

A high-speed train, likely a TGV, is shown in motion, blurred background, with text overlaid. The train is white with a blue stripe and is moving towards the viewer. The background is a blurred tunnel or track, suggesting high speed. The text is white and bold, centered over the train.

CIVIL-463.24

DYNAMIQUE FERROVIAIRE

Structure de la présentation

- ▶ **Intérêt de la dynamique ferroviaire**
- ▶ **Le véhicule ferroviaire**
- ▶ **Bases de la mécanique du mouvement**
- ▶ **Traction et freinage**
- ▶ **Forces résistantes**
- ▶ **Accélération et aptitude en rampe**

Dynamique ferroviaire

▶ Dynamique ferroviaire

- ▶▶ Relations entre le mouvement du véhicule ferroviaire et les forces qui provoquent ce mouvement

▶ Nécessité de la dynamique ferroviaire

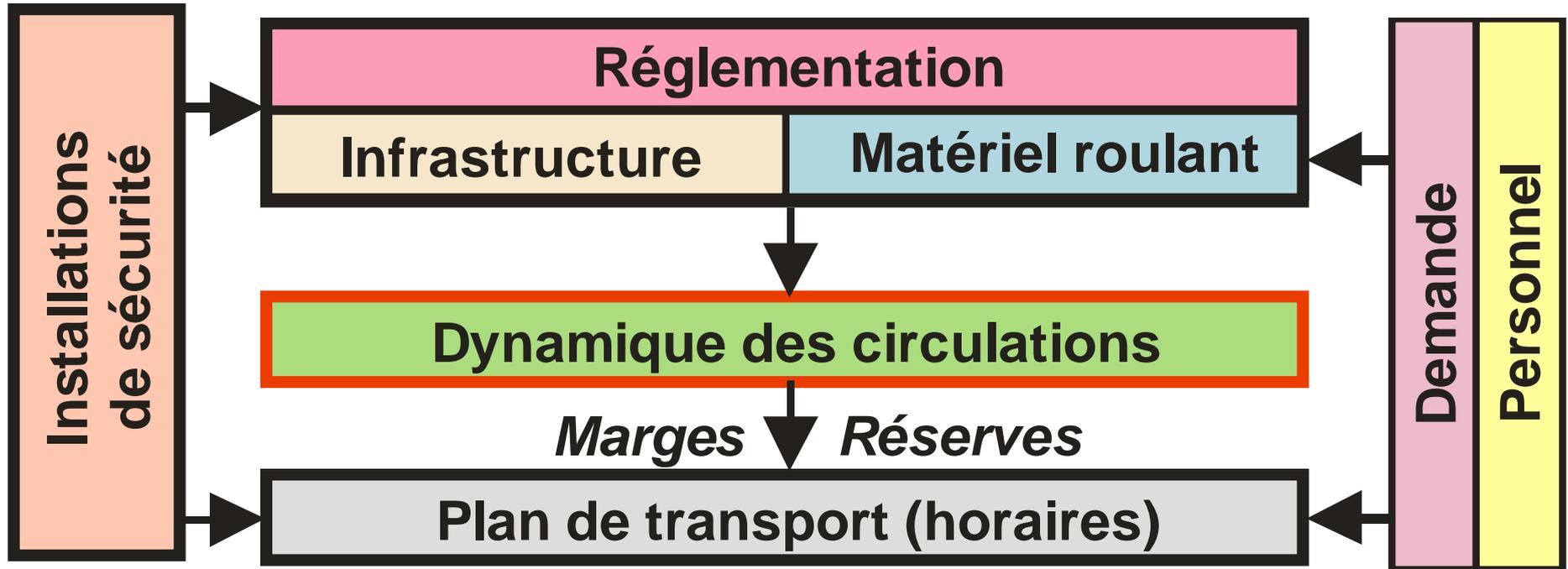
- ▶▶ Pour construire les horaires

- ▶▶ Pour déterminer l'usure de la voie

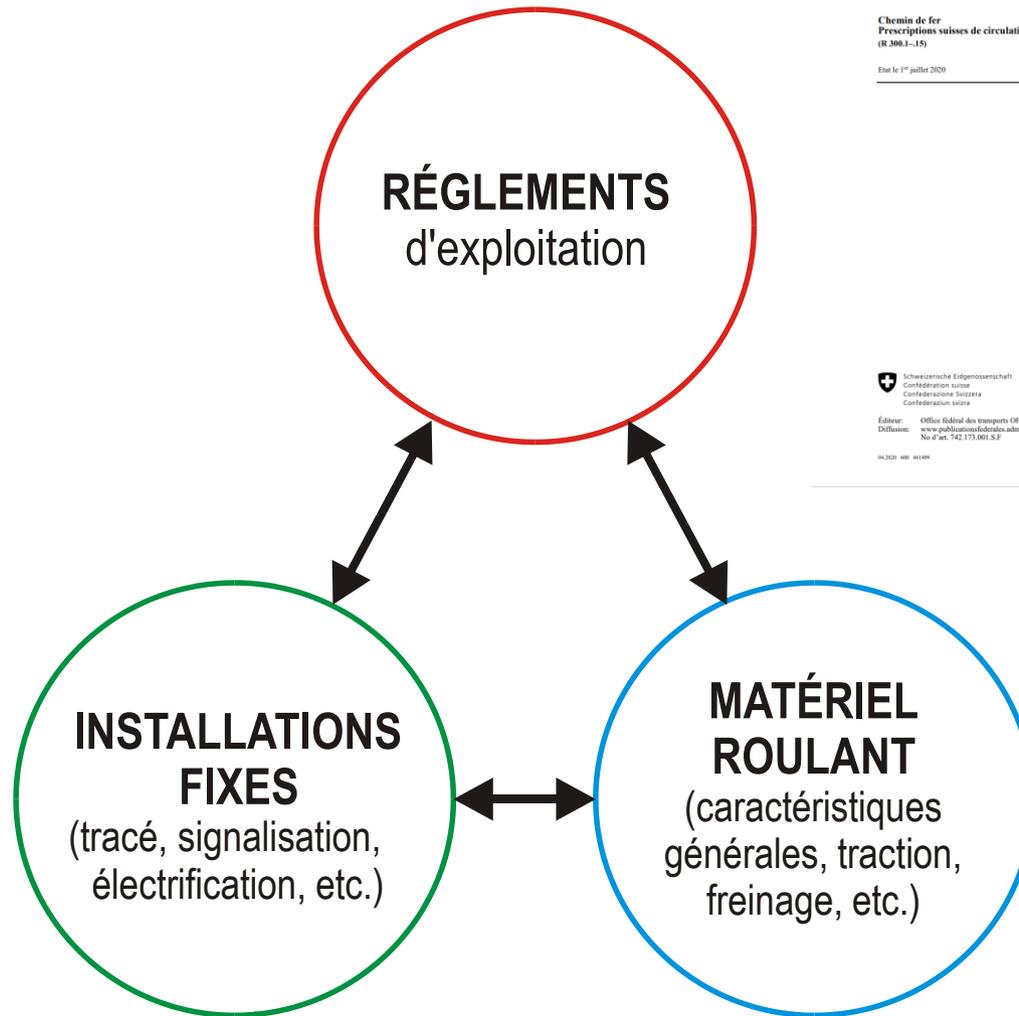
- ▶▶ Pour estimer le bruit

- ▶▶ Pour estimer la consommation d'énergie

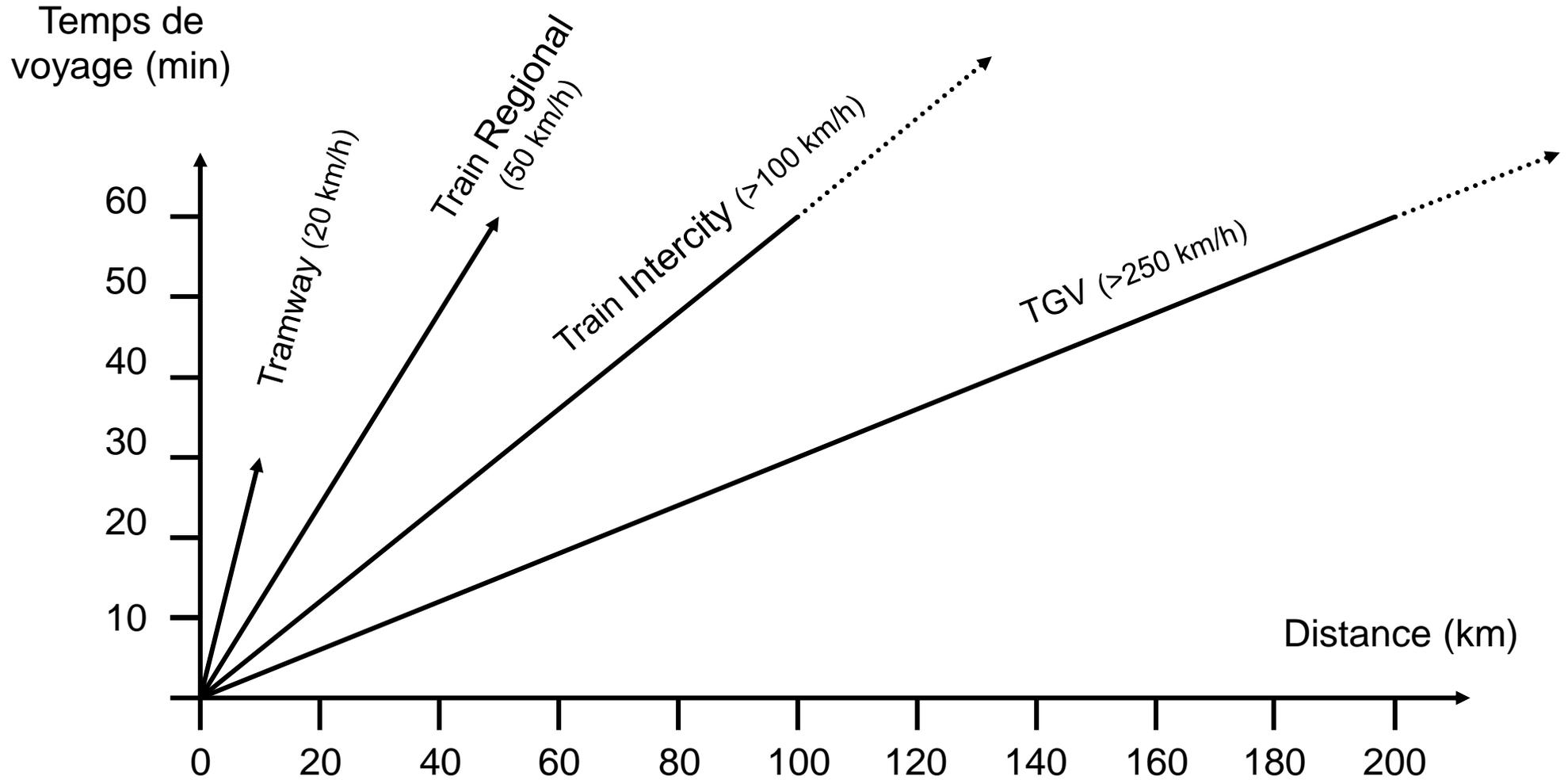
Construction des horaires



Données de base de la dynamique ferroviaire



A chaque type de train, son champ d'action



Matériels roulants adaptés à chaque besoin

Tramway



Source : snotpg

Sur voirie urbaine (R_{\min} , gabarit étroit)
 $L >$ bus (42 m), V_{\max} 80 km/h

Tram - train



Lien ville – campagne, normes 2 réseaux

Méto



Site propre intégral, gabarit large ou étroit
Grande capacité, V_{\max} 100 km/h

RER - Train régional



Source : CFF

Agglomération ou régions rurales
Capacité, accessibilité, V_{\max} 120-160 km/h

Train Intercity - RegioExpress



Source : CFF

Liaisons entres centres urbains
Confort, V_{\max} 140-160 km/h, 200-220 km/h

Train à Grande Vitesse



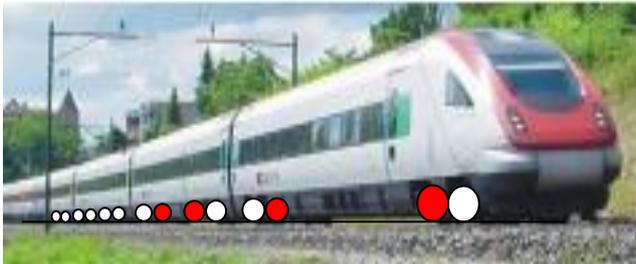
Liaisons grands centres urbains
 V_{\max} 250 à 320 km/h
Probl. aérodynamisme, bruit, ...

Définitions du matériel roulant ferroviaire

	Désignation	Spécification
Matériel moteur	Locomotive / Tracteur	Ne transporte ni voyageurs ni marchandises
	Automotrice	Peut transporter des personnes (alimentation primaire électrique)
	Autorail	Peut transporter des personnes (alimentation primaire thermique)
	Rame automotrice	Peut transporter des personnes (composée de plusieurs véhicules, certains pouvant être non moteurs)
Matériel remorqué	Rame tractée	Ensemble de véhicules non moteurs
	Voitures	Transport de personnes
	Fourgons	Transport de poste, colis, marchandises
	Wagons	Transport de marchandises, notamment en vrac ou encombrantes

Matériel roulant moteur

Rame automotrice RABDe500



Autorail X72500 (X-TER)



● Essieu moteur

○ Essieu porteur

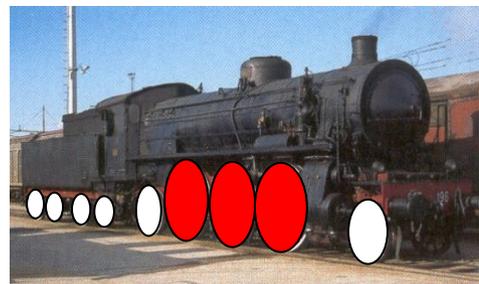
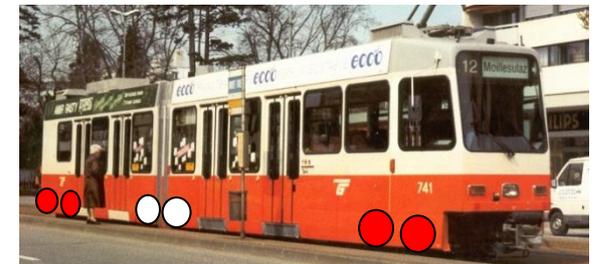
Motrice
Be4/6



Locomotive Re420 Bo'Bo'



Locotracteur



Locomotive + tender



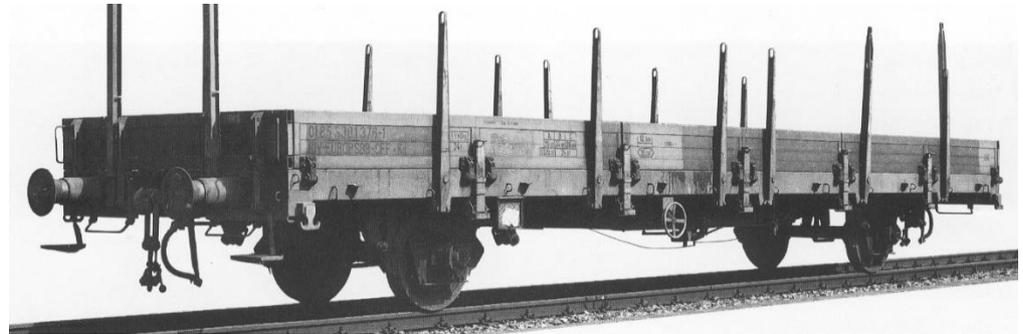
Draisine DU94

Matériel roulant remorqué

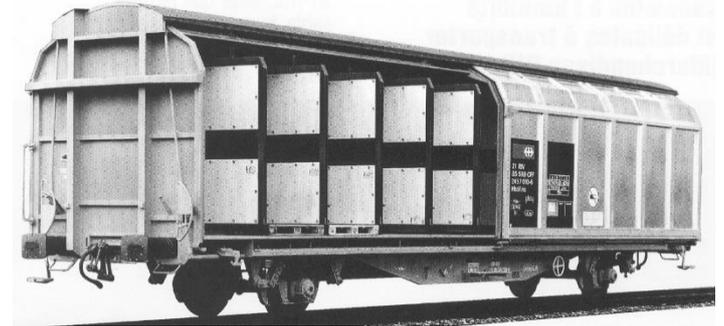


Voiture / Remorque / Voiture-pilote (2 bogies)

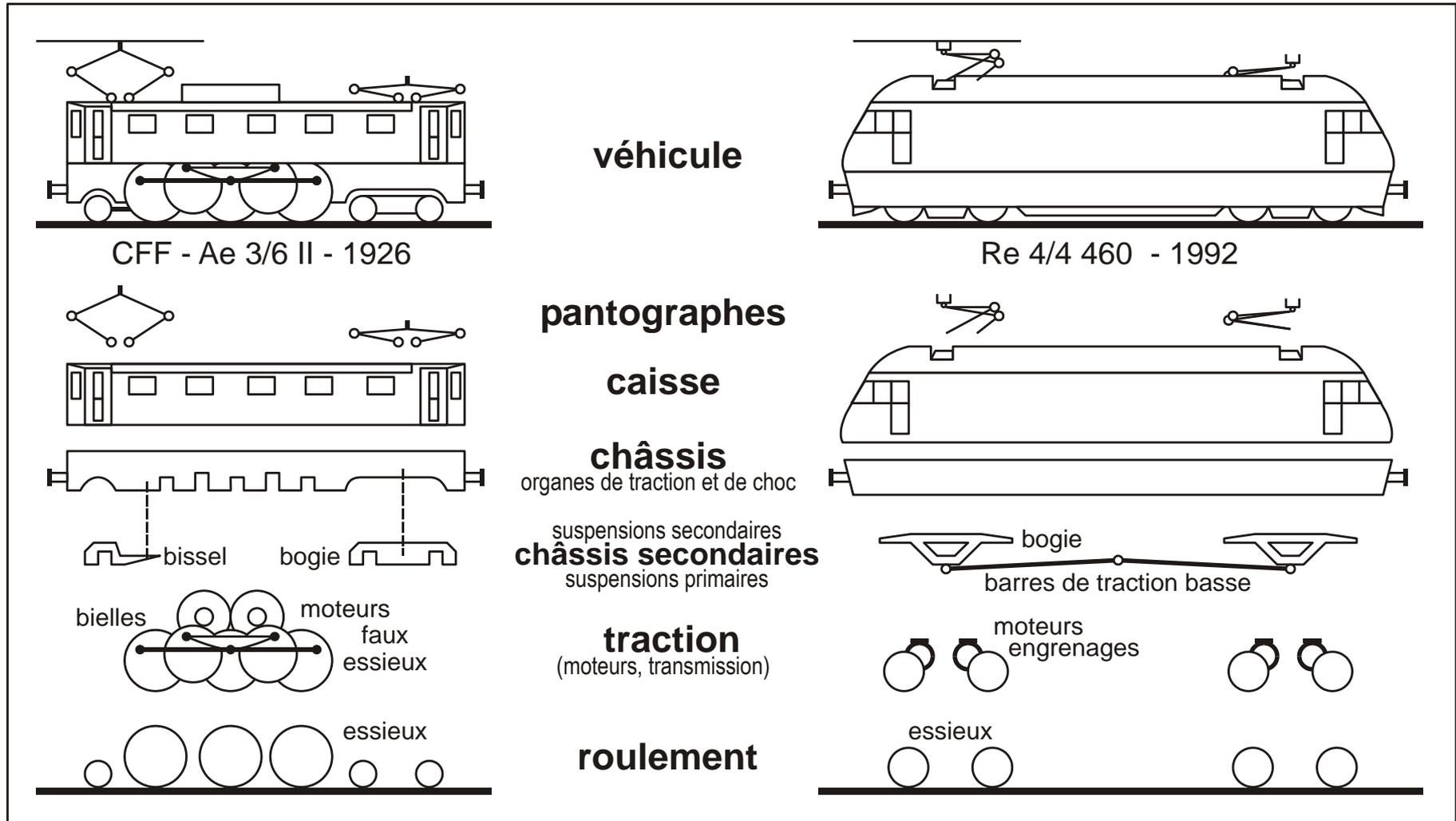
Wagons (2 essieux)



Wagon (2 bogies)



Dispositions constructives



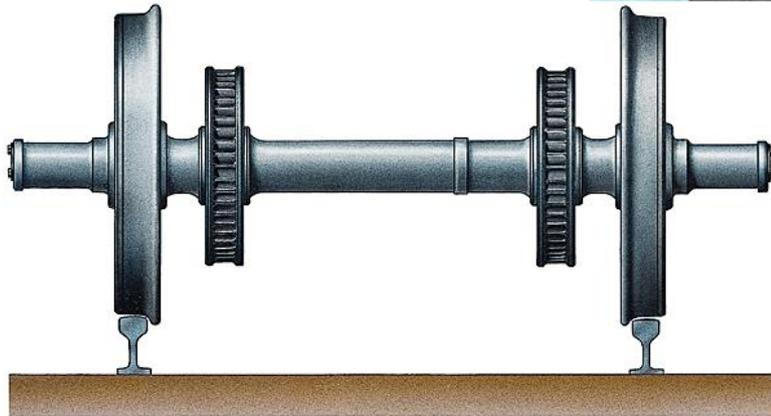
Dimensions

Matériel roulant	Longueur (m)
Véhicule moteur à 2-3 essieux	8 - 12
Wagon à 2 essieux	10 - 15
Véhicule moteur et wagon à 4 essieux (2 bogies)	13 - 20
Véhicule moteur à 6 essieux (2-3 bogies)	18 - 22
Voiture et automotrice à 4 essieux (2 bogies)	20 - 27
Rame automotrice à grande vitesse	200
Rame articulée à 2-3 éléments	30 - 50

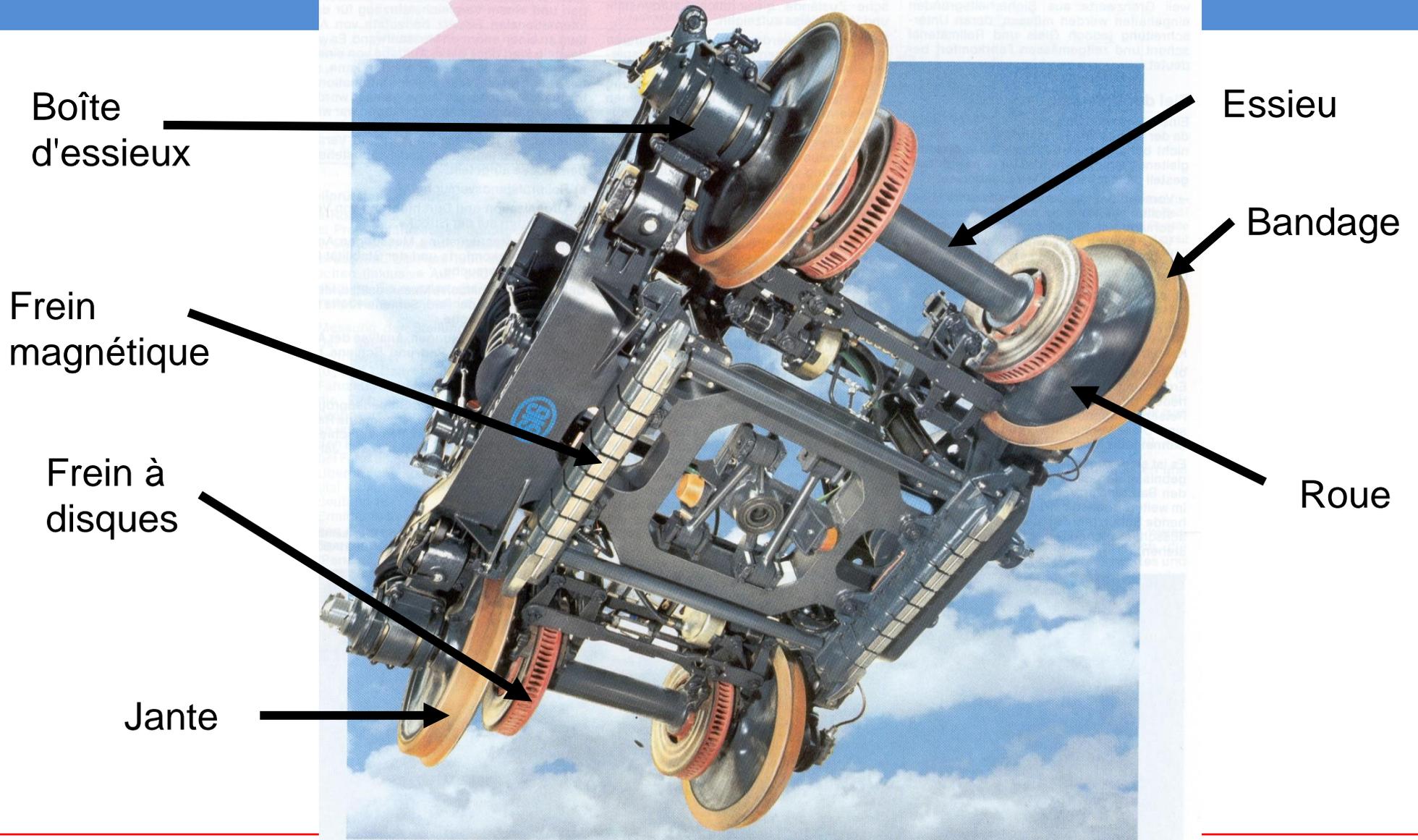
Essieux et roues ferroviaires



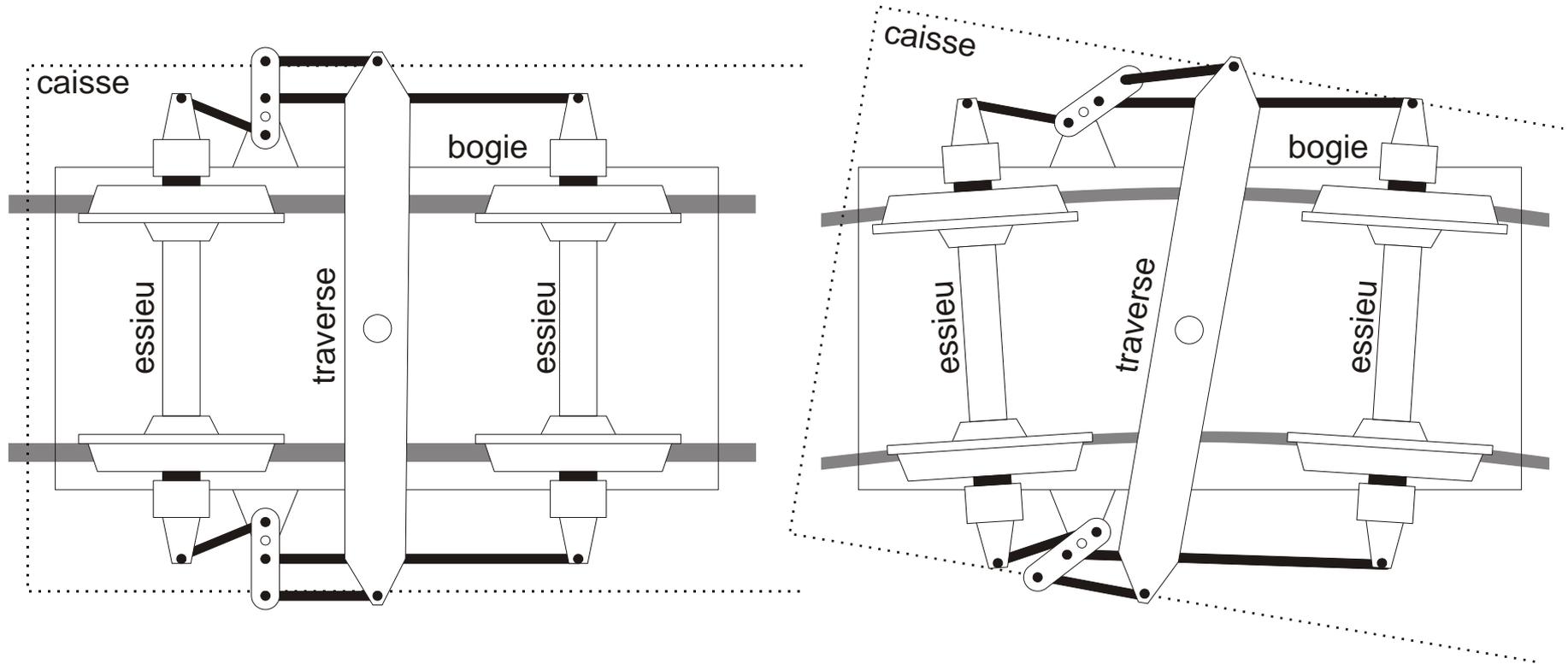
boudin
de la
roue



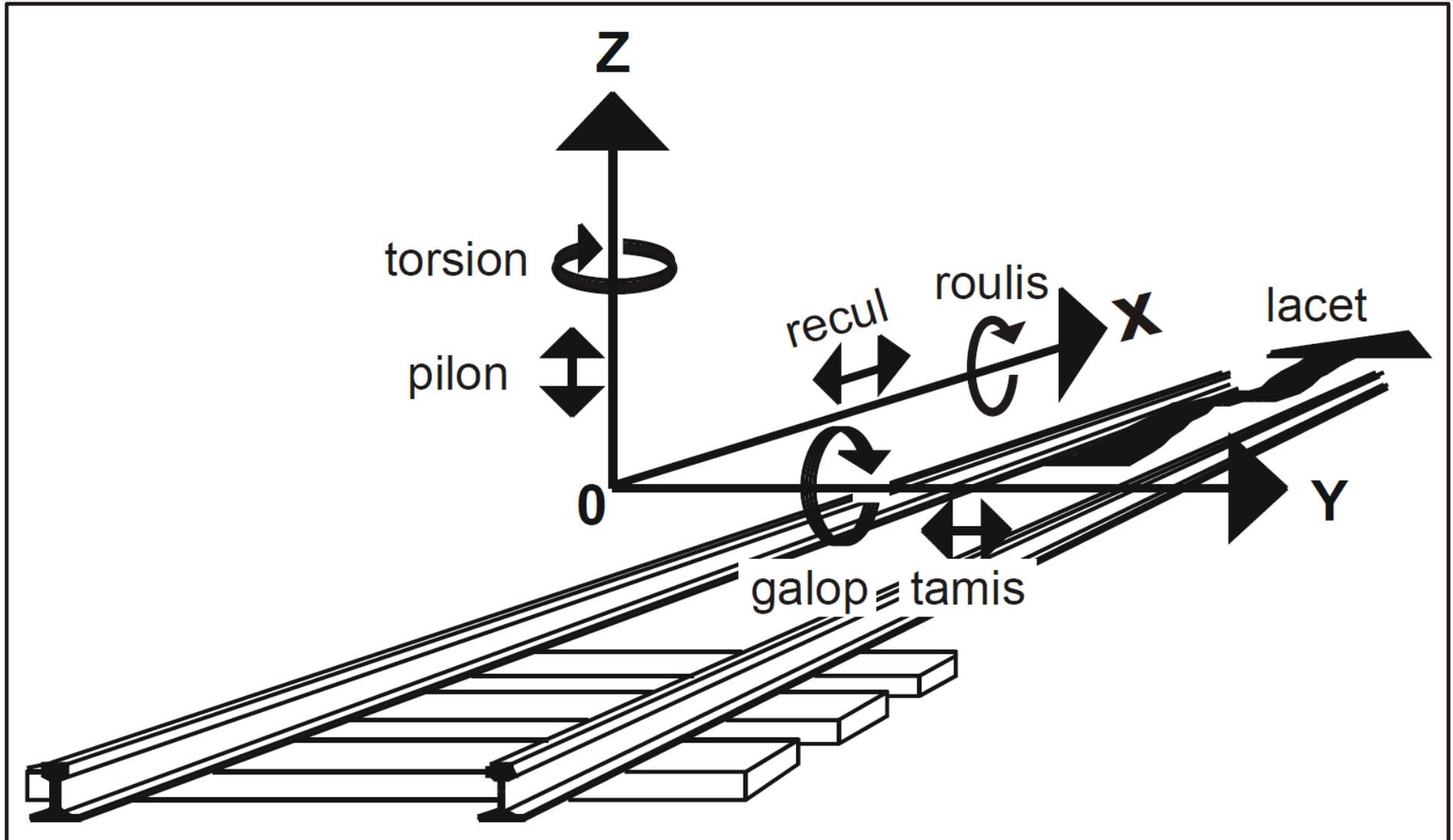
Bogies



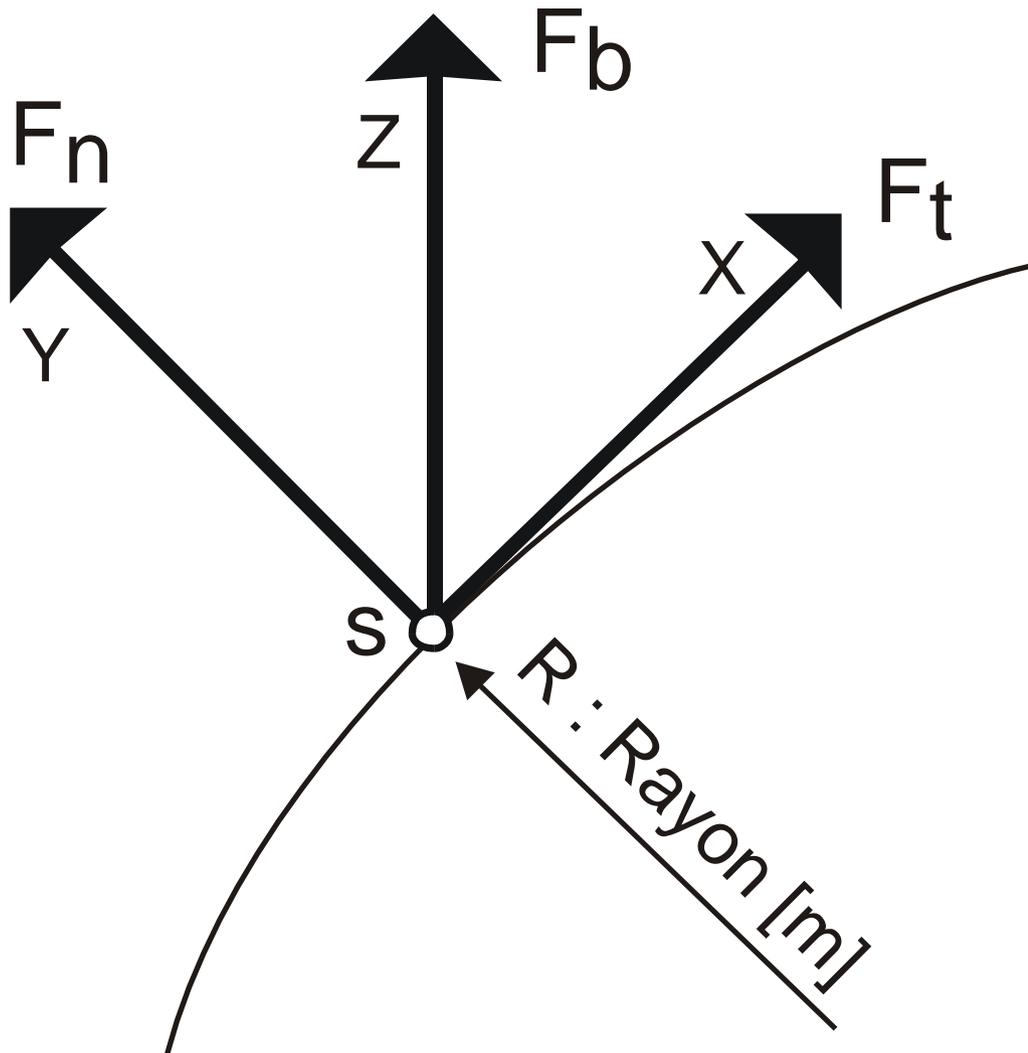
Bogies



Le mouvement ferroviaire et ses effets



Lois de la mécanique du mouvement



$$m' \cdot \frac{dv}{dt} = F_t(v, s)$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = F_n(v, s)$$

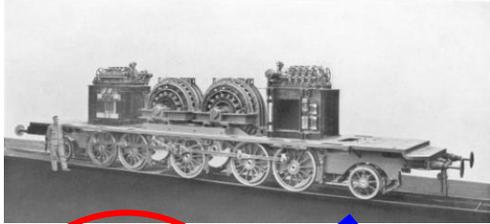
$$m \cdot g = -F_b(v, s)$$

Équation générale du mouvement principal

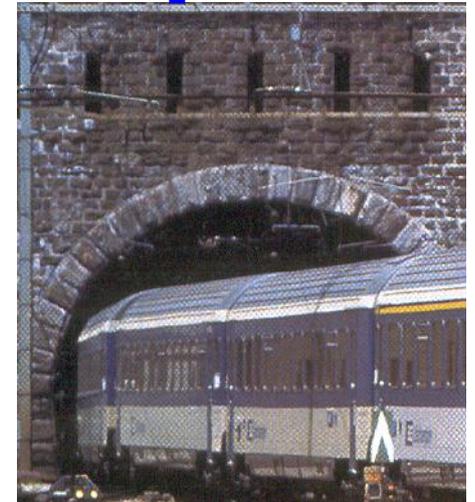
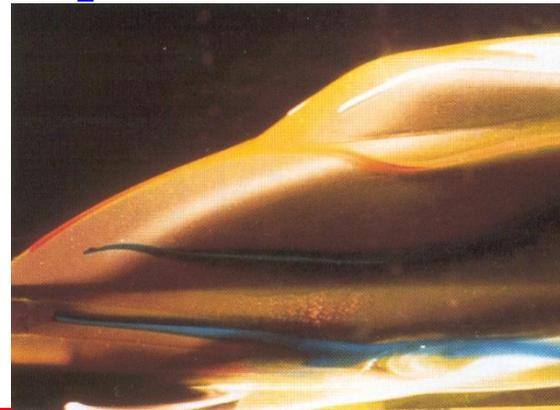
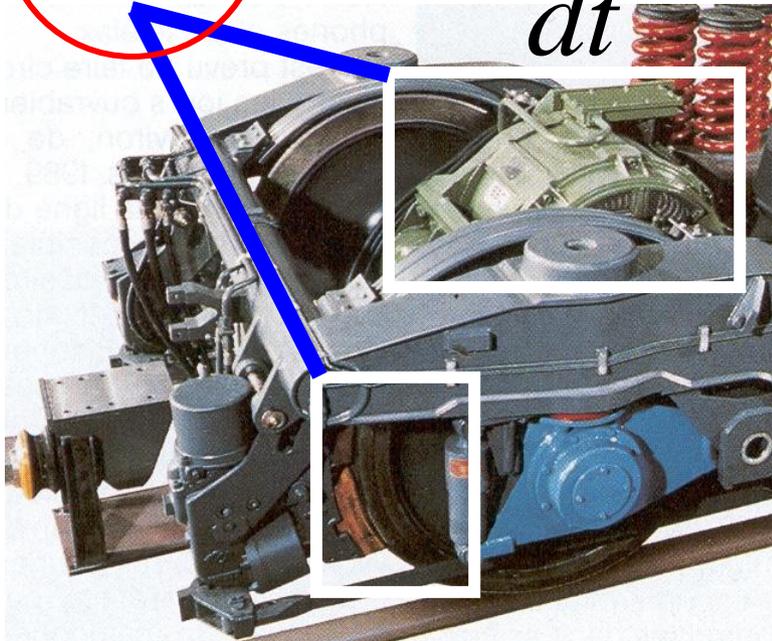
$$F_1(v) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$

- ▶ $F_1(v)$ force motrice
- ▶ $m' \cdot \frac{dv}{dt}$ résistance d'inertie
- ▶ $R_1(v)$ résistances à l'avancement → liées à la vitesse
- ▶ $R_2(s)$ résistances dues aux courbes et aux déclivités → liées à l'abscisse curviligne
- ▶ $R_t(v, s)$ résistances en tunnel → liées à la vitesse et l'abscisse

Équation générale du mouvement principal



$$F_1(v) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$



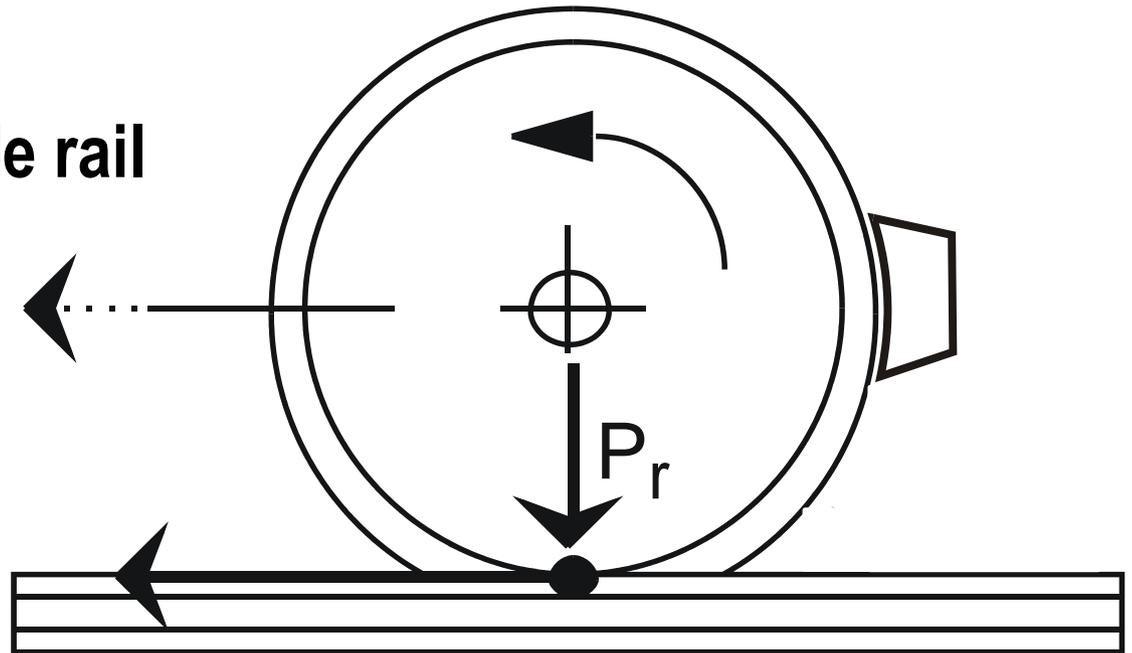
Coefficient d'adhérence f_r

► Condition de non-patinage

$$F_r \leq P_r \cdot f_r$$

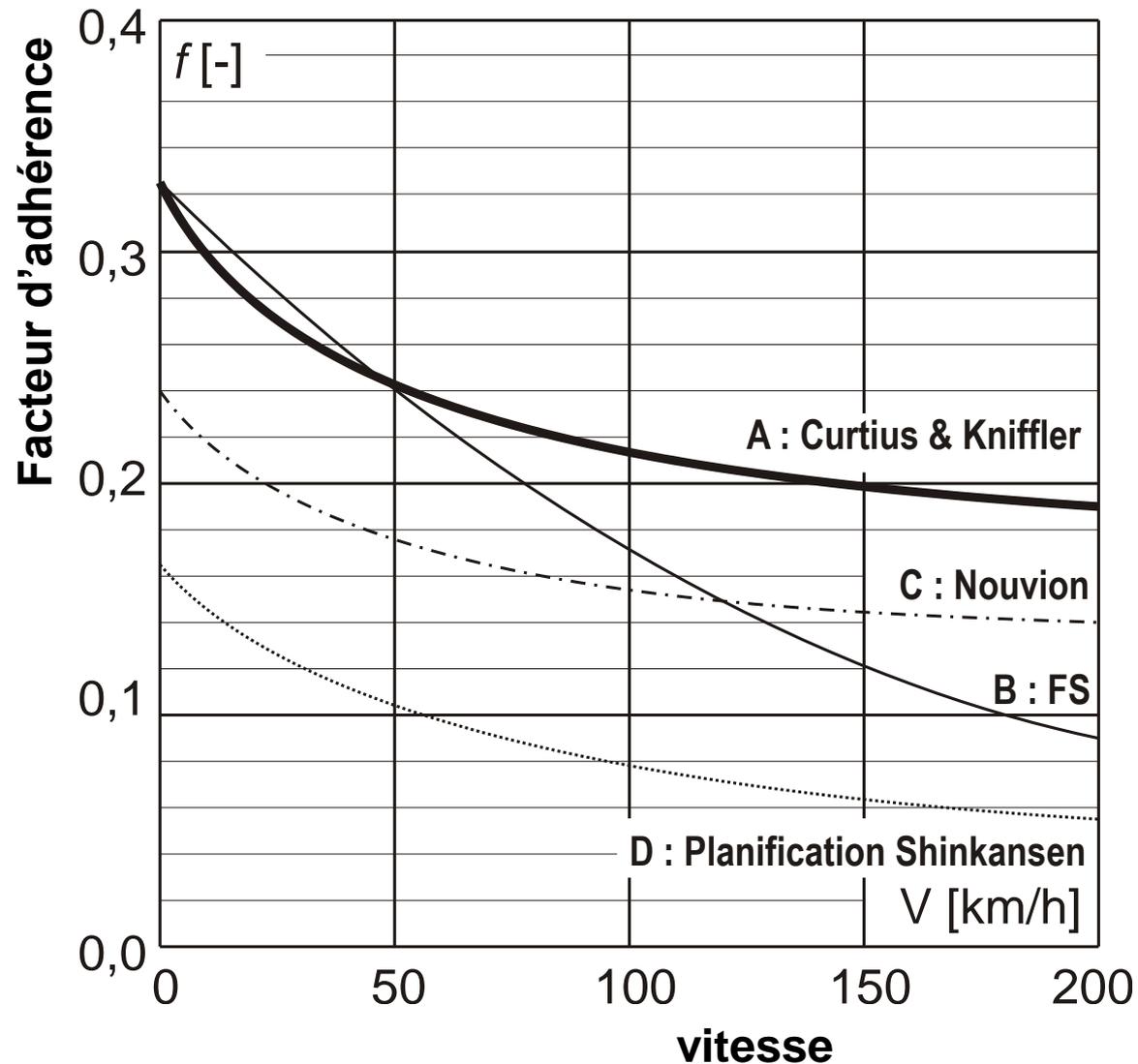
► Le coefficient d'adhérence f_r dépend de la charge sur la roue, de la vitesse, de la nature et de l'état de la surface du rail et du bandage de la roue.

► F_r Force de traction sur le rail



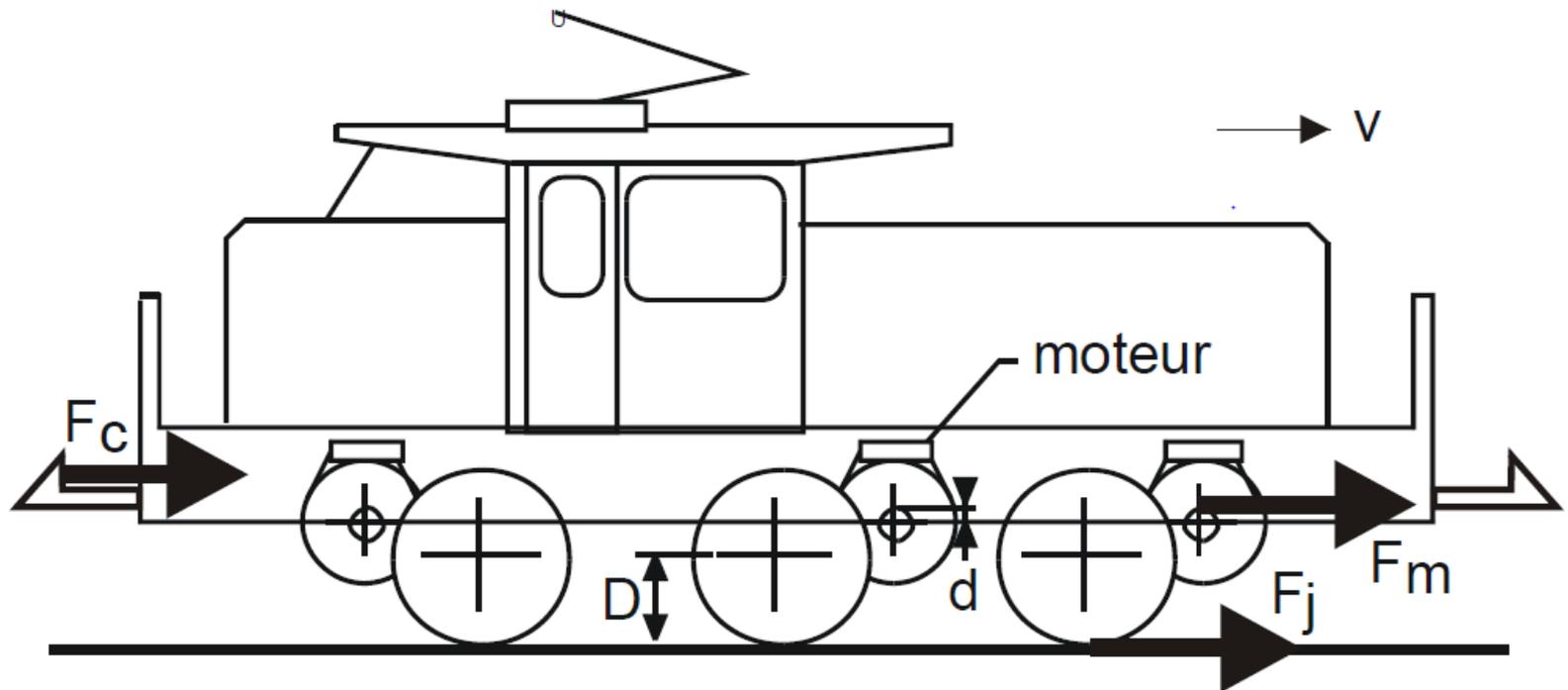
$$F_r \leq P_r \cdot f_r$$

Coefficient d'adhérence f_r en traction



Effort de traction

- ▶ $F_m(V)$ effort sur l'arbre moteur
- ▶ $F_j(V)$ effort à la jante
- ▶ $F_c(V)$ effort au crochet



Courbe caractéristique de traction Fv

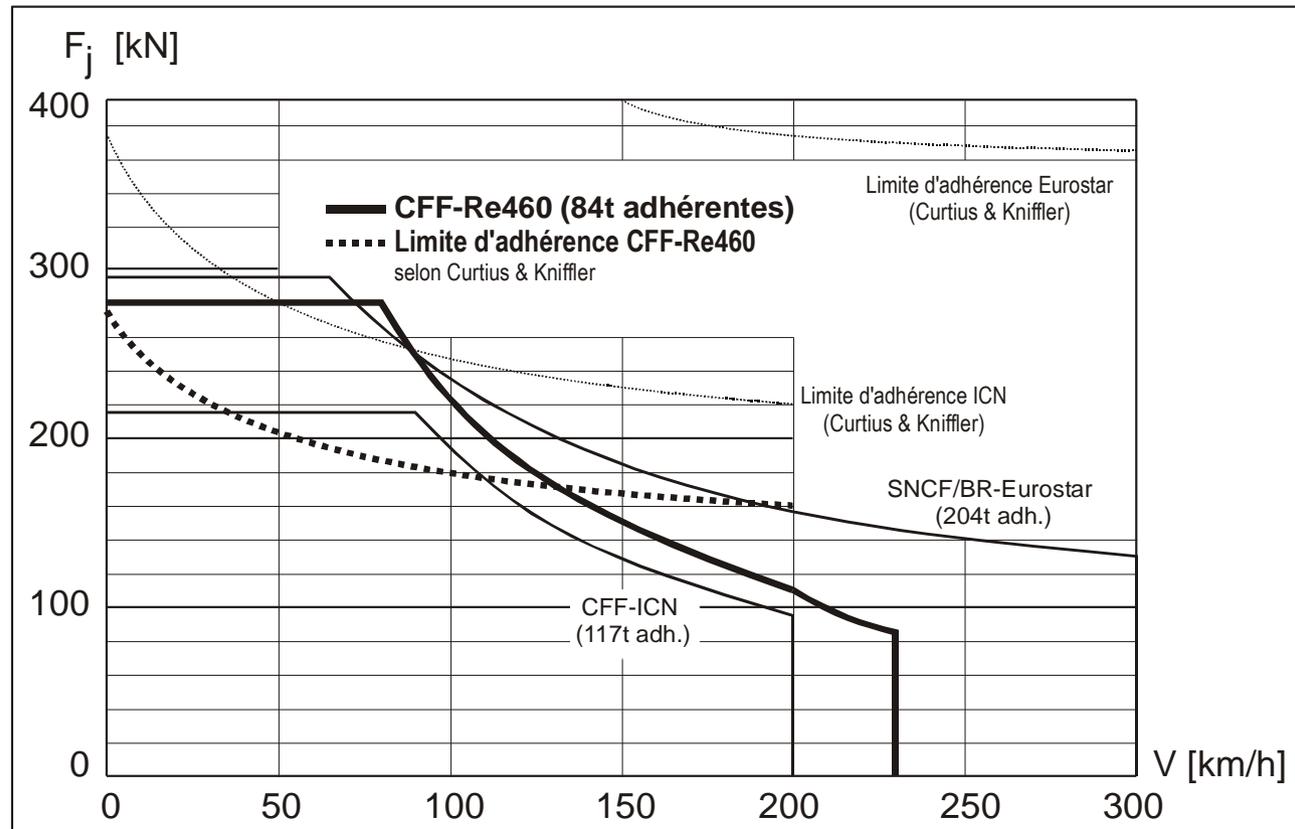
▶ Effort de traction maximal limité par les conditions d'adhérence

▶ Fonction de la vitesse

▶ Puissance disponible

▶▶ $P = F \cdot V$

▶▶ $kW = kN \cdot m/s$



Freinage

► Condition de non-blocage de la roue

$$Q \leq \frac{P_r \cdot f_r}{\varphi}$$

P_r charge de la roue [kN]

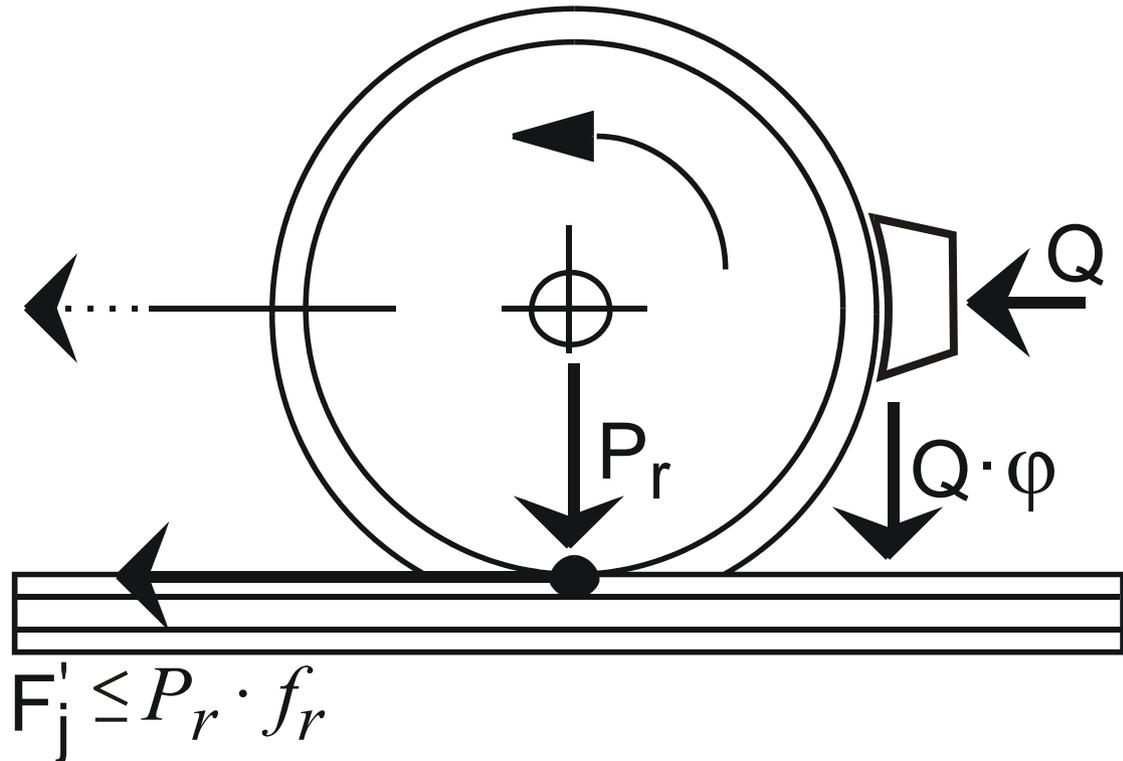
Q force d'application des sabots sur la roue [kN]

φ coefficient de frottement bandage acier/sabot de frein en fonte grise [-]

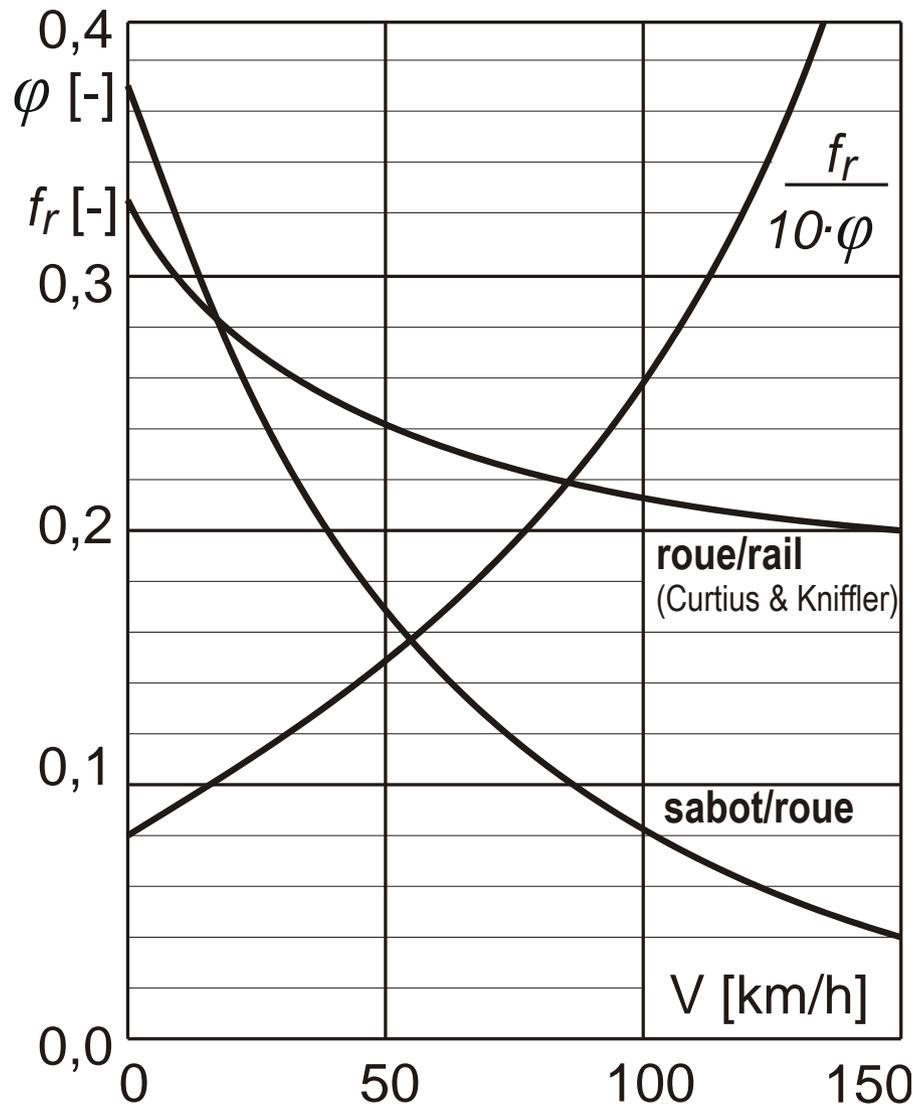
f coefficient de frottement bandage acier/rail sec (coefficient d'adhérence) [-]

$Q \cdot \varphi$ force de freinage [-]

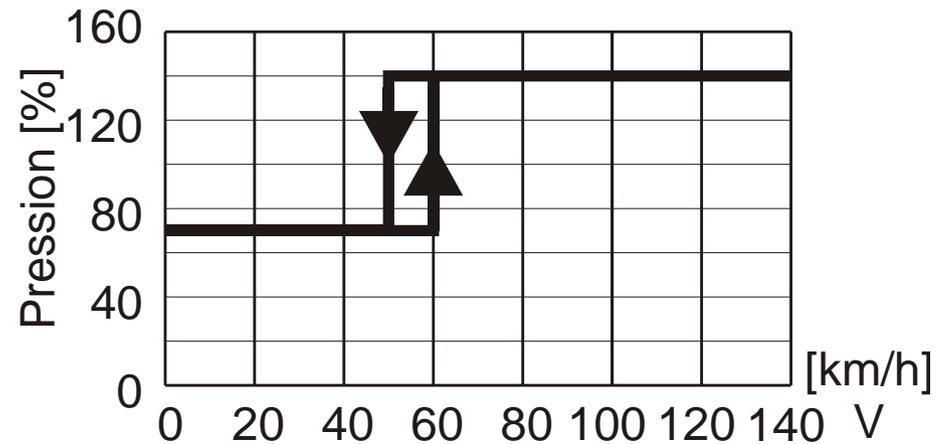
$P_r \cdot f_r$ limite d'adhérence [kN]



Coefficient d'adhérence en freinage



$$Q \leq \frac{P_r \cdot f_r}{\varphi}$$



Décélérations moyennes usuelles

Catégories de convois	Décélération moyenne de service [m/s ²]
Tram, Métro, RER	1,0 – 1,2
Trains voyageurs	0,6 – 0,8
Trains marchandises et de service	0,3 – 0,6

Résistance totale à l'avancement

Résistances
générales (v)

Résistances
locales (s)

$$R_{av}(v, s) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$

Résistance spécifique

▶ Résistance spécifique r_i

▶ Résistance divisée par le poids du véhicule ou du convoi ferroviaire

▶ Exprimée en N / kN

▶ Correspond à ‰ → s'assimile à une déclivité

▶ Domaine ferroviaire → déclivités en ‰ plutôt qu'en %

▶ $R_i = r_i \cdot m \cdot g$ m en tonnes, R_i en N

$$N = \frac{N}{kN} \cdot 1'000 \cdot kg \cdot \frac{m}{s^2} = \frac{N}{kN} \cdot 1'000 \cdot N$$

Résistance d'inertie

$$R_{av}(v, s) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$

$$m' \frac{dv}{dt} = \xi \cdot m \frac{dv}{dt} \quad \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right] = [N]$$

m, m' masse et masse d'inertie du convoi (kg)
 ξ facteur d'inertie adimensionnel → tient compte des masses tournantes

Résistance spécifique à l'inertie

▶ $r_i = 100 \cdot \zeta \cdot \frac{dv}{dt}$ (‰)

▶ r_i **Rrésistance spécifique due à l'inertie** (N/kN ou ‰)

▶ ζ **facteur d'inertie adimensionnel**

Valeurs du facteur d'inertie ζ

Type de chemin de fer	Véhicules	ζ (-)
A adhérence	Locomotives	1,10 – 1,20
	Automotrices	1,08 – 1,14
	Voitures	1,06 – 1,09
	Wagons vides	1,08 – 1,10
	Wagons chargés	1,03 – 1,04
	Trains complets	1,06 – 1,10
A crémaillère	Locomotives	1,50 – 3,50
	Automotrices	1,30 – 2,50

Résistance spécifique au roulement / frottement

- ▶ $r_{rf} = \alpha = \text{constante (‰)}$
- ▶ α **résistance spécifique au roulement = constante**
 - ▶▶ 1,5 ‰
 - ▶▶ TGV : peut être inférieure à 1 ‰

Résistance spécifique due aux chocs

▶ $r_{ch} = \beta \cdot V$ (‰)

▶ r_{ch} **résistance spécifique due aux chocs**

▶ V **vitesse (km/h)**

▶ β **coefficient de choc**

▶▶ 0,003 à 0,01 (‰ / km/h)

Résistance spécifique à l'air

▶ $r_{air} = \gamma \cdot V^2$ (‰)

▶ r_{air} résistance spécifique due à l'air

▶ V vitesse (km/h)

▶ γ coefficient aérodynamique

Type de convoi	Spécificité	Coefficient aérodynamique γ [‰/(km/h) ⁻²]
Véhicules isolés	Locomotive Automotrices/Autorails	0,00030 – 0,00060 0,00040 – 0,00090
Trains voyageurs courts	50 – 100 m	0,00030 – 0,00050
Trains voyageurs longs	> 150 m TGV	0,00020 – 0,00030 0,00013 – 0,00014
Trains marchandises longs	wagons vides wagons chargés	0,00050 – 0,00060 0,00015 – 0,00020

Résistance spécifique générale à l'avancement

$$R_{av}(v, s) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$

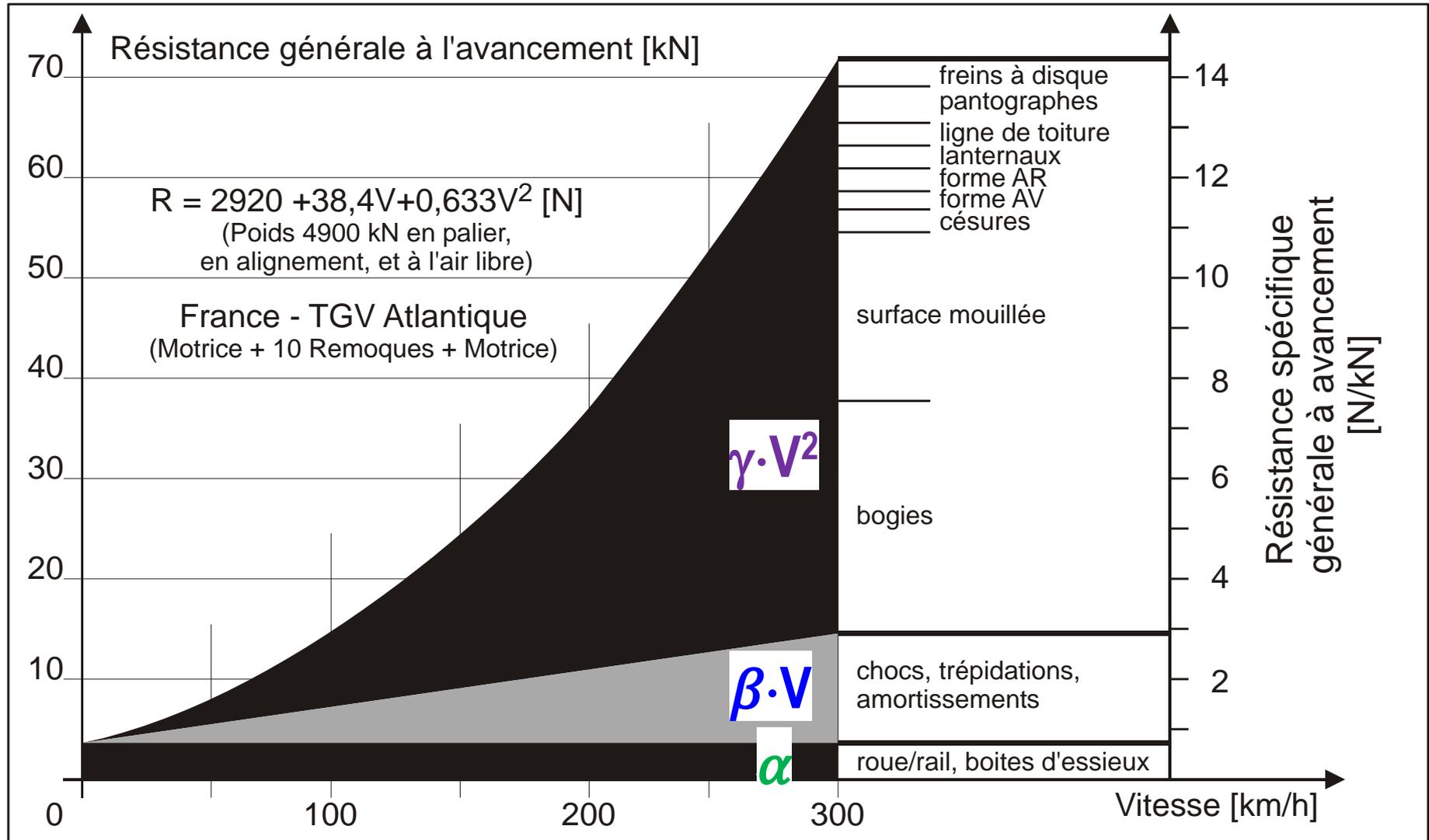
Formule de Davis : $r_1 = \alpha + \beta \cdot V + \gamma \cdot V^2$

Roulement

Air

Chocs

Résistance spécifique générale à l'avancement



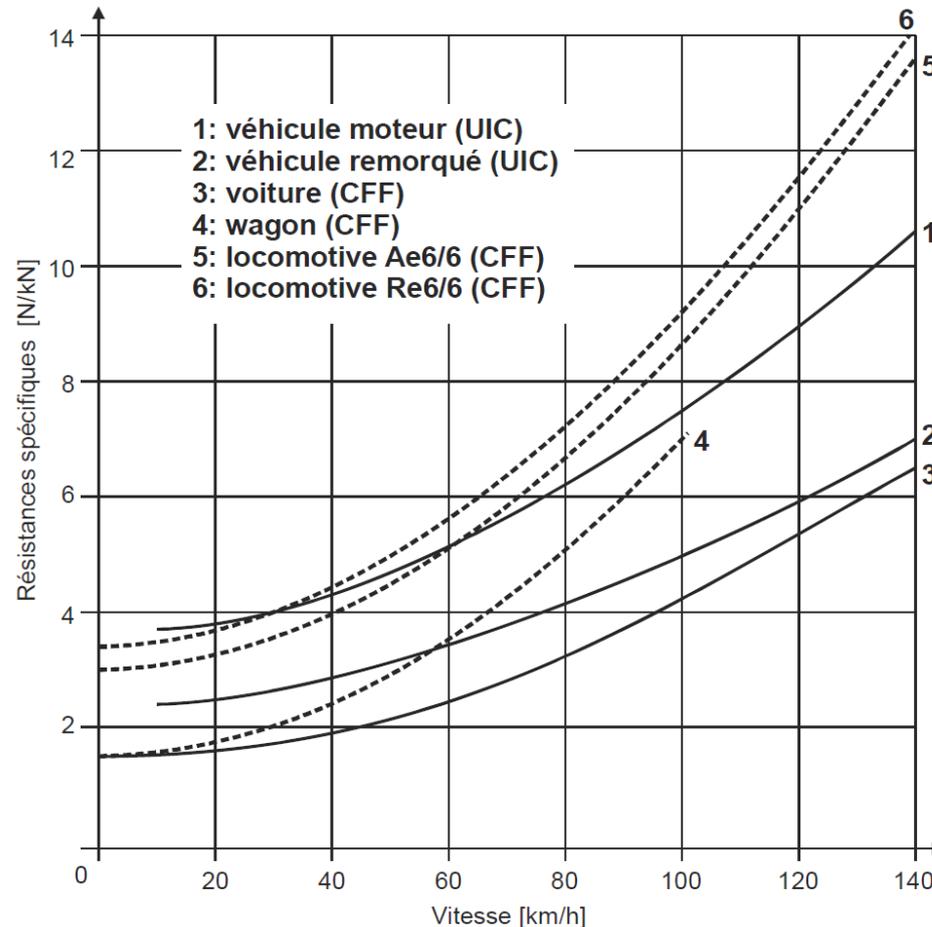
Résistance spécifique générale à l'avancement

- ▶ Absence de valeurs mesurées, pour un matériel roulant donné
- ▶ Valeurs à considérer selon CFF

	α [‰]	β [‰ / km/h]	γ [‰ / (km/h) ⁻²]
Locomotive	3.5	0,006	0,00059
Voitures voyageurs	1,5	0,003	0,00023
Wagons marchandises	1,5	0,003	0,00054

Résistance spécifique générale à l'avancement

► Valeurs proposées par l'UIC et les CFF



Résistances locales à l'avancement

$$F_1(v, v^2, s) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v, v^2) + R_2(s) + R_t(v, s)$$

Déclivités

Courbes

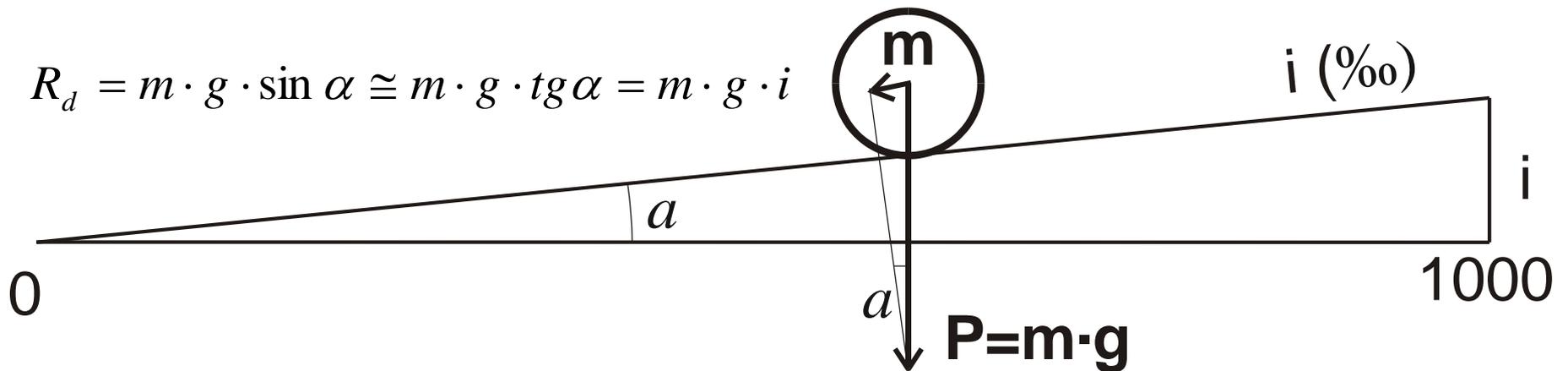
Tunnels



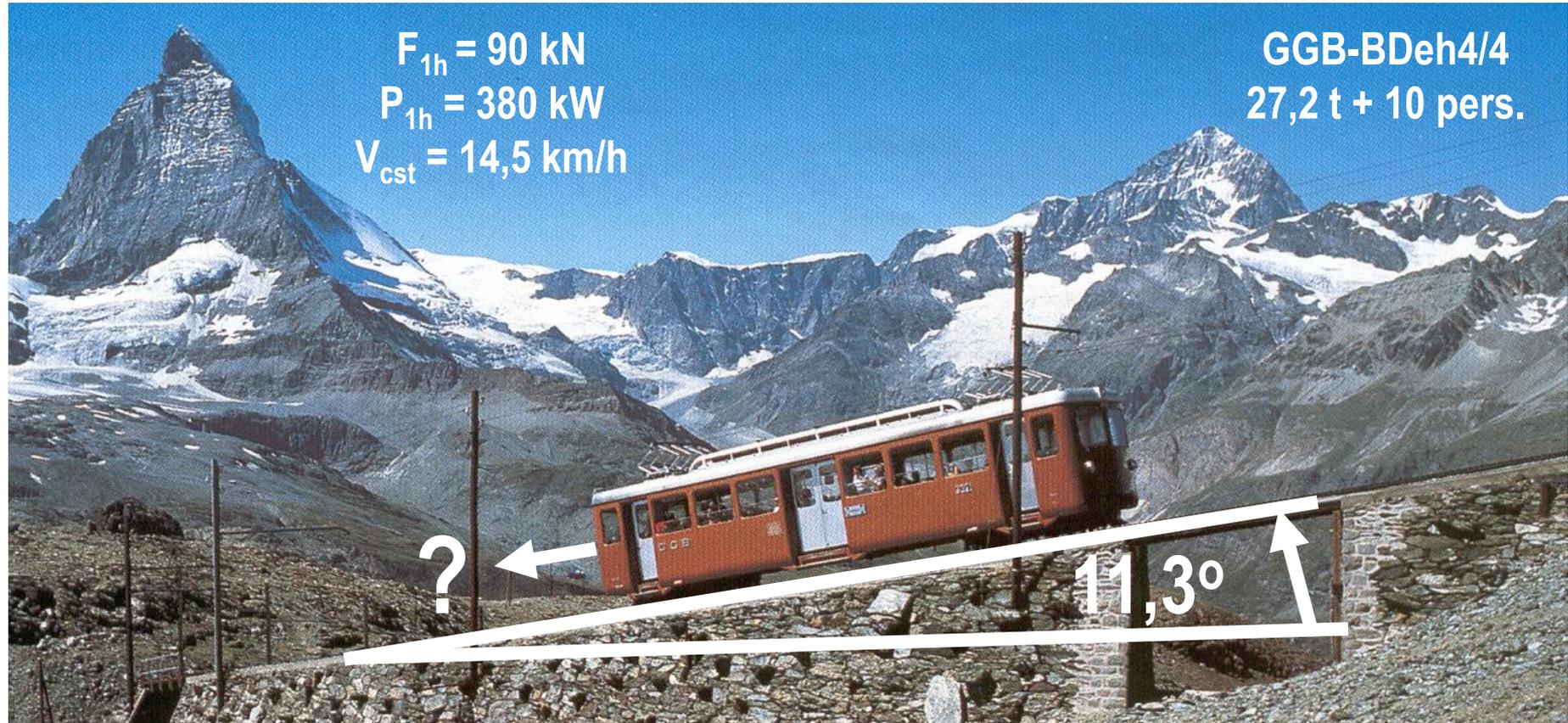
Résistance des déclivités



$$r_d = \sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha = i \quad (\text{‰})$$

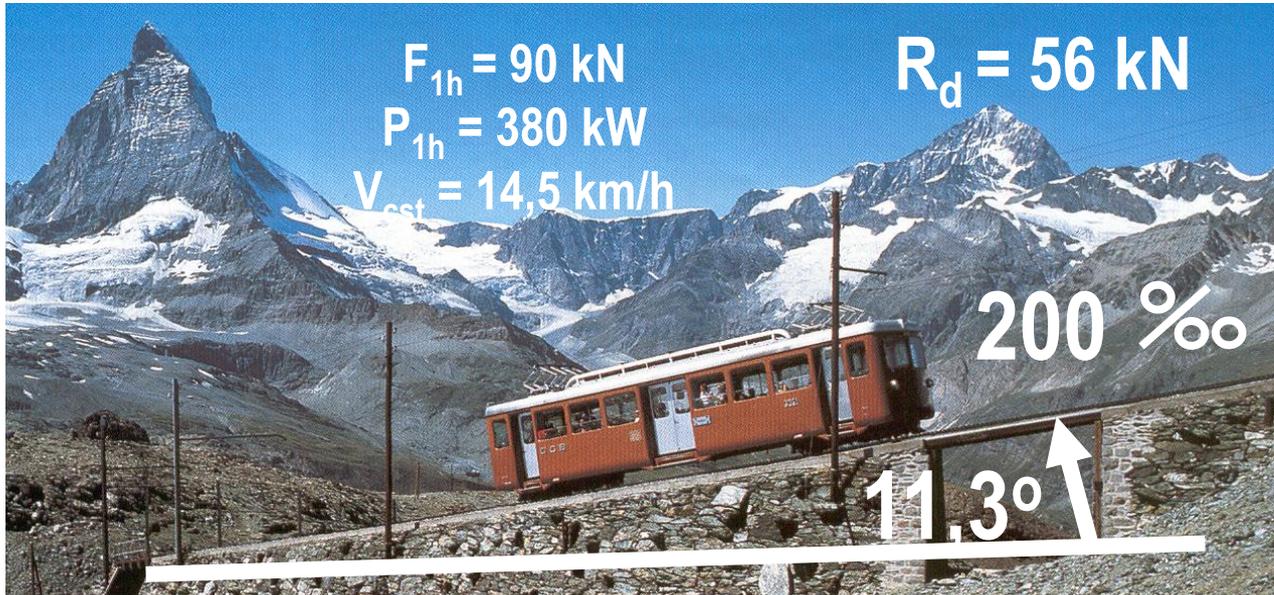


Résistance des déclivités - Exemple



$$P = (27,2 + 10 \cdot 0,08) \cdot g = 28 \cdot 9,81 \cong 280 \text{ kN}$$

Résistance des déclivités - Exemple



Combien vaut R_d ?
(poids: 280 kN)

$$R_d = 200\text{‰} \cdot 280 \cdot \text{kN} = 56'000 \text{ N} = 56 \text{ kN}$$

$$r_d = 200 \text{ ‰}$$

Résistance dues aux courbes



Formule
générale
de
Von Röckl

$$r_c = \frac{\chi}{R - \rho} \text{ [‰]}$$

avec χ et ρ ,
coefficients
empiriques
en (m)

R = Rayon
de courbure
en (m)

Formule de Desdouits (pour $R \geq 80$ m)
avec κ coefficient empirique en (m)

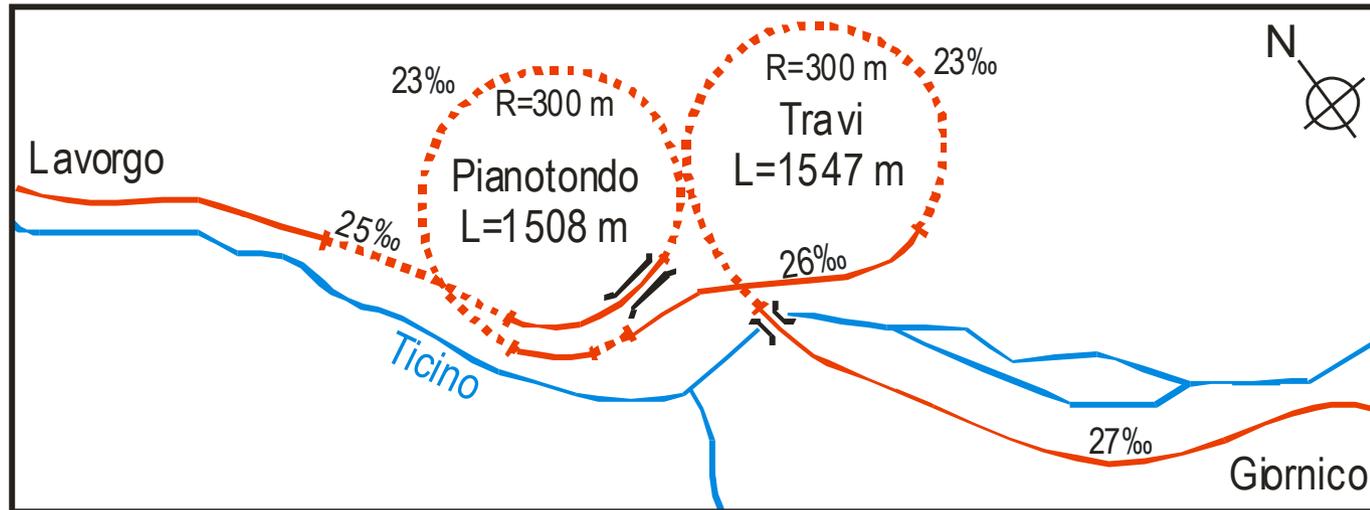
$$r_c = \frac{\kappa}{R} \text{ [‰]}$$

Résistance dues aux courbes

► Valeurs du coefficient de résistance en courbe κ

Ecartement de la voie	κ [m]
1435 mm (standard)	700-800
1000 mm (étroit-métrique)	500-550
750 mm	350-400
600 mm	200-220

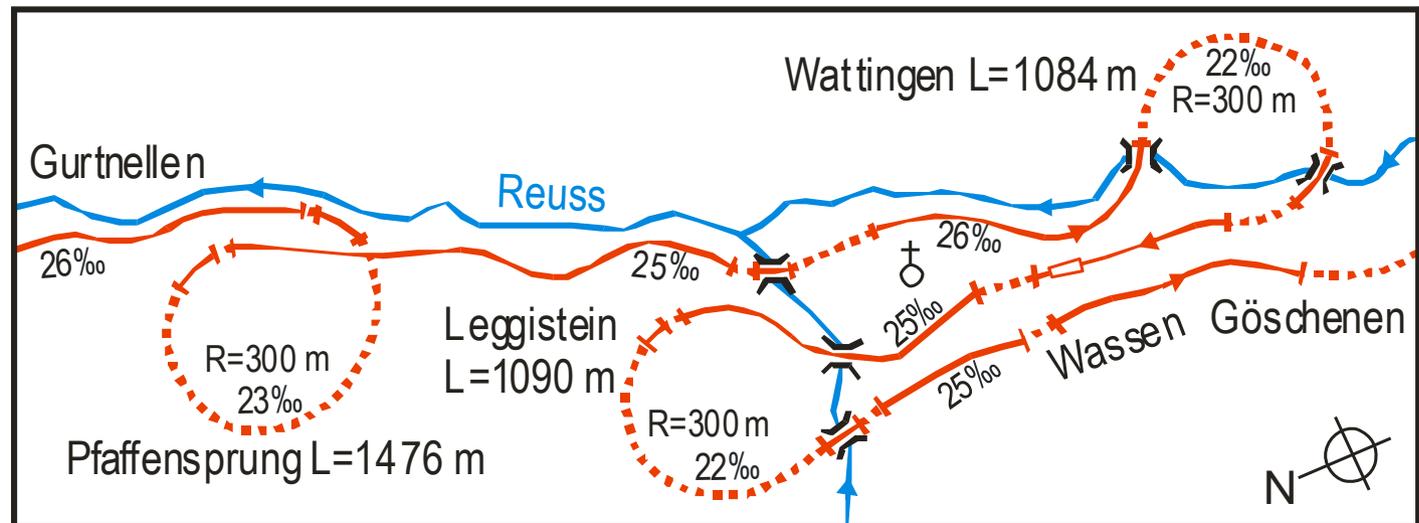
Résistances locales : déclivité équivalente



$$r_d = i \text{ [‰]}$$

$$r_c = \frac{800}{R} \text{ [‰]}$$

R = Rayon de courbure (m)



Résistance spécifique en tunnel

▶ $r_{at} = f_t \cdot \gamma \cdot V^2$ (‰)

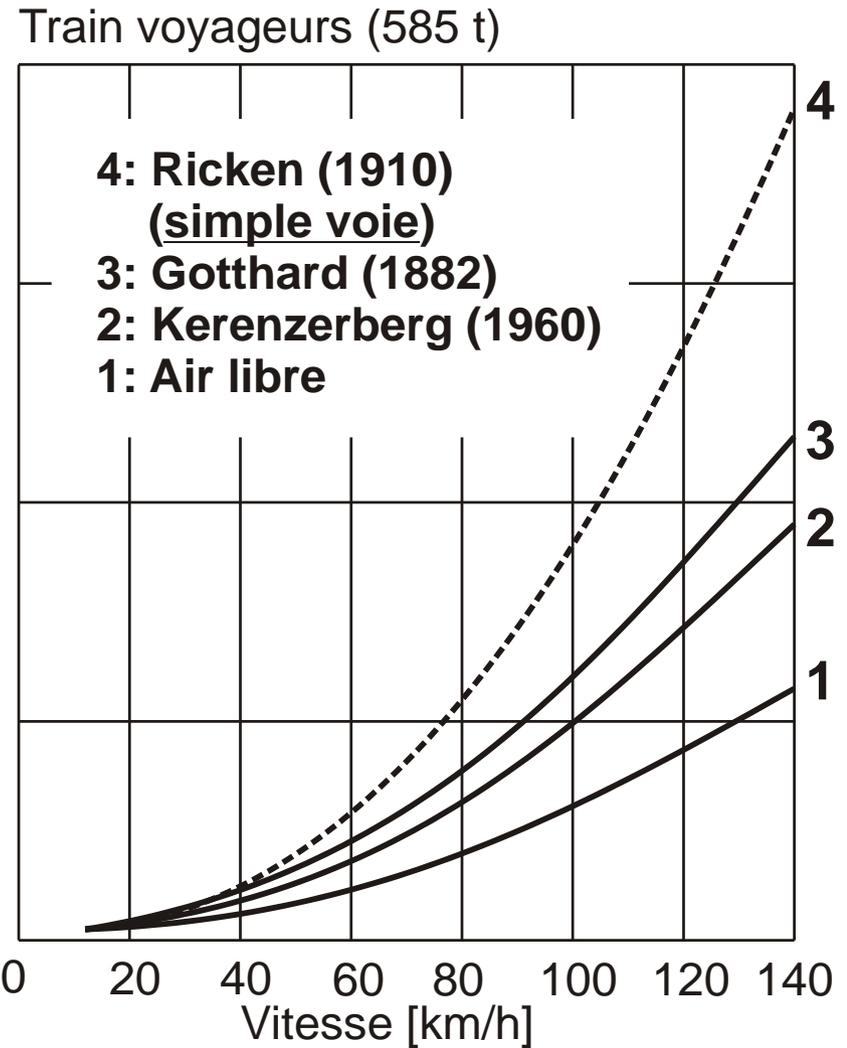
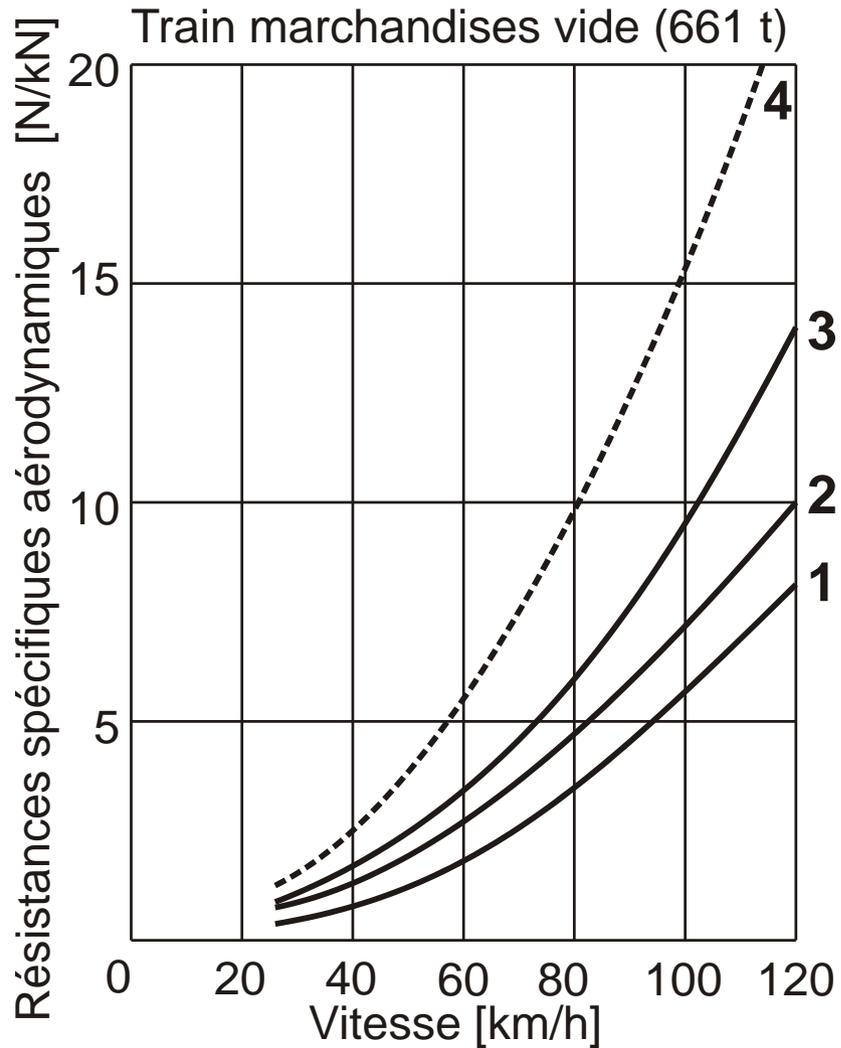
▶ r_{at} résistance spécifique en tunnel

▶ V vitesse (km/h)

▶ f_t facteur de tunnel

Type de tunnels (voie normale)	Désignation	Section [m ²]	f_t [-] Mar. – Voy.		V_{max} [km/h]
Voie unique	Simplon (CH/I)	22	2,4	3,0	140
	Ricken (CH)	27			125
	Planification (NLFA - CH)	49			200
	Villejust (LGV-A - F)	46			270
Double voie	Gotthard (CH)	42	1,7	1,8	125
	Hauenstein (CH)	44	1,5	1,7	140
	Kerenzerberg (CH)	50	1,3	1,6	125
	Grauholz (CH)	65			200
	Marseille (LGV-Méd. - F)	63			230
	Planification (NBS – D)	92	---	1,3	300
	Tartaiguille (LGV-Méd. - F)	100			320
	Planification (LGV – E), courts Planification (LGV – E), longs	110 75			350 350

Résistances locales en tunnel



Résistances totales à l'avancement - Résumé

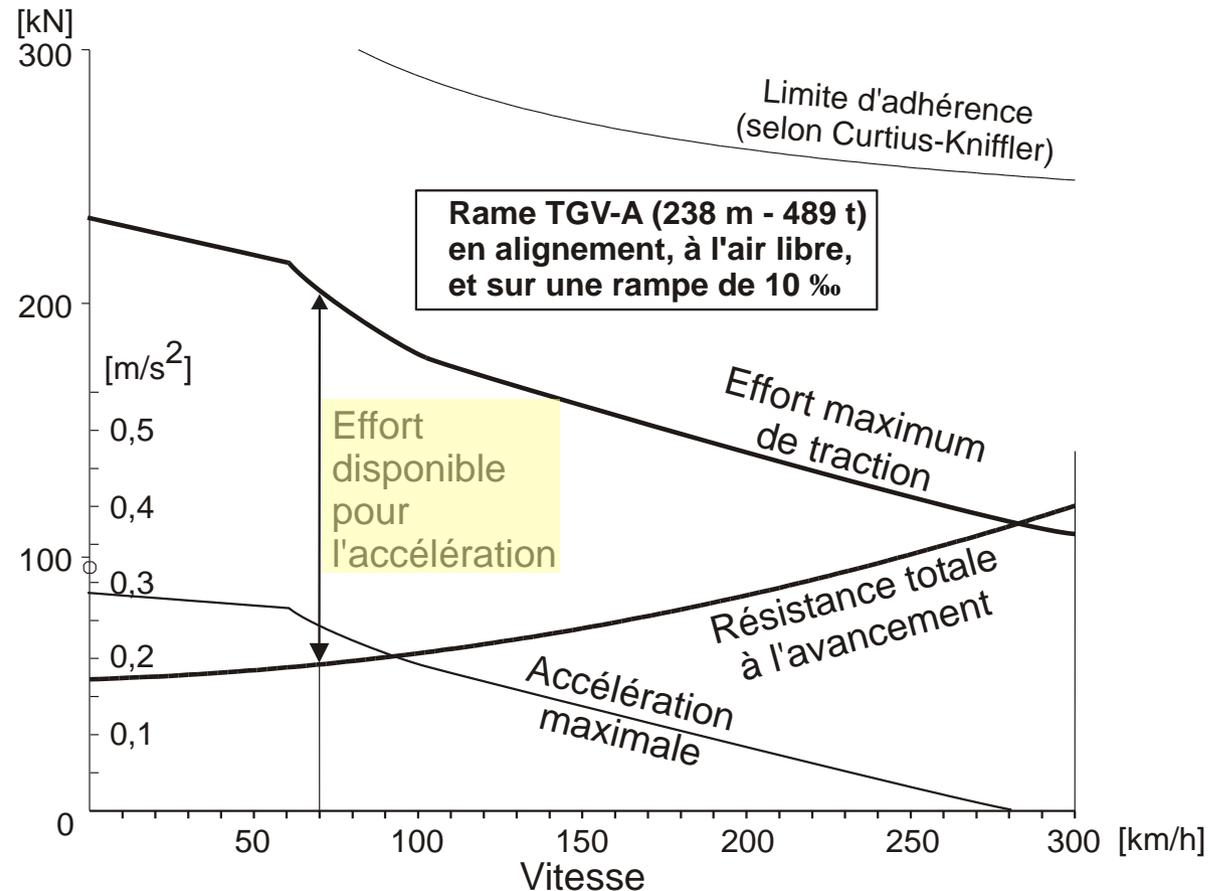
$$R_{tot}(v) = R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$

$$R_{tot} = R_{rf} + R_{ch} + R_{air} + R_d + R_c + R_t$$

- **V** **V²** - - **V²**

Effort résiduel disponible

$$F_1(v) = m' \cdot \frac{dv}{dt} + R_1(v) + R_2(s) + R_t(v, s)$$



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

