

3.1 Equations générales

Le mouvement d'un train est essentiellement celui d'un mobile de masse m à un degré de liberté. On peut le décrire par une équation de Newton scalaire.

$$\sum_{i=1}^n F_i = m \cdot a \quad (3.1)$$

On distingue les forces produites dans le train : force due aux moteurs et force de freinage mécanique et les forces subies par lui : frottements propres et forces localisées (déclivité, frottements supplémentaires en courbe ou en tunnel).

Les frottements propres peuvent être décomposés en une part constante, une part proportionnelle à la vitesse de translation et une part proportionnelle à son carré.

$$F_f = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{N}] \quad (3.5)$$

On prendra soin de vérifier si les valeurs numériques sont données pour des vitesses en [m/s] ou en [km/h]. Si on lit sur les courbes des figures 3.3 à 3.4, on n'a pas ce problème, ces courbes sont données en valeurs relatives à la masse. Pour les trains remorqués, on lira une courbe différente pour la locomotive – qui ouvre le passage dans l'air – et le convoi qui suit.

- 1 Voitures UIC vers 1960 (SNCF, CFF, DB, FS)
- 2 Voitures Corail 1975 (SNCF), Eurofima 1980 (DB, FS, ÖBB,...) ou VUIV 1985 (CFF)
- 3 Voitures légères 1940 (CFF)
- 3 en ajoutant 20 [N/t] Voitures BOB en crémaillère

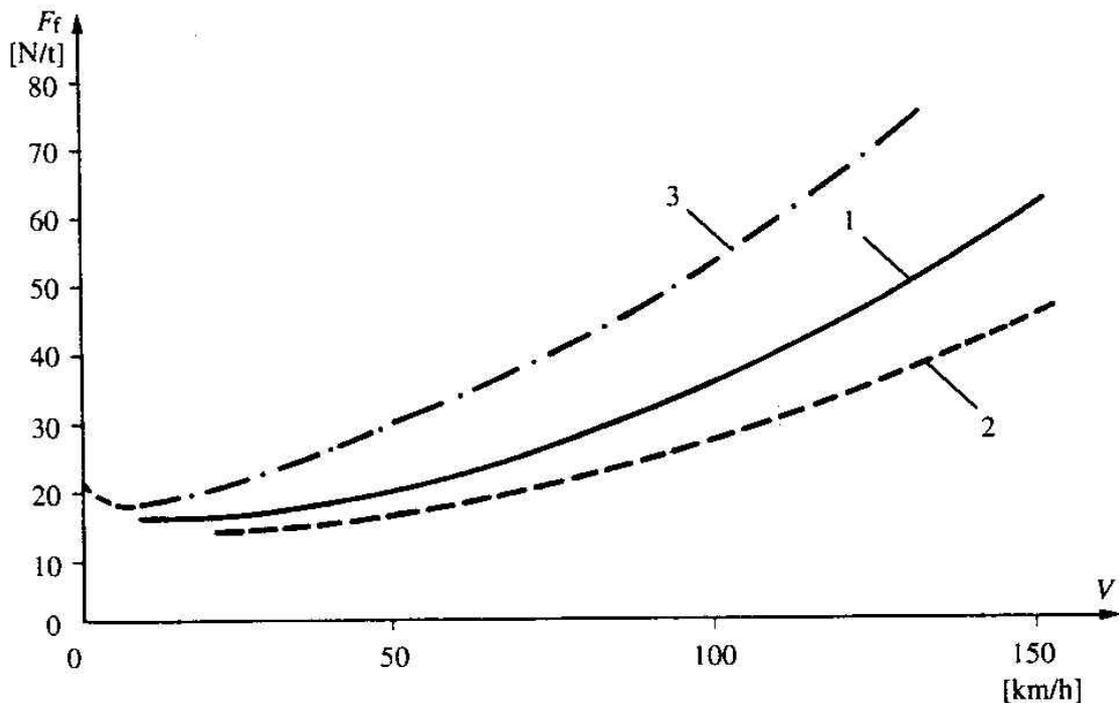


Fig. 3.4 Résistance à l'avancement de convois voyageurs.

- 1 locomotive Ae 6/6 (CFF): CoCo de 120 t
- 2 locomotive 9001 (SNCF): BB de 80t
- 3 locomotive 6001 (SNCF): CC de 120 t
- 4 locomotives Am 4/6 (CFF) : 1BoBo1 de 93 t, Re 460 (CFF) : BoBo de 84 t (—)
- 5 locomotive 2D2 (PO)
- 6 locomotive BBB (FS)
- 7 locomotive Re 4/4 II (CFF) : BoBo de 80 t
- 8 locomotive Re 6/6 (CFF) : BoBoBo de 120 t
- 9 automotrice BOB en crémaillère
- 10 automotrice BOB en adhérence
- 11 automotrice articulée TSOL ou Stadtbahn B

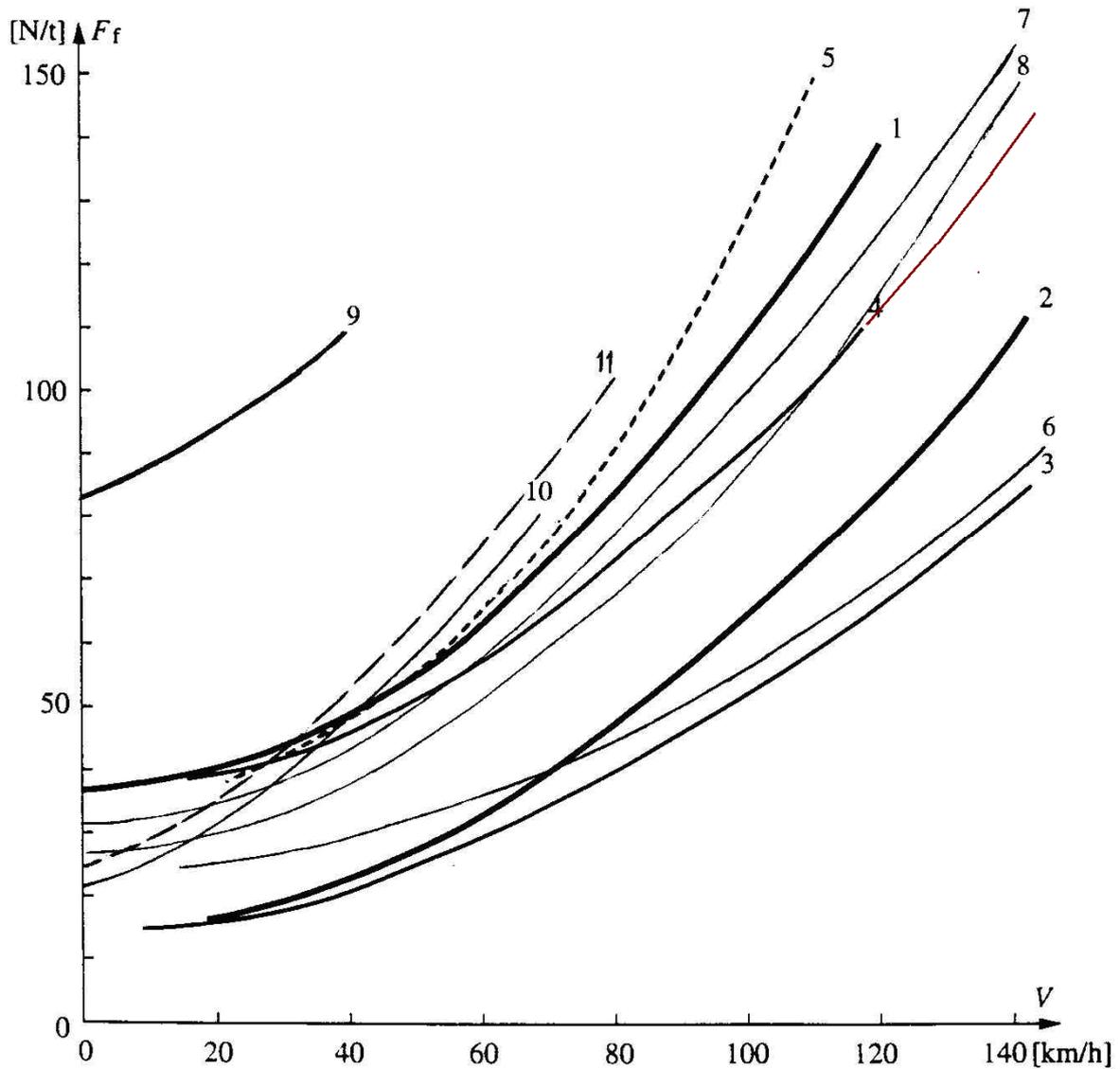


Fig. 3.3 Résistance à l'avancement de véhicules moteurs.

Les trains marchandises ont des caractéristiques différentes, la diversité des formes et les parois rugueuses des wagons engendrent plus de turbulences qui augmentent les résistances aérodynamiques.

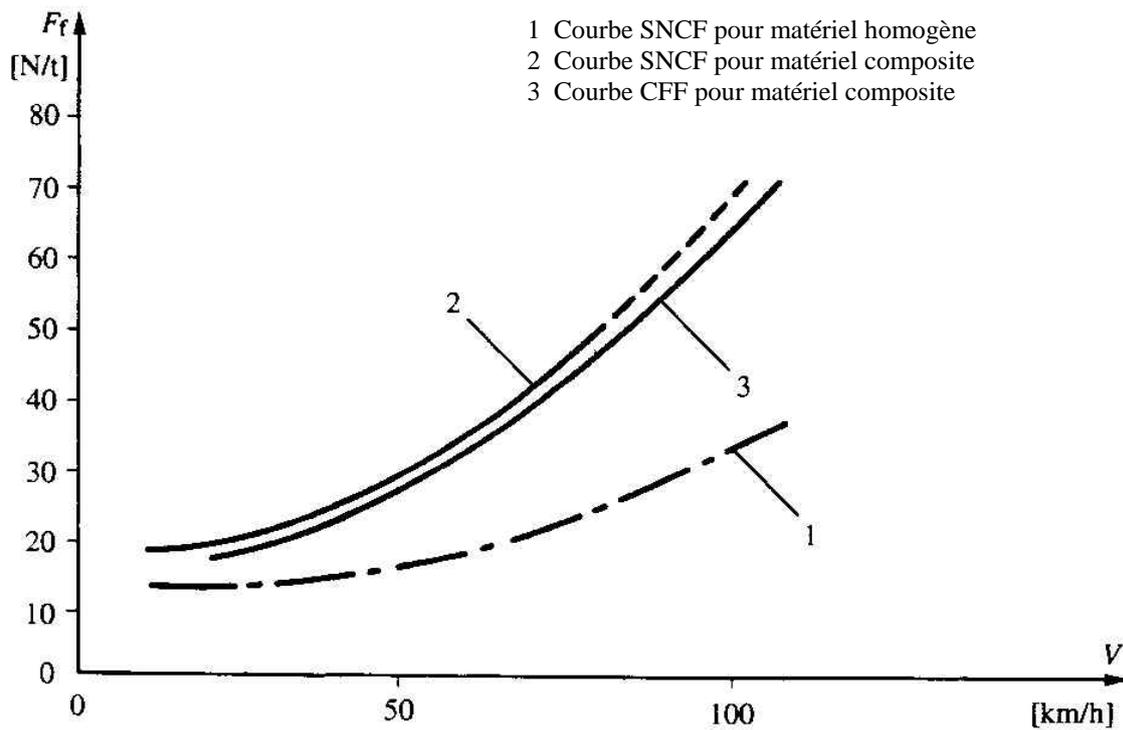


Fig. 3.5 Résistance à l'avancement de convois marchandises.

En déclivité, les résistances sont obtenues en multipliant le poids du train par la pente i de la voie parcourue, donnée en pour mille dans les tabelles. On souligne qu'on approxime ici le sinus de l'angle par sa tangente, ce qui est acceptable pour des pentes jusqu'à 120 ‰ environ.

$$F_d = m g i 10^{-3} \quad [\text{kN}] \tag{3.12}$$

Si on introduit la masse en en kilo plutôt qu'en tonne, la force sera exprimée en $[\text{N}]$.

La force F_c de frottement supplémentaire due aux passages en courbe est localisée en certains points d'un parcours où les courbes sont de faible rayon.

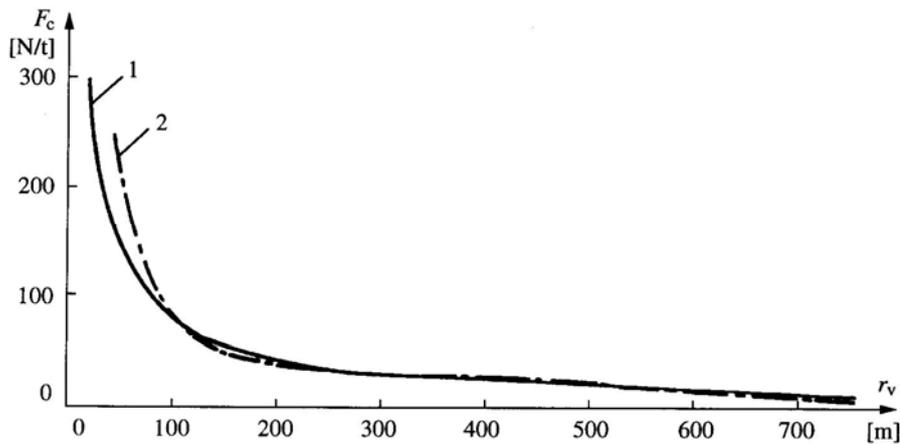


Fig. 3.10 Résistance à l'avancement due aux courbes en voie normale.

Pour la force de frottement supplémentaire en tunnel F_g , on prend le « Cv^2 » de l'équation (3.5) pour un tunnel à double voie et deux fois cette valeur pour un long tunnel à voie unique. On tient compte ainsi de l'effet de piston dans le tube du tunnel. La partie aérodynamique des frottements est ainsi doublée ou triplée par rapport à l'air libre.

Pour l'accélération d'un convoi (3.1), on ne tient pas compte que de la masse qu'on peut peser, mais aussi des volants d'inertie en mouvement – roues, roues dentées, rotors de moteurs – qui introduisent une augmentation de la masse apparente pour le mouvement, symbolisée par un facteur ξ .

$$m^* = \xi m \tag{3.22b}$$

Véhicules		ξ
Train complet		1,06 à 1,10
Voitures et wagons	à adhérence	1,02 à 1,04
Voitures vides		1,05 à 1,12
Automotrices		1,08 à 1,14
Locomotives		1,15 à 1,30
Voitures	à crémaillère	1,05 à 1,10
Automotrices		1,30 à 2,50
Locomotives		1,50 à 3,50

Fig. 3.13 Coefficient des masses tournantes.

L'effort de traction $Z = F_{in}$ est calculé d'après le couple M_m à l'arbre moteur, le rapport de transmission k_G et le rayon r_e de la roue et au rendement η_G de la transmission (ch. 5).

$$Z = \eta_G \frac{M_m}{k_G r_e} 10^{-3} \quad [\text{kN}] \tag{3.17}$$

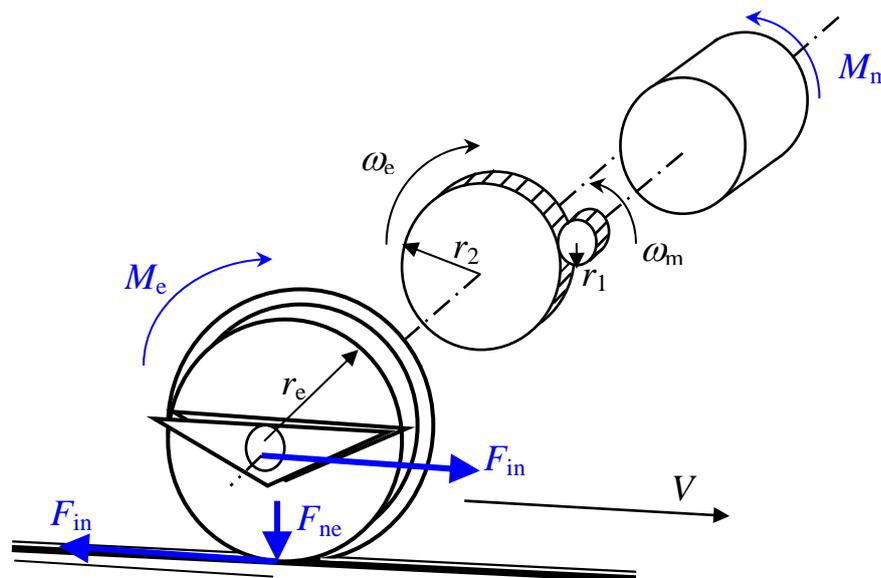


Fig. 3.12 & 3.14 De rotation à translation, avec adhérence.

A cause des condition d'adhérence des roues d'acier sur un rail d'acier, on ne peut pas développer un effort de traction ou de freinage supérieur à une valeur limite qui dépend du

coefficient d'adhérence μ_r et de la force d'appui F_{ne} de l'essieu perpendiculairement au plan du rail. En première approximation, on peut considérer que la force d'appui de l'essieu est à peu près le quart du poids total pour une locomotive à 4 essieux, elle n'est toutefois pas constante en raison de la dynamique de la caisse et des bogies avec leurs suspensions, lorsqu'un effort de traction au crochet et les efforts aux jantes provoquent un couple de cabrage. Le coefficient d'adhérence dépend de la vitesse de translation de l'engin moteur et de la vitesse de glissement des roues sur le rail, selon des lois empiriques décrites aux figures 3.15 et 3.17.

$$Z < \mu_r F_{ne} \quad [\text{kN}] \tag{3.24b}$$

Si la condition (3.24b) n'est pas respectée, on observe un patinage de l'essieu concerné, qui ira en s'aggravant si le couple moteur n'est pas rapidement et fortement réduit par action du personnel de conduite ou d'un dispositif antipatinage.

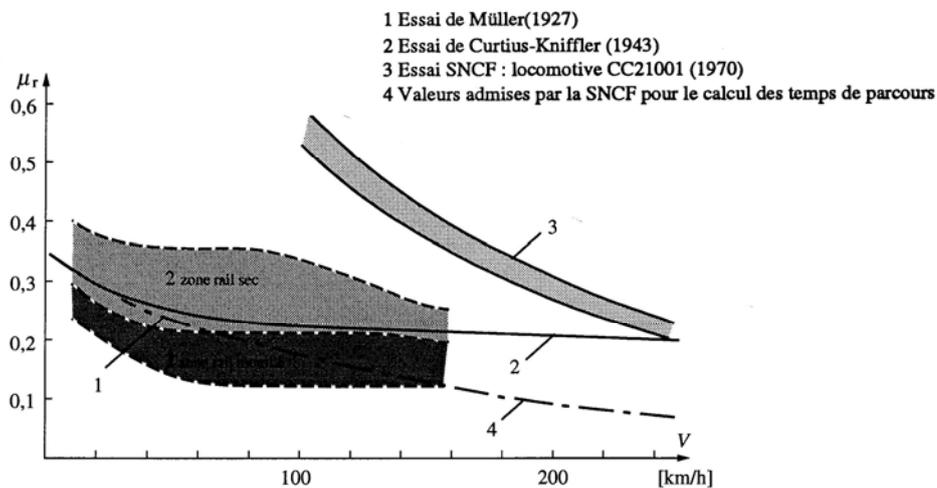


Fig. 3.15 Coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse de translation.

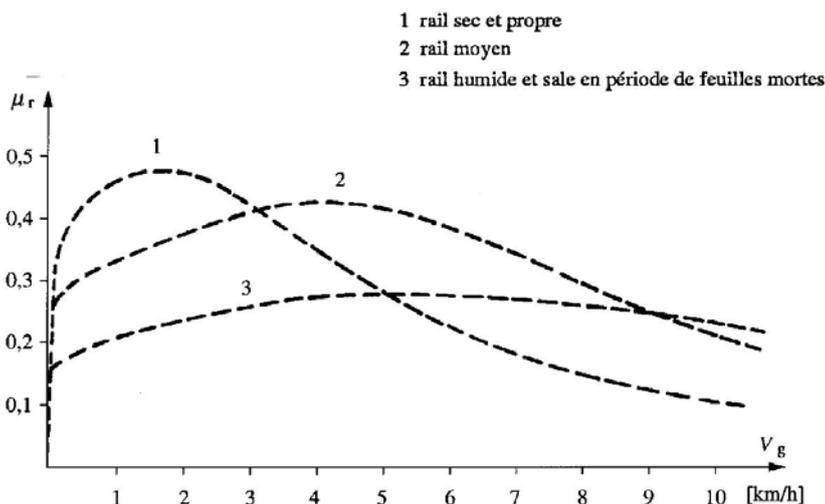


Fig. 3.17 Coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse de glissement.

On peut encore noter que le coefficient d'adhérence d'un pneumatique sur chaussée – métro ou trolleybus – atteint près du double de celui d'une roue d'acier sur rail, soit entre 0,55 et 0,62 selon le type de revêtement.

C'est au démarrage que les efforts nécessaires Z sont les plus élevés.

$$Z = m * a + F_d + F_f \quad (3.1b)$$

La SNCF utilise pour estimer l'effort au démarrage une formule empirique simplifiée de rampe corrigée.

$$Z = m g i_{\text{corr}} 10^{-3} \quad [\text{kN}] \quad (3.12b)$$

On peut indiquer les valeurs utilisées pour les trains marchandises, avec une accélération espérée de $0,03 \text{ [m/s}^2\text{]}$:

$$\begin{aligned} i_{\text{corr}} &= 1,225 (i + 2,2) & \text{si } i &\geq 7 \text{ [\%]} \\ i_{\text{corr}} &= 4,35 + i & \text{si } i &< 7 \text{ [\%]} \end{aligned} \quad (3.14b)$$

L'effort au crochet est l'effort de traction développé par l'engin de traction, auquel on soustrait ce qui est nécessaire à son propre mouvement.

$$F_{\text{att}} = Z - (m_{\text{loc}} * a + F_{d_{\text{loc}}} + F_{f_{\text{loc}}}) \quad (3.44)$$

L'attelage « UIC » est construit pour un effort de rupture minimal de 850 kN. Par rapport à cette valeur, les entreprises de chemin de fer imposent une marge de sécurité et donne une limite en service (SNCF : 360 kN, CFF : 650 kN). Il existe des attelages à vis renforcés (limite de rupture à 1350kN) de même géométrie que l'attelage standard. Avec un attelage automatique, la limite est de l'ordre de 1500 kN.

C'est dans ces circonstances de démarrage que les limitations dues à l'adhérence ou à la résistance d'attelage devront être observées avec le plus grand soin.