ouvrages d'art (masse totale du véhicule divisée par la longueur mesurée entre les extrémités des tampons non serres).

- Sous-catégorie 2 = 6,4 t/m.
- Sous-catégorie 3 = 7,2 t/m
- Sous-catégorie 4 = 8,0 t/m
- Sous-catégorie 5 = 7.2 t/m
- Sous-catégorie 6 = 8.8 t/m

L'ensemble des lignes de la S.N .C.F. est classé en catégorie C4.

Interaction véhicule – voie

Il existe entre voie et véhicule des interactions dynamiques très étroites puisque les véhicules exercent des efforts statiques et dynamiques sur la voie et que les imperfections de celle-ci réagissent sur la stabilité des véhicules.

Caractéristiques techniques de la voie

On caractérise l'élasticité de la voie sous charge à l'aide d'un certain nombre de paramètres.

- **Module de voie K :** $K = q / y$

- y : étant l'enfoncement correspondant à une charge q .
- q : charge uniformément répartie sur un rail.

- **Coefficient de réaction de traverse ρ :** $\rho = Q / y$

- y : étant l'enfoncement correspondant a la réaction verticale Q .
- Q : la réaction verticale d'une traverse par file de rail.

En désignant par « l » la distance entre deux traverses consécutives, « ρ » peut être relie a K par la relation suivante :

$$\rho = \frac{Q}{y} = K \cdot \frac{Q}{q} = K \cdot \frac{q \cdot l}{q} = K \cdot l$$

- Coefficient de ballast C :

$$C = \frac{\rho}{S} = \frac{Q}{S} \cdot \frac{1}{y} = \frac{P}{y}$$

- P : étant la pression moyenne exercée sur la surface S de la traverse.
- S : la surface d'appui de la traverse.

Défauts géométriques de la voie – Spectres de ces défauts

Les défauts du nivellement que ceux des véhicules (balourd de roue par exemple) provoquent des surcharges dynamiques aléatoires, de nombreuses mesures en voie ayant permis d'en définir les caractéristiques. L'analyse des défauts des principales données de la voie (nivellement et dressage de chaque file, écartement), est faite au moyen de voitures d'enregistrement.

Ci-après quelques défauts du rail :

1. Rail avarié : rail ni fissuré ni rompu qui présente d'autres défauts généralement situés en surface
2. Rail fissuré : rail présentant, en un point quelconque de sa longueur et quelles que soient les parties intéressées du profil, une ou plusieurs solutions de continuité, d'orientation quelconque, visibles ou non, dont le développement risque d'entraîner une rupture à échéance plus ou moins rapprochée
3. Rail rompu : tout rail qui s'est séparé en deux morceaux ou plus, et tout rail dont un fragment de métal s'est détaché en provoquant sur la table de roulement une lacune de plus de 50mm de longueur et 10mm de profondeur

Phénomènes verticaux

- Pour le comportement statique de la voie sous l'action des charges verticales : on dispose de deux facteurs pour conserver la qualité du nivellement, soit améliorer le coefficient de ballast, soit augmenter le nombre de traverses par kilomètre. Une traverse « danseuse » ne repose plus sur son moule de ballast sur lequel elle est brutalement appliquée aux passages des charges.

- Le méplat d'une roue est constitué par une partie plane sur le cercle de roulement suite à un enrayage. Le RIV (Réglementation Internationale des Wagons) a limité la longueur du méplat à 85mm pour une roue d'un mètre.

Phénomènes transversaux

1. Cinématique de l'essieu dans la voie : la solidarité des deux roues d'un même essieu impose une conicité des bandages qui limite dans les courbes les phénomènes de glissement

en permettant des cercles de roulement de diamètres différents proportionnels aux chemins à parcourir. L'essieu, dans un mouvement de lacet, peut occuper diverses positions.

2. Contact rail-roue :

Lorsqu'une roue roule sur un rail, le contact se fait par une petite surface de forme elliptique Pseudo-glissement. Conicité équivalente

3. Phénomène dynamique de lacet

D'autres phénomènes (frottement entre caisse et bogie, jeu entre essieu et boîte d'essieu) accentuent encore la non linéarité du phénomène compliqué enfin par les chocs des boudins sur les rails.

4. Résistance de la voie aux efforts transversaux

L'influence des divers facteurs de déstabilisation transversale de la voie :

- Vitesse
- Charge d'essieu
- Serrage des attaches
- Type de voie
- Contraintes thermiques
- Stabilisation de la voie (opération d'entretien)

En effet, si l'on considère un véhicule stable, les efforts transversaux qu'il exerce sur la voie peuvent être décomposés en :

- **Hc** : une force quasi statique due à la part non compensée de la force centrifuge dans les courbes.

$$Hc = \alpha \cdot \frac{P \cdot I}{1500}$$

P : poids par essieu en tonnes.

V : vitesse en km/h.

I : Insuffisance de dévers en mm.

α : un coefficient exprimant la répartition inégale de la force centrifuge entre les deux essieux.

- **Ha** : due aux mouvements aléatoires de l'essieu dans la voie provenant de l'irrégularité de celle-ci et des mouvements de lacets (caractéristiques des véhicules, dressage et nivellement de la voie, vitesse)

$$Ha = \frac{P \cdot V}{1000}$$

P : poids par roue en Newton.

V : vitesse en km/h.

Les relations utiles entre devers, vitesse et rayon de courbe en assurant la condition de stabilité.

$$H_e + H_a \leq H \text{ limite}$$

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

Vibrations des voies aux passages des charges roulantes

La voie ferrée, aux passages des charges roulantes, est soumise à un ébranlement du sol et un bruit intense dus aux phénomènes de glissement roue – rail , et aux irrégularités du contact de roulement.

Calcul des rails

Calcul de la section du rail

L'étude mathématique des conditions de sollicitation du rail est très difficile. Rationnellement, on devrait calculer le rail comme une poutre continue reposant sur plusieurs appuis élastiques et parcourue par des charges mobiles. Ces calculs sont complexes.

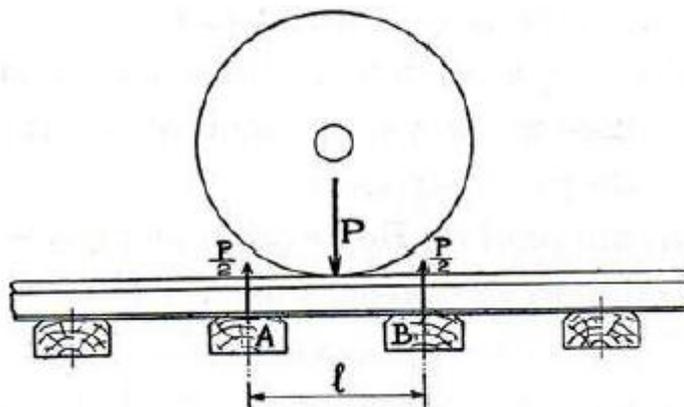
En pratique, on se borne aux deux hypothèses suivantes pour déterminer le moment fléchissant maximum :

- 1) Si l'on admet que le rail est simplement appuyé sur les traverses, le moment de flexion maximum est :

$$M1 = \frac{P}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{P.l}{4}$$

P : poids de la roue la plus chargée.

l : écartement des appuis (traverses).



- 2) Si l'on estime que, le rail étant attaché aux traverses par les tirefonds, il existe une solidarité assez complète pour qu'on puisse considérer le rail comme encasté, le moment maximum au milieu de la travée est :

$$M_2 = \frac{P.l}{8}$$

- 3) l'hypothèse de l'encastrement est beaucoup trop favorable et n'est jamais réalisée dans la pratique. En fait, selon l'état du ballast, la solidité des attaches et surtout la position des roues sur les travées voisines, le rail peut se trouver dans tous les états intermédiaires entre l'encastrement et le simple appui.

On est amené à admettre un moment moyen :

$$M_{\text{moy}} = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{3 P.l}{16}$$

Calcul des contraintes dans le rail

Pour le calcul des éléments constitutifs de la voie, les appuis des longrines transversales sont remplacés par des traverses longitudinales de même surface, selon la théorie de ZIMMERMANN, et cela va permettre de déterminer les contraintes dans les champignons et les patins des rails.

Les rails sont considérés comme des longues poutres sur appuis élastiques avec un coefficient du ballast C . Le choix du coefficient du ballast doit être basé sur la plus mauvaise qualité de la plateforme sur le tronçon considéré.

Calcul des contraintes dans le patin du rail

La contrainte dans le patin du rail est : $\sigma = \frac{M_{\text{max}}}{W} \cdot (1 + 3d) \cdot \sum_i \mu_i$

M_{max} : Moment maximum dans le rail : $M_{\text{max}} = \frac{Q.l_r}{4}$

l_r : longueur fictive de référence de traverse longitudinale de même surface :

$$l_r = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot c}} \quad (\text{en cm})$$

E : module d'élasticité (N/cm²).

I : moment d'inertie du rail (cm⁴).

w : module de résistance (cm³).

C : coefficient du ballast (N/cm³).

B : largeur de référence de la traverse longitudinale fictive.

$$B = \frac{b \cdot (l - 50)}{2 \cdot S}$$

b : largeur de la traverse.

l : longueur de la traverse.

S : espacement des traverses.

Q : charge verticale par roue (KN)

d : coefficient tenant compte de la qualité de la voie (usure, déformation, qualité géométrique, vitesse de circulation...etc).

$$d = n \cdot \varphi$$

- **n= 0.1** : voie en très bon état.
- **n= 0.2** : voie en bon état.
- **n= 0.3** : voie en mauvais état.

φ : coefficient tient compte de l'influence de la vitesse de circulation

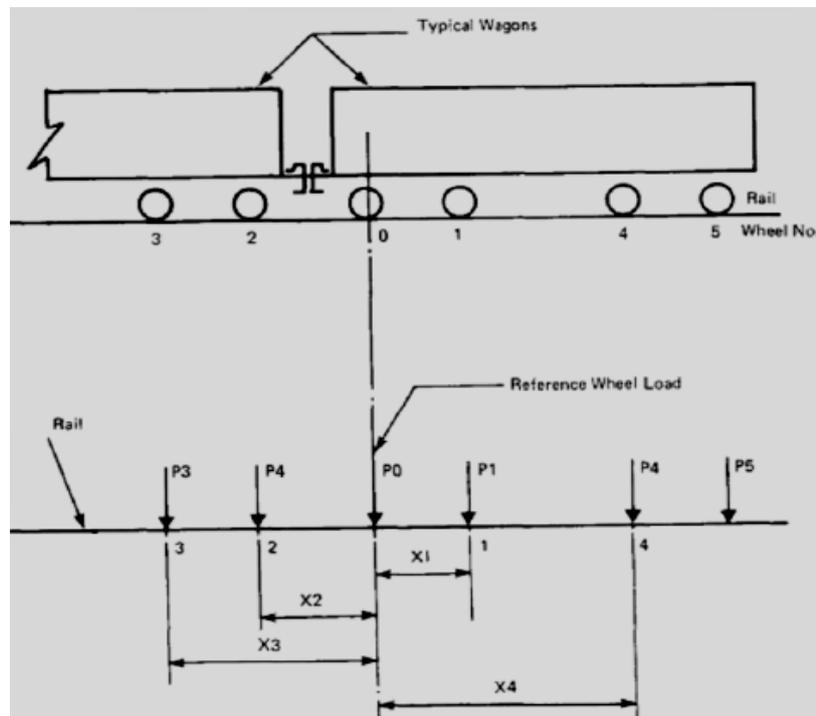
- $v \leq 60 \text{ km/h}$ $\varphi = 1$.
- $60 < v \leq 300 \text{ km/h}$ (trains de voyageurs) $\varphi = 1 + 0.5 \frac{v-60}{190}$.
- $60 < v \leq 140 \text{ km/h}$ (trains de marchandises) $\varphi = 1 + 0.5 \frac{v-60}{80}$.

μ_i, ξ_i : coefficients de ZIMMERMANN, qui tiennent compte de l'effet des essieux adjacents ;

$$\xi_i = x_i / l_r$$

$$\mu_i = e^{-\xi_i} (\cos \xi_i - \sin \xi_i)$$

x_i : distance du point considérés, aux essieux adjacents.



Calcul de tassement des rails : le tassement se calcul par la formule suivante

$$y = \frac{Q}{2 \cdot B \cdot C \cdot l_r} \cdot \sum_i \eta_i$$

Q : charge verticale par roue (KN)

C : coefficient du ballast (N/cm³).

B : largeur de référence de la traverse longitudinale fictive.

L_r : longueur fictive de référence de traverse longitudinale de même surface :

η_i , **ξ_i** : coefficients de **ZIMMERMANN**, qui tiennent compte de l'effet des essieux adjacents ;

$$\xi_i = x_i / l_r.$$

$$\eta_i = e^{-\xi_i} (\cos \xi_i + \sin \xi_i)$$

Le tableau suivant montre les valeurs des coefficients de **ZIMMERMANN** (**μ_i** , **ξ_i**) :

ξ	μ	ξ	μ	ξ	μ	ξ	μ
0,0	1,0000	1,7	-0,2047	3,4	-0,02374	5,1	0,00795
0,1	0,8100	1,8	-0,1985	3,5	-0,01769	5,2	0,00746
0,2	0,6398	1,9	-0,1899	3,6	-0,01241	5,3	0,00692
0,3	0,4888	2,0	-0,1794	3,7	-0,00787	5,4	0,00636
0,4	0,3564	2,1	-0,1675	3,8	-0,00401	5,5	0,00578
0,5	0,2415	2,2	-0,1548	3,9	-0,00077	5,6	0,00520
0,6	0,1413	2,3	-0,1416	4,0	0,00189	5,7	0,00464
0,7	0,0599	2,4	-0,1282	4,1	0,00403	5,8	0,00409
0,8	-0,0093	2,5	-0,1149	4,2	0,00572	5,9	0,00356
0,9	-0,0657	2,6	-0,1019	4,3	0,00699	6,0	0,00307
1,0	-0,1108	2,7	-0,0895	4,4	0,00791	6,1	0,00261
1,1	-0,1457	2,8	-0,0777	4,5	0,00852	6,2	0,00219
1,2	-0,1716	2,9	-0,0666	4,6	0,00886	6,3	0,00181
1,3	-0,1897	3,0	-0,0563	4,7	0,00898	6,4	0,00146
1,4	-0,2011	3,1	-0,04688	4,8	0,00892	6,5	0,00115
1,5	-0,2068	3,2	-0,03831	4,9	0,00870	6,6	0,00087
1,6	-0,2077	3,3	-0,03060	5,0	0,00837	6,7	0,00063

La contrainte de flexion maximale calculée dans le patin, doit être inférieure à la contrainte admissible ; **σ_{adm}=700 MPa**.

Calcul des contraintes dans le champignon du rail

La charge admissible de roue **Q_{adm}** et pour le plus petit rayon de roue admissible **r_{adm}** :

$$Q_{adm} = 6 \cdot 10^{-7} \cdot r \cdot \left(\frac{\sigma_{ru}}{v}\right)^2 \quad (\text{kN})$$

$$r_{adm} = 1,67 \cdot 10^{-6} \cdot Q \cdot \left(\frac{v}{\sigma_{ru}}\right)^2 \quad (\text{mm})$$

σ_{ru} : contrainte à la rupture de rail (700 à 900) MPa.

v : coefficient de sécurité qui tient compte des défauts des matériaux.

Le tableau suivant montre les valeurs des coefficients de sécurité v :

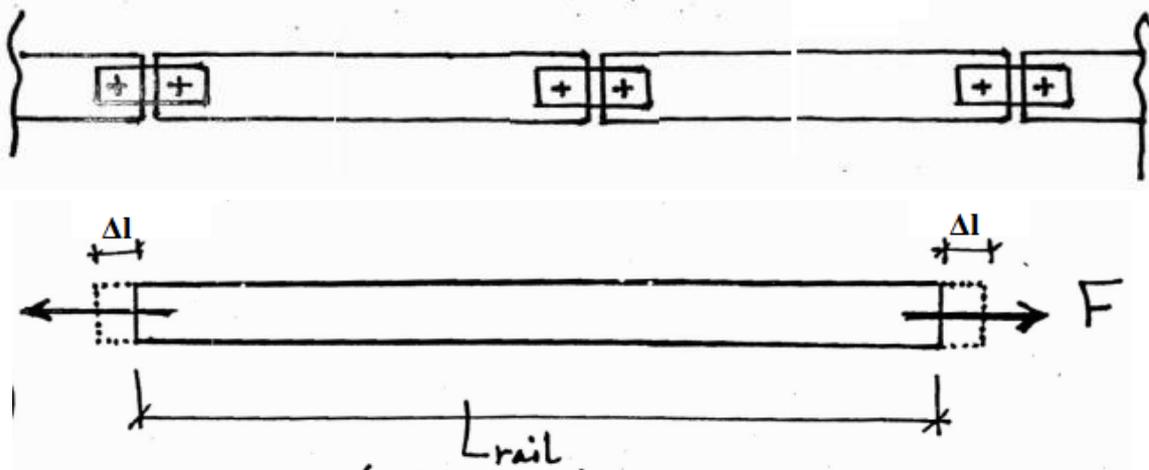
Type de voie	v min
SFS (lignes à grande vitesse)	1,4
HAS / ABS (lignes principales/secondaires de détournement)	1,3
NFS, S-Bahn (lignes secondaires/RER)	1,2
Autres voies principales de lignes de 1ère et de 2ème catégories	1,1
Autres voies de 2ème catégorie	1,0
Voies de 3ème catégorie	1,0
Voies de sortie	1,0

Calcul des contraintes d'origine thermique (effort longitudinal) dans le rail :

Ce sont des efforts qui s'exercent dans le sens longitudinal dus à la variation de température, ce qui engendre une dilatation (rétrécissement) dans le rail. Il existe deux types ; rails fixés par boulons et éclisses, et rails fixés par soudage (LRS).

Rails fixés par boulons et éclisses

Dans ce cas chaque rail se dilate seul sans influence sur les autres éléments (rails),



La contrainte longitudinale vaut : $\sigma = \frac{F}{A}$

La dilatation engendre une force F donnée par ;

$$F = \frac{Rd \cdot l}{4} + E \cdot \alpha \cdot A \cdot \Delta T - \frac{E \cdot A \cdot \Delta \lambda}{l}$$

Rd : Résistance du rail à la dilatation (N/cm).

l : longueur du rail standard (18 m).

E : module d'élasticité $E=21 \cdot 10^6$ (N/cm²).

A : section du rail (cm²).

$\Delta \lambda$: largeur du joint de dilatation (cm)

α : coefficient de dilatation thermique $11,8 \cdot 10^{-6}$

ΔT : différence de température (c°);

T_{\max} : température maximale (c°);

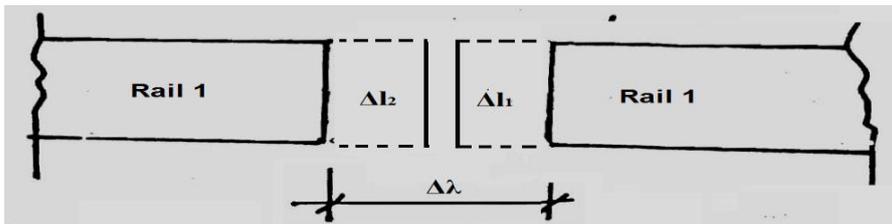
T_{\min} : température minimale (c°);

T_{fix} : température lors de fixation du rail (c°);

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\text{fix}}$$

$$T_{\text{fix}} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

$\Delta \lambda = 2\Delta l$ (afin d'éviter tous chevauchements des deux rails lors de dilatation)



Rails soudés LRS :

Dans le cas des rails soudés, l'ensemble travaille comme une seule barre, et à cause du nombre important des traverses (point de fixation) le rail résiste à la dilatation axiale, jusqu'à une certaine distance bien déterminée au delà de laquelle les contraintes thermiques n'ont pas d'influences ;

La contrainte thermique vaut : $\sigma_t = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$

La contrainte de résistance du rail à la dilatation σ_{rx} (fonction de x) :

$$\sigma_{rx} = \frac{Rd \cdot x}{A}$$

La variation de température engendre une contrainte thermique σ_t , constante.

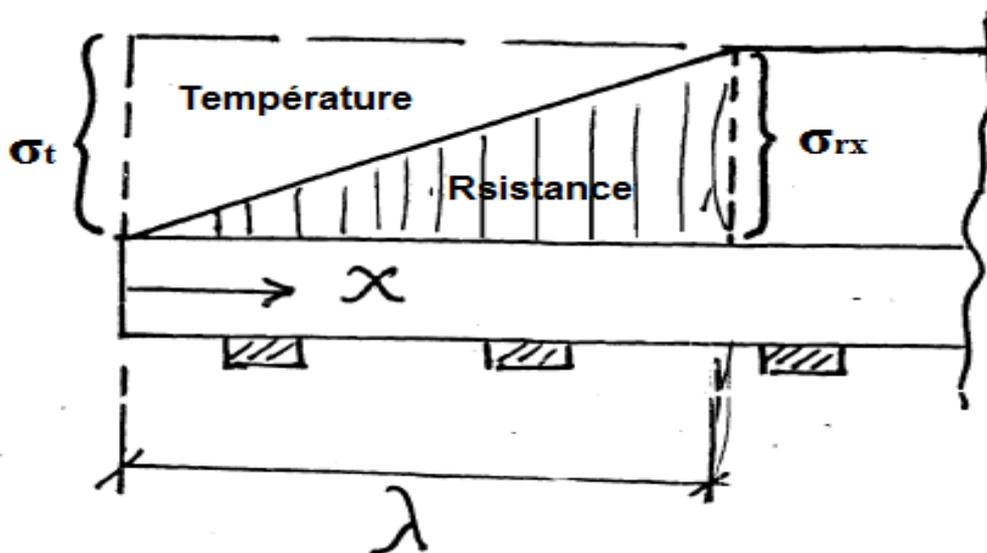
Le rail s'oppose à cette dilatation par une contrainte σ_{rx} , à l'extrémité ($x=0$), et augmente en fonction de x jusqu'au point $x=\lambda$; ou $\sigma_{rx} = \sigma_t$ (pas d'effet thermique).

Rd : Résistance du rail à la dilatation.

λ : longueur influencée par la variation de température (non équilibre thermique) :

on a : $\sigma_{rx} = \sigma_t$ $E \cdot \alpha \cdot \Delta T = \frac{Rd \cdot \lambda}{A}$

$$\lambda = \frac{E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T}{Rd} \text{ (cm)}$$



L'ECLISSAGE ET LES LONGS RAILS SOUDES (L.R.S.)

Généralités

La pose des rails se fait normalement avec des joints de dilatation, les rails, de 18 ou 36 m de long, coulissant librement dans les éclisses (pièces qui assurent la jonction de deux rails successifs). Dans ce cas la continuité électrique doit être assurée. De plus en plus se développe la technique dite des « barres longues » ou LRS (longs rails soudés), dans laquelle les coupons de rail de 80 m sont soudés en atelier en longueurs de 320 à 400 mètres. Ces barres sont posées sur de très grandes longueurs, sans limite réelle, les soudures nécessaires étant réalisées sur place. La dilatation est contrainte par le frottement des traverses sur le ballast. Cela suppose réunies certaines conditions de stabilité de la plate-forme et de rayon de courbure minimum. À l'extrémité des LRS sont installés des appareils de dilatation, ainsi qu'au droit de certains ouvrages d'art.

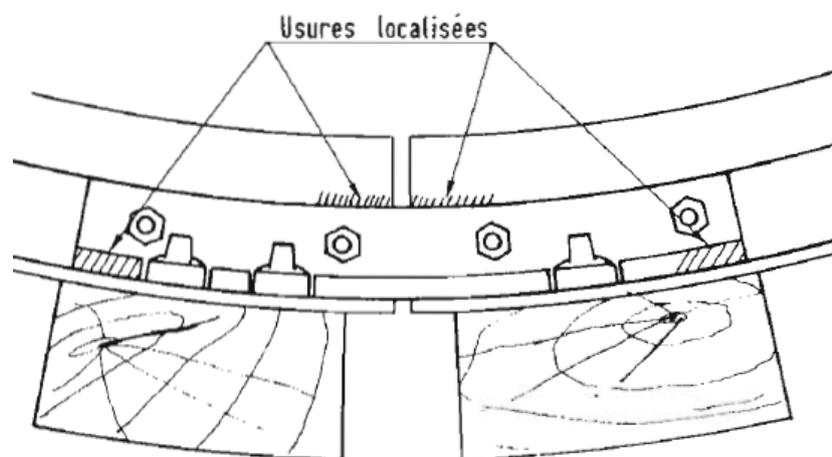
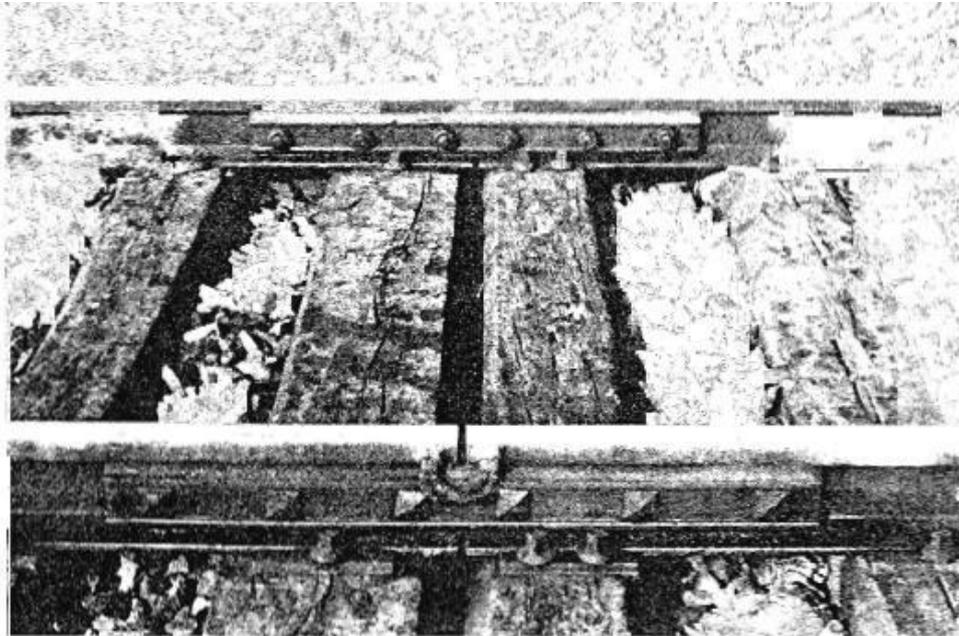
ECLISSAGE

L'éclissage permet d'assembler deux rails consécutifs. Il doit satisfaire aux quatre conditions suivantes :

- relier les rails de façon qu'ils se comportent comme une poutre continue en alignement et en nivellement,
- avoir une résistance à la déformation qui approche d'aussi près que possible celle des rails qu'il assemble,
- empêcher les mouvements verticaux ou latéraux des extrémités des rails l'une par rapport à l'autre, tout en permettant la dilatation,
- être aussi simple que possible et composé d'un minimum d'éléments.

Les éclisses (voir photo) supportent des efforts importants. Lorsque l'essieu arrive au voisinage du joint, l'extrémité du rail amant tend à fléchir comme une poutre en console ;

cette flexion est empêchée par la présence de l'éclisse qui reçoit ainsi une charge vers le milieu de sa portée supérieure et la reporte sur le patin des rails encadrant par les extrémités de sa portée inférieure, comme le montre schématiquement la figure ; il en est de même lorsque la roue a franchi la lacune.



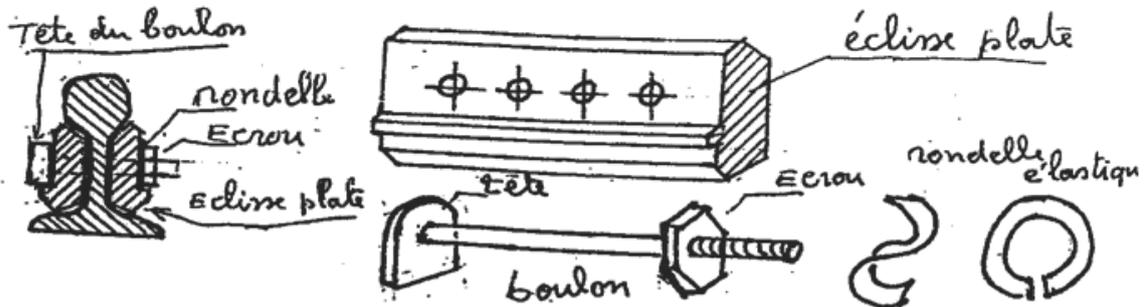
Pour jouer son rôle, il faut donc que l'éclisse soit coincée entre les portées supérieure et inférieure du rail ; l'effort à transmettre étant parallèle à l'axe vertical du rail, il y a intérêt à donner aux portées une inclinaison aussi faible que possible sur l'horizontale.

Type d'éclisses :

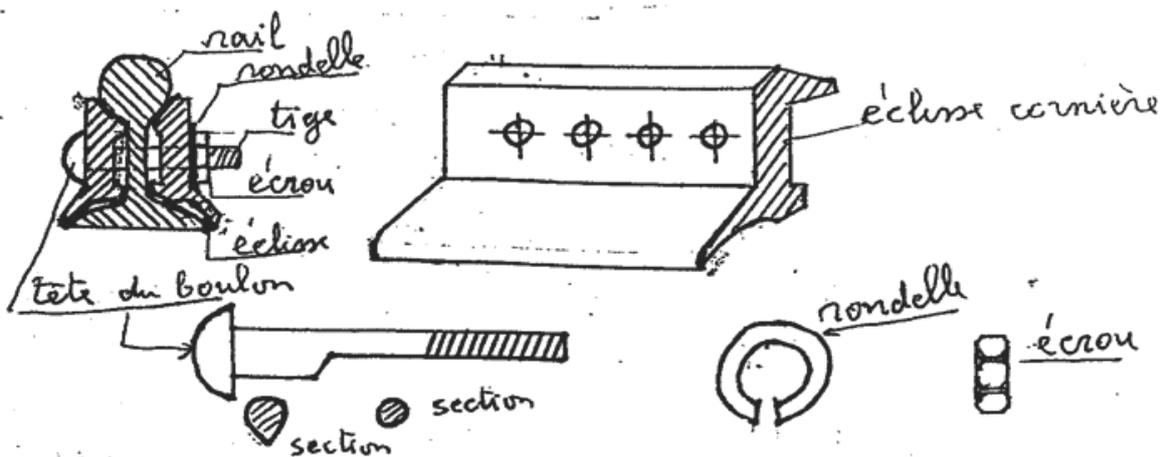
Il existe trois types des éclisses :

- Eclisses plates.
- Eclisses cornières.
- Eclisses doubles cornières

ECLISSES PLATES



ECLISSES CORNIÈRES



PERMISSIFS DE DILATATION

L'éclisse doit permettre au rail de se dilater et de se contracter librement en fonction des variations de température, de sorte qu'elle doit être périodiquement graissée, afin de faciliter le déplacement du rail, mais surtout le diamètre des trous d'éclissage dans le rail et dans l'éclisse et celui des boulons doivent être choisis de façon à permettre une libre dilatation.

Inconvénients des éclisses

- Création de dépression au droit de chaque joint entraînant l'inconfort des voyageurs et la fatigue du matériel roulant.
- Déformation et éventuellement rupture des bouts des barres (rechargement d'about).
- Déconsolidation des attaches et de l'appui des traverses de joint sur leur moule par suite des chocs et vibrations conjuguées des essieux et du rail entraînant des gauches.

- Formation de « mini LRS » par grippage des éclisses pouvant provoquer des déformations de la voie (flambage, déripage) nécessitant un entretien important (démontage et graissage des éclisses, reprise de la qualité géométrique de la voie,...)
- Bruits dû aux chocs
- Équerrage des joints en pose à joint concordant imposant des calculs de longueur de rail différente entre grand et petit rayon en courbe.
- Pose alternée des joints provoquant des gauches entraînant le roulis du matériel et des reprises fréquentes d'entretien.
- Faiblesse du rail au joint due au faible moment d'inertie à cet endroit La résolution de ces différents problèmes a conduit à l'élimination des joints de rail par soudure des barres, donc par la création des longs rails soudés (LRS).

Entretien des éclisses

L'influence de la brisure du profil en longueur sur l'importance du « coup de marteau » est considérable que l'on peut imputer à :

- la création d'une dépression au droit de chaque joint d'où l'inconfort des voyageurs et fatigue du matériel roulant
- la déformation des abouts des barres
- la déconsolidation des attaches et de l'appui des traverses

Les longs rails soudés – LRS

Historique

Depuis les origines du chemin de fer, la dilatation des rails a été source de désagrément pour les exploitants ferroviaires.

Comme, de toute façon, la technologie alors disponible ne permettait pas d'avoir de longs rails, ce problème fut résolu en laissant, aux joints entre les rails, un espace suffisant à leur libre dilatation. Une voie posée selon cette méthode est dite en « barres normales ».

Cependant, les joints, du fait de cette discontinuité du roulement, entraînent des chocs au passage des roues. Outre l'inconfort ressenti par les passagers, ces chocs entraînent une usure des constituants du joint, ainsi que du ballast sous les traverses supportant le joint et nécessitent un entretien très régulier.

Les exploitants ont donc toujours cherché une solution pour supprimer les joints. C'est ainsi que, dès les années 1930, fut théorisé le fonctionnement des LRS. Mais les matériaux de l'époque, en particulier les attaches rigides, n'assuraient pas un maintien suffisant et ne permettaient donc pas une mise en œuvre aisée de cette nouvelle technologie. Il fallut attendre la mise au point des attaches élastiques pour reprendre l'expérimentation puis passer à la généralisation du procédé.

Définition des LRS

Appelés aussi « barres longues c'est une méthode moderne de pose des voies ferrées qui présente l'intérêt de supprimer la plupart des joints de rails sur des longueurs importantes, souvent de plusieurs kilomètres, et de constituer une barre dont la longueur est suffisante pour qu'un, au moins, de ses points reste fixe, quelles que soient les variations de température. Les barres longues sont produites en atelier par la soudure électrique de rails élémentaires. Ces barres longues, dont la souplesse autorise le transport sur des rames de wagons plats, sont ensuite posées et soudées entre elles sur place par soudure aluminothermique.

La dilatation du métal avec la température, qui est empêchée dans ce système de pose, se transforme en contraintes de compression ou de tension.

Aux extrémités on installe des appareils de dilatation ou des joints à grands permessifs, qui permettent aux rails de coulisser, tout en assurant sans hiatus la continuité du roulement.

Stabilité des L.R.S

Une voie posée en LRS est soumise, aux températures élevées, à des compressions longitudinales. Le phénomène de flambage, qui peut en résulter, est cependant très différent du flambage classique étudié dans la résistance des matériaux :

- Le rail est assimilable à une poutre d'élanement infini
- Le mouvement latéral du rail est contrarié par des forces antagonistes (frottement des traverses sur le ballast, couple de fixation par les attaches du rail sur les traverses).

Dilatation des L.R.S.

Rien ne s'oppose à la pose d'une barre de longueur infinie, la contrainte longitudinale étant indépendante de la longueur. Toutefois, des points singuliers (appareils de voie, ouvrages d'art, etc.) obligent à réaliser des joint.

Utilisation des L.R.S.

La pose des nouvelles voies se font en L.R.S, elles sont soudées en longues et transportées sur des rames spécialement aménagées. Les tronçons sont reliés entre eux par soudure aluminothermique. L'entretien du nivellement est moins fréquent dans la voie soudée.

L'utilisation de la voie soudée élimine les dépenses relatives au matériel des joints et les dépenses dues à la fatigue plus accentuée de la voie au voisinage des joints.

Avantages et inconvénients

Les LRS présentent deux principaux avantages, qui sont la conséquence de la suppression des joints éclissés :

- une réduction des coûts d'entretien de la voie,
- une meilleure qualité de roulement et plus grand confort pour les voyageurs.

Les inconvénients, largement compensés par les avantages, sont :

- une technicité plus grande de leur mise en œuvre et de leur entretien, nécessitant un personnel bien formé.
- un risque de déformation par flambement de la voie sous les contraintes de compression excessives lors de périodes de très fortes chaleurs (mais ce risque existe aussi en barres normales).
- cette compression sous températures élevées entraîne également des risques de déformations lors de travaux effectués sur les rails, le ballast ou les attaches durant la saison chaude. Pour cette raison, sauf à prendre des précautions particulières comme par exemple une limitation de la vitesse, on n'entreprendra pas de travaux en été sur des voies en LRS.
- un risque accru par rapport aux barres normales de rupture de rail lors des périodes de grand froid du fait de la tension régnant dans les barres.
- une utilisation de quantités de ballast plus importantes afin de mieux ancrer les traverses.

On évitera par ailleurs, pour minimiser le risque de déformations de voie, de poser des LRS sur des voies trop sinueuse, ou établies sur des terrains de mauvaise stabilité.

Contraintes dans les traverses

Calcul des contraintes dans les traverses

Les contraintes dans les traverses sont calculées, afin de vérifier la résistance de ces dernières aux contraintes admissibles. Les contraintes peuvent être déterminées selon trois méthodes ;

- Méthode de la charge uniforme.
- Méthode de la charge non uniforme.
- Méthode Allemand.

Le principe des méthodes est celui des planchers renversés avec les réactions du sol comme charges.

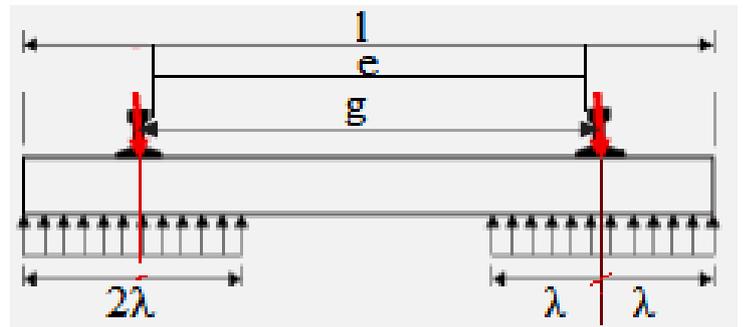
Méthode de la charge uniforme.

e : écartement des rails = 1435 mm.

$g = e + \text{largeur du champignon}$
 $= 1435 + 65 = 1500 \text{ mm}$

l : longueur totale de la traverse

$$\lambda = \frac{l - g}{2}$$



Dans cette méthode ;

- La charge sur l'essieu (locomotive ou wagons) est de $0.6 P_{max}$
- La charge « q » est supposée uniformément répartie le long de la traverse.

P_{max} : la charge maximale par essieu, se détermine comme suit :

$$P_{max} = \max \left(\frac{P_{locomotive}}{\text{nombre essieux}} ; \frac{P_{wagons}}{\text{nombre essieux}} \right)$$

Détermination de q :

$$0.6 P_{max} = q \cdot l, \quad \text{alors} \quad q = \frac{0.6 P_{max}}{l}$$

Détermination des moments :

$$1) M_1 : \quad M_1 = q \cdot \lambda \cdot \frac{\lambda}{2} = q \cdot \frac{\lambda^2}{2}$$

$$2) M_2 \quad M_2 = \frac{q \cdot g^2}{8} - M_1$$

3) Détermination du moment maximal : M_{max} :

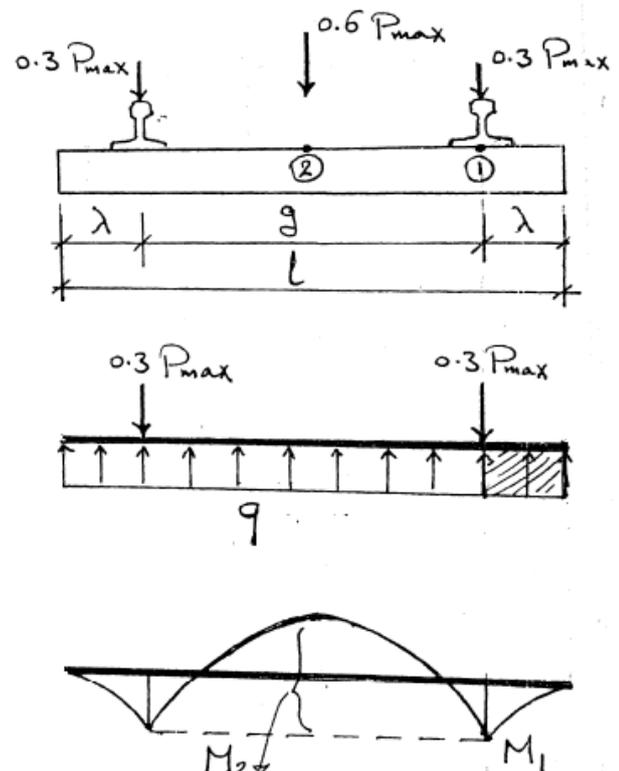
$$M_{max} = \max(M_1; M_2)$$

La contrainte statique :

$$\sigma_{st} = \frac{M_{max}}{w}$$

La contrainte dynamique :

$$\sigma_{dy} = \sigma_{st} (1 + I)$$



$$I = \frac{V^2}{30000}$$

Mmax : moment maximal.

w : module de résistance (cm³).

I : coefficient d'impact dynamique

V : vitesse de circulation.

Les contraintes calculées σ_{st} et σ_{dy} doivent être inférieures à la contrainte admissible de la traverse.

Méthode de la charge non uniforme :

Dans cette méthode :

- La charge sur l'essieu (locomotive ou wagons) est de **0.6 Pmax**.
- La charge « **q** » est supposée uniformément répartie sur une longueur « **2λ** » aux extrémités de la traverse, et au milieu une charge uniforme de « **q/4** » sur la longueur « **x** » à déterminer de la traverse.

Pmax : la charge maximale par essieu, se détermine comme suit :

$$P_{max} = \max \left(\frac{P_{locomotive}}{\text{nombre essieux}} ; \frac{P_{wagons}}{\text{nombre essieux}} \right)$$

Détermination de **q** :

$$0.6 P_{max} = 2(q \cdot 2\lambda) + \left(\frac{q}{4}x\right)$$

$$\text{Avec } (x = l - 4\lambda)$$

Détermination des moments :

$$1) M_1 : \quad M_1 = q \cdot \lambda \cdot \frac{\lambda}{2} = q \cdot \frac{\lambda^2}{2}$$

2) M₂

$$M_2 = 0.3 P_{max} \cdot \frac{g}{2} - q \cdot 2 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{g}{2}\right) - \left(\frac{q}{4} \cdot \frac{x}{2}\right) \cdot \frac{x}{4}$$

3) Détermination du moment maximal : **Mmax** :

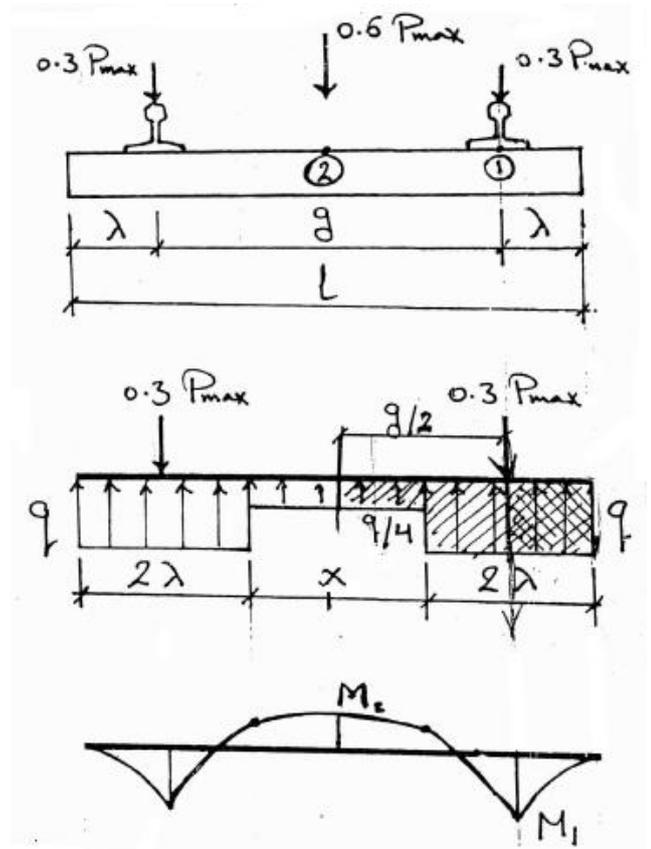
$$M_{max} = \max(M_1; M_2)$$

La contrainte statique :

$$\sigma_{st} = \frac{M_{max}}{w}$$

La contrainte dynamique :

$$\sigma_{dy} = \sigma_{st} (1 + I)$$



Méthode Allemande :

A la différence des méthodes précédentes, cette méthode suppose l'existence d'un coussin (plaque d'appuis métallique) sous les rails d'une largeur « **d** »

Dans cette méthode :

- La charge sur l'essieu (locomotive ou wagons) est de **0.8 Pmax**, l'impact dynamique est inclus.
- La charge « **q** » est supposée uniformément répartie sur une longueur « **2λ** » aux deux extrémités de la traverse.
- une charge uniforme de « **q'** » sur la longueur de la plaque « **d** » aux deux extrémités de la traverse.

Pmax : la charge maximale par essieu, se détermine comme suit :

$$P_{\max} = \max \left(\frac{P_{\text{locomotive}}}{\text{nombre essieux}}; \frac{P_{\text{wagons}}}{\text{nombre essieux}} \right)$$

Détermination de **q** :

$$0.4 P_{\max} = q \cdot 2 \lambda$$

$$q = \frac{0.4 P_{\max}}{2 \lambda} = 0.2 P_{\max}$$

Détermination de **q'** :

$$0.4 P_{\max} = q' \cdot d$$

$$q' = \frac{0.4 P_{\max}}{d}$$

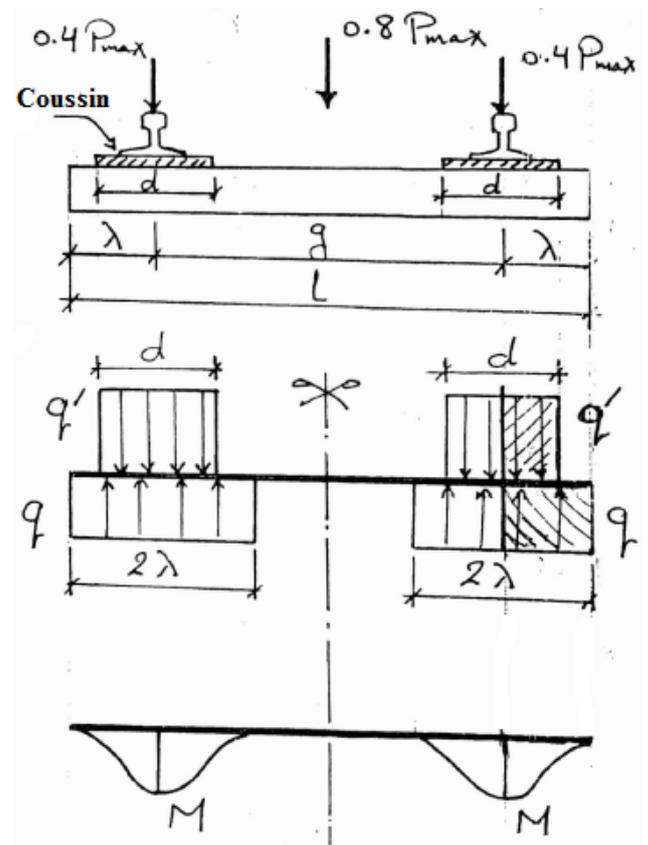
Détermination du moment :

$$M: \quad M = q \cdot \lambda \frac{\lambda}{2} - q' \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{d}{4}$$

$$M_{\max} = q \cdot \frac{\lambda^2}{2} - q' \cdot \frac{d^2}{8}$$

La contrainte dynamique:

$$\sigma_{dy} = \frac{M_{\max}}{w}$$



Pose de la voie

Lors de la pose de la voie ferrée en général on suit Les étapes suivantes ;

- Le ballast est déversé sur la plateforme et régalié à la hauteur des faces inférieures des traverses ;
- Les traverses sont alignées transversalement sensiblement à l'endroit qu'elles doivent occuper ;
- Les rails sont déposés provisoirement bout à bout, mais ils sont placés à peu près à leur écartement normal ;

Ils sont éclissés sommairement en ayant soin de placer entre eux une cale provisoire dont l'épaisseur correspond à l'ouverture du joint de dilatation.

Après cette pose provisoire, on procède à la mise en place exacte des traverses (l'espacement est 60 ou 65cm), celles-ci sont ensuite fixées. Le ballast devant constituer la couche supérieure, est refoulé sous les traverses et la voie est amenée par relèvements successifs à la machine au niveau voulu.

Il s'agit alors de procéder au dressage provisoire en alignement, puis de dresser la voie dans le sens de la hauteur c'est-à-dire de procéder au relevage au niveau donné par les piquets de hauteur et au moyen de mires ou d'un jeu de nivelettes. Le relevage terminé c'est-à-dire les deux files de rails étant bien à la hauteur voulue.

Le bourrage.

Le bourrage a pour but de donner une bonne assiette aux traverses c'est-à-dire de consolider leur position pour qu'elles n'aient aucune tendance à s'affaisser ou s'incliner de quelque côté que ce soit. Il est logique que le bourrage de la traverse soit le plus intense au point d'application de la charge, c'est-à-dire au droit du rail et puis, qu'il aille graduellement en diminuant, jusqu'à 40 ou 50 centimètres vers l'intérieur de la voie et, à l'extérieur, jusqu'à l'extrémité de la traverse. La partie centrale de la traverse ne doit pas être bourrée, mais simplement garnie de ballast, de manière qu'il n'y ait pas de vides qui permettraient le déboufrage des parties voisines sous l'action des charges roulantes.

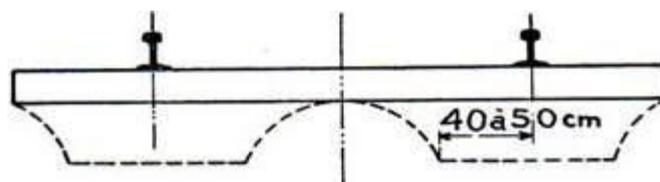
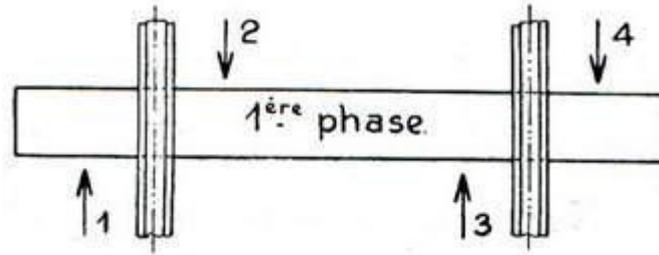


Diagramme de l'intensité du bourrage.

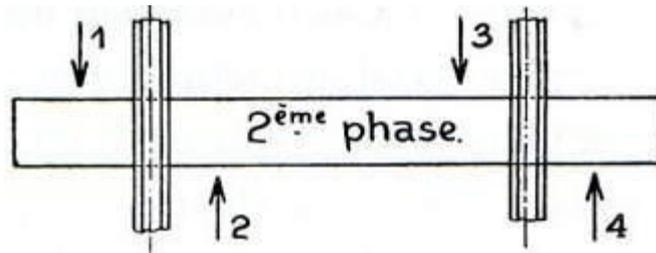
Le bourrage des pierrailles se fait à la pioche par équipe de quatre hommes attaquant la traverse de quatre côtés à la fois ; l'opération s'effectue en deux phases. Dans la première

phase, les ouvriers occupent les positions 1 à 4, deux se plaçant entre les rails, les deux autres au dehors.



Bourrage d'une traverse (première phase).

Dans la seconde phase, les ouvriers occupent les positions symétriques par rapport à l'axe de la traverse.



Bourrage d'une traverse (seconde phase).

Les premiers coups de pioche sont donnés presque verticalement afin d'augmenter la cohésion du ballast, puis on incline peu à peu l'outil et l'on termine par des coups presque horizontaux, en évitant de toucher les traverses et les rails.

On reconnaît que la traverse est suffisamment bourrée au son qu'elle rend quand on laisse tomber verticalement et d'une certaine hauteur, la tête d'une pince à riper (ou d'une canne à boule) sur chaque tête de traverse.

Remarque : A proprement parler, l'ouvrier ne bourre pas la voie, il la nivelle ; en réalité, c'est le train qui bourre la voie. L'ouvrier ne pourrait soulever la voie en la bourrant.

Actuellement cette opération s'effectue à l'aide des engins, bourrage mécanique.

Dressage définitif de la voie.

Sous l'effet du bourrage, des altérations légères dans la position de la voie peuvent se produire. On les corrige par le dressage définitif qui se fait avec les mêmes outils et les mêmes méthodes que le dressage provisoire mais avec plus de soins encore.

Éclissage.

La voie étant bourrée et dressée définitivement, on complète l'éclissage des rails et l'on place éventuellement les dispositifs anti-cheminements.

Régalage du ballast.

Pour achever la pose de la voie, il ne reste plus qu'à régaler le ballast et les banquettes d'après les profils imposés et à faire le nettoyage de la voie, des accotements et des fossés.

Remarque : Quelque temps après la mise en service de la voie, il se produit sur remblai neuf un tassement général auquel il faut remédier en relevant la voie pour la ramener à son niveau primitif.

Après le passage d'un certain nombre de trains lourds, on procède à un relèvement qui donne à la voie son assiette définitive.

Position des joints

La partie la plus faible d'une voie ferrée est le joint. On comprend alors la grande importance qu'on accorde à l'assemblage des rails bout à bout. La façon plus au moins parfaite dont il est réalisé influence d'une manière primordiale la tenue des abouts qui sont les joints particulièrement vulnérables des rails, elle influence également fortement la stabilité de l'ensemble de la voie ; elle conditionne la douceur du roulement dont dépendent l'usure du matériel roulant et le confort des voyageurs.

Les joints peuvent être, appuyés, suspendus ou en porte-a.-faux :

1) Le joint appuyé

Le joint appuyé est celui réalisé sur une traverse. Il peut se trouver sur une traverse ordinaire, sur une traverse double métallique ou sur une traverse double en bois.

Le joint appuyé sur une traverse ordinaire n'est guère employé parce qu'il devient rapidement défectueux. (Fig. 20. a.)

Le joint appuyé posé sur traverse double donne de meilleurs résultats que le précédent parce que la surface d'appui est beaucoup plus grande. Les chemins de fer allemands utilisent la traverse double en bois constituée par deux traverses ordinaires assemblées par boulons. Les chemins de fer allemands et suisses emploient le joint appuyé sur traverses doubles métalliques. (Fig. 20. b)

2) Le joint suspendu

Dans ce cas, le joint est situé entre deux traverses dites traverses contre-joint, mais ces traverses, tout en étant indépendantes l'une de l'autre, sont rapprochées au point d'être pratiquement jointives. Le joint suspendu donne de bons résultats, il est très employé.

Les traverses contre-joints sont distantes de 290 mm d'axe en axe. (Fig 21)

3) Le joint en porte-à-faux

Le joint est situé entre deux traverses notablement écartées l'une de l'autre. Les partisans de ce système estiment que si le joint est réalisé en porte-à-faux, l'abaissement de l'extrémité d'un rail entraîne l'abaissement à peu près équivalent de l'extrémité du rail qui lui est assemblé, ce qui provoque un roulement plus doux. Ce système de joint est également très employé. Il s'impose lorsque l'on emploie des selles à clavettes, les deux traverses contre-joint devant laisser entre elles assez d'espace pour la pose et l'enlèvement des clavettes. (Fig. 22, a) et (Fig. 22, b)

Les joints sont dits :

- « concordants », « d'équerre » ou « parallèle quand ils sont sur une même perpendiculaire à l'axe de la voie ;
- « Alternés » ou « chevauchant » s'ils ne répondent pas à cette condition. Les joints d'une file de rails présentent un décalage

Les joints d'une file de rails présentant un décalage, peuvent se trouver à peu près au droit du milieu de l'intervalle des joints de l'autre file, présenter un décalage d'un mètre (1/2 bogie) ou même d'une seule traverse d'une file par rapport à l'autre, ou être décalées de quelques mètres.

Le travelage (densité de traverses) :

Le travelage est le nombre de traverses au kilomètre, est un paramètre très important pour le comportement de la voie. Pratiquement l'écartement d'axe en axe des traverses est de l'ordre de 0,60 à 0,65 m. Cependant, ce sont des considérations de vitesse qui, en raison de l'impact, définissent le travelage à adopter en voies principales :

- 1.519 traverses par km si la vitesse est égale ou supérieure à 120 km/h,
- 1.444 traverses par km si la vitesse comprise entre 90 et 120 km/h,
- 1.371 traverses par km si la vitesse inférieure à 90 km/h.

L'augmentation du travelage est plus intéressante pour la conservation de la voie ferrée, l'influence des charges de roues sur la plateforme est plus faible et se traduit par une meilleure tenue du nivellement de la voie

Sur les autres réseaux européens, le travelage varie de 1.400 à 1.600, en général il est de l'ordre de 1666 traverses/km, et peut atteindre 1850 à 2000 traverses/km, pour des charges plus élevées dans certaines régions.

Le resserrement du travelage est limité par la nécessité de pouvoir introduire dans l'intervalle les outils de bourrage ou de soufflage. Toutes choses égales, le renforcement du profil du rail permettrait de diminuer le nombre de traverses.

