

ADHÉRENCE ROUE – RAIL



Michel Durochat, Gilbert Desplanques avec l'aide de Wikipédia



L'adhérence roue/rail est un phénomène suffisamment complexe pour n'être pas complètement résolu à ce jour, même pour la grande vitesse.

Pour cela, un petit retour historique (plus d'un siècle) s'impose car c'est précisément à cette période que va se créer une carence technologique qui s'accroîtra avec le temps et les évolutions du chemin de fer, qui conservera d'ailleurs l'écartement de voie de la mine d'où il est issu (auquel seront rajoutés plus tard d'autres écartements comme la voie métrique), sujet évoqué dans le BI n°93 de janvier 2014 en page 13.

Dans l'Angleterre du XIX^e siècle, comme partout ailleurs, le meilleur mode de transport terrestre était le cheval. Lorsque l'invention de la locomotive à vapeur créée par Stephenson arriva, l'idée était d'utiliser autrement les trains des mines voire d'acheminer le charbon extrait sur de faibles distances. Les voies ferrées sortent alors de la mine, les premières infrastructures ferroviaires sont créées.

Stephenson construit un premier prototype en 1814 : c'est une chaudière cylindrique horizontale, munie de 4 roues, elles-mêmes entraînées à l'aide de manivelles par les pistons de 2 cylindres verticaux. En 1817, il met au point sa première vraie locomotive, qui peut remorquer un train de charbon de 70 tonnes. En 1825, nouvelle étape : Stephenson sort une machine qui roule à 30 kilomètres à l'heure. Le jour de l'inauguration de la ligne marchandise Stockton-Darlington on accroche à celle-ci un wagon rempli de musiciens : c'est aussi le premier train de voyageurs. Dans une descente, le convoi s'emballe, dépassant le cavalier porte-drapeau qui l'accompagne : il atteint les 40 kilomètres à l'heure !

La plus célèbre création de Stephenson reste cependant « La Fusée » (The Rocket), construite pour relier Liverpool et Manchester : La nouvelle compagnie ferroviaire fondée prit le nom « Liverpool and Manchester Railway et exploita ainsi la première véritable ligne voyageurs. Le 15 septembre 1830, jour de son premier voyage, George Stephenson peut être fier de lui : il a tout supervisé, les voies, les ponts et les tunnels, et vu « grand », en prévision du trafic, avec l'aide de son assistant-ingénieur Joseph Locke.

Georges Stephenson
Avec un croquis de la « Rocket » et
une reproduction au musée de Londres



À cette époque, il n'était pas question de l'étude de l'ellipse de Hertz ou de la théorie de Carter mais seulement d'une alternative au cheval. L'absence de maîtrise de l'adhérence roue/rail n'a pas pesé bien lourd en l'absence d'autre mode de transport de masse. Le chemin de fer allait connaître un essor considérable, la majorité des infrastructures ferroviaires existantes de nos jours ont été construites au XIX^e siècle.

L'avènement d'autres modes de transport terrestre, automobile et aviation, va progressivement pousser le chemin de fer au déclin. La problématique du pétrole dans les années 1970 va lancer une nouvelle période incluant la recherche de la grande vitesse dont la seule véritable innovation se situe dans la TVM (transmission voie machine).

Le faible coefficient d'adhérence roue/rail est la seule raison d'exister du transport ferroviaire:

Un homme seul peut déplacer un wagon de 15 tonnes sur une voie plane.

Comprendre cela revient à comprendre l'intérêt du faible coefficient d'adhérence roue/rail : le faible besoin énergétique. C'est la raison de son utilité d'origine dans les mines. C'est aussi la raison qui a permis de créer le transport ferroviaire au XIX^e siècle avec des locomotives à vapeur de faible puissance. C'est ce qui permet encore de nos jours de tracter des trains de plusieurs milliers de tonnes de fret.

La seule raison d'exister encore de nos jours pour le chemin de fer réside dans cette faible adhérence au sol. Toutes les solutions techniques tendant à augmenter ce coefficient d'adhérence autrement que de manière corrective ponctuelle sont donc erronées car il y a alors perte de l'avantage énergétique en plus d'une usure prématurée du couple roue/rail.

La maîtrise de l'adhérence roues/rails ne s'entend qu'en conservant l'avantage du faible coefficient de base.

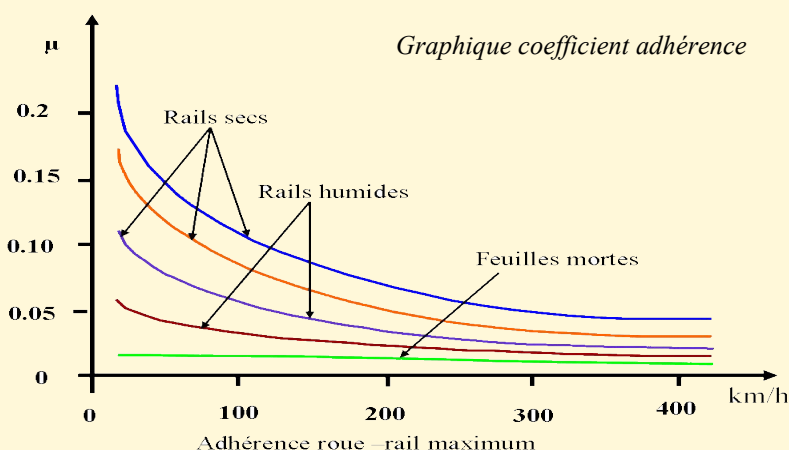
Comparaison avec l'aviation:

Pour mieux appréhender le problème, il est utile de comparer les distances d'arrêt d'urgence d'un train à grande vitesse et d'un avion à l'atterrissage car les problématiques sont proches, pour l'avion, il existe un diagramme qui permet au pilote de connaître précisément sa distance d'arrêt depuis le touchdown (toucher des roues au sol) à environ 250 km/h jusqu'à l'arrêt complet.

Le diagramme intègre un coefficient multiplicateur 1,xx selon l'état de la piste, c'est-à-dire le **coefficient d'adhérence disponible** pour le freinage de l'aéronef. Ainsi le pilote dispose d'un mini/maxi qui s'intègre dans la longueur de la piste. Les équipes techniques de l'aéroport garantissent un coefficient d'adhérence minimum de la piste (revêtement), en complément l'aéronef est équipé des pneumatiques adaptés pour supporter les efforts de freinage requis. Le couple "revêtement de piste"/"pneumatique" constitue le coefficient d'adhérence disponible pour le freinage de n'importe quel avion.

Pour le train à grande vitesse comme pour tous les trains, il n'existe aucun diagramme, et pour cause : aucune maîtrise du coefficient d'adhérence pour le freinage.

C'est au jugé et en faisant appel à son expérience (observation des freinages précédents et état visible du rail) que le conducteur détermine la distance et l'effort de freinage nécessaire pour obtenir l'arrêt du train. Les équipements de sécurité embarqués comparent la décélération effective par rapport à une valeur limite théorique et peuvent déclencher le freinage maximum mais jamais le coefficient d'adhérence réel



n'intervient dans les calculs. Les distances de cantonnement intègrent cette adhérence aléatoire au freinage par leur longueur mais il arrive que le signal de protection soit franchi par le train en raison d'une adhérence trop faible pour s'arrêter avant.

Le freinage d'urgence d'un train s'adapte à l'adhérence disponible qui est toujours aléatoire. Les constructeurs de trains ne fournissent que la distance d'arrêt minimum, l'arrêt

d'urgence, car le maxi n'existe pas ou peut varier dans de telles proportions qu'il en devient une inconnue.

Les rails: Bulletin n° 93 page 13, site actgv.fr (rubrique/technique-rail),

On associe communément les problématiques d'adhérence roue/rail aux feuilles d'arbres qui se déposent sur les voies ferrées en automne. Si cette particularité saisonnière existe, elle représente une vision réduite de la réalité et des phénomènes faisant "vivre" une voie ferrée et plus particulièrement le ressuage du rail qui n'est pas pris en compte dans la technologie et l'organisation ferroviaire.

Les contraintes les plus importantes qui affectent les rails concernent l'alternance dilatation / rétraction liées aux écarts de température, non pas de l'air ambiant mais du rail lui-même. Si ces contraintes sont prises en compte pour la construction et la maintenance des voies ferrées quant aux conséquences sur la longueurs des fils de rail, elles sont oubliées quant à leur conséquence sur le coefficient d'adhérence.

La dilatation de l'acier allié du rail permet aux éléments en surface de pénétrer à l'intérieur, particulièrement les corps gras issus des huiles de graissage présentes sur les organes mécaniques des bogies, des graisseurs de boudins de roue et plus généralement de tous les corps gras présents à la surface des rails avant ou au moment de la dilatation. Le ressuage des aciers ou des alliages d'aluminium est bien connu en aéronautique où il est utilisé comme méthode de contrôle pour détecter les fissures de matière: contrôle de ressuage.

La rétraction de l'acier des rails en raison d'une baisse de sa température entraîne alors le ressuage en surface des corps gras qui l'ont pénétré. L'association de ces corps gras de surface avec de l'humidité ambiante (pluie fine, crachin et brouillard) entraîne une dégradation du coefficient d'adhérence plus ou moins importante.

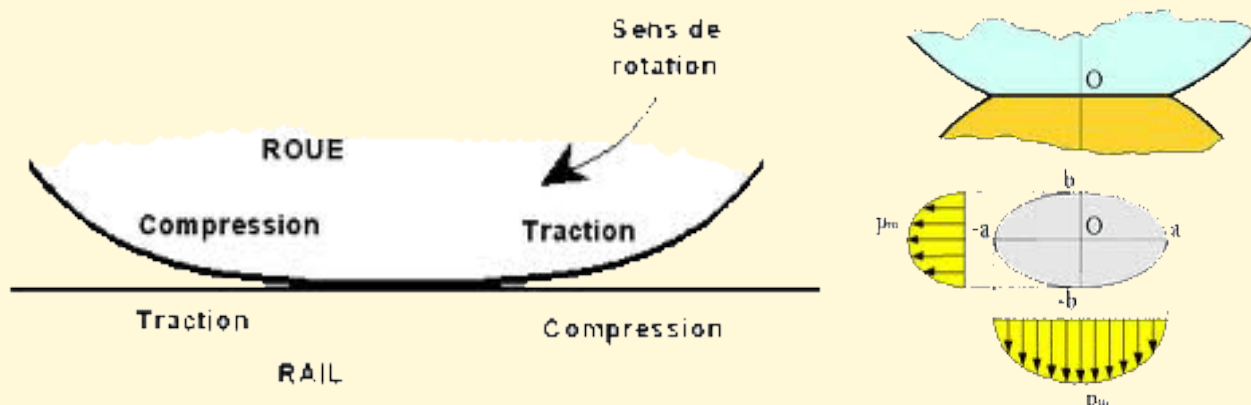
La vision communément admise selon laquelle les problèmes d'adhérence roue/rail sont limités à l'automne et la chute des feuilles d'arbres est fortement erronée même si cette période en représente le plus fort cumul. Il se trouve simplement que l'automne suit l'été et les fortes chaleurs sèches sous les climats tempérés. La quantité de corps gras déposés sur les rails et absorbée par lui est généralement la plus importante en été, toute chute suffisante de la température entraîne un ressuage qui, associée à de l'humidité, entraîne une dégradation significative de l'adhérence, même en plein été, alors qu'aucun moyen existant d'y remédier n'est alors mis en œuvre (lavage des rails).

Le phénomène de ressuage des rails est possible toute l'année et non simplement durant une période définie.

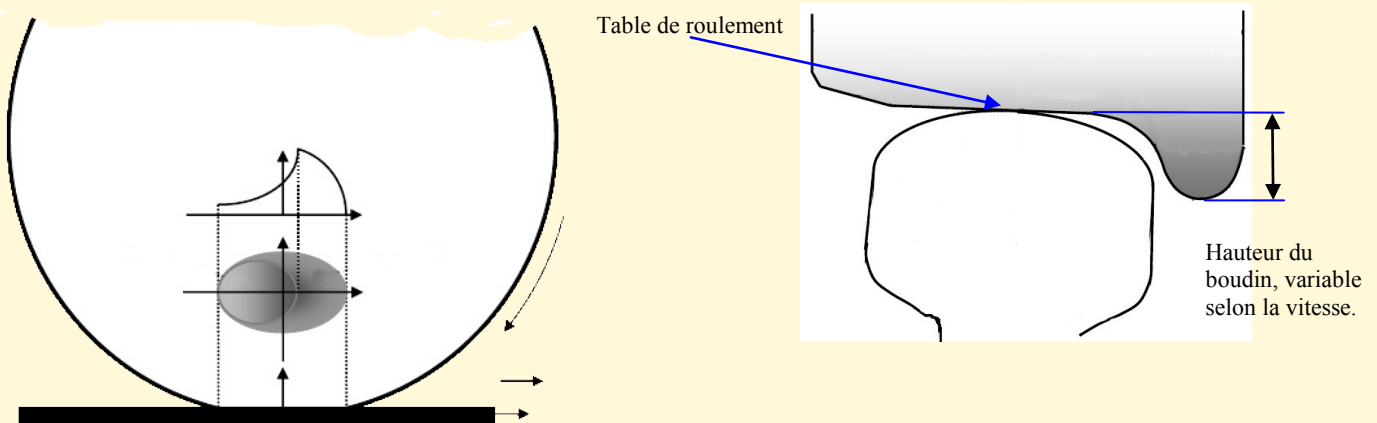
Les roues: (voir organes mécaniques rubrique technique: www.actgv.fr.)

Les roues sont à associer aux essieux, ces derniers aux bogies même si la partie qui nous intéresse ici est l'interface roue/rail. Les roues sont constitutives d'essieux rigides, les inscriptions en courbe étant réalisées par le profil de roue. Le déplacement latéral est limité par les boudins de roue qu'il faut graisser pour éviter une usure prématurée des rails. Différentes technologies existent allant jusqu'au différentiel moteur. Cependant, la technologie différentielle est neutre pour le freinage.

La modélisation dynamique du contact roues/rails met en évidence un glissement permanent, plus ou moins limité selon l'adhérence disponible. L'Ellipse de Hertz n'est pas suffisante pour déterminer le glissement total d'une roue. (L'évolution du torseur action mécanique appliqué sur le contact roue/rail, modélisable comme une somme d'un ensemble de contacts ponctuels infinitésimaux.



Le comportement en adhérence des contacts à l'échelle microscopique qui décide d'un glissement ou d'une adhérence. Pseudo glissement du contact roue/rail



Si, à l'arrêt du convoi, la surface de HERTZ peut être considérée comme intersection complète des surfaces de contact, il n'en est pas de même du mouvement, car il s'opère de façon locale sur la roue et sur le rail des mouvements de tractions et de compressions de la matière.

Le contact roue/rail n'est plus homogène et il apparaît deux zones d'équilibres bien distinctes du point de vue lois de COULOMB sur l'intersection des surfaces de contact :

- une portion où le contact roue/rail peut encore être considéré comme adhérent,
- - une portion où le contact roue/rail est glissant).

Les éléments variables de la roue influant sur l'adhérence roue/rail sont:

1. Une dissymétrie, même faible, des profils de roues d'un même essieu
2. Une dissymétrie excessive de diamètres des roues entre essieux d'un même bogie
3. La vitesse
- 4 La charge à l'essieu.

L'adhérence roue-rail:

Elle est à la base de la traction et du freinage dans la très grande majorité des chemins de fer , dans lesquels la puissance de traction et de freinage sont transmise par les roues au rail et repose donc sur le frottement entre une roue en acier sur un rail en acier.

On parle de « chemin de fer par adhérence » par opposition à d'autres système de traction comme les chemins de fer à crémaillère, dans lesquels la force de traction est transmise par l'engrenage d'une roue dentée sur une crémaillère située entre les rails, (le petit train de la Rhume, Le Panoramique Puy de Dômes etc...



Le Panoramique Puy de Dômes arrivant à la station.



Roue dentée de la crémaillère du Panoramique.

Petit train de la Rhune: (à crémaillère)



ou les funiculaires dans lesquels l'effort de traction est transmis par un câble tracteur.



À gauche le funiculaire de la Ville de Pau quittant le croisement.

À droite les câbles de traction des cabines du funiculaire.



Adhérence dégradée

On parle d'adhérence dégradée quand le coefficient de frottement entre les roues et les rails est insuffisant pour transmettre les efforts mécaniques de traction ou de freinage.

A mesure que l'intensité de la force de traction ou de freinage augmente, la portion adhérente diminue et laisse place à la portion glissante.

Au sein de la zone glissante, la vitesse circonférentielle de la roue tend à être plus élevée ou moins élevée par rapport à la vitesse de translation du moyeu :

Si nous sommes en traction:

- La partie tangentielle de l'action mécanique est dans le sens du vecteur vitesse de glissement, elle est donc motrice : La zone *patine*, la matière accélère localement dans la zone.

•

Si nous sommes en freinage:

- La partie tangentielle de l'action mécanique est dans le sens opposé au vecteur vitesse de glissement, elle est donc résistante : La zone « *enraye* », la matière tend à se bloquer localement dans la zone.
- Dès lors que la surface adhérente a complètement laissé place au glissement, il y a rupture d'adhérence. La désolidarisation du contact engendre « *patinage* » ou « *enrayage* » complet de la roue selon le cas.

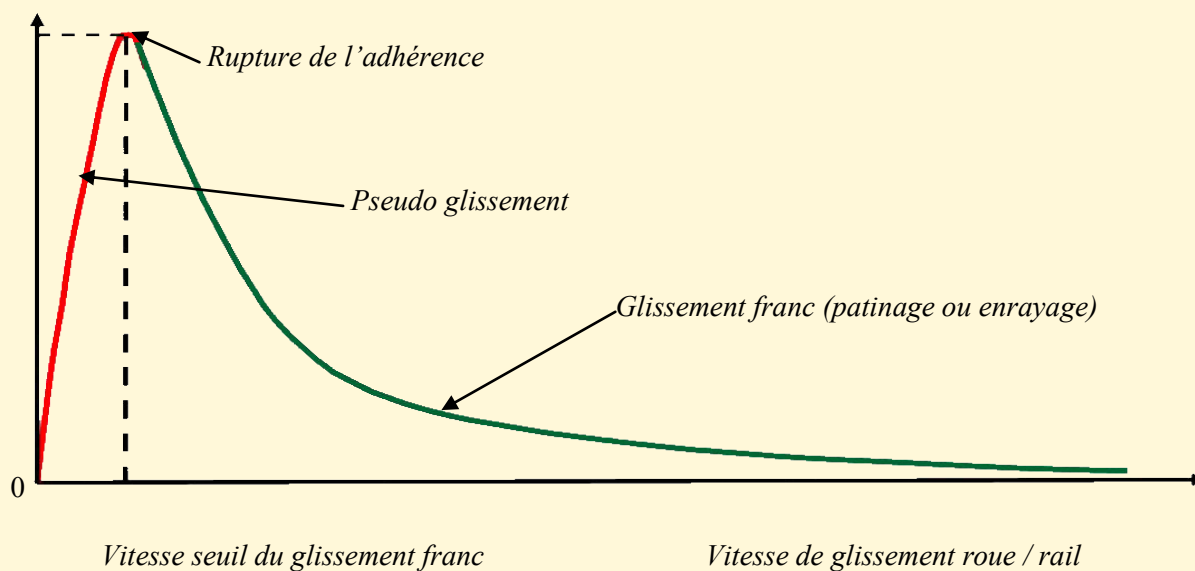
- Cette état intermédiaire entre l'adhérence et le glissement de la roue sur le rail se nomme le « *pseudo glissement* ». Caractéristique de l'effort transmissible en fonction de la vitesse de glissement.



Résultat d'un important patinage, il est à noter que l'acier de la roue est plus dur que celui du rail. L'exemple ci-dessus est exceptionnel. Le rail est complètement creusé, la table de roulement de la roue a peu souffert du patinage si ce les marques d'écaillement de celle-ci, nécessitant tout de même d'un reprofilage dès la rentrée à son centre de maintenance.

L'effort qui peut être fourni sur le contact roue rail est mesuré comme une fonction de la vitesse de glissement qui se crée localement.

Effort transmissible sur le contact



Tant que la surface adhérente est présente, la roue est en situation de pseudo glissement. Elle peut transmettre l'effort au rail via le contact. L'équilibre mécanique se stabilise autour d'une vitesse de glissement proportionnelle à cet effort (auquel peuvent être retranchées les pertes de frottement, de traction et de compression de la matière).

A partir d'un seuil, grossièrement associable à celui du coefficient d'adhérence, il y a basculement de l'équilibre stable en équilibre instable. L'effort exercé sur le contact fait croître brutalement la vitesse

glissement. Les surfaces de contacts désolidarisées font chuter considérablement l'effort transmis, ainsi la roue se retrouve indépendante du rail. Sous l'action de l'effort exercé sur la roue, cette dernière patine (dans le cas de la traction) ou tends à se bloquer (dans le cas du freinage).

Caractéristique de l'adhérence en fonction de la vitesse du convoi

A mesure que la vitesse du convoi augmente, il est vérifié expérimentalement que le coefficient d'adhérence diminue.

Une loi empirique a été établie
$$\mu = \mu_0 \frac{8 + 0.1 \cdot V}{8 + 0.2 \cdot V}$$

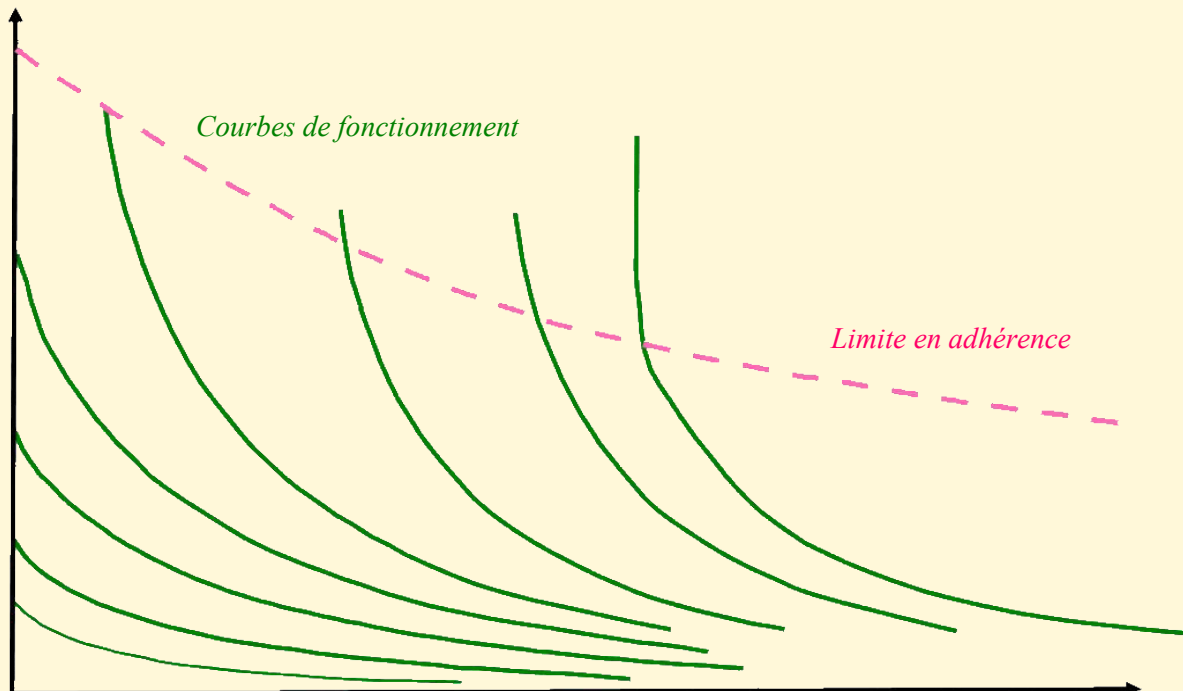
Avec V en km/h μ_0 et paramètre correspondant approximativement au coefficient d'adhérence à $V = 0$ km/h

La valeur maximale de la force de traction ou de freinage transmissible via un contact roue rail est donc $\mu(V) \cdot P$ P étant la charge appliquée sur le contact roue/rail en Newton.

Les caractéristiques Effort - Vitesse d'un engin moteur doivent s'inscrire à l'intérieur de la zone, et de ce fait, être nécessairement décroissante et de forme hyperbolique. Une chaîne de traction idéale à « équi-puissance », résout en partie le problème, mais des caractéristiques effort vitesse encore plus accentuées peuvent être obtenues avec des organes de traction adaptés :

- Moteur à courant continu à excitation série,
- Coupleur hydraulique de type *convertisseur de couple*.

Les facteurs influençant sur le coefficient d'adhérence



Facteurs environnementaux:

Sur le terrain, l'adhérence est soumise à divers facteurs tel que :

- Qualité des surfaces adhérentes,
- - Conditions climatiques,
- - Présence de matière organiques.

Ceci rend particulièrement complexe l'appréhension d'un phénomène pourtant primordial en exploitation ferroviaire.

Facteurs technologiques:

De nombreux critères mécaniques influent sur le coefficient d'adhérence et sont à l'origine des diverses configurations technologiques rencontrées sur les véhicules ferroviaires (que nous aurons l'occasion d'évoquer ultérieurement) :

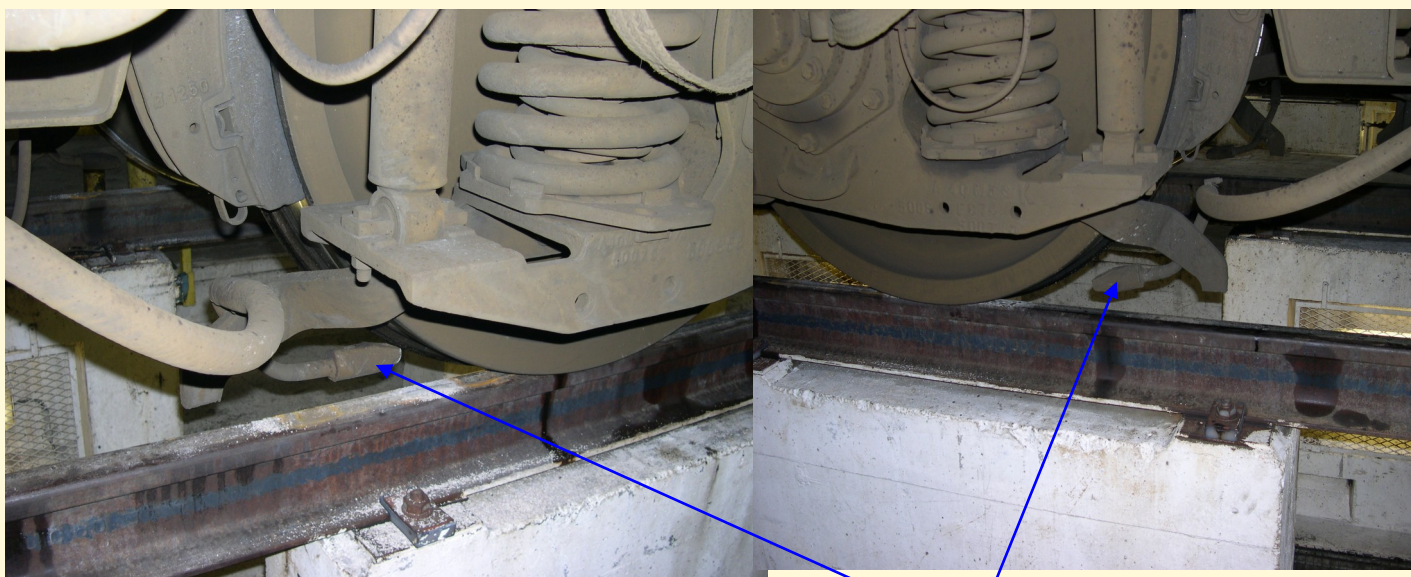
- Tenue de la suspension,
- Disposition des organes de traction sur les bogies,
- Répartition des charges sur les essieux,
- Empattement (écartement) entre essieux,
- Transmission de l'effort de traction entre bogies et caisse.
- Phénomènes de *cabrage* ou de *broutage* (inégalités entre hauteurs des points de contact d'une roue à l'autre, d'un bogie à un autre)

La chaîne de traction d'un engin moteur peut par son comportement, atténuer dans une certaine mesure, le risque de basculement en glissement franc des roues motrices :

- Un équipement haute tension monophasé, du fait de son caractère *inductif* et de sa faible *résistance ohmique*, s'oppose à l'instabilité du comportement électro-dynamique des moteurs à courant continu.
- Une transmission diesel-électrique par son réglage en *hyper adhérence*, à savoir la modification des caractéristiques tension-intensité de l'alternateur, stabilise le point de fonctionnement des moteurs à courant continu
- Une chaîne de traction à semi-conducteur actif présente une réactivité en mesure de maintenir stable un point d'équilibre.

Des dispositifs de contrôle d'adhérence embarqués (*anti-patinage* et *anti-enrayage*) au sein des véhicules ferroviaires tendent à améliorer l'adhérence de manière convaincante. Les dernières évolutions technologiques peuvent maintenir la roue sur un point d'équilibre normalement instable dans le but d'assurer le nettoyage de roulement des surfaces de contact. Cependant, l'appréhension du point d'équilibre du contact roue/rail est estimée de manière indirecte sur la mesure du facteur accélération et dérivée de l'accélération (*jerk*). Aussi lorsque le contact roue/rail est glissant, il n'est plus possible de procéder à un relevé direct de la vitesse de la roue. Il n'est toujours guère possible à ce jour de mesurer concrètement le glissement localisée d'une roue et encore moins de mettre en œuvre une modélisation du contact roue/rail, ce qui en permettrait pourtant le contrôle direct.

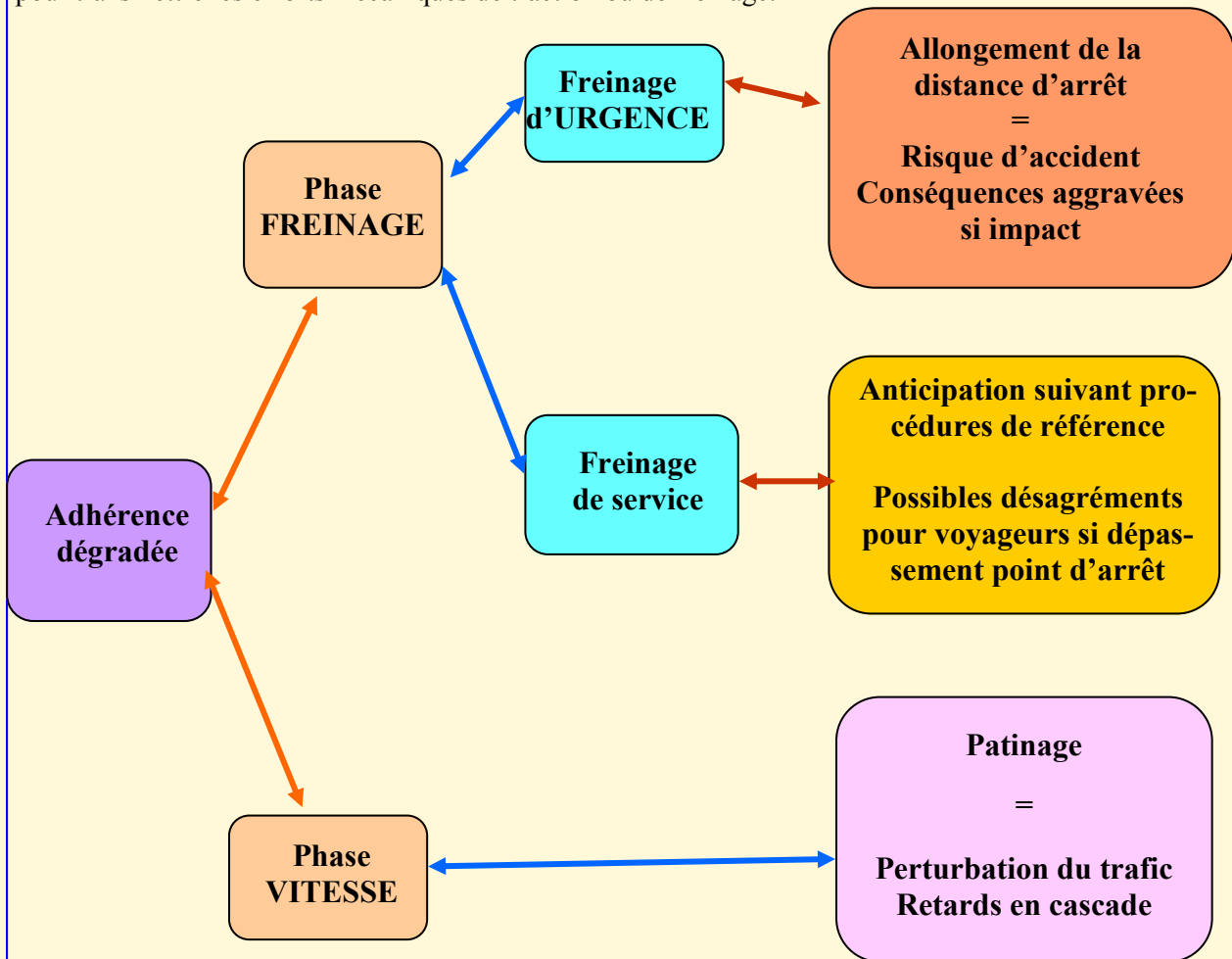
Le **sablage**, a toujours constitué et depuis le début du chemin de fer, l'ultime recours pour maintenir une roue en adhérence sur le rail.



Éjecteur de sable.

Adhérence dégradée:

On parle d'adhérence dégradée quand le coefficient de frottement entre les roues et les rails est insuffisant pour transmettre les efforts mécaniques de traction ou de freinage.



L'adhérence est réduite lorsque les rails sont dits "gras". Une erreur communément admise considère la pluie comme cause alors que l'eau est détergente naturellement.

D'ailleurs, la plupart du temps, c'est la pluie qui nettoie les rails. Un temps pluvieux est souvent accompagné d'une baisse de température, c'est cette dernière qui provoque le ressuage des rails. Un temps pluvieux démarre généralement par quelques gouttes, celles-ci restent d'abord en surface du rail. Les résidus graisseux ressués, d'origine végétale ou de lubrifiants pétroliers, remontent alors en surface de la pellicule d'eau (l'huile flotte) et enduisent les roues bien au-delà de la surface de contact par projection. Lorsque les roues sont graissées, elles perdent plus ou moins rapidement l'adhérence.

Les feuilles mortes en décomposition se transforment, sous l'action des roues, en un enduit de lignine glissant.

La lutte contre la perte d'adhérence due aux feuilles mortes, qui constitue un réel problème sur certaines sections de lignes, comprend l'application de sandite (un mélange gel-sable) par des trains spéciaux de sablage, le lavage des rails par des jets d'eau sous pression et, à plus long terme, par l'élagage de la végétation, le long des voies. Une autre solution consiste à augmenter le nombre de roues en contact avec la voie avec, par exemple, en utilisant plusieurs motrices.

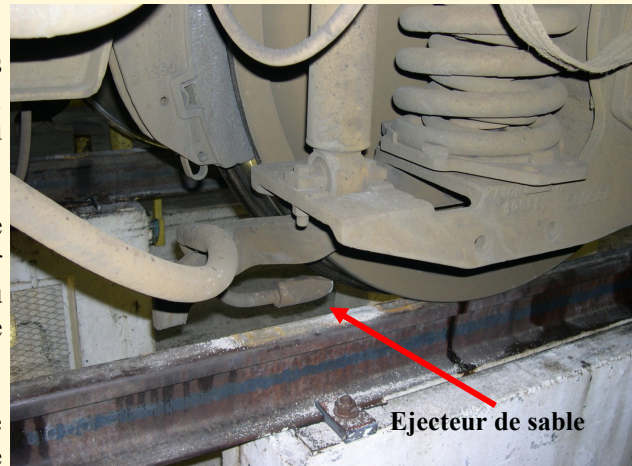
Le sablage:

L'utilisation de sable pour compenser les carences d'adhérence roue/rail est une solution employée pour améliorer l'adhérence.

Pour corriger les carences d'adhérence roue/rail, les engins moteurs (locomotives, automotrices, automoteurs) sont équipés de sablières contenant du sable sec qui peut être projeté sur le dessus des rails.

Cependant, l'efficacité de cette technique trouve vite ses limites. Pour cette raison, les rails sont lavés par des machines spéciales lorsque la prévisibilité du phénomène est possible, c'est-à-dire durant la chute des feuilles d'arbres en automne.

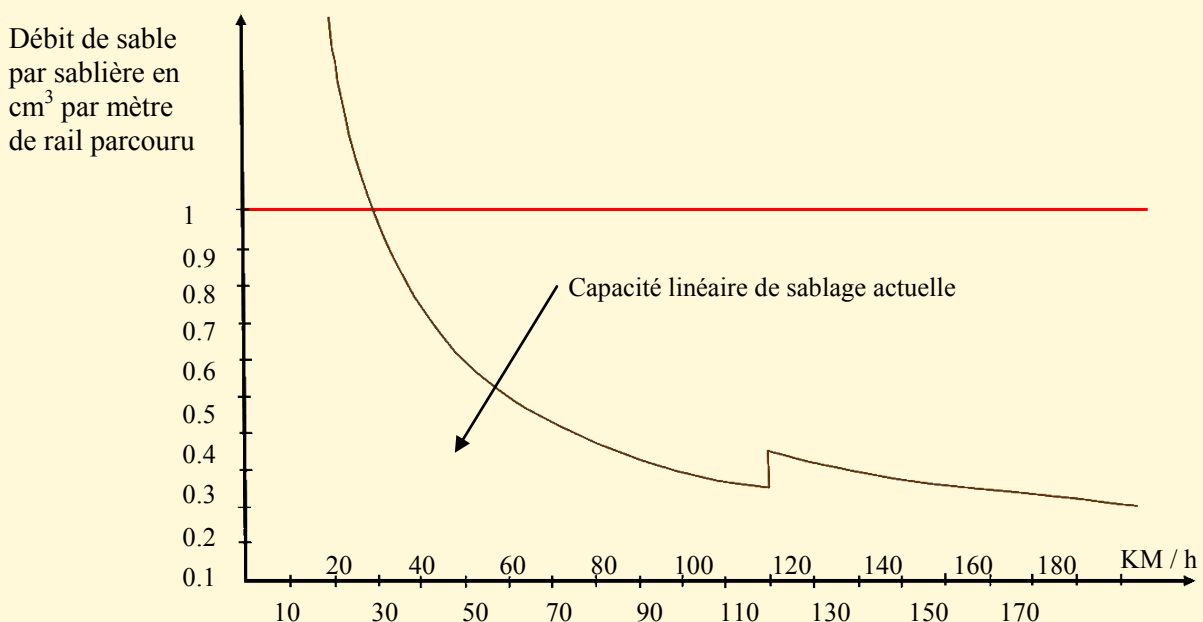
Cette solution n'est pas très efficace et rend nécessaire l'utilisation de machines laveuses de rails qui, compte tenu du coût, ne sont mises en œuvre qu'à des périodes choisies.



Train laveur de rails.

L'efficacité du sablage diminue quand les besoins augmentent, conséquence d'une technologie obsolète conçue il y a un siècle: le sablage à débit fixe. Il suffit de rapprocher le graphique du coefficient d'adhérence ci-dessus de celui du débit de sable. Cela montre bien que l'efficacité du sablage actuel se réduit en même temps que l'adhérence.

Le graphique montre (ligne rouge horizontale) la capacité de sablage nécessaire pour réellement pouvoir compenser les pertes d'adhérence en traction et en freinage d'urgence.



Par ailleurs, on peut voir que le débit de sable pour une vitesse $< 30\text{km/h}$ est beaucoup trop élevé, le sable s'opposant alors au mouvement en traction.

Le débit linéaire de référence est de 1 cm^3 par mètre de rail parcouru, norme UIC. Hors, ce débit n'est effectif qu'à la vitesse de 30 km/h .

Dans le système de sablage actuel, le sable est posé sur le rail par gravité, il existe également le sablage sous pression à l'aide d'un injecteur à air comprimé (voir photos page précédente) . Il est donc très sensible aux perturbations aérodynamiques en plus de boucher facilement les conduites de descente. La fiabilité est donc particulièrement aléatoire.

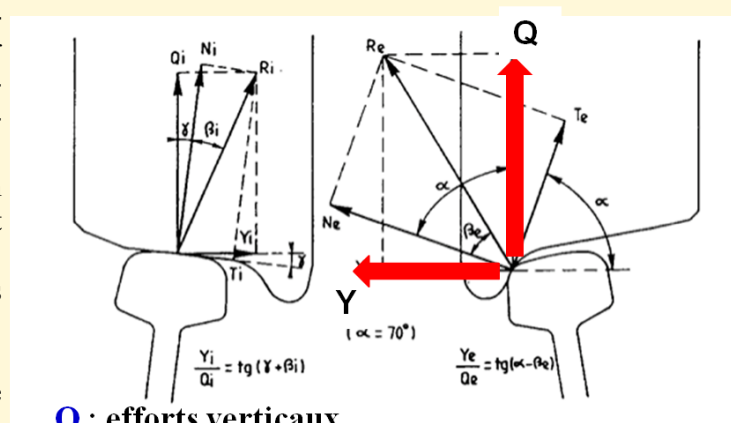
Maîtriser l'adhérence roue/rail permet de maîtriser les performances de freinage, de freinage d'urgence et de traction

Maîtriser l'adhérence roues/rails à toutes les vitesses et toutes les conditions d'environnement:

Cette maîtrise commence dans le cahier des charges:

1. Sous les climats tempérés, les carences d'adhérence peuvent se produire sur toutes sections de lignes, en toutes saisons, pour tous les types de train, pour toutes les déclivités, à toutes les vitesses. Elles ont un caractère imprévisibles pour la plupart, hormis les feuilles d'arbres en automne. Une technologie embarquée est donc nécessaire, disponible à tout moment.
2. La quantité de sable embarquée doit être suffisante entre 2 ravitaillements successifs. La consommation de sable doit être la plus basse possible et la plus efficace possible.
3. Le sable perdu par les perturbations aérodynamiques est inutilement éjecté. Le sable nécessite d'être éjecté à une vitesse suffisante pour ne pas subir de déviation aérodynamique.
4. Le débit possible de sable par sableur nécessite d'être égal à 1 cm^3 de sable / mètre de rail parcouru ou s'en approcher au plus près. La capacité de débit / sablière doit être multipliée. Cependant, la quantité d'air comprimé disponible ne pouvant augmenter dans les mêmes proportions, des nouveaux éjecteurs très performants sont nécessaires.
5. En traction, l'adhérence dégradée ou perte d'adhérence ne se conçoit que sur des "zones" de voie de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres. La vitesse de passage de ces zones détermine la durée de sablage. Plus la chute de vitesse est importante, plus le temps de sablage est augmenté. En sablant à un débit plus élevé, suffisant pour maintenir la vitesse, le temps de franchissement de la section de voie affectée est réduit. La consommation de sable sera réduite elle est pilotée par électronique et asservie à l'antipatinage.
6. En freinage d'urgence, l'adhérence dégradée se traduit par une augmentation de la distance d'arrêt. Les systèmes ABS permettent d'adapter la puissance de freinage à l'adhérence disponible mais ne la corrige pas. Rétablir l'adhérence optimale permet de maintenir les meilleures performances de freinage possible.
7. La fiabilité est importante. L'utilisation de pièces mécaniques en mouvement doit être réduite au maximum.
8. Il est interdit d'utiliser le sablage sur les appareils de voies (aiguillages)

Dans la mesure du possible, cette technologie nécessite d'être adaptable à la quasi totalité des véhicules ferroviaires en circulation.



Q : efforts verticaux

Y : efforts transversaux

Rapport Y/Q : critère de déraillement

Schéma de maintien bandage-roue.

