



CIVIL-463.28

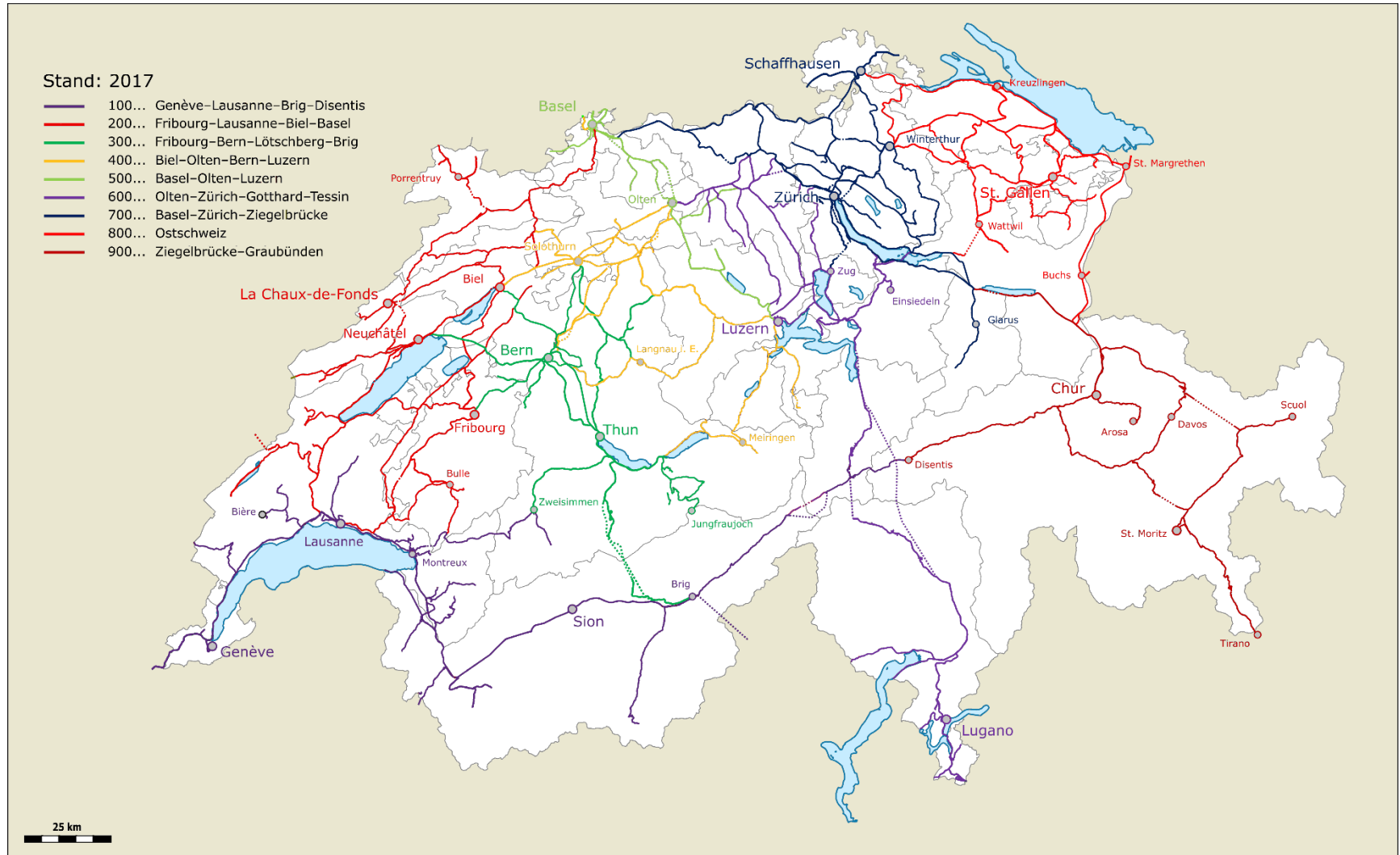
**SUPERSTRUCTURE DE LA
VOIE FERREE**

**Base : Chapitre 17
du TGC 25**

Organisation de la thématique

- ▶ **Réseau ferroviaire en Suisse**
 - ▶ Classement des voies
- ▶ **Composantes de la voie ferrée**
 - ▶ Rails
 - ▶ Traverses
 - ▶ Ballast
 - ▶ Voies sans ballast
- ▶ **Dimensionnement de la voie ferrée**

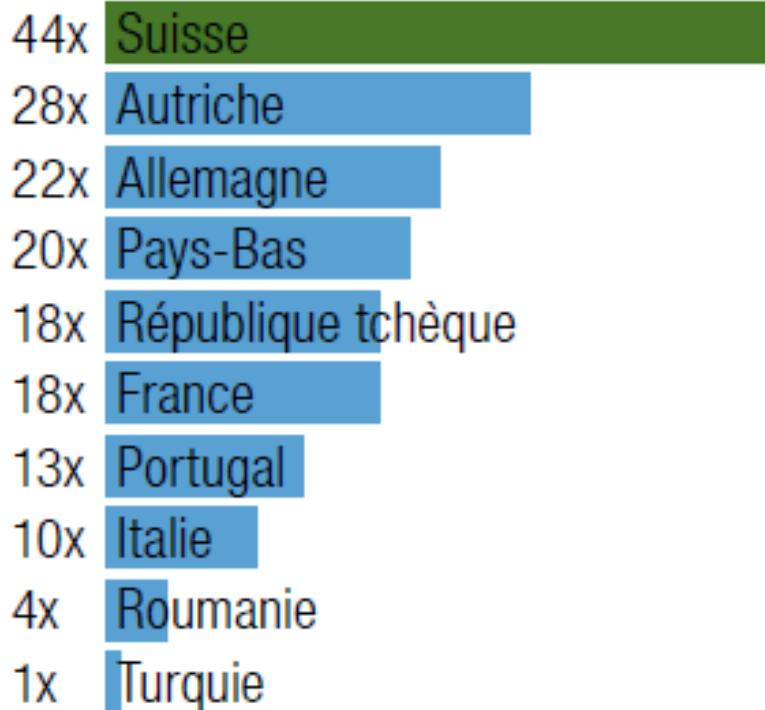
Réseau ferroviaire en Suisse



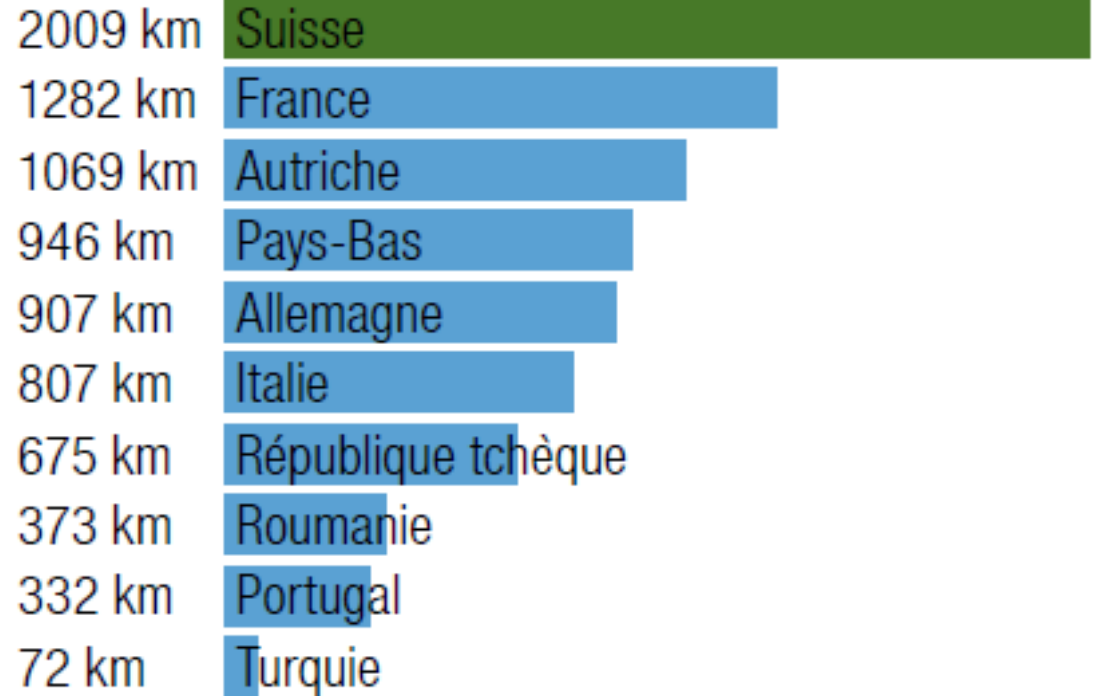
Réseau ferroviaire en Suisse

► Forte utilisation du train

Nombre annuel de voyages



Distance annuelle moyenne

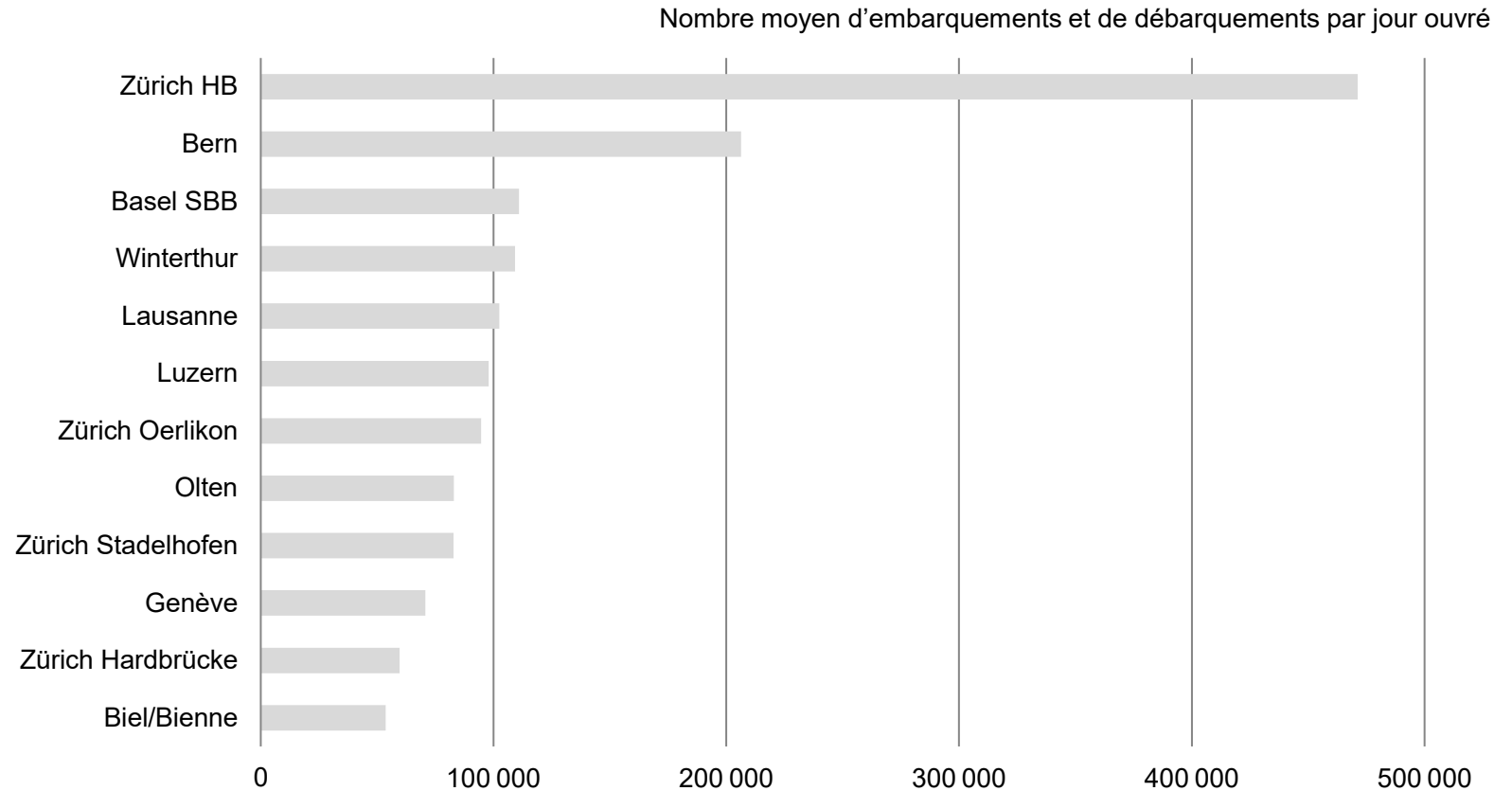


Forte utilisation du train

- ▶ **En moyenne 93 trains / jour / Km**
 - ▶ CFF : 159 trains / jour / Km
- ▶ **Zurich HB 2'050 trains / jour**
 - ▶ Chaque 42 secondes
- ▶ **Berne HB 1'050 trains / jour**
- ▶ **Valeurs 2018**
 - ▶ 20'590 mios de passagers × km 16 %
 - ▶ 10'300 mios de tonnes × km 37 %

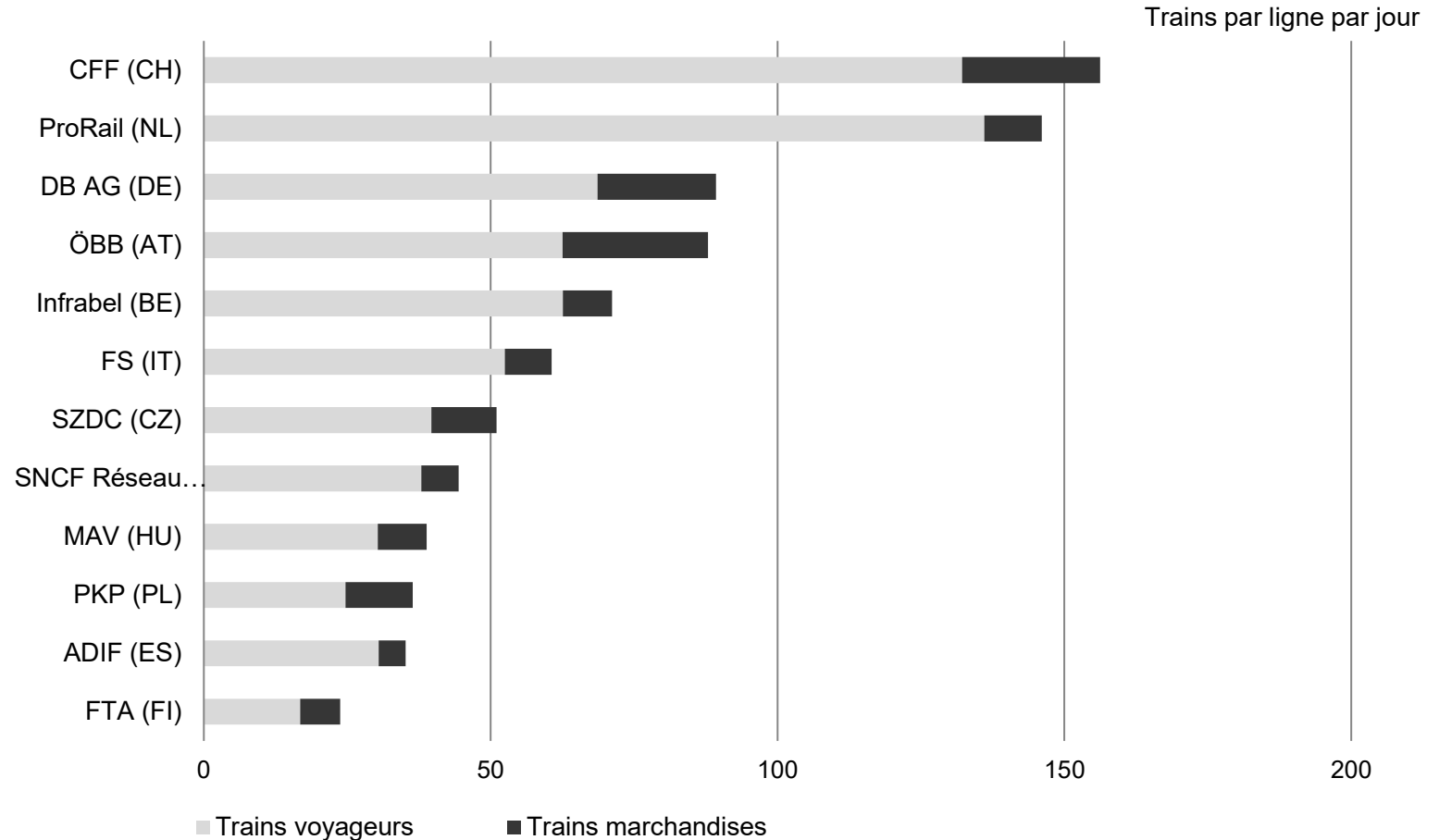
Affluence des voyageurs dans les gares

► 2018



Utilisation de l'infrastructure ferroviaire

► Europe - 2019



Classement des voies

TGC 25, chapitre 17.3.1

▶ Réseau CFF classé selon ...

- ▶ Charges

- ▶ Importance du tronçon

- ▶ Nature du trafic

- ▶ Vitesse de circulation des convois

▶ 2 types de voies

- ▶ Voies principales (VP) : voies de circulation des trains

- ▶ Voies secondaires (VS) : voies de gare (voies de garage, manœuvre et formation)

Classement des voies

► Catégories de voies

Catégorie de voie	Principaux critères de classement
VP 1	Voies directes entre les gares : $TBC \geq 30\,000$ tonnes ou $V \geq 140$ km/h
VP 2	Voies directes entre les gares : $15\,000 \text{ tonnes} \leq TBC \leq 30\,000$ tonnes
VP 3	Voies directes entre les gares : $TBC \leq 15\,000$ tonnes
VP 4	Voies de gare : $V \geq 60$ km/h
VP 5	Voies de gare : $TBC \geq 30\,000$ tonnes ou $V \leq 60$ km/h
VS	Voies de gare : pas de circulation des trains

TBC Tonnes Brutes Complètes (charge journalière)

Classement des voies

► Groupes de voies

Groupe de voies	Catégories des voies
Groupe 1	VP1 ainsi que VP4, si elles sont sollicitées comme VP1
Groupe 2	VP2, VP3, autre VP4, VP5 ainsi que VS avec une charge ≥ 5000 TBC/jour
Groupe 3	VS

TBC Tonnes Brutes Complètes (charge journalière)

Exemple de classement d'une voie

▶ Le Locle – Crêt-du-Locle - Valeurs 2016

▶ Voie unique à 100 km/h

Catégories de train	Heure de...	LOCLE - CRET-DU-LOCLE			CRET-DU-LOCLE - LOCLE		
		Nombre de trains	Tonnage brut (t)	Sillons-km	Nombre de trains	Tonnage brut (t)	Sillons-km
Train de marchandises direct	Jour	224	105510	821.408	224	61983	821.408
Train de marchandises direct	Nuit	0	0	0	0	0	0
Intercity/Eurocity	Jour	0	0	0	0	0	0
Intercity/Eurocity	Nuit	0	0	0	0	0	0
Train de matériel vide du trafic voyageurs	Jour	28	3843	102.676	6	1529	22.002
Train de matériel vide du trafic voyageurs	Nuit	741	95956	2717.247	723	121390	2651.241
Train de locs	Jour	5	1000	18.335	9	1768	33.003
Train de locs	Nuit	3	600	11.001	1	200	3.667
RegioExpress	Jour	5'821	925964	21345.607	5'803	891086	21279.601
RegioExpress	Nuit	1'047	137546	3839.349	1'089	146077	3993.363
Train régional	Jour	7'032	1024741	25786.344	7'061	1037735	25892.687
Train régional	Nuit	1'245	169001	4565.415	1'226	157621	4495.742
RER	Jour	97	8781	355.699	98	8918	359.366
RER	Nuit	14	1470	51.338	14	1470	51.338
Train direct/Interregio	Jour	0	0	0	1	310	3.667
Train direct/Interregio	Nuit	1	310	3.667	3	646	11.001
Train de tracteurs	Jour	1	300	3.667	1	300	3.667
Train de tracteurs	Nuit	0	0	0	0	0	0
Total		16'259	2'475'022	59'622	16'259	2'431'033	59'622

LOCLE - CRET-DU-LOCLE - LOCLE		
Nombre de trains	Tonnage brut (t)	Sillons-km
448	167493	1642.816
0	0	0
0	0	0
0	0	0
34	5372	124.678
1'464	217346	5368.488
14	2768	51.338
4	800	14.668
11'624	1817050	42625.208
2'136	283623	7832.712
14'093	2062476	51679.031
2'471	326622	9061.157
195	17699	715.065
28	2940	102.676
1	310	3.667
4	956	14.668
2	600	7.334
0	0	0
32'518	4'906'055	119'244

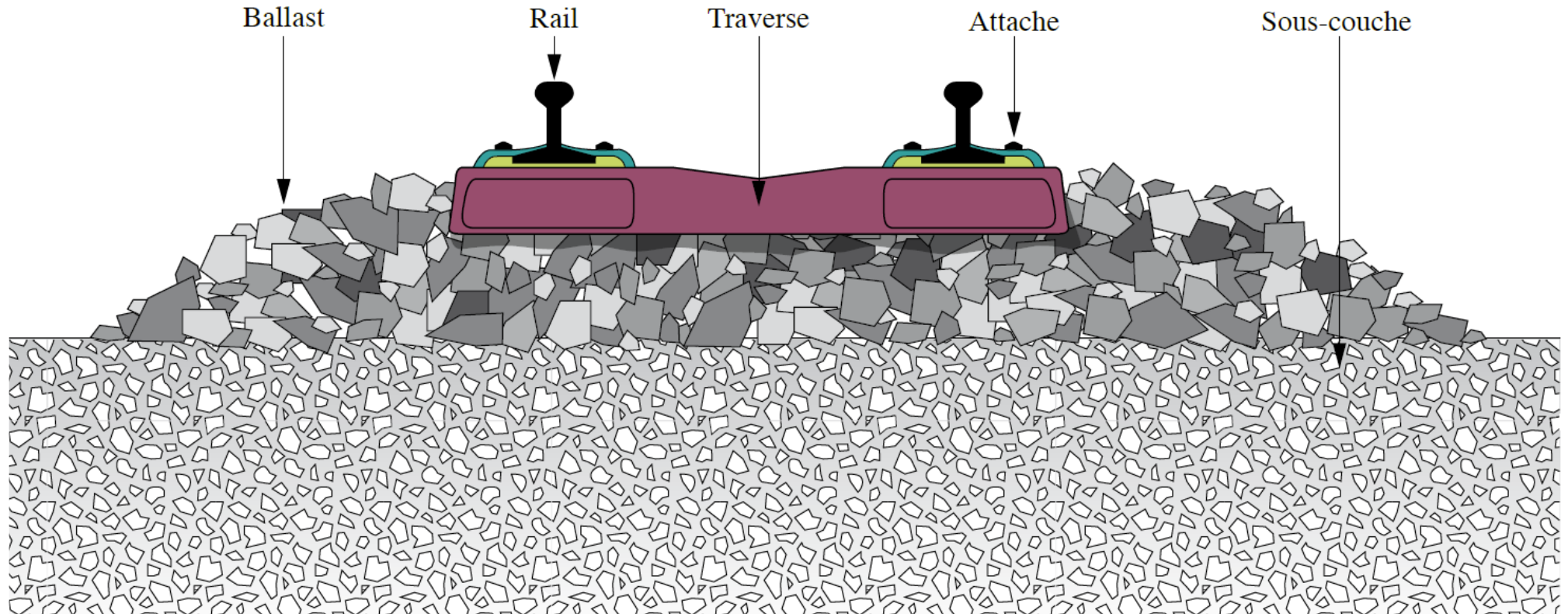
▶ **13'440 TBC/j**

VP3

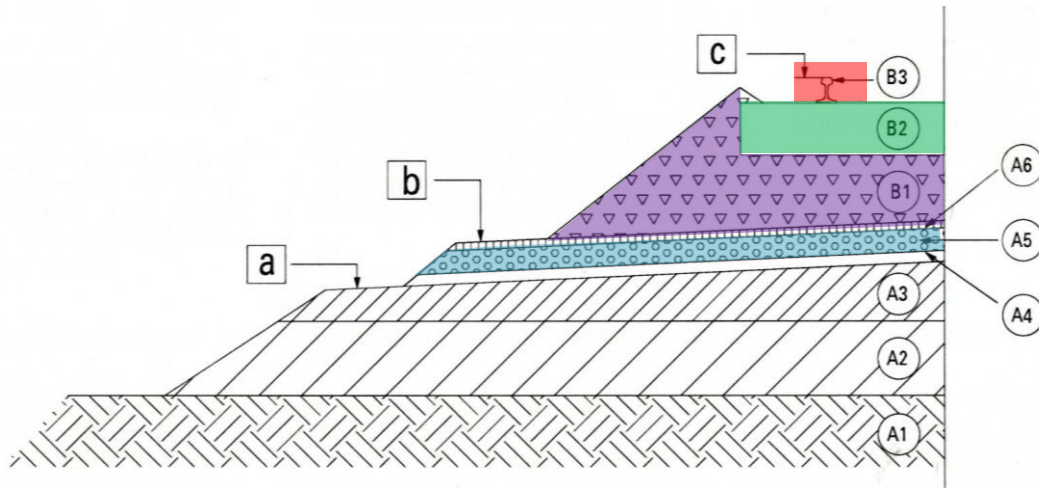
Superstructure d'une voie ferrée ballastée



Superstructure d'une voie ferrée ballastée



Terminologie de la voie ferrée



	Couches ○	Surfaces □	Exemples de matériaux usuels	
B Superstructure	B3 Rail	c Niveau de roulement (PdR)	– Acier à rails	
	B2 Traverse		– Béton – Acier – Bois	
	B1 Ballast		– Roche dure concassée	
A Infrastructure	A6 Couche d'étanchéité	b Couche de base	– Couche bitumineuse	– Grave PSS
	A5 Couche de fondation		– Agrégats minéraux	
	A4 Couche de transition ¹⁾ Couche de drainage ²⁾	a Plate-forme	– Grave 1, 2 – (GW ou GP)	
	A3 Terrain amélioré		– Ballast – Gravieron – Ballast concassé – Sable – Géotextile	
	A2 Remblai		– Sol compacté – Stabilisation – Matériaux de substitution	
	A1 Terrain naturel		– Matériaux compactés – Terrain non remanié	

1) sur infrastructure rigide

2) sur roche fissurée et altérée

[Réglementation CFF – R RTE 21110]

Type de voies ferrées – Chemin de fer

▶ Voie ferrée ballastée



▶ Voie ferrée sur dalle



Autres types de voies ferrées

► Tramway



► Crémaillère

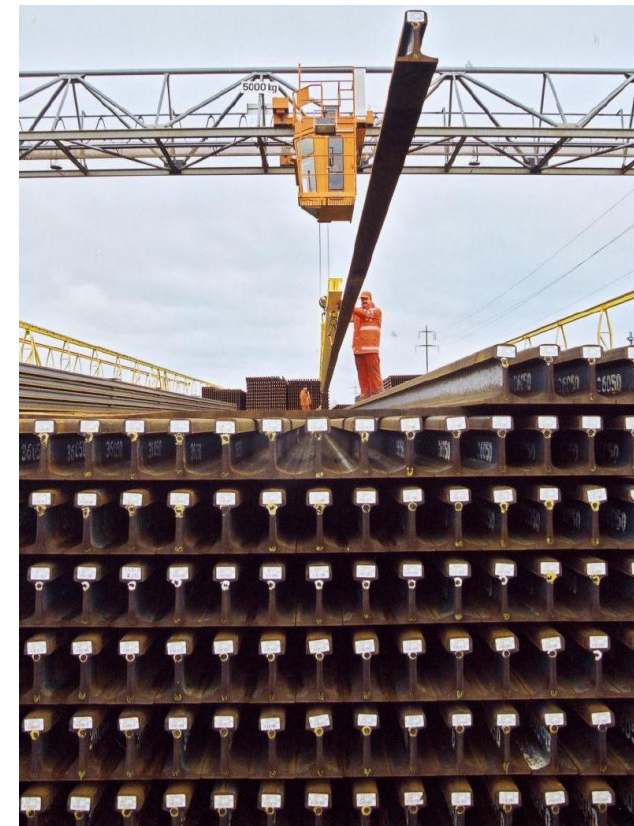
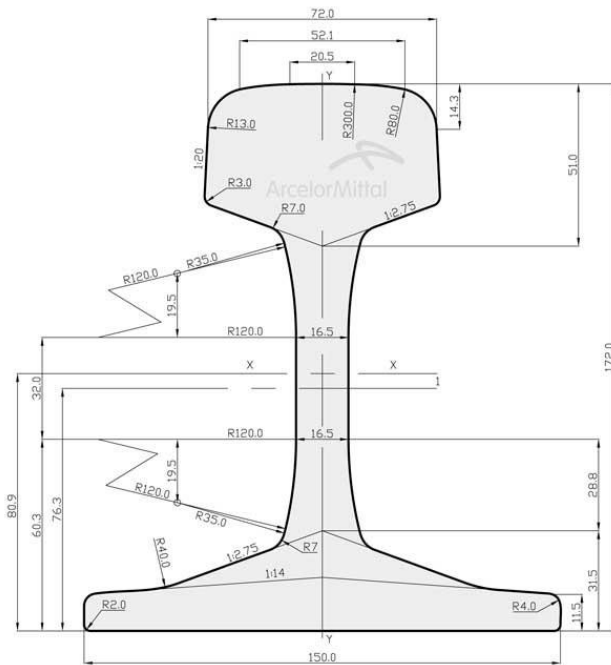


Composantes de la voie ferrée

- ▶ **Rails**
- ▶ **Traverses**
 - ▶ y.c. attaches
- ▶ **Ballast**
- ▶ **Sous-couche**

Rails

- ▶ **Élément en acier soudé**
- ▶ **Mise en parallèle de 2 rails → Voie ferrée**
- ▶ **Forme particulière**



Rôles du rail

- ▶ **Supporter la charge verticale des roues et les efforts dynamiques qui en résultent**
 - ▶ Transmettre les charges des roues aux traverses
- ▶ **Former une surface de roulement continue, lisse et plane**
 - ▶ Minimiser les efforts de traction (faible résistance spécifique à l'avancement)
- ▶ **Guider latéralement les roues des véhicules**
 - ▶ Courbe : reprendre les efforts transversaux dus à la force centrifuge

Rôles du rail

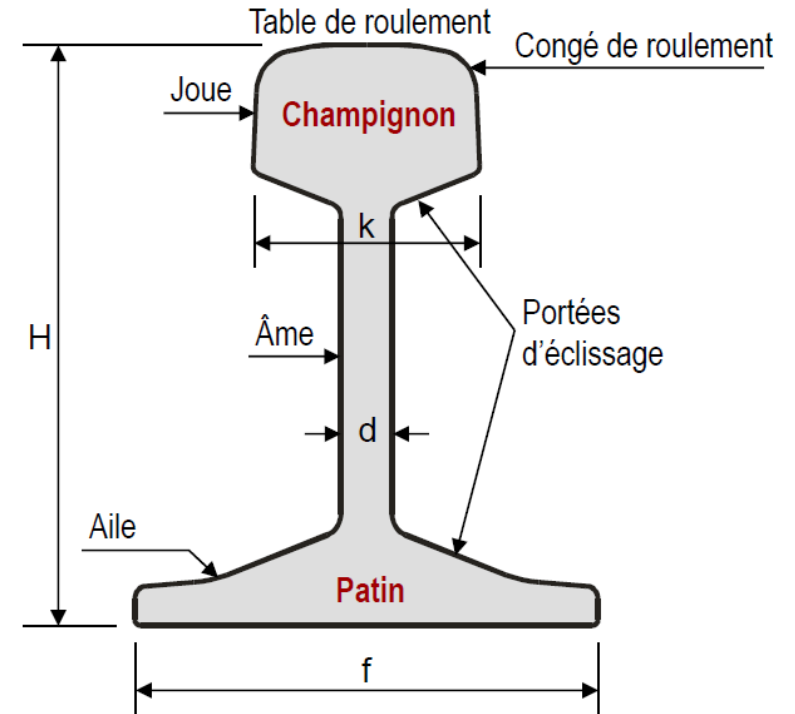
- ▶ **Reprendre les efforts longitudinaux**
 - ▶ Causes : accélération, freinage et résistance au roulement des convois
- ▶ **Permettre le passage du courant électrique**
 - ▶ Circuit de voie des appareils de sécurité
 - ▶ Retour du courant de traction (lignes électrifiées)

Types de rail

► 2 critères de distinction

►► Forme du profil

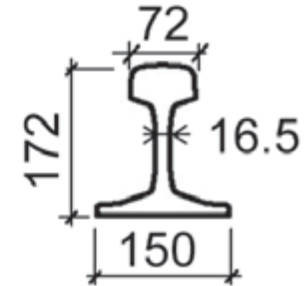
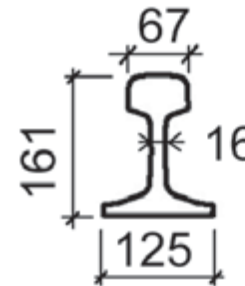
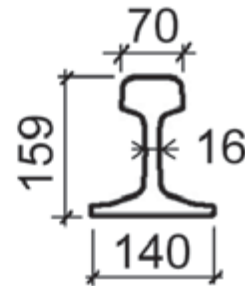
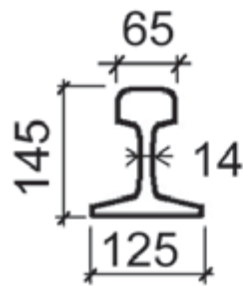
- Rail Vignole
- Rail à gorge (chaussée)



►► Masse d'acier utilisée par m' de rail

Types de rails actuels

Profil	H mm	f mm	k mm	d mm	Poids kg/m
CFF I	145	125	65	14	46.0
UIC 54E	161	125	67	16	53.8
UIC 60	172	150	72	16.5	60.3



Dénomination
CFF

46 E1

54 E1

54 E2

60 E1

46 Kg

54 Kg

60 Kg

[Réglementation CFF - D RTE 22040]

Rails soudés

- ▶ **En général, les rails sont soudés**
 - ▶ Soudure aluminothermique
 - ▶ Efforts introduits dans le rail lors de cette opération



Eclissage

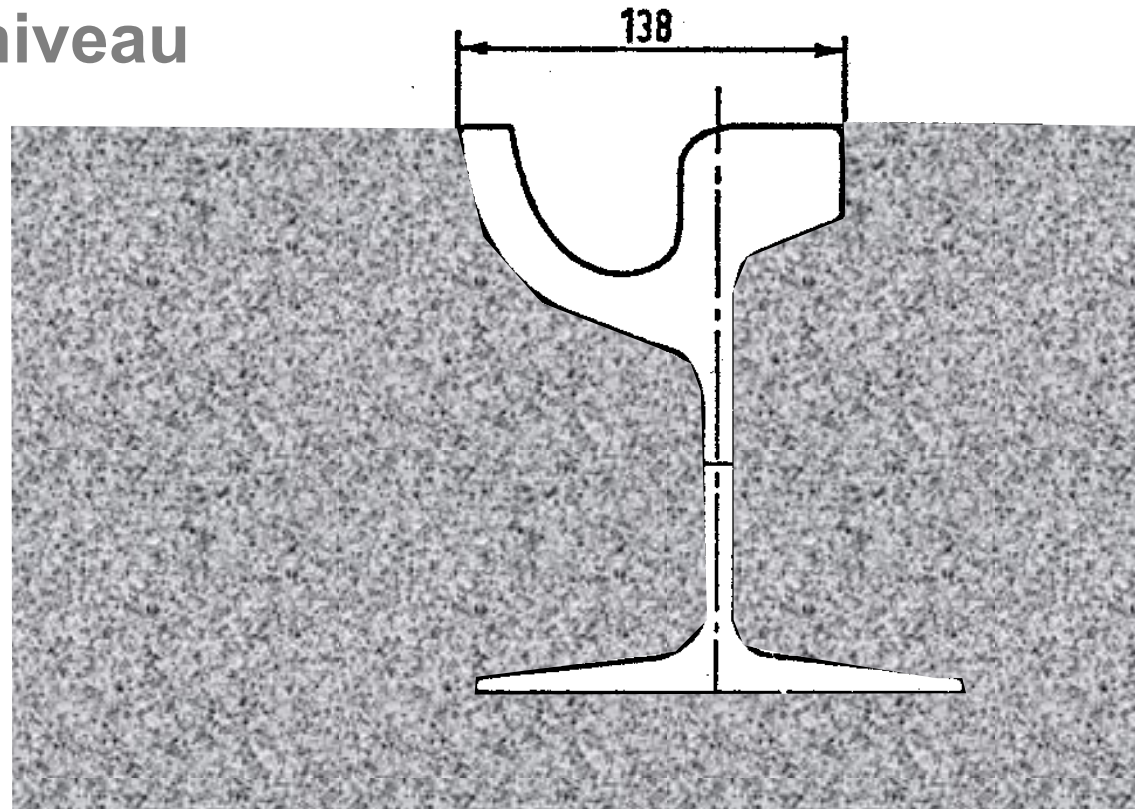
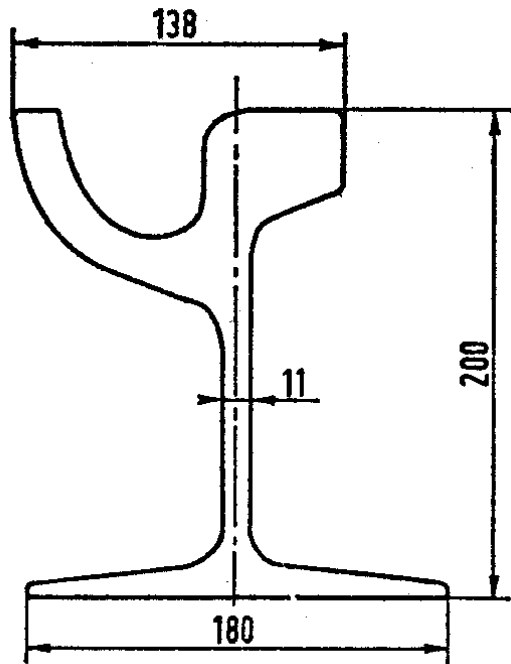
- ▶ **Action de lier 2 rails au moyens d'éclisses**
- ▶ **Profilés métalliques appliqués de part et d'autre de l'âme et relié par des boulons**



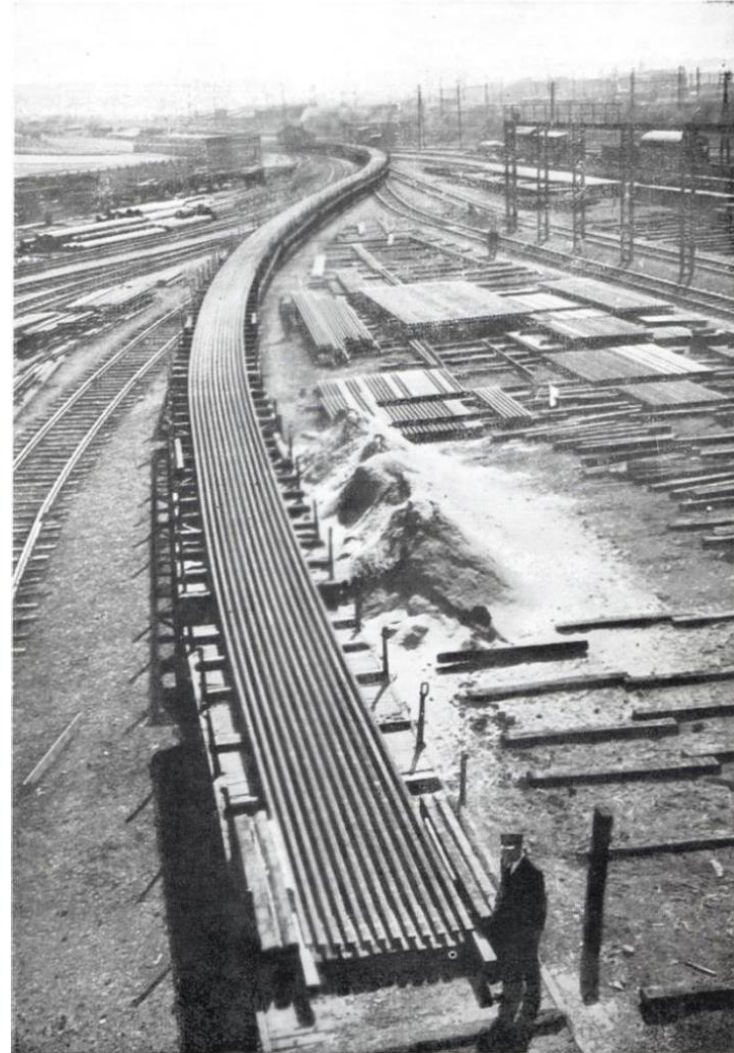
Rails à gorge

► Utilisation

- Voies insérées dans une chaussée
- Certains passages à niveau



Souplesse des rails



Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

Souplesse des rails



Ecartement des rails

▶ Mesuré 14 mm sous le plan de roulement

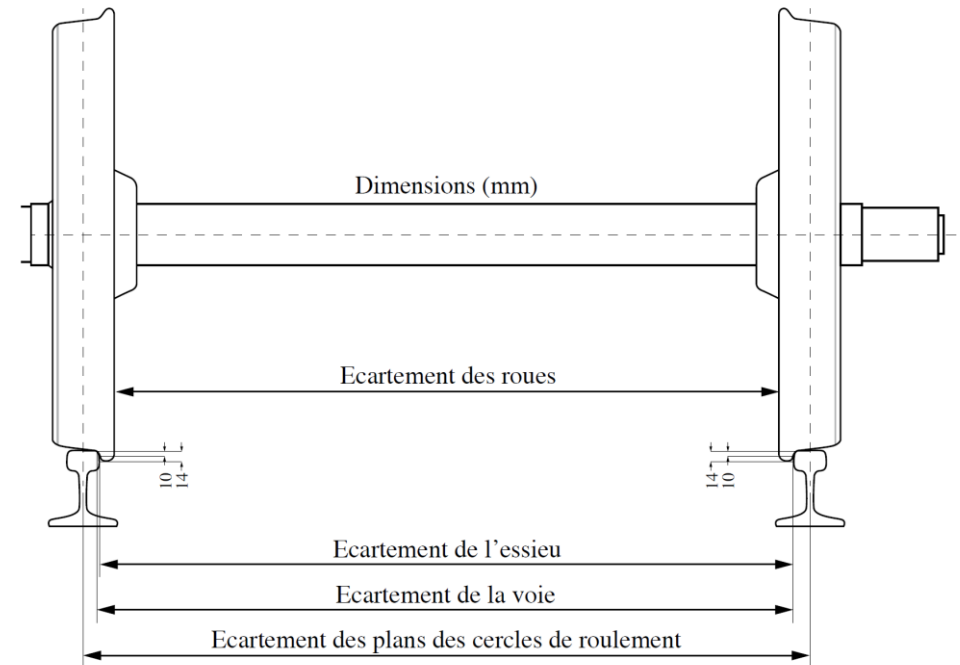
▶ Ecartement standard

▶▶ 1'435 mm

▶▶ 60 % des voies ferrées dans le Monde

▶ Ecartement métrique

▶ Surécartement en courbe



Attaches

► Fonctions

- Absorber et transmettre les efforts longitudinaux du rail à la traverse
- Amortir les vibrations et les chocs
- Maintenir l'écartement et l'inclinaison des rails
- Assurer l'isolation électrique entre le rail et les traverses



Types d'attaches

► Selle et tirefond

► Selon type de traverses



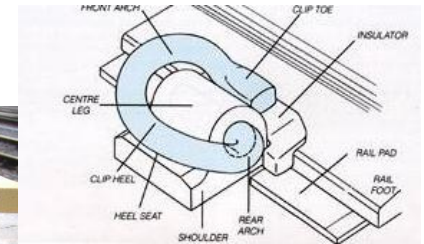
Sur acier
(A, Aei, Aek, Aeki)



Sur bois
(Ke)



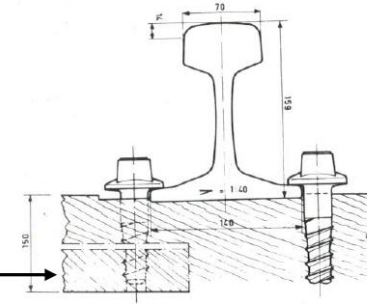
Sur béton
(W, Ws)



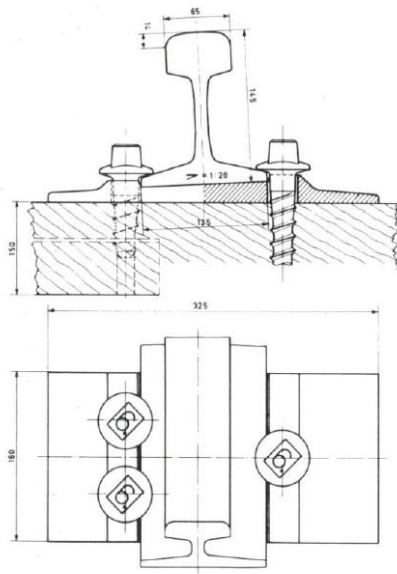
Elastique sans tirefond
(attaches e-clip & FastClip)

Types de pose

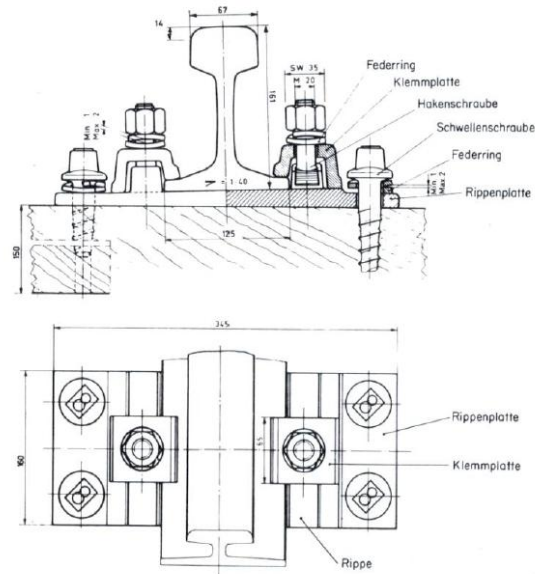
pose directe sans selle avec tire-fonds



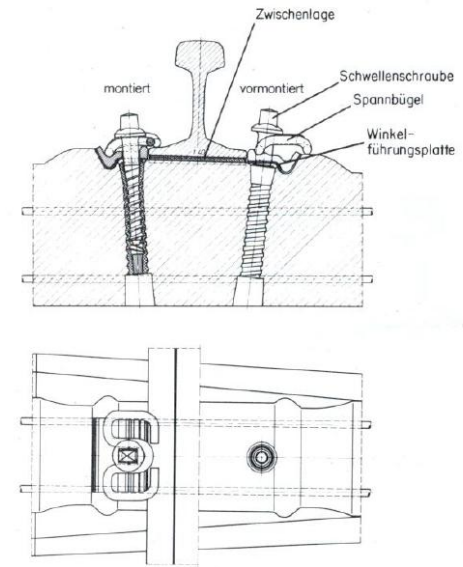
directe avec selle



indirecte avec selle

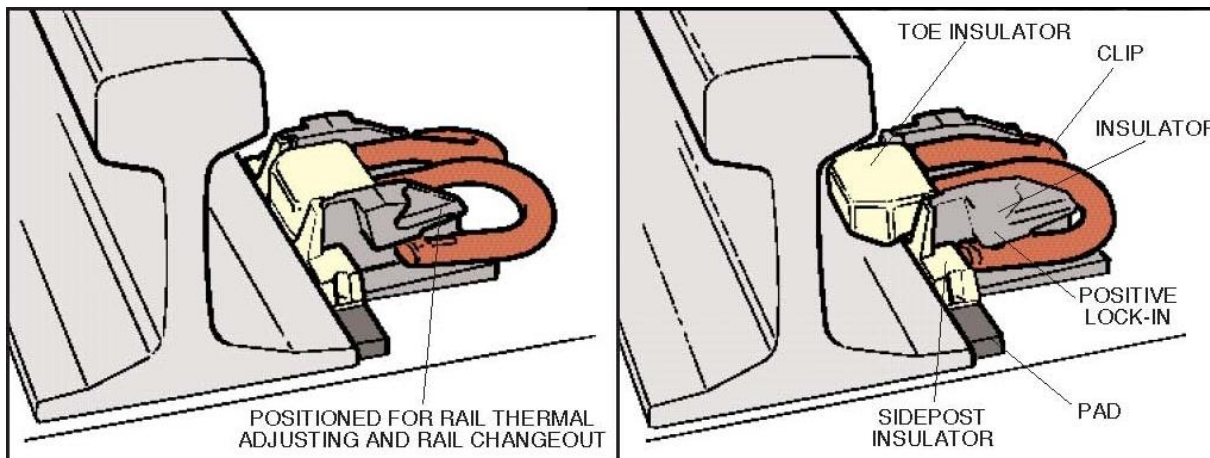


élastique



Attaches FastClip

- ▶ Sans tirefond
- ▶ Rapidité et facilité de mise en œuvre
- ▶ Livré prêt à l'emploi
- ▶ Mécanisation totale



- ▶ LGV Est du record de vitesse 2007

Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

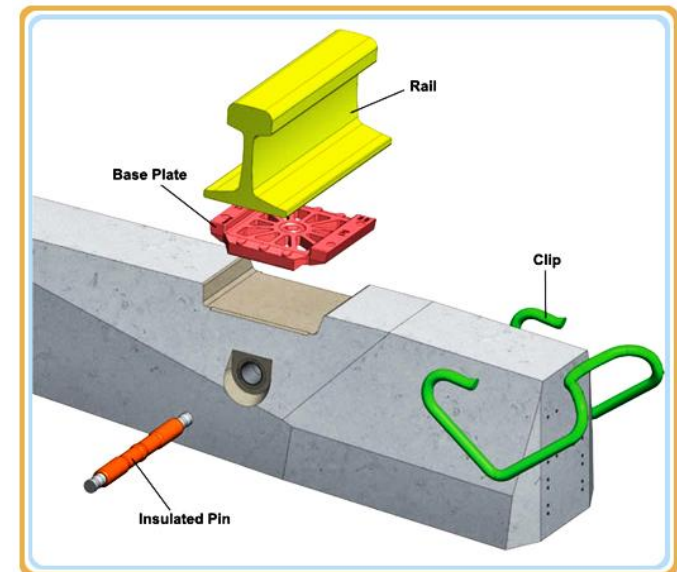
Semelle élastique sous rail

► Rôle

- Absorber les vibrations
- Contribuer à la souplesse de la voie
- Contribuer à l'isolation électrique des rails

► Applications

- Traverses béton / dalle en béton



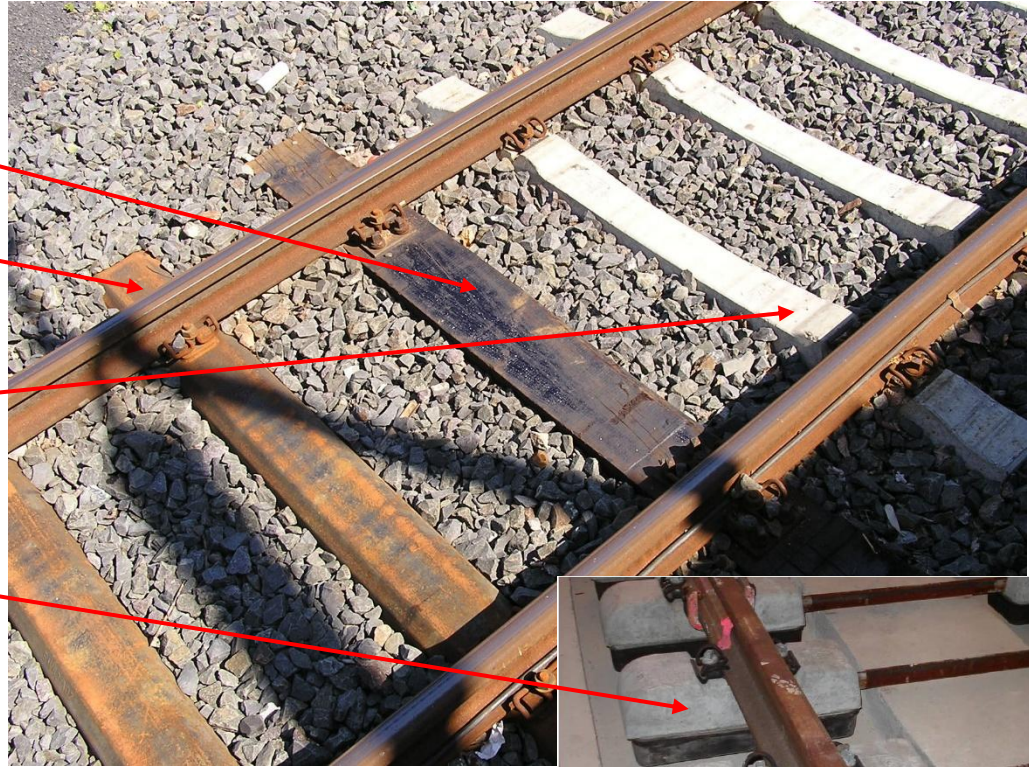
Traverses

► Fonctions

- Répartition des charges verticales transmises par le rail sur le ballast
- Reprise des efforts longitudinaux et transversaux résultant de la dynamique des véhicules et des variations de longueur du rail sous l'influence des variations de température
- Maintien de l'écartement et de l'inclinaison des rails
- Diminution de l'effet des déformations locales du sol d'infrastructure

Matériaux de traverse

- ▶ Bois
- ▶ Acier
- ▶ Béton
 - ▶ Monobloc
 - ▶ Blochet
- ▶ Bois synthétique



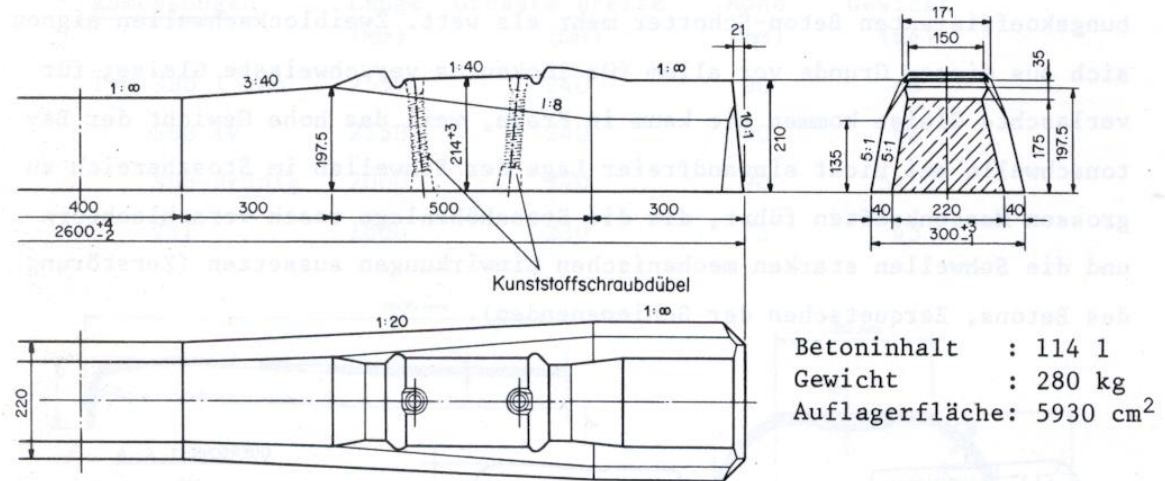
Avantages / Inconvénients

Matériau	Avantages	Inconvénients
Bois	Flexible (mauvais sols) Légères (~ 87 kg)	Faible durée de vie (~ 25 ans) Coût Faible résistance au déplacement latéral
Métal	Facile à poser Légères (~ 70 kg) Durée de vie ~ 50 ans	Bruyante Conductrice
Béton	Poids élevé – stabilité de la voie Facile à construire Durée de vie \geq 50 ans	Poids élevé (~ 200 kg) → manutention Dégâts en cas de déraillement Charges dynamiques > 25%
Plastique	Légèreté Imputrescible Durée de vie ~ 50 ans	Plus faible résistance

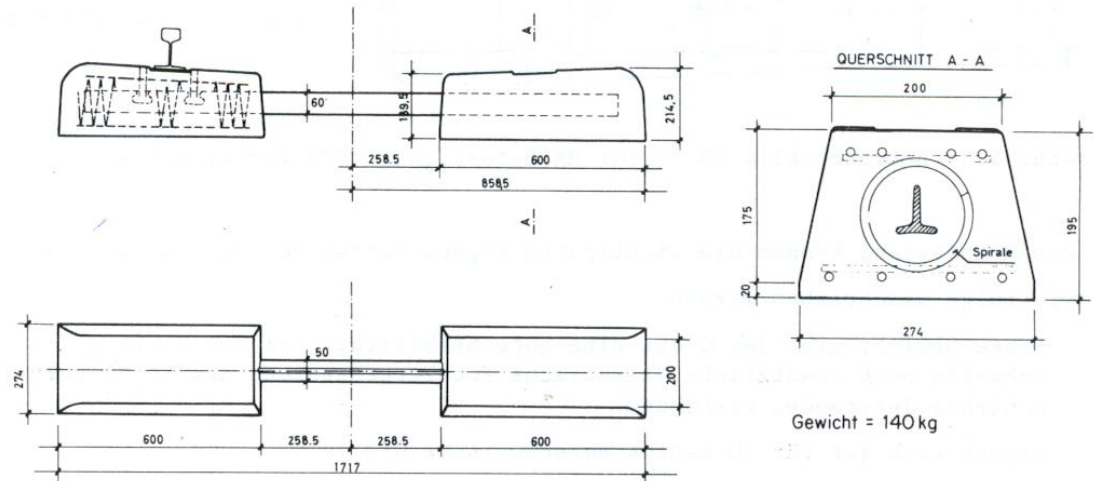
Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

Traverses en béton

► Béton monobloc

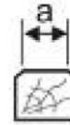
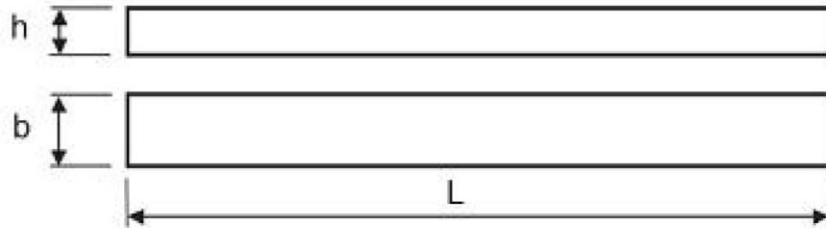


► Béton avec blochets



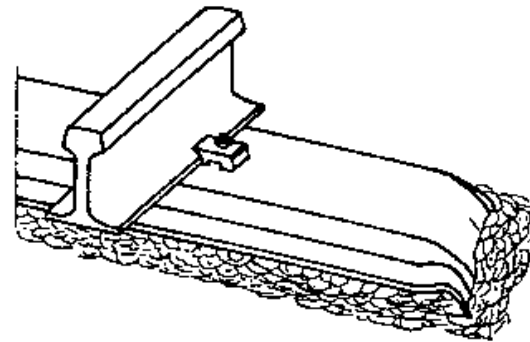
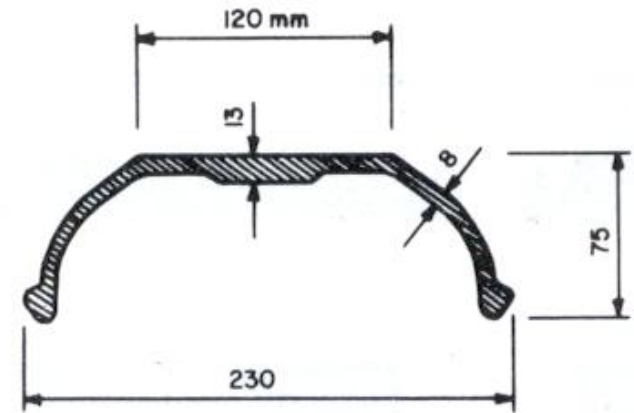
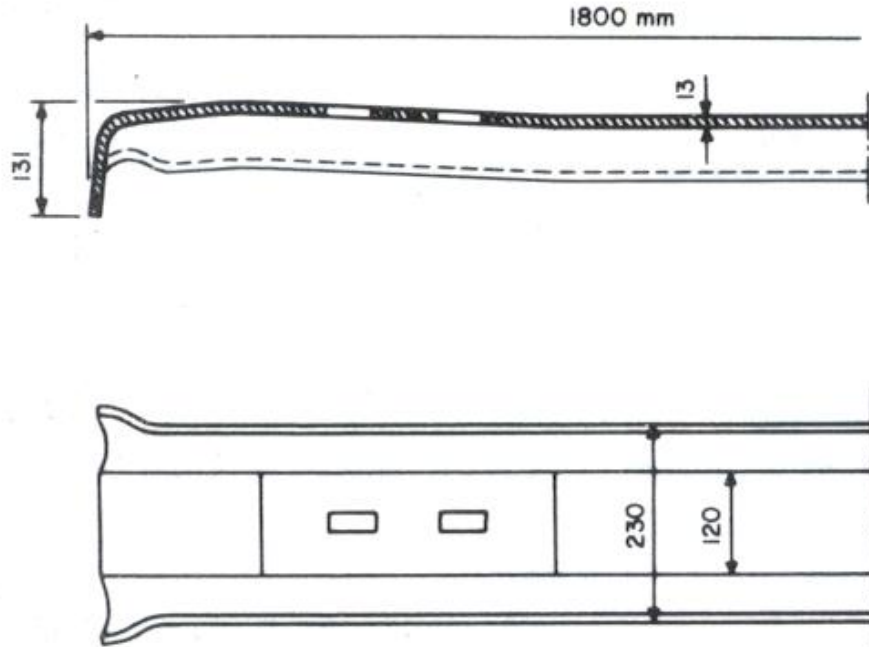
Traverses en bois

Traverses en bois



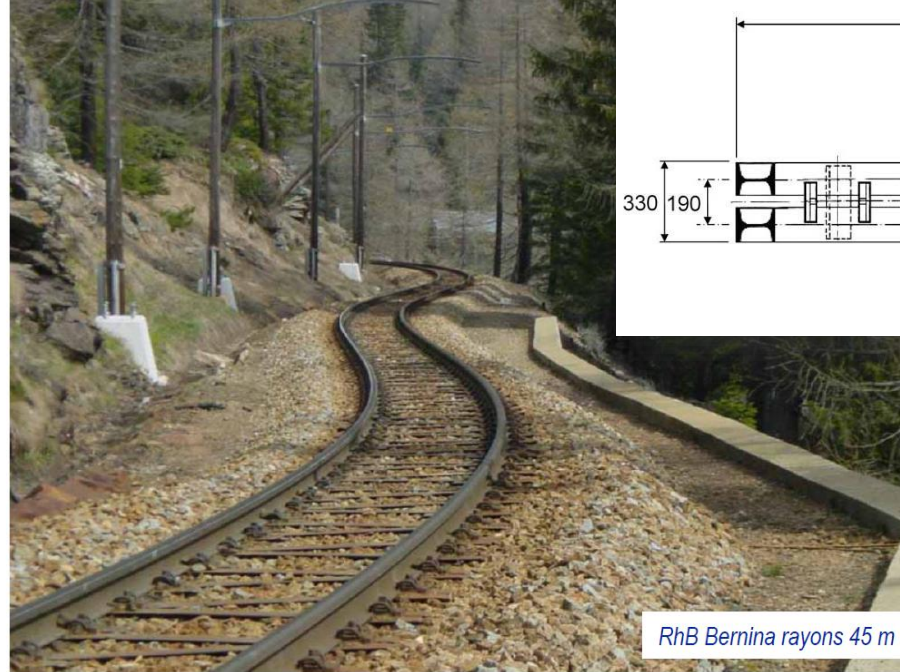
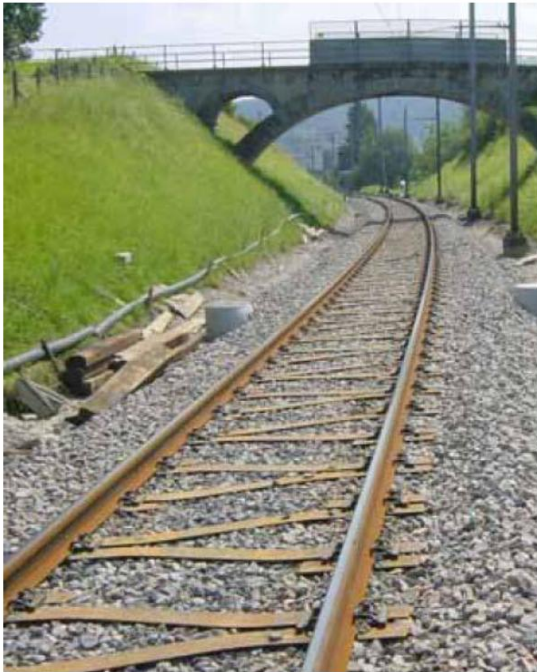
Utilisation	Cotes des traverses [mm]				Genre de bois	Poids	
	h	b	a	L		nouveau à 0.95 t/m ³	ancien, à 0.88 t/m ³
VP1 à VP4	150	260	170	2500 ou ¹⁾ 2600	Chêne ou hêtre	93 ou 96 kg	86 ou 89 kg
VP5 et VS		240	160	2600		86 ou 89 kg	73 ou 79 kg
Voie à trois rails		260		2500		93 kg	86 kg
Appareil de voie	150	260	170	2200 à 4800	Chêne	37 kg/m	34 kg/m
	160					40 kg/m	37 kg/m
Ponts	180	220	150	Variable	Chêne ou hêtre	38 kg/m	35 kg/m
	230	250	165			55 kg/m	51 kg/m
	250					59 kg/m	55 kg/m

Traverses métalliques traditionnelles

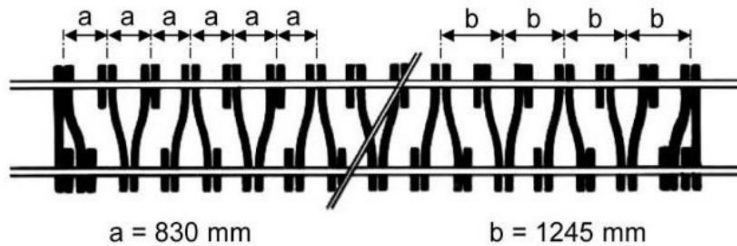
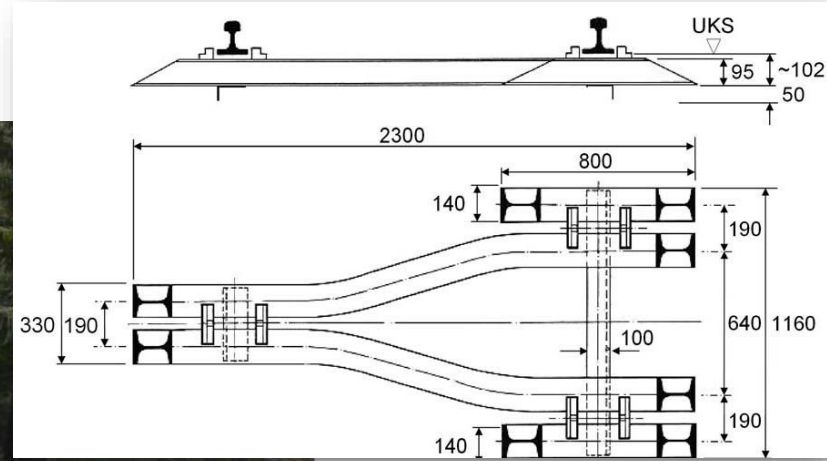


Traverses métalliques en Y

► Meilleure rigidité transversale



RhB Bernina rayons 45 m



Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

Traverses en bois synthétique FFU

- ▶ **Domaine d'utilisation : ponts et appareils de voie**
- ▶ **Avantages**
 - ▶ Imputrescible
 - ▶ Moins cher que les traverses en bois
 - ▶ Durée de vie : 50 ans
 - ▶ Isolation électrique
 - ▶ Résistance aux produits chimiques

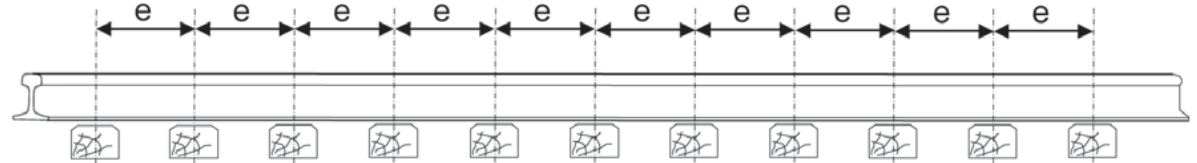


Traverses

► Espacement des traverses

►► **60 cm** VP1 à VP4

►► 67 cm VP5 et VS



► Masse d'une traverse

►► Bois 90 kg

►► Bois synthétique 90 kg

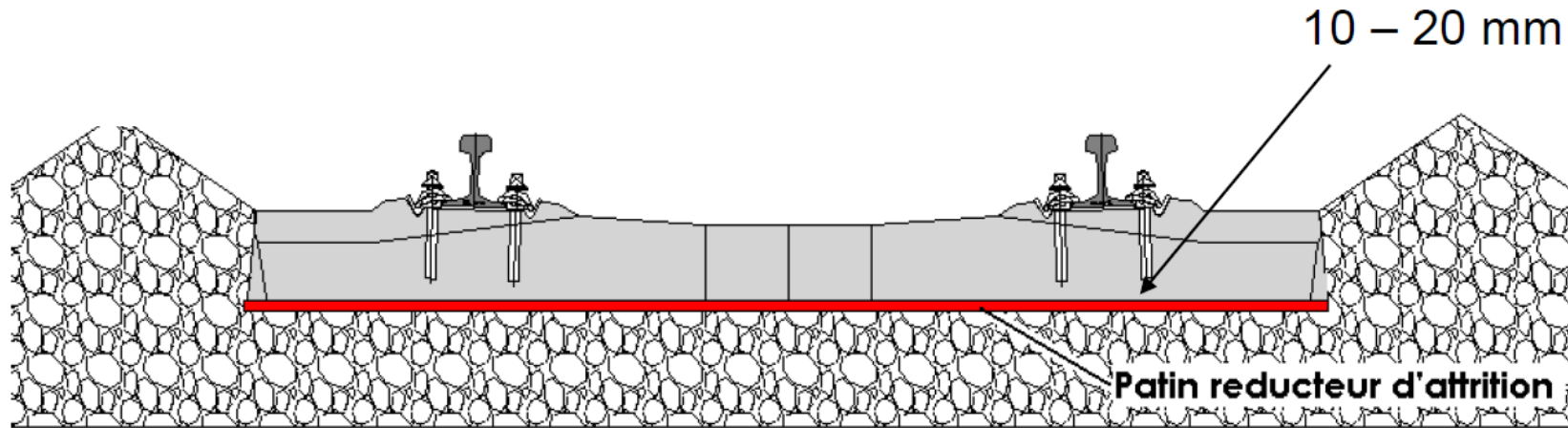
►► Acier 70 kg

►► Béton blochet 200 kg

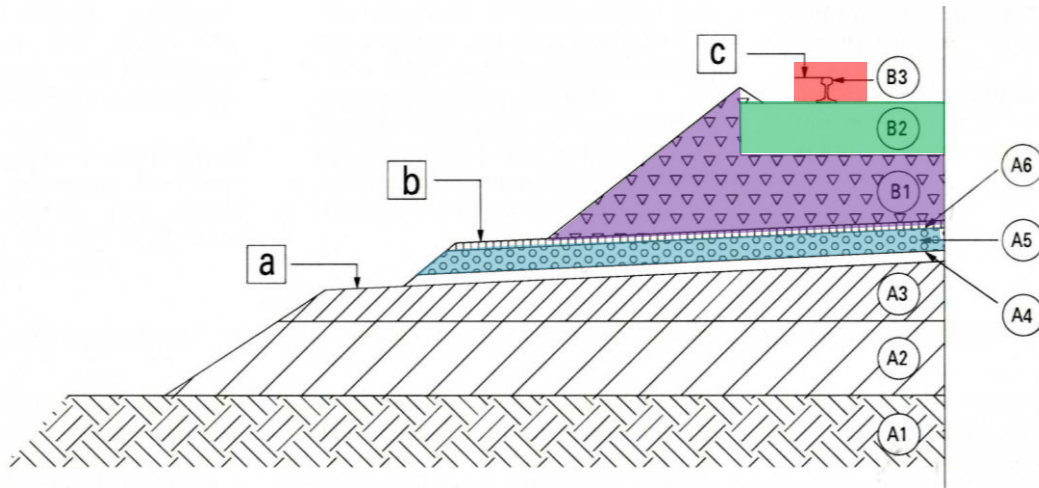
►► Béton monobloc 280 kg

Patins Réducteurs d'Attrition

► Améliore le contact traverse – ballast



Terminologie de la voie ferrée



	Couches ○	Surfaces □	Exemples de matériaux usuels	
B Superstructure		c Niveau de roulement (PdR)		
	B3 Rail	b Couche de base	– Acier à rails	
	B2 Traverse		– Béton – Acier – Bois	
B1 Ballast	– Roche dure concassée			
A Infrastructure	A6 Couche d'étanchéité	a Plate-forme	– Couche bitumineuse	– Grave PSS
	A5 Couche de fondation		– Agrégats minéraux	
	A4 Couche de transition ¹⁾ Couche de drainage ²⁾	– Grave 1, 2 – (GW ou GP)		
	A3 Terrain amélioré	– Ballast – Gravieron – Ballast concassé – Sable – Géotextile		
	A2 Remblai	– Sol compacté – Stabilisation – Matériaux de substitution		
	A1 Terrain naturel	– Matériaux compactés – Terrain non remanié		

[Réglementation CFF – R RTE 21110]

¹⁾ sur infrastructure rigide

²⁾ sur roche fissurée et altérée

Ballast



Ballast

▶ **Matériaux granulaires non liés**

▶ **Fonctions**

- ▶ Répartir les charges sur la plate-forme de telle manière que ces dernières ne provoquent pas de déformations excessives
- ▶ Assurer l'écoulement des eaux de ruissellement
- ▶ Neutraliser les effets des agents atmosphériques, en particulier du gel et du dégel
- ▶ Eviter tout déplacement horizontal du système porteur rails-traverses

Efforts transversaux

- ▶ RAILS soudés
- ▶ Dilation thermique



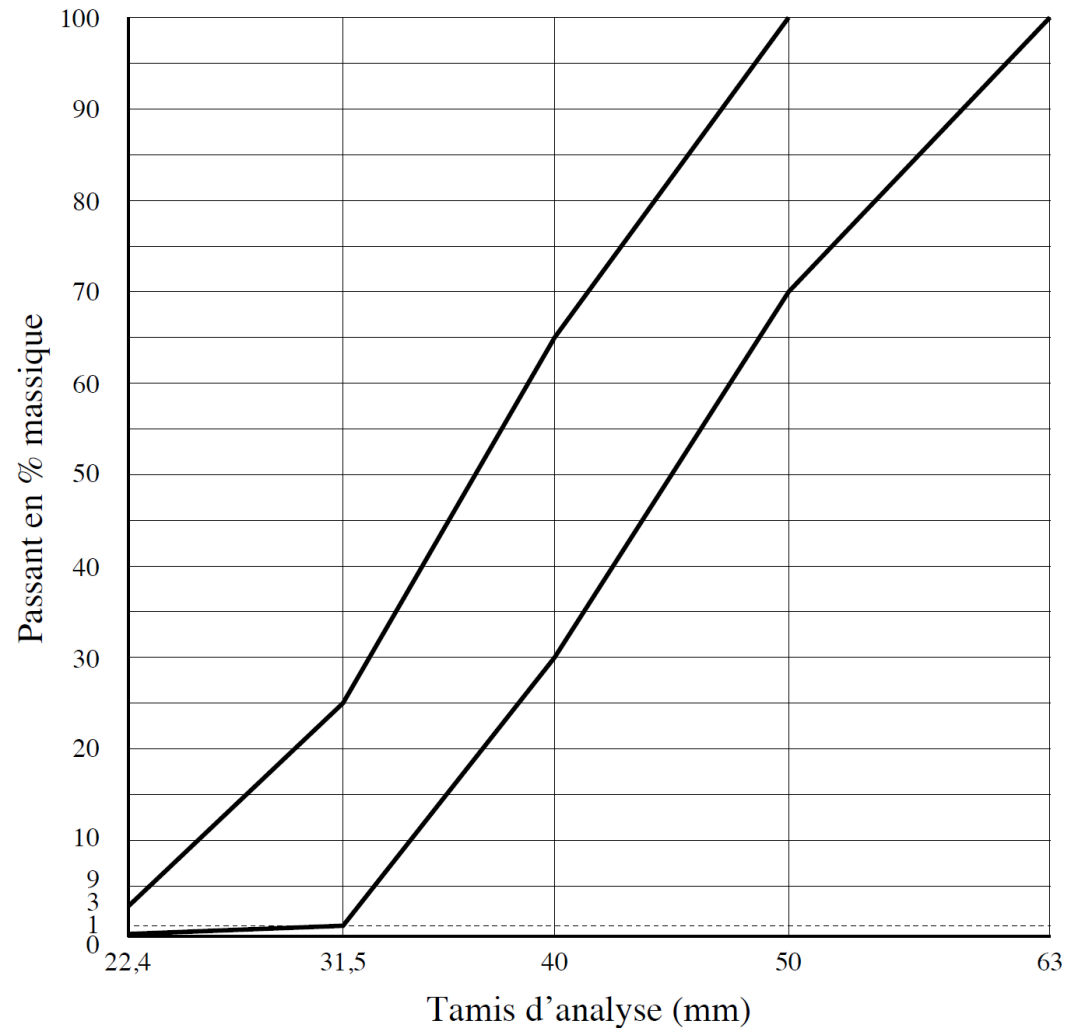
Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

Critères de qualité

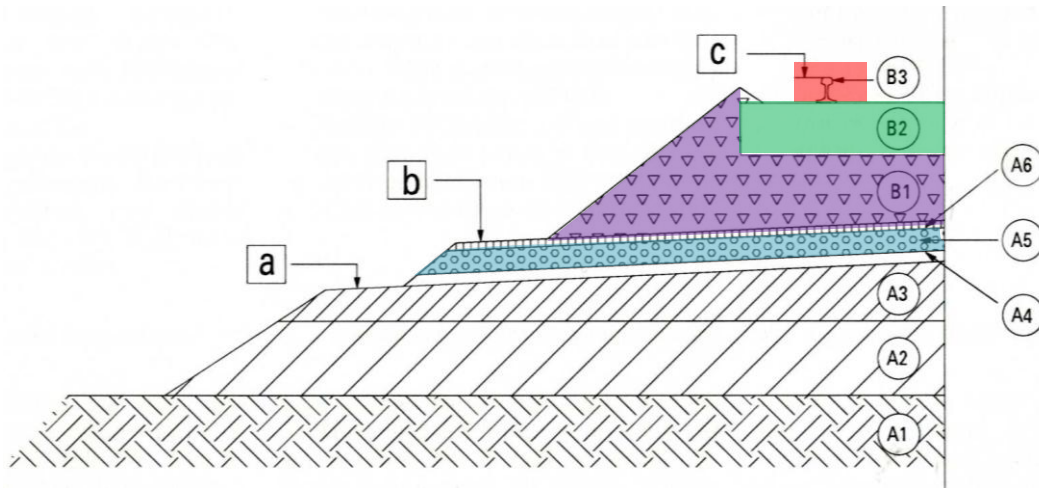
- ▶ **Roches concassées (pierres dures)**
- ▶ **Granulométrie : 22,4 à 63 mm**
- ▶ **Forme du grain: polyédrique à arêtes vives**
- ▶ **Faible teneur en éléments fins 0.5 mm**
 - ▶ $\leq 0,5 \%$
- ▶ **Bonne résistance à la fragmentation (Los Angeles)**
- ▶ **Epaisseur 20 cm à 60 cm**

Fuseau granulométrique du ballast

► SN 670 110



Terminologie de la voie ferrée



	Couches ○	Surfaces □	Exemples de matériaux usuels	
B Superstructure		c Niveau de roulement (PdR)		
	B3 Rail	b Couche de base	– Acier à rails	
	B2 Traverse		– Béton – Acier – Bois	
B1 Ballast	– Roche dure concassée			
A Infrastructure	A6 Couche d'étanchéité	a Plate-forme	– Couche bitumineuse	– Grave PSS
	A5 Couche de fondation		– Agrégats minéraux	
	A4 Couche de transition ¹⁾ Couche de drainage ²⁾		– Grave 1, 2 – (GW ou GP)	
	A3 Terrain amélioré		– Ballast – Gravier – Ballast concassé – Sable – Géotextile	
	A2 Remblai		– Sol compacté – Stabilisation – Matériaux de substitution	
	A1 Terrain naturel		– Matériaux compactés – Terrain non remanié	

[Réglementation CFF – R RTE 21110]

¹⁾ sur infrastructure rigide

²⁾ sur roche fissurée et altérée

Infrastructure

▶ Fonctions des couches

▶▶ Couche d'étanchéité

- Protéger l'infrastructure et le terrain naturel contre la pénétration d'eau/la croissance des plantes

▶▶ Couche de fondation

- Répartir les charges à la plate-forme (en complément du ballast)
- Protéger la sous-couche du gel

Infrastructure

► Fonctions des couches

►► Couche de transition

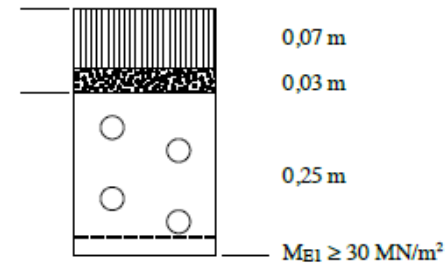
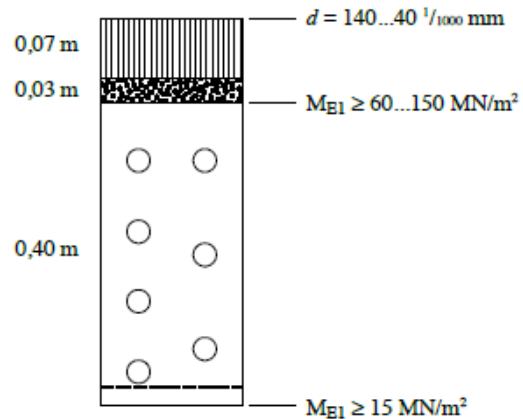
- Séparer la couche de fondation et la couche sous-jacente
- Contribuer à l'élasticité dans l'infrastructure rigide (ponts, tunnels)

►► Couche de drainage

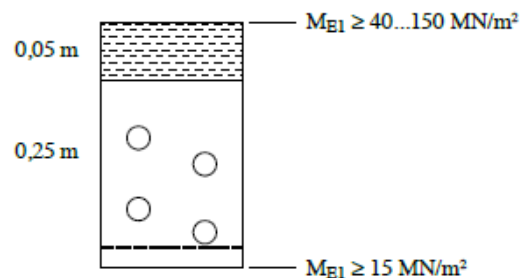
- Evacuer l'eau

Dimensions infrastructure

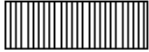

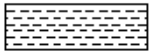


Voies appartenant au groupe 1



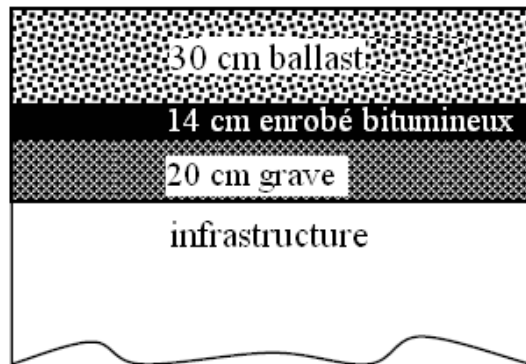
Voies appartenant aux groupes 2 et 3



Légendes

-  Revêtement bitumineux, caractéristiques selon SN 640 431
-  Granulats bitumineux/matériau de rabotage d'enrobé 0/16 mm selon SN 640 741 comme couche d'égalisation (augmente l'élasticité et diminue les vibrations)
-  Couche d'étanchéité graveleuse selon ch. 9.2 et annexe 6, p. ex. mame du Jura (Juramergel)
-  Grave 1 (Grave 2 autorisée seulement si exigences SN 670 120 remplies)
-  Eventuellement géotextile selon SN 640 241

Sous-couche bitumineuse



Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

Sous-couche bitumineuse

▶ **Caractéristiques**

- ▶ Épaisseur variant entre 4 et 20 cm
- ▶ Posée entre la plateforme et le ballast

▶ **Avantages durant la phase de construction**

- ▶ Protège la sous-couche des camions
- ▶ Permet la circulation des camions indépendamment de la météo

Sous-couche bitumineuse

- ▶ **Avantages durant la phase d'exploitation**
 - ▶ Assure le drainage des eaux
 - ▶ Empêche la remontée de fines dans le ballast
 - ▶ Protège le terrain et les eaux souterraines en cas d'accidents
 - ▶ Protège la plateforme lors du renouvellement du ballast

Tassement de remblais

- ▶ **La stabilisation de la plateforme est très importante**
 - ▶ La correction des défauts après la pose des dalles est minimale (max 20 mm)
 - ▶ La correction des tassements initiaux des dalles coûte
 - ▶ Bon compactage des remblais → réduction des tassements
- ▶ **Etape cruciale**
 - ▶ Ne pas négliger l'investissement dans un remblai pour réduire / annuler les tassements
- ▶ **Utilisation de semelles plus hautes sous les rails**

Exemple des étapes de construction



Voies sans ballast

▶ Inconvénients de la voie ballastée

▶ Voie épaisse

▶ Tassements fréquents et irréguliers

▶ Zones de transition OA : tassements différentiels

▶ Envol du ballast

▶ Dégradation du ballast, perte d'élasticité et de drainage

▶ Entretien fréquent et onéreux (40 à 50 % du budget d'entretien de la voie)

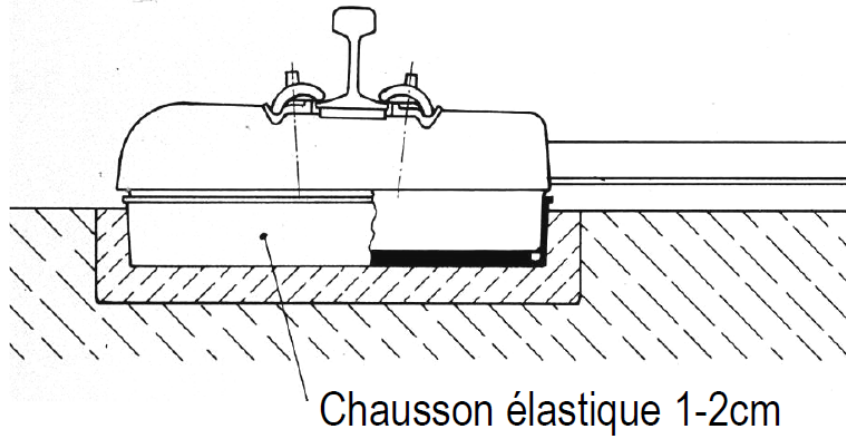
▶ Faible résistance latérale du ballast en courbe

Voies sans ballast

- ▶ **VSB**
- ▶ **Réseaux de métros**
- ▶ **Réseaux fortement sollicités**
 - ▶ LGV
 - ▶ Shinkansen

VSB avec blochets intermédiaires en béton

► Analogue à une voie ballastée



► Tunnels M1



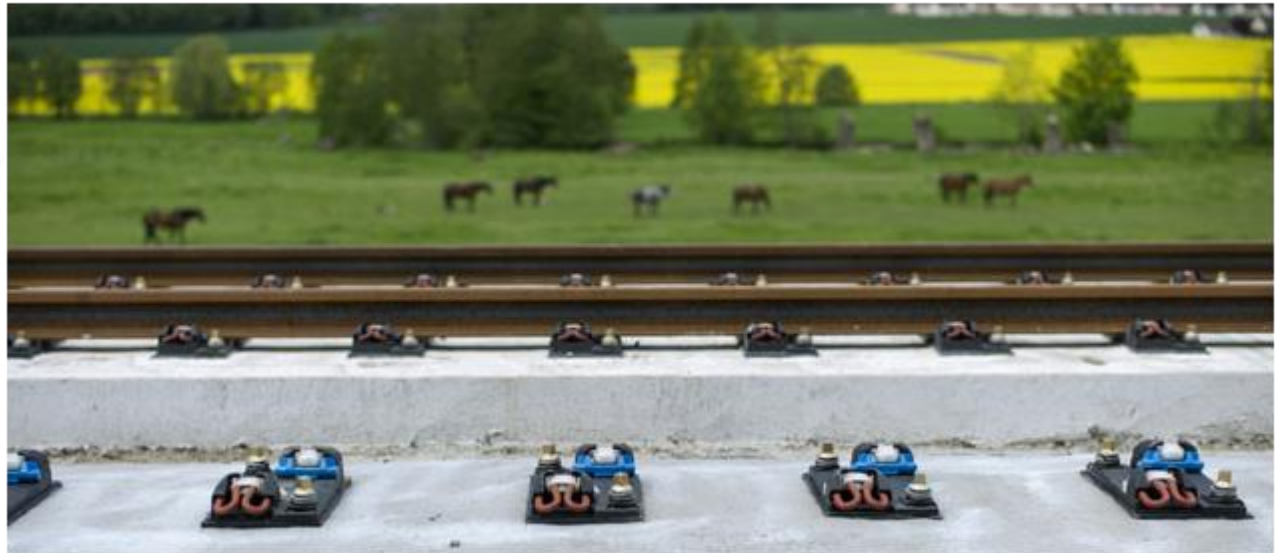
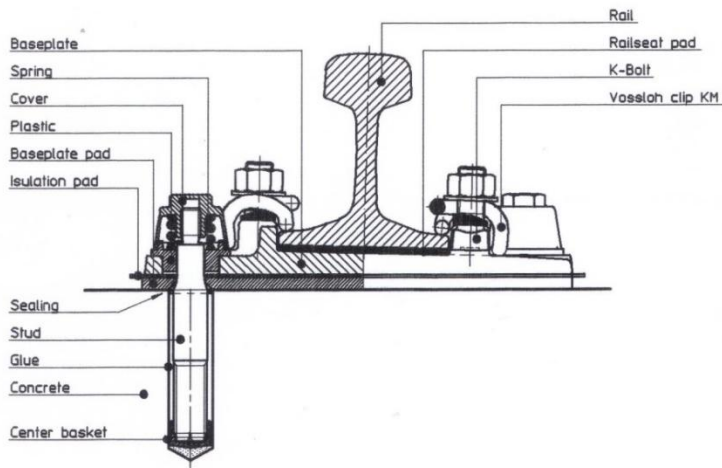
Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

VSB avec selles

► Selles enfoncées dans le béton frais

►► Pose de 1'000 m par jour

►► Délai d'un mois avant le passage du premier train
(séchage du béton)



Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

VSB de type monolithique

► Pose sur dalle continue

► LGV



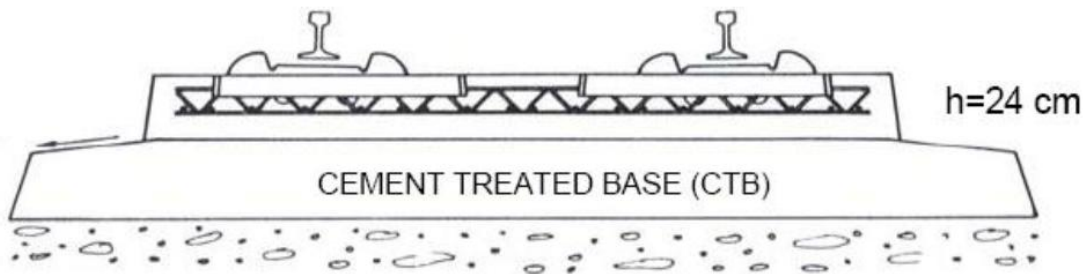
Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017

VSB de type monolithique

- ▶ Pose mécanisée
- ▶ 500 m/jour
- ▶ Système Züblin : insertion des traverses par vibration dans le béton frais

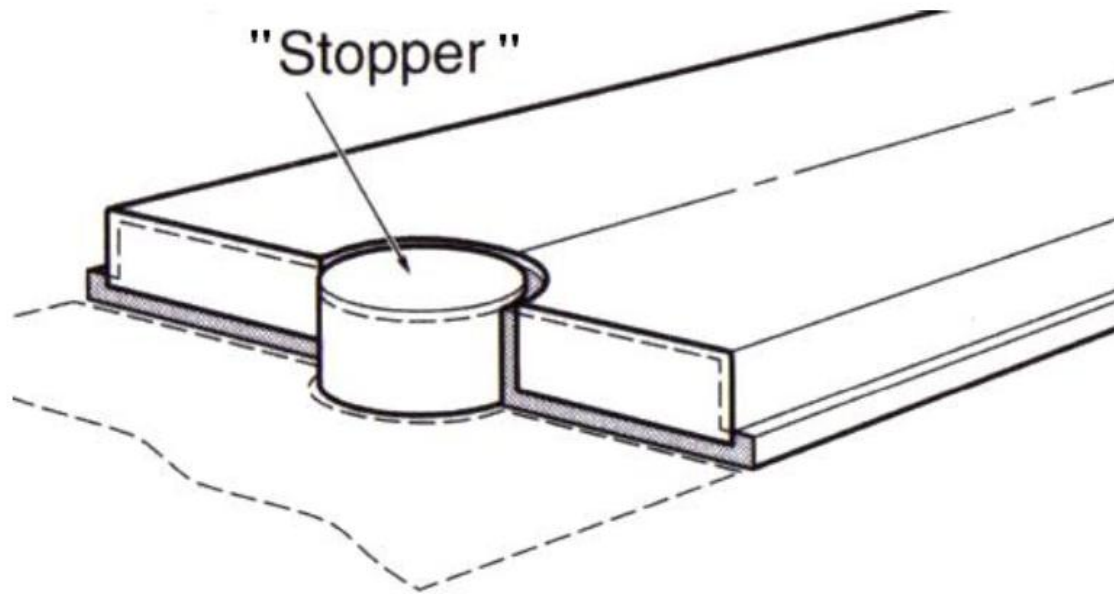


Source : Jean-Daniel Buri, Citec, 2017



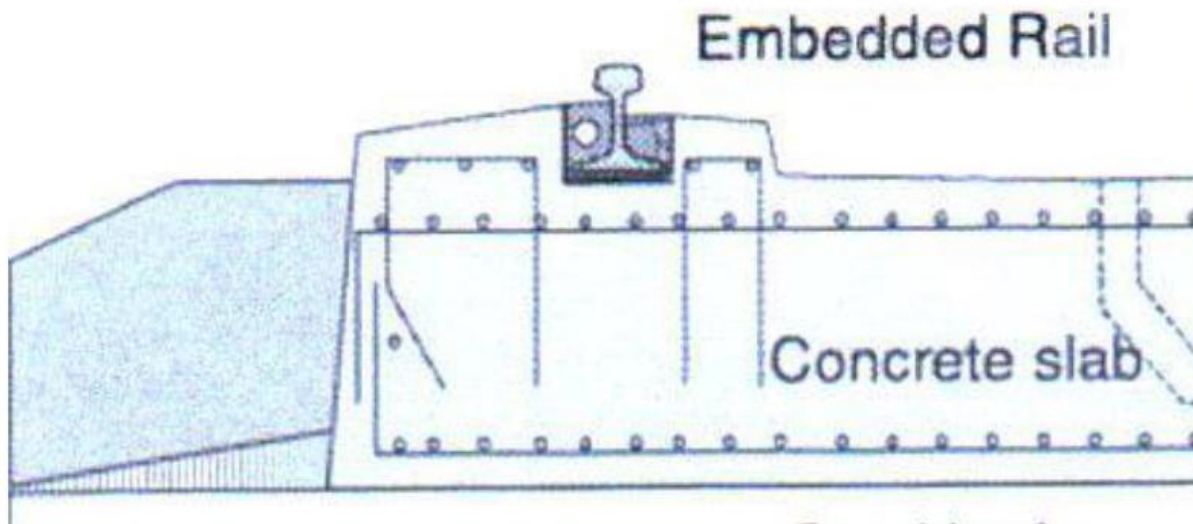
VSB sur dalle préfabriquée

► Dalle posée sur couche élastique



VSB avec rails encastrés

- ▶ **Fixation continue des rails**
 - ▶ Couche élastique entourant le rail
- ▶ **Réduction du bruit de roulement**
- ▶ **Ponts et tramways**



Avantages des VSB

- ▶ **Dévers et insuffisance de devers plus grands**
- ▶ **Hauteur de construction et poids réduit**
- ▶ **Meilleure maîtrise des transitions avec les OA**
- ▶ **Grande stabilité de la qualité géométrique de la voie**
- ▶ **Résistance au flambage et au gauchissement élevée**
- ▶ **Amortissement des vibrations**
- ▶ **Garantie de confort pour les passagers**
- ▶ **Entretien et coûts de maintenance réduits (- 25 %)**

Inconvénients des VSB

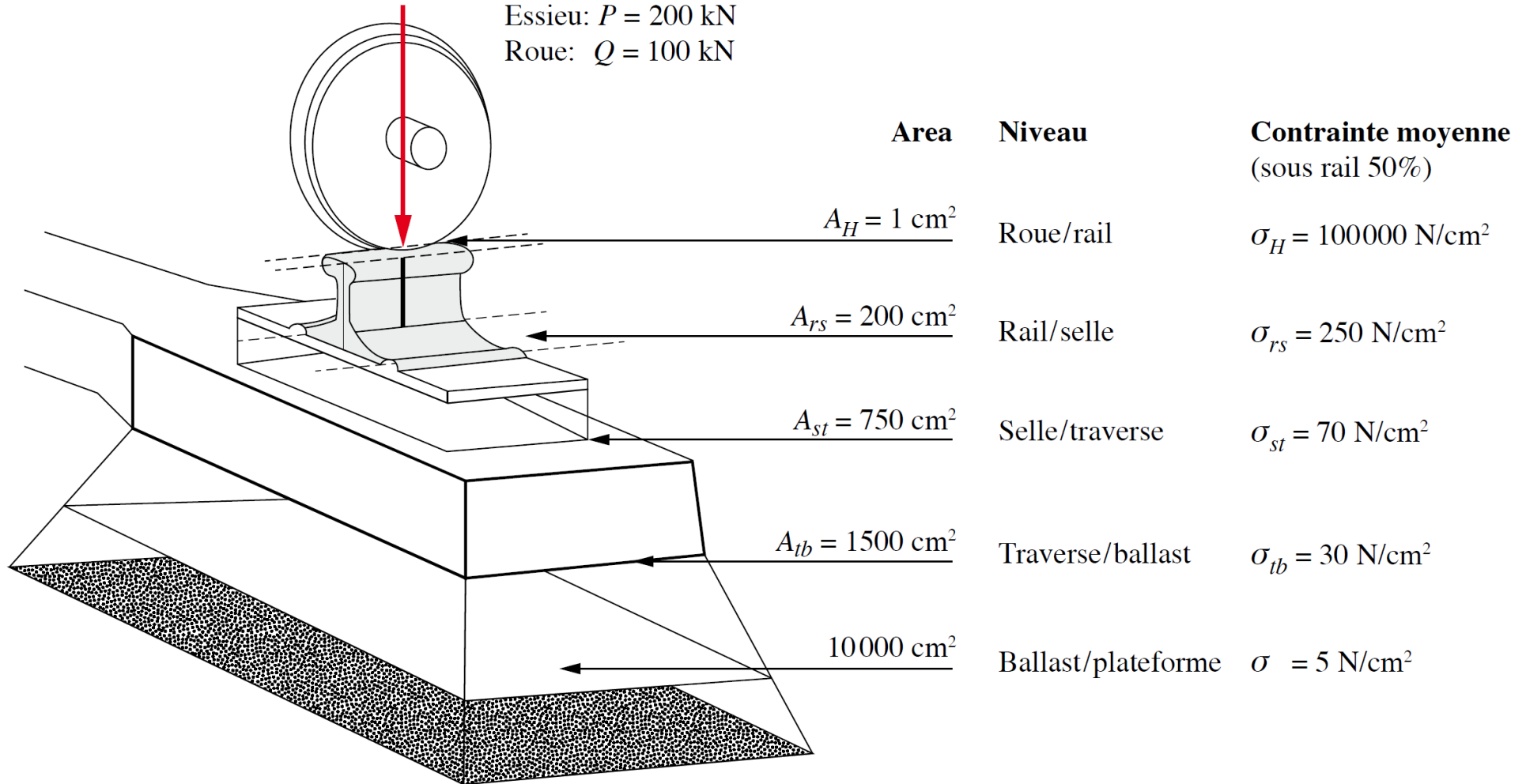
- ▶ **Grandes exigences de construction**
 - ▶ Remblais de très haute qualité
 - ▶ Précision de construction de la voie
- ▶ **Moindre flexibilité pour toute modification future du tracé**
- ▶ **En cas d'accident, réparation longue et difficile**
- ▶ **Soigner les transitions VB – VSB !**
- ▶ **1,5 à 2 fois plus cher qu'une VB**

Charges sur la voie



Répartition des charges

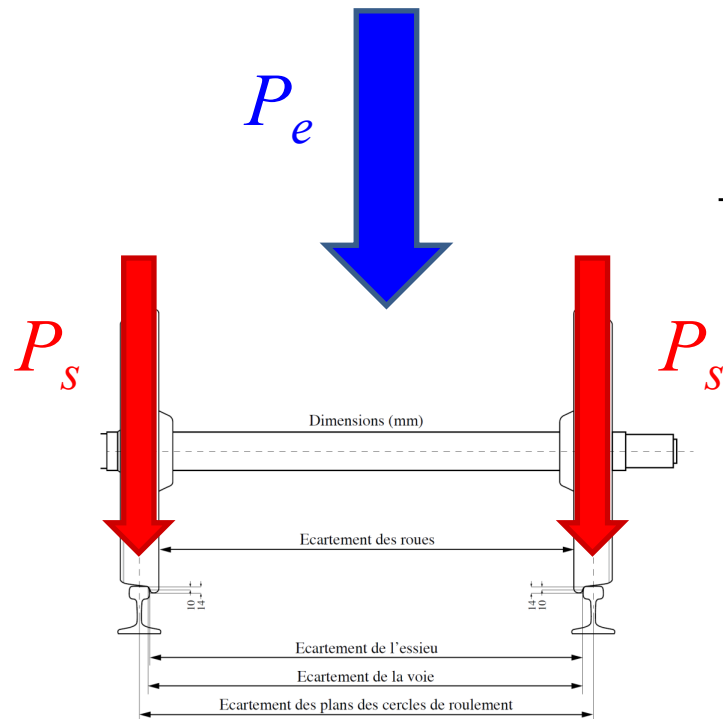
Essieu: $P = 200 \text{ kN}$
Roue: $Q = 100 \text{ kN}$



Charge utilisée pour le dimensionnement

► Charge par essieu

$$P_e = 2 \cdot P_s$$



Type de train	Nombre d'essieux	Charge par essieu (kN)
Tramway	4	70
Train de service	4	120
Locomotive	4 ou 6	215
Wagon marchandise	2 ou 4	225
Train lourd (USA, Australie, Brésil)	2 ou 4	250 à 375

Exemples

▶ 200 kN / essieu



▶ 225 kN / essieu



Charge utilisée pour le dimensionnement

$$P = \varphi \cdot P_s$$

P	Charge utilisée pour le dimensionnement (kN)
P_s	Charge de roue (kN), déterminée par la moitié de la charge par essieu
φ	Coefficient de l'impact dynamique (> 1)

Charge utilisée pour le dimensionnement

► Coefficient de l'impact dynamique φ

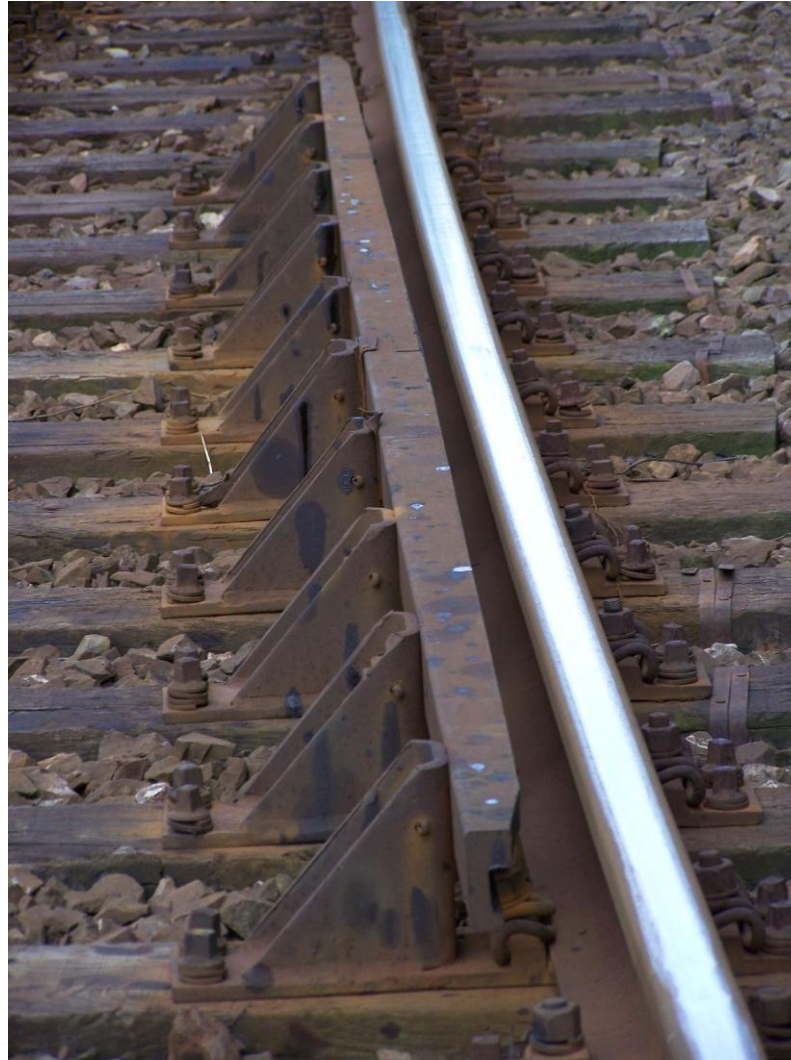
Méthode	Formule pour déterminer φ	Méthode	Formule pour déterminer φ
AREMA – American Railway Engineering and Maintenance Association	$1 + 5,21 \cdot \frac{V}{D}$	ORE – Office of Research and Experiments of the International Union of Railway	$1,29 + 0,04 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^3$
DB – Deutsche Bahn	$1 + \frac{V^2}{3 \cdot 10^4} \quad (V < 100 \text{ km/h})$	WMATA – Washington Metropolitan Area Transit Authority	$(1 + 3,86 \cdot 10^{-5} \cdot V^2)^{0,67}$
Driessen	$1 + \frac{4,5V^2}{3 \cdot 10^5} - \frac{1,5V^3}{10^7} \quad (V > 100 \text{ km/h})$	Inde	$1 + \frac{V}{58,14 \cdot k^{0,5}}$
Afrique du Sud	$1 + 4,92 - \frac{V}{D}$		
Clarke	$1 + \frac{19,65 \cdot V}{D \cdot k^{0,5}}$		

V : vitesse (km/h)

D : diamètre des roues (mm)

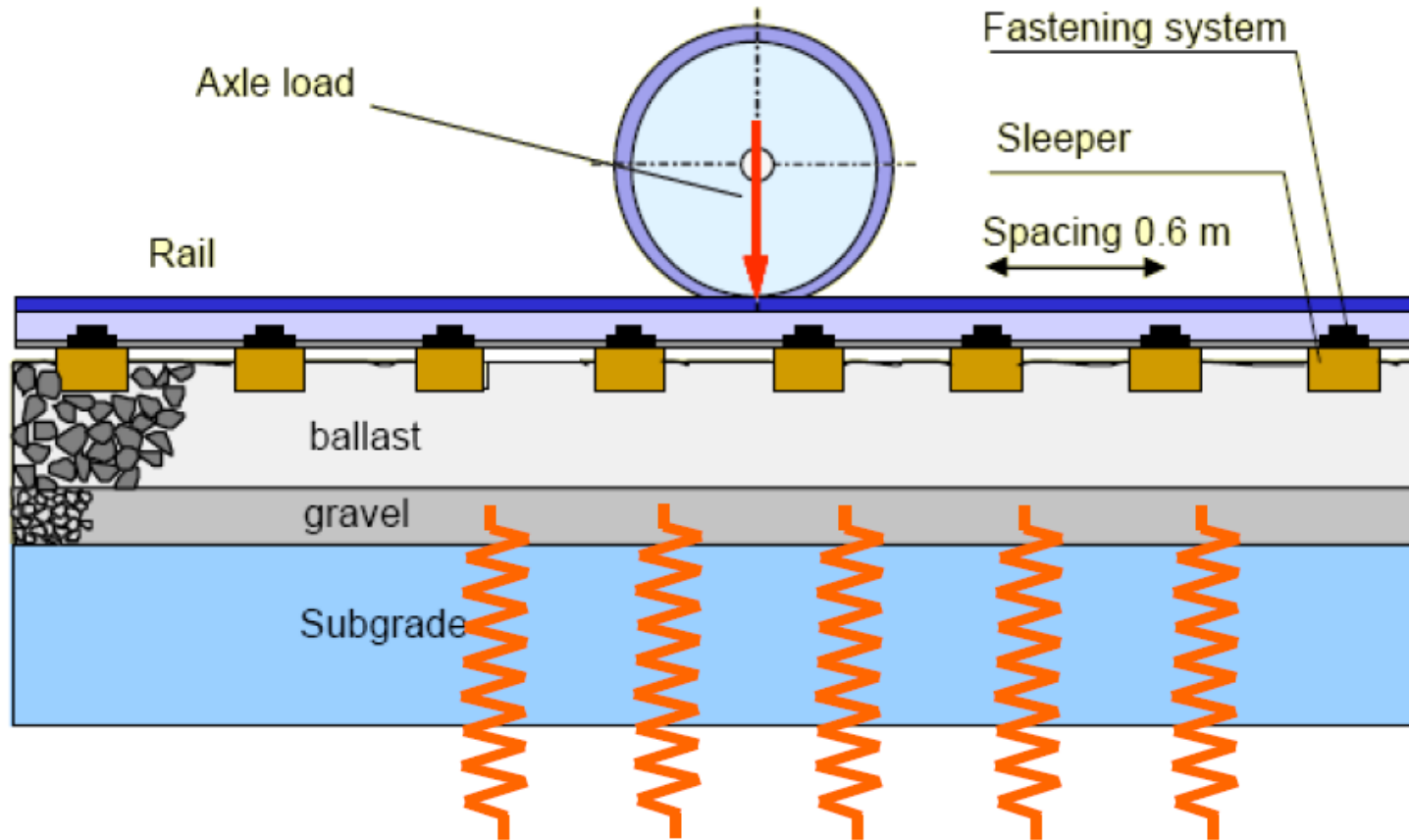
k : coefficient (–)

Dimensionnement du rail



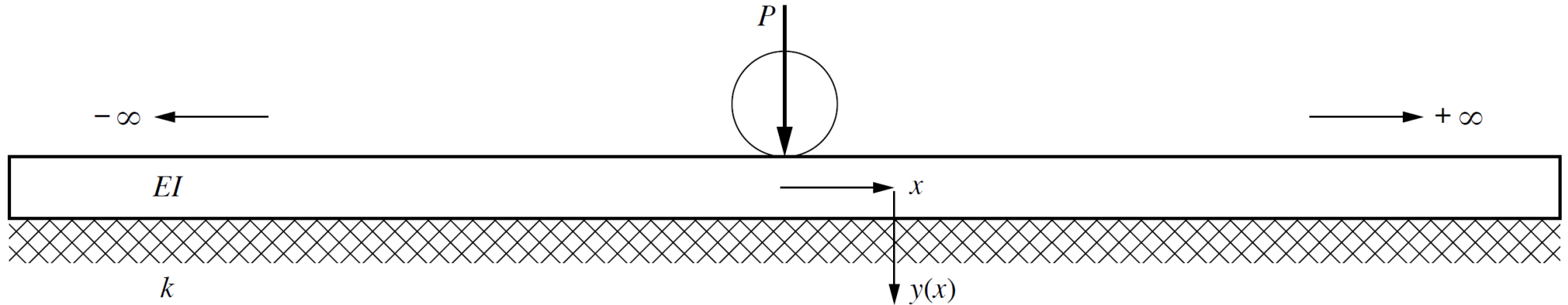
Poutre continue sur une fondation élastique

► Charge ponctuelle



Poutre continue sur une fondation élastique

► Winkler & Zimmerman 1867



$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky(x) = q(x)$$

$y(x)$	déflexion à la position x (m)
$q(x)$	charge verticale distribuée (kN/m)
E	module de Young du rail (MPa)
I	moment d'inertie du rail (mm^4)
EI	rigidité en flexion du rail
k	rigidité de la fondation (MPa)

Poutre continue sur une fondation élastique

► Charge ponctuelle P

► Déflexion du rail

$$y_x = \frac{P\beta e^{-\beta x}}{2k} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

Rigidité relative β (Talbot)

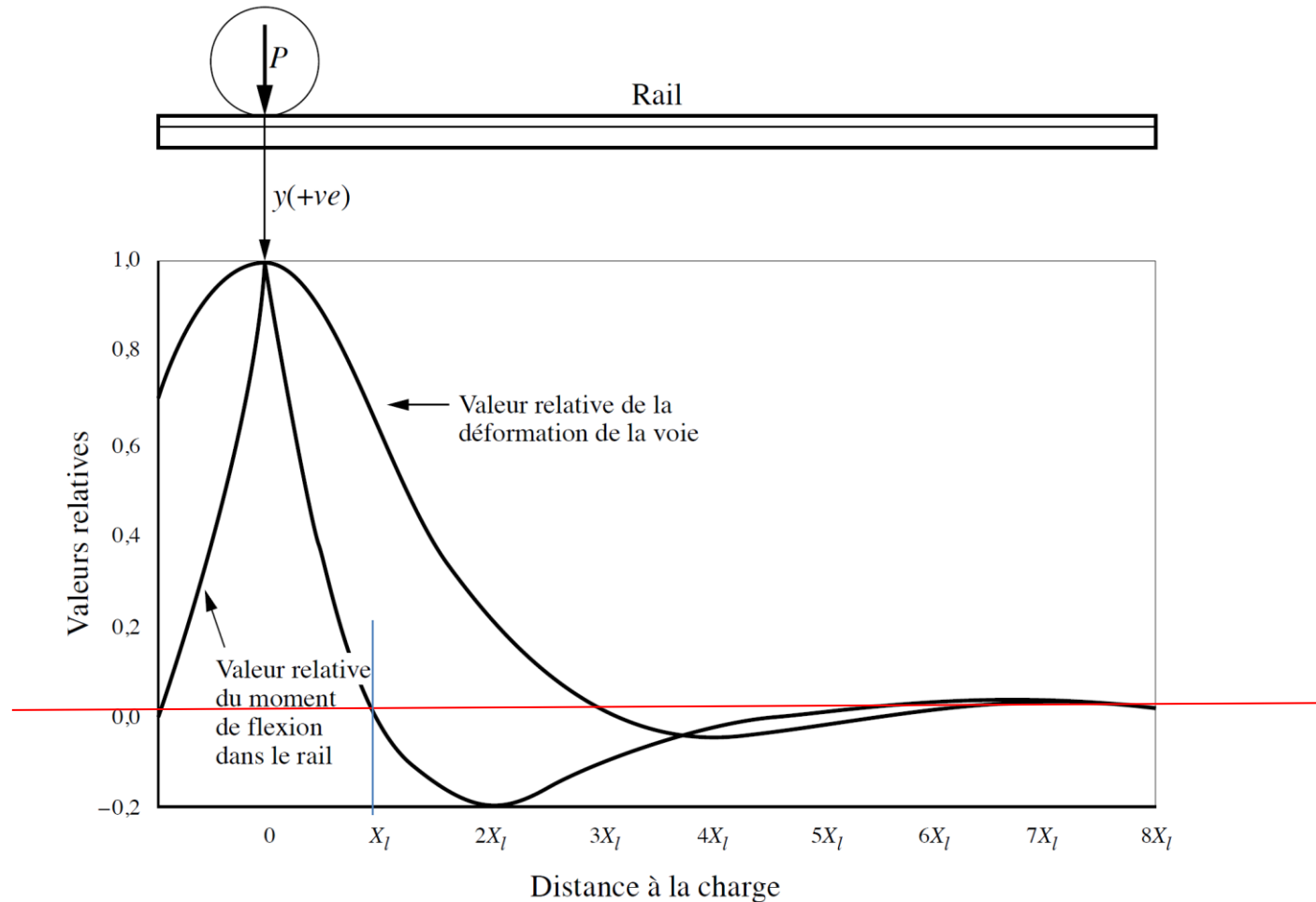
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

► Moment de flexion du rail

$$M_x = \frac{Pe^{-\beta x}}{4\beta} (\cos \beta x - \sin \beta x)$$

Déflexion et Moment de flexion

► Action d'une charge P



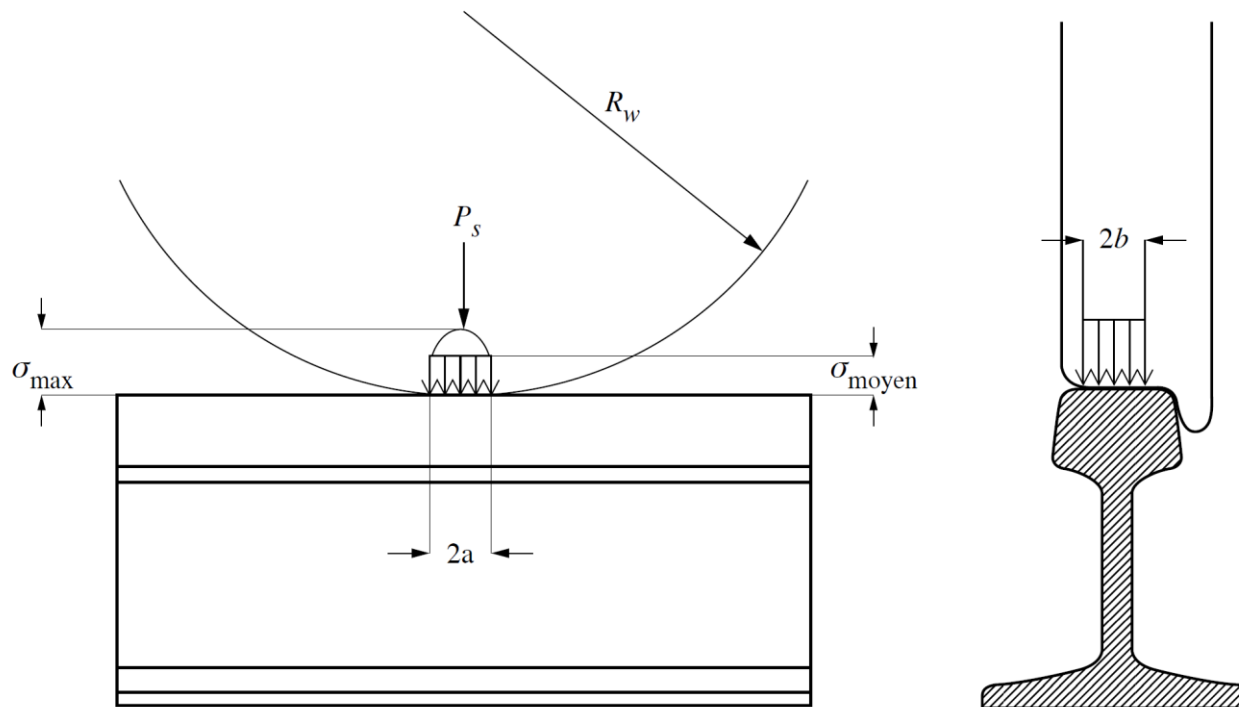
Hay 1953

Contrainte de cisaillement roue-rail

► Contrainte de cisaillement au point de contact

► Surface de forme elliptique

► Eisenmann : surface de contact rectangulaire $2a \cdot 2b$



Déflexion et moment de flexion maximaux

	Déflexion y (m)	Moment de flexion M (kNm)
Charge concentrée P (kN)	$y_0 = \frac{P\beta}{2k}$	$M_0 = \frac{P}{4\beta}$
Plusieurs charges P_i (kN)	$y_{max} = \sum_{i=0}^{i=n} P_{xi} \cdot B_{xi}$	$M_{max} = \sum_{i=0}^{i=n} P_{xi} \cdot A_{xi}$
	$B_{xi} = \frac{\beta \cdot e^{-\beta x_i}}{2k} (\cos \beta \cdot x_i + \sin \beta \cdot x_i)$	$A_{xi} = \frac{\beta \cdot e^{-\beta x_i}}{4\beta} (\cos \beta \cdot x_i - \sin \beta \cdot x_i)$

M_0 moment de flexion du rail

n nombre d'essieux adjacents, $i = 0$ correspond à l'essieu de référence

x_i distance de l'essieu de référence à l'essieu adjacent,

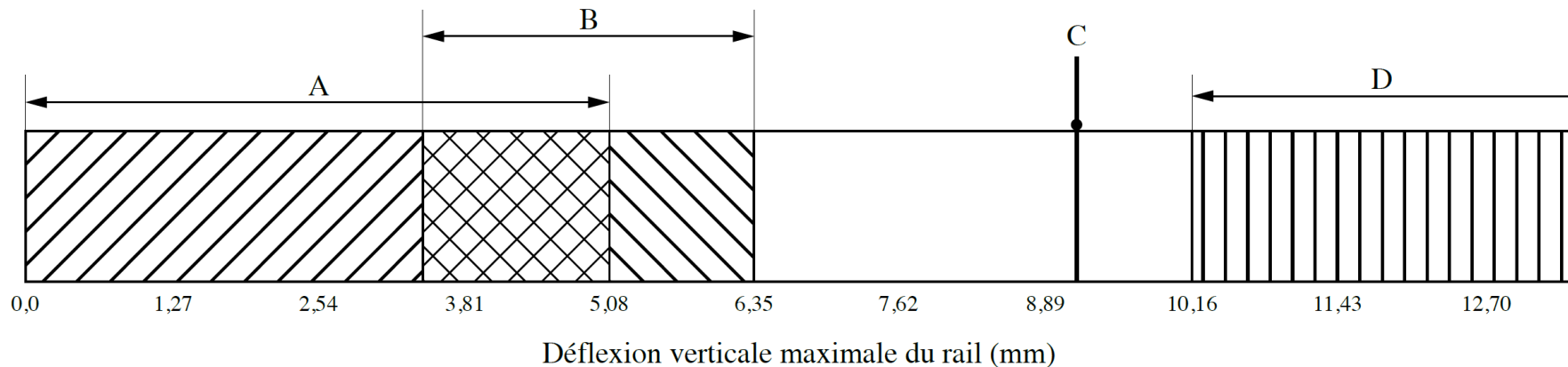
y déflexion du rail

P_{x_i} charge de dimensionnement à la position x_i

Déflexion admissible

▶ **AREA** 3,18 mm à 6,35 mm

▶ **Lundgren**



A pour la nouvelle voie

B pour la voie lourde en se basant sur la condition de flexibilité et rigidité

C pour la voie légère (poids du rail < 50 kg/m)

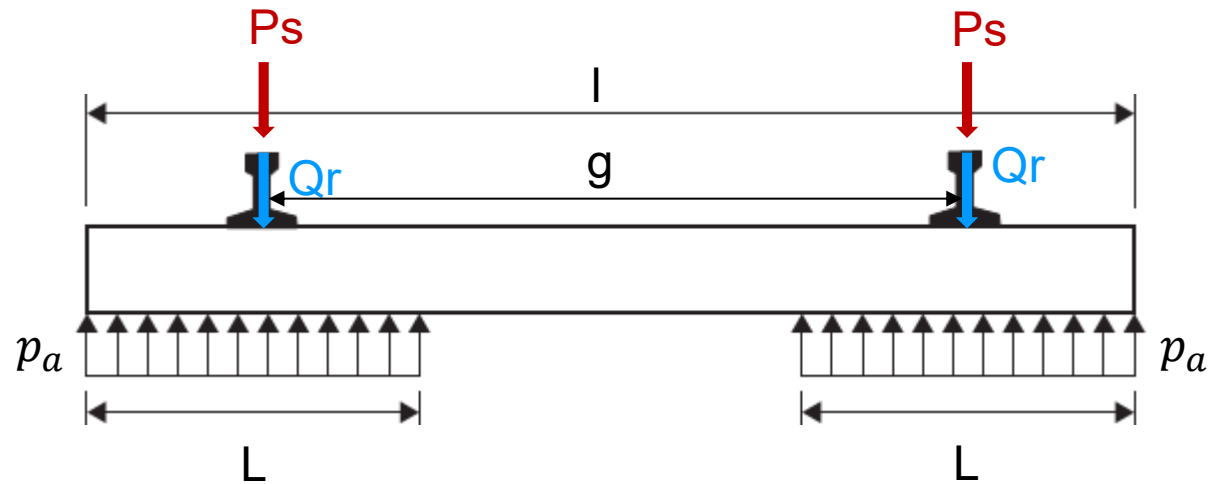
D pour la voie faible, mal entretenue, vite détériorée

Dimensionnement des traverses



Pression entre la traverse et le ballast

► Répartition des charges sous la traverse



$$p_a = \frac{Q_r}{BL} \cdot F_2$$

B	largeur de la traverse (m)
l	longueur de la traverse (m)
L	longueur effective de contact de la traverse sous le rail (m), par exemple : $L = l/3$ selon Clarke
F_2	facteur dépendant du type de traverse et de l'opérateur, par exemple : $F_2 = 2$ selon AREA
Q_r	charge transmise par le rail

Contrainte de flexion de la traverse

► Contrainte maximale

	Sous le rail	Au centre
Moment maximal de flexion (kNm)	$M_r = Q_r \cdot \frac{l-g}{2}$	$M_c = Q_r \cdot \frac{g}{2}$
Contrainte maximale de flexion (MPa)	$\sigma_r = \frac{M_r}{Z_r}$	$\sigma_c = \frac{M_c}{Z_c}$

- g distance entre les deux rails (m)
 l longueur de la traverse (m)
 Q_r charge transmise par le rail
 Z_c, Z_r moment statique de la traverse sous le rail, au centre (m³)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

STRAIL