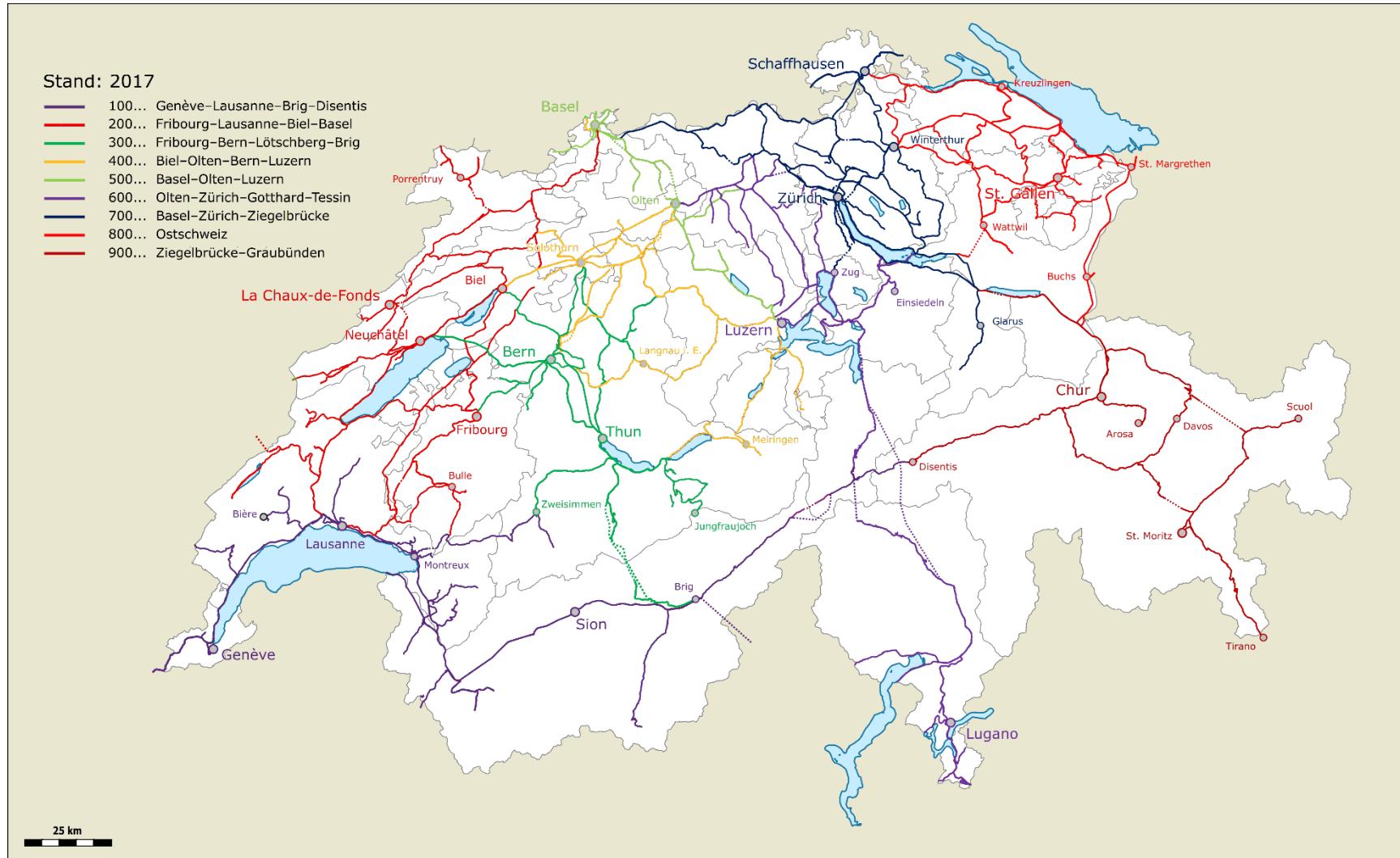


An aerial photograph of a Swiss vineyard during autumn. The fields are terraced and filled with yellow and orange grapevines. A small town with white houses and red roofs is visible in the upper left. In the lower left, a modern high-speed train with white, blue, and grey carriages is traveling along a curved track through the vineyards.

**CIVIL-463.25**

**GEOMETRIE FERROVIAIRE**

# Réseau ferroviaire en Suisse



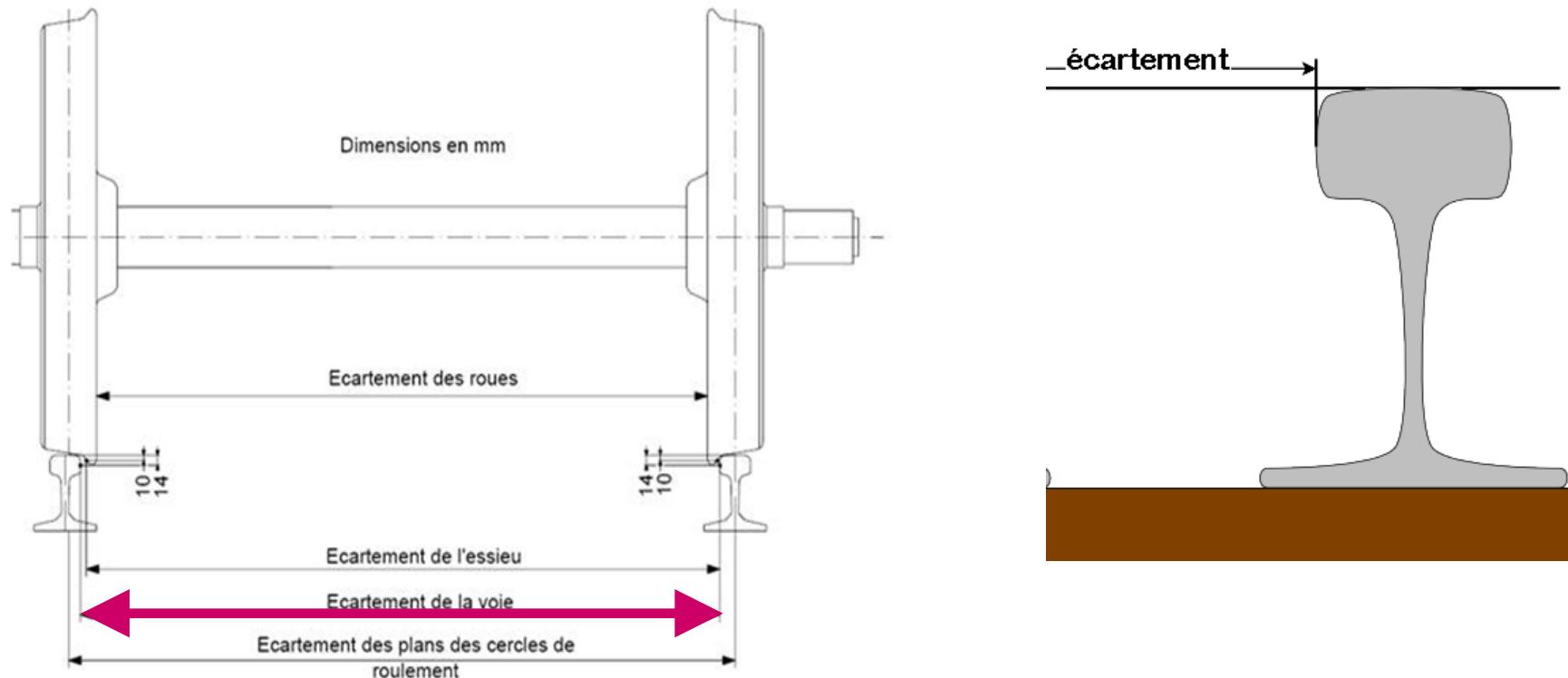
# Législation

- ▶ Chaque pays édicte sa législation
- ▶ Règles communes
  - » Union Internationale des Chemins de fer (UIC)
  - » ERA (European Railway Agency)
  - » Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI/TSI)
- ▶ Pour la Suisse
  - » Office Fédéral des Transports (OFT/BAV)
  - » Dispositions d'Exécution de l'Ordonnance sur les Chemins de Fer (DE-OCF) [Site OFT](#)

# Ecartement de la voie

## ► Paramètre essentiel de la voie ferrée

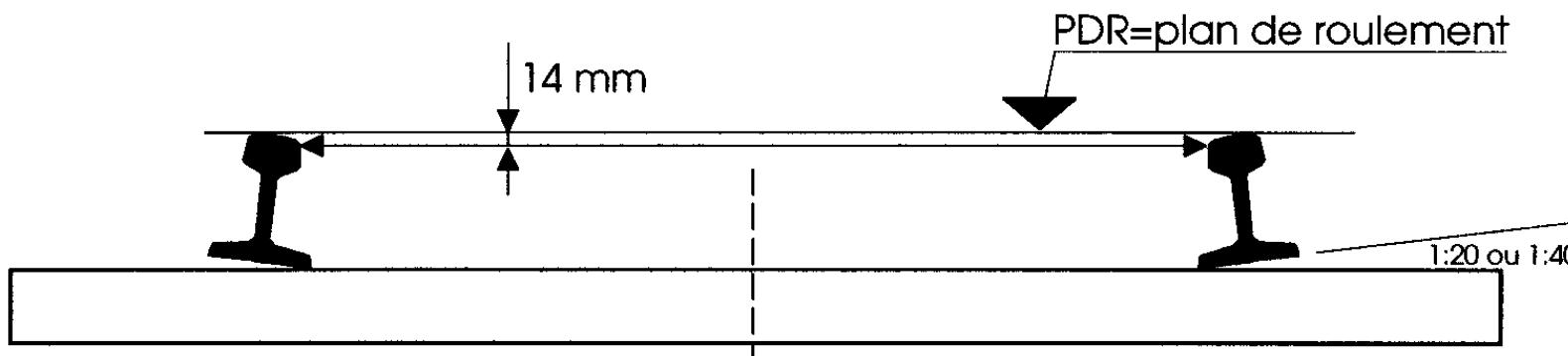
► Distance entre les joues intérieures des deux files de rail à 14 mm en dessous du plan de roulement (PDR)



# Ecartement de la voie

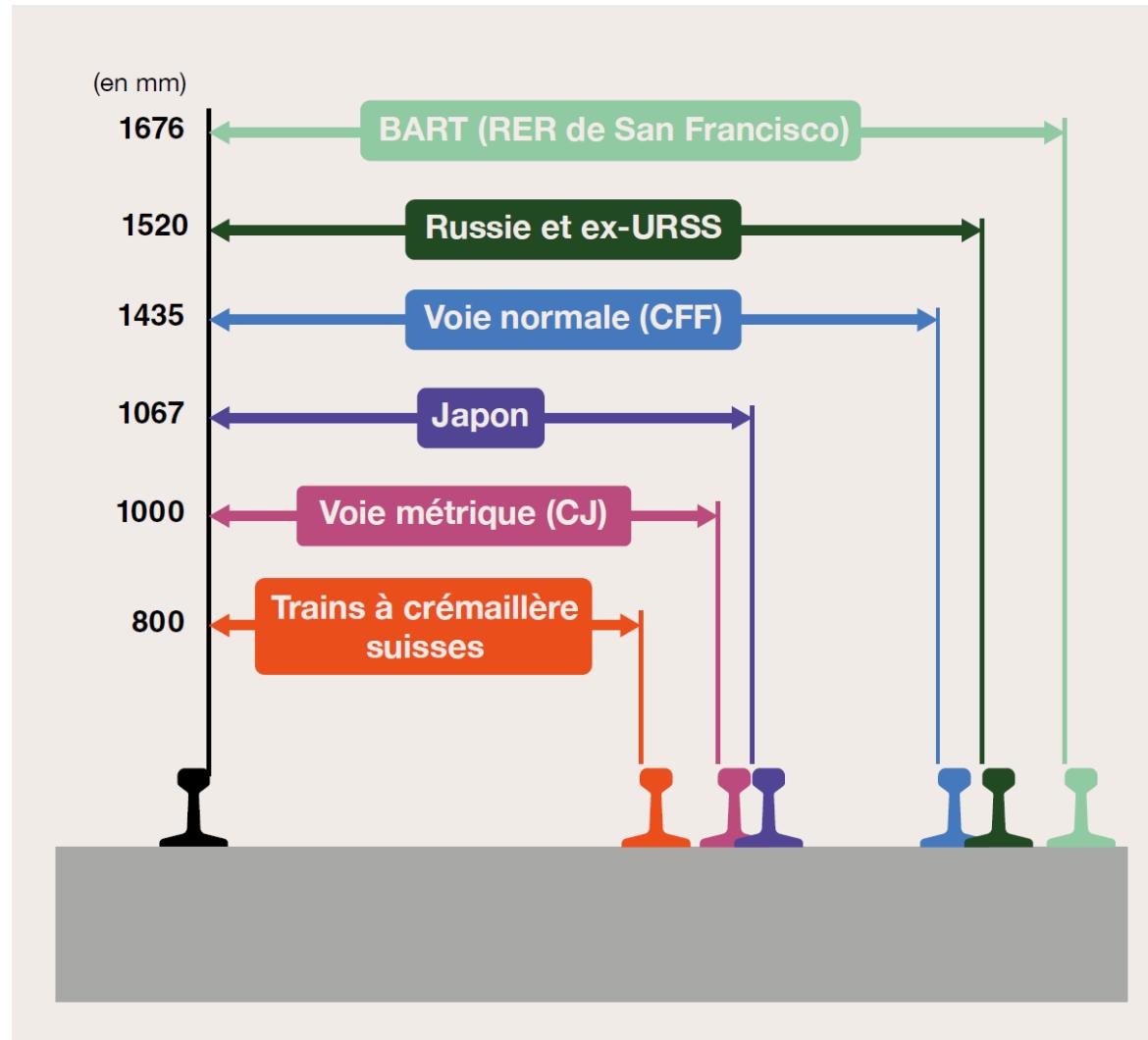


► Appelé UIC ou « *normal* » si  $e = 1'435 \text{ mm (} 4' 8\frac{1}{2}\text{"})$



DE-OCF  
Art.16 - f.1N  
1:40 +/- 1:100  
soit  
 $1,43^\circ +/- 0,58^\circ$

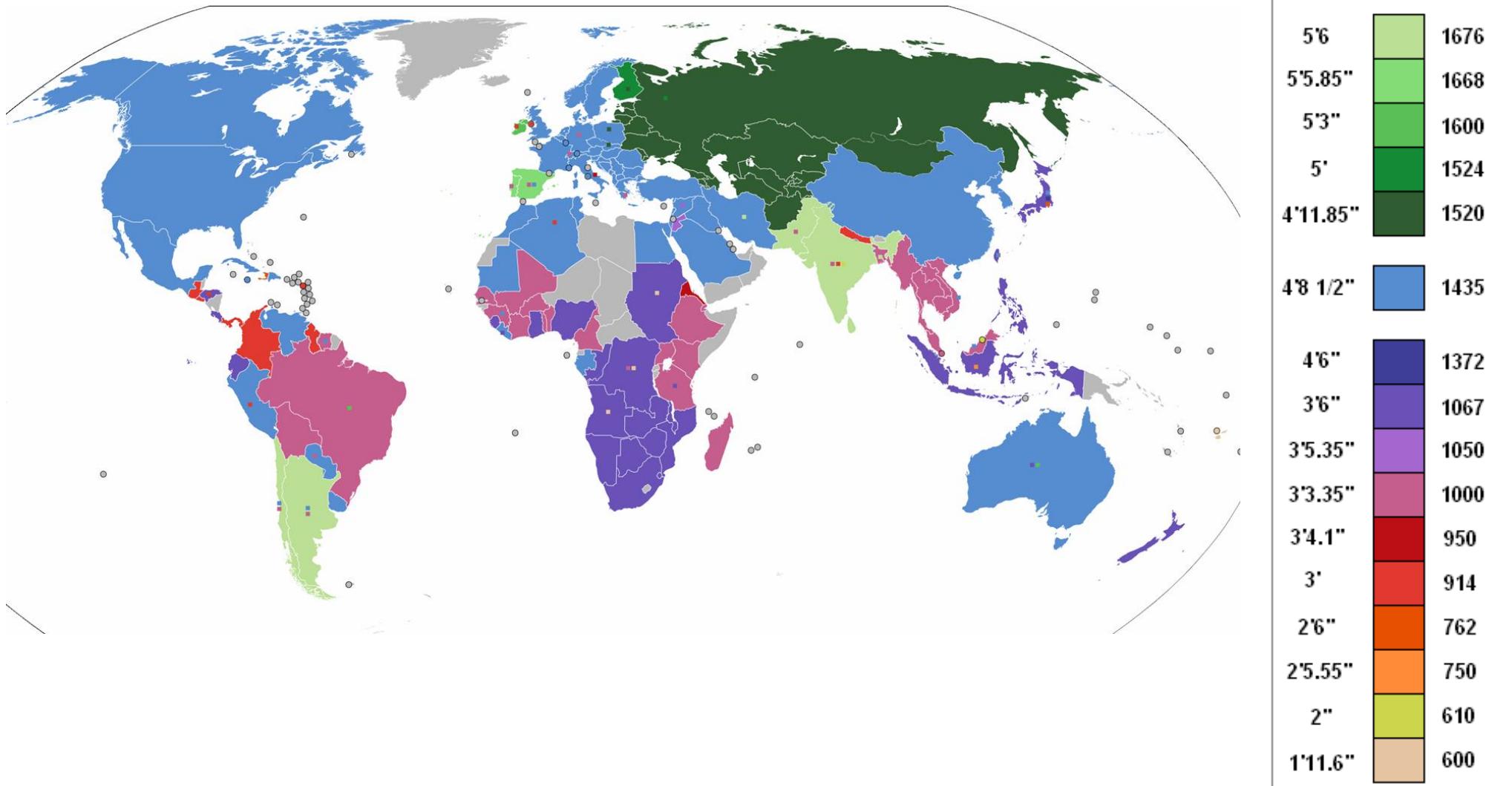
# Diversité des écartements



# Répartition en Suisse

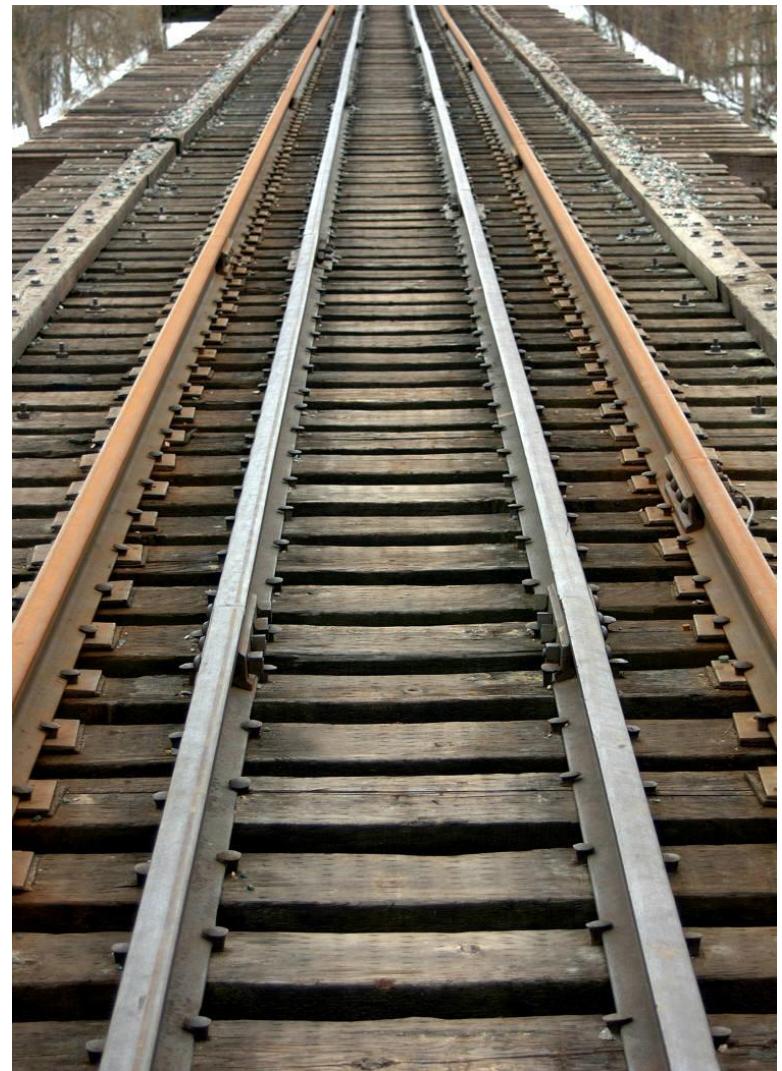
▶ Ecartement normal 1'435 mm	3'681 km
▶ Ecartement 1'200 mm	2 km
▶ Ecartement métrique 1'000 mm	1'312 km
▶ Ecartement 800 mm	55 km
▶ Ecartement 750 mm	13 km

# Écartements ferroviaires dans le monde



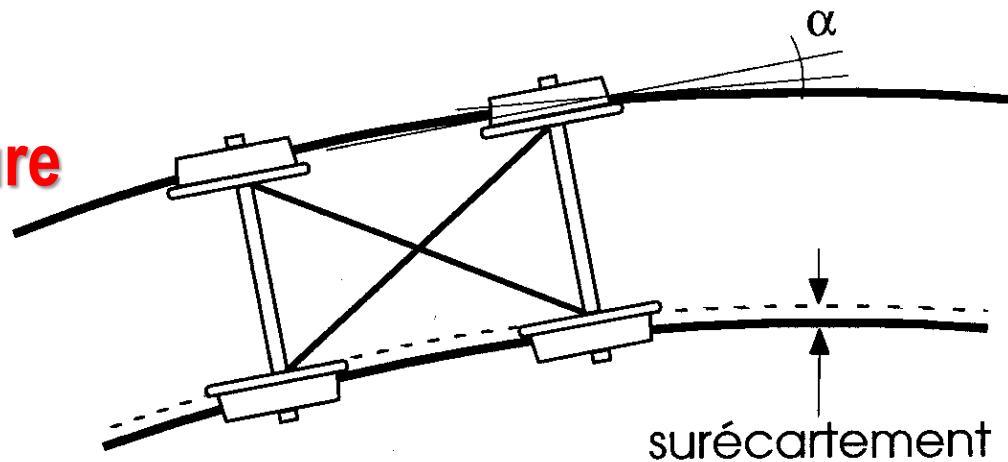
# Voies à double écartement

- ▶ 3 rails
- ▶ 4 rails



# Surécartement dans les courbes de faible rayon

- ▶ Meilleure inscription des véhicules en courbe → bogie rigide
- ▶ Pour les faibles rayons
- ▶ Déplacement de la file **intérieure**



Rayons R en [m] (*) pour les branchements en courbe	Surécartement [mm]
275 (*230) et plus	0
274 (*229) à 185	6 (*5)
184 à 150	10
149 à 130	16 (*15)
129 et moins	20

DE-OCF  
Art.16 - f.1N

# Gabarits ferroviaires

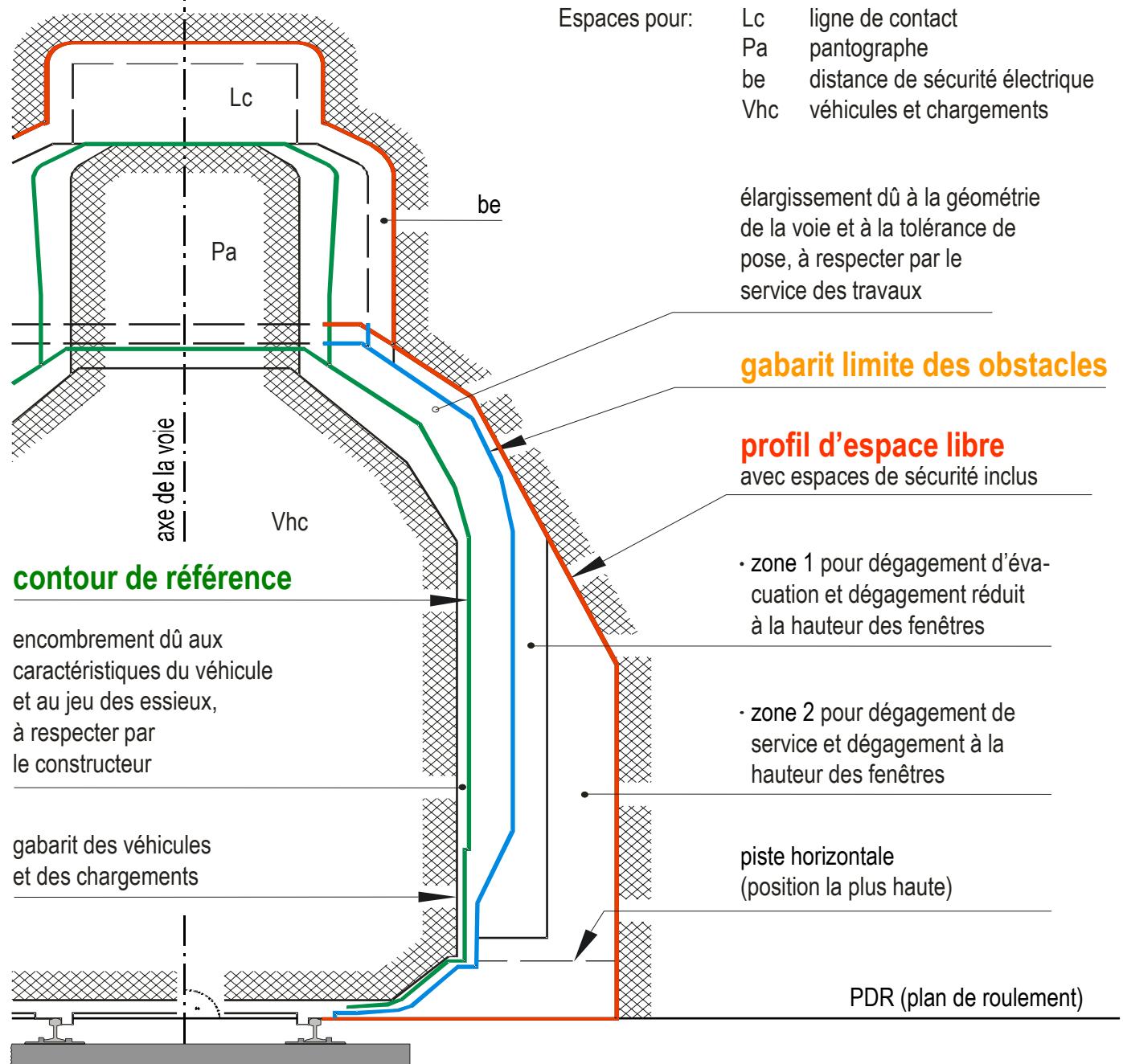
**Les différents gabarits ferroviaires permettent de déterminer**

- » Contour maximal de construction des véhicules
- » Position des obstacles par rapport à la voie

**En Suisse, les Dispositions d'Exécution de l'Ordonnance sur les Chemins de Fer (DE-OCF) fixent 3 gabarits (en anglais : *gauges*)**

- » **Contour de référence**
- » **Gabarit limite des obstacles**
- » **Profil d'espace libre**

# Résumé



# Gabarits utilisés en Suisse

- ▶ 4 gabarits OCF – Ordonnance sur les chemins de fer
- ▶ OCF 1      installations existantes
- ▶ OCF 2      nouvelles lignes et adaptation des installations existantes
- ▶ OCF 3      trafic combiné
- ▶ OCF 4      nouvelles lignes NLFA et grande vitesse ( $\geq 160$  km/h)

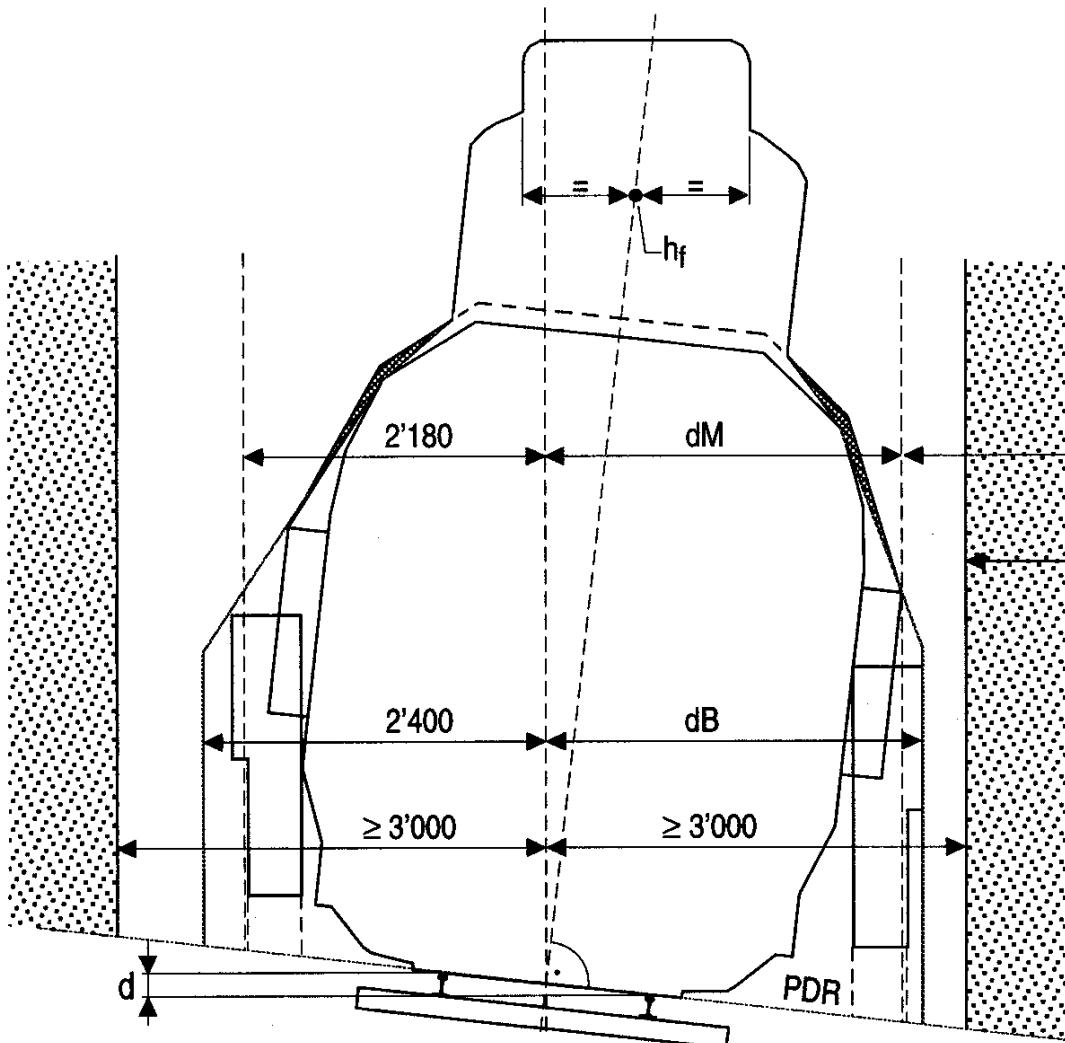
# Pas de standards internationaux

- ▶ Pas d'unité dans les dimensions des gabarits
- ▶ Ils ont tendance à s'agrandir
  - » Charges toujours plus élevées ou encombrantes (ferroutage)
  - » Augmentation des vitesses
  - » Agrandissement dans le coin supérieur
- ▶ Gabarit «Passe-partout international»
  - » Gabarit statique
  - » Vérification des chargements des wagons ouverts

# Pas de standards internationaux

- ▶ **Gabarit de chargement du trafic combiné**
  - » Code internationalement reconnu
  - » Autorisation de circuler sur les différentes lignes

# Surlargeur et dévers en courbe



$h_f$  = position normale du fil de contact

Distance minimale pour mâts dans les gares

Distance minimale pour installations nouvelles  
(espace pour travaux hors du profil d'espace libre)

$R \geq 250$ m	Dévers $d$ [mm]			
	0	50	100	150
$dB$ [mm]	2'500	2'500	2'560	2'650
$dM$ [mm]	2'180	2'300	2'400	2'500

les dimensions pour  $d > 50$  mm ont été définies  
par construction exacte du profil d'espace libre.

# Entraxe des voies

- ▶ **Distance horizontale entre les axes de deux voies contiguës**
  - ▶ Minimum en Europe continentale : tunnel du Gothard avec 3.34 m  
 $(2 \times 1,645 = 3.29)$
- ▶ **Tient compte**
  - ▶ des effets aérodynamiques : entraxe plus élevé pour la grande vitesse
  - ▶ d'espaces de sécurité pour le personnel

# Entraxe des voies – Voie normale CFF

Gares		Pleine voie	
Distance normale (sans quai)	Sans passage inférieur (avec quai)	Doubles voies	Voies multiples
4,50 m	5,20 m	3,60m Voie existante $V \leq 140 \text{ km/h}$  Nouvelles voies 3,80m Pour $V \leq 160 \text{ km/h}$ $R \geq 250, \Delta d \leq 150 \text{ mm}$  4,20m Pour $160 < V \leq 200 \text{ km/h}$	5,20m Avec une piste de service
Exceptionnellement 4,20m			

# Distance entre une route et une voie ferrée

- ▶ Distance entre le bord de la chaussée et l'axe de la voie ferrée la plus proche
- ▶ Autoroutes                            10,00 m
- ▶ Routes principales                6,00 m
- ▶ Autres routes                        4,50 m

# Eléments du tracé

- ▶ Lien très étroit entre
  - » Caractéristiques du tracé en plan et en élévation
  - » Vitesse maximale de circulation des véhicules
- ▶ Vitesse maximale des véhicules limitée
  - » Accélérations sur les convois sur une trajectoire courbe
    - confort (des passagers) / sécurité / usure
  - » Caractéristiques du matériel moteur (puissance, freinage)
- ▶ Un véhicule ferroviaire n'a qu'un degré de liberté !
  - » Appareils de voies pour gérer les dépassements

# Tracé en plan

## ► Alignements

## ► Courbes circulaires

### » Valeurs minimales

- Résistance à l'avancement
- Inscription des véhicules dans la courbe

### » Voie normale – Rayons minimaux

- Voies principales                    200 m
- Voies de manœuvre                150 m

### » Voies en courbes : généralement posées avec un dévers d

## ► Clothoïdes de raccordement

# Paramètres de base

- ▶ **Vitesse maximale de circulation des véhicules**
  - ▶ Accélérations sur des trajectoires courbes : confort, sécurité, usure des rails, etc.
  - ▶ Caractéristiques des locomotives dans les déclivités : puissance, capacité de freinage, etc.
- ▶ **Vitesse de référence VR**
- ▶ **Écartement de la voie**

# Tracé en plan – Alignement

- ▶ Élément de tracé le plus simple à réaliser
- ▶ Le plus favorable à l'exploitation
- ▶ Pas de dévers



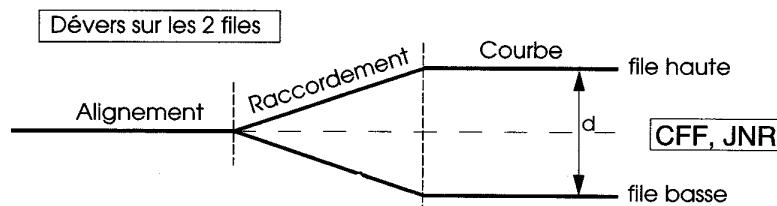
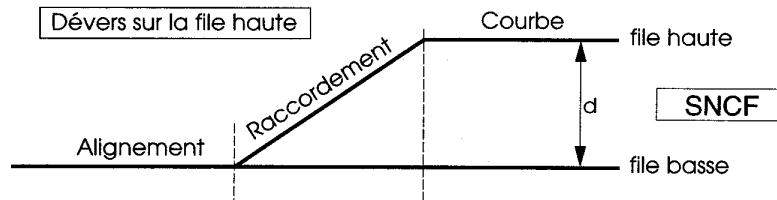
# Dévers en courbe

## ► Objectifs

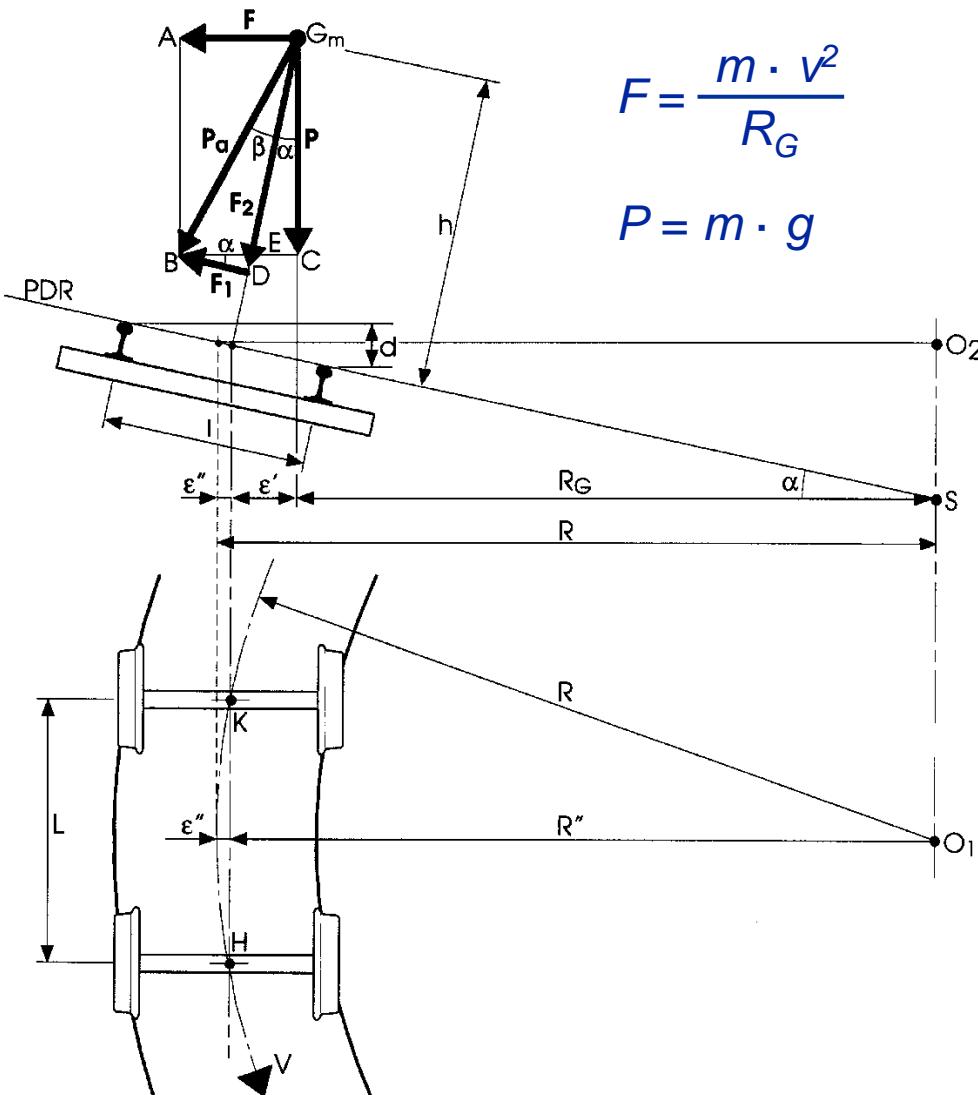
- » Limiter les effets de la force centrifuge sur le confort des voyageurs
- » Protéger les marchandises (stabilité)
- » Limiter l'usure du matériel
- » Voie posée avec un dévers réparti sur les deux files de rails

## ► Ecartement de la voie constant

→ dévers exprimé en valeur absolue (mm)



# Dévers - Forces



$$F = \frac{m \cdot v^2}{R_G}$$

$$P = m \cdot g$$

- ▶  $d$  : dévers (mm)
- ▶  $F_1$  : composante de  $P_a$  dans le plan de la voie

►  $F_1 = m \times a_{nc}$

- ▶  $a_{nc}$  : accélération non compensée par le dévers

$$a_{nc} = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{d}{l}$$

$$d = \frac{l}{g} \left( \frac{v^2}{R} - a_{nc} \right)$$



: constantes

# Dévers – Valeurs maximales

- ▶ Limite du dévers
  - ▶ 160 mm en pleine voie pour voie ballastée et trafic mixte
  - ▶ 170 mm en pleine voie pour voie sans ballast et trafic mixte
  - ▶ 180 mm en pleine voie si seulement trafic de voyageurs
- ▶ Si dévers exceptionnel de 180 mm : déplacement latéral des marchandises, écrasement de la file de rail intérieure à la courbe en cas d'arrêt, instabilité si le c. de gravité du véhicule est élevé
- ▶ Limitation du dévers à 110 mm sur voie, adjacente à un quai de gare, sur laquelle un arrêt des trains est prévu en service régulier

# Accélération latérale non compensée

$$a_{nc} = \frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{d}{l}$$

- ▶  $a_{nc}$  accélération latérale non compensée ( $\text{m/s}^2$ )
- ▶  $V$  vitesse du train ( $\text{m/s}$ )
- ▶  $R$  rayon de la voie ( $\text{m}$ )
- ▶  $g$  accélération terrestre ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
- ▶  $d$  dévers de la voie ( $\text{mm}$ )
- ▶  $I$  distance d'axe en axe des deux files de rail ( $\text{mm}$ )

# Accélération latérale non compensée – Voie normale

$$a_{nc} = \frac{V^2}{13 \cdot R} - \frac{d}{153}$$

- ▶  $a_{nc}$  accélération latérale non compensée ( $\text{m/s}^2$ )
- ▶  $V$  vitesse du train (km/h)
- ▶  $R$  rayon de la voie (m)
- ▶  $d$  dévers de la voie (mm)
- ▶  $e$  écartement = 1'435 mm
- ▶  $I$  1'500 mm

# Dévers théorique $d_0$

- ▶ Dévers pour lequel l'accélération non compensée vaut 0
- ▶ Vitesse d'équilibre  $V_0$

$$\text{▶ } a_{nc} = 0 = \frac{V_0^2}{13 \cdot R} - \frac{d_0}{153}$$

$$\text{▶ } d_0 = 11,8 \cdot \frac{V_0^2}{R}$$

# Insuffisance de dévers

## ► Insuffisance de dévers $\Delta d$

- Partie de l'accélération transversale dans le plan de la voie qui n'est pas compensée par le dévers

$$\Delta_d = d_0 - d$$

$$\Delta_d = 11,8 \cdot \frac{V_0^2}{R} - \left( \frac{11,8 \cdot V_0^2}{R} - 153 \cdot a_{nc} \right)$$

$$\Delta_d = 153 \cdot a_{nc}$$

# Insuffisance de dévers

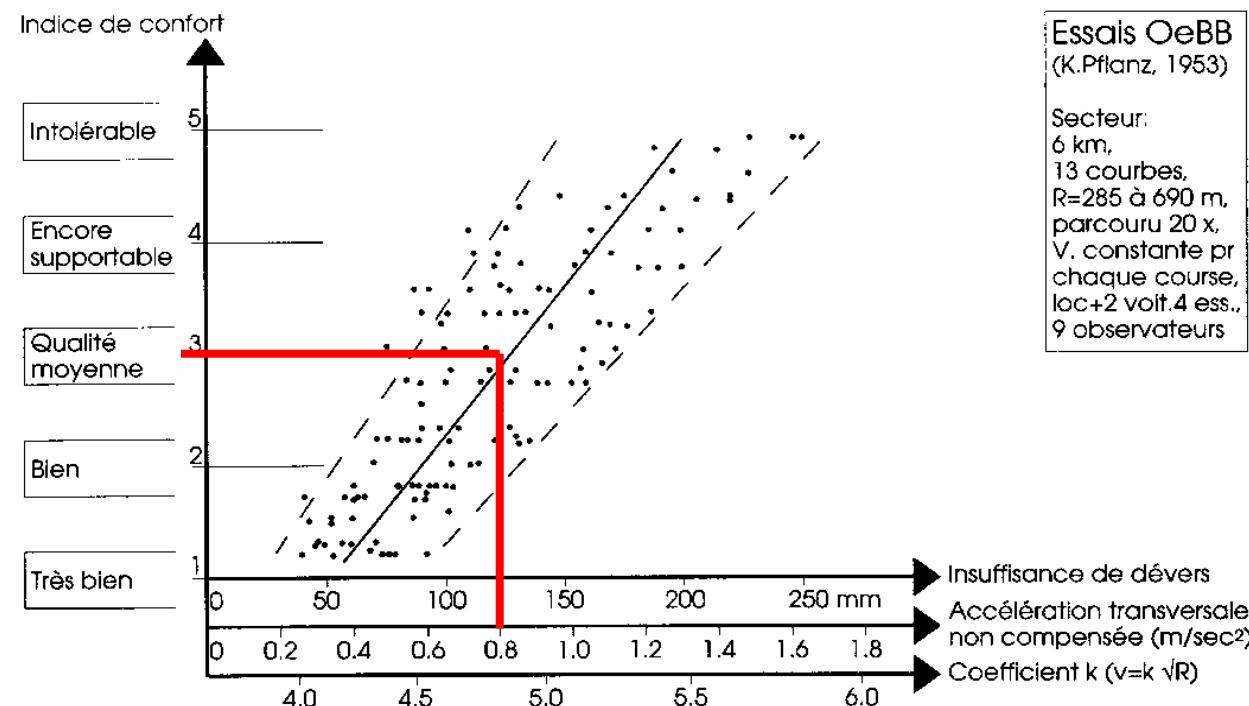
- ▶ Accélération non compensée  $\simeq$  Insuffisance de dévers
- ▶  $a_{nc}$  et  $\Delta d$  sont des notions équivalentes

$$\gg \Delta_d = 153 \cdot a_{nc}$$

- ▶ Valeur acceptable

$$\gg -1 \text{ m/s}^2 \leq a_{nc} \leq 1 \text{ m/s}^2$$

**► 0,8 m/s<sup>2</sup>**



# Insuffisance de dévers

- ▶ Insuffisance de dévers  $\Delta d$
- ▶ Voie normale
  - » Cas normal  $\Delta d = 153 \cdot a_{nc} = 153 \cdot 0,8 = 122 \text{ mm}$
  - » Cas normal  $\Delta d = 153 \cdot a_{nc} = 153 \cdot 0,85 = 130 \text{ mm}$

# Dévers – Valeurs maximales

- ▶ Limite du dévers
  - ▶ 160 mm en pleine voie pour voie ballastée et trafic mixte
  - ▶ 170 mm en pleine voie pour voie sans ballast et trafic mixte
  - ▶ 180 mm en pleine voie si seulement trafic de voyageurs
- ▶ Si dévers exceptionnel de 180 mm : déplacement latéral des marchandises, écrasement de la file de rail intérieure à la courbe en cas d'arrêt, instabilité si le c. de gravité du véhicule est élevé
- ▶ Limitation du dévers à 110 mm sur voie, adjacente à un quai de gare, sur laquelle un arrêt des trains est prévu en service régulier

# Dévers usuels (CFF)

- ▶ Maximum normal      150 mm
- ▶ Exceptionnel            180 mm
- ▶ Voies à quai            100 mm

# Vitesse maximale en courbe

$$v_R = \sqrt{\left(a_{nc} + \frac{d}{153}\right) \cdot 13R} = \sqrt{\frac{(153a_{nc} + d) \cdot 13R}{153}} = \sqrt{\frac{(\Delta d + d) \cdot 13R}{153}}$$

## ► Relation Rayon / Vitesse

- »  $\Delta d = 122 \text{ mm}$
- »  $d = 150 \text{ mm}$

$$V_{R_{\max}} = 4,8 \cdot \sqrt{R}$$

- » Vitesse en km/h et Rayon en m

# Exemple numérique

Rayon fixé à  $R = 300 \text{ m}$

- $V_{max} = 4,8 \cdot \sqrt{300} = 83 \text{ km/h}$
- $d = 6,5 \cdot \frac{83^2}{300} = 150 \text{ mm} = d_{max} \rightarrow \text{OK !}$

Si la vitesse d'exploitation est fixée à 80 km/h, on a :

- $d = 6,5 \cdot \frac{80^2}{300} = 140 \text{ mm}$
- $d_0 = 11,8 \cdot \frac{80^2}{300} = 252 \text{ mm}$
- $\Delta d = 252 - 140 = 112 \text{ mm} < 122 \text{ mm} \rightarrow \text{OK !}$

Autre vérification :  $a_{nc} = \frac{80^2}{13 \cdot 300} - \frac{140}{153} = 0,73 \text{ m/s}^2 < 0,80 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{OK !}$

# Dévers normal

► Les trains ne circulent pas tous à la même vitesse

► 3 situations

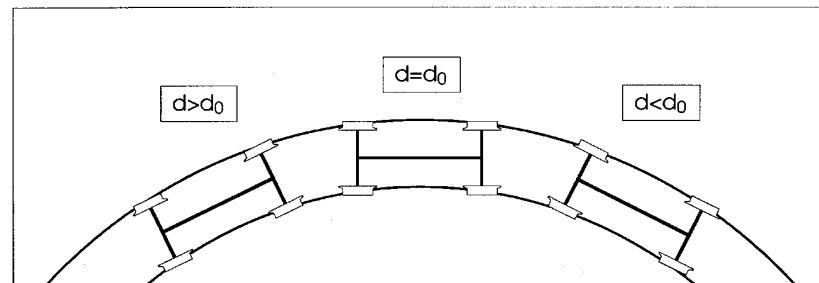
►  $d > d_0$  Excès de dévers

- Problème pour les trains lents et à l'arrêt
- Usure et écrasement du rail intérieur

►  $d = d_0$  Vitesse d'équilibre

►  $d < d_0$  Insuffisance de dévers

- Accélération transversale non compensée
- Usure et écrasement du rail extérieur



# Dévers normal

- ▶ Le dévers maximal n'est pas systématiquement implanté dans toutes les courbes
- ▶ Dévers normal calculé
  - ▶ Pour une courbe donnée et une vitesse donnée
  - ▶ Tenant aussi compte des trains les plus lents
- ▶ Voies CFF avec une vitesse inférieure ou égale à 125 km/h
  - ▶  $d = 6,5 \cdot \frac{V_R^2}{R}$

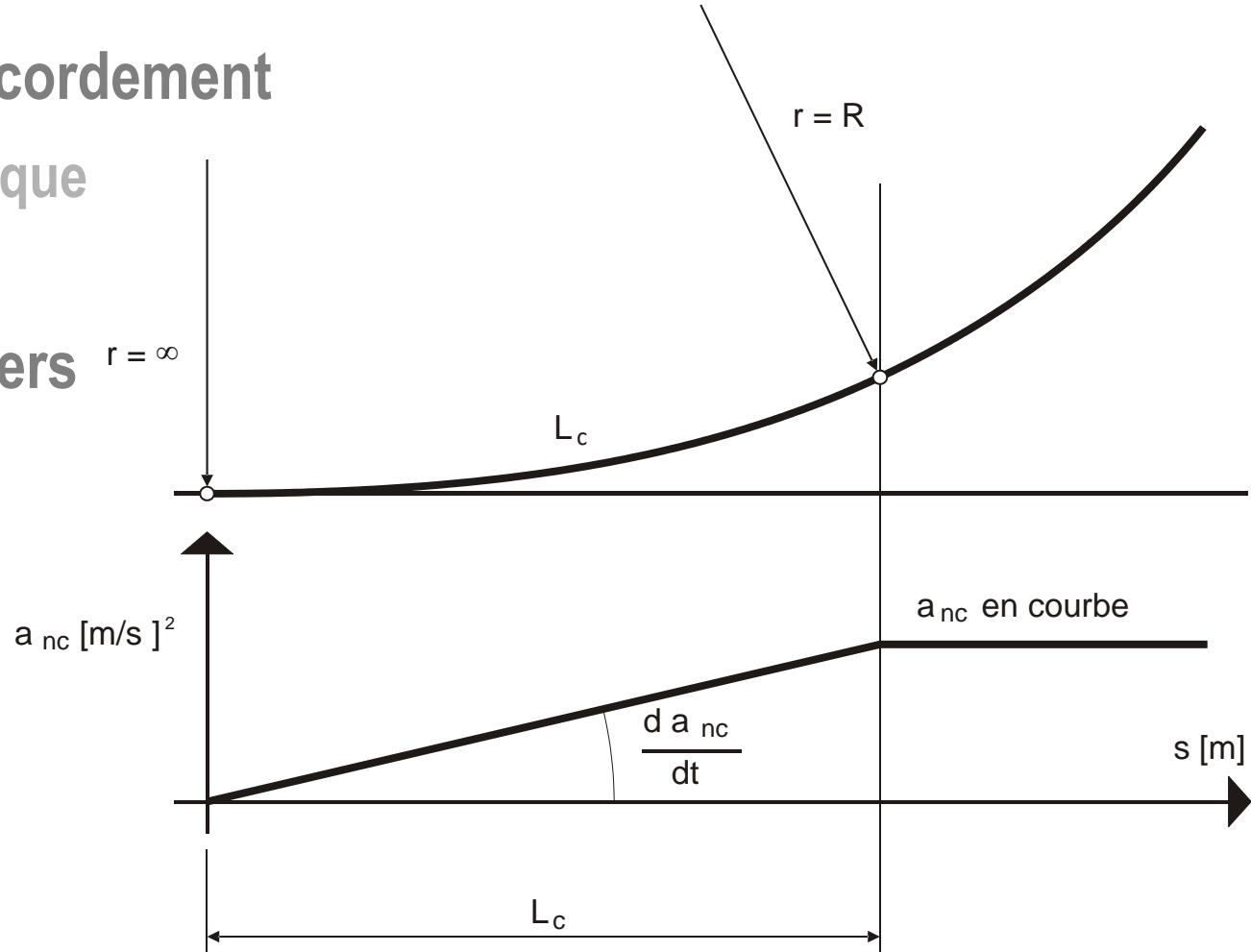
# Courbes de raccordement / Rampes de dévers

## ► Transition progressive entre éléments (sans chocs)

### ► Courbes de raccordement

- Parabole cubique
- Clothoïde

### ► Rampes de dévers



# Longueur de la courbe de raccordement $L_c$

- ▶ Limiter la variation de l'accélération transversale non compensée

$a_{nc}$

- ▶ Notion de confort

$$L_c \geq \frac{a_{nc}}{\frac{da_{nc}}{dt} \text{ admissible}} \times V$$

La vitesse V reste constante

Valeur admissible :  $da_{nc} / dt = 0,236 \text{ mm/s}^3$

- ▶ Ecartement fixe → accélération non compensée directement proportionnelle à l'insuffisance de dévers  $\Delta d$

$$L_c \geq \frac{d\Delta d}{\frac{d\Delta d}{dt} \text{ admissible}} \times V$$

Valeur admissible :  $d\Delta d / dt = 36 \text{ mm/s}$

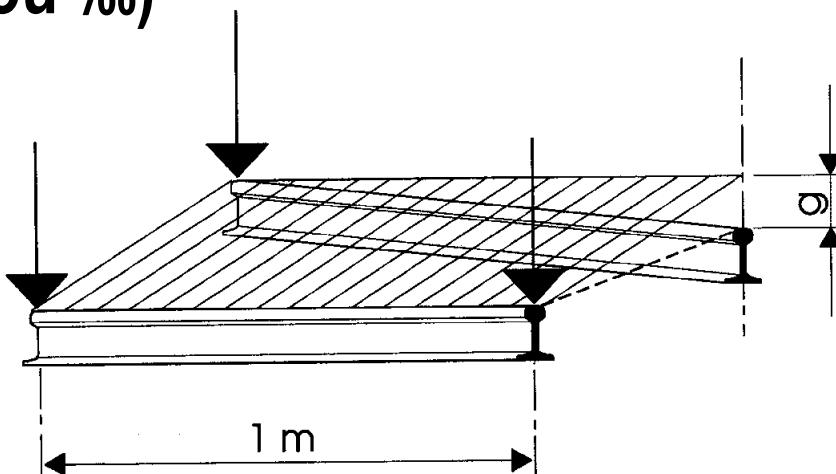
# Longueur de la rampe de dévers $L_d$

- ▶ Éviter les inégalités de répartition de la charge sur les rails
- ▶ Sécurité contre le déraillement
- ▶ Notion de gauche
  - ▶ Différence de dévers par unité de longueur de voie
- ▶ Gauche de la voie (exprimé en mm/m ou %)

$$L_d \geq \frac{d}{g_{admissible}}$$

$$L_d \geq \frac{d}{\frac{dd}{dt} \text{admissible}} \times V$$

Valeur admissible :  
 $\frac{dd}{dt} = 44 \text{ mm/s}$



# Exemple numérique

Avec les valeurs de l'exemple initialement traité :

$$V = 80 \text{ km/h} = 22,2 \text{ m/s} \quad d = 140 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 112 \text{ mm} \quad a_{nc} = 0,73 \text{ m/s}^2$$

4 valeurs différentes de calcul :

Variation de  $a_{nc}$        $L_c = \frac{0,73}{0,236} \cdot 22,2 = 68,7 \text{ m}$

Variation de  $\Delta d$        $L_c = \frac{112}{36} \cdot 22,2 = 69,1 \text{ m}$

Gauche  $g$        $L_d = \frac{140}{2} = 70 \text{ m}$

Variation de  $d$        $L_d = \frac{140}{44} \cdot 22,2 = 70,6 \text{ m}$

→ Choix de  $L_c = L_d = 71 \text{ m}$

Paramètre de la clohoïde :       $A^2 = L \cdot R = 71 \cdot 300 \rightarrow A = 145,95 \text{ m}$

# Courbes en S

► Exemple : zone d'appareils de voie

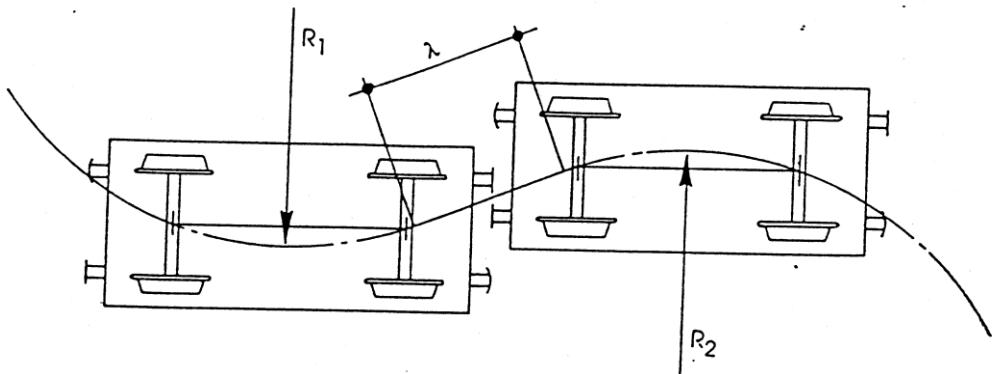
► Vérifier

► Recouvrement suffisant des tampons

► Choc reste dans des limites supportables

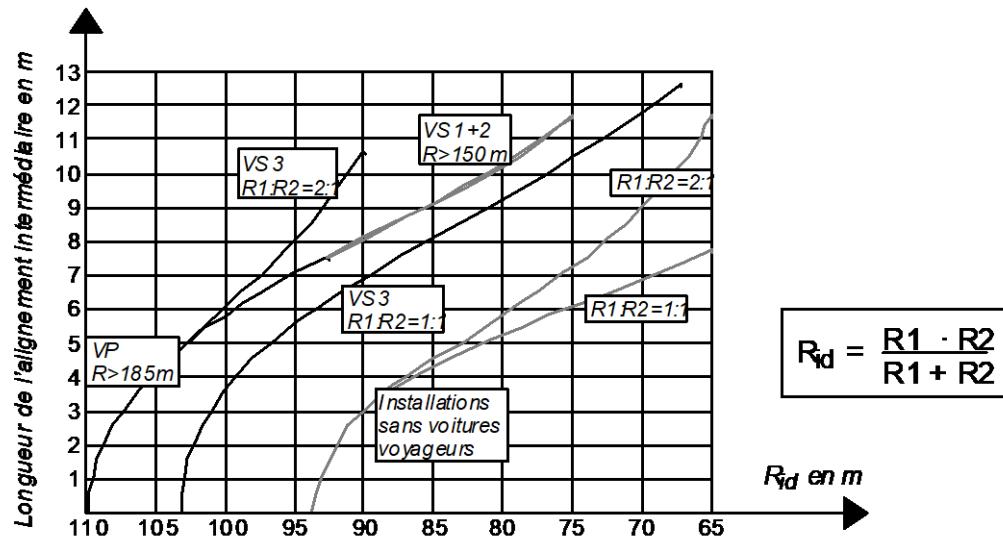
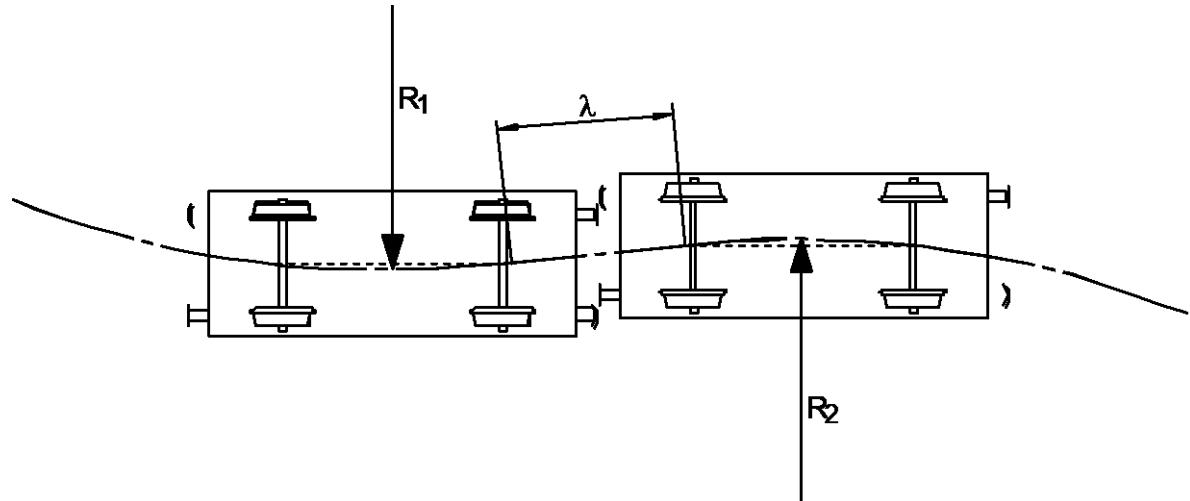
► Solution

► Insérer un alignement intermédiaire de longueur  $\lambda$  entre les deux courbes de sens contraires



# Alignment intermédiaire entre deux courbes

Prévoir un alignement  
intermédiaire de  
longueur  $\lambda$  si  $R_{id} \leq 110$



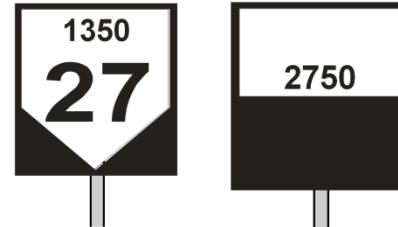
# Profil en long

## ► Déclivités ( $i \geq 1 \text{ à } 2 \%$ )

► Rampes montées

► Pentes descendentes

► Paliers zones horizontales ( $i \leq 2 \%$ )



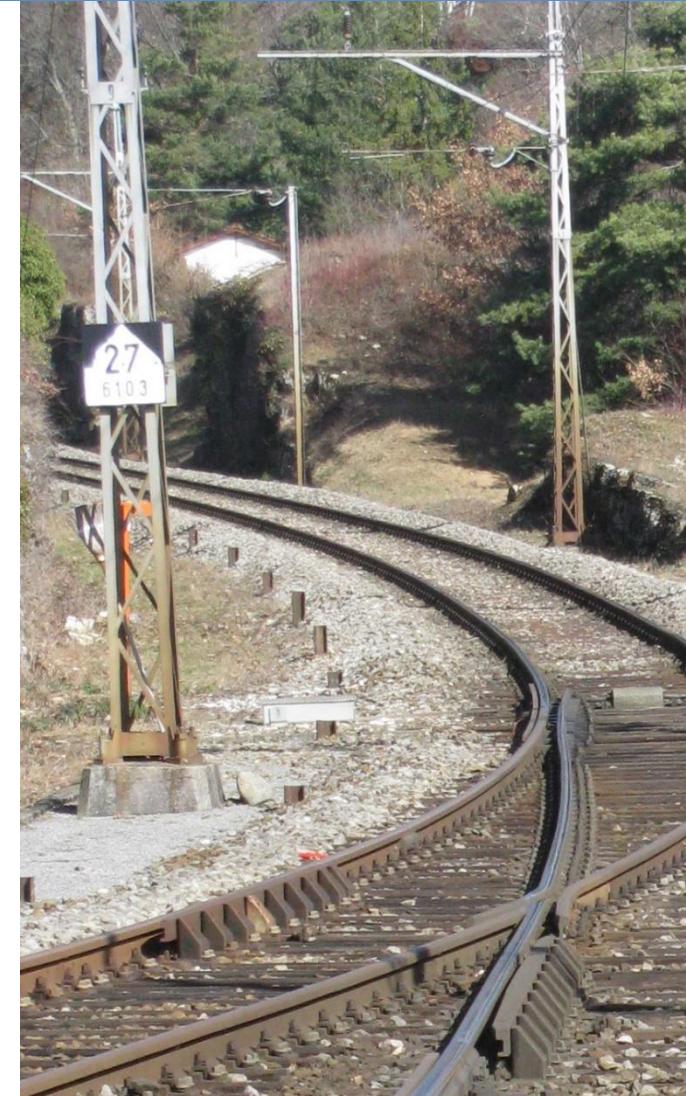
## ► Limitation des déclivités

► Adhérence (frottement acier / acier)

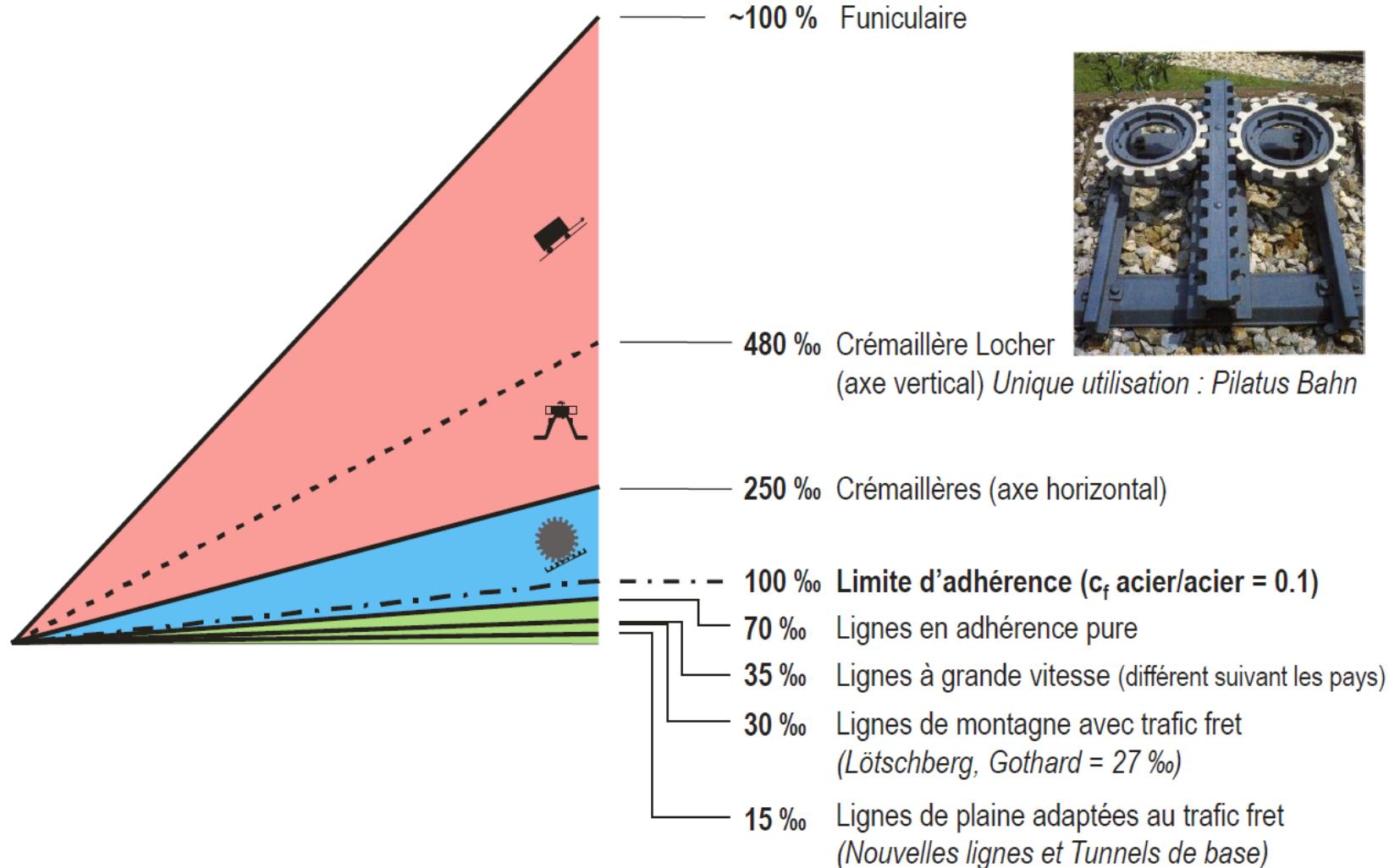
► Mode de traction

► Résistances des attelages

## ► Fortes déclivités : crémaillère / funiculaire



# Déclivités maximales



# Rampes

## ► Lignes existantes

- » Gothard                            26-28 %<sub>o</sub>
- » TGV Paris-Lyon                    35 %<sub>o</sub>

## ► Nouvelles lignes : valeurs maximales (Suisse)

- » Maximum légal                    70 %<sub>o</sub> (nouvelles lignes)
- » Limite normale                    40 %<sub>o</sub>

## ► Valeurs maximales recommandées

- » Lignes voyageurs                35 %<sub>o</sub>
- » Lignes fret                        13 %<sub>o</sub>

# Vitesse maximale en pente

- ▶ Dépend du
  - » Type de frein
  - » Rapport de freinage (poids frein / poids total du train)
    - Déterminant pour les trains marchandises

# Vitesse maximale en pente

## ► Suisse

Déclivités en %o	Cat. N	Vitesse maximale en km/h (en site propre)				
		Catégorie R		Catégorie A		
		Tronçons déterminés	Frein- voyageur	Frein- voyageur	Frein- marchand.	Frein à main
Rampes et paliers	200	160	125	120	80	40
Pentes :						
0      jusqu'à 10		160	125	120	80	40
plus de 10 ...13		160	120	115	80	40
plus de 13 ...16		160	115	110	80	40
plus de 16 ...19		160	110	105	80	40
plus de 19 ...22		160	105	100	80	40
plus de 22 ...25		155	100	95	75	40
plus de 25 ...28		150	95	90	70	40
plus de 28 ...31		145	90	85	65	35
plus de 31 ...34		140	85	80	60	35
plus de 34 ...37		140	80	75	55	30
plus de 37 ...40		135	75	70	50	30
plus de 40 ...43		130	70	65	45	25
plus de 43 ...46		130	65	60	45	25
plus de 46 ...50		125	60	55	40	20

© DE-OCF

# Courbes de raccordement vertical

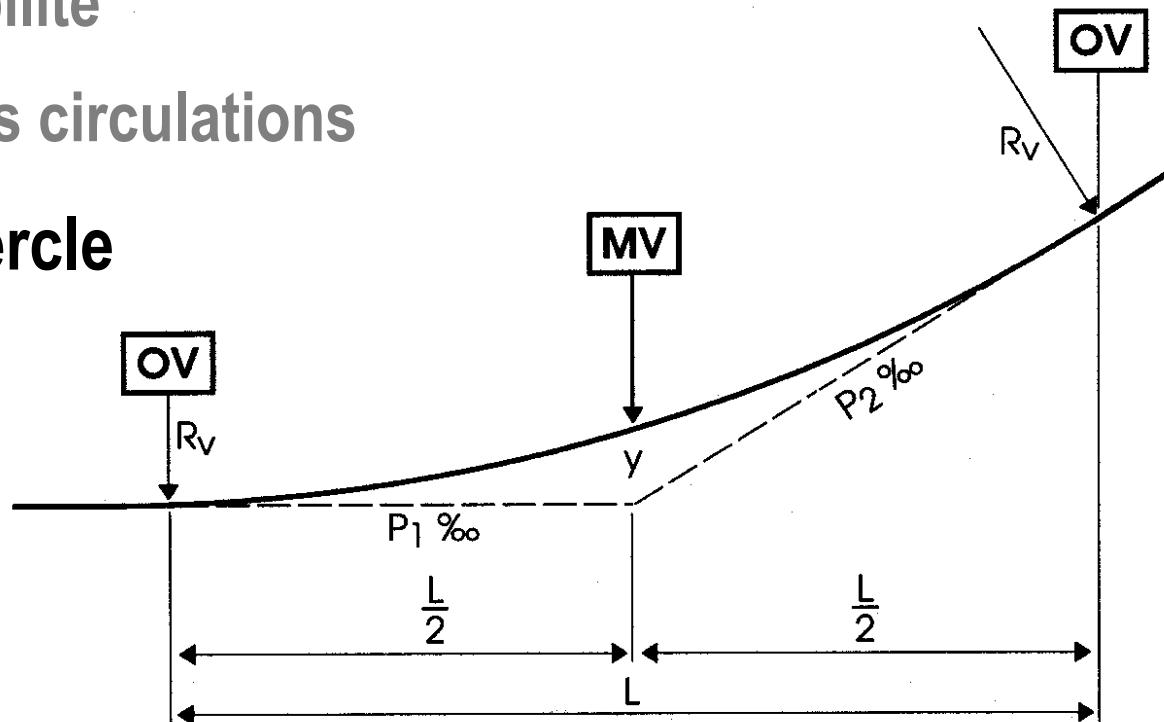
## ► Contrairement à la route

- Pas de problème de visibilité
- Dépend de la sécurité des circulations

## ► Raccordement = arc de cercle

## ► Remarques

- À éviter dans les rampes de dévers
- Bosses des triages selon prescriptions spéciales



# Raccordement vertical

- Rayon convexe

- Normal

$$R_V = \frac{V_R^2}{2,5}$$

► Minimum de 3'000 m

- exceptionnel

$$R_V = \frac{V_R^2}{4}$$

- Rayon concave

- Normal

$$R_V = \frac{V_R^2}{4}$$

► Minimum de 2'000 m

- exceptionnel

$$R_V = \frac{V_R^2}{6}$$

# Législation à considérer

- ▶ Différente pour chaque pays
  - » Pas détaillé dans ce cours
  - » Bien se renseigner avant chaque projet
- ▶ De manière générale
  - » Mise à l'enquête publique nécessaire
  - » Installations sont d'utilité publique
  - » En Suisse
    - Auprès de l'OFT
    - Procédure d'approbation des plans **PAP**

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION

