

Dynamique du freinage

L'objet n'est pas ici de refaire un cours complet de dynamique ferroviaire, ni d'exposer en détail la physique macroscopique du freinage des trains, mais d'appréhender la difficulté qu'il peut y avoir, non pas à déterminer de manière théorique les performances de freinage d'un train (encore que...) mais de voir combien il est difficile de trouver des méthodes simples permettant de déterminer le plus précisément possible la performance d'un train en exploitation quotidienne, notamment lorsque ce train peut être composé de matériels très divers aux performances hétérogènes.

De nombreux facteurs entrent en ligne de compte, parmi lesquels :

- La longueur du train : lorsque la commande du freinage est pneumatique, les temps de réponse sont très variables en fonction de la longueur du convoi (voir la page sur le frein à commande pneumatique) et influent directement sur la distance d'arrêt.
- Les caractéristiques de friction des organes de frein (semelles, disques et garnitures) : ces caractéristiques varient en fonction de divers facteurs (vitesse initiale du freinage, vitesse instantanée, humidité, type de matériau, etc...), et ont un impact direct sur la distance d'arrêt.

Nous allons donc voir comment, en pratique, déterminer la performance de freinage d'un train avant de l'engager en ligne. Cette détermination revêt un caractère extrêmement important, puisque c'est elle qui conduit à définir la vitesse limite de circulation du convoi en fonction des caractéristiques de la ligne parcourue : toute erreur peut donc conduire à une vitesse limite trop élevée par rapport aux capacités de freinage du convoi, et en regard des distances de cantonnement.

Notons que cette performance de freinage est l'un des facteurs entrés par l'agent de conduite dans le codeur du KVB lors de la constitution du train, et qui permet ensuite à ce KVB de déterminer les courbes de contrôle de vitesse à tout instant de la marche.

Equations de la dynamique

Ceux à qui il reste quelques souvenirs de leurs classes de Lycée se rappelleront que la distance d'arrêt d'un véhicule ralentissant avec une décélération constante est donnée par la loi du mouvement uniformément varié :

$$D = \frac{1}{2} \times \gamma \times t^2$$

où γ représente la décélération du véhicule, et t le temps.

Le temps de freinage est obtenu par la relation :

$$V_0 = \gamma \times t$$

où V_0 représente la vitesse initiale de freinage.

Ainsi, à partir de ces deux relations, on peut déterminer deux équations liant la distance d'arrêt et la décélération :

$$D = \frac{V_0^2}{2 \times \gamma} \quad \text{ou} \quad \gamma = \frac{V_0^2}{2 \times D}$$

Enfin, rappelons que la décélération se déduit de la formule :

$$F = M \times \gamma$$

où M désigne la masse du véhicule et F l'ensemble des efforts de freinage qui s'y appliquent.

Nota - La masse M prise ici en compte est ce que l'on appelle la masse dynamique du train. En effet, les divers équipements en rotation (essieux, disques de frein, moteurs de traction, transmissions) « consomment » en interne au train, par leur inertie en rotation, une part de l'effort de freinage appliqué : la décélération finalement obtenue doit donc tenir compte de cette perte d'effort interne.

Notion de masse freinée (ou poids-frein) et de pourcentage de masse freinée

Introduction

La méthode mathématique évoquée ci-dessus convient très bien à la conception des véhicules ferroviaires, mais son utilisation est plutôt laborieuse en exploitation quotidienne. Cette méthode mathématique convient par ailleurs très bien pour la définition et la détermination des performances de freinage de matériels indéformables en service commercial (rames automotrices par exemple) au moment de leur conception et durant leur exploitation, mais est nettement plus délicate à manier lorsque le convoi ferroviaire est constitué de véhicules différents et aux performances parfois hétérogènes, en particulier pour les besoins de l'exploitation.

Or la majeure partie du trafic reste assurée par des trains composés d'une locomotive et de véhicules remorqués. Il s'agit donc pour l'exploitant de pouvoir déterminer de manière simple les performances de freinage de chaque train en fonction des caractéristiques propres des véhicules le composant, et du fait que la longueur et la charge du dit train peuvent être très différentes d'un jour à l'autre.

Enfin, Il faut aussi prendre en compte le fait que les capacités de freinage des trains vont devoir être déterminées par les agents en charge de sa composition, lesquels n'ont ni les moyens ni le temps de déterminer par un calcul mathématique complexe les performances de freinage de chaque train constitué au cours d'une journée d'exploitation. Et si les micro-ordinateurs (ou autres tablettes informatiques) peuvent aujourd'hui embarquer des applications rendant ce type d'opération complexe accessible à tous, il n'en était pas de même il y a seulement une trentaine d'années !

C'est pourquoi l'UIC a mis en place des méthodes simples de détermination des performances de freinage des trains, de manière à ce que ces performances puissent permettre de fixer immédiatement la catégorie du train, sa vitesse limite et les éventuelles restrictions d'exploitation auquel il sera soumis en fonction des caractéristiques de l'infrastructure parcourue. Ces méthodes doivent de plus être communément admises par l'ensemble des opérateurs adhérents afin de permettre une exploitation internationale sur les mêmes bases.

Ainsi sont nées les notions de masse freinée et de pourcentage de masse freinée. L'idée de base de ces paramètres est la suivante : chaque véhicule entrant dans la composition d'un train doit comporter une ou plusieurs masses freinées, et la masse freinée d'un convoi est la somme des masses freinées des véhicules le composant. C'est donc pourquoi la masse freinée est inscrite sur tous les véhicules susceptibles d'être échangés entre Réseaux (ainsi que sur les locomotives), car cela permet de déterminer les performances des trains ainsi constitués.

Compte-tenu de la relative complexité de la méthode et des nombreux cas particuliers dont elle fait l'objet, l'objectif n'est ici de présenter qu'une synthèse très générale permettant de comprendre le principe général de la dite méthode. Pour en connaître tous les détails, référez-vous à la fiche UIC 544-1 !

Nota - Durant de nombreuses années, la masse freinée a été dénommée « poids-frein ». Ce terme est encore souvent utilisé dans le langage courant, mais n'a plus cours dans les fiches UIC.

Principe général

L'UIC a défini comme postulat de départ qu'un train de 15 voitures à bogies (60 essieux) qui s'arrête en 1000 mètres à partir de la vitesse initiale de 120 km/h présente un pourcentage de masse freinée $\lambda = 80\%$.

Partant de ce constat, l'UIC a réalisé des abaques pour un véhicule seul et pour un train de 60 essieux qui permettent de définir, en fonction de la masse freinée, la distance d'arrêt pour deux vitesses initiales courantes à l'époque : 100 km/h et 120 km/h.

Certes, très bien me direz-vous... Mais cela n'indique pas comment déterminer le λ d'un véhicule... Eh bien deux méthodes existent :

- Par essais.
- Par calculs.

Détermination par essais

On mesure la distance d'arrêt pour toutes les vitesses indiquées sur l'abaque de la fiche UIC entre 100 km/h (wagon) ou 120 km/h (voiture) et la vitesse maximale du véhicule, en régime P et en freinage d'urgence :

- Soit du véhicule isolé au lancer (on tracte le véhicule par le biais d'un attelage à décrochage télécommandé, puis on dételle de la locomotive et on freine le véhicule).
- Soit d'un train de 400 m (voitures) ou 500 m (wagons) composé exclusivement des véhicules concernés tractés par une locomotive non freinée.

En général, on pratique même les deux types d'essais.

La distance d'arrêt mesurée est ensuite reportée sur les abaques de l'UIC, ce qui permet de déterminer le λ . La masse freinée est ensuite déduite du λ pour chaque vitesse initiale, et c'est la plus faible valeur obtenue qui sera indiquée sur le véhicule.

Exemple

Un train composé de 15 voitures à bogies, toutes identiques et de masse unitaire 42 tonnes, remorqué par une locomotive non freinée de masse 150 tonnes, présente une distance d'arrêt de 875 m à partir de 120 km/h. Les abaques UIC nous indiquent un λ correspondant à 93%, ce qui donne pour le train une masse freinée de :

$$B_{\text{train}} = \lambda \times M_{\text{train}} = 0,93 \times (15 \times 42 + 150) = 725,4 \text{ tonnes}$$

Chacune des voitures a donc une masse freinée de :

$$B = \frac{B_{\text{train}}}{15} = \frac{725,4}{15} = 48,36 \text{ tonnes}$$

La masse freinée à 120 km/h d'une voiture est donc de 48 tonnes.

Seul problème : ce genre d'essais est fort lourd, coûteux et long à réaliser. Par ailleurs, lorsqu'il s'agit d'un véhicule sortant de construction, il n'est pas toujours aisé d'attendre d'en avoir un nombre suffisant pour constituer un train de 400 ou 500 m : c'est pourquoi cette méthode n'est plus utilisée que dans des configurations particulières.

Détermination par calcul

Les moyens de calcul actuels permettent de réaliser un calcul de distance d'arrêt en prenant en compte toutes les caractéristiques des équipements de freinage (pressions aux cylindres de frein, coefficients de frottement, rendements, etc...) et d'en déduire, à partir des abaques (ou formules correspondantes) de la fiche UIC 544-1, le λ du véhicule.

Les calculs sont réalisés pour les différentes vitesses reprises par les abaques, comme pour les essais.

Détermination par calcul : cas particulier des véhicules équipés uniquement d'un frein à semelles en fonte

Cette méthode, valable uniquement pour les semelles en fonte P10 et pour une vitesse maximale de circulation de 120 km/h (donc en pratique uniquement pour certains wagons), permet une détermination du λ uniquement par calcul.

Si F_a désigne l'effort de freinage délivré par les équipements de freinage d'un véhicule en mouvement, la masse freinée (ou poids-frein) est définie par :

$$B = \frac{k \times F_a}{g}$$

où k est un paramètre constant, propre au véhicule, et g est l'accélération de la pesanteur.

La fiche UIC donne les formules et abaques correspondants pour le paramètre k (lequel dépend notamment de la géométrie des porte-semelles utilisés).

Influence de la longueur du train

Le frein pneumatique présente des temps de réponse étroitement liés à la longueur du train (voir la page sur le frein pneumatique). Or ces temps de réponse conditionnent directement la performance finale, à savoir la distance d'arrêt.

Il est admis qu'en deçà d'une longueur de 400 m pour un train composé de voitures et de 500 m pour un train composé de wagons, la masse freinée obtenue par sommation des masses freinées indiquées sur les véhicules reste correcte. En revanche, celle-ci doit être corrigée si la longueur du train excède ces valeurs (sauf dans le cas de véhicules équipés de l'assistance électropneumatique – frein EP – ou d'accélérateurs de vidange).

La fiche UIC 544-1 intègre donc des abaques indiquant le facteur correctif à appliquer sur la masse freinée obtenue par sommation des masses freinées des véhicules composant le train.

Dans la pratique, cette correction concerne essentiellement les wagons circulant sous régime P, les trains de voyageurs atteignant rarement plus de 400 mètres.

Cas particulier des trains de fret freinés au régime G

Nous avons vu plus haut que la masse freinée est toujours déterminée en régime P. Or les trains de fret circulent pour leur très grande majorité en régime G, ce afin de limiter les efforts longitudinaux de traction ou de compression (voir la page sur le frein pneumatique).

Pour les trains de marchandises, et pour les types de semelles en fonte les plus couramment utilisées, des abaques ont été réalisées à partir d'essais afin de pouvoir déterminer, en fonction notamment du λ du train (somme des λ des wagons) et de la déclivité, la distance d'arrêt pour chaque vitesse limite type (90 km/h, 100 km/h, 120 km/h) et pour une longueur de train jusqu'à 700 m, pour un frein à commande pneumatique.

Il s'agit donc essentiellement dans ce cas d'abaques destinées à l'exploitation des trains, et non à la détermination de la masse freinée lors de la conception des véhicules.

A noter que cette méthode ne concerne que les trains composés de véhicules équipés uniquement de semelles en fonte.

Cas particulier des trains de voyageurs : la formule de Pédelucq

Pour les trains de voyageurs composés de véhicules équipés de semelles en fonte, une formule a été établie par Mr Pédelucq :

$$D = \frac{\varphi \times V_0^2}{1,09375 \times \lambda + 0,127 - 0,235 \times i \times \varphi}$$

où φ est un coefficient qui varie en fonction de la vitesse initiale V_0 du freinage (et est donné par des tableaux), et i représente la déclivité (affectée d'un signe - si c'est une rampe, d'un signe + si c'est une pente). Une correction est ensuite apportée en fonction de la longueur du train, là encore grâce aux directives de la fiche UIC 544-1.

Cette formule a été déduite de nombreux essais. Elle n'est néanmoins plus utilisée aujourd'hui.

Evolution des organes de freinage

Vous avez remarqué qu'il a été fait souvent mention du fait que les formules et abaques indiquées en référence ont été établies pour des matériels munis de semelles en fonte, et équipés de la commande pneumatique de freinage. Or c'est justement là que le bât blesse... En effet, l'augmentation des vitesses et des tonnages des trains de voyageurs ont nécessité l'utilisation d'autres types de frein que le frein à semelles en fonte (voir les pages consacrées aux organes de freinage) : frein à disque, semelles composites, utilisation des moteurs de traction en génératrices pour fournir un effort de retenue, freins électromagnétiques sur rails ou à courants de Foucault.

Or il s'est vite avéré que l'utilisation de ces types de frein, souvent en combinaison l'un avec l'autre, rendait en partie caduque l'utilisation du λ comme base de détermination de la performance, ce fameux λ n'étant plus du tout constant (en fonction de la vitesse initiale notamment). De plus, certains matériels (MI79 ou MI2N par exemple) ont été équipés d'une commande électrique de freinage, aux caractéristiques fort différentes de la commande pneumatique.

Il aurait alors fallu inscrire sur les véhicules un gigantesque tableau indiquant pour chaque vitesse le λ correspondant.

En ce qui concerne les wagons, l'utilisation toujours très large de semelles en fonte permet d'utiliser encore les méthodes de l'UIC. Mais la tendance va vers une généralisation des semelles en matériau composite et des freins à disques, dont le comportement différent a imposé de revoir, au moins partiellement, les méthodes de calcul de l'UIC. C'est ainsi que sont nées des abaques spécifiques à ces freins, prenant en compte par ailleurs l'augmentation des vitesses de circulation jusqu'à 160 km/h dans un premier temps, puis jusqu'à 200 km/h.

Performances de freinage des matériels modernes

Nous l'avons vu, les méthodes classiques ont montré ces vingt dernières années leurs limites au regard des nouvelles techniques de freinage.

Pour tenir compte de l'évolution de ces techniques, que ce soit en termes d'organes de freinage mais aussi pour des véhicules n'utilisant plus l'énergie pneumatique pour la commande du freinage ou(et) l'application des freins, il a fallu développer d'autres méthodes et d'autres outils.

Ceux-ci sont basés sur les calculs pas à pas, extrêmement fastidieux lorsque réalisés à la main avec une règle à calcul mais grandement facilités depuis le début des années 90 par le fort développement des micro-ordinateurs. Les matériels modernes font donc l'objet de calculs de performances précis, dans lesquels sont pris en compte l'ensemble des paramètres (dont les coefficients de friction des organes de freinage, ainsi

que leurs variations en fonction de divers paramètres, comme la vitesse). Ces logiciels sont alimentés par les retours d'expérience, sachant que la mise en service d'un nouveau véhicule passe obligatoirement par la validation par essais de ses performances (vérification de la conception et des calculs réalisés, réglages fins pour obtenir les performances requises).

Par ailleurs, l'introduction des systèmes de signalisation modernes (TVM, KVB, LZB, ERTMS, etc...) implique de connaître les performances de freinage du convoi sous forme d'une décélération équivalente, qui plus est garantie (donc intégrant l'adhérence dégradée, un certain niveau d'isolement des équipements de freinage sur le train, les tolérances sur l'effort et le coefficient de frottement des matériaux, etc...). Ces performances ne sont donc accessibles que par un calcul pas à pas, et non via une méthode de type masse freinée.

Quelques ordres de grandeur pour terminer

Afin de se faire une idée des performances de freinage des véhicules ferroviaires, voici quelques exemples pour des matériels types. Pour plus de précisions, vous pouvez aussi vous reporter aux fiches techniques des matériels proposées sur ce site.

Wagons

Les wagons présentent des λ généralement très faibles, de l'ordre de 40 à 80% en régime G (marchandises). Pour les wagons possédant le régime P (voyageurs) existent deux sous-régimes de freinage : S, pour lequel un λ minimal de 65 à 70% est exigé, et SS (vitesse de circulation 120 km/h), pour lequel le λ minimal est de 100%.

Trains de voyageurs classiques

Pour des vitesses supérieures ou égales à 140 km/h, le λ minimal exigé est de 150 à 170% en tare, ce qui correspond au sous-régime de freinage R (indiqué dans un losange sur la voiture). Pour des véhicules roulant à 200 km/h, le λ monte couramment autour de 180% en tare.

En pratique, ceci signifie qu'un train Corail de 15 voitures aptes à 200 km/h s'arrête en une distance d'environ 980 mètres à partir de 160 km/h, et de 1620 mètres à partir de 200 km/h.

Les locomotives ont bien souvent des λ plus faibles, essentiellement en raison de leur masse importante. Une BB 22200 présente un λ maximal (correspondant à la mise en œuvre des freins électrodynamique et mécanique en régime P simultanément) de 119% à 160 km/h (soit une distance d'arrêt de 1200 mètres environ). Ce λ tombe à 72% en freinage mécanique seul à partir de 120 km/h, en régime G... La BB 26000 (Sybic) est un peu mieux lotie, avec un λ d'environ 130% à 160 km/h (dans les mêmes conditions que la BB 22200), et de 150% à 200 km/h.

Automoteurs / automotrices

L'automoteur TER X 72500 s'arrête en une distance de 1050 mètres à partir de 160 km/h, ce qui correspondrait à un λ d'environ 140% si l'on considère qu'il s'agit d'un véhicule isolé compte-tenu de sa faible longueur. A 120 km/h, la distance d'arrêt est de 610 mètres, soit un λ d'environ 120%.

L'automotrice Z2N s'arrête, quant à elle, en 650 mètres à partir de 120 km/h, soit un λ d'environ 120%.

Rames TGV

Une rame TGV s'arrête en une distance de 1300 mètres depuis 200 km/h, soit un λ supérieur à 220% !...

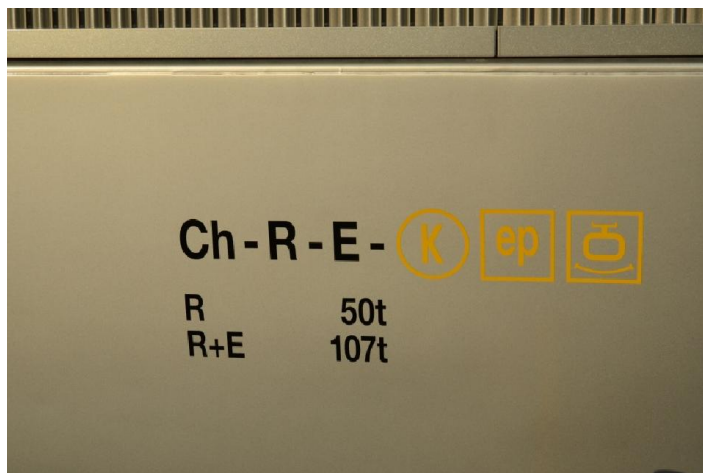


Figure 1 – Marquages de masse freinée sur la motrice d'une rame RGV pour le Maroc (R = frein à friction seul, R+E = frein à friction et électrodynamique combinés)

Tramways

Les tramways sont, avec les métros sur pneumatiques, les véhicules ferroviaires les plus performants en freinage. Les décélérations moyennes atteignent couramment 3 m/s^2 , ce qui correspond à une distance d'arrêt de 82 mètres à partir de 80 km/h. A titre de comparaison, un automoteur XTER s'arrête depuis la même vitesse en une distance de 290 mètres... On ne peut plus parler de λ à ce niveau de performances !