

TRACÉ DE VOIE



NOTIONS FONDAMENTALES



Principes fondamentaux

Efforts exercés sur le rail

Risques de déraillement

Par montée de roue sur le rail

Par déripage de voie

Par mariage des tampons

Confort des voyageurs

Le dévers

Dévers prescrit

Insuffisance de dévers

Accélération normale

Insuffisance admissible

Accélération verticale

Variation de dévers

Variation d'insuffisance

Récapitulation

Relation entre I , V , R

Gains pendulaires possibles

TRACÉ DE VOIE

Sommaire

L'armement et ses limites

Conséquences « tracé »

Biais cognitifs

Données d'entrée

Analyse des données d'entrée

Méthodologie d'études

Critères d'analyse du tracé

Le tracé de voie graphique

Références

FIN



TRACÉ DE VOIE

Principes fondamentaux

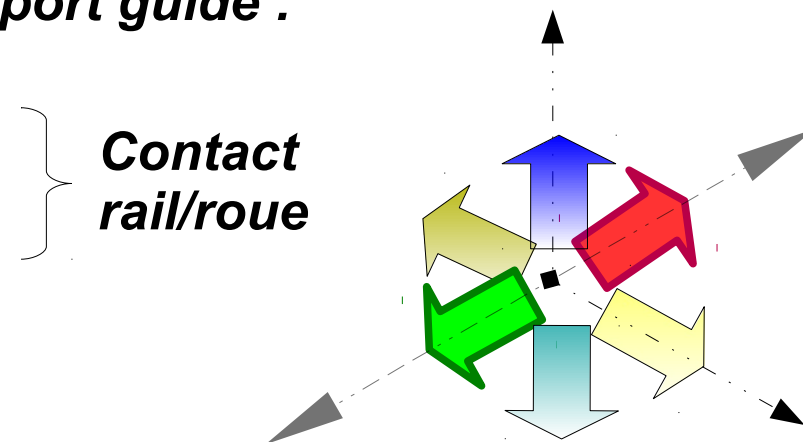
Le transport ferroviaire est un transport guidé :

- ✓ Il y a un support guidant
- ✓ Il y a des roues.

Il n'y a que deux degrés de liberté :

- ✓ Avant
- ✓ Arrière

Il y a un très faible coefficient de frottement (en palier, la résistance au roulement et de l'ordre de 1 à 3 kg/t contre 20 kg/t pour un véhicule routier)

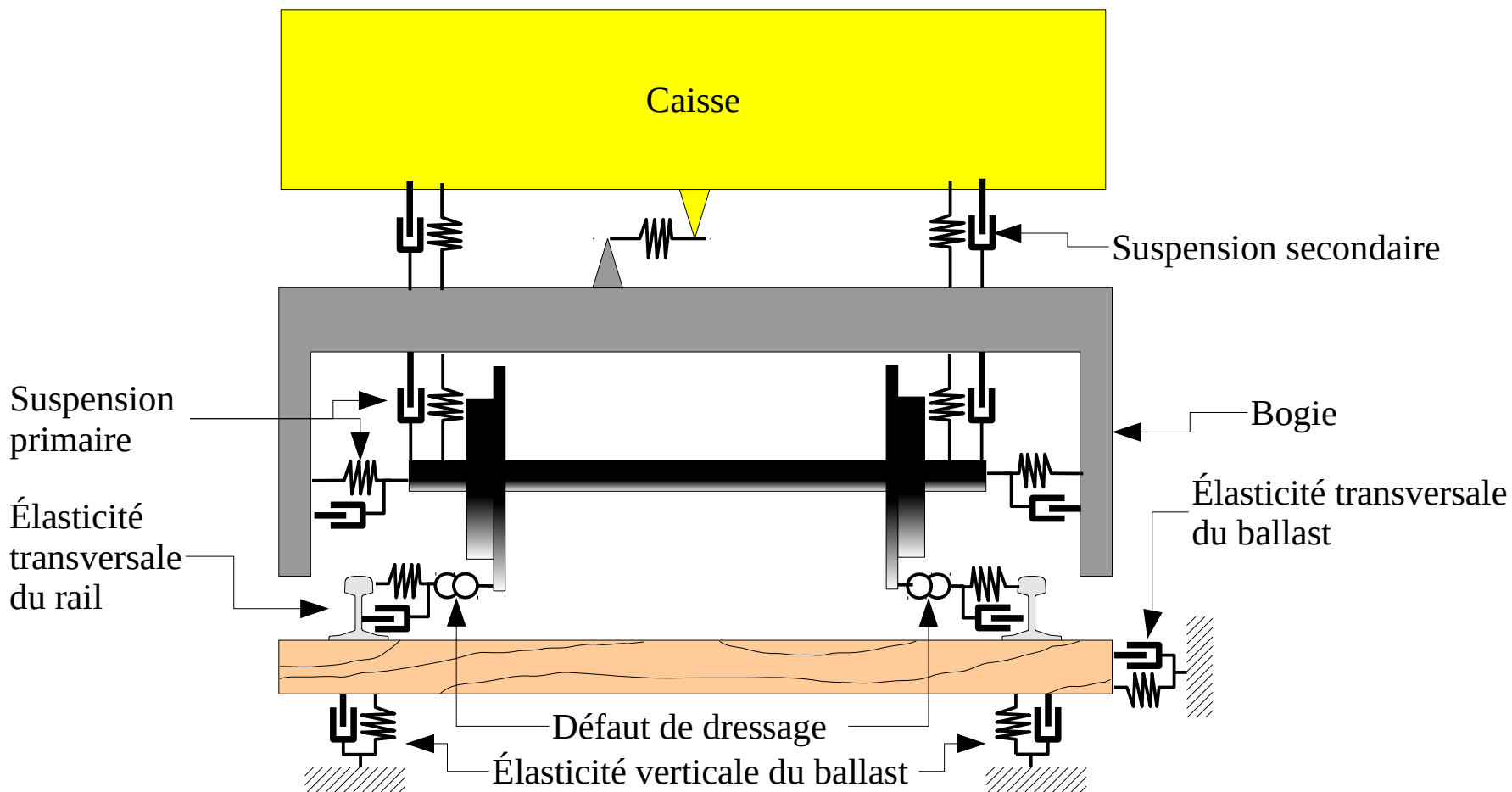


Toute la sécurité du système est assurée par le support

TRACÉ DE VOIE

Principes fondamentaux

Le système ferroviaire peut être représenté comme suit :

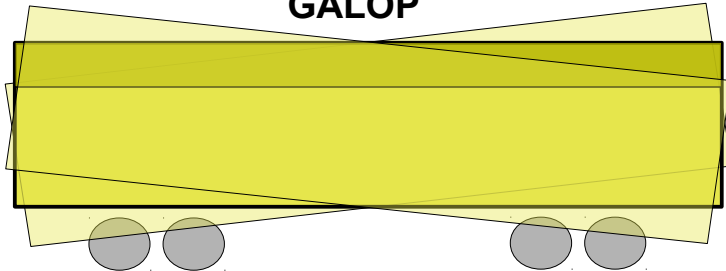


TRACÉ DE VOIE

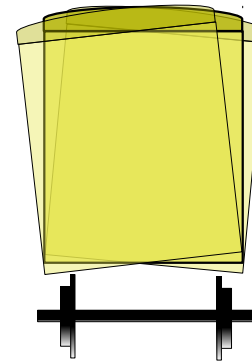
Principes fondamentaux

Principaux mouvements affectant un véhicule :

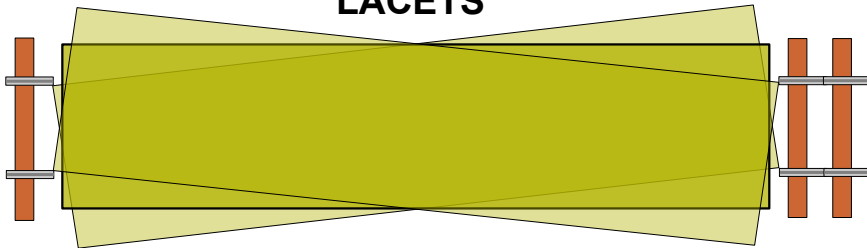
GALOP



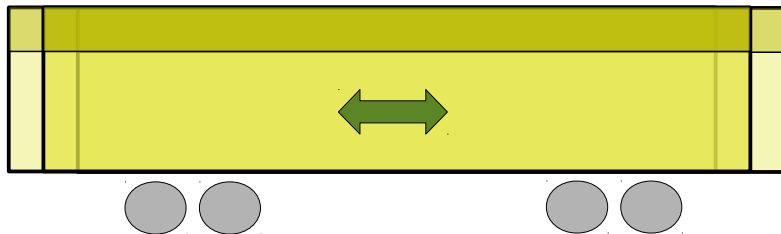
ROULIS



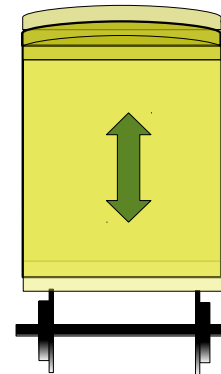
LACETS



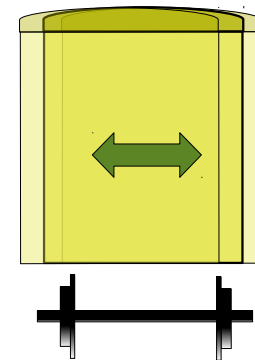
TRANSLATION LONGITUDINALE



TRANSLATION VERTICALE



TRANSLATION LATÉRALE



TRACÉ DE VOIE

Principes fondamentaux

Le support doit résister aux efforts supportés journallement (transversaux, verticaux, fatigue)

Il doit garantir :

- ✓ La sécurité des voyageurs.

Déraillement (contact rail/roue, géométrie de la voie)

Déripage de la voie (efforts transversaux, ballast)

Collision par rattrapage, nez à nez ou prise en écharpe (position de la voie, détection des mobiles)

- ✓ Le confort des voyageurs et les marchandises.

Accélérations subies par ceux et celles-ci (géométrie de la voie).

TRACÉ DE VOIE

Principes fondamentaux

Le support est constitué des rails, des traverses et du ballast.

Le rail supporte et guide le véhicule, il transmet des informations (signalisation par circuit de voie) et assure le retour du courant de traction

Les traverses répartissent la charge, maintiennent l'écartement et assurent l'inclinaison au 1/20^{ème}

Le ballast répartit la charge sur la plate-forme, amortit les vibrations par frottement interne (attrition), draine les eaux de pluies et permet l'entretien facile de la géométrie par bourrage



en présence de circuit de voie, l'absence d'information permet de détecter une rupture de rail.

TRACÉ DE VOIE



SOLLICITATIONS DU SUPPORT



Le comportement dynamique est caractérisé par :

- ✓ la charge verticale dynamique extrême de roue, soit : Q_{dyn}^{maxi}
(concerne l'effort dynamique vertical engendré par le passage de la roue sur un défaut géométrique du rail).
- ✓ la charge dynamique totale à deux écarts types, soit : $Q_{dyn}^{2\sigma}$
(concerne la fatigue du rail).
- ✓ la charge dynamique verticale aux abouts, soit : Q_{dyn}^{about}
(concerne l'effort dynamique vertical engendré par le passage de la roue sur un about).
- ✓ l'effort transversal dynamique, soit : H .
- ✓ les efforts d'inscription sur les files internes et externes du rail, soit, respectivement : Y_i, Y_e .

Valeur extrême de la charge dynamique de roue :

$$Q_{dyn}^{maxi} = Q_N + \Delta Q_{QS} + \Delta Q_{max}$$

Q_N = la charge nominale statique de roue,

ΔQ_{QS} = la surcharge quasi-statique correspondant à l'influence de la force centrifuge non compensée,

ΔQ_{max} = la surcharge dynamique extrême due aux masses non suspendues (essieux et bogies, globalement tout ce qui est rigidement fixé aux essieux).

} *charge quasi-statique*

La charge dynamique totale à deux écarts types :

$$Q_{dyn}^{2\sigma} = Q_N + \Delta Q_{QS} + \underbrace{2\sigma(\Delta Q_{dyn})}_{\text{Écart type des surcharges dynamiques des masses suspendues et non suspendues}}$$

Q_N = la charge nominale statique de roue,

ΔQ_{QS} = la surcharge quasi-statique correspondant à l'influence de la force centrifuge non compensée,

ΔQ_{dyn} = les surcharges dynamiques dues aux masses suspendues et non suspendues.

Écart type des surcharges dynamiques des masses suspendues et non suspendues

La charge dynamique verticale aux abouts :

$$Q_{dyn}^{about} = (Q_N + \Delta Q_{QS})(1 + \beta)$$

Q_N = la charge nominale statique de roue,

ΔQ_{QS} = la surcharge quasi-statique correspondant à l'influence de la force centrifuge non compensée,

$(1 + \beta)$ = un coefficient amplificateur de la charge dynamique verticale à l'about concerné.

Les efforts d'inscription :

$$Y_i = \mu Q_i$$

μ = le coefficient de frottement transversal de la roue sur le rail.

Q_i = l'effort vertical exercé sur la file intérieure.

$$Y_e = Y_i + F_a + F_c + F_{ins}$$

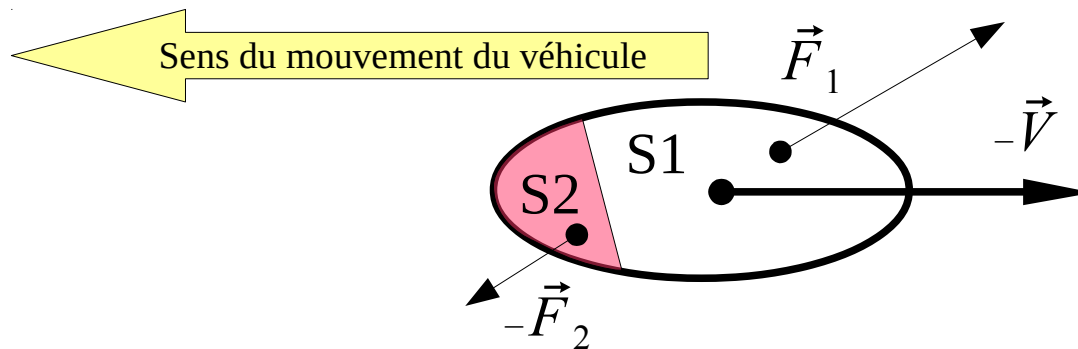
F_a = prenant en compte l'accélération transversale non compensée.

F_c = lié à l'effort engendré par le couple de rotation du bogie dans la voie.

F_{ins} = correspondant à l'effort d'inertie transversale des masses non suspendues.

Contact roue – rail

lorsqu'une roue roule sur le rail, le contact se fait par une petite surface de forme elliptique (~10 à 15 mm de grand axe). Il convient d'ajouter à la vitesse de glissement d'origine cinématique une autre vitesse d'origine élastique provenant des déformations de contacts qui se produisent entre la roue et le rail. La déformation d'un pneu en roulement permet de représenter ce phénomène lié aux déformation élastiques de la zone de contact.



La charge Q de roue joue un rôle considérable dans la fatigue du rail. Des études statistiques montre que cette fatigue est fonction de Q^a avec $a > 2$.

à condition de rester dans le domaine élastique, la pression au centre de l'ellipse est donnée par la formule de Hertz :

$$q_0 = \frac{1}{\pi \mu \nu} Q^{1/3} \left(\frac{E}{1 - \sigma^2} \right)^{2/3} \left[\frac{3}{8} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_1'} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_2'} \right) \right]^{2/3}$$

π, μ, ν : = Coefficients donnés par les tables de Hertz

E, σ : = Module d'élasticité de l'acier et son coefficient de Poisson

Q : = Charge de la roue

$\rho_1, \rho_1', \rho_2, \rho_2'$ = Rayons de courbures principaux du rail et de la roue

TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

Si le contact à lieu entre le flan du rail et le boudin, l'ellipse est beaucoup plus aplatie et l'effort est multiplié par 4.

De même, on calcule la contrainte de cisaillement maximale située à quelques millimètres sous la surface de contact et qui est la plus dangereuse :

$$t = 85 Q^{1/3} \left(\frac{1}{r} \right) \left[\left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{1}{\rho_b} \right) \right]^{1/3}$$

r : Rayon de la roue

ρ_r : Rayon de la surface transversale du rail

ρ_b : Rayon transversal du bandage

Les travaux du laboratoire de mécanique des solides de l'école polytechnique de Paris ont permis de préciser ces phénomènes.

L'augmentation de charge de roue a une influence défavorable à tous les niveaux mais surtout en profondeur.

Un profil de bandage de roue voisin du profil d'usure est favorable.

Une diminution du diamètre des roues est plus défavorable en surface qu'en profondeur.

La charge admissible diminue beaucoup plus vite pour les petits diamètres que pour les grands.

Le danger de ruine par déformation plastique de la surface de roulement reste toujours inférieur au risque d'endommagement par fatigue.

L'augmentation de charge de roue a une influence défavorable à tous les niveaux mais surtout en profondeur.

L'augmentation de l'inertie du rail et de la rigidité du support à une incidence modeste, plutôt défavorable, mais :

- Les déformations aléatoires permanentes sont moins importantes qu'avec un rail léger.
- La propagation des fissures de fatigue est ralentie.

Il apparaît, en définitive, que les sollicitations les plus dangereuses se situent vers 10 à 15 mm de profondeur.

La surface de l'ellipse de contact augmente avec la durée d'application, les contraintes ($\sigma = F/S$) seront donc d'autant plus élevées que la durée d'application est courte, c'est à dire que la vitesse croît.

La distribution des contraintes résiduelles varie le long du rail, elle se modifie au fur et à mesure des circulations. Il en résulte des modifications de courbure de rail en chaque point d'où des défauts de linéarité de courte longueur d'onde jouant un rôle important dans l'augmentation des surcharges dynamiques dues aux oscillations des masses non suspendues.

Qualité de l'acier à rail :

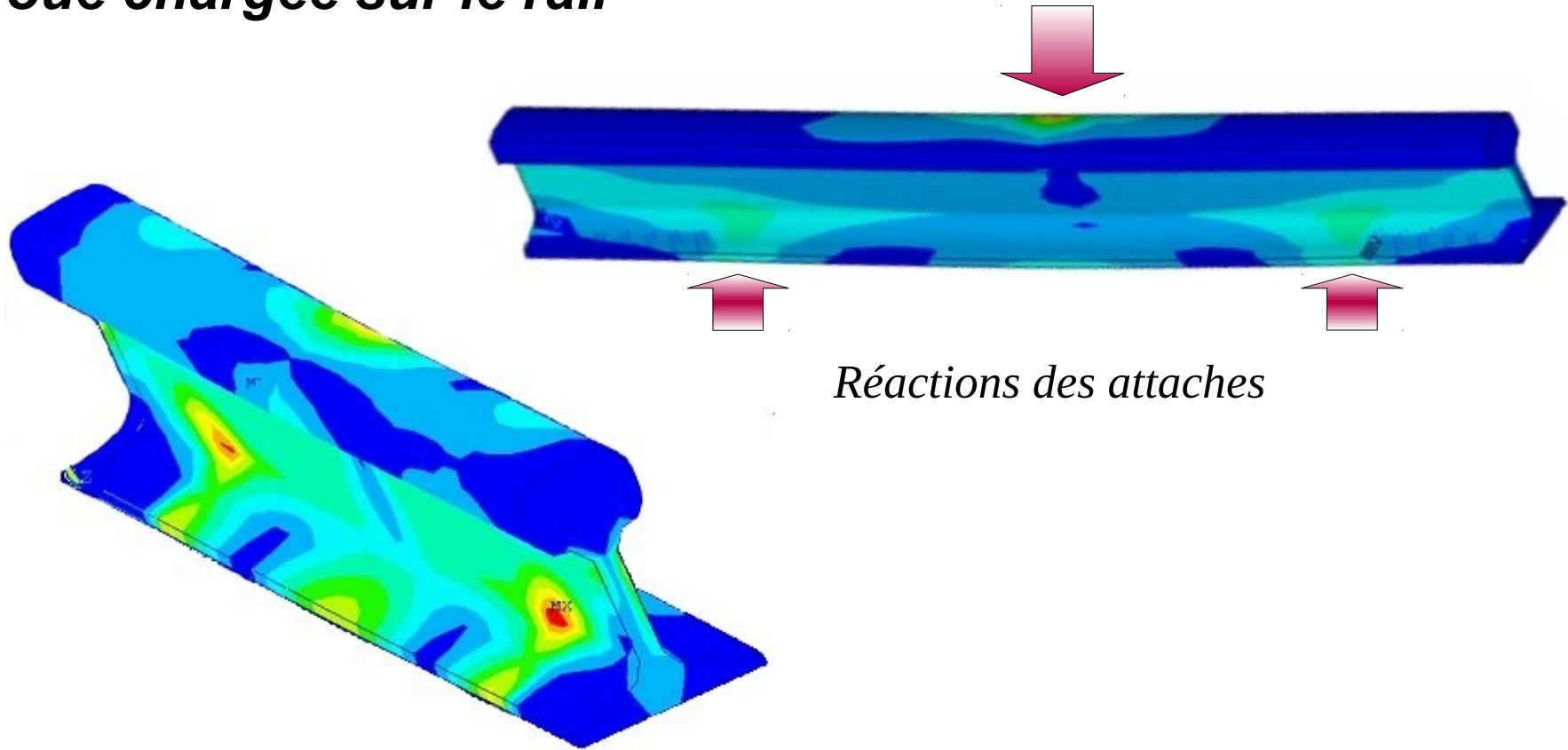
- Résistance à l'abrasion.
- Absence de fragilité.
- Absence de susceptibilité à l'auto trempe.
- Soudabilité.
- Adaptation facile à la production.

Ces qualités sont naturellement contradictoires et le produit ne peut être qu'un compromis.

TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

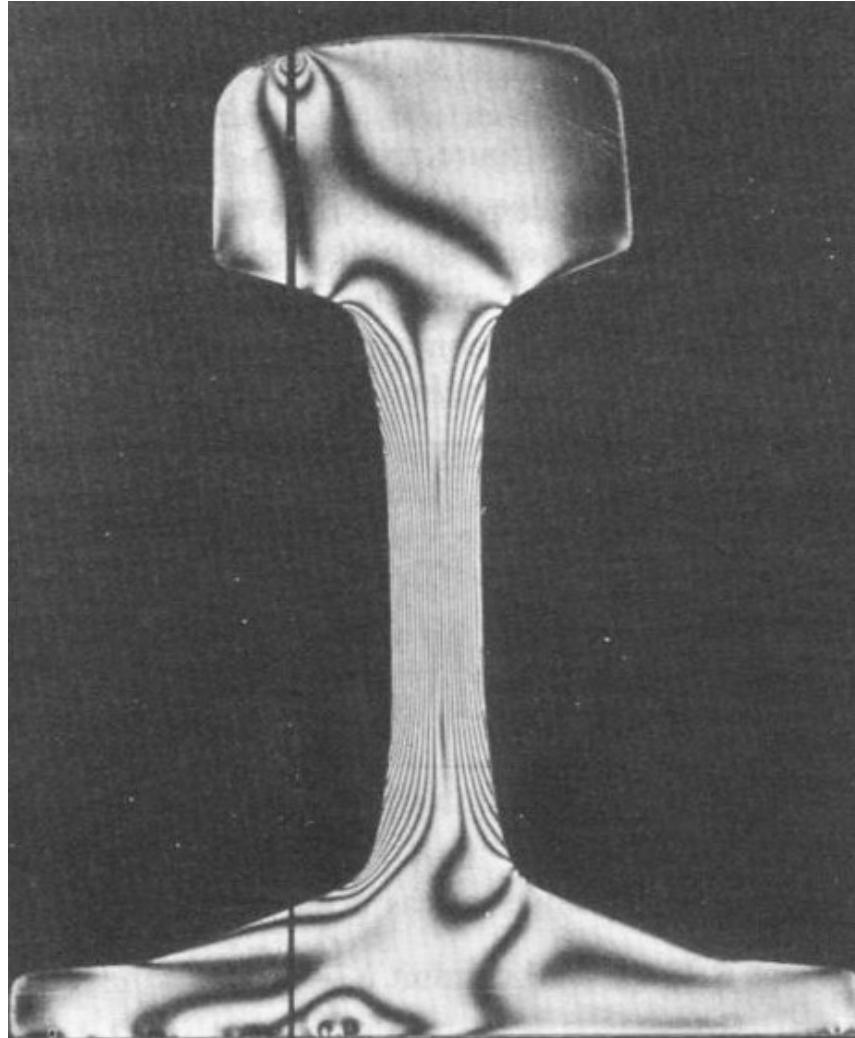
Répartition des contraintes suite à l'application d'une roue chargée sur le rail



Réactions des attaches

Élasticimétrie

La contrainte est proportionnelle au nombre de franges compté à partir d'une surface non sollicitée ou apparaissant pendant l'application de la charge.



Conséquences pour le rail

Les efforts exercés sur le rail provoquent sont usure et l'apparition de défauts.

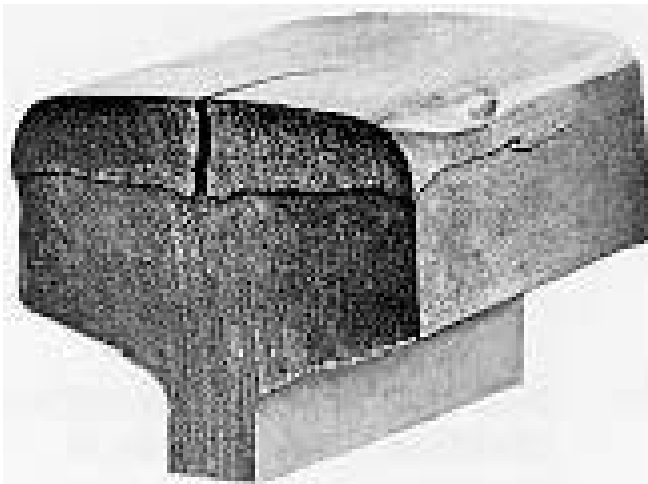
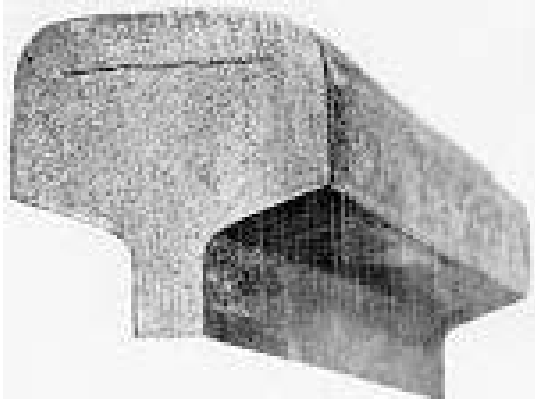
Ceux-ci sont repris dans l'IN 0285 (EF2C33) « Codification des défauts de rails ».

De nombreux défauts apparaissent aux joints sur les abouts de rail ou au niveau des trous d'éclisse de même qu'en pleine barre.

Ils peuvent être dus, soit à la fabrication, soit à l'utilisation.

Quelques, exemples non exhaustifs, de défaut provoqués par l'utilisation :

Fissuration horizontale des abouts



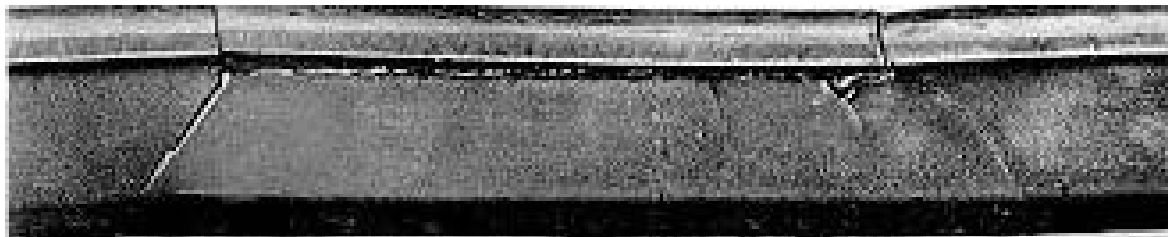
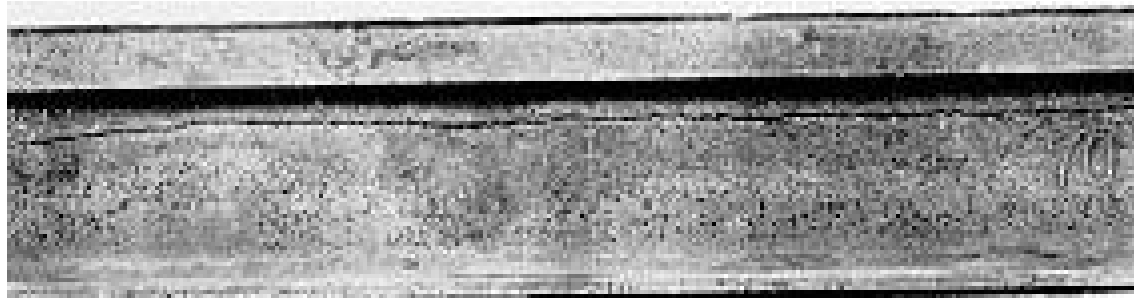
TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

Fissuration transversale (inclusion, flocon d'hydrogène)



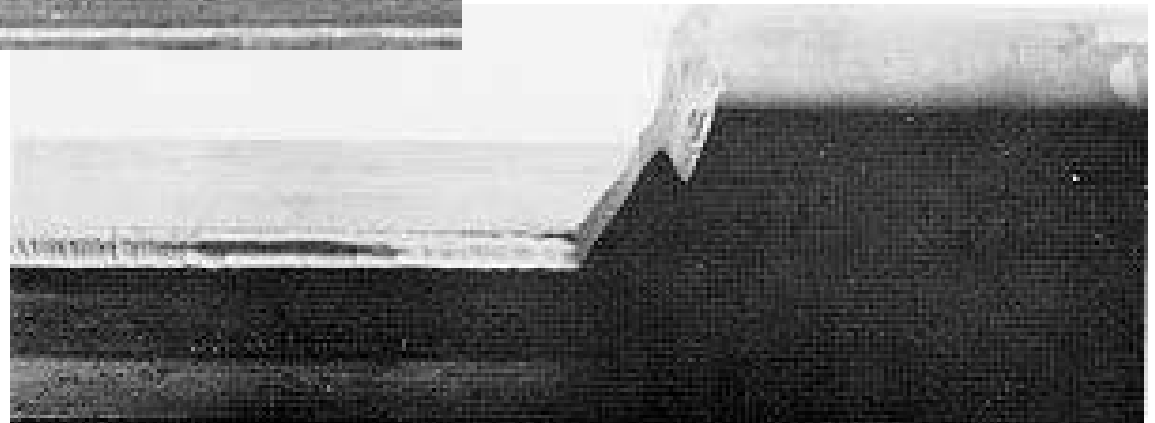
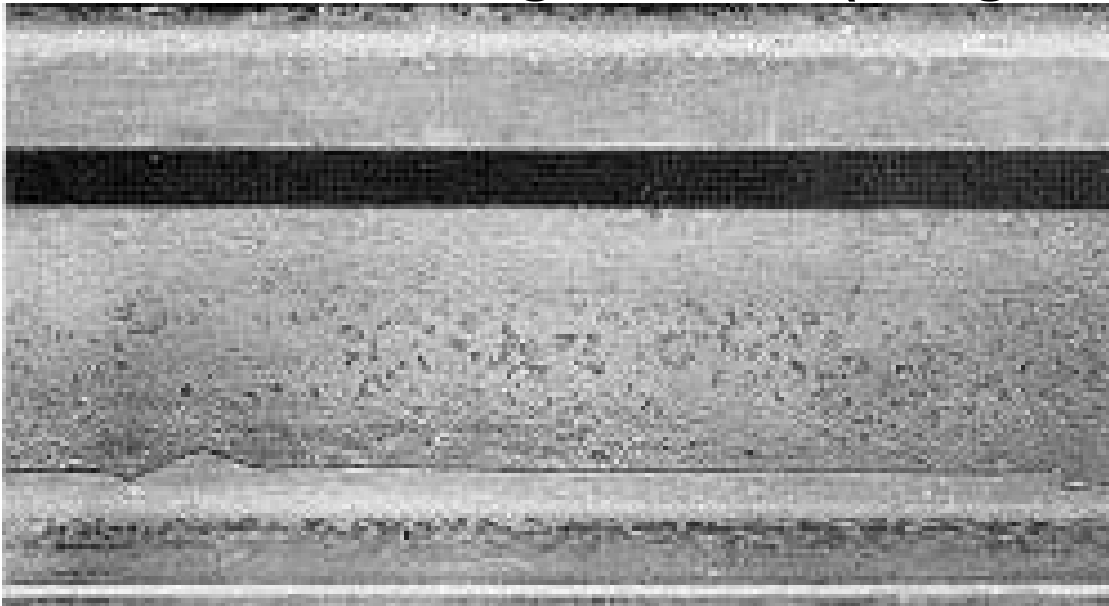
Fissuration longitudinale (congé du champignon)



TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

Fissuration longitudinale (congé du patin)



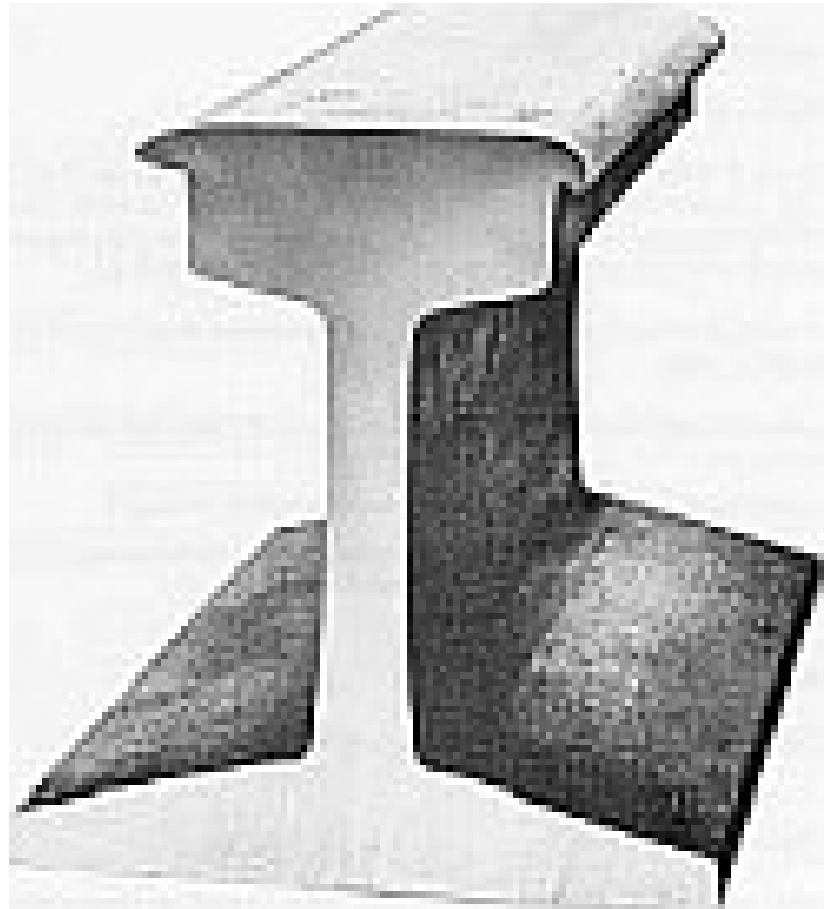
TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

Usure latérale



Usure verticale



TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

Patinage



L'usure ondulatoire

L'usure ondulatoire à ondes courtes est caractérisée par une succession pseudo périodique,

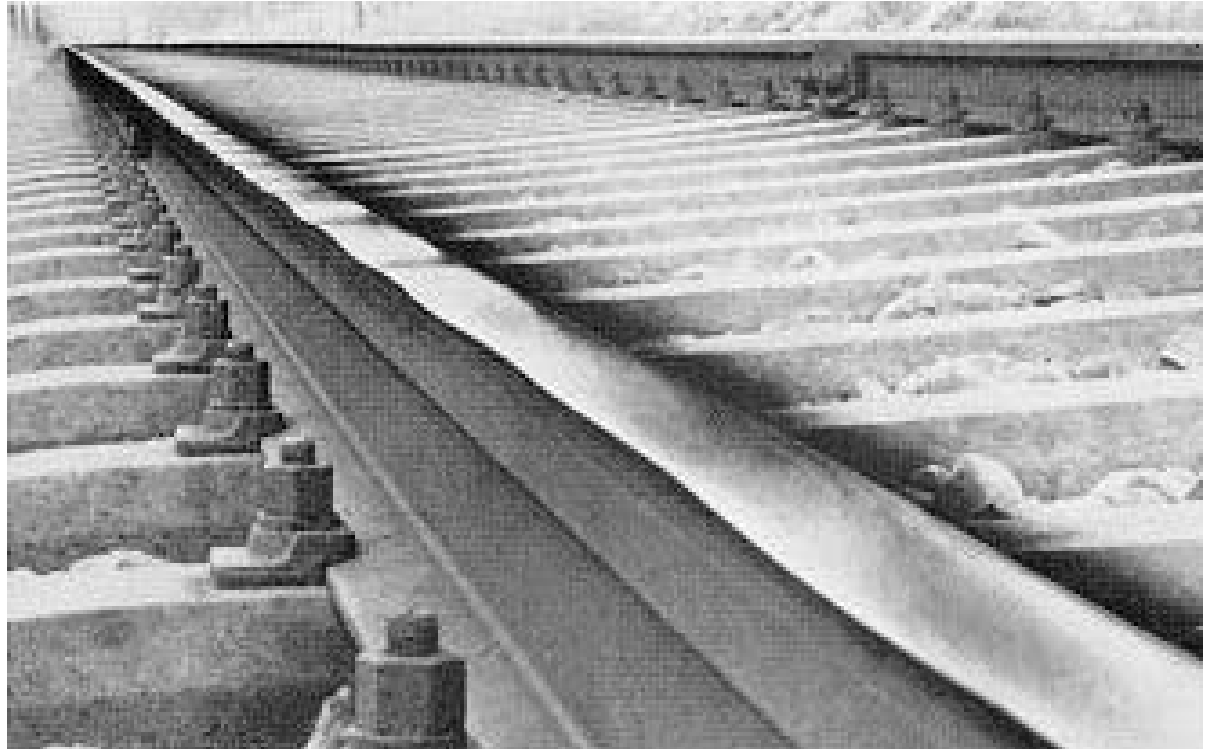
sur la surface de roulement, de crêtes brillantes et de creux sombres. La longueur d'onde est généralement comprise entre 3 et 8 cm.



TRACÉ DE VOIE

Efforts exercés sur le rail

L'usure ondulatoire à ondes longues est caractérisée par des dénivellations de la surface de roulement, plus ou moins accentuées et irrégulières par rapport à un profil rectiligne idéal.



La longueur d'onde
varie généralement de 8 à 30 cm environ.

L'usure ondulatoire à ondes longues apparaît préférentiellement sur les files basses de courbes.

RISQUES DE DÉRAILLEMENT PAR MONTÉE DE ROUE SUR LE RAIL



Montée de la roue sur le rail (le guidage n'est plus assuré)

plusieurs facteurs interviennent :

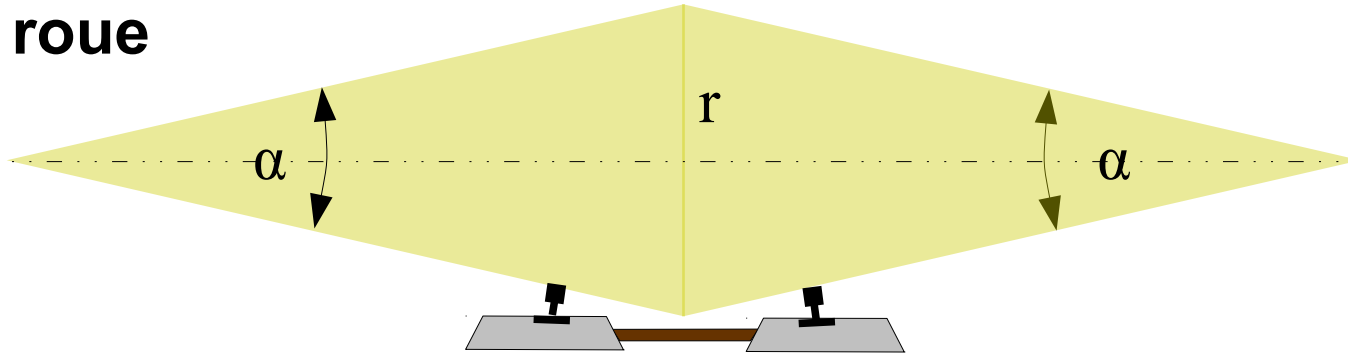
- Le profil de roue,
- Le profil de rail,
- Les frottements,
- Les suspensions,
- Les bogies,
- L'angle d'attaque,
- Les gauches, la qualité géométrique de la voie,
- etc.

**Études
particulières
à chaque
domaine**

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

La roue



Le bandage des roues est conique ($1/20^{\text{ème}}$), celles-ci sont solidaires de leur axe commun et donc obligées au même nombre de tours. L'essieu se comporte comme un dicône et s'autocentre sur une voie en alignement en revenant dans une position médiane, il y a donc glissement au contact roue rail et rotation de l'essieu. Cette trajectoire sinusoïdale est appelée lacet. La longueur d'onde L dépend du rayon r de la roue, de la différence s des 2 circonférences de roulement et de l'angle du cône α

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Formule de Klingel (ant. 1890)

$$L = 2 \sqrt{\frac{rs}{\alpha}}$$

Pour un véhicule à 2 essieux à une distance l :

$$L' = L \sqrt{l + \left(\frac{L}{s}\right)^2}$$

Lors du record de vitesse de 331 km/h (CC7107 le 28 mars et BB 9004 le 29 mars 1955 sur la ligne des landes), il à été constaté des déformations sinusoïdales de la voie sur environ 500 m avec une période d'environ 22 m.



les véhicules modernes à 4 essieux ont une période variant entre 20 et 30 m.

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement



TRACÉ DE VOIE

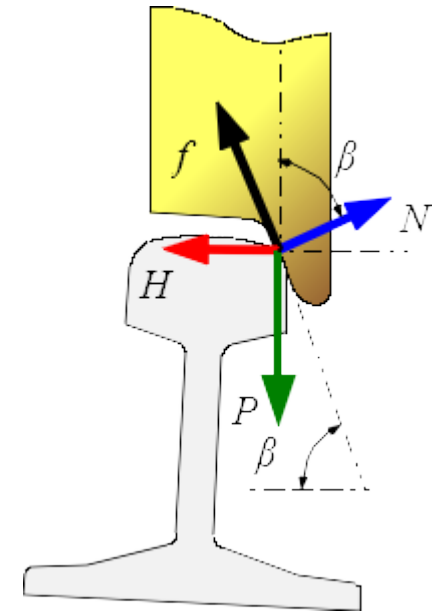
Risques de déraillement



Contact rail / roue

En négligeant le pseudo glissement et l'angle d'attaque, la roue transmet au rail la charge P et la poussée H ; elle reçoit une réaction normale N à laquelle correspond, s'il y a glissement, un frottement f .

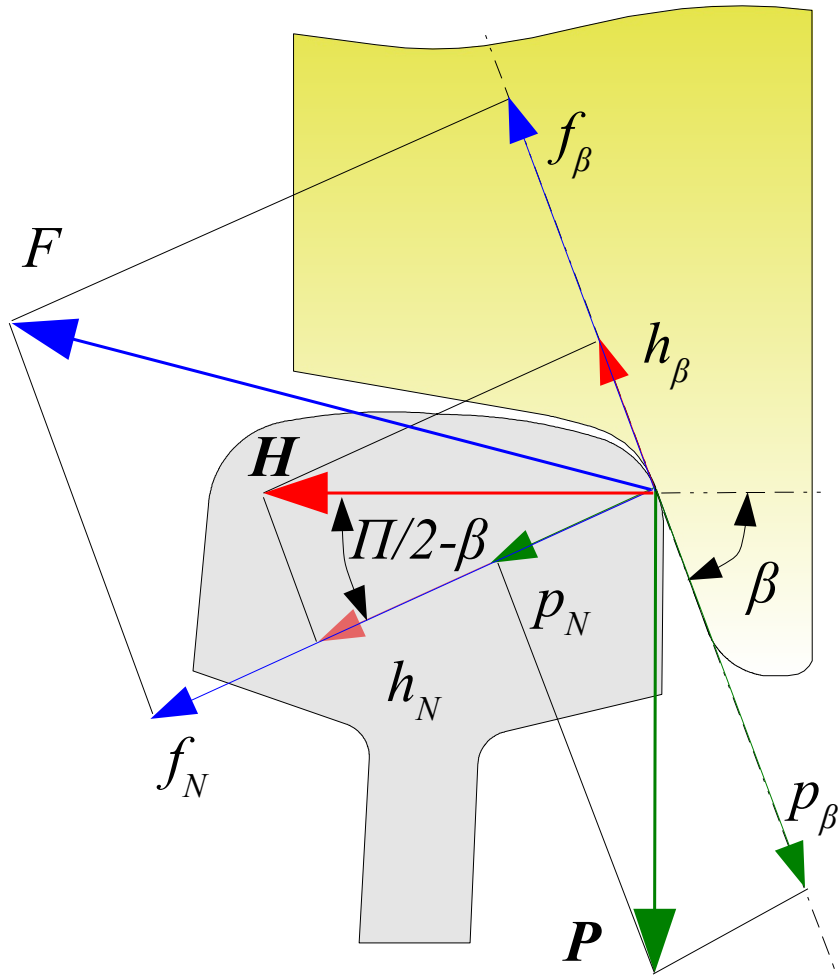
En écrivant l'équilibre de ces forces on obtient la valeur de la poussée H au-delà de laquelle le déraillement est susceptible de se produire.



Le rapport H sur P est appelé « capacité de guidage » de la roue elle dépend de la charge sur la roue mais aussi de l'angle du boudin par rapport à l'horizontale (70° à la SNCF)

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement



$$h_{\beta} = H \cos \beta \quad p_{\beta} = P \sin \beta$$

$$f_N = h_N + P_N = P \cos \beta + H \sin \beta$$

$$f_{\beta} = k f_N \quad (k \text{ coefficient de frottement})$$

Condition de non déraillement :

$$p_{\beta} > h_{\beta} + f_{\beta} \text{ donc :}$$

$$P \sin \beta > H \cos \beta + k (P \cos \beta + H \sin \beta)$$

$$P \sin \beta - k P \cos \beta > H \cos \beta + k H \sin \beta$$

$$P (\sin \beta - k \cos \beta) > H (\cos \beta + k \sin \beta)$$

$$\frac{(\sin \beta - k \cos \beta)}{(\cos \beta + k \sin \beta)} > \frac{H}{P}$$

En simplifiant par $\cos \beta$:

$$\frac{H}{P} < \frac{(\operatorname{tg} \beta - k)}{(1 + k \operatorname{tg} \beta)}$$

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

ex: $\beta = 70^\circ$ ($\text{tg } \beta = 2.74748$)

$k = 0,25$ (rail sec) $\Rightarrow H < 1,480 P$

$k = 0,12$ (rail mouillé) $\Rightarrow H < 1,976 P$

H étant la force à appliquer latéralement sur la roue pour qu'elle monte sur le rail, P la charge de la roue.

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Lorsque la roue se lève (Z), la fonction définissant l'effort transversal (H) est rapidement croissante (congé entre la table de roulement et le boudin) puis relativement constante (partie du flan du boudin) et diminue très rapidement (congé inférieur du boudin). L'équilibre est stable dans la 1^{ère} zone, indifférent dans la 2^{ème} puis instable dans la 3^{ème}. La zone médiane constitue donc l'effort maximal admissible⁽¹⁾.



1 – Voir « La théorie statique du déraillement d'un essieu » par M. Charvet (Revue Générale des Chemins de Fer du 3 août 1950).

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

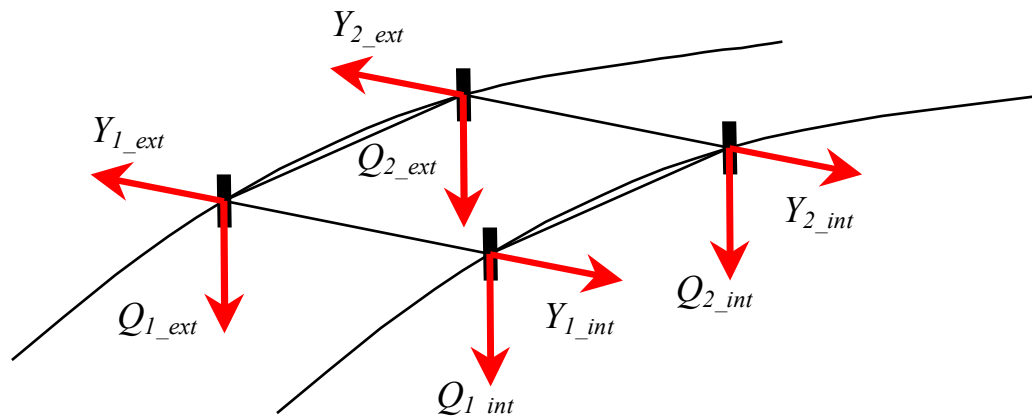
Forces mesurées lors des essais d'homologation (fiche UIC 518)

Sur un bogie équipé d'essieux instrumentés, on mesure les 8 forces suivantes (efforts exercés par les roues sur les rails):

- forces verticales: Q_{1_ext} Q_{1_int} Q_{2_ext} Q_{2_int}

- forces transversales: Y_{1_ext} Y_{1_int} Y_{2_ext} Y_{2_int}

indices 1 / 2 : essieu 1 / essieu 2, indices ext / int : roue extérieure / roue intérieure (en courbe)



TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Les études du comité ERRI B55 ont conduit à prescrire, pour prévenir tout déraillement par montée de boudin sur le rail, une limite au rapport (Y_{1_ext} / Q_{1_ext}) de l'effort transversal et vertical de la roue guidante, qui caractérise le risque de déraillement. Celle-ci doit rester inférieure à 0,8 (1,2 pour une circulation à faible vitesse).

$$\frac{Y}{Q} \leq 0,8 \quad \text{pour des vitesses lentes on admet} \quad \frac{Y}{Q} \leq 1,2$$

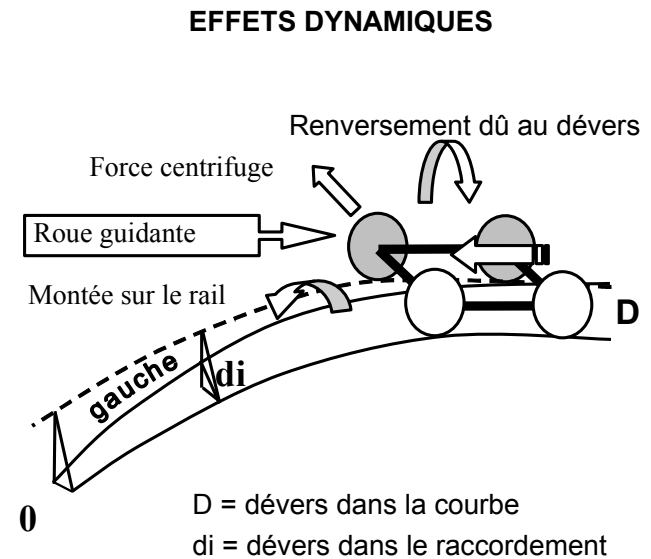


Pour éviter le chanfreinage du rail favorisant la montée de roue dans les faibles rayons, on graisse le flan intérieur du rail extérieur diminuant ainsi le frottement f .

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Les expériences montrent que l'effort critique de dérapage de voie (non stabilisée) est atteint bien avant l'effort critique de déraillement sauf à faible vitesse, en courbe de faible rayon et de dévers important comportant un raccordement de sortie à forte variation de dévers où se cumulent un délestage de la roue guidante (fort dévers, faible vitesse), un fort angle d'attaque (petit rayon) et un gauche important favorisant ces phénomènes.



Des limites de dévers (et réciproquement de variation de dévers) ont donc été définies en fonction du gauche en sortie de courbe et de la valeur du rayon de la courbe, les règles du « $(R-100)/2$ ».

$$dp \leq \frac{(R-100)}{2} \quad \text{si } g \leq 2 \text{ mm/m}$$

$$dp \leq \frac{(R-150)}{2} \quad \text{si } g \leq 3 \text{ mm/m}$$

$$dp \leq \frac{(R-250)}{3} \quad \text{si } g \leq 4 \text{ mm/m}$$



Attention à la valeur du rayon de la branche déviée d'appareil cintré posé en dévers et des gauches sur l'itinéraire dévié !

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

De même, on a fixé le dévers maximum à 180 mm pour des raisons de sécurité (arrêt en courbe, redémarrage où l'effort de traction amplifie les phénomènes de renversement et de délestage).

Une expérimentation (dévers 175/180) a été réalisée sur la ligne Dijon-Vallorbe pour s'affranchir du problème en proposant des raccordements bi-pentes avec une faible variation de dévers coté courbe et une forte variation coté alignement (évitant d'allonger les raccordements).

À ce jour aucun désordre n'a été constaté.

Voir 

Le mainteneur n'est pas favorable à sa généralisation du fait de la nécessité d'une préparation plus soignée du bourrage de ces zones risquant de ne plus être assurée (perte de compétence).

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Raccordement b – Km 444,255 – 444,375

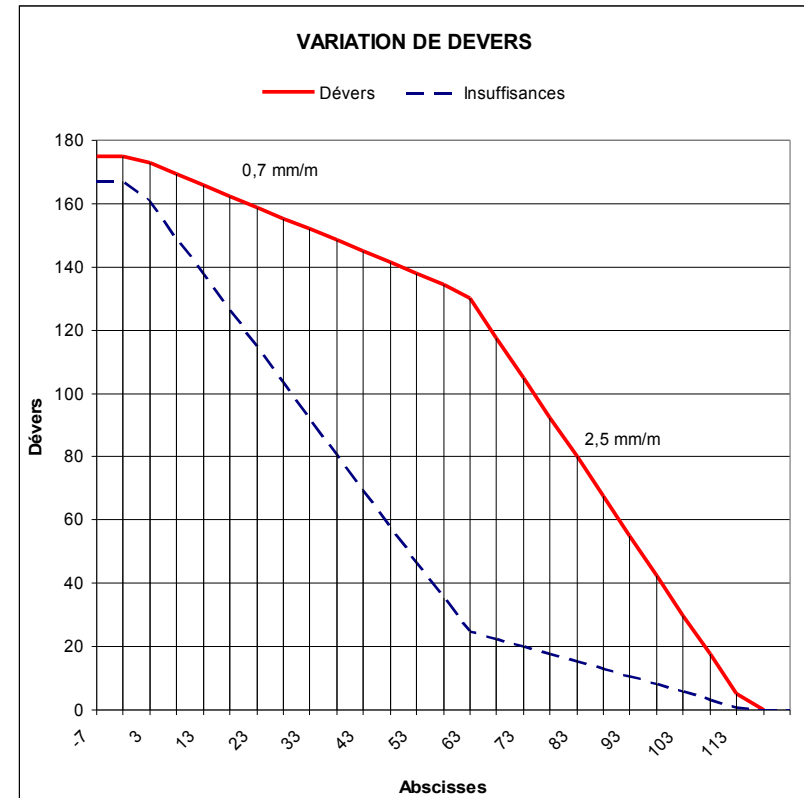


$a1 = 2.5$ $D = 175$ $V = 140$
 $a2 = 0.7$ $L = 115$ $R = 676$
 $Xp = 62.50$ $Yp = 131.25$

N° borne	Abscisse	Dévers	I	k	E[k]
110	-7	175	167	0.112	0
111	3	173	160	0.048	0
112	13	166	138	0.208	0
113	23	159	115	0.368	0
114	33	152	92	0.528	0
115	43	145	69	0.688	0
116	53	138	47	0.848	0
117	63	130	25	1.008	1
118	73	105	20	1.168	1
119	83	80	15	1.328	1
120	93	55	10	1.488	1
121	103	30	6	1.648	1
122	113	5	1	1.808	1
123	123	0	0	1.968	1

$$k = E \left[\frac{(1,8x)}{112,5} \right]$$

$$y = (1-k)(-0,7x+175) + 2,5k(115-x)$$



TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Raccordement C – Km 444,780 – 444,910

$$y = \frac{172S^3(6S^2 - 1890S + 1587600)}{31757969376}$$

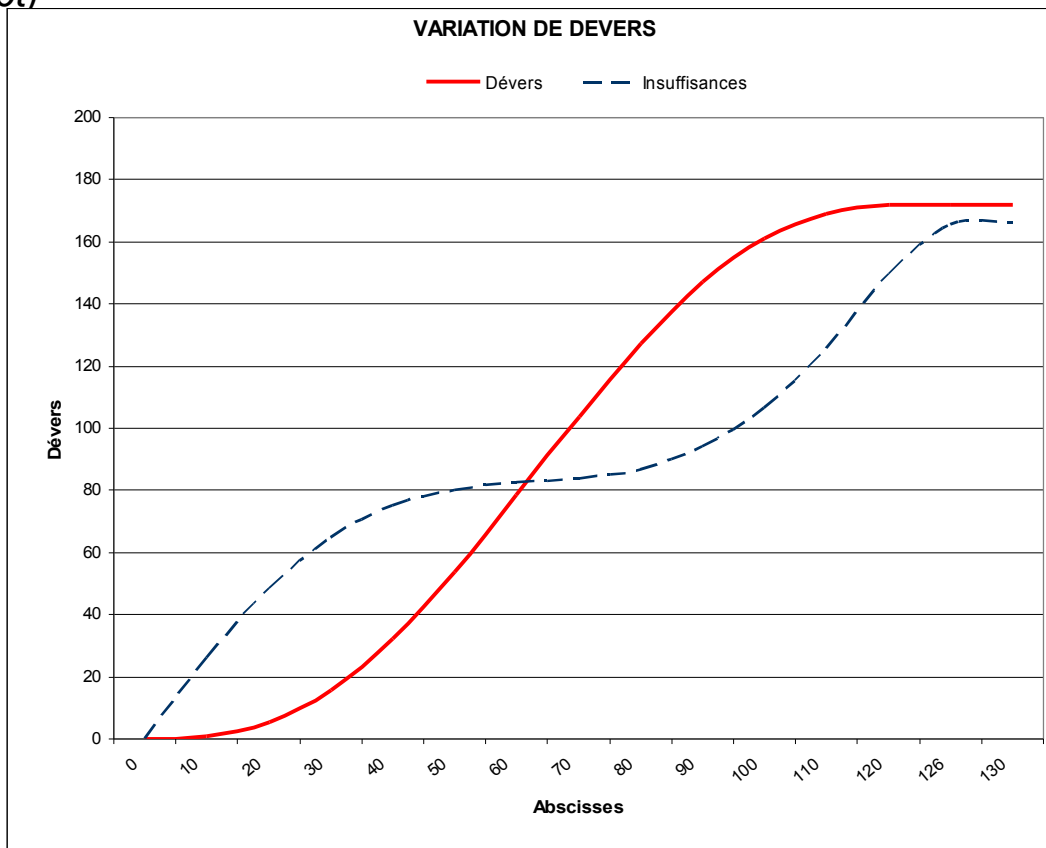
(Courbe de M. Caquot)



V Km/h = 140
D = 172

L = 126
Rayon = 685

N° bornes	ABSCI. (m)	D	D/L	I	dD/dt	dl/dt	dD/dt + dl/dt
163	0	0	0.0	0.0	3.0	101.2	104.2
164	10	1	0.1	26.0	17.8	86.4	104.2
165	20	5	0.5	48.2	40.3	63.9	104.2
166	30	16	1.0	64.7	63.9	40.3	104.2
167	40	32	1.6	75.0	83.6	20.6	104.2
168	50	54	2.2	80.3	96.0	8.3	104.2
169	60	78	2.5	82.4	99.4	4.8	104.2
170	70	104	2.5	83.8	92.1	12.1	104.2
171	80	127	2.4	86.9	76.5	27.7	104.2
172	90	147	2.0	94.1	54.7	49.5	104.2
173	100	161	1.4	106.8	30.9	73.3	104.2
174	110	169	0.8	125.6	10.5	93.7	104.2
175	120	172	0.3	149.7	1.1	103.1	104.2
176	126	172	0.0	165.6	0.0	3.5	3.5
177	130	172	0.0	166.0	0.0	0.0	0.0



Retour



TRACÉ DE VOIE

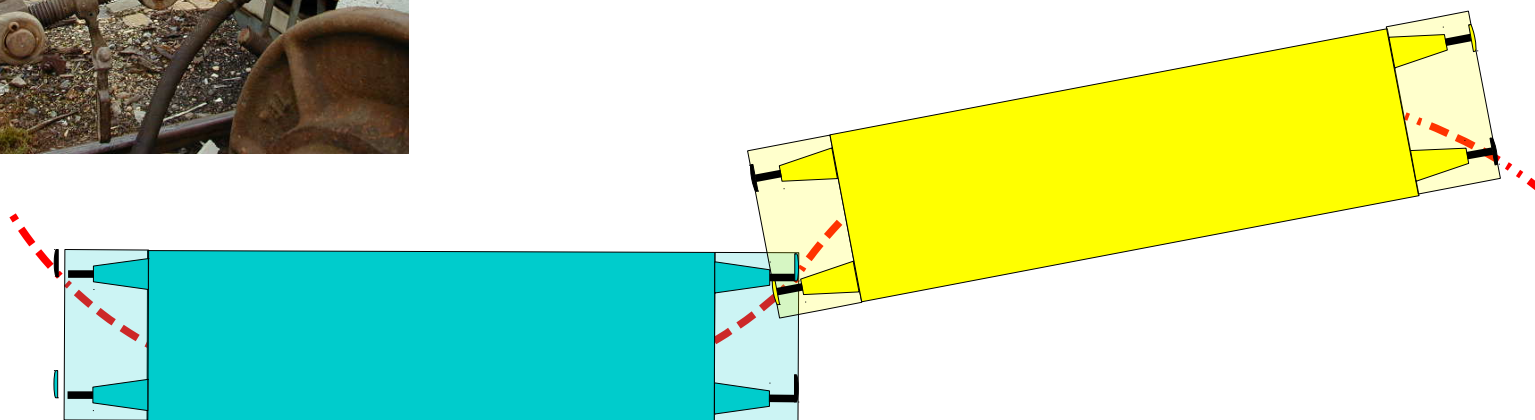
**- RISQUES DE
DÉRAILLEMENT
PAR MARIAGE
DE TAMPONS**



TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Le support guide les véhicules, ceux-ci sont reliés par des attelages constitués de tampons. Le tracé du support doit assurer un recouvrement minimum de ceux-ci en toute occasion.



TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Pour limiter ces risques, il convient de réduire les déports relatifs de deux véhicules en respectant une longueur minimale d'alignement L entre courbe et contre-courbe.

Formules UIC, R_1 et $R_2 \geq 150$ m, e = écartement

$$L = \sqrt{(R_1 + R_2) \left(\frac{45}{R_1} + \frac{45}{R_2} - 0,45 - 2(1,470 - e) \right)} \quad \text{si } \frac{45}{R_1} + 9 \left(\frac{4R_2 - R_1}{R_2^2} \right) \leq 0,45 - 2(1,470 - e)$$

Exceptionnellement

$$L = 15 - \sqrt{(4R_2 - R_1) \left(0,45 - 2(1,470 - e) - \frac{45}{R_1} \right)} \quad \text{si } \frac{45}{R_1} + 9 \left(\frac{4R_2 - R_1}{R_2^2} \right) > 0,45 - 2(1,470 - e)$$

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

La condition d'alignement s'exprime sous la forme :

$$\frac{45}{R_1} + \frac{45}{R_2} - 0,45 - 2(1,470 - e) > 0$$

Dans le cas le plus défavorable, $e = 1,470$ et le terme $(1,470 - e)$ s'annule.

La SNCF utilise les formules si-dessous (ex IN 0272) :

$$L = \sqrt{(R_1 + R_2) \left(\frac{45}{R_1} + \frac{45}{R_2} - 0,36 \right)} \quad \text{si } \frac{45}{R_1} + \frac{45}{R_2} > 0,36 \quad \text{valeur nominale (1)}$$
$$L = \sqrt{(R_1 + R_2) \left(\frac{45}{R_1} + \frac{45}{R_2} - 0,45 \right)} \quad \text{si } \frac{45}{R_1} + \frac{45}{R_2} > 0,45 \quad \text{valeur exceptionnelle (2)}$$

} Sinon alignement inutile

Le terme 0,36 au lieu de 0,45 exprime une marge de sécurité prise par rapport aux résultats des formules UIC.

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

La différence de résultat entre les formules (1) et (2) représente 1,777 m pour $R_1 = R_2 = 150$ m).

On peut également exprimer ces équations en fonction des flèches :

$$L = \sqrt{\frac{45(f_1 + f_2)(f_1 + f_2 - 400)}{f_1 f_2}} \quad \text{si } f_1 + f_2 > 400 \quad \text{valeur nominale}$$
$$L = \sqrt{\frac{45(f_1 + f_2)(f_1 + f_2 - 500)}{f_1 f_2}} \quad \text{si } f_1 + f_2 > 500 \quad \text{valeur exceptionnelle}$$

} Sinon
alignement
inutile

L'IC 00272 v2 du 30/01/2013 (RFN-NG-IF 02 C-32-n°005) donne comme condition d'alignement :

$$f_1 + f_2 > 420 \quad \text{Avec alignement de 10 m minimum.}$$

Les alignements définis entre courbes et contre courbes ont pour but de ménager un recouvrement de tampons minimum de 60 mm, exceptionnellement de 25 mm, pour éviter l'enchevêtrement synonyme de déraillement.

Ces formules tiennent compte des saillies au niveau des tampons, des jeux dus au matériel, de la souplesse des suspensions et du jeu entre l'essieu et l'écartement des rails.

Une formule empirique était utilisée par l'ex service VBG3 (Sud Est) :

$$L = 7 \left(\frac{1000}{4} R_1 - 4 \frac{R_2}{1000} \right)$$

Celle-ci minore un peu l'alignement par rapport à la formule SNCF actuelle, 7,467 m pour 8,161 m R 150 m

Implantation des appareils de voie en tracé sinueux

l'IN 0230 « Appareils de voie unifiés – Conditions d'implantation, études particulières, études spéciales » détermine, en fonction des dispositions de la fiche UIC 527.1 OR (Dimension des plateaux de tampons – Tracé de voie des courbes en S), les règles d'implantation :

Implantation normale (tableaux impairs) qui réserve un recouvrement de tampons de 60 mm au moins (75 mm lorsque la vitesse relative de déplacement des tampons est plus importante),

Implantation exceptionnelle (tableaux pairs) qui réserve un recouvrement de tampons de 25 mm au moins (40 mm lorsque la vitesse relative de déplacement des tampons est plus importante).

Les calculs tiennent compte de l'angle de déviation des appareils à tracé sécant et de la longueur des alignements inclus dans l'appareil (entre JP et PRA – Longueur du croisement droit). Les alignements réels entre courbe et contre-courbe sont donc en réalité plus importants que la longueur ℓ qui figure dans les tableaux.

Établis pour la vitesse de 30 km/h pratiquée sur voies de service et certaines zones de gare, ils concernent les cas de figure suivants :

- Tableaux I et II Courbe située coté pointe,
- Tableaux III et IV Courbe située coté talon,
- Tableaux V et VI Appareils pointe à talon,
- Tableaux VII et VIII Appareils talon à talon,
- Tableaux IX et X Appareils pointe à pointe.

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

A la vitesse de 40 km/h, la part dynamique intervenant dans le décalage transversal des tampons est plus importante que pour la vitesse de 30 km/h. Il est donc nécessaire d'allonger l'alignement intermédiaire entre les deux courbes du tracé sinueux sur les liaisons, les entrées et les sorties de voies principales où la vitesse minimale de 40 km/h est prévue à généraliser dans l'avenir. Cette disposition s'applique essentiellement à l'implantation pointe à pointe de branchements $tg 0,11$ à déviation pour laquelle l'alignement intermédiaire minimal nécessaire est de 5 m.

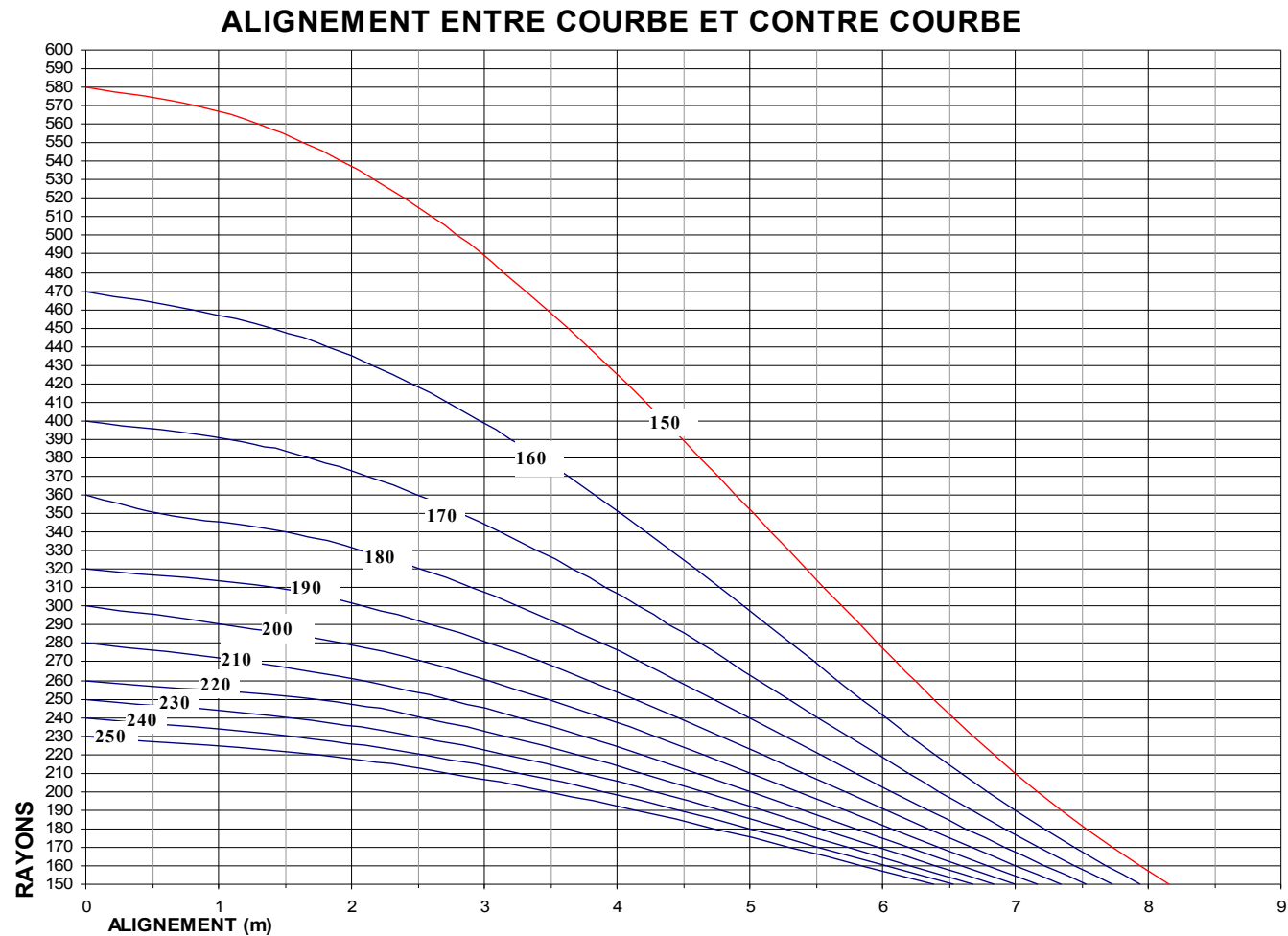


L'angle de déviation en pointe d'appareil peut être assimilé à un surcroît de flèche de 40 mm pour 1° (0,13) et 20 mm pour $0^\circ,30'$ (S 0,167).

TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

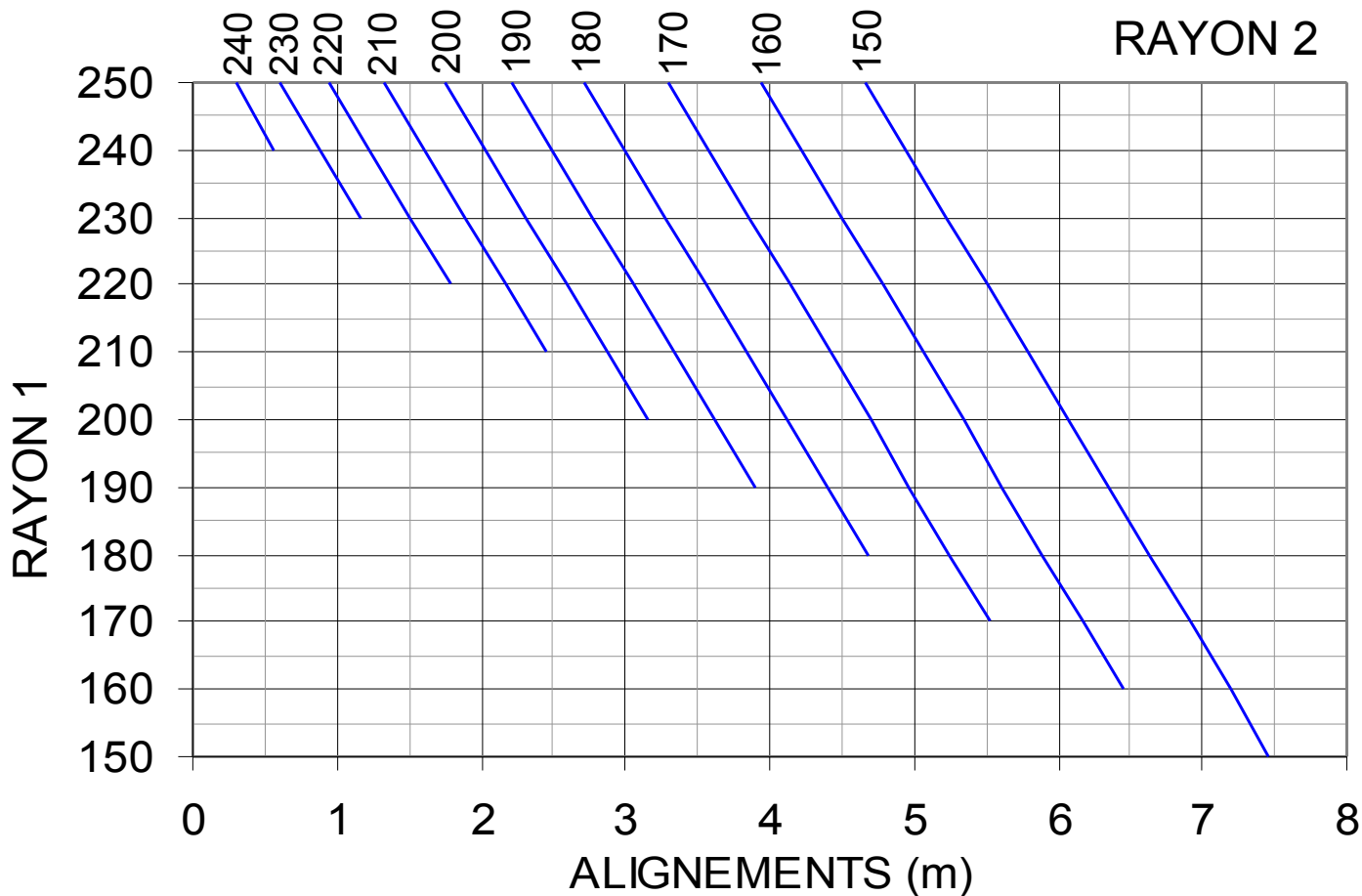
Formule
SNCF



TRACÉ DE VOIE

Risques de déraillement

Formule
Sud Est



RISQUES DE DÉRAILLEMENT PAR DÉRIPAGE



Déformation de la voie au passage d'une circulation

Facteurs à prendre en compte :

- rigidité du châssis de voie,
travelage, type de rail, attaches,...
- frottement traverse / ballast,
nature, usure, épaisseur du ballast, degré de stabilisation,
nature, forme et poids des traverses
- contraintes de compression dans le rail,
type de rail,
type de pose,
variation de température,
entretien (ouverture des joints, graissage des éclisses,...)

Accélérations transversales γ_t supportées par la voie,

mouvements de réaction induits par le support

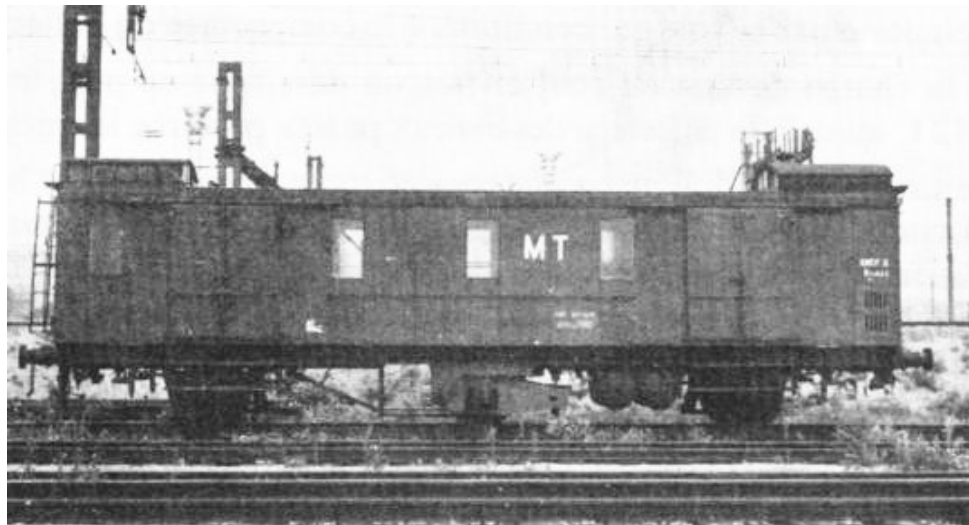
- ✓ qualité géométrique (défauts de dressage, de nivellement, d'écartement, gauches, danse,...)
- ✓ géométrie (courbes, alignements, points de transition de tracé, raccordements, appareils de voie)

mouvements du véhicule

- ✓ vitesse, inertie, réaction de suspension

Déripage de voie : Études expérimentales⁽¹⁾

Des essais ont été réalisés en 1952, 1955 et en 1962, 1963 sur une voie stabilisée puis déconsolidée par une opération de nivellement par soufflage et après le passage de 2000 t au moyen du wagon dérailleur SNCF.

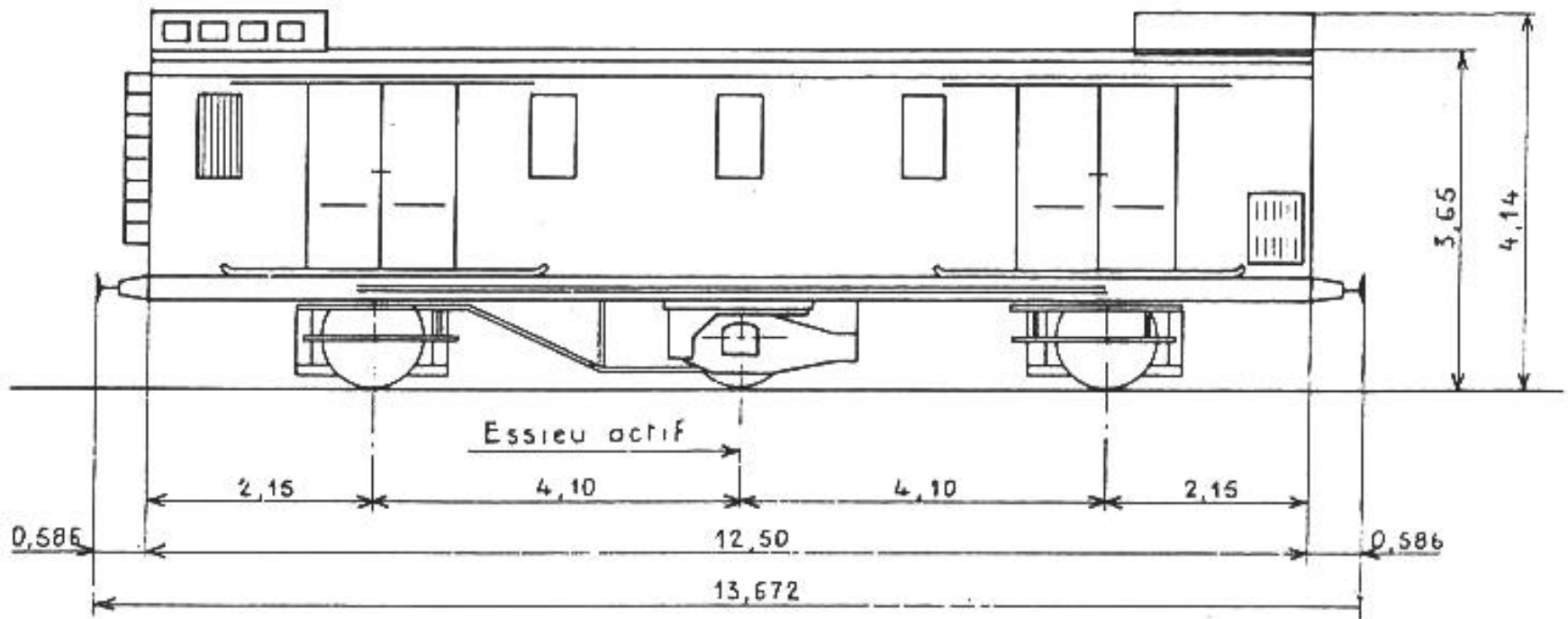


1 – Voir « La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant » par M. Prud'Homme (Revue Générale des Chemins de Fer de janvier 1967).

TRACÉ DE VOIE

Risque de déraillement

Wagon-dérailleur SNCF – Ssi 443

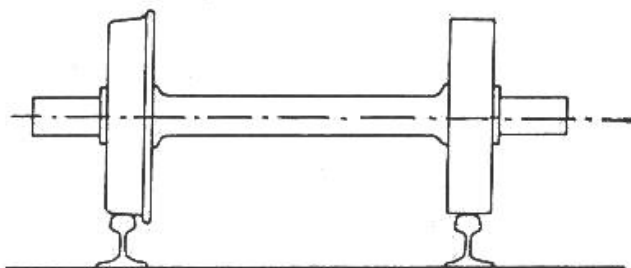


TRACÉ DE VOIE

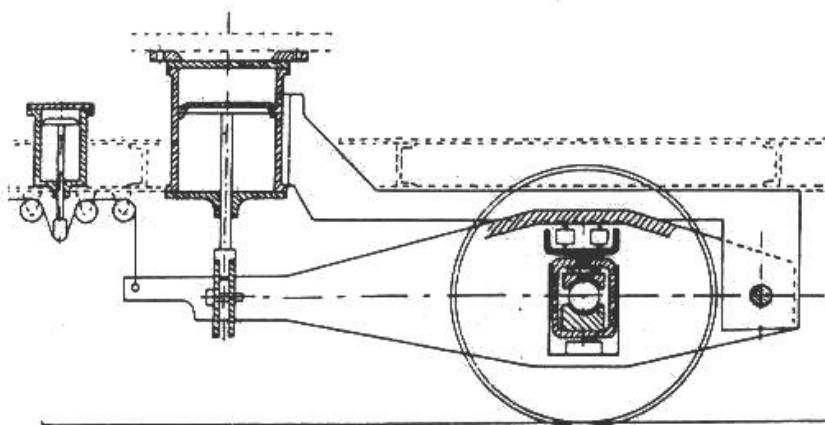
Risque de déraillement

Détailles de fonctionnement

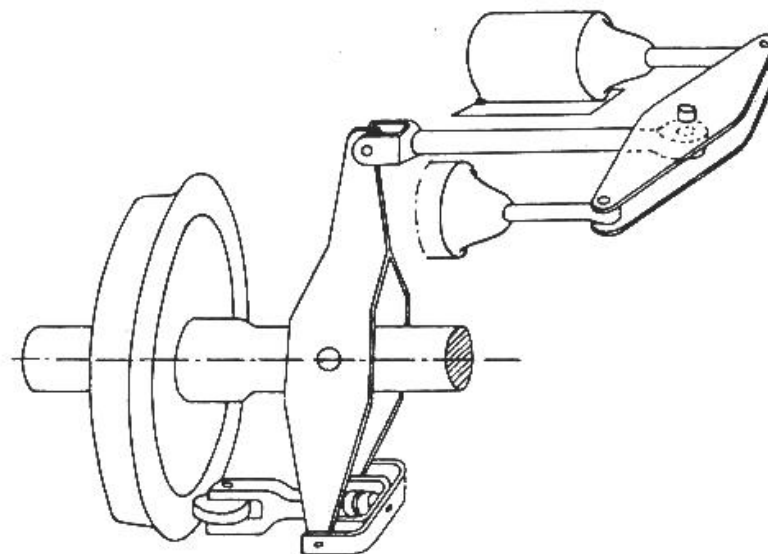
L'ESSIEU DÉRAILLEUR



LE CHÂSSIS PORTE-ESSIEU



DISPOSITIF D'APPLICATION DE L'EFFORT TRANSVERSAL



TRACÉ DE VOIE

Risque de déraillement

Influence
de la
charge P
(essais
de 1963
et 1952)

Fig. 23 — Essais de 1963 au wagon dérailleur

Traverses bois sans selle. Attaches élastiques. Rail 46 kg U 33

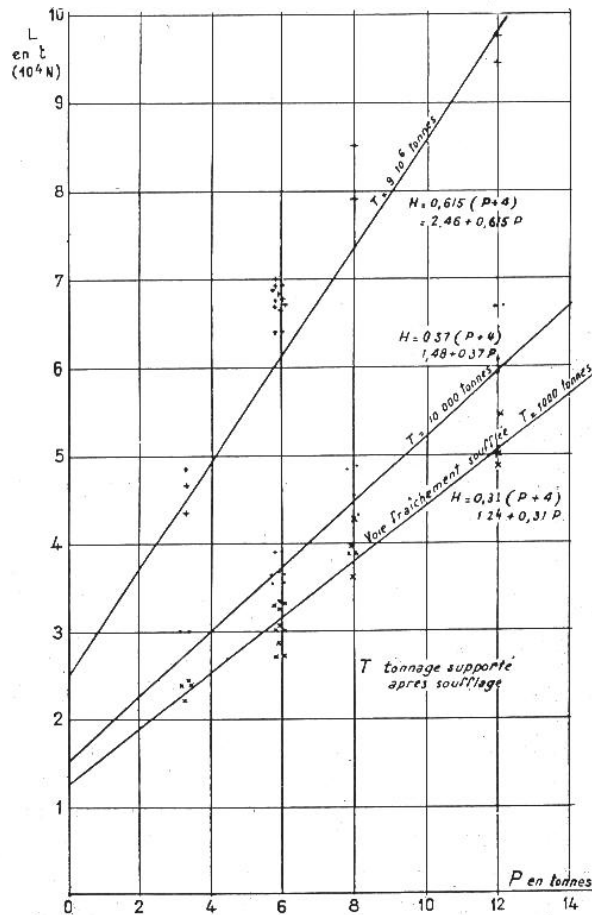
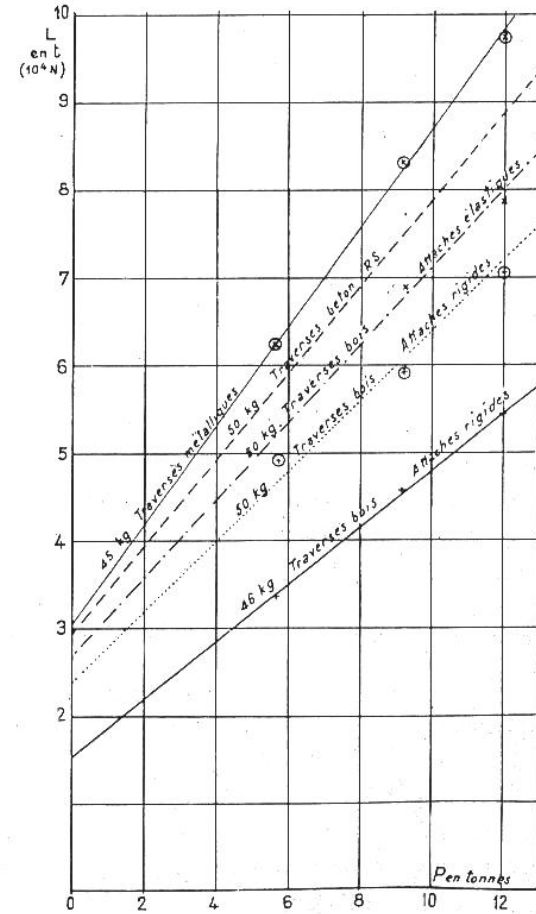


Fig. 24 — Essais de 1952 au wagon dérailleur

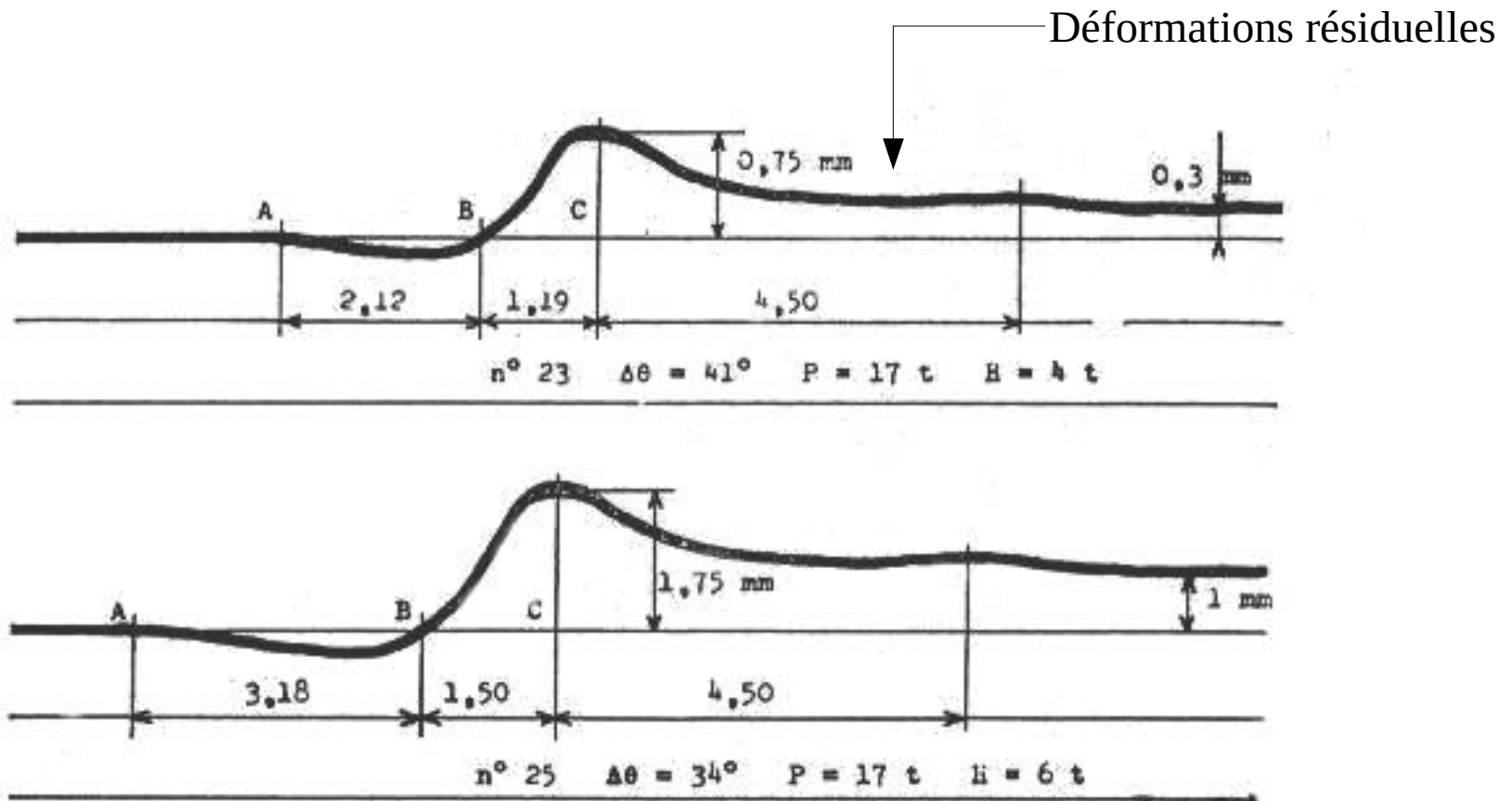
au wagon dérailleur



TRACÉ DE VOIE

Risque de déraillement

Enregistrement de la déformation transversale :



TRACÉ DE VOIE

Risque de déraillement

On constate :

une zone AB de contre flèche de sens opposé à l'effort H. Cette zone, plus accusée, a une amplitude plus grande lorsque les rails sont comprimés.

Une deuxième zone BC où la déformation est de même sens que H

Influence de la charge P à l'essieu

l'effort $L = f(P)$, en tonne, a pour équation, à $\pm 0,4$ t près :

$L = 1,24 + 0,31P$ Cette formule n'étant qu'approchée, la SNCF a adopté :

$$L = 1 + \frac{P}{3} \quad \text{ou, en kN,} \quad L = 10 + \frac{P}{3}$$

C'est la formule de Prud'Homme

Cette formule remplace celle de M. Blondel : $L = 0,40 P$

Rappelons qu'elle ne concerne qu'une voie déstabilisée.

$$L = 0,85 \left(1 + \frac{P}{3}\right)$$

Fournit une valeur inférieure jamais atteinte au cours des essais

Application à la détermination de la vitesse maximale de circulation d'un véhicule

Lors des essais, les efforts transversaux H exercés par les essieux du véhicule et les variations de charges verticales sont mesurés au niveau des boîtes d'essieux. Les essais ayant montré que les efforts s'exerçant durant une courte durée sont sans influence, il n'est pas tenu compte des oscillations de fréquence supérieures à 20 Hz. Il est ainsi possible de comparer à tout instant les efforts H et la valeur de L.

TRACÉ DE VOIE

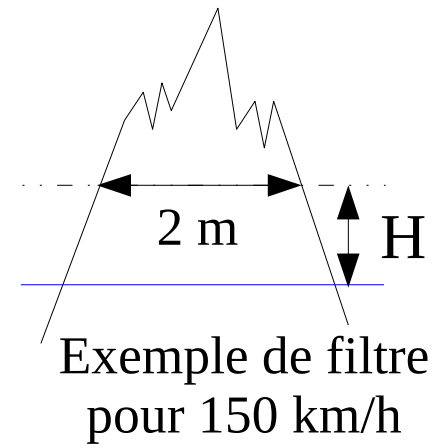
Risque de déraillement

Le véhicule est autorisé à circuler à V si à $V+10$ il n'a jamais été observé d'efforts $H > 0,85 + 0,28P$

Pour fixer les idées, la valeur moyenne de H enregistrée est 3 à 4 fois inférieure à la valeur moyenne de résistance de la voie de référence (46 kg, traverses bois, aussitôt après soufflage) donnée par $1 + 0,33P$

H max est supérieur à 3 écarts types de sa valeur moyenne

$0,85 + 0,28P$ est inférieure de 3 écarts types à la valeur moyenne de dérapage de la voie de référence.



Principaux enseignements tirés de ces essais :

Les facteurs principaux influant sur la résistance transversale d'une voie sont le degré de compacité du ballast et l'intimité de son contact avec les traverses.

Le passage répété des trains constitue le moyen de compactage le plus efficace par l'intensité des efforts verticaux appliqués et des vibrations provoquées.

La résistance transversale croît sensiblement comme le logarithme du tonnage supporté avec, toutefois, une asymptote supérieure.

Les petits déplacements latéraux de la voie ne se font pas par glissement des traverses sur le lit de ballast mais par déplacement de ses éléments sur une certaine épaisseur.

La réduction de résistance transversale provoquée par les opérations d'entretien conduisant à relever ou riper la voie, est sensible. Le soufflage entraîne une réduction un peu plus importante que le bourrage mécanique mais la différence n'est pas suffisante pour justifier son abandon.

Le taux de compression des LRS n'influe pas sensiblement sur la résistance transversale de la voie, mais lorsque l'effort transversal critique est atteint, les déformations prennent une plus grande amplitude. D'où, en été, l'interdiction d'effectuer des opérations d'entretien susceptible de diminuer la résistance de la voie.

La grosseur des éléments de ballast (30/60 ou 20/40) n'est pas très significative contrairement à une voie non chargée où les banquettes jouent alors un rôle important.

TRACÉ DE VOIE

Risque de déraillement

Le serrage des attaches a une influence pratiquement nulle sur la résistance d'une voie chargée.

l'inertie du rail joue un rôle plus important, mais la résistance latérale n'est pas l'aspect le plus important dans le choix d'un profil de rail.

Les voies stabilisées sur traverses en béton ont une résistance plus importante que les voies sur traverses en bois (~20%). Cette différence tombe à ~10% après soufflage.

~75% de la résistance maximale est obtenue après le passage de 100 000 t sur traverses en bois et 20 000 t sur traverses en béton.

TRACÉ DE VOIE

Risque de déraillement

En courbe la résistance sous charge n'est pas modifiée, même lorsque les rails sont en compression ($R > 750$ m bois, 500 m béton) attention toutefois aux rayons plus faibles.



En cas de LRS, se référer impérativement aux référentiels LRS notamment l'IN 2915 « Conditions d'armement et de tracé pour la création de LRS »

CONFORT DES VOYAGEURS



Les clients voyagent assis ...

Mais ils peuvent circuler ou voyager debout !

Accélérations subies (m/s^2):

- accélérations verticales,
- accélérations transversales,
- accélérations angulaires,
- accélérations longitudinales.

Mais il faut aussi tenir compte des variations d'accélération ou jerk (m/s^3) caractérisant les raccordements.

Il s'agit de limiter à des valeurs acceptables les accélérations transversales, verticales et aléatoires

Le voyageur assis est sensible aux accélérations aléatoires.

Pour le voyageur debout ce sont les valeurs d'accélération quasi statiques (constantes) résultant, soit en vertical des rayons de changement de pente, soit en transversal de la force centrifuge non compensée, et la vitesse avec laquelle ces accélérations sont appliquées, qui créent une impression désagréable.

Dans le plan transversal, on peut admettre des valeurs plus élevées que dans le plan vertical.

En effet, les actions physiologiques des accélérations continues ou à très basses fréquences agissent dans le plan vertical au niveau viscéral et peuvent assez rapidement provoquer des nausées (cinétose), surtout si elles sont dirigées vers le haut;

Dans le plan transversal ce sont des problèmes d'équilibre qui interviennent. Le voyageur est disposé à accepter des accélérations transversales quasi statiques (constantes) relativement grandes lorsqu'il se tient debout, à condition que les accélérations aléatoires soient faibles.

Des études empiriques ont été réalisées pour fixer l'ordre de grandeur des accélérations auxquelles les voyageurs peuvent s'adapter (inconsciemment dans les raccords)

Les résultats constatés sont repris dans le tableau ci-dessous.

Confort	Valeurs de γt en m/s^2 pour un voyageur		$d\gamma t / dt$ en m/s^3
	assis	debout	
Très bien	1	0,85	0,30
Bien	1,2	1	0,45
Acceptable	1,4	1,2	0,70
Acceptable exceptionnellement	1,5	1,4	0,85

TRACÉ DE VOIE

Confort des voyageurs

La SNCF a choisi de limiter les accélérations transversales quasi statiques (constantes) à :

$$\gamma_t = 0,15 g \quad \text{et} \quad \frac{d\gamma_t}{dt} = 0,10 g/s \quad \text{soit} \quad \gamma_t = 0,15 \times 9,81 = 1,4715 m/s^2$$

$$\text{et en valeur recommandée: } \gamma_{tr} = 0,135 \times 9,81 \vee = 1,3243 m/s^2$$

En fait, les valeurs recommandées actuelles d'insuffisance limitent l'accélération transversale.

$$\gamma_t = 0,98 m/s^2 \quad \text{pour les trains de } 2^{\text{ème}} \text{ catégorie } (I = 150\text{mm})$$

$$\gamma_t = 1,05 m/s^2 \quad \text{pour les trains de } 3^{\text{ème}} \text{ catégorie } (I = 160\text{mm})$$

TRACÉ DE VOIE

Confort des voyageurs

La géométrie du support devra donc garantir le non dépassement de ces limites en fonction de la vitesse des trains l'empruntant.

Elle se caractérise par :

ses rayons (en plan horizontal et vertical)

le sur-haussement d'un rail par rapport à l'autre (dévers)

des courbes de raccord entre alignement et courbe et les effets dynamiques associés.

TRACÉ DE VOIE

Le dévers

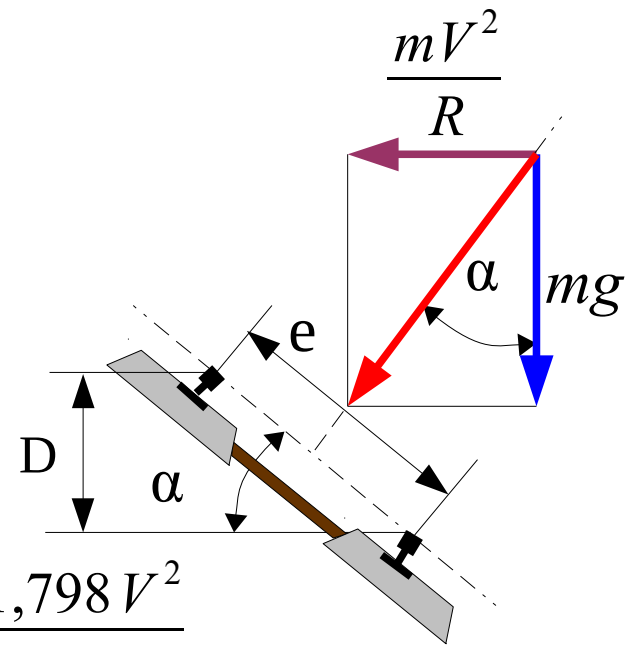
Calcul du dévers d'équilibre D (Formule fondamentale)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{(mV^2)}{R}}{mg} = \frac{V^2}{Rg} = \frac{D}{(e \cos \alpha)}$$

$$(1) \quad V_{(m/s)} = \frac{V_{(km/h)} \times 1000}{3600} = \frac{V_{(km/h)}}{3,6}$$

$$D_{(mm)} = \frac{e \cos(\alpha) V_{(km/h)}^2}{3,6^2 R_{(m)} g} = \frac{1500 \cos(\alpha) V^2}{12,96 \times 9,81 \times R} = \frac{11,798 V^2}{R}$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - \frac{D^2}{e^2}} = \sqrt{1 - \frac{180^2}{1500^2}} = 0,9856 \approx 1$$



Rappels historiques

Avant les années 1930, le surhaussement S est calculé de différentes façons suivant les réseaux :

Sur l'Est, $S = 12V^2/R$ en donnant à V la valeur $20 + 2V_i / 3$,
 V_i étant la vitesse maximum autorisée.

Au Chemin de fer du Nord, $S = C/R$, C étant un coefficient variable en fonction des lignes ou portions de ligne et de la vitesse des trains qui les parcourent. C peut prendre les valeurs suivantes :

120, 110, 100, 90, 75, 60, 50, 40, 30, 20, avec $S \leq 0,15$ m.

On notera que pour les valeurs de C 30, 45, 60, 75, les vitesses respectives sont 50, 60, 70, 80. Peut être est-ce là la raison d'un coefficient de dévers multiple de 15 ?

- **Au PLM**, $S = 2V/3R$, V étant la vitesse maximum autorisée.
Mais par le fait de l'augmentation constante de la puissance des machines et, par suite, du poids et de la vitesse des trains, l'expérience a montré que, sur les lignes fréquentées par des trains à marche rapides, exposés à subir en courbe des réactions, il y avait intérêt à accentuer le dévers afin d'améliorer le confort des voyageurs. Dans ce but il a été mis à l'essai sur les principales lignes à grandes vitesses une nouvelle formule qui donne à partir de 80 km/h environ un dévers supérieur à celui de la formule ci-dessus. Les résultats ayant été satisfaisants elle a été généralisée.

TRACÉ DE VOIE

Dévers prescrit

$$V \leq 78 \text{ km/h} \quad S = \frac{V - 25}{R}$$

Jusqu'à 25 km/h les voies seront posées en principe sans dévers

$$V \leq 120 \text{ km/h} \quad S = 1,6 \frac{V - 45}{R}$$

Cette formule se raccorde à la précédente à la vitesse de 78,333 km/h

$$V \geq 120 \text{ km/h} \quad S = 2,4 \frac{V - 70}{R}$$

Cette formule se raccorde à la précédente à la vitesse de 120 km/h

Sur Paris - Nice, la vitesse fixée pour le calcul du dévers était de 140 km/h sur les parcours ne comportant pas de courbes de rayon inférieur à 1200 m, 130 km/h sur les parcours ne comportant pas de courbes de rayon inférieur à 900 m

Sur Paris - Clermont - Vichy, la vitesse retenue était de 130 km/h sur les parcours ne comportant pas de courbes de rayon inférieur à 900 m

TRACÉ DE VOIE

Dévers prescrit

On remarquera qu'il n'est fait aucune mention de l'insuffisance de dévers. Celle-ci calculée avec les limites de l'époque nous donne :

À V 130 km/h, $d = 160$ mm, $R = 900$ m, $I = 61,5$ mm

À V 140 km/h, $d = 140$ mm, $R = 1200$ m, $I = 52,7$ mm

Ce qui confirme que l'augmentation des performances du réseau c'est faite par l'augmentation de l'insuffisance de dévers impliquant une qualité géométrique accrue, et donc un entretien plus performant, pour ne pas ce faire au détriment du confort des voyageurs.

TRACÉ DE VOIE

Dévers prescrit

L'hétérogénéité des vitesses pratiquées et des types de train circulant sur une même section de ligne a conduit à fixer un dévers pratique inférieur au dévers d'équilibre (impossible à mettre en place pour toutes les vitesses pratiquées) En vue d'homogénéiser les contraintes subies par la voie et la fatigue entre rail bas et rail haut et ainsi d'optimiser l'entretien de celle-ci, la valeur du dévers pratique tient compte de l'importance relative des trafics voyageurs et marchandise et de la dispersion des vitesses pratiquées. Le dévers pratique ou dévers prescrit est calculé au moyen d'un coefficient constant sur la section de ligne considérée, le coefficient «C» (multiple de 15), proportionnellement à la courbure. Celui-ci est adapté en fonction des désordres constatés en voie par l'établissement. Toutefois, une exception à la règle de proportionnalité dévers/courbure et tolérée en passant d'un coefficient de dévers à un autre par un raccordement en dévers établi avec un gauche de 0,5 mm/m.

TRACÉ DE VOIE

Dévers prescrit

Aujourd'hui, le dévers prescrit est calculé au moyen du coefficient C reprenant la formule des Chemins de fer du Nord.

$$d_{(mm)} = \frac{1000 C}{R_{(m)}} = 0,02 C f_{(10m)}$$

Pour des raisons techniques (arrêt en courbes, démarrage) le dévers prescrit est limité à 160 mm en valeur recommandée et 180 mm en limite exceptionnelle

TRACÉ DE VOIE


Insuffisance de dévers

Le dévers prescrit « d » étant inférieur au dévers d'équilibre « D » pour les circulations rapides, il subsiste une force centrifuge non compensée proportionnelle à la différence entre ces deux dévers. Cette différence est appelée insuffisance de dévers ou insuffisance tout court.

$$I_{mm} = D_{mm} - d_{mm} \quad D = \frac{11,8 V^2}{R} \Rightarrow I = \frac{11,8 V^2}{R} - d$$

pour un dévers prescrit nul, l'insuffisance est maximale.

l'accélération transversale peut donc être calculée au niveau du rail, en fonction de I , R et V :

 $\gamma = \frac{V^2}{R}$ et $I = \frac{11,8 V^2}{R} \Rightarrow \gamma = \frac{I}{11,8 \times 3,6^2} = \frac{I}{152,928}$ soit $\frac{I}{153}$

le terme $\frac{1}{3,6^2}$ étant le coefficient de transformation des km/h en m/s pour obtenir γ en m/s² à partir de V en km/h (voir équation 1 p 84)

TRACÉ DE VOIE

Accélération normale

Calcul de l'accélération normale à une courbe

$$a = Vt = R\theta \Rightarrow \theta = \frac{Vt}{R}, \quad V_x = V\sin\theta, \quad V_y = V\cos\theta$$

L'accélération normale est la dérivée de la vitesse par rapport au temps

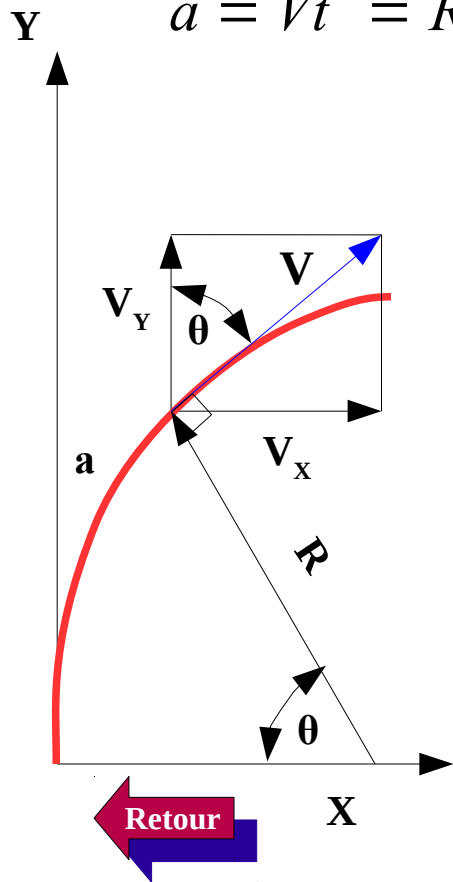
si $y = f(u)$ et $u = g(x)$ alors $y' = f'(u) \times g'(x)$

soit $f(u) = V\cos(\theta)$ et $g(x) = \frac{Vt}{R}$

$$\gamma_y = -V\sin(\theta)\frac{V}{R} \quad \text{et} \quad \gamma_x = V\cos(\theta)\frac{V}{R}L \quad \text{et} \quad \gamma_v = \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2}$$

$$\gamma_v = \sqrt{\frac{V^4}{R^2}\sin^2(\theta) + \frac{V^4}{R^2}\cos^2(\theta)} \Rightarrow \gamma_v = \frac{V^2}{R} \sqrt{\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)}$$

$$\gamma_v = \frac{V^2}{R}$$



TRACÉ DE VOIE

Insuffisance admissible

nous venons de voir que

$$\gamma_t = \frac{I}{152,928}$$

Or, au niveau des voyageurs, les mouvements du véhicule dus à l'écrasement des suspensions extérieures courbe provoquent une accélération supplémentaire qui se traduit par une insuffisance ressentie plus importante, fonction du coefficient de souplesse « s » des véhicules.

s = ~0,4 pour les voitures corail

s = ~0,25 pour les automoteurs

s = ~0,2 pour les TGV



TRACÉ DE VOIE

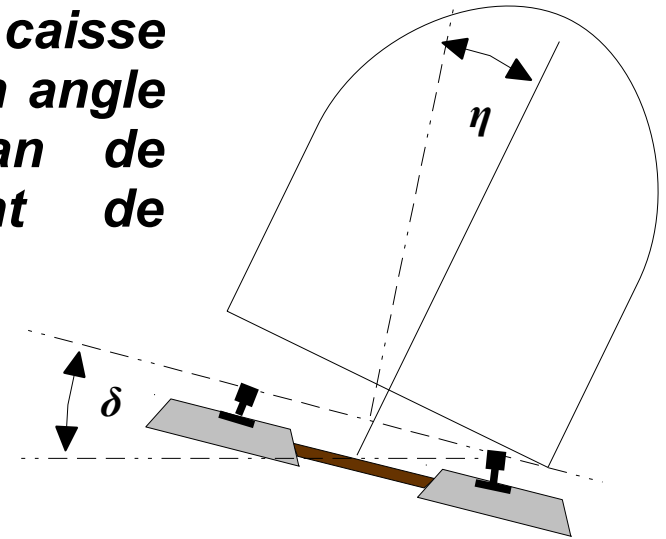
Insuffisance admissible

Coefficient de souplesse s :

Lorsqu'un véhicule est placé à l'arrêt sur une voie en dévers, dont le plan de roulement fait un angle δ avec l'horizontale, sa caisse s'incline sur ses suspensions et fait un angle η avec la perpendiculaire au plan de roulement. On appelle coefficient de souplesse s du véhicule, le rapport:

$$s = \frac{\eta}{\delta}$$

$s \approx 0,4$ voiture corail, $0,25$ automoteurs, $0,2$ TGV



TRACÉ DE VOIE

Insuffisance admissible

Donc, au niveau du voyageur :

$$\gamma_t = \frac{I(1+0,4)}{152,928} \leq 0,15 \text{ g} \Rightarrow I \leq \frac{1,4715 \times 152,928}{1,4} = 160,7 \text{ soit } 160 \text{ mm}$$

$$\gamma_t = \frac{I(1+0,4)}{152,928} \leq 0,135 \text{ g} \Rightarrow I \leq \frac{1,3243 \times 152,928}{1,4} = 144,66 \text{ soit } 150 \text{ mm}$$

On démontre de même que pour les 3^{ème} catégorie :

$$I \leq \frac{1,4715 \times 152,928}{1,25} = 180,03 \text{ soit } 180 \text{ mm}$$

$$I \leq \frac{1,3243 \times 152,928}{1,25} = 162,01 \text{ soit } 160 \text{ mm}$$

TRACÉ DE VOIE

Insuffisance admissible

Pour les trains de 1^{ère} catégorie, de charge à l'essieu plus importante (22,5t contre 17t 3^{ème} cat.), afin de rester dans une plage d'efforts dans le rail comparable à ceux des catégories précédentes, on limite l'insuffisance admissible :

$$F = m \gamma = m \times \frac{I}{152,928} \Rightarrow \frac{I_{3^{\text{ème}} \text{ cat}} \times 17}{152,928} = \frac{I_{1^{\text{ère}} \text{ cat}} \times 22,5}{152,928}$$

$$\Rightarrow I_{1^{\text{ère}} \text{ cat}} = \frac{I_{3^{\text{ème}} \text{ cat}} \times 17}{22,5} = \frac{180 \times 17}{22,5} = 136 \text{ soit } 130 \text{ mm exceptionnelle}$$

$$\Rightarrow I_{1^{\text{ère}} \text{ cat}} = \frac{I_{3^{\text{ème}} \text{ cat}} \times 17}{22,5} = \frac{160 \times 17}{22,5} = 120,8 \text{ soit } 110 \text{ mm recommandée}$$

Il en est de même pour l'accélération verticale

Celle-ci est limitée à :

- ✓ Lignes classiques : 0,22 m/s² en valeur normale et 0,31 m/s² en valeur exceptionnelle.
- ✓ Lignes nouvelles ($\gamma_v < 0,05 g$) :
 - ✓ En creux 0,45 m/s² en valeur normale et 0,50 m/s² en valeur exceptionnelle.
 - ✓ En bosse 0,45 m/s² et 0,60 m/s².

Ces limites sont choisies en prenant en considération le confort de marche et l'éventualité d'une plate-forme de la voie non stabilisée. Sur les lignes où les voyageurs sont susceptibles de voyager debout, il est recommandé de ne pas dépasser 0,1 m/s².

Récapitulation : $\gamma_{m/s^2} = \frac{V_{m/s}^2}{R_m} \Rightarrow R_m = \frac{V_{km/h}^2}{3,6^2 \gamma_{m/s^2}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = 0,22m/s^2 \Rightarrow R = 0,350730 \times V^2 \text{ soit } 0,35 \times V^2 \\ \gamma = 0,31m/s^2 \Rightarrow R = 0,248905 \times V^2 \text{ soit } 0,25 \times V^2 \\ \gamma = 0,45m/s^2 \Rightarrow R = 0,171468 \times V^2 \text{ soit } 0,17 \times V^2 \\ \gamma = 0,50m/s^2 \Rightarrow R = 0,154321 \times V^2 \text{ soit } 0,15 \times V^2 \\ \gamma = 0,60m/s^2 \Rightarrow R = 0,128601 \times V^2 \text{ soit } 0,13 \times V^2 \end{array} \right.$$

TRACÉ DE VOIE

Variation de dévers

La roue s'accommodant mal des marches d'escalier, le surhaussement d'un rail par rapport à l'autre ne peut se faire que progressivement.

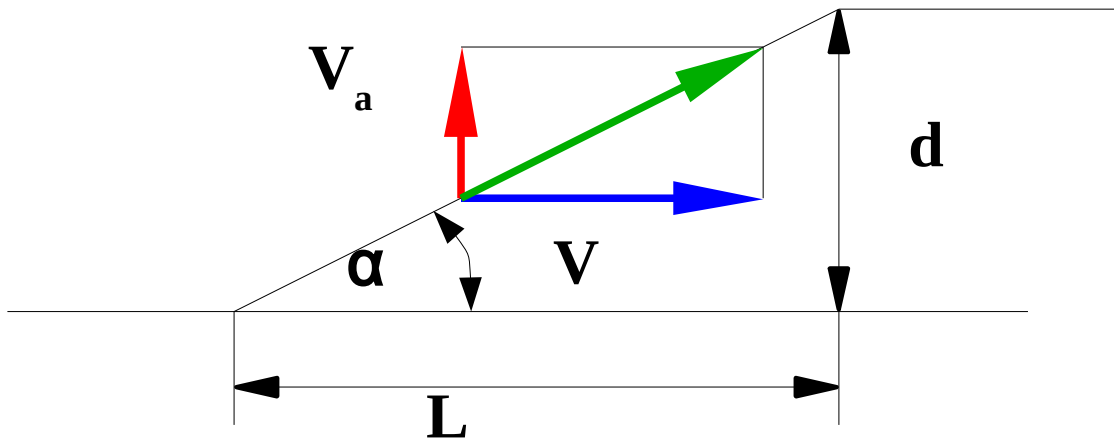
La zone de voie dans laquelle s'effectue la prise de dévers s'appelle raccordement progressif (RP)

Malgré tout, la prise de dévers en raccordement provoque des réactions de suspension entraînant des oscillations nuisibles au confort et au matériel. Afin de limiter l'amplitude de celles-ci et de raccourcir leur temps d'amortissement, la vitesse relative de montée de la roue extérieur courbe par rapport à la roue intérieur ne doit pas être trop importante.

TRACÉ DE VOIE

Variation de dévers

Cette vitesse ascensionnelle V_a est le produit de la vitesse V du véhicule par la rampe de dévers.



$$V_a = V \operatorname{tg} \alpha = \frac{V d}{L}$$

TRACÉ DE VOIE

Variation de dévers

Au début du siècle dernier (1907 – 1908 ?) la compagnie du Nord a réalisé, au sujet des pentes relatives des rails, des expériences très intéressantes, en augmentant progressivement la vitesse jusqu'à des limites où l'on ne ressentait pas encore de secousse ni de déplacement.

Pente relative des deux files (mm/m)	4,9	8,2	9,7
Longueur de la pente (m)	12,1	5	7,35
Vitesse maximum (km/h)	81	45	40
Vitesse de torsion V_a (km/h)	0,397	0,369	0,388
Vitesse de torsion V_a (m/s)	0,11	0,10	0,108

TRACÉ DE VOIE

Variation de dévers

Dans ces expériences, on a pu apprécier un léger mouvement ondulatoire de grande amplitude. Afin d'atténuer le plus possible ce mouvement oscillatoire et rendre insensible l'entrée en courbe, il suffit que :

$$pV_a = 0,157 \text{ ou } p_{(mm/m)} = \frac{157}{V}$$

M. Hallade, dans son article de la revue Générale des Chemins de Fer N° 4 d'avril 1908 (p 264) préconisait :

$$p_{(mm/m)} = \frac{175}{V} \text{ exceptionnellement } \frac{380}{V}$$

TRACÉ DE VOIE

Variation de dévers

Aujourd'hui, la vitesse de montée d'une roue par rapport à l'autre dans le plan vertical, lors de la prise de dévers d'un véhicule est limitée à 50 mm/s, exceptionnellement 60 mm/s (contrainte matériel) ce qui correspond à peut près à une rotation de 2°/s (1°909152 pour e = 1500 mm).

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = 50 \text{ mm/s} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{\Delta d}{\Delta l} \times \frac{V}{3,6} \Rightarrow \frac{\Delta d}{\Delta l} \leq \frac{3,6 \times 50}{V} = \frac{180}{V} \quad \text{en mm/m}$$

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = 60 \text{ mm/s} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{\Delta d}{\Delta l} \times \frac{V}{3,6} \Rightarrow \frac{\Delta d}{\Delta l} \leq \frac{3,6 \times 60}{V} = \frac{216}{V} \quad \text{en mm/m}$$

TRACÉ DE VOIE

Variation de dévers

Nous avons vu que le dévers pratique est toujours inférieur au dévers d'équilibre, la différence étant appelée insuffisance de dévers.

De même que le dévers prescrit varie dans les raccordements, l'insuffisance résultante variera également dans ceux-ci, engendrant des variations d'accélération transversales.

Celles-ci, nous l'avons vu précédemment, étant limitées par le confort des voyageurs à 0,10 g/s.

TRACÉ DE VOIE

Variation d'insuffisance

La variation d'insuffisance ou variation d'accélération transversale subie par le voyageur est en fait composée de l'accélération due au rayon de la courbe (plan horizontal) et de l'accélération due à la rotation de prise de dévers (plan vertical). En négligeant le coefficient de souplesse, on peut écrire :

$$\gamma_h + \gamma_v \leq 0,10 g \quad \text{ou} \quad \frac{1}{152,928} \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} + \frac{\Delta d}{\Delta t} \right) \leq 0,981 \Rightarrow \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} + \frac{\Delta d}{\Delta t} \right) \leq 150,022 \text{ mm/s}$$

Pour tenir compte des différents type de circulation, on retient 125 mm/s comme limite recommandée

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} \leq 50 \text{ mm/s} \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta t} \leq 75 \text{ mm/s en valeur recommandée}$$

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} \leq 60 \text{ mm/s} \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta t} \leq 90 \text{ mm/s en valeur exceptionnelle}$$

TRACÉ DE VOIE

Variation d'insuffisance

Dans les zones d'appareils de voie (20m de part et d'autre, ce qui correspond à peu près à l'empatement des bogies d'une voiture corail), fortement armée où des chocs existent inévitablement afin d'avoir un tracé de voie plus « compact », la variation d'insuffisance par rapport au temps admissible est plus importante :

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} \leq 125 \text{ mm/s } \textit{en valeur recommandée}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} \leq 150 \text{ mm/s } \textit{en valeur exceptionnelle}$$

TRACÉ DE VOIE

Variation d'insuffisance

Dans le cas où il n'est pas fait usage de raccords progressifs (absence de variation de dévers par exemple), la discontinuité d'insuffisance ne devra pas dépasser :

en voie principale

Conditions normales : 50 mm

conditions exceptionnelles : 75 mm

en pointe et talon d'appareils de voie.

100 mm



À 40 km/h sur VP, un rayon de 250 m sans dévers génère un ΔI de 75,52 mm et impose donc des RP !

TRACÉ DE VOIE

Récapitulation

Limites admissibles pour les circulations voyageurs sur lignes classiques, en voie courante correctement armée

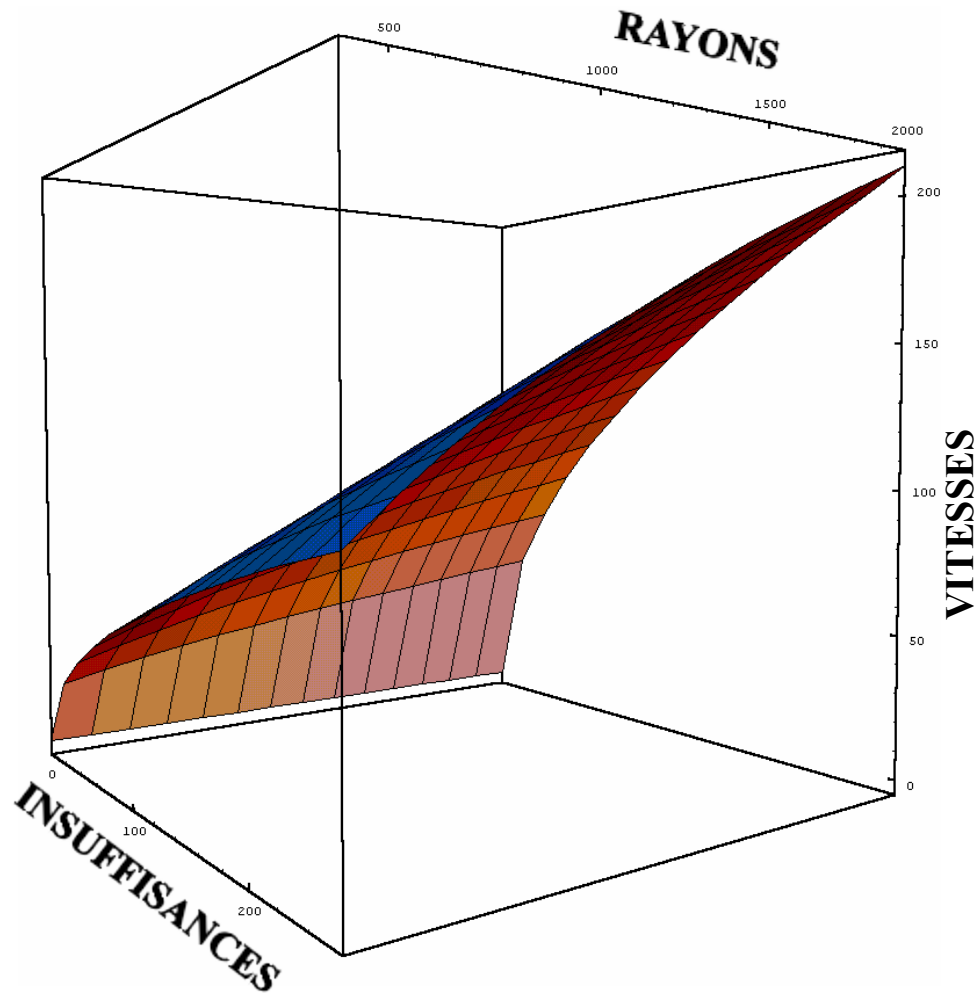
Vitesses (km/h)		$V \leq 160$		$160 < V \leq 200$		$200 < V \leq 220$
Type de circulation		Catégorie II	Catégorie III	Catégorie II	Catégorie III	TGV
Dévers (mm)	recommandé	160	160	160	160	160
	exceptionnel.	180	180	180	180	180
Insuffisance de dévers (mm)	recommandé	150	160	150	160	160
	exceptionnel.	160	180			
$\Delta l/\Delta t$ (mm/s)	recommandé	75	75	75	75	65
	exceptionnel.	90	90	90	90	75
$\Delta D/\Delta L$ (mm/m)	recommandé	180/V	180/V	180/V	180/V	180/V
	exceptionnel.	216/V	216/V	216/V	216/V	216/V

TRACÉ DE VOIE

Relation entre I , V , R

Ce graphique montre
l'influence de chacun
des 3 facteurs sur les 2
autres

$d = 0$ (dévers pratique)
 $I =$ insuffisance de dévers (0-260)
 $R =$ rayon de la courbe (400-2000)



TRACÉ DE VOIE

Gains pendulaires possibles

$$d + I_c = 11,8 \frac{V_c^2}{R} \quad \text{et} \quad d + I_p = 11,8 \frac{V_p^2}{R}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{R(d + I_c)}{11,8}} \quad \text{et} \quad V_p = \sqrt{\frac{R(d + I_p)}{11,8}}$$

Soit, pour les valeurs nominales retenues en France : $d = 160$ $I_c = 160$ $I_p = 260$

$$V_c = \sqrt{\frac{320R}{11,8}} = \sqrt{320} \sqrt{\frac{R}{11,8}} \quad \text{et} \quad V_p = \sqrt{\frac{420R}{11,8}} = \sqrt{420} \sqrt{\frac{R}{11,8}}$$

Pourcentage maximal d'augmentation de vitesse par rapport à la vitesse initiale :

$$\frac{V_p - V_c}{V_c} = \frac{(\sqrt{420} - \sqrt{320}) \frac{\sqrt{R}}{11,8}}{\sqrt{320} \frac{\sqrt{R}}{11,8}} = \frac{(\sqrt{420} - \sqrt{320})}{\sqrt{320}} = 0,145644\% \quad \text{soit } 15\%$$

V_c : Vitesse des trains classiques (km/h)

V_p : Vitesse des trains pendulaires (km/h)

R : Rayon de la courbe considérée (m)

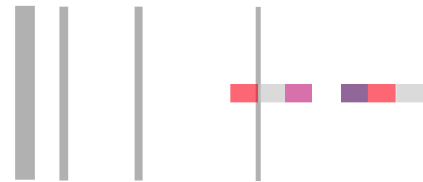
d : Dévers prescrit dans la courbe considérée (mm)

I_c : Insuffisance de dévers trains classiques (mm)

I_p : trains pendulaires (mm)



IMPACT DE L'ARMEMENT SUR LE TRACÉ



Les accélérations transversales et verticales, en fonction de la masse à l'essieu des véhicules produisent des efforts dans le rails et donc la voie.

La répétition de ceux-ci, au gré des circulations, génère une fatigue dans le rail et la voie proportionnelle au cube de la vitesse engendrant des défauts pouvant provoquer la rupture du rail.

On a donc été conduit à imposer des limites aux efforts subits par la voie en fonction de son armement. Limiter les forces appliquées au rail revient à limiter l'accélération associée et, par voie de conséquence, l'insuffisance de dévers (proportionnelle au coefficient 1/152,928 près).

Il a donc été établi des catégories de circulation en fonction des effets produits.

Les matériels conventionnels sont classés en 3 catégories définies par la lettre TSR2 / S7A du 6/08/81

Catégorie I :

Trains FRET désignés ME (messageries) et MA (marchandises).

Catégorie II :

Trains FRET désignés MV160 et MVGV,

Trains Voyageurs composés de locomotive(s) + voitures, rames automotrices autres que celles homologuées en catégorie III.

Catégorie III :

- ✓ Rames automotrices avec caractéristiques particulières (centre de gravité peu élevé, faible coefficient de souplesse, masse à l'essieu et masses non suspendues réduites),
- ✓ Éléments automoteurs thermiques et autorails.

Nota : Ces catégories sont également définies dans la fiche UIC 518.

Pour les circulations FRET, la classification des lignes ou sections de lignes, du point de vue de la voie (fiche UIC 700), est fonction de la masse maximale à l'essieu du wagon chargé. Elle est représentée par les lettres A, B, C, D et E.

charge A : 16 t à l'essieu,

charge B : 18 t à l'essieu,

charge C : 20 t à l'essieu,

charge D : 22,5 t à l'essieu,

charge E : 25 t à l'essieu (réservé),

pour les wagons respectant les caractéristiques de base de la classification.

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Projet de fiche UIC 700

A	P = 16 t	$p = 5.0$ t/m	D2	P = 22.5 t	$p = 6.4$ t/m
B1	P = 18 t	$p = 5.0$ t/m	D3	P = 22.5 t	$p = 7.2$ t/m
B2	P = 18 t	$p = 6.4$ t/m	D4	P = 22.5 t	$p = 8.0$ t/m
C2	P = 20 t	$p = 6.4$ t/m	E4	P = 25 t	$p = 8.0$ t/m
C3	P = 20 t	$p = 7.2$ t/m	E5	P = 25 t	$p = 8.8$ t/m
C4	P = 20 t	$p = 8.0$ t/m			

P est la charge à l'essieu, p la charge à l'essieu par mètre (répartition des bogies)

Classification DEMAUX

A partir des années 40, l'accroissement de la vitesse des trains et l'augmentation des charges à l'essieu ont conduit le chemin de fer à un renforcement de sa superstructure. Cette adaptation, progressive, fut marquée par une réglementation des machines à vapeur et des tenders propre à chacun des anciens réseaux existants. Ceux-ci disposaient alors chacun de leurs propres règles adaptées, bien sûr, aux besoins régionaux et à leur situation propre (nécessité d'exploitation, armement, caractéristiques des machines, âge et état d'entretien des voies). L'interpénétration entre les réseaux des machines à vapeur et des tenders, la création de la SNCF ont donc fait apparaître la nécessité d'unifier ces règles.

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

une commission fut créée portant le nom de « commission de circulation des machines », dite « commission Demaux »; cette dernière avait alors pour mission d'établir une méthode homogène de classement des machines et des tenders. Le but de ce groupe de travail était au final de faciliter la circulation des différents matériels sur le futur réseau national ; la commission , tout en tenant compte de l'amélioration progressive de la qualité de la voie, a ainsi généralisé sur l'ensemble de la SNCF les règles de circulation des machines et tenders en ne considérant que les règles les plus libérales ayant une pratique courante et prolongée sur une ou plusieurs régions.

Chacune des régions travaillant avec ses propres règles de circulation souvent construites de façon empirique, leur réseau respectif présentant la plus grande hétérogénéité en ce qui concerne l'armement des voies et le matériel roulant, La commission se proposa donc de classer en groupes d'une part les voies comparables et d'autre part les machines comparables en fonction de coefficients à déterminer afin d'effectuer les assimilations nécessaires.

La commission décida donc, compte tenu du grand nombre de paramètres caractéristiques pour la voie, de ne les comparer entre elles qu'au moyen du terme :

$$\frac{\left(\frac{I}{V}\right)}{L}$$

I : moment d'inertie du rail, considéré à demi usure verticale, par rapport à l'axe neutre horizontal.

V : ordonnée de la fibre la plus éloignée, par rapport à ce même axe neutre.

L : espacement entre axes des traverses les plus écartées.

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

En mécanique, pour un système de points matériels P_i de surface S_i , le moment d'inertie par rapport à un axe est défini par la formule :

$$I = \sum_i S_i d_i^2 \quad \text{où } d_i \text{ est la distance de } S_i \text{ à l'axe.}$$

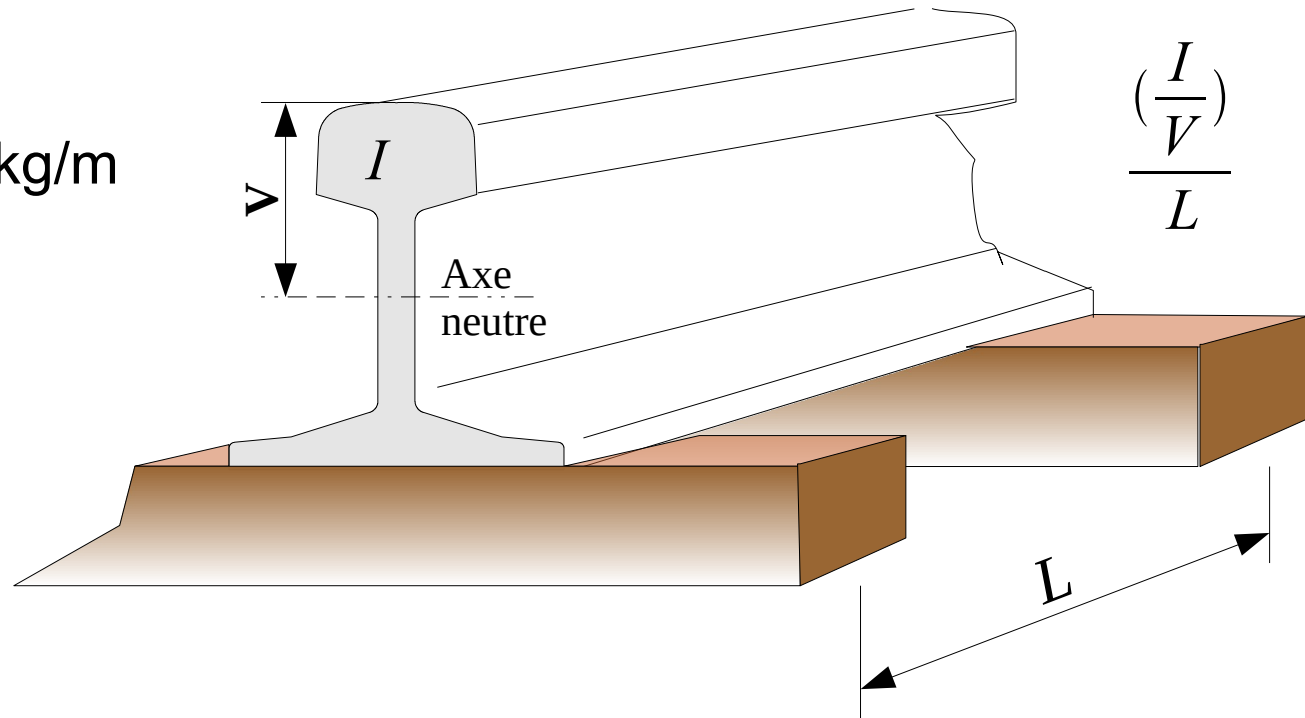
Exemple :

Rail U 50, 50,88 kg/m

$S = 6482 \text{ mm}^2$

$I = 2023 \text{ cm}^4$

$I/V = 248,8 \text{ cm}^3$



TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Poids durail (Kg/m)	Type derail	Rail à demi usure		Rail à limite d'usure	
		usure verticale (mm)	I/V (mm ³)	usure verticale (mm)	I/V (mm ³)
30,475	30 k Est	4	117 436	8	105420
30,772	13	5	117 000	10	109 000
33,400	17	5	142 000	10	130 000
34,200	PLM	5	140 300	9	126 100
36,495	36 K Std S40	5	141 000	11	124 000
36,495	36 K Std S13	5	141 500	11	122 400
36,900	II	5	146 000	10	132 000
37,800	IIa	5	154 000	10	133 000
39,250	PM	6	146 500	13	125 300
40,950	S 41	a	172 000	16	142 000
41,000	16	5	184 000	10	164 000
41,348	G 33	6	168 000	12	128 000
45,050	l6a	7	201 000	15	162 000
46,040	46 k Est	8	181 889	16	152 733
46,256	46 k Std S33 - U33	8	180 800	16	147 000
46,256	46 k Std S12 - SB	9	194 000	16	162 000
47,824	LP	8	197 500	16	157 000
48,890	S 49	8	195 000	16	176 000
50,568	50 k Std S36 U36 U50	8	223 900	16	180 800
55,695	55 k Std S11	9	237 000	18	189 100
55,695	55 k Std S39 U39 U55	9	235 100	18	203 000
60,34	UIC60 (ex U80)	10	305 470	20	215 458

Ce coefficient ne correspond qu'à la résistance du rail, pour les efforts verticaux ; il néglige la fatigue des joints, du ballast et de la plate-forme, l'influence des courbes, l'état d'entretien de la voie. Mais il présente l'avantage d'être simple.

De même la commission imposa de comparer les machines à partir du terme suivant :

$$k \frac{P L^2 V^2}{1000 E}$$

K fait intervenir le rôle des bissels et des bogies.
K=0.5 à 0.6 en cas de présence de bogie.
K=0.7 à 0.8 en cas de présence de bissel.
K=1 en cas d'absence de bogie ou bissel.

P et L^2/E
caractérisent la
machine

P : masse totale maximum de la machine.

L : sa longueur hors tampons.

E : son empattement total.

V : la vitesse limite praticable sur chaque ligne par la machine.

Le coefficient $1/1000$ n'intervient que pour la commodité des calculs

V^2 tient compte
des effets
dynamiques

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Le travail de la commission a ainsi conduit aux règles de circulation ci-contre

Voies		Numéros des groupes de voies et de machines	Machines à vapeur autorisées à circuler	
Armement	Valeur de (en mm ²)		Masse maximum de l'essieu le plus lourd	Valeur maximum de P en tonnes, L & E en mètres, V en km/h
Très léger	100 à 140	1	17 T	3500
Léger	141 à 179	2	18 T	5500
Moyen	180 à 235	3	20 T	9300
Fort	236 à 350	4	21 T 6	15500
Très fort	Plus de 350	5	23 T	19000

Aujourd'hui encore le classement DEMAUX compare entre eux les divers types d'armement de la voie au moyen du rapport I/VL (défini ci – avant) qui caractérise le travail du rail à la flexion sous charge verticale.

Cinq groupes sont définis, pour lesquels une relation est établie entre :

Pour les circulations voyageurs,

- ✓ le rapport I/VL de l'armement de la voie,
- ✓ la masse à l'essieu maximale des engins moteurs,
- ✓ la vitesse maximale admise,
- ✓ l'insuffisance de dévers maximale admise.

Le type de rail, de traverses et le travelage influent également séparément sur ces paramètres.

Circulations FRET :

- ✓ le rapport I/VL de l'armement de la voie,
 - ✓ le type de rail (Vignole ou Double Champignon, masse au mètre), l'espacement maximal des traverses, la charge à l'essieu des wagons,
 - ✓ le tonnage moyen mensuel FRET,
- l'insuffisance de dévers maximale admise.
la vitesse maximale admise,

Des restrictions « tracé » sont également à prendre en compte en cas de rail Double Champignon (DC) pour la circulation des trains en charge D.

Textes de base définissant les relations armement / vitesse /
insuffisance de dévers pour les circulations de catégories II et III

Trains de voyageurs (catégories II et III)

Le référentiel **IC 00161** (ex **CG EF 1 C 2 n°1** du 25/08/81) donne les conditions techniques à respecter pour relever la vitesse limite des trains de voyageurs jusqu'à 220 km/h.

Le tableau ci-après récapitule les conditions de circulation liées à l'armement de la voie contenues dans ces textes :

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Armement Rail Vignole					Catégorie II				Catégorie III					
Groupe Demaux	I/VL rail ^{1/2} u (mm ²)	Rail mini (kg/m)	type de traverse (1)	Espace axes traverses (m)	Masse Essieu loc maxi (t)	V maxi (km/h)		I (mm) nor / max		Masse Essieu maxi (t)	V maxi (km/h)		I (mm) nor / max	
5 ^{ème}	> 350	LRS 50 kg	TBA ou TB	0.60	22,5	200	150	150	<i>N</i>	220	160	160	160	160
						160	150	160	<i>P</i>		160 ⁽²⁾	160	180	
4 ^{ème}	350 301	LRS U33 (+ faible % de BN≥18m)	TBA	0.60	20	160	150	160	<i>N</i>	160				
			TB	0.58	20	160	150	160	<i>P</i>	160				
		TBA ou TB	0.60	21 21,6	135 115	150 150	160 160	<i>N</i> <i>P</i>	135					

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Armement Rail Vignole					Catégorie II				Catégorie III			
Groupe Demaux	I/VL rail ^{1/2} u (mm ²)	Rail mini (kg/m)	type de traverse (1)	Espace axes traverses (m)	Masse Essieu loc maxi (t)	V maxi (km/h)	I (mm) nor / max		Masse Essieu maxi (t)	V maxi (km/h)	I (mm) nor / max	
4 ^{ème}	300/236	NP	NP	NP	21,6	115	NP	150	NP	115	NP	160
3 ^{ème}	235/180	NP	NP	NP	20	95	NP	140	NP	100	NP	150
2 ^{ème}	179/141	NP	NP	NP	18	85	NP	120	NP	90	NP	130
1 ^{er}	140/100	NP	NP	NP	17	70	NP	80	NP	80	NP	125

(1) Voir tableau suivant pour le type de TBA utilisable

(2) 200 km/h dans le futur référentiel

NP = non précisé, mais sachant que, pour le type de rail et l'espacement maxi des traverses, les conditions indiquées sont basées sur le type de pose de l'époque qui était fonction du groupe Demaux.

D'autre part, pour la masse à l'essieu des trains de catégorie III, la consigne de 1981 considère la masse à l'essieu des autorails de l'époque.

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Groupe Demaux	Armement Rail DC				Catégorie II				Catégorie III			
	<i>I/VL rail^{1/2} u (mm²)</i>	<i>Rail mini (kg/m)</i>	<i>type de traverses (1)</i>	<i>Espace axes traverses (m)</i>	<i>(t) Masse Essieu loc maxi</i>	<i>Vitesse maxi (km/h)</i>	<i>Insuffisance dévers (mm) nor /max</i>		<i>Masse Essieu maxi (t)</i>	<i>Vitesse maxi (km/h)</i>	<i>Insuffisance dévers (mm) nor/max</i>	
4 ^{ème}	300/236	NP	NP	NP	21,6	100	130	140	NP	110	140	150
3 ^{ème}	235/180	NP	NP	NP	20	90	110	130	NP	95	130	140
2 ^{ème}	179/141	NP	NP	NP	18	80	100	110	NP	85	110	120
1 ^{er}	140/100	NP	NP	NP	17	60	70	75	NP	70	80	100

Les valeurs maximales d'insuffisance de dévers ne peuvent être appliquées que dans la demi-partie supérieure de la plage Demaux concernée.

Nota : Sur ces groupes, moyennant l'accord de la Direction de l'Équipement, les valeurs du tableau « rail Vignole » pouvaient toutefois être appliquées au rail DC sous certaines conditions.

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

insuffisances de dévers limites applicables aux trains de la catégorie I

Groupes Demaux	Insuffisance de dévers limite (en mm)					
	Charge C (20 t / essieu)		Charge D (22.5 t / essieu)		Charge E (25 t / essieu)	
3, 4 et 5	Nor 110	Max 130	Nor 110	Max 130	Nor 110 ⁽¹⁾	Max 130 ⁽¹⁾
2	110	120	100	110	75 sur VS interdit sur VP	
1	75	80	75 / rail DC interdit / rail Vignole		interdit	

VS : voie de service, VP : voie principale
Sur rail DC, appliquer les valeurs normales.

(1) $l < 75$ mm sur le groupe 3, la vitesse max étant de 30 km/h

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

vitesse possibles en fonction des traverses :

TRAVERSES	$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$V > 160$
VAX U20	Autorisé		Interdit
VAX U21	Autorisé		Interdit ⁽¹⁾
VAX U31	Autorisé		
VAX U41	Autorisé		
Monobloc U31 et U41	Autorisé		
Bois	Autorisé		
Mixité Bois / VAX U20	Autorisé	Interdi ⁽¹⁾	Interdit
Mixité Bois / VAX U21 ou Bois / Monobloc U31	Autorisé		Interdit

(1) dérogation possible pour les circulations de catégorie III.  admis uniquement sur pose existante

Un autre classement des lignes existe également. Il s'agit de la classification UIC.

La classification des voies de lignes est établie sur la base d'un trafic fictif Tf_2 dont l'expression est la suivante :

$$Tf_2 = S(T_v + K_m \times T_m + K_t \times T_t)$$

T_v désigne le tonnage journalier voyageurs exprimé en tonnes brutes remorquées,

T_m désigne le tonnage journalier marchandises exprimé en tonnes brutes remorquées,

T_t désigne le tonnage journalier des engins de traction exprimé en tonnes⁽¹⁾

K_m est un coefficient qui vaudra normalement 1,15 et pour les voies supportant un trafic prépondérant d'essieux de 20 tonnes, 1,30⁽²⁾

K_t est un coefficient égal à 1,40⁽²⁾

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

S est un coefficient de qualité de la voie qui pourra prendre des valeurs suivantes :

$S = 1$	Lignes sans trafic voyageurs ou comportant un trafic voyageurs essentiellement local.
$S = 1,10$	Lignes dont le trafic voyageurs comporte des trains dont la vitesse est au plus égale à 120 km/h.
$S = 1,20$	Lignes dont le trafic voyageurs comporte des trains dont la vitesse est supérieure à 120 km/h et au plus égale à 140 km/h.
$S = 1,25$	Lignes dont le trafic voyageurs comporte des trains dont la vitesse est supérieure à 140 km/h.

- 1) On comprendra en principe dans le tonnage des engins de traction T_t les automotrices à voyageurs dont la charge par essieu est supérieure à 17 tonnes, les autres étant comprises dans le tonnage voyageurs T_v .
- 2) K_m et K_t sont des coefficients tenant compte à la fois de la charge et de l'agressivité des essieux actuels.

Le coefficient S pourra avoir une même valeur entre les deux extrémités d'un même tronçon de ligne même s'il existe, sur ce tronçon, une ou plusieurs fractions sur lesquelles, pour des raisons diverses (tracé notamment), la vitesse des trains est inférieure à celle qui est pratiquée sur le reste du tronçon.

Ce coefficient pourra même avoir la même valeur pour un ensemble de tronçons d'une même ligne et correspondre à la vitesse maximale pratiquée sur ces tronçons.

Les voies des lignes sont classées, selon la valeur de leur trafic fictif, en neuf groupes⁽³⁾ suivant les seuils ci-après

Groupe 1			$Tf2 > 120\ 000$
Groupe 2	120 000	\geq	$Tf2 > 85\ 000$
Groupe 3	85 000	\geq	$Tf2 > 50\ 000$
Groupe 4	50 000	\geq	$Tf2 > 28\ 000$
Groupe 5	28 000	\geq	$Tf2 > 14\ 000$
Groupe 6	14 000	\geq	$Tf2 > 7\ 000$
Groupe 7	7 000	\geq	$Tf2 > 3\ 500$
Groupe 8	3 500	\geq	$Tf2 > 1\ 500$
Groupe 9	1 500	\geq	$Tf2$

3) Les 7^e, 8^e et 9^e groupes sont scindés selon qu'ils comportent (AV) ou non (SV) des lignes parcourues par des circulations "voyageurs"

Le trafic fictif est déterminé pour chacune des deux voies d'une ligne ou d'un tronçon de ligne à double voie, mais les deux voies seront en général regroupées sous un même classement (en principe celui de la voie la plus chargée).

Sur les lignes à plus de deux voies, les voies dites "bis" pourront être classées dans un groupe différent.

Le trafic fictif est calculé par tronçon de ligne d'une longueur minimale de l'ordre de 50 km, sauf justification particulière (par exemple, tronc commun à plusieurs lignes sur une faible longueur).

Le groupe UIC sert notamment à déterminer le dimensionnement des structures, l'armement et aussi l'entretien.

Les Longs Rails Soudés (LRS)

D'autres limites de tracé sont imposées par l'armement, les limites de rayon dues aux contraintes liées à l'augmentation de température dans les longs rails soudés.

Ces limites sont traitées dans l'IN 2915.

celle-ci reprend, en fonction de l'armement, rail, planché, attaches, du défaut de dressage et du groupe UIC de la ligne les rayons minimaux autorisés associés au profil de banquettes de ballast.

TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Exemple pour un défaut de dressage de 14 mm, $V > 80$ km/h des groupes UIC 1 à 6 et 7AV à 9AV

		Profils de rails					
		46 E 2	50 E 6 / 50 E 1		60 E 1		
		Rayon minimal de pose en mètres lorsque la voie est ballastée au profil					
Classe de traverses	Travelage Tr/km	Plein	Renforcé	Plein	Renforcé	Plein	Renforcé
Classe 4	1666 t/km	500	300	500	350 (monobloc) 300m (bibloc)	500m	400 (monobloc) 300 (bibloc)

Les rayons minimaux ont été fixés à la suite de calculs de stabilité de la voie. La valeur du rayon minimal autorisé pour la pose des LRS dépend :

du profil de rail,

du type de traverse et pour les traverses béton de la classe définie avec une distinction entre les traverses monoblocs et les traverses bibloc.

du profil de ballast,

de la valeur du défaut de dressage ponctuel mesuré sur base de 10 m (paramètre de dressage suivant normes de géométrie IN2640 et IN1895).

du travelage.

TRACÉ DE VOIE

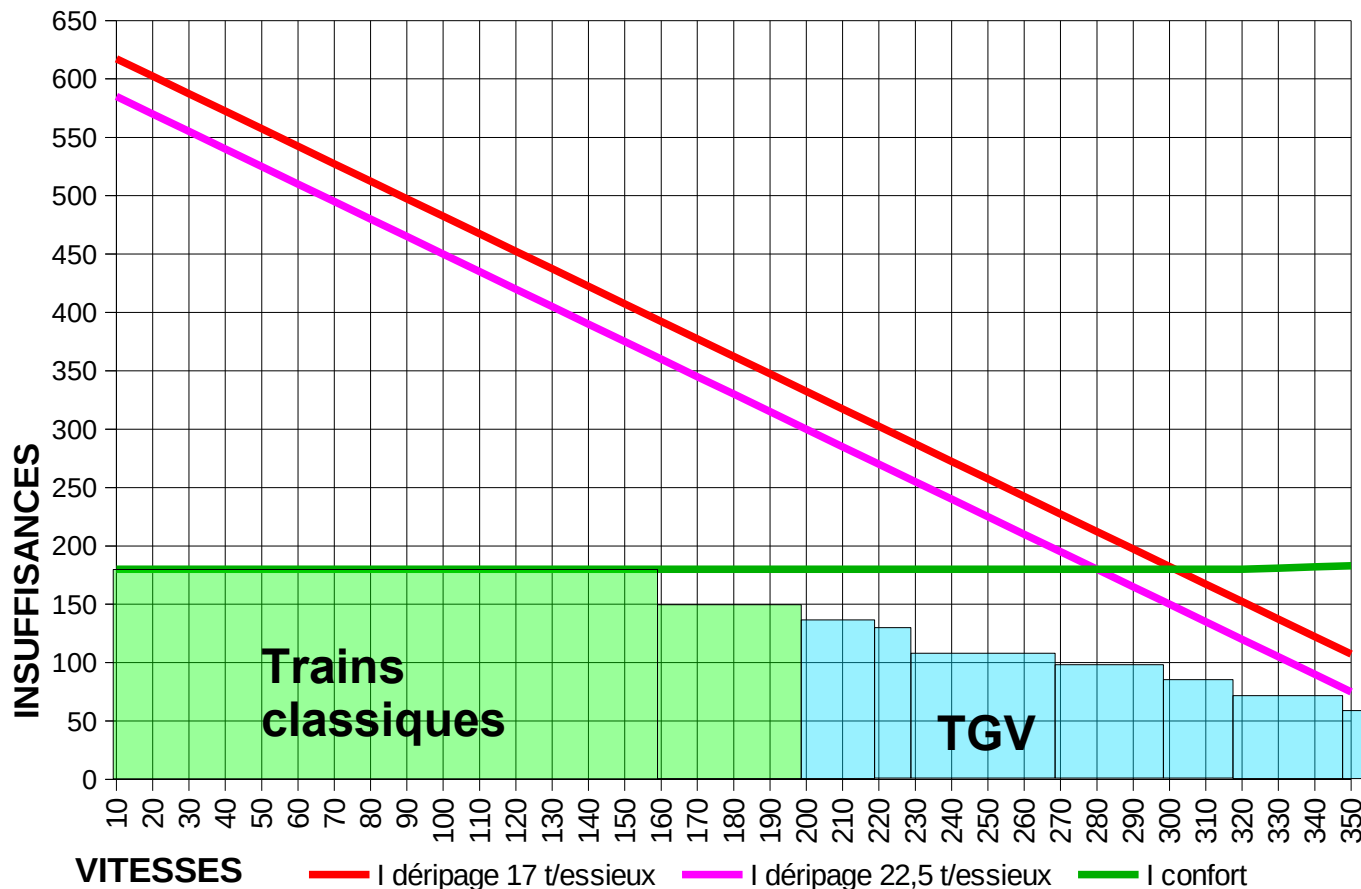
L'armement et ses limites

Insuffisances limites de déformations (nose sur traverses bétons)

$$I_{(mm)} \leq 500 + \frac{2250}{P_{(tonnes)}} - 1,5 V_{(km/h)}$$

Comparaison

Insuffisance limites de déformation - Insuffisance limites de confort



TRACÉ DE VOIE

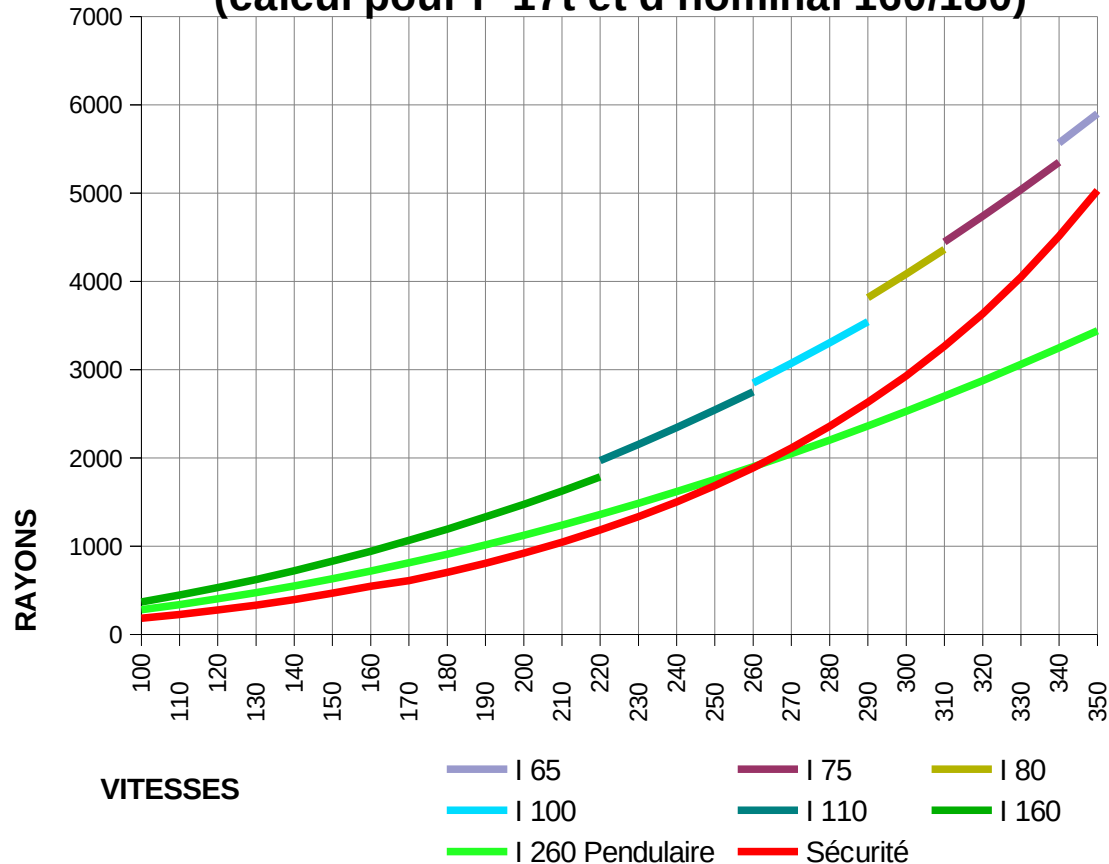
L'armement et ses limites

Diagramme $R=f(V)$ pour
 I nominal trains
automoteurs, TGV et
pendulaires (260)

Pour les vitesses élevée,
la condition de sécurité
prime sur la condition de
confort, c'est pourquoi
l'insuffisance admissible
diminue avec les
vitesses importantes.

Au delà de 260 km/h, le
pendulaire n'est plus du
tout pertinent.

Conditions de confort et de sécurité
(calcul pour P 17t et d nominal 160/180)



TRACÉ DE VOIE

L'armement et ses limites

Ce qui donne pour les normes TGV voyageurs :

Vitesse (km/h)	V	230	270	300	320	350
Coefficient de ligne(RP)	K	390 000	576 000	720 000	850000	1 100 000
Dévers (mm) $d = K / R$						
Limite maximale	d	180	180	180	180	180
Insuffisance de dévers (mm)	I					
Limite normale		110	100	80	75	65
Limite exceptionnelle		140	130	100	90	80
Variation d'insuffisance de dévers (mm/s)	$\Delta I / \Delta t$					
Limite normale				30		
Limite exceptionnelle				50		
Variation de dévers (mm/m)	$\Delta d / \Delta L$					
Limite normale				180/V		
Limite exceptionnelle				216/V		

Interdépendance signalisation



Lors d'études de relèvement de vitesse sur une voie dont l'âge des rails est antérieur ou égal à 1970¹, compte tenu de la forte présence de carbone liée aux méthodes d'élaboration de l'acier et du manque de fiabilité des contrôles de santé interne lors de la fabrication avant cette période, si la signalisation n'est pas assurée par circuit de voie (ex : compteur d'essieux) ou si elle l'est par circuit de voie mono rail, du fait de la non possibilité de détection des cassures de rail, l'augmentation de vitesse ne sera pas accordée.

1) Annexe 5 de l'IC00161- Version 01 du 17-02-2015

LES ÉTUDES DE TRACÉ



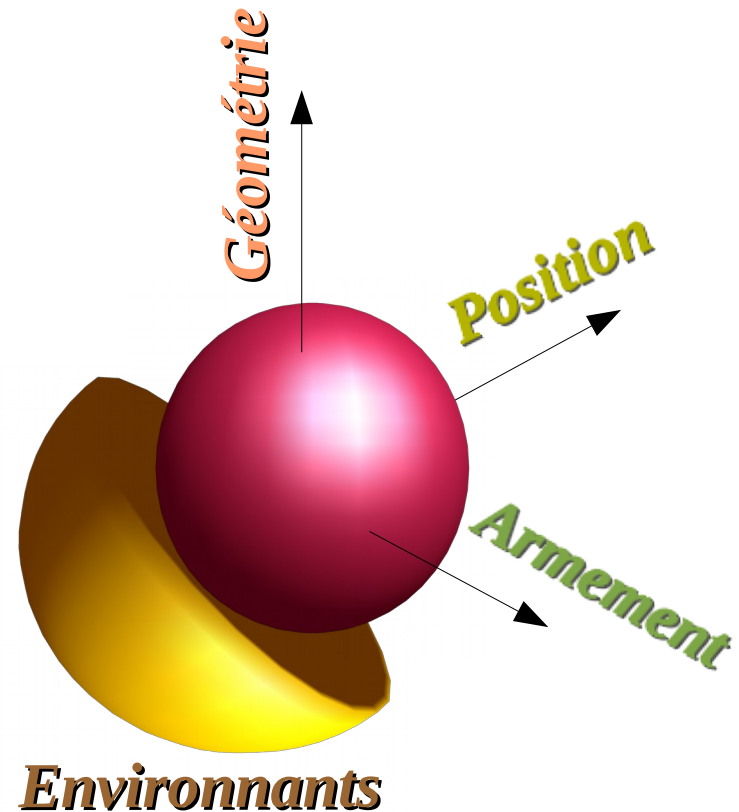
TRACÉ DE VOIE

Conséquences « tracé »

Étudier un tracé de voie, c'est calculer une géométrie et une position de la voie en tenant compte de ses constituants en fonction de ses environnants.

nous sommes en présence d'un système. À situation donnée, la meilleure solution n'est pas forcément l'addition des meilleures solutions de chacun de ses éléments

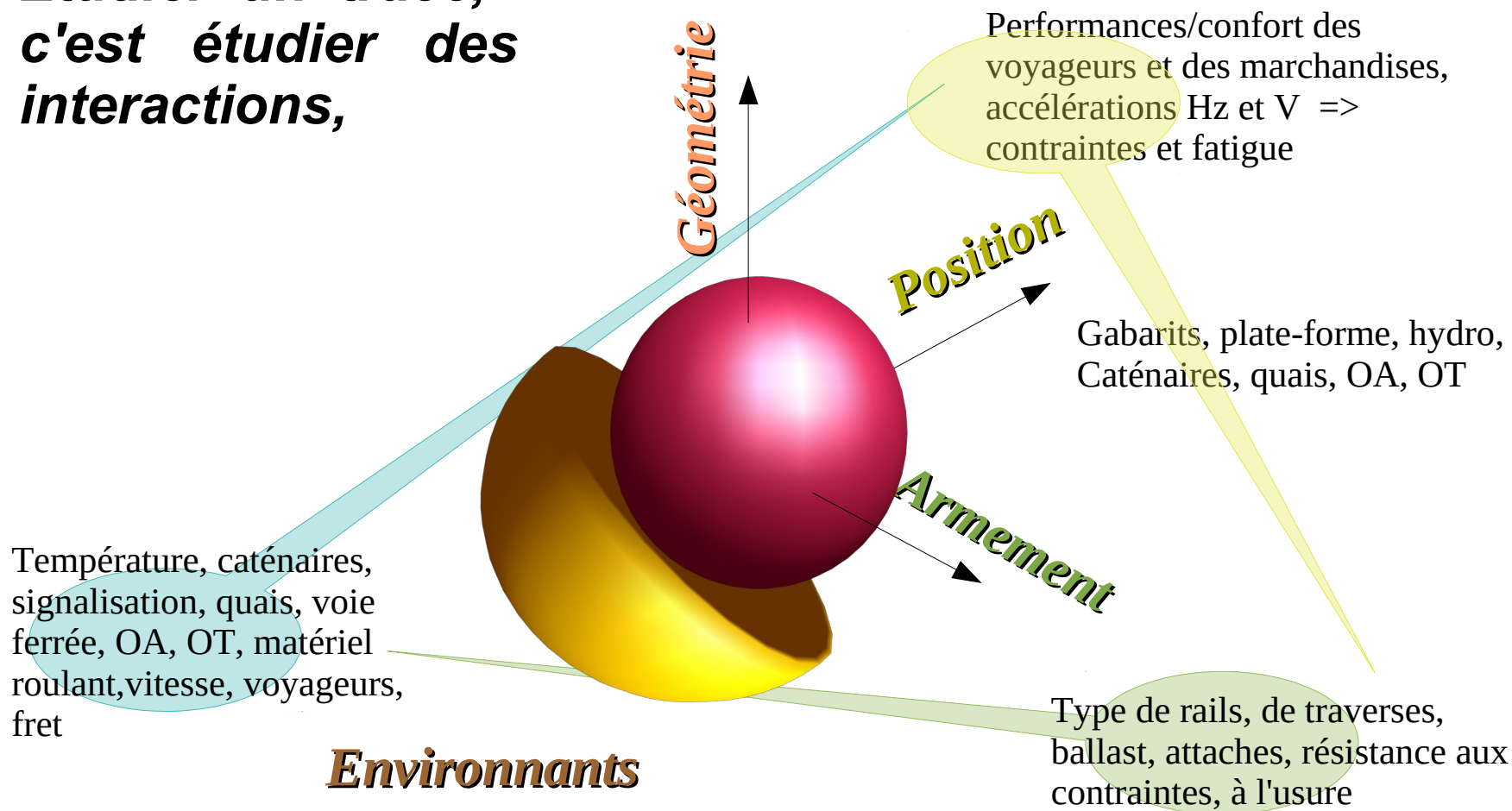
$$\text{Tracé} = \iiint_{\text{Espace}} \tau(g, p, a) dg dp da$$



TRACÉ DE VOIE

Conséquences « tracé »

**Étudier un tracé,
c'est étudier des
interactions,**



Nous venons de voir que la géométrie du support est directement responsable des effets dynamiques affectant celui-ci ainsi que le véhicule.

Le rayon, le dévers ainsi que leurs variations sont bornés par les effets indirects qu'ils induisent sur le confort des voyageurs, sur la voie ou sur les véhicules.

La vitesse, par les accélérations qu'elle génère, est le premier facteur déterminant dans une étude de tracé. Elle doit être impérativement connue (ou adaptée) pour les différentes catégories de train susceptibles d'emprunter l'itinéraire calculé mais aussi suivant l'armement retenu et le type de pose envisagé.

TRACÉ DE VOIE

Conséquences « tracé »

Les études de tracé de voie ne peuvent être conduites que par une approche systémique :

APPROCHE ANALYTIQUE	APPROCHE SYSTÉMIQUE
Isole : se concentre sur les éléments	Relie : se concentre sur les interactions entre les éléments.
Considère la nature des interactions.	Considère les effets des interactions
S'appuie sur la précision des détails.	S'appuie sur la perception globale.
Modifie une variable à la fois.	Modifie des groupes de variables simultanément.
Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles.	Intègre la durée et l'irréversibilité.
La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie.	La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité.

TRACÉ DE VOIE

Conséquences « tracé »

APPROCHE ANALYTIQUE

Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action (exemple : modèles économétriques).

Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles.

Conduit à un enseignement par discipline (juxta-disciplinaire).

Conduit à une action programmée dans son détail.

Connaissance des détails, buts mal définis.

APPROCHE SYSTÉMIQUE

Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action (exemple : modèles du Club de Rome).

Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes.

Conduit à un enseignement pluridisciplinaire.

Conduit à une action par objectifs.

Connaissance des buts, détails flous.

En effet, un tracé n'a de sens que par rapport à ses environnants immédiats dont les principaux sont :

Le matériel considéré (catégorie de train).

La caténaire et l'énergie électrique.

La signalisation (d'arrêt, d'espacement, d'indication de vitesse, de contrôle KVB, les postes).

L'armement.

Les différents obstacles (autres voies, ponts, tunnels, quais, signaux, voie routière, etc).

Les ouvrages d'art.

Le personnel (exploitant, conduite, entretien).

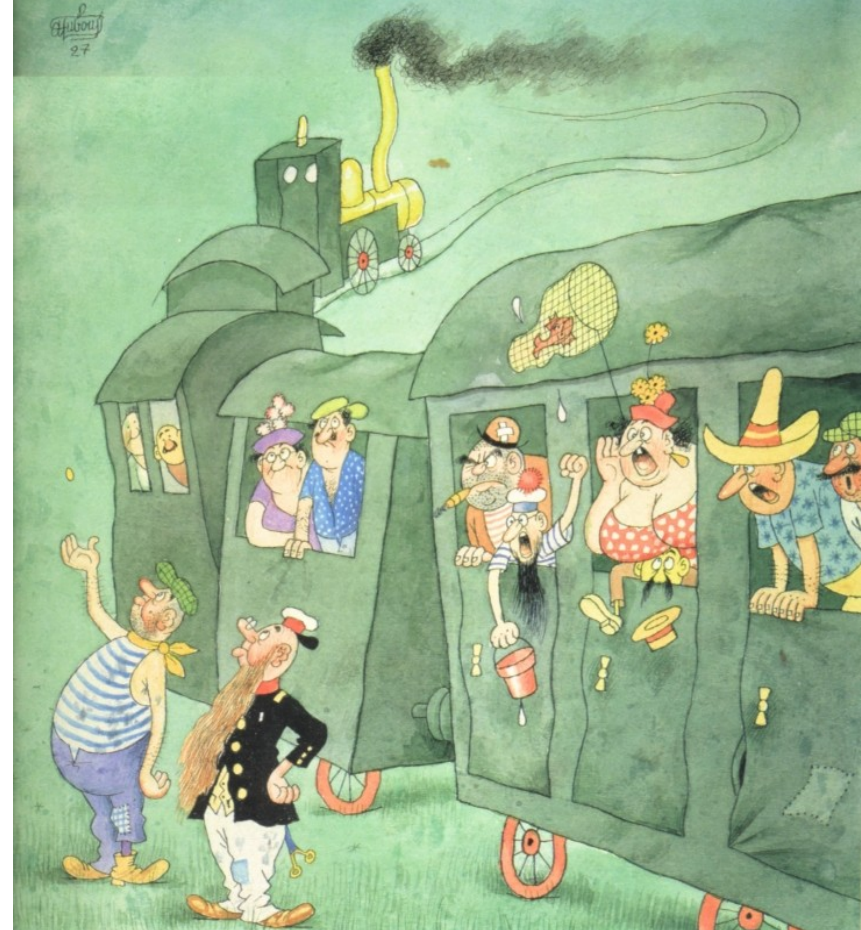
L'entretien ultérieur, la maintenabilité.

D'où la nécessité de bien connaître le système et ses interactions pour pouvoir « sentir » le plus rapidement possible les difficultés occasionnées aux autres métiers (Programmes Consignes, Caténaires, etc.) résultant de la modification du tracé de la voie. Cette anticipation permet d'éviter les reprises d'études tout en améliorant l'efficacité globale de la conception.

Le recueil des éléments descriptifs du système est primordial, il demande du temps. L'analyse de ces données également. Elle peut nécessiter des compétences variées et externes au Pôle Ingénierie.

Certaines de ces données étant importantes, leur absence doit être négociée lors de la revue d'exigence avec le client, la fiabilité de l'étude et de son chiffrage en dépend.

LES BIAIS COGNITIFS



Le biais de la loi des petits nombres

La « loi des petits nombres » est ce biais cognitif qui, faussant les résultats des sondages, nous conduit à prendre pour certaines des informations qui ne sont pourtant pas étayées.

Gare à l'échantillon étudié.

A noter : cette « loi des petits nombres » s'applique aussi dans le temps. Même si la fréquence d'un événement (météorologique, par exemple) est faible, il peut se reproduire deux années consécutives : ces deux années constituent alors un trop petit échantillon pour être forcément conforme à la probabilité établie sur plusieurs décennies de relevés météo. Ne sous-estimez donc pas un risque, de crue centennale par exemple, sous prétexte qu'une crue centennale a déjà eu lieu l'année précédente.

Le biais de la régression vers la moyenne

Le biais de la « régression vers la moyenne » nous fait prendre des variations pour des tendances... Et de mauvaises décisions.

Considérez la durée de la période concernée.

Cette « régression vers la moyenne » est aussi prise en compte par les scientifiques quand ils évaluent l'efficacité d'un traitement, ou par les pouvoirs publics lorsqu'il s'agit de tester l'effet d'un nouvel équipement sur le nombre d'accidents (un rond-point ou un radar automatique, par exemple).

Dans tous les cas, il est nécessaire de prendre en considération une période assez longue pour comparer les périodes « avant l'intervention » et « après l'intervention » ou de comparer l'évolution avec d'autres éléments (autre élève, effet placebo, fragments de route similaires etc.)

Le biais de la négligence du taux de base

Les psychologues appellent « négligence du taux de base » le biais qui déforme notre lecture des probabilités, nous amenant par exemple à nous inquiéter pour rien.

Imaginez : après avoir effectué le test de dépistage d'une maladie rare touchant une personne sur 10 000 en France, vous recevez un courrier de l'hôpital vous annonçant que ce test, efficace à 99 %, s'est révélé positif. L'inquiétude vous saisit: la probabilité que vous soyez malade vous semble être de 99 %. Faux: cette probabilité est inférieure à...1%.

Les probabilités vous réservent des pièges.

L'erreur d'appréciation vient de ce que nous oublions une information essentielle : la fréquence du phénomène lui-même, (1/10 000 pour la maladie rare). Si 10 000 personnes passent le test à l'hôpital, statistiquement, il y en aura en moyenne une qui sera atteinte de la maladie et pour laquelle le test sera positif. Mais puisqu'il n'est fiable qu'à 99 %, il se révélera aussi positif (à tort) pour une centaine de personnes parmi les 9 999 non touchées.

Le biais de la disponibilité en mémoire

Le biais de la « disponibilité en mémoire » nous fait prendre un événement récent pour un événement fréquent. Or, ce n'est pas parce qu'un événement vient d'avoir lieu qu'il a forcément plus de chances de se reproduire.

Ne vous focalisez pas sur les faits récents.

Il est donc nécessaire de garder en mémoire les événements du même type qui se sont déjà déroulés, même lointains, pour ne pas céder à ce biais. Une précaution essentielle en matière de prévention des risques.

Le biais d'ancrage

Le « biais d'ancrage » est celui qui nous défavorise dans une négociation. Daniel Kahneman l'a démontré en demandant aux visiteurs d'un centre de protection des oiseaux marins combien ils étaient prêts à donner pour soutenir le centre. Résultat : 64 dollars en moyenne. Mais s'il leur demande s'ils sont prêts à donner au moins 5 dollars, leur intention de contribution n'est plus que de 20 dollars. Au contraire, lorsqu'un chiffre élevé est évoqué (400 dollars), leur contribution s'élève en moyenne à 143 dollars.

Fixez vos propres bases dans une négociation.

Pour les psychologues, le premier chiffre avancé (5 ou 400 dollars) influence notre réponse. Une astuce bien connue des professionnels du marchandage. Conclusion, il est préférable de parler le premier et donc de créer soi-même l'ancrage, après avoir estimé la valeur qu'on est prêt à accorder au bien convoité.

Le biais de confirmation

Le « biais de confirmation » donne un air de vérité à ce que nous croyons. Chacun d'entre nous a tendance à faire un tri dans les informations et les preuves qu'il reçoit, l'amenant insensiblement à sélectionner celles qui confirment ses hypothèses ou ses croyances antérieures. Un phénomène qui se produit de manière d'autant plus sensible que l'incertitude est grande et que la polémique fait rage.

Ne négligez pas les points de vue contraires.

Un tel « biais de confirmation » prend toute sa dimension nuisible lorsqu'il s'agit d'innover, quand des idées iconoclastes ou des résultats atypiques cherchent à trouver un écho dans leur domaine. S'en défendre nécessite de prendre en compte tous les éléments à disposition, qu'ils soient conformes ou non à votre opinion, voire d'essayer d'adopter le point de vue contraire au vôtre. Optez pour « l'analyse des hypothèses concurrentes ».

Le biais de l'aversion pour la perte

La peur de perdre est bien mauvaise conseillère. Dès les années 1970, Daniel Kahneman avait suggéré la propension des individus à être plus affectés par la perte que par le gain. Il introduisait l'idée que les décisions, notamment celles des financiers, n'étaient pas aussi rationnelles qu'on pouvait l'espérer.

La peur de perdre aggrave vos pertes.

Celui-ci a en effet montré qu'un investisseur avait tendance à conserver dans son portefeuille d'actions celles qui étaient les moins performantes, afin de ne pas souffrir de leur vente à perte. Il préfère alors en vendre d'autres, au rendement pourtant meilleur. Résultat, la rentabilité des titres conservés était en moyenne inférieure de 3,4 % à celle des titres vendus. La peur de perdre aggrave donc les pertes.

Le biais de cadrage

L'énoncé d'une question influence notre réponse. Daniel Kahneman l'a démontré en 1981 lors d'une expérience restée célèbre. Deux groupes de personnes ont été interrogés sur la décision à prendre alors qu'une hypothétique maladie pourrait causer la mort de 600 personnes. Dans 1^{er} groupe, les participants avaient le choix entre 2 solutions : l'option A permettait de sauver 200 personnes, tandis que l'option B avait 33 % de chances de sauver 600 personnes, mais 66 % de risques de ne sauver personne. Dans le cas de l'option. Un rapide calcul montre que le nombre de survivants attendu est le même pour les options A et B, soit 200 personnes. Mais compte tenu du risque de ne sauver personne, 72 % des participants au test choisissaient l'option A.

Les probabilités de survie soumises au second groupe étaient les mêmes, mais leur formulation était modifiée : l'option A provoquait la mort de 400 personnes, pour l'option B, il y avait 33 % de chances pour que personne ne meure et 66 % de risques que tout le monde meure. 78 % des participants ont alors choisi l'option B.

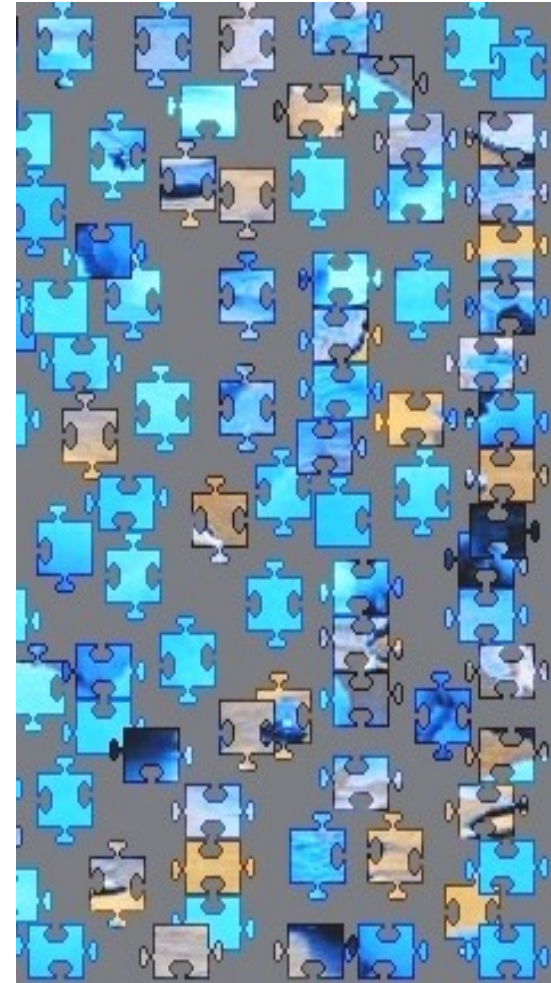
Le biais de représentativité

Scientifiquement appelé « heuristique de représentativité », ce biais nous fait privilégier les stéréotypes. Il consiste à baser notre jugement sur des informations « personalistes » et des stéréotypes plutôt que sur les statistiques.

Méfiez-vous des préjugés.

Quant aux préjugés qui orientent notre vision du monde, est-il utile de dire qu'il faut s'en méfier et s'efforcer de tenir compte de toutes les informations à notre disposition avant de prendre une décision ?

LES DONNÉES D'ENTRÉE



TRACÉ DE VOIE

Données d'entrée

Données d'entrée nécessaires à toutes études

Référentiels à utiliser :

- normes de tracé,
- Lignes Classiques,
- Lignes à Grande Vitesse,
- Voie étroite....

Itinéraires concernés :

- Classement UIC,
- Classement Demaux.
- Débouché (gabarits).

Catégories de train concernées (1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème}).

Vitesses pratiquées, vitesses signalisées, vitesses projetées.

TRACÉ DE VOIE

Données d'entrée

Tracé actuel, épures hallades.

Coefficient C, flèches, variation de dévers, doucines...)

Schéma d'armement, relevé mauzin.

Plans à l'échelle des installations (1/25000^{ème}, 1/1000^{ème}, Levé topographique 1/200^{ème} suivant le niveau d'études demandé).

Type d'électrification (1500 V, 25 000 V 50 Hz, 15 000 V 16 2/3 Hz).

Déclivités, pentes, rampes, raccordement cylindrique.

Entre-axe à utiliser.

Sondages, carottages, dégarnissages et ou relevages autorisés, etc...

Schéma d'armement



Type de rail, de traverse, d'attache, travelage, année et type de pose, présence d'appareils de dilatation, etc...

Permet de savoir :

- ✓ si les référentiels LRS s'appliquent (rayons admissibles).
- ✓ si des restrictions de vitesse suivant le type de traverse s'appliquent.



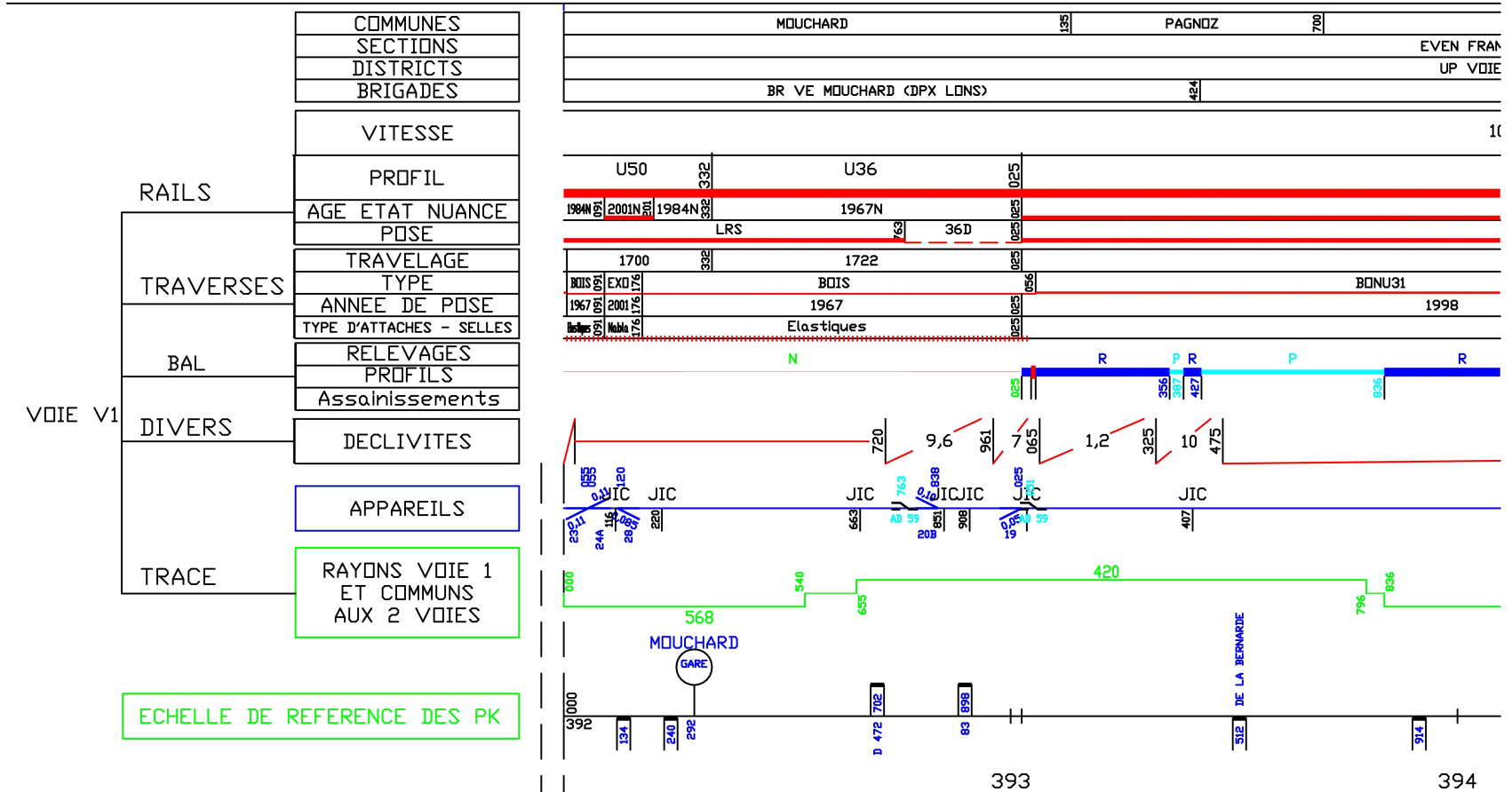
dans la mesure du possible, prévoir l'avenir !

Permet de calculer le groupe Demaux et donc de connaître l'insuffisance armement admissible

Permet de recenser les travaux de modernisation à prévoir, type de rail, de traverses (métalliques, bois, béton), technologie d'appareil de voie, type de pose, etc.

TRACÉ DE VOIE

Extrait de schéma d'armement



Relevé Mauzin



son analyse permet de connaître la qualité géométrique de la voie (c'est à dire ses défauts de nivellement, gauches, dressage, écartement,...) :

- ✓ Qualité géométrique des zones de raccord de tracé, évolution du tracé, allongement des doucines, zone de variation de dévers, gauches.
- ✓ Zones difficiles à tenir où l'on évitera les efforts en voie importants en choisissant les insuffisances et des variations de dévers les moins élevées possibles.

Contactez l'expert maintenance ou le mainteneur local.

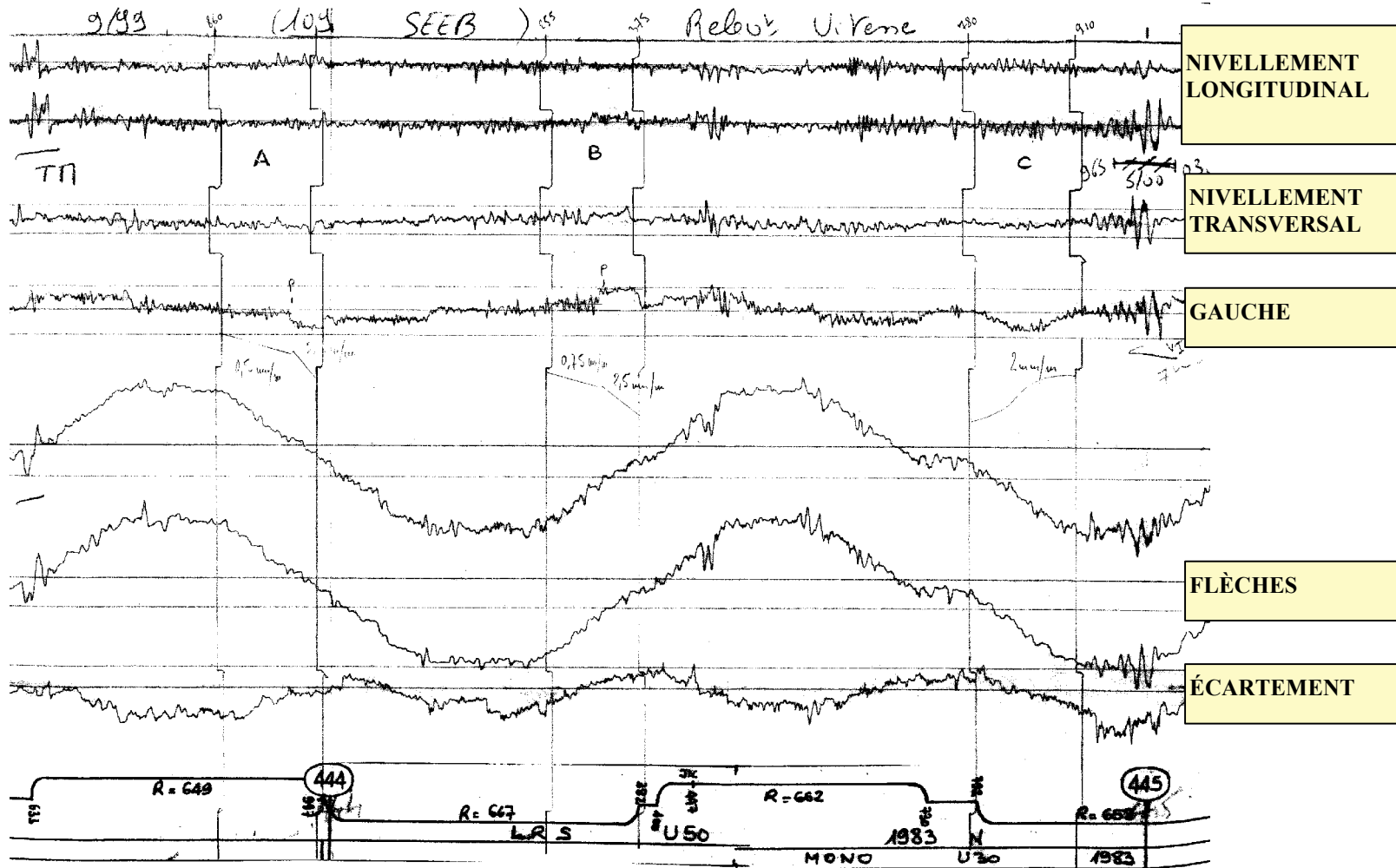
L'application TIMON (Traitement Infographique des Mesures et des Opérations Nomenclaturées) permet l'extraction de différents documents utiles dans le cadre de modernisation.



TRACÉ DE VOIE

Extrait de relevé Mauzin

Courbes
A, B, C
Ligne 850
relevés du
3/10/2000



TRACÉ DE VOIE

Analyse des données d'entrée

Zone de qualité médiocre où l'on évitera de se raccorder :

Points topographiques de mauvaise qualité (représentent-ils un défaut ?)

Zones à traiter dans le cadre du projet, le proposer à la MOA, se raccorder au-delà

Zones de gauche ayant dérivé dans des appareils de voie nécessitant leur déplacement éventuel

Vitesses pratiquées :

Vitesse jalonnée, vitesse matérialisée par « Z R », consulter les RT (renseignements techniques) et les plans techniques (SES)

Zones de décélération ou d'accélération où les trains ne seront jamais à la vitesse signalisée ce qui permet, parfois, de « passer » en faisant moins de casse. Évaluer cette vitesse pour les calculs au moyen des courbes de mise en vitesse ou de décélération (se rapprocher du groupe Programme Signalisation, voir le formulaire de tracé)



Penser à vérifier les trains de 1^{ère} catégorie (MA 80, MA 100, ME 120) à l'insuffisance admissible limitée (110 / 130 mm voir groupes Demaux)

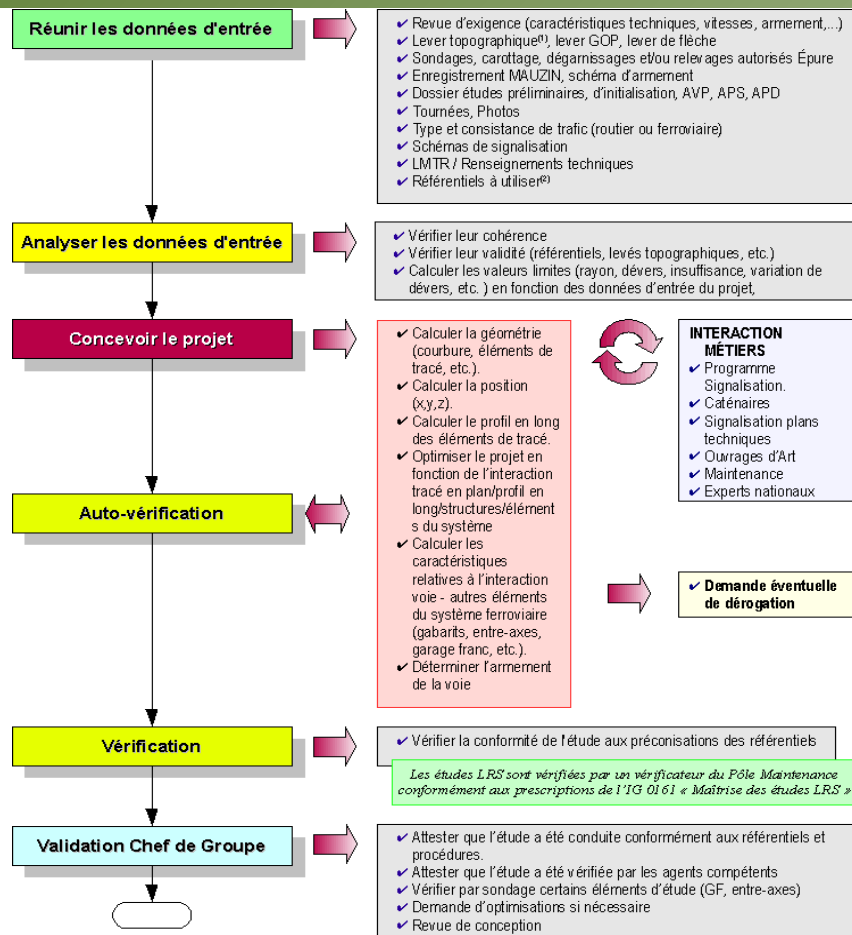


Dans les communications, ou pour des appareils dont la pose n'est pas considérée comme « isolée » (voir IN 0230) la vitesse de franchissement de la branche déviée peut être diminuée de 10 km/h ou plus

Sur la **branche directe** de certains appareils cintrés extérieur la vitesse est limitée.

0,13 ec CEX	R 400 m → R 499 m V ≤ 40 km/h	R 500 m → R 1000 m V ≤ 100 km/h
0,11 c CEX	R 400 m → R 500 m V ≤ 40 km/h	R 501 m → R 1000 m V ≤ 100 km/h

MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES



Comparer les valeurs mesurées sur le levé topographique avec les valeurs correspondantes sur les documents décrivant l'état actuel (épures hallades, relevé d'entre axes,...) en cas de divergence, utiliser les cotes redondantes du levé pour savoir si la voie est à son emplacement d'origine ou non.

D'où l'intérêt de relever la position de la voie levée par rapport aux goupilles des bornes hallades (si elles existent), aux supports caténaux (idem) ou à la voie contiguë.

Analyser les conséquences de l'écart de position de la voie sur le projet, faire trancher la MOA (remise à la position originelle ou non entraînant souvent des travaux plus importants, rayon de cintrage des appareils si R diffèrent ?)

Choisir judicieusement les points d'appuis levés dans les zones de raccordement pour les calculs des alignements de référence. En cas de courbe, comparer les rayons obtenus par ces points et ceux donnés par les épures hallades. De préférence, choisir les points donnant le rayon le plus proche des flèches de celles-ci ou rétablir les rayons d'origine.

La valeur des rayons calculés de même que la variation de flèches doivent être, autant que possible, compatibles avec une valeur de flèche ronde (au minimum au 1/2 millimètre)

$$F_{(mm)} = \frac{50000}{R_{(m)}}$$

Calculer les limites admissibles des normes de tracé

	TRACE GÉOMÉTRIQUE	MÉTHODE DES FLÉCHES
Dévers d'équilibre (mm)	$D = \frac{11,8 V^2}{R} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{DR}{11,8}}$	$D = \frac{0,236 V^2 f}{1000} \Rightarrow V = \sqrt{1000 \frac{D}{0,236 f}}$
Dévers pratiques (mm)	$d = \frac{1000 C}{R} \Rightarrow C = \frac{dR}{1000}$	$d = 0,02 C f \Rightarrow C = \frac{d}{0,02 f}$
Variation de dévers (mm/m)	$\frac{\Delta d}{\Delta L} = \frac{180}{V} \text{ ou } \frac{216}{V}$	
Insuffisance (mm)	$I = D - d = \frac{11,8 V^2 - 1000 C}{R}$	$I = D - d = f \left(\frac{0,0118 V^2 - C}{50} \right)$
Variation d'insuffisance par seconde (mm/s)	$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I V}{3,6 L}$ avec $L = 20$ m en cas de discontinuité	

TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Calculs de Δf (sur 10 m) en fonction de C et V.

Longueur minimum de raccordement (C optimum)

	Différence de flèche (mm) sur 10 m en fonction de C			
VITESSES	$V \leq 200$ km/h		200 km/h $< V \leq 220$ km/h	
LIMITES	NORMALES	EXCEPTIONNELLES	NORMALES	EXCEPTIONNELLES
Condition de gauche (mm/m)	$\frac{\Delta d}{L} \leq \frac{180}{V}$ $\Delta f \leq \frac{90000}{CV}$	$\frac{\Delta d}{L} \leq \frac{216}{V}$ $\Delta f \leq \frac{108000}{CV}$	$\frac{\Delta d}{L} \leq \frac{180}{V}$ $\Delta f \leq \frac{90000}{CV}$	$\frac{\Delta d}{L} \leq \frac{216}{V}$ $\Delta f \leq \frac{108000}{CV}$
Condition de variation d'insuffisance (mm/s ²)	$\frac{\Delta I}{\Delta T} \leq 55 \text{ mm/s}^2$ $\Delta f \leq \frac{99000}{0,0118 V^3 - CV}$	$\frac{\Delta I}{\Delta T} \leq 90 \text{ mm/s}^2$ $\Delta f \leq \frac{162000}{0,0118 V^3 - CV}$	$\frac{\Delta I}{\Delta T} \leq 50 \text{ mm/s}^2$ $\Delta f \leq \frac{90000}{0,0118 V^3 - CV}$	$\frac{\Delta I}{\Delta T} \leq 75 \text{ mm/s}^2$ $\Delta f \leq \frac{135000}{0,0118 V^3 - CV}$
C optimum $\Delta f_{\frac{\Delta I}{\Delta T}} = \Delta f_{\frac{\Delta d}{\Delta L}}$	$C = 0,005619 V^2$	$C = 0,004720 V^2$	$C = 0,005900 V^2$	$C = 0,005244 V^2$

Déterminer l'insuffisance maximum à utiliser en comparant l'insuffisance calculée à l'insuffisance permise par le groupe Demaux de la ligne pour les trains considérés dans l'étude.

Vérifier si l'armement est compatible avec les vitesses envisagées (notamment traverse béton légère VAX U20 si $V > 140$ km/h).

Déterminer le rayon minimum en fonction de l'armement prévu si pose LRS (IN 2915).

Déterminer si les appareils de voie sont ou non incorporés (IN 0289) :

- ✓ Encrage
- ✓ Suivant la branche incorporée, changement de sens de l'appareil ?

CATÉNAIRES



Sollicitations mécaniques

Rame V150 le 3 avril 2007
PK 181,8 V 555,4 km/h



TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Rame V150 le 3 avril 2007
PK 183,0 V 558,7 km/h



TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

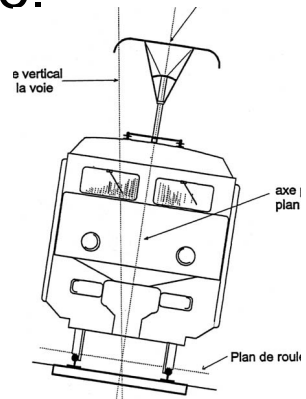
Rame V150 le 3 avril 2007
PK 184,8 V 563,3 km/h



Caténaires

La hauteur du fil de contact par rapport au plan de roulement est normalement de 5,50 m (constante, de 4,95 elle a été portée à 5,08 m sur LGV). Aux passages à niveau, elle doit être supérieure à 6 m sans dépasser 6.50 m (hauteur limite de captage des pantographes) à la température minimale.

Le désaxement A du fil de contact par rapport à l'axe du matériel roulant ne peut dépasser ± 22 cm en alignement et en courbe (1,5 kV), et ± 20 cm en alignement, ± 24 cm en courbe (25 kV). Par convention, il est positif vers l'intérieur de la courbe.



$$A = \frac{d \times Hf_c}{1,51}$$

où A est la distance axe vertical de la voie, axe pantographe (désaxement), d le dévers et Hf_c la hauteur du fil de contact.

TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Situation	Hauteur du FC / Plan de roulement	
	1 500 V	25 000 V
En voie courante au droit des supports	5,50 m	
Hauteur maximale (pour respecter le débattement maximal des pantographes)	6,50 m	
Hauteur minimale à la traversée des voies ouvertes à la circulation publique	6,00 m	
Hauteur minimale sous les ouvrages d'art (exemple de valeur : gabarit le plus répandu 4,38 m)	4,53 m zone normale 4,54 m zone polluée	4,65 m zone normale 4,70 m zone polluée
Hauteur minimale sur LGV	/	5,08 m

La portée (multiple de 4,50 m), distance entre 2 supports successifs, varie en fonction des rayons des courbes.

Caténaires, portée « a » et rayon en plan

Caténaires 1500 V

a = 63,0 m			R ≥	1 400 m
58,5 m	1400 m	>	R ≥	1 200 m
54,0 m	1200 m	>	R ≥	1000 m
49,5 m	1000 m	>	R ≥	850 m
45,0 m	850 m	>	R ≥	700 m
40,5 m	700 m	>	R ≥	600 m
36,0 m	600 m	>	R ≥	450 m
31,5 m	450 m	>	R ≥	350 m
27,0 m	350 m	>	R ≥	250 m
18,0 m	250 m	>	R	

Caténaires 25 000 V

a = 63,0 m			R ≥	1 800 m
58,5 m	1800 m	>	R ≥	1 350 m
54,0 m	1350 m	>	R ≥	1 050 m
49,5 m	1050 m	>	R ≥	850 m
45,0 m	850 m	>	R ≥	650 m
40,5 m	650 m	>	R ≥	500 m
36,0 m	500 m	>	R ≥	400 m
31,5 m	400 m	>	R ≥	300 m

Ligne de contact simple, portée « a » et rayon en plan

Caténaires 1500 V

a = 30,0 m	∞		R \geq	230 m
29,0 m	230 m	>	R \geq	215 m
28,0 m	215 m	>	R \geq	200 m
27,0 m	200 m	>	R \geq	190 m
26,0 m	190 m	>	R \geq	170 m
24,0 m	170 m	>	R \geq	150 m

Caténaires 25 000 V

a = 30,0 m	∞		R >	260 m
28,0 m	260 m	\geq	R >	220 m
25,0 m	220 m	\geq	R >	180 m
23,0 m	180 m	\geq	R >	150 m

En cas de sectionnement, ces valeurs sont modifiées pour éviter que la valeur de désaxement ne dépasse les limites admises (IN 1063 25Kv).

TRACÉ DE VOIE

Methodologie d'études

La caténaire est normalement parallèle au profil en long de la voie.

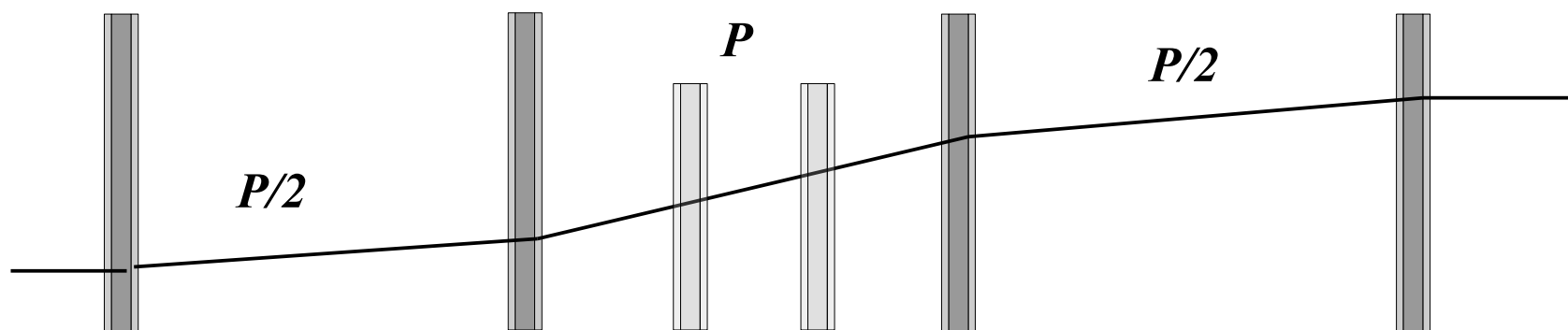
La différence de pente, entre la caténaire et le profil en long de la voie, est limitée en fonction de la vitesse.

1500 V (IGTE 21403/3000)		25000V (VZC 21403/303000)	
		$V > 160$ km/h	2 mm/m
$V > 100$ km/h	3 mm/m	$100 < V \leq 160$ km/h	3 mm/m
$V \leq 100$ km/h	6 mm/m	$V \leq 100$ km/h VS non rég.	6 mm/m
LCS-LCD- LCDR	10 mm/m	LCSNR - VS	10 mm/m

TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

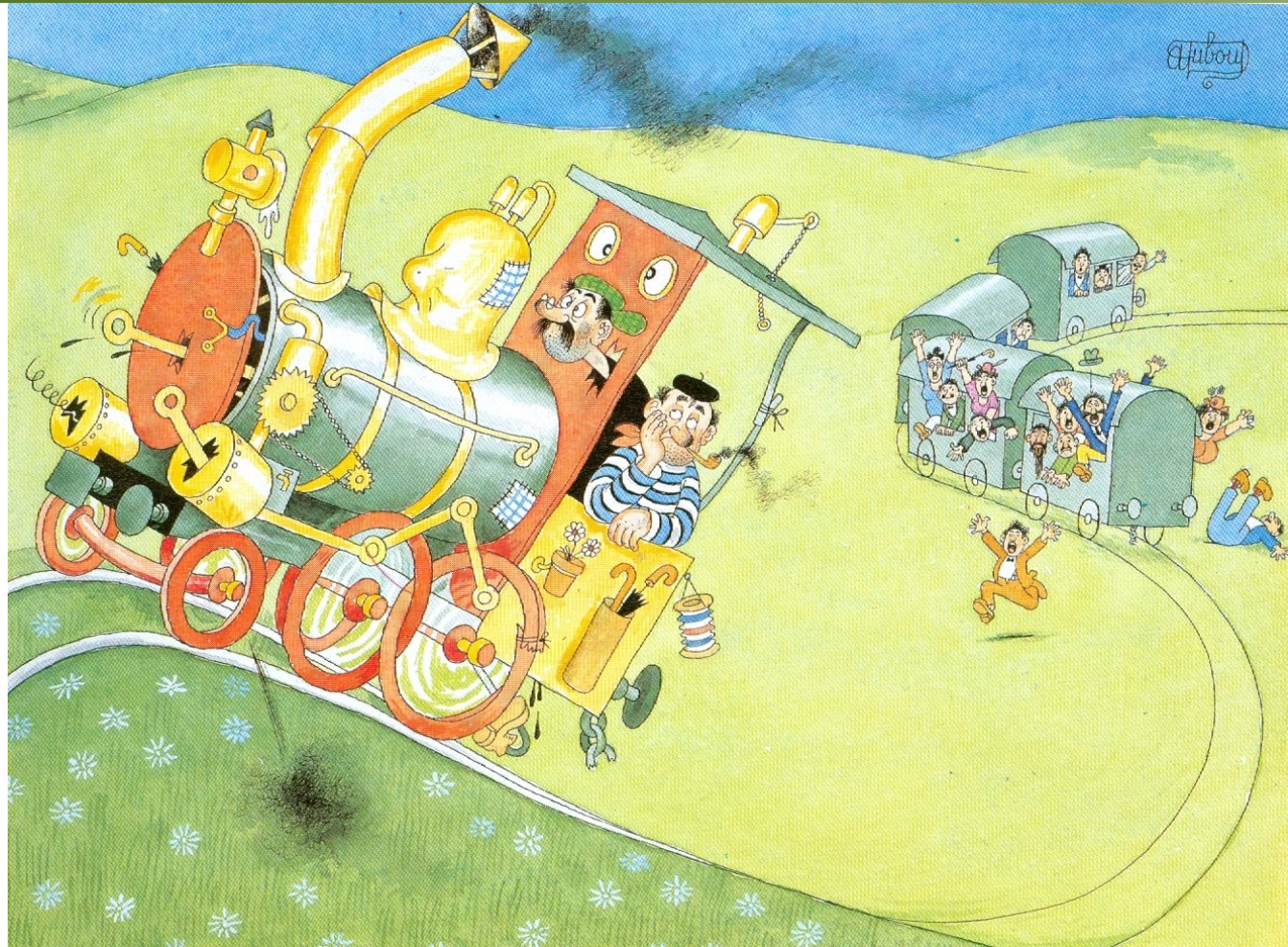
La variation de pente ou de rampe du fil de contact entre 2 portées successives ne peut dépasser la valeur de la demi pente maximale autorisée P .



Un raccordement cylindrique de profil en long de voie entre 2 supports caténaux peut s'avérer impossible à réaliser avec le fil de contact.

En cas de rehaussement de quai, en 25000 V, attention à la protection électrique des voyageurs, l'isolateur le plus bas (sur le support) ne devant pas être à moins de 5 m du sol.

PROFIL EN LONG



Profil en long

Pentes corrigées $P_c = \frac{800}{R}$

Résistance des attelages

Redémarrage, puissance des engins de traction

position des raccordements cylindriques (IN 0272, IN 0230)

En pleine voie

Par rapport aux appareils (cassures)

Réalisation (bourreuses)

Passage à niveau, profil routier, TIPULES et ses limites

Appareils de voie posés en dévers

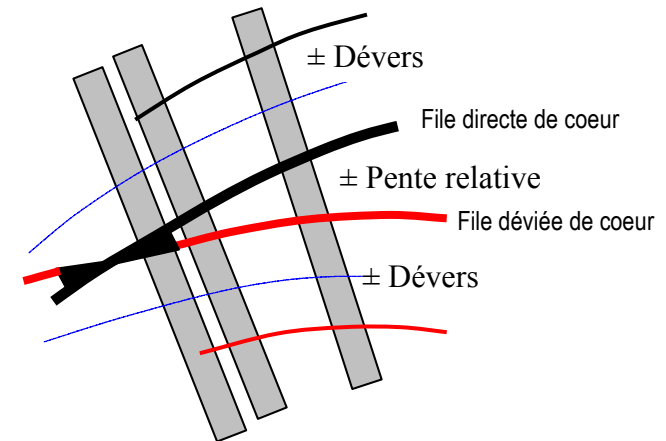
La pose d'appareil de voie en dévers nécessite le calcul du profil en long de toutes les files de rail. Celui-ci est lié à l'inclinaison des traverses de cœur et de sortie de cœur résultant elle-même du dévers en voie directe et en voie déviée.

Dans certains cas (réduction de la valeur du gauche en sortie de branche déviée, communication entre voie de dévers différent, etc.) il est intéressant de pouvoir augmenter ou diminuer le dévers de la branche déviée par rapport au dévers de la branche directe en sortie d'appareil. Les appareils doivent alors être impérativement sur plancher bois. La méthode consiste à sur entailler les traverses dans la partie intermédiaire et sous le cœur.

En général, sous le cœur et en sortie de cœur, le sur entaillage est moyenné entre la branche directe et la branche déviée, toutefois, il est possible de ne sur entailler qu'une seule file (extérieure ou intérieur courbe) L'entaille maximale en extrémité de la sortie de croisement (ou à 5 m si celle-ci est de longueur inférieure dans le cas de pose d'appareils isolés) ne peut pas dépasser 26 mm, une profondeur supérieure imposant l'emploi de traverses spéciales plus épaisses.

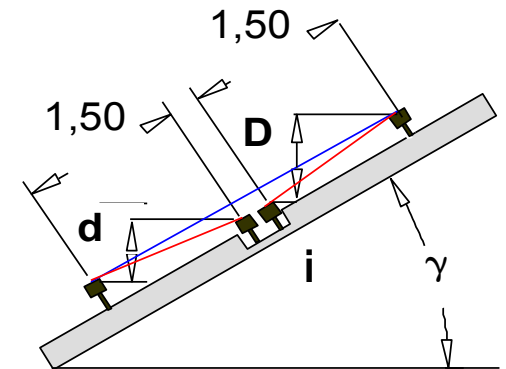
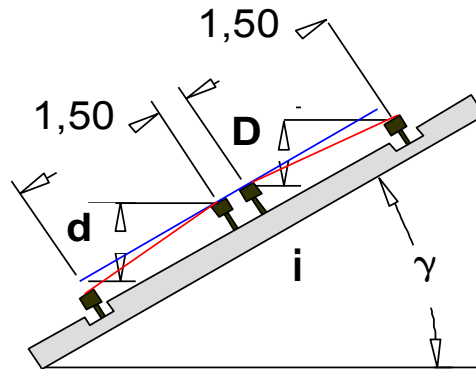
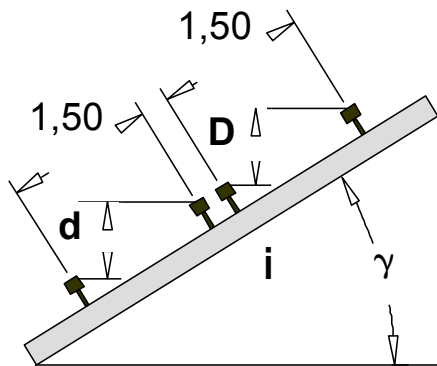
Le profil en long des files de rail sera calculé relativement à celui de la file de cœur de la branche directe :

- ✓ En ajoutant algébriquement l'inclinaison relative de la file de cœur de la branche déviée par rapport à la file de cœur de la branche directe.
- ✓ En ajoutant algébriquement les dévers par rapport aux deux files de cœur.



Calcul de l'inclinaison des traverses

Appareils non entaillés ou les 2 files intérieures ou extérieures entaillées.



$$i_{(mm/m)} = \frac{d_{[mm]} + D_{[mm]}}{1,50_{[m]} + 1,50_{[m]}}$$

D = Dévers de la branche directe

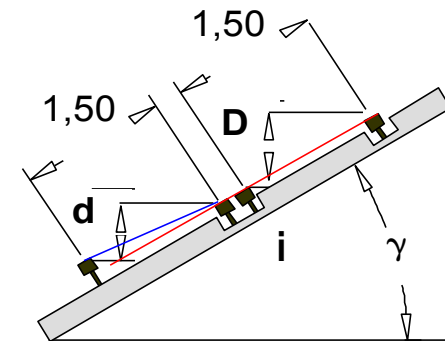
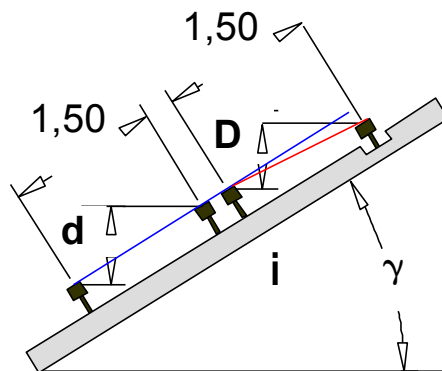
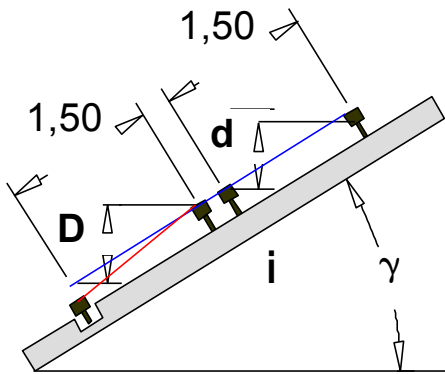
d = Dévers de la branche déviée

i = inclinaison des traverses

TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Une file de rail ou le coeur et 1 file de rail sont entaillés.



$$i_{(mm/m)} = \frac{d_{[mm]}}{1,50_{[m]}}$$

$$i_{(mm/m)} = \frac{D_{[mm]}}{1,50_{[m]}}$$

D = Dévers de la branche entaillée

d = Dévers de la branche non entaillée

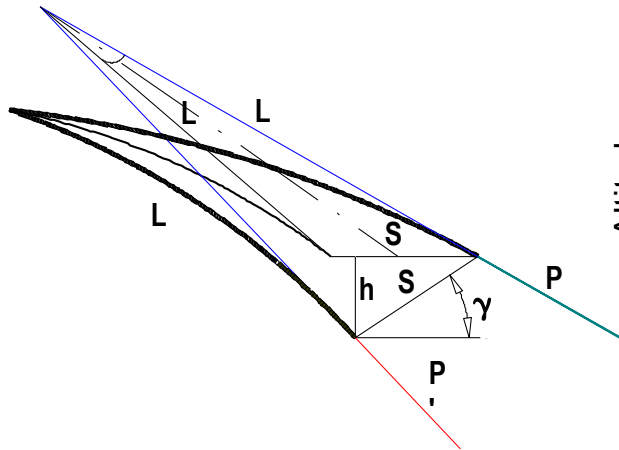
i = inclinaison des traverses

TRACÉ DE VOIE

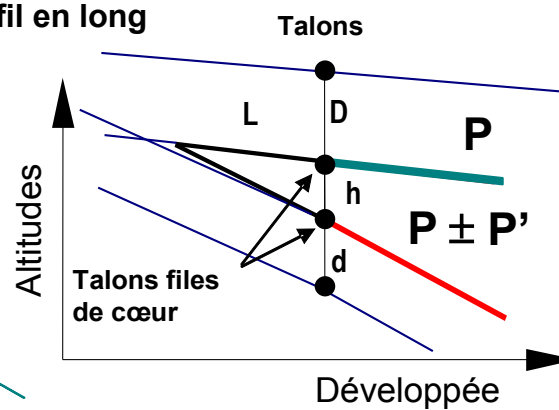
Méthodologie d'études

Calcul de la pente relative P' de la file déviée de cœur aux talons théoriques (modèle éclissé)

Cœur de croisement



Profil en long



$$h_{[mm]} = S_{[m]} \times i_{[mm/m]}$$

$$L_{[m]} = \frac{S_{[m]}}{2 \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$P'_{[mm/m]} = \frac{h_{[mm]}}{L_{[m]}}$$

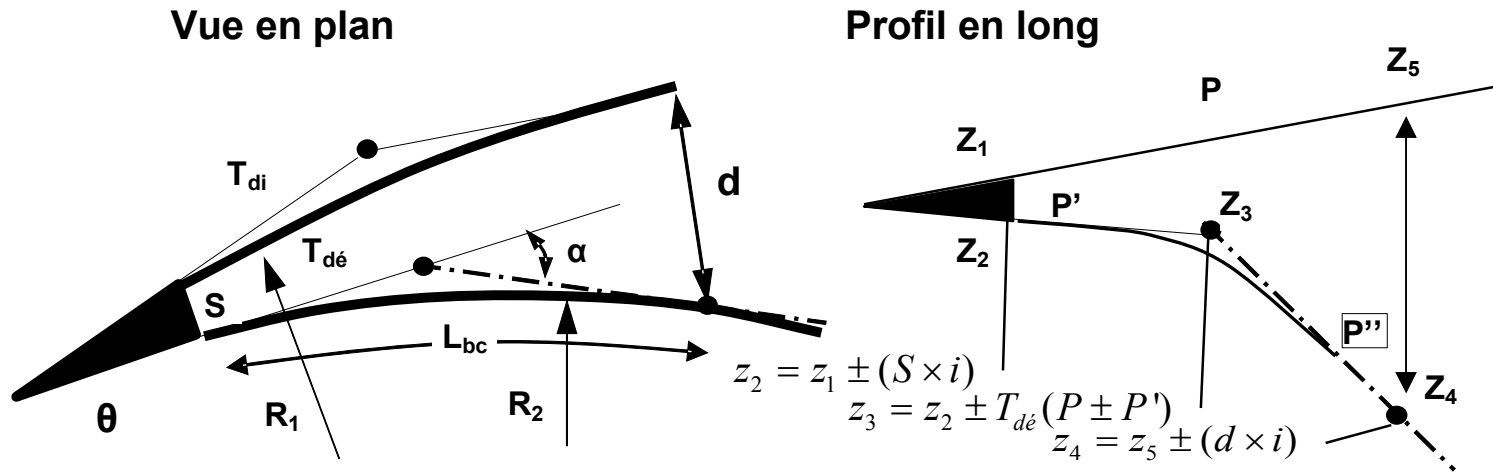
$$P' = 2 \times i \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

- S = écartement entre les files de cœur
- q = angle de l'appareil
- h = différence d'altitude entre les files de cœur en talons
- L = développée du trajet parcouru
- P = profil de la file directe de cœur
- P' = profil de la file déviée de cœur par rapport à la file directe de cœur

TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Calcul de la pente relative P'' de la file déviée de cœur à la sortie de croisement



$$\alpha_{[radian]} = \frac{L_{bc}}{R_2} \quad T_{dé} = R_2 \times tg \left(\frac{\alpha_{[radian]}}{2} \right) \quad P'' = \frac{Z_3 - Z_4}{T_{dé}}$$

R_2 = Rayon de la file déviée de cœur dans la sortie de croisement

L_{bc} = Longueur de la sortie de croisement

α = Angle au centre correspondant à la développée du rayon R_2 dans la sortie de croisement

Réalisation, bourrage

zone d'arrêt ou de reprise (tracé constant courbe ou alignement)

Bourreuse d'appareil (6 à 700 m/h)

Bourreuse de ligne (1200 à 1600 m/h)

L' intervalle de travail permet-il de bourrer ou dresser de la pleine voie avec la bourreuse d'appareil jusqu'à une zone de tracé constant ?



Relevages

Les relevages entraînent généralement un élargissement de la banquette de ballast au détriment de la piste, penser à son rétablissement.

Attention au sur-poids de ballast supplémentaire sur les ouvrages d'art (contacter OA).

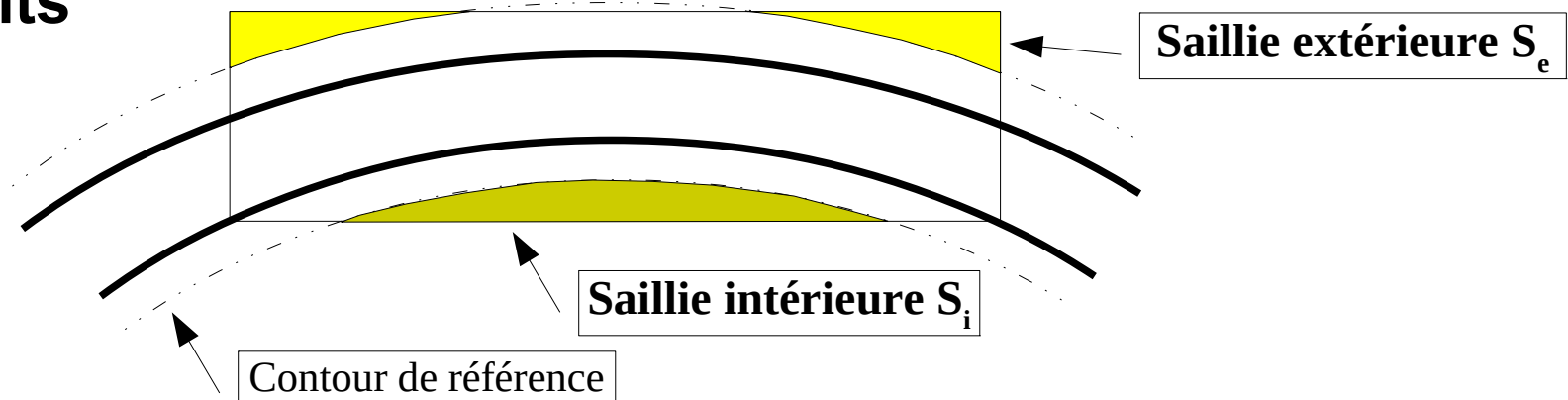
Attention aux possibilités de relevage des caténaires (poteau, consoles, gabarit d'isolation)

Aux PN, vérifier la conformité du profil en long routier avec les préconisations de l'arrêté ministériel du 26 novembre 2003. Lors de l'utilisation de « TIPULES⁽¹⁾ » prendre une marge de dégagement minimale de 6 cm, les véhicules respectant **strictement** l'arrêté.

Réserver, si possible, des zones d'arrêt ou de reprise de bourrage (30 à 50m) où le tracé est constant notamment en zone d'appareils.

(1) **T**raitement **I**nformatisé des **P**assages à niveau **U**tilisés par **L**es **E**ngins **S**urbaissés.

Gabarits



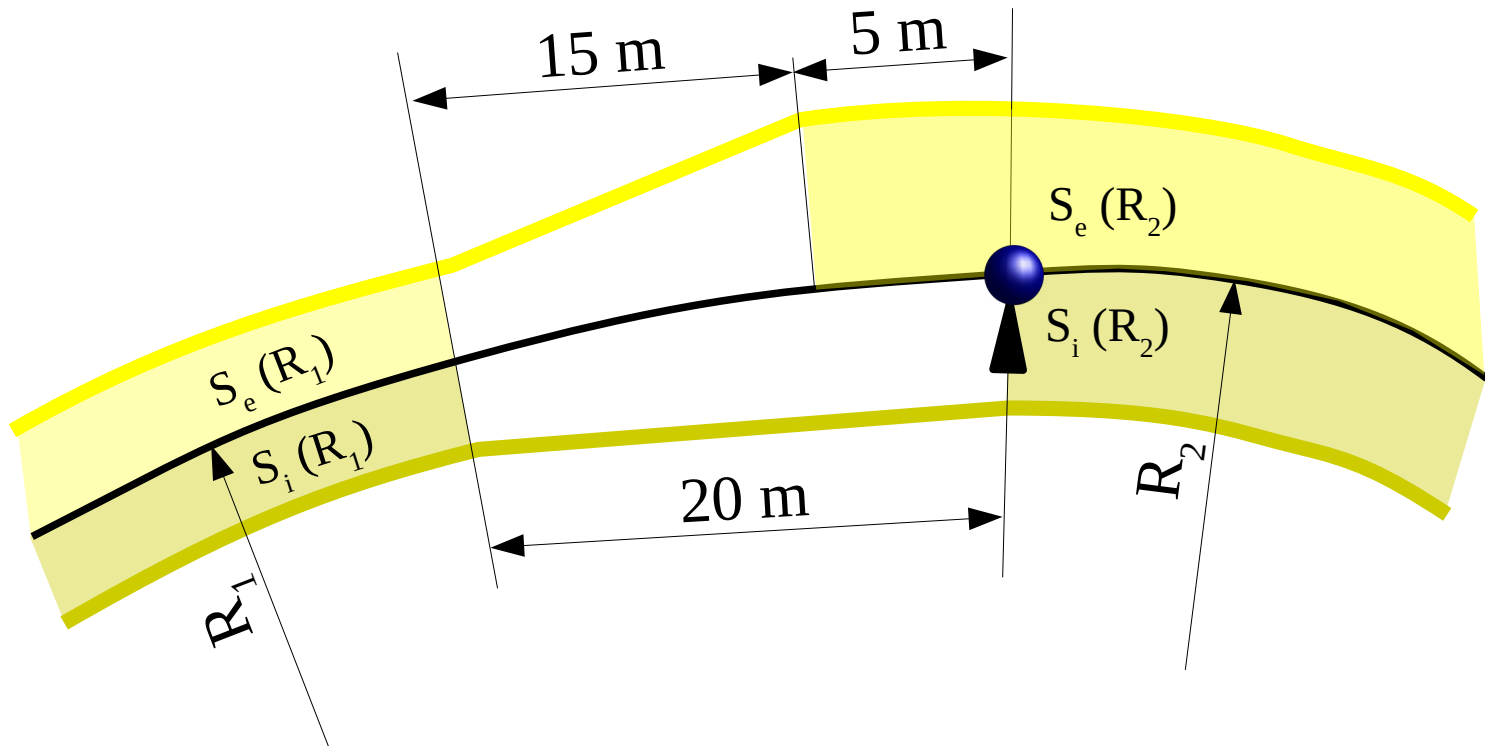
Les valeurs de saillies sont valables lorsque le rayon de la voie est constant sur au moins 10 m pour S_i et 20 m pour S_e de chaque côté du point considéré.

Penser aux saillies supplémentaires S' (obstacles isolés, ouvrage d'art) et S'' (zone de quai), au droit des pointes d'appareil de voie. S'' étant inférieure à S' du fait des déplacements quasi statiques négligeables à la hauteur des bordures de quais (tous types)

TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

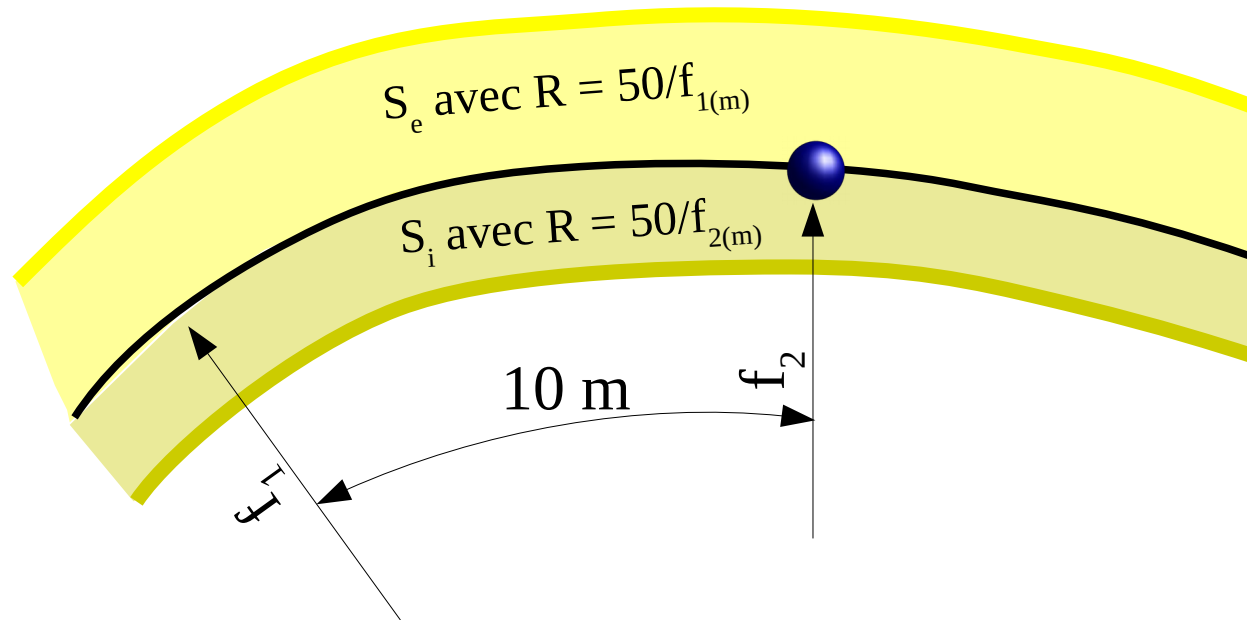
Point de tangence, $R_1 > R_2$



TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Raccordements progressifs (f : flèche au milieu d'une corde de 20 m, $f_1 > f_2$)



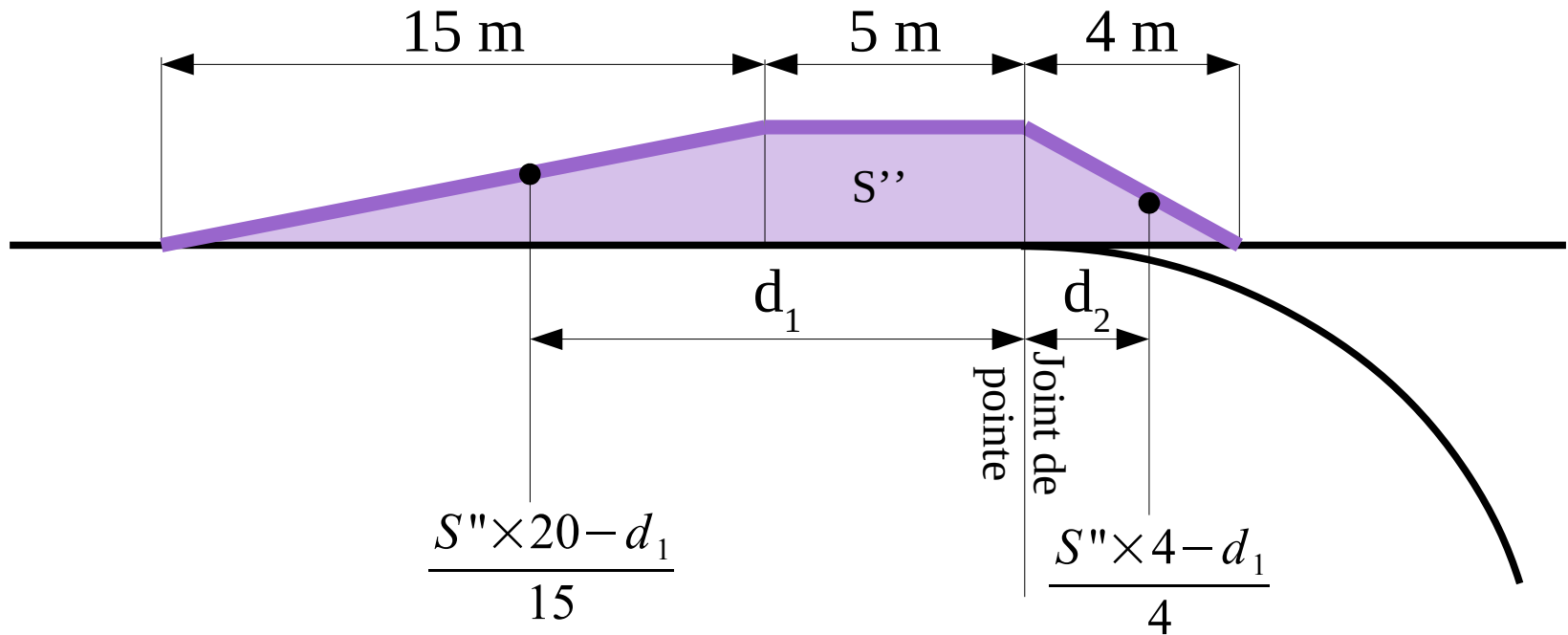
TRACÉ DE VOIE

Méthodologie d'études

Pointe d'appareils

ex : 0,13 ec en alignement, $S'' = 0,160$ m

0,05 en alignement, $S'' = 0,010$ m



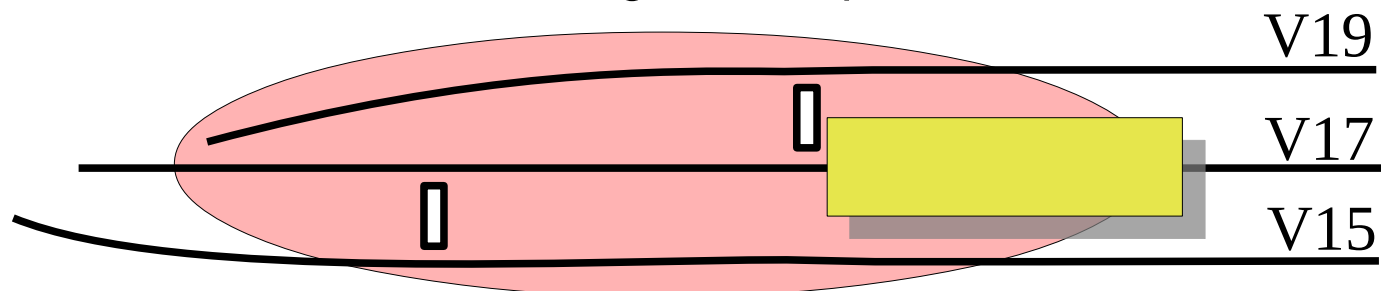
Vérifier les entre-axes, attention au courbes ou raccordements progressifs non concentriques.

Attention aux lignes aériennes longeant nos voies lors de ripages important (ballant du au vent fonction de la portée, contacter si besoin RTE).

Positionner si possible les moteurs d'aiguilles coté piste (déplacement éventuel de l'appareil) de même que les caniveaux câbles pour la sécurité du personnel.

Vérifier que les déplacements de garage franc (GF) restent compatibles avec la signalisation.

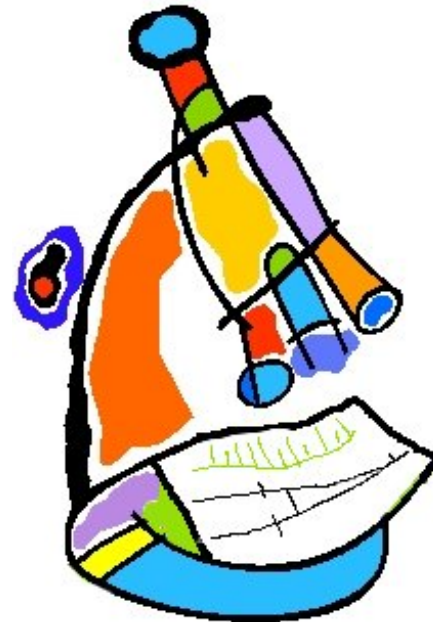
Dans les têtes de faisceau, calculer les courbes de raccord afin d'aligner le mieux possible les GF entre les différentes voies. C'est le plus pénalisant, celui donnant la longueur utile la plus faible qui est retenu comme base d'alignement pour les voies encadrantes



En cas de pose avec dévers, le tracé géométrique des raccordements n'intègre pas les doucines. Réserver 15 m de voie libre minimum de part et d'autres.



ANALYSE DU TRACÉ



TRACÉ DE VOIE

Critères d'analyse du tracé

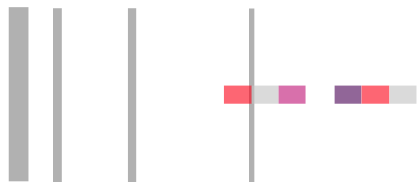
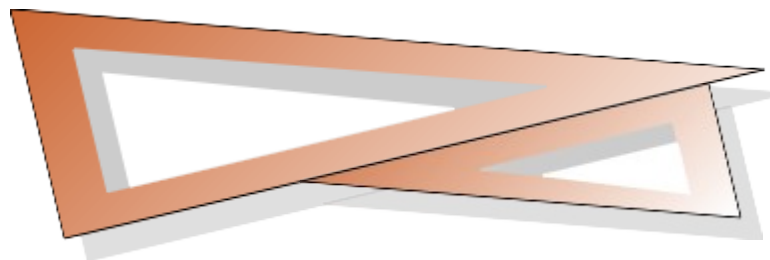
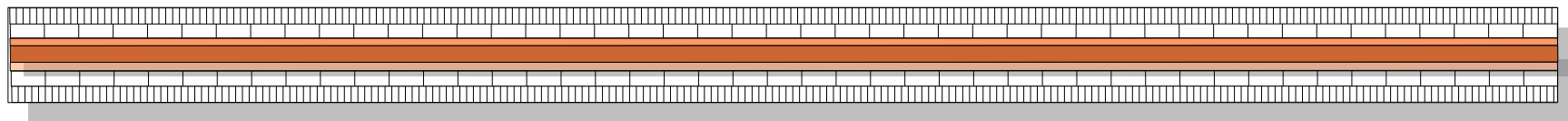
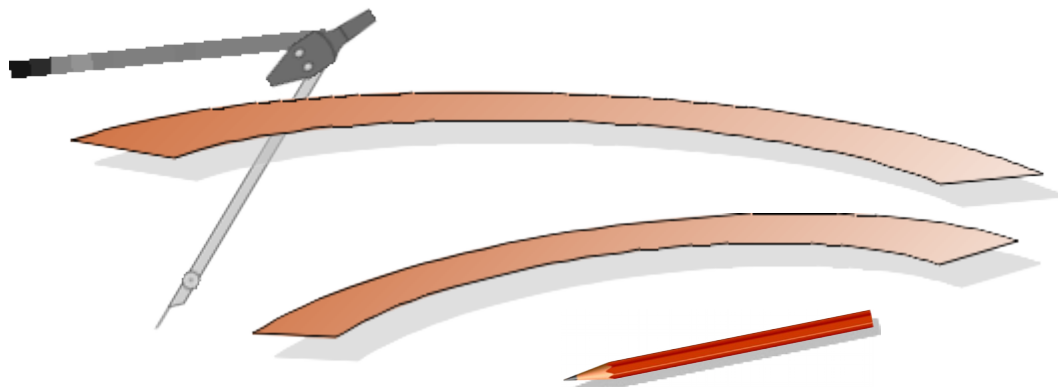
Respect des normes	Mesure de la distance par rapport à la valeur limite exceptionnelle : $\frac{\Sigma (\text{valeurs limites exceptionnelles} - \text{valeurs utilisées})}{\text{nombre de valeurs mesurées}}$
Qualité du tracé	Indice calculé à partir du graphe des variations d'insuffisance
Difficultés de réalisation	Intervalles, pose, tracé en plan, profil en long
Difficultés d'entretien	Blancs travaux, Bourrage, LRS libération/incorporation
Ripage de voie longitudinal	Σ des ripages / nombre d'appareils ripés
Ripage de voie latéral	Σ des surfaces mesurées entre le tracé actuel et le tracé futur

TRACÉ DE VOIE

Critères d'analyse du tracé

Relevage	Σ des surfaces mesurées, sur le profil en long, entre le tracé actuel et le tracé futur
Caténaires	Supports à déplacer, importance des travaux
SES	Importance des travaux
Réchauffage des aiguilles	Importance des travaux, difficulté d'utilisation (gaz, électrique)
Facilité d'utilisation	Manoeuvre des appareils
Facilité d'utilisation	Transport
Saut de performance	Fluidité, vitesses, matériel, entretien...

TRACÉ GRAPHIQUE



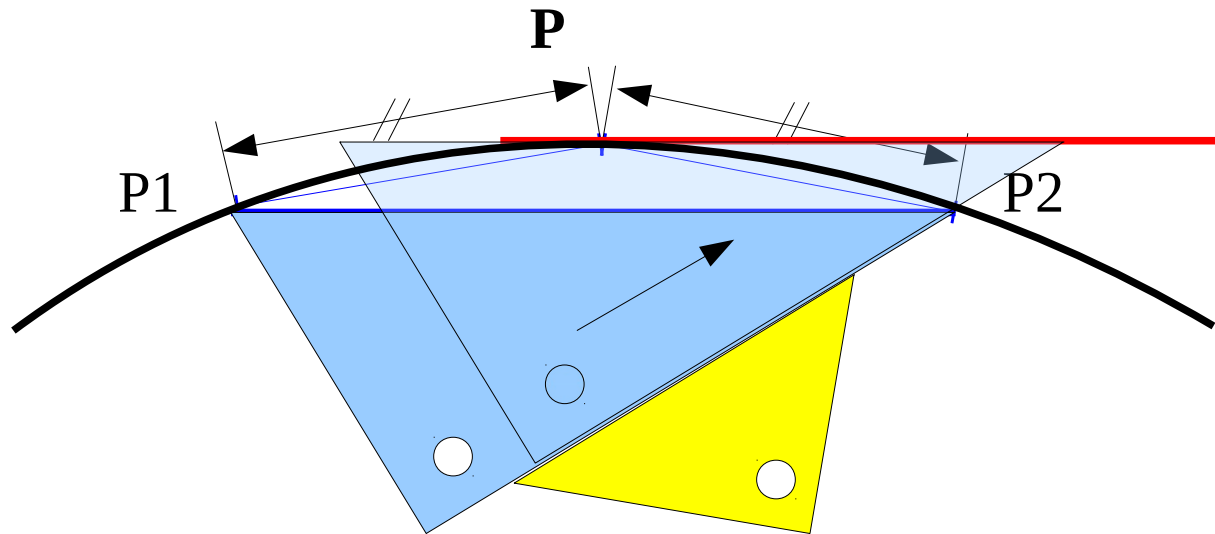
TRACÉ DE VOIE

Le tracé de voie graphique

Le tracé de voie peut avantageusement être réalisé graphiquement, surtout dans les phases d'émergence, au 1/1000^{ème} ou 1/200^{ème}.

Tangente en 1point à un cercle :

Tracé P_1 et P_2 équidistants de P , tracé la parallèle à $P_1 P_2$ passant par P

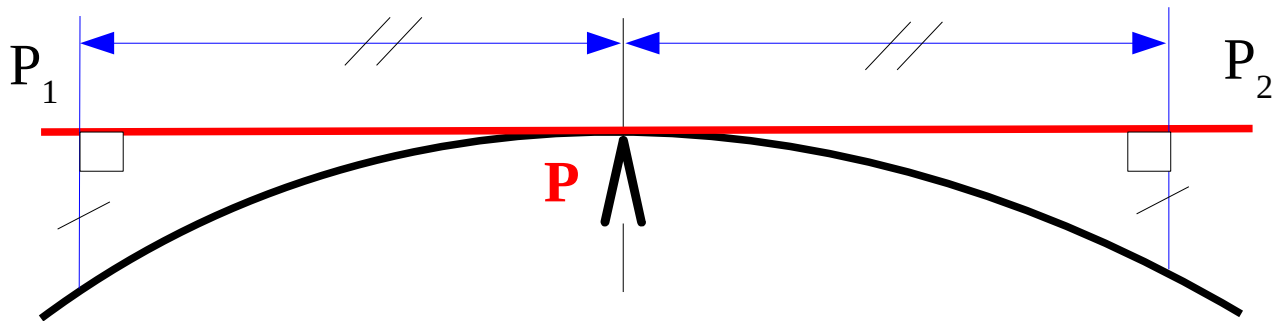


TRACÉ DE VOIE

Le tracé de voie graphique

P point de tangence à un cercle :

Choisir P_1 et P_2 équidistants perpendiculairement à la tangente au cercle, P est au milieu du segment $P_1 P_2$.

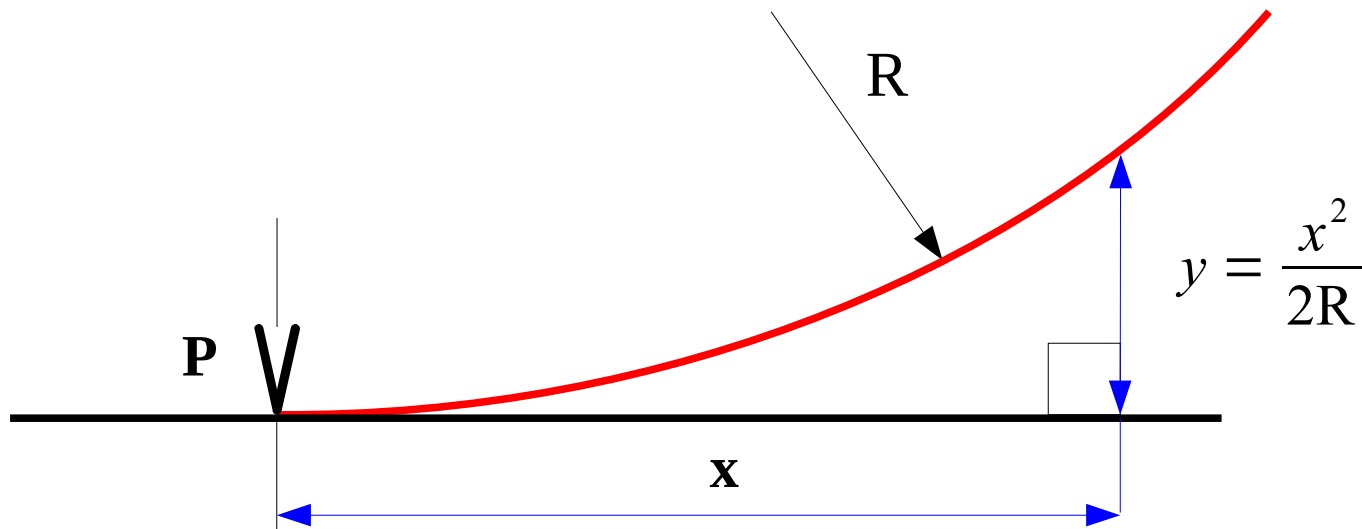


TRACÉ DE VOIE

Le tracé de voie graphique

Cercle tangent en 1 point à un alignement :

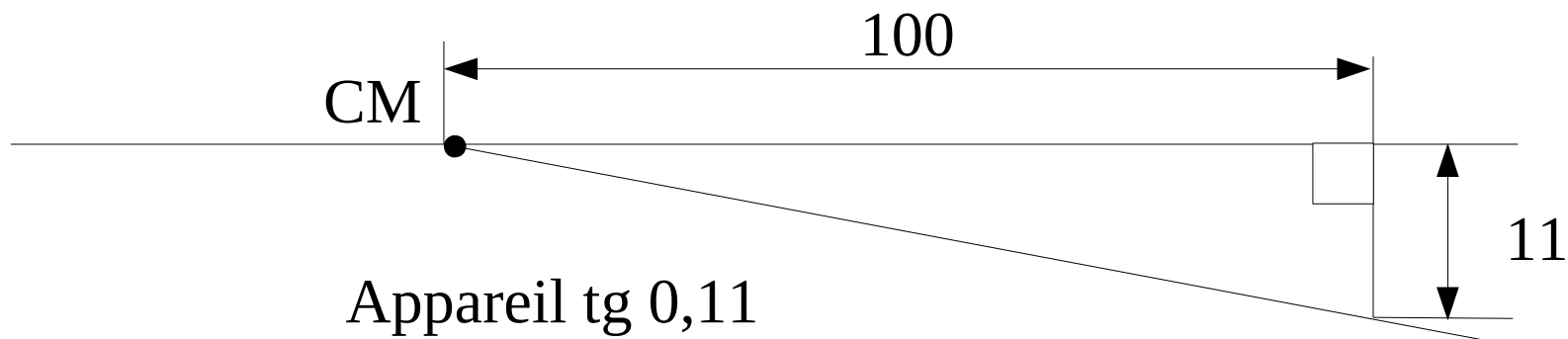
Choisir une distance x et reporter perpendiculairement la valeur y , le cercle de rayon R passe par ce point.



TRACÉ DE VOIE

Le tracé de voie graphique

Ouvrir un appareil de voie :

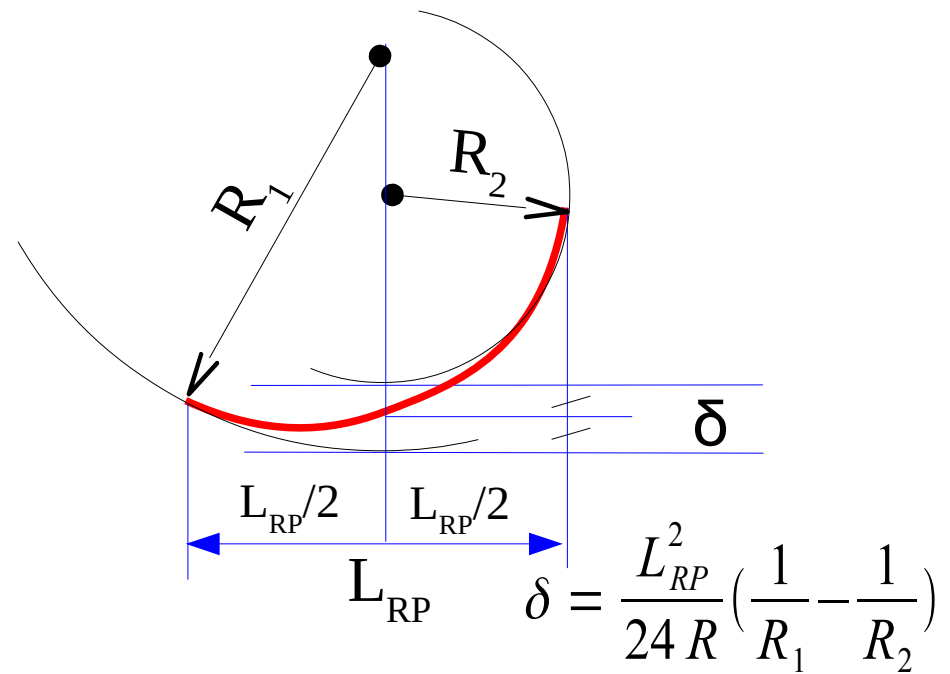
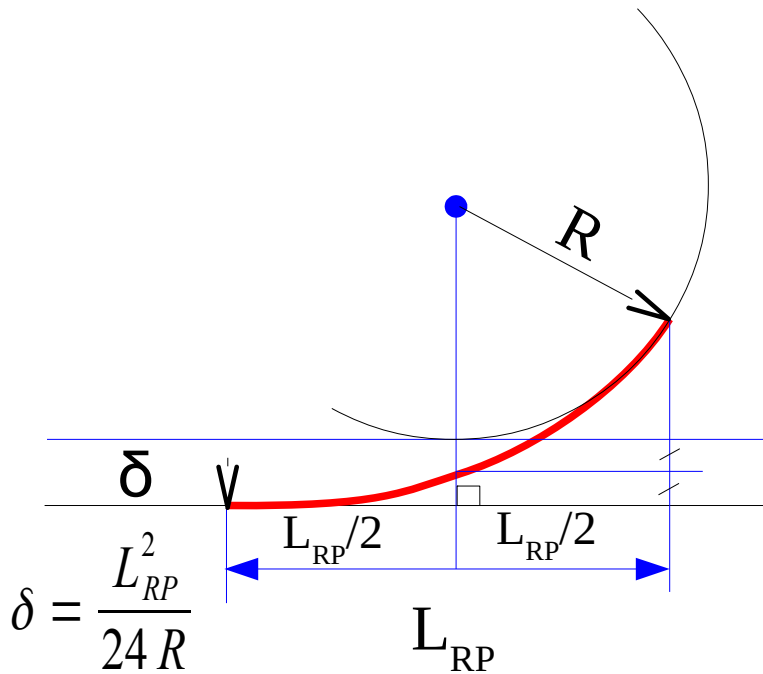


TRACÉ DE VOIE

Le tracé de voie graphique

Tracer un RP :

Au 1/1000^{ème} le décalage est quasiment compris dans l'épaisseur du trait, il suffit de reporter la demi longueur de raccordement de part et d'autre du point de tangence



TRACÉ DE VOIE

FIN

Tout ça pour éviter ça !



TRACÉ DE VOIE

Vous avez dit... Dubout ?



TRACÉ DE VOIE

Pour terminer

La clothoïde...

$$x = S \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{k}{2}\right)^{2n} S^{4n}}{(4n+1)(2n)!} \quad y = \frac{k}{2} S^3 \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{k}{2}\right)^{2n} S^{4n}}{(4n+3)(2n+1)!} \quad k = \frac{1}{S \times R_{(S)}} \quad \delta = \frac{L^2}{24R}$$



TRACÉ DE VOIE

Références

Yves NOBLET

Cadre Équipement de Direction Hors classe honoraire Ingénierie SNCF

2013

Consultant Spécialiste en infrastructures ferroviaires

2010-2012

SNCF Direction Régionale de DIJON – Chef de Projets Pôle Ingénierie

2001-2009

SNCF Direction Régionale de DIJON – Responsable du groupe Études Générales et voie

1997-2001

SNCF Direction Régionale de DIJON – Adjoint Chef de Groupe Études Générales et Voie

1979-1997

SNCF Direction Régionale de DIJON – Projeteur puis Cadre Études Voies et Aménagements

1976-1979

SNCF Direction Régionale de Strasbourg - Dessinateur Études Générales et Voies

