LA FORCE DE FREINAGE

ou 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 ? Et la force de freinage, cette fameuse force sans laquelle rien se serait possible, qu'en sait-on exactement ? Voici quelques éléments de réponses….

Les tests de freinage

Pour qui veut percer les mystères du freinage, des tests impliquant un conducteur, une voiture et une piste d'essais sont nécessaires. Les quelques mesures relevées 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 faut-il procéder et que doit-on mesurer ?

Choisir la bonne piste !

Et d'abord, quelle piste choisir ? Elle doit obéir aux caractéristiques suivantes : une longue ligne droite, sans déclivité ni dévers, garnie d'un revêtement uniforme, un bitume de dernière génération si l'on souhaite mesurer des performances maximales de freinage.

Quant à la voiture, elle doit être récente, en bon état, donc sortie d'un atelier de révision ou de contrôle, et surtout, confiée à un conducteur sachant freiner (ce n'est pas si fréquent, paraît-il !).

En plus du conducteur, la voiture doit accueillir un passager installé à l'avant, ceci afin d'équilibrer la répartition des masses. En avant, c'est parti !

La méthode classique : le décamètre !

La méthode la plus classique consiste à mesurer la vitesse initiale de la voiture 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 : la décélération, le temps de freinage, le 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 réelle, et non une vitesse compteur (voir dossier ADILCA ''*vitesse / compteurs de vitesse*'').

La zone de freinage sera ensuite abordée au régulateur, calé sur une valeur qui tient compte de l'incertitude du compteur. Aucun danger, car le régulateur de vitesse se déconnecte dès que le conducteur actionne la pédale de frein. De toutes manières, le système de freinage est toujours capable d'arrêter une voiture, même si l'accélérateur est resté bloqué à fond.

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

Il ne reste plus alors qu'à utiliser un bon vieux décamètre pour mesurer la distance de freinage ! Mais où commence cette fameuse distance ? Si la voiture est équipée d'un canon à plâtre dirigé vers le sol et commandé électriquement par l'allumage des feux stop, la précision est garantie, il n'y a pas d'erreur possible.

Afin d'améliorer la fiabilité des résultats, il est préférable de calculer la moyenne d'au moins trois essais, les performances de freinage pouvant varier d'un test à l'autre selon la forme du conducteur, la température du sol ou celle des pneumatiques et du système de freinage.

La méthode des paresseux : le chronomètre !

Oui ! Un simple chronomètre peut suffire ! En effet, en combinant la vitesse initiale de la voiture et son temps de freinage, il est possible de calculer tous les autres paramètres tels que la décélération, la distance de freinage, etc. ! Le décamètre devient inutile et il n'y a même plus besoin de descendre de voiture, les paresseux apprécieront !

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 préférée des essayeurs de la presse automobile est aussi la plus moderne et la plus pratique.

Elle consiste à utiliser un ordinateur de freinage, couramment appelé ''FREINOGRAPHE'' (marque déposée par la société PROJETEL).

L'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 !

Mais 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, comme son nom l'indique, le calculateur se charge ensuite de tous les calculs.

Ni mystère, ni magie dans tout ça : du point de vue de la physique en effet, l'intensité de la décélération et le temps de freinage suffisent pour calculer tous les autres paramètres tels que la vitesse initiale, la distance de freinage, etc. C'est là le rôle du calculateur. Seule précaution élémentaire : 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 grandeurs fondamentales qui, compte-tenu des performances des voitures modernes, pourraient être celles-ci :

- vitesse initiale : 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) ;
- 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, qui se définit comme la variation de vitesse par unité de temps.

En combinant la vitesse initiale (30 $m.s^{-1}$) et le temps de freinage (3 s), on calcule aisément l'intensité de la décélération, ici égale à 10 mètres par seconde carrée (unité d'accélération ou de décélération, symbole $m.s^{-2}$).

Le coefficient d'adhérence

Deuxième calcul simple : le coefficient d'adhérence, qui se définit comme le rapport entre la décélération et une accélération de référence.

La décélération étant égale à 10 $m.s^{-2}$ et l'accélération de référence étant celle de la pesanteur terrestre (valeur approchée : ‘‘**g**’’ = 10 $m.s^{-2}$), le coefficient d'adhérence est ici exactement égal à 1 et cela n'a rien d'étonnant !

En effet, les essais de freinage régulièrement publiés dans la presse automobile montrent que, contrairement à une idée reçue, la plupart des voitures de tourisme (ou plutôt : les pneumatiques dont elles sont équipées) sont capables d'obtenir un coefficient d'adhérence égal à 1 ou supérieur.

Le glissement des pneumatiques

Supposons qu'au cours du freinage, le conducteur ait déclenché le système antiblocage, et supposons que ce système soit configuré pour intervenir à partir de 5 % de glissement, cela signifie que durant le freinage, la vitesse circonférentielle des roues était de 5 % inférieure à la vitesse de translation de la voiture.

Par exemple, à l'instant précis où la vitesse de translation de la voiture était de 100 $km.h^{-1}$, la vitesse circonférentielle des roues était de 95 $km.h^{-1}$.

La variation de vitesse

Autre calcul simple : la variation de vitesse, qui se définit comme la vitesse acquise à chaque intervalle de temps.

La décélération de la voiture étant égale à 10 $m.s^{-2}$, cela signifie que la vitesse diminue de 10 mètres par seconde (unité de variation de vitesse, symbole $m.s^{-1}$) pour chaque seconde écoulée.

Il est alors facile de calculer la vitesse acquise à chaque intervalle de temps :

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

La distance de freinage

La distance de freinage se définit comme la distance parcourue pendant la décélération.

En combinant les valeurs précédentes, il est possible de calculer cette distance à chaque intervalle de temps. Ainsi, 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 ici du doigt la difficulté à percevoir ce phénomène, la distance parcourue pendant le freinage n'étant pas identique à chaque intervalle de temps.

La force de freinage

La force de freinage se définit comme la force qui ralentit la voiture lorsque le conducteur actionne la pédale de frein.

Cette fameuse force, celle sans laquelle rien ne serait possible, s'exerce sur les quatre pneumatiques au contact du sol, il est donc impossible de la mesurer directement.

Mais il reste néanmoins possible d'en calculer l'intensité. Pour cela, il suffit simplement de connaître la masse de la voiture, sa décélération, et de combiner les deux grandeurs.

Prenons comme hypothèse une voiture de masse 1 500 kilogrammes (unité de masse, symbole kg) circulant sur une route horizontale : une décélération de 10 $m.s^{-2}$ suppose une force de freinage de 15 000 newtons (unité de force, symbole N).

Si on néglige la résistance de l'air, la résistance au roulement et le frein moteur, c'est la force moyenne résultant de l'interaction entre le revêtement routier et la bande de roulement des quatre pneumatiques [(1)].

Le principe de réciprocité

Selon le troisième principe de Newton (*principe de réciprocité*), toute force qui s'exerce sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé.

Cette réaction provient de la masse de la voiture, elle consiste en une poussée horizontale qui s'exerce sur la Terre [(2)], mais sans conséquence quant à son mouvement de rotation, le rapport des masses étant en sa faveur [(3)].

Le tangage

Le tangage se définit comme le mouvement de rotation de la masse de la voiture autour de son centre de gravité, mouvement causé par la force de freinage et qui s'explique par la hauteur séparant le centre de gravité du sol.

La réaction de tangage est proportionnelle à la masse, à la décélération et au rapport entre la hauteur du centre de gravité et la longueur de l'empattement.

Ainsi, si on considère une voiture de masse 1 500 kg caractérisée par un centre de gravité de 0,5 mètre de haut pour un empattement de 2,5 mètres de long, une décélération de 10 $m.s^{-2}$ génère un tangage de 3 kN.

La charge dynamique des trains

Le tangage déleste le train arrière et augmente la charge du train avant pendant le freinage, c'est ce qu'on appelle la charge dynamique des trains.

Si on considère une voiture pesant 15 kN (''**g**'' = 10 $m.s^{-2}$), caractérisée par un centre de gravité de 0,5 m de haut, un empattement de 2,5 m, une répartition des masses de 900 kg sur le train avant et 600 kg sur le train arrière, un tangage de 3 kN génère une charge dynamique de 12 kN sur le train avant (9 + 3) et 3 kN sur le train arrière (6 – 3).

Autrement dit : en délestant le train arrière (– 3 kN), le tangage s'ajoute à la charge du train avant (+ 3 kN), le poids total de la voiture restant évidemment inchangé.

La répartition du freinage

La charge dynamique des trains conditionne la répartition du freinage, grandeur qu'on exprime le plus souvent par un pourcentage.

Ainsi, dans l'exemple cité plus haut, le train avant doit transmettre 80 % de la force de freinage (12/15), le train arrière seulement 20 % (3/15).

L'énergie cinétique

L'énergie cinétique se définit comme la quantité d'énergie acquise par une masse en mouvement. Autrement dit, stopper une masse revient à supprimer son énergie cinétique (voir dossier ADILCA ''*énergie cinétique*'').

L'énergie cinétique acquise par une voiture correspond à l'énergie chimique apparue sous forme de mouvement suite à la combustion du carburant, déduction faite de toutes les pertes liées à l'échauffement du moteur, à l'entraînement des accessoires (pompe à huile, pompe à eau, alternateur, assistance de direction, climatisation…) et de la transmission (boîte de vitesses, différentiel).

Plus simplement, l'énergie cinétique étant égale au demi-produit de la masse par le carré de sa vitesse, un calcul nous montre que l'énergie cinétique de la voiture [(4)] au début du freinage était très exactement égale à 675 kilojoules (unité d'énergie, symbole kJ).

Cette quantité d'énergie cinétique correspond à la combustion d'environ 20 cm^3 de carburant (0,02 litre ou 1/50ème de litre), ce qui donne une idée, non seulement du pouvoir énergétique du carburant [(5)], mais aussi du faible rendement des moteurs thermiques (voir dossier ADILCA ''*combustion des carburants*'').

Le travail de la force de freinage

Le travail se définit comme l'énergie consommée par le déplacement d'une force.

Cette grandeur étant égale au produit de la force par la distance parcourue, il est facile de calculer le travail accompli, au sens physique du terme, par la force de freinage qui s'est exercée sur les pneumatiques de la voiture : ce travail est ici exactement égal à 675 kilojoules (unité de travail, symbole kJ).

La comparaison avec l'énergie cinétique initiale de la voiture permet de vérifier l'exactitude des théories de James Joule (physicien anglais, 1818-1889) : le travail et l'énergie sont deux grandeurs équivalentes, le concept de travail servant de lien entre les concepts de force, de déplacement et d'énergie.

L'énergie cinétique de la voiture (675 kJ) a bien été transformée par le travail de la force de freinage (675 kJ), ces deux grandeurs restant toujours strictement égales !

La puissance de freinage

La puissance se définit comme l'énergie consommée, produite ou transformée par unité de temps.

Connaissant la quantité d'énergie cinétique (675 kJ) et la durée du freinage (3 secondes), il est facile de calculer la puissance de freinage, égale à 225 kilowatts (unité de puissance, symbole kW).

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 (unité de puissance, symbole ch), unité encore couramment utilisée dans le milieu de l'automobile. Ces 225 kW correspondent à 306 ch !

Cette valeur confirme que la force de freinage est toujours largement capable d'arrêter n'importe quelle voiture, même si l'accélérateur est resté 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 la puissance de leur freinage, et non plus par rapport à la puissance de leur moteur ?

La variation d'énergie cinétique

La puissance étant une variation d'énergie par intervalle de temps, une puissance de 225 kW correspond à une variation d'énergie cinétique de 225 kilojoules par seconde (unité de variation d'énergie, symbole $kJ.s^{-1}$). Cependant, cette grandeur reste peu expressive dans l'esprit du grand public.

En combinant les valeurs précédentes de vitesse et de distance, on peut alors exprimer cette variation d'énergie, non plus en fonction du temps, mais en fonction de la distance parcourue pendant le freinage.

Ainsi, la voiture a perdu :

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

Ce résultat, surprenant en apparence, confirme que l'énergie cinétique se dissipe grâce au travail d'une force.

La cadence de réduction de cette énergie est ici de 15 kilojoules par mètre de freinage (unité de variation d'énergie, symbole $kJ.m^{-1}$), grandeur uniquement liée aux conditions du test (masse de la voiture, équipement pneumatique, nature du revêtement routier), mais par ailleurs complètement indépendante de la vitesse initiale ou de la distance parcourue pendant le freinage.

La chaleur du freinage

Qu'est devenue cette énergie cinétique ?

Selon le principe général de la conservation de l'énergie et de son équivalence quelle qu'en soit la forme, cette énergie cinétique a été intégralement convertie en une quantité égale d'énergie thermique (675 kJ), donc en chaleur, au niveau du revêtement routier, des pneumatiques et des freins. Cette conversion a été effectuée à 80 % par le train avant, à 20 % par le train arrière.

Si on néglige l'échauffement du revêtement routier, celui de la bande de roulement des pneumatiques, ainsi que les échanges entre les disques de freins et l'air ambiant, on peut calculer la variation de la température du système de freinage, à condition de connaître sa masse et la capacité thermique du matériau dont il est constitué.

À titre d'exemple, la capacité thermique de la fonte, matériau généralement utilisé pour les disques de freins, est voisine de 0,5 kilojoule par kilogramme et par kelvin (unité de capacité thermique, symbole $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$).

Cela signifie que, si la voiture est munie de deux freins à disques ventilés de masse totale 14 kilogrammes agissant sur le train avant, et de deux freins à disques pleins de masse totale 6 kilogrammes agissant sur le train arrière, le système de freinage voit sa température s'élever d'environ 77 kelvins (unité de température, symbole K) à l'avant, d'environ 45 kelvins à l'arrière, valeurs qui s'ajoutent à la température initiale du système.

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, grandeur également appelée *masse surfacique*.

En prenant pour hypothèse une masse de 1 500 kg et une surface totale de contact au sol des quatre pneumatiques égale à 1 000 cm^2 (0,1 m^2), ce rapport est ici égal à 1,5 (grandeur sans dimension).

Concrètement, cela signifie que chaque centimètre-carré de la bande de roulement des pneumatiques doit freiner une masse de 1,5 kilogramme.

Ce rapport est très important : il renseigne sur le travail effectué par la bande de roulement des pneumatiques ; il conditionne donc le choix de la composition de la gomme et sa texture, 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 des quatre pneumatiques égale à 0,1 m^2 et une distance de freinage de 45 mètres, la surface totale de revêtement routier ayant participé au freinage est égale à 4,5 m^2.

On peut logiquement en déduire que, pour réduire la distance de freinage, il suffirait d'équiper la voiture de pneumatiques plus larges, garnis d'une gomme plus tendre. En effet, dans cette hypothèse, l'augmentation de largeur se traduirait par une réduction de longueur, donc de distance, la surface de freinage restant inchangée.

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

(1) *Les différentes valeurs calculées dans ces pages supposent que la voiture circule sur une route parfaitement horizontale. Si ce n'est pas le cas, la composante du poids parallèle à la route s'ajoute à la force de freinage en montée, se retranche de cette force en descente (voir dossier ADILCA ''déclivités'').*

(2) *Cette réaction peut faire ''travailler'' le revêtement, ce qu'on peut constater par exemple sur les circuits automobiles, dans les zones de freinages intenses.*

(3) *Si on compare une voiture de 2 tonnes et la Terre (6 x 10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 3 x 10^{21}, soit 1 pour 3 000 milliards de milliards.*

(4) *On néglige l'énergie cinétique de rotation des roues et de la partie non débrayable de la transmission.*

(5) *On peut en déduire que, si le rendement du moteur était parfait et en l'absence de forces résistantes naturelles (résistance au roulement et résistance de l'air), ce volume de carburant suffirait pour propulser une masse immobile de 1 500 kg jusqu'à la vitesse de 108 $km.h^{-1}$.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

QUELQUES RELATIONS ENTRE GRANDEURS…

Poids :

P = M . g

P : poids, exprimé en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
g : accélération gravitationnelle terrestre, valeur approchée : **g** = 10 **m.s^{-2}**
cohérence des unités : **P** = kg . m.s^{-2} = **kg.m.s^{-2}** = **N**

Exemple : calculons le poids d'une voiture de masse 1 500 kg :

P = 1 500 x 10 = 15 000 **N**

Décélération :

ϒ = V² / 2 D

ϒ : décélération, exprimée en **m.s^{-2}**
V : vitesse initiale, exprimée en **m.s^{-1}**
D : distance de freinage, exprimée en **m**
cohérence des unités : **ϒ** = (m^{+1}.s^{-1})^{2} . m^{-1} = m^{+2}.s^{-2} . m^{-1} = **m.s^{-2}**

Exemple : calculons la décélération d'une voiture qui s'immobilise après avoir parcouru 45 m avec une vitesse initiale de 30 m.s^{-1} (108 km.h^{-1}) :

ϒ = 30^{2} / (2 x 45) = 900 / 90 = 10 **m.s^{-2}**

Temps de freinage :

T = V / ϒ

T : temps de freinage, exprimé en **s**
V : vitesse initiale, exprimée en **m.s^{-1}**
ϒ : décélération, exprimée en **m.s^{-2}**
cohérence des unités : **T** = m^{+1}.s^{-1} . m^{-1}.s^{+2} = **s**

Exemple : calculons le temps de freinage dans les conditions suivantes : vitesse initiale de 30 m.s^{-1} (108 km.h^{-1}), décélération de 10 m.s^{-2} :

T = 30 / 10 = 3 **s**

Vitesse acquise en fonction du temps de freinage :

$$\mathbf{Vb = Va - (\Upsilon \, . \, T)}$$

Vb : vitesse acquise, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
Va : vitesse initiale, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
ϒ : décélération, exprimée en $\mathbf{m.s^{-2}}$
T : temps de freinage, exprimé en **s**
cohérence des unités : $\mathbf{V} = m.s^{-1} - (m.s^{-2} \, . \, s) = m.s^{-1} - m.s^{-1} = m.s^{-1}$

Exemple : calculons la vitesse acquise dans les conditions suivantes : vitesse initiale de 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$), décélération de 10 $m.s^{-2}$ pendant 2 secondes :

$$\mathbf{Vb} = 30 - (10 \times 2) = 30 - 20 = 10 \; \mathbf{m.s^{-1}}$$

Distance parcourue pendant le freinage selon la vitesse acquise :

$$\mathbf{D = (Va^2 - Vb^2) / (2 \, \Upsilon)}$$

D : distance parcourue, exprimée en **m**
Va : vitesse initiale, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
Vb : vitesse acquise, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
ϒ : décélération, exprimée en $\mathbf{m.s^{-2}}$
cohérence des unités : $\mathbf{D} = (m.s^{-1})^2 - (m.s^{-1})^2 / (m.s^{-2}) = m^{+2}.s^{-2} \, . \, m^{-1}.s^{+2} = m$

Exemple : calculons la distance parcourue par la voiture pour une vitesse initiale de 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) et une vitesse acquise de 10 $m.s^{-1}$ (36 $km.h^{-1}$), la décélération étant de 10 $m.s^{-2}$:

$$\mathbf{D} = (30^2 - 10^2) / (2 \times 10) = (900 - 100) / 20 = 800 / 20 = 40 \; \mathbf{m}$$

Coefficient d'adhérence :

$$\mathbf{\mu = \Upsilon / g}$$

μ : coefficient d'adhérence, grandeur sans dimension ;
ϒ : décélération ou accélération transversale, exprimée en $\mathbf{m.s^{-2}}$
g : accélération de référence, exprimée en $\mathbf{m.s^{-2}}$
(accélération gravitationnelle terrestre, valeur approchée : **g** = 10 $m.s^{-2}$)
cohérence des unités : $\mathbf{\mu} = (m^{+1}.s^{-2}) \, . \, (m^{-1}.s^{+2})$ = grandeur sans dimension.

Exemple : calculons le coefficient d'adhérence autorisant une décélération de 10 mètres par seconde carrée :

$$\mathbf{\mu} = 10 / 10 = 1$$

Coefficient de glissement

$$a = (V - v) / V$$

a : coefficient de glissement, grandeur sans dimension
V : vitesse de translation de la voiture, exprimée en **$m.s^{-1}$**
v : vitesse circonférentielle des roues, exprimée en **$m.s^{-1}$**
cohérence des unités : $(m^{+1}.s^{-1}) . (m^{-1}.s^{+1})$ = grandeur sans dimension

Exemple : calculons le coefficient de glissement d'une roue qui tourne avec une vitesse circonférentielle de 95 $km.h^{-1}$ au moment où la vitesse de translation de la voiture est de 100 $km.h^{-1}$:

a = (100 - 95) / 100 = 5 / 100 = 0,05 = 5 %

Force de freinage :

$$F = M . \Upsilon$$

F : force de freinage, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
ϒ : décélération, exprimée en **$m.s^{-2}$**
cohérence des unités : **F** = kg . $m.s^{-2}$ = **N**

Exemple : calculons la force de freinage capable de communiquer une décélération de 10 $m.s^{-2}$ à une voiture de masse 1 500 kg :

F = 1 500 x 10 = 15 000 **N**

Tangage :

$$R = M . \Upsilon . H / L$$

R : réaction de tangage, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
ϒ : décélération, exprimée en **$m.s^{-2}$**
H : hauteur du centre de gravité, exprimée en **m**
L : longueur de l'empattement, exprimée en **m**
cohérence des unités : **R** = kg . $m^{+1}.s^{-2}$. m^{+1} . m^{-1} = $kg.m.s^{-2}$ = **N**

Exemple : calculons la réaction de tangage d'une voiture (masse 1 500 kg, hauteur du centre de gravité 0,5 m, empattement 2,5 m) pour une décélération de 10 $m.s^{-2}$:

R = 1 500 x 10 x 0,5 / 2,5 = 7 500 / 2,5 = 3 000 **N**

Travail de la force de freinage :

$$\mathbf{E = F \cdot D}$$

E : travail, exprimé en **J**
F : force de freinage, exprimée en **N**
D : distance de freinage, exprimée en **m**
cohérence des unités : $\mathbf{E} = kg.m.s^{-2} \cdot m = kg.m^2.s^{-2} = \mathbf{J}$

Exemple : calculons le travail d'une force de freinage de 15 000 N qui s'est exercée sur une distance de 45 mètres :

$$\mathbf{E} = 15\,000 \times 45 = 675\,000 \ \mathbf{J}$$

Énergie dissipée par le freinage :

$$\mathbf{E = ½ \, M \cdot V^2}$$

E : énergie, exprimée en **J**
M : masse, exprimée en **kg**
V : vitesse initiale, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{E} = kg \cdot (m^{+1}.s^{-1})^2 = kg.m^2.s^{-2} = \mathbf{J}$

Exemple : calculons l'énergie à dissiper pour immobiliser une voiture de masse 1500 kg circulant à 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) :

$$\mathbf{E} = ½ \times 1\,500 \times 30^2 = 750 \times 900 = 675\,000 \ \mathbf{J}$$

Variation d'énergie selon la vitesse acquise :

$$\mathbf{\Delta E = ½ \, M \cdot (Va^2 - Vb^2)}$$

ΔE : variation d'énergie, exprimée en **J**
M : masse, exprimée en **kg**
Va : vitesse initiale, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
Vb : vitesse acquise, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{E} = kg \cdot [(m.s^{-1})^2 - (m.s^{-1})^2] = kg.m^2.s^{-2} = \mathbf{J}$

Exemple : calculons la variation d'énergie d'une voiture de masse 1 500 kg lorsque la vitesse passe de 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) à 20 $m.s^{-1}$ (72 $km.h^{-1}$) :

$$\mathbf{\Delta E} = ½ \times 1\,500 \times (30^2 - 20^2) = 750 \times (900 - 400) = 750 \times 500 = 375\,000 \ \mathbf{J}$$

Puissance de freinage :

$$\mathbf{B = E / T}$$

B : puissance de freinage, exprimée en **W**
E : énergie dissipée, exprimée en **J**
T : temps de freinage, exprimé en **s**
cohérence des unités : $\mathbf{B} = kg.m^2.s^{-2} . s^{-1} = kg.m^2.s^{-3} = \mathbf{W}$

Exemple : calculons la puissance de freinage nécessaire pour dissiper une énergie de 675 000 J en 3 secondes :

$$\mathbf{B} = 675\,000 / 3 = 225\,000\ \mathbf{W}$$

Variation de température du système de freinage :

$$\mathbf{\Delta T = E / M / C}$$

ΔT : variation de température, exprimée en **K**
E : énergie dissipée, exprimée en **J**
M : masse du système de freinage, exprimée en **kg**
C : capacité thermique du matériau de freinage, exprimée en $\mathbf{J.kg^{-1}.K^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{\Delta T} = kg^{+1}.m^{+2}.s^{-2} . kg^{-1} . kg^{-1}.m^{-2}.s^{+2} . kg^{+1} . K^{+1} = \mathbf{K}$

Exemple : calculons la variation de température d'un système de freinage en fonte ($C = 500\ J.kg^{-1}.K^{-1}$) de masse 20 kg ayant dissipé une énergie de 675 000 J :

$$\mathbf{\Delta T} = 675\,000 / 20 / 500 = 67{,}5\ \mathbf{K}$$

Énergie brute libérée par la combustion du carburant :

Gazole (densité 845 $kg.m^{-3}$) : **43,9 $\mathbf{MJ.kg^{-1}}$** (**37 $\mathbf{MJ.l^{-1}}$**)

Essence (densité 760 $kg.m^{-3}$) : **46,1 $\mathbf{MJ.kg^{-1}}$** (**35 $\mathbf{MJ.l^{-1}}$**)

GPL (densité 550 $kg.m^{-3}$) : **46,5 $\mathbf{MJ.kg^{-1}}$** (**26 $\mathbf{MJ.l^{-1}}$**)

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *