

LES LOIS PHYSIQUES DU FREINAGE

Du point de vue de la conduite automobile, le freinage d'urgence est sans doute le geste technique le plus difficile à réaliser. C'est pourtant un geste essentiel car, selon les termes du code de la route, seul le freinage permet au conducteur de rester « *constamment maître de sa vitesse* » quelles que soient les circonstances...

Que nous enseigne la physique à propos du freinage ? Que peut-on mesurer ? Que peut-on calculer ? Voici quelques éléments de réponses....

Les tests de freinage

Pour qui veut percer les mystères du freinage, il faut procéder à des tests impliquant un conducteur, une voiture et une route, ceci afin de relever des mesures fondamentales qui seront ensuite utilisées pour différents calculs.

Ces tests, les essayeurs de la presse automobile en organisent régulièrement et les résultats obtenus sont riches d'enseignements. Mais, pour garantir des mesures fiables, comment procéder et que doit-on mesurer ?

La méthode classique : le décamètre !

La méthode la plus classique consiste à mesurer la vitesse initiale et la distance de freinage. Du point de vue de la physique en effet, ces deux valeurs suffisent pour calculer ensuite tous les autres paramètres du freinage : décélération, temps de freinage, coefficient d'adhérence, etc.

Attention ! Pour éviter les approximations, il est nécessaire d'étalonner le tachymètre de la voiture afin que la vitesse initiale soit bien une vitesse chrono et non une vitesse compteur (voir dossier ADILCA "*vitesse*").

La zone de freinage sera ensuite abordée au régulateur calé sur une valeur qui tient compte de l'imprécision du compteur. Aucun danger : le régulateur de vitesse se déconnecte dès que le conducteur touche la pédale de frein et de toutes manières, le système de freinage est toujours capable d'arrêter une voiture dont le moteur s'emballe.

Exemple : on souhaite mesurer la distance de freinage avec une vitesse initiale de 108 km.h^{-1} (30 m.s^{-1}). Si l'imprécision du tachymètre est de 2,5 %, la zone de freinage doit être abordée à 111 km.h^{-1} compteur.

Il ne reste plus qu'à utiliser un bon vieux décamètre pour mesurer la distance de freinage ! Mais où commence cette fameuse distance ? Mieux vaut équiper la voiture d'un canon à plâtre dirigé vers le sol et commandé électriquement par l'allumage des feux stop. Ainsi, aucune erreur possible.

Afin d'améliorer la précision des calculs, il vaut mieux procéder à trois tests et faire la moyenne des trois mesures, les performances de freinage pouvant varier d'un test à l'autre selon la forme du conducteur, la température du système de freinage ou celle du sol et des pneumatiques.

La méthode des fainéants : le chronomètre !

En effet, à condition de connaître la vitesse initiale de la voiture, il suffit d'un chronomètre pour mesurer le temps de freinage et le tour est joué ! Le décamètre devient inutile et il n'y a même plus besoin de descendre de voiture, les fainéants apprécieront ! Du point de vue de la physique en effet, deux données suffisent pour calculer ensuite tous les autres paramètres du freinage : décélération, distance de freinage, etc.

Hélas, cette méthode est moins précise que la précédente sauf si le déclenchement du chronomètre est couplé à l'allumage des feux stop. Mais dans ce cas, *quid* de l'arrêt du chrono ?

La méthode moderne : l'ordinateur !

La méthode désormais la plus souvent employée par les essayeurs de la presse automobile est aussi la plus simple, la plus moderne et la plus pratique.

Elle consiste à utiliser un ordinateur de freinage couramment appelé "FREINOGRAPH" (marque déposée). Cet appareil se charge de tout ! Adieu canon à plâtre, décamètre ou chronomètre ! Et plus besoin non plus de se soucier de la vitesse initiale ! Adieu calculatrice sophistiquée !

Comment fonctionne cet appareil magique ? D'une manière très rudimentaire en réalité puisqu'il n'est muni que d'un capteur de décélération, d'un chronomètre et d'un calculateur basique. Le capteur mesure l'intensité de la décélération, le chronomètre mesure sa durée et le calculateur se charge ensuite de tout le reste.

Ni mystère ni magie dans cet appareil : du point de vue de la physique en effet, l'intensité de la décélération et le temps de freinage suffisent pour calculer ensuite tous les autres paramètres tels que vitesse initiale, distance de freinage, etc. C'est ce que fait le calculateur. Seule précaution métrologique : le freinage doit aboutir à l'immobilisation complète de la voiture, l'appareil ne discernant pas les variations de vitesse.

Le résultat des tests...

Les trois méthodes exposées ci-dessus nous donnent différentes valeurs fondamentales qui compte-tenu des performances des voitures modernes, pourraient être celles-ci :

- vitesse initiale : 108 km.h^{-1} (30 m.s^{-1}),

- distance de freinage : 45 mètres,
- temps de freinage : 3 secondes.

Que peut-on calculer ensuite ? Plein de choses !...

La décélération

Premier calcul simple : la décélération. En effet, en combinant la vitesse initiale et la distance ou le temps de freinage, on calcule rapidement l'intensité de la décélération, ici égale à 10 m.s^{-2} .

Le coefficient d'adhérence

Deuxième calcul simple : le coefficient d'adhérence. La décélération de la voiture étant égale à 10 m.s^{-2} , ce coefficient est évidemment égal à 1 et cela n'a rien d'étonnant !

Des essais régulièrement publiés dans la presse montrent en effet que près de la moitié des voitures modernes (ou plutôt : les pneumatiques dont elles sont équipées) sont aujourd'hui capables de créer un coefficient d'adhérence égal à 1 ou supérieur.

La variation de vitesse

Troisième calcul simple : la variation de vitesse. La décélération de la voiture étant égale à 10 m.s^{-2} , cela signifie que la vitesse diminue de 10 m.s^{-1} par seconde. Il est alors facile de calculer celle-ci à chaque intervalle de temps. Cette vitesse est de :

- 72 km.h^{-1} (20 m.s^{-1}) au bout d'une seconde de freinage,
- 36 km.h^{-1} (10 m.s^{-1}) au bout de deux secondes de freinage,
- 0 au bout de trois secondes de freinage.

La distance parcourue pendant le freinage

C'est un calcul plus compliqué ! Il nous montre que la voiture a parcouru :

- 25 mètres pendant la première seconde de freinage,
- 15 mètres pendant la deuxième seconde de freinage,
- 5 mètres pendant la troisième seconde de freinage.

On touche du doigt la complexité du freinage, la distance parcourue pendant le temps de freinage n'étant pas identique pour chaque seconde écoulée...

La force de freinage

La force de freinage s'exerce au contact du sol, c'est donc une force impossible à mesurer directement mais il reste néanmoins possible d'en calculer l'intensité. Pour cela, il suffit simplement de connaître la masse de la voiture.

Prenons pour hypothèse une voiture de masse 1500 kilogrammes. La force de freinage est alors égale à 15 000 newtons. C'est la force moyenne produite au contact du sol par la bande de roulement des quatre pneumatiques.

Le travail de la force de freinage

La force de freinage s'est exercée sur une distance de 45 mètres, il est donc facile de calculer le travail accompli, au sens physique du terme. Ce travail est égal à 675 000 joules.

Un simple calcul de l'énergie cinétique initiale de la voiture permet en outre de vérifier l'exactitude des théories de James Joule (physicien anglais, 1818-1889) : l'énergie cinétique initiale (675 000 joules) a bien été transformée par le travail d'une force et ces deux grandeurs sont strictement égales !

La puissance de freinage

Du travail à la puissance il n'y a qu'un pas qu'on peut franchir allègrement, étant donné que nous connaissons la durée du freinage, égale à 3 secondes. Cette puissance est ici égale à 225 kilowatts.

C'est une valeur remarquable, bien supérieure à celle délivrée par la plupart des moteurs. Pour s'en faire une idée plus précise, il suffit de l'exprimer en cheval vapeur, ancienne unité de puissance bannie en 1961 mais encore utilisée de nos jours dans le milieu du commerce automobile. Ces 225 kilowatts correspondent à 306 chevaux !

Cette valeur confirme que la force de freinage est toujours largement capable d'arrêter n'importe quelle voiture, même si l'accélérateur reste bloqué à fond. Des sept forces qui s'exercent sur la voiture, la force de freinage est bien la première par ordre de grandeur et d'importance.

Et si on référençait les modèles de voitures par rapport à leur puissance de freinage et non plus par rapport à celle du moteur ?

La variation d'énergie cinétique

L'énergie cinétique initiale de la voiture et la distance parcourue pendant le freinage permettent de calculer la variation d'énergie cinétique à chaque intervalle de temps. La voiture a perdu :

- 375 000 joules sur une distance de 25 mètres pendant la première seconde,
- 225 000 joules sur une distance de 15 mètres pendant la deuxième seconde,
- 75 000 joules sur une distance de 5 mètres pendant la troisième seconde.

Ce résultat confirme bien que l'énergie cinétique se dissipe grâce à une force et à une distance.

La cadence de réduction de cette énergie est ici de 15 000 joules par mètre de freinage, grandeur uniquement liée aux conditions du test mais totalement indépendante de la vitesse ou de la distance parcourue pendant ce freinage.

La chaleur du freinage

Qu'est devenue cette énergie ? Elle a été convertie en chaleur, essentiellement au niveau des freins.

La masse totale du système de freinage, le matériau dont il est constitué et sa capacité thermique permettent de calculer la variation de température correspondante.

Par exemple, si la voiture est munie de quatre freins à disques en acier de masse totale 15 kilogrammes et de capacité thermique voisine de $0,5 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, le système de freinage voit sa température s'élever d'environ 90 °C.

Le rapport masse / surface de contact au sol

La masse de la voiture et la surface de contact au sol des pneumatiques autorisent le calcul du rapport masse/surface appelé *masse surfacique*, grandeur qui renseigne sur le travail effectué par la bande de roulement des pneumatiques.

En prenant pour hypothèse une surface totale de contact au sol des quatre pneumatiques égale à 1000 cm^2 ($0,1 \text{ m}^2$), ce rapport est 1,5. Cela signifie que chaque centimètre-carré de pneu doit freiner une masse de 1,5 kilogrammes.

Cette grandeur est déterminante dans le choix de la texture de la gomme des pneumatiques car le manufacturier doit trouver un compromis entre endurance et adhérence.

La surface de freinage

On peut calculer enfin ce qu'on appelle la surface de freinage, c'est à dire la surface totale de revêtement routier ayant participé au freinage. En prenant pour hypothèse une surface de contact au sol de $0,1 \text{ m}^2$, la surface totale de revêtement ayant participé au freinage est $4,5 \text{ m}^2$.

Cela signifie que, toutes conditions égales par ailleurs, il serait possible de réduire la distance de freinage de cette voiture en adoptant simplement des pneumatiques plus larges garnis d'une gomme plus tendre.

En effet, pour une surface de freinage équivalente, l'augmentation de largeur se traduirait alors par une réduction de longueur et donc de distance !

Dès lors, pour le physicien, presque tous les mystères du freinage ont été élucidés !