L'ÉNERGIE CINÉTIQUE

Tous les spécialistes s'accordent pour dire que l'une des plus grandes difficultés de la conduite automobile est de pouvoir apprécier correctement la vitesse, mais aussi et surtout d'évaluer les différences de vitesse.

D'où provient cette difficulté ? Les capteurs sensoriels que sont les yeux et la peau ne sont pas des instruments de mesure, ils ne peuvent nous renseigner que d'une manière assez subjective sur le mouvement et la vitesse. C'est pourquoi toutes les voitures sont équipées d'un tachymètre afin que le conducteur puisse à tout moment disposer d'une donnée objective essentielle pour la conduite.

Cependant, être informé de la *vitesse* exacte est une chose, savoir appréhender les *différences de vitesse* en est une autre. En effet, les phénomènes automobiles tels que la consommation de carburant, les distances de freinage ou les conséquences des éventuelles collisions sont toujours liées à des *variations d'énergie cinétique* et non à de simples différences de vitesse.

Autrement dit, seul le calcul permet une évaluation correcte et précise de ces différences, le tachymètre n'étant alors d'aucune utilité. Voici les détails de ce raisonnement aux conséquences surprenantes.

Définir l'énergie cinétique

L'énergie désigne toute manifestation de mouvement, de chaleur ou de rayonnement. L'énergie qui apparaît sous forme de mouvement est appelée *énergie cinétique*.

Il existe trois définitions plus précises de l'énergie cinétique, toutes trois parfaitement équivalentes en vertu de la loi générale de la conservation de l'énergie découverte et formulée par le physicien anglais James Joule (1).

Première définition : *l'énergie cinétique désigne la quantité d'énergie nécessaire pour "fabriquer" du mouvement. En effet, en l'absence d'énergie, une masse reste immobile ou conserve une vitesse constante. L'énergie cinétique est donc une indication précise de l'énergie consommée pour accélérer une masse, déduction faite de toutes les pertes dues à la chaleur, aux frottements et aux résistances diverses.*

Deuxième définition : *l'énergie cinétique désigne la quantité d'énergie qui doit être intégralement dissipée pour obtenir l'immobilisation complète d'une masse en mouvement. L'énergie cinétique est donc une indication précise de la difficulté à freiner une masse.*

Troisième définition : *l'énergie cinétique désigne la quantité d'énergie dissipée dans une collision. L'énergie cinétique est donc une indication précise de la violence d'un choc.*

Exprimer l'énergie cinétique

L'énergie cinétique est une grandeur scalaire, donc sans orientation spatiale, on ne peut la représenter que par un nombre. On l'exprime grâce à la relation :

$$\mathbf{E = \frac{1}{2} M V^2}$$

Selon le Système International d'unités dont l'usage est, rappelons-le, obligatoire partout dans le monde quels que soient les domaines concernés (industrie, commerce, enseignement), la masse s'exprime en *kilogramme* (symbole **kg**), la vitesse en *mètre par seconde* (symbole $\mathbf{m.s^{-1}}$) et l'énergie cinétique en *joule* (symbole **J**) en hommage aux travaux de James Joule.

La vérification de la cohérence des unités s'écrit ainsi :

énergie cinétique $= kg \cdot (m.s^{-1})^2 = kg.m^2.s^{-2} =$ **joule.**

<u>Exemple</u> : calculons l'énergie cinétique d'une voiture de masse 1500 kilogrammes circulant à la vitesse de 30 mètres par seconde [(2)] :

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} M V^2$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \times 1\,500 \times 30^2$$

$$\mathbf{E} = 750 \times 900 = 675\,000 \ \mathbf{J}$$

Créer ou supprimer de l'énergie

Rien de miraculeux en matière d'énergie : créer de l'énergie cinétique, la réduire ou la supprimer impose de solliciter des forces physiques.

Dans le cas d'une voiture circulant sur une route horizontale, ces forces s'exercent sur les pneumatiques au contact du sol (force de traction, force de retenue et force de freinage, voir dossiers ADILCA) ou, en cas de collision, par contact avec un obstacle.

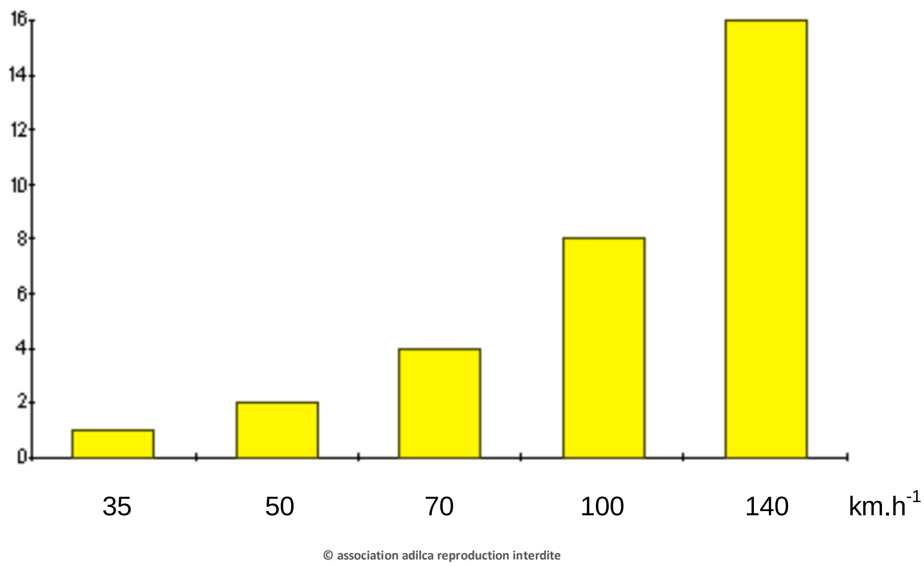
Le travail (au sens physique du terme) qu'effectuent ces forces correspond très exactement à la variation d'énergie cinétique constatée.

Les relations entre grandeurs

Intéressons-nous aux relations entre grandeurs. Que nous indique la relation qui exprime l'énergie cinétique ? La *masse* est évidemment une constante, tandis que la variable est la *vitesse élevée au carré*. Concrètement, cela signifie que l'énergie cinétique n'est pas proportionnelle à la vitesse mais au *carré de la vitesse*.

Autrement dit, si la vitesse est multipliée par deux, l'énergie cinétique est multipliée par quatre ; si la vitesse est multipliée par trois, l'énergie cinétique est multipliée par neuf ; si la vitesse est multipliée par quatre, l'énergie cinétique est multipliée par seize, etc.

On peut également en déduire que l'énergie cinétique est multipliée par deux quand la vitesse est seulement multipliée par 1,414 puisque $2^{1/2} = 1,414$.



Représentation schématique de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse.

Le rôle de la vitesse

La relation entre l'énergie et la vitesse nous montre que :

- pour doubler la vitesse d'une voiture, il faut consommer quatre fois plus de carburant(2) ; la distance de freinage est alors quatre fois plus longue et, en cas de collision, le choc est quatre fois plus violent !

- pour tripler la vitesse d'une voiture, il faut consommer neuf fois plus de carburant(2) ; la distance de freinage est alors neuf fois plus longue et, en cas de collision, le choc est neuf fois plus violent !

- pour quadrupler la vitesse d'une voiture, il faut consommer seize fois plus de carburant(2) ; la distance de freinage est alors seize fois plus longue et, en cas de collision, le choc est seize fois plus violent ! etc.

Dès lors, on perçoit mieux l'intérêt de calculer très précisément ce que représentent réellement ces différences de vitesse, d'autant plus que, en apparence, elles semblent insignifiantes à nos yeux. Mais comment faire ?

La variation d'énergie cinétique

Toute variation de vitesse correspond à une variation d'énergie cinétique :

- pour accélérer une voiture, il faut lui communiquer une énergie cinétique supplémentaire ;

- pour freiner cette voiture et la ramener à sa vitesse initiale, il faut dissiper une quantité d'énergie cinétique équivalente.

La variation d'énergie cinétique s'exprime grâce à la relation :

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

Conformément au Système International d'unités, la masse s'exprime en *kilogramme* (symbole **kg**), **Vb** désigne la vitesse acquise et **Va** la vitesse initiale, toutes deux exprimées en *mètre par seconde* (symbole $\mathbf{m.s^{-1}}$). Naturellement, l'énergie cinétique s'exprime en *joule* (symbole **J**).

La vérification de la cohérence des unités s'écrit ainsi :

$$\mathbf{\Delta E} = kg\ .\ [(m.s^{-1})^2 – (m.s^{-1})^2] = kg\ .\ (m.s^{-1})^2 = kg.m^2.s^{-2} = \mathbf{joule.}$$

<u>Exemple</u> : calculons la variation d'énergie cinétique d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes lorsque sa vitesse passe de 15 $m.s^{-1}$ (54 $km.h^{-1}$) à 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) :

$$\Delta E = ½\ M\ (Vb^2 – Va^2)$$

$$\Delta E = ½ \times 1\ 500 \times (30^2 – 15^2)$$

$$\Delta E = 750 \times (900 – 225)$$

$$\mathbf{\Delta E} = 750 \times 675 = 506\ 250\ \mathbf{J}$$

Correspondance entre variation d'énergie et vitesse

Connaissant la masse de la voiture et la variation d'énergie, il est facile de calculer la vitesse correspondante. Pour cela, il suffit d'inverser la relation :

$$\mathbf{E = ½\ M\ V^2}$$

d'où :

$$\mathbf{V = (2\ E\ /\ M)^{1/2}}$$

Exemple : calculons la vitesse qui correspond à une énergie cinétique de 506 250 J pour une voiture de masse 1 500 kilogrammes :

$$V = (2 \times 506\,250 / 1\,500)^{1/2}$$

$$V = (1\,012\,500 / 1\,500)^{1/2}$$

$$\mathbf{V} = 675^{1/2} = 26 \text{ m.s}^{-1} = 94 \ \mathbf{km.h^{-1}}$$

Ce résultat signifie que, pour faire varier la vitesse de cette voiture de 54 $km.h^{-1}$ (15 $m.s^{-1}$) à 108 $km.h^{-1}$ (30 $m.s^{-1}$), il a fallu lui communiquer une quantité d'énergie équivalente à celle que possède cette voiture lorsqu'elle circule à 94 $km.h^{-1}$.

Autrement dit, accélérer une voiture de 54 $km.h^{-1}$ à 108 $km.h^{-1}$ revient, du point de vue de l'énergie, à lui communiquer l'équivalent d'une vitesse de 94 $km.h^{-1}$.

Une formule simplifiée…

La masse étant une constante, la variation d'énergie cinétique est fonction de la différence des carrés de la vitesse : on peut le vérifier en simplifiant la relation, ce qui serait le cas si la masse en question était exactement égale à deux kilogrammes.

Et comme il ne s'agit pas ici de calculer une quantité, mais uniquement d'apprécier une différence affectant la variable vitesse, il est alors possible de calculer cette différence en conservant l'expression de la vitesse en *kilomètre par heure* (symbole $\mathbf{km.h^{-1}}$).

Autrement dit, le simple calcul de la *racine carrée de la différence des carrés* de la vitesse exprimée en *kilomètre par heure* nous renseigne de manière correcte et précise sur la variation d'énergie cinétique, et donc sur la différence de vitesse correspondante.

La relation simplifiée s'écrit alors :

$$\mathbf{V = (Vb^2 - Va^2)^{1/2}}$$

Dans cette relation, il s'agit d'une accélération : V est la variation d'énergie cinétique entre la vitesse initiale Va et la vitesse acquise Vb, grandeurs toutes trois exprimées en *kilomètre par heure*. La puissance ½ correspond à la *racine carré* de cette différence.

La relation satisfait à l'exigence de cohésion des unités, ce qui se vérifie ainsi :

$$\textbf{variation d'énergie cinétique} = [(\text{km.h}^{-1})^2]^{1/2} = \mathbf{km.h^{-1}}$$

Exemple : exprimons en $km.h^{-1}$ la variation d'énergie entre 54 $km.h^{-1}$ et 108 $km.h^{-1}$:

$$V = (108^2 - 54^2)^{1/2}$$

$$V = (11\ 700 - 2\ 900)^{1/2}$$

$$V = 8\ 800^{1/2}$$

$$\mathbf{V} = 94\ \mathbf{km.h^{-1}}$$

On constate que le calcul gagne en rapidité avec un résultat particulièrement significatif, ainsi qu'on va le voir dans les exemples qui suivent.

Quelques exemples concrets…

Les lecteurs familiarisés avec les séries de calculs pourront, en utilisant la relation complète exprimant l'énergie cinétique, calculer celle-ci pour chacun des exemples proposés, effectuer une soustraction puis calculer la vitesse correspondante et vérifier ainsi la validité des résultats indiqués.

Premier exemple : quelle est la différence d'énergie cinétique entre 50 $km.h^{-1}$ et 60 $km.h^{-1}$?

$$\mathbf{V} = (60^2 - 50^2)^{1/2} = (3\ 600 - 2\ 500)^{1/2} = (1\ 100)^{1/2} = 33\ \mathbf{km.h^{-1}}$$

On peut en déduire ceci : pour accélérer de 50 à 60 $km.h^{-1}$, il faut consommer la même quantité de carburant (2) que pour accélérer de 0 à 33 $km.h^{-1}$; pour freiner de 60 à 50 $km.h^{-1}$, il faut dissiper la même énergie que pour freiner de 33 à 0 $km.h^{-1}$. Du point de vue de l'énergie, circuler à 60 $km.h^{-1}$ revient donc à circuler avec 33 $km.h^{-1}$ de plus qu'à 50 $km.h^{-1}$!

Deuxième exemple : quelle est la différence d'énergie cinétique entre 80 $km.h^{-1}$ et 90 $km.h^{-1}$?

$$\mathbf{V} = (90^2 - 80^2)^{1/2} = (8\ 100 - 6\ 400)^{1/2} = (1\ 700)^{1/2} = 41\ \mathbf{km.h^{-1}}$$

On peut en déduire ceci : pour accélérer de 80 à 90 $km.h^{-1}$, il faut consommer la même quantité de carburant (2) que pour accélérer de 0 à 41 $km.h^{-1}$; pour freiner de 90 à 80 $km.h^{-1}$, il faut dissiper la même énergie que pour freiner de 41 à 0 $km.h^{-1}$. Du point de vue de l'énergie, circuler à 90 $km.h^{-1}$ revient donc à circuler avec 41 $km.h^{-1}$ de plus qu'à 80 $km.h^{-1}$!

Troisième exemple : quelle est la différence d'énergie cinétique entre 110 $km.h^{-1}$ et 130 $km.h^{-1}$?

$$\mathbf{V} = (130^2 - 110^2)^{1/2} = (16\ 900 - 12\ 100)^{1/2} = (4\ 800)^{1/2} = 69\ \mathbf{km.h^{-1}}$$

On peut en déduire ceci : pour accélérer de 110 à 130 $km.h^{-1}$, il faut consommer la même quantité de carburant (2) que pour accélérer de 0 à 69 $km.h^{-1}$; pour freiner de 130 à 110 $km.h^{-1}$, il faut dissiper la même énergie que pour freiner de 69 à 0 $km.h^{-1}$. Du point de vue de l'énergie, circuler à 130 $km.h^{-1}$ revient donc à circuler avec 69 $km.h^{-1}$ de plus qu'à 110 $km.h^{-1}$!

Un tableau pour résumer…

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des valeurs calculées à partir de 30 km.h^{-1} pour les vitesses habituellement pratiquées en France.

130	126,5	124	120	115	110	102,5	94	83	69	50	0
110	106	102,5	98	92	85	75,5	63	46	0	48	69
90	85	81	75	67	57	41	0	44	63	79	94
70	63	57	49	36	0	39	57	71	85	97,5	110
50	40	30	0	33	49	62	75	87	98	109	120
30	0	26	40	52	63	74	85	95	106	116	126,5
km.h^{-1}	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**	**110**	**120**	**130**

Comment lire ce tableau ? Il suffit de faire correspondre les valeurs en caractères gras de la colonne de gauche et celles de la ligne du bas. La vitesse indiquée correspond à la différence d'énergie cinétique exprimée en *kilomètre par heure*.

Exemple 1 : entre **50** et **70** km.h^{-1}, la différence est de 49 km.h^{-1}. Cela signifie que pour accélérer une voiture de 50 jusqu'à 70 km.h^{-1}, il faut lui donner une énergie équivalente à celle qui l'a propulsée de 0 jusqu'à 49 km.h^{-1}, cette différence se retrouvant naturellement au freinage ou en cas de collision.

Exemple 2 : entre **70** et **100** km.h^{-1}, la différence est de 71 km.h^{-1}. Cela signifie que pour accélérer une voiture de 70 jusqu'à 100 km.h^{-1}, il faut lui donner une énergie équivalente à celle qui l'a propulsée de 0 jusqu'à 71 km.h^{-1}, cette différence se retrouvant naturellement au freinage ou en cas de collision.

De telles différences sont bien évidemment impossibles à estimer à partir des seules données affichées au compteur de vitesse, et encore moins à partir des seules perceptions ou sensations du conducteur…

Une loi aux conséquences surprenantes…

Une autre conséquence de cette loi est que, plus la vitesse est élevée, plus les différences sont importantes !

Ainsi, à 30 km.h^{-1}, augmenter la vitesse de 20 km.h^{-1} représente une différence de 40 km.h^{-1} ; à 50 km.h^{-1}, cette même augmentation représente une différence de 49 km.h^{-1} ; à 70 km.h^{-1}, elle en vaut 57 ; à 90 km.h^{-1}, elle en vaut 63, et à 110 km.h^{-1}, 69 !

Traduite en langage arithmétique courant, cette loi pourrait s'écrire de la manière suivante :

$50\ km.h^{-1} = 30\ km.h^{-1} + 40\ km.h^{-1}$

$70\ km.h^{-1} = 50\ km.h^{-1} + 49\ km.h^{-1}$

$90\ km.h^{-1} = 70\ km.h^{-1} + 57\ km.h^{-1}$

$110\ km.h^{-1} = 90\ km.h^{-1} + 63\ km.h^{-1}$

$130\ km.h^{-1} = 110\ km.h^{-1} + 69\ km.h^{-1}$

Ou encore :

$130\ km.h^{-1} = 30\ km.h^{-1} + 40\ km.h^{-1} + 49\ km.h^{-1} + 57\ km.h^{-1} + 63\ km.h^{-1} + 69\ km.h^{-1}$!

Farfelue en apparence, cette équivalence peut se vérifier ainsi :

$130^2 = 30^2 + 40^2 + 49^2 + 57^2 + 63^2 + 69^2 = 16\ 900$ (3) !

Concrètement, cela signifie qu'une seule voiture circulant à 130 $km.h^{-1}$ possède autant d'énergie cinétique que six voitures identiques circulant respectivement à 30, 40, 49, 57, 63 et 69 $km.h^{-1}$!

Dès lors, on comprend mieux la nécessité, pour la sécurité comme pour les économies d'énergie et la protection de l'environnement, de limiter la vitesse à des niveaux raisonnables.

(1) *James Prescott Joule, physicien anglais (1818-1889). La loi de la conservation de l'énergie énonce que le travail, la chaleur et l'énergie sont des grandeurs équivalentes qui changent de forme mais se conservent toujours intégralement.*

(2) *Ce calcul représente la seule énergie nécessaire pour accélérer une masse dans un mouvement rectiligne, c'est ce qu'on appelle l'énergie cinétique de translation. La quantité totale est supérieure si on considère, d'une part, l'énergie cinétique de rotation qui se définit comme l'énergie nécessaire pour créer le mouvement de rotation du moteur, de la transmission et des roues de la voiture, d'autre part, l'action des forces résistantes (résistance au roulement, résistance de l'air) durant le laps de temps que dure cette accélération. L'énergie cinétique de rotation des quatre roues d'une voiture de tourisme représente environ 5 % de l'énergie cinétique de translation, cette proportion restant constante quelle que soit la vitesse.*

(3) *Le résultat exact donne 16 880 pour 16 900, la différence étant due aux approximations sur la valeur précise des racines carrées.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Énergie totale libérée par la combustion d'un carburant :

Gazole (densité 845 $kg.m^{-3}$) : **44,3 $MJ.kg^{-1}$** (**37,4 $MJ.l^{-1}$**)

Essence (densité 760 $kg.m^{-3}$) : **46,9 $MJ.kg^{-1}$** (**35,6 $MJ.l^{-1}$**)

GPL (densité 550 $kg.m^{-3}$) : **48,7 $MJ.kg^{-1}$** (**26,8 $MJ.l^{-1}$**)

Énergie cinétique de translation :

$$E = ½ M . V^2$$

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

Exemple : calculons l'énergie cinétique de translation d'une voiture de masse 1 500 kg circulant à 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$) :

E = ½ x 1 500 x 30^2 = 750 x 900 = 675 000 **J**

Énergie cinétique de rotation :

$$E = ½ M . R^2 . \omega^2$$

E : énergie cinétique, exprimé en **J**
M : masse, exprimée en **kg**
R : rayon, exprimé en **m**
ω : vitesse de rotation, exprimée en **$rad.s^{-1}$**
cohérence des unités : **E** = kg . m^2 . s^{-2} = **J**
(*le radian est une grandeur sans dimension*)

Exemple : calculons l'énergie cinétique de rotation des 4 roues d'une voiture lorsque ces roues tournent à la vitesse de 15 tours par seconde (95 $rad.s^{-1}$), chaque roue étant assimilée à un disque plein et homogène de masse 18 kg et de rayon 0,30 m :

E = (½ x 18 x $0,30^2$ x 95^2) x 4 = (9 x 0,09 x 9 025) x 4 = 7 310 x 4 = 29 240 **J**

Énergie cinétique totale :

$$E_{(totale)} = E_{(translation)} + E_{(rotation)}$$

Exemple : calculons l'énergie cinétique totale d'une voiture, l'énergie cinétique de translation étant de 675 kJ, l'énergie cinétique de rotation des 4 roues étant de 30 kJ (on néglige l'énergie cinétique de rotation du moteur et de la transmission) :

$\mathbf{E_{(totale)}} = 675 + 30 = 705$ **kJ**

Variation d'énergie cinétique :

$$\Delta E = ½ \, M \, . \, (Vb^2 – Va^2)$$

ΔE : variation d'énergie cinétique, 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 : $\mathbf{E} = kg \, . \, [(m.s^{-1})^2 – (m.s^{-1})^2] = kg.m^2.s^{-2} = \mathbf{J}$

Exemple : calculons la variation d'énergie cinétique d'une voiture de masse 1 500 kg lorsque la vitesse passe de 20 $m.s^{-1}$ (72 $km.h^{-1}$) à 30 $m.s^{-1}$ (108 $km.h^{-1}$), si on néglige la variation d'énergie cinétique de rotation du moteur, de la transmission et des roues :

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

Équivalence entre énergie et vitesse :

$$V = (2\,E / M)^{1/2}$$

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

Exemple : calculons la vitesse d'une masse de 1 500 kg lorsque celle-ci possède une énergie cinétique de 300 000 J (on néglige la variation d'énergie cinétique de rotation du moteur, de la transmission et des roues) :

$$\mathbf{V} = (2 \times 300\,000 / 1\,500)^{1/2} = (600\,000 / 1\,500)^{1/2} = (400)^{1/2} = 20 \ \mathbf{m.s^{-1}} = 72 \ km.h^{-1}$$

Relation simplifiée :

$$V = (Vb^2 – Va^2)^{1/2}$$

V : vitesse, exprimée en $\mathbf{km.h^{-1}}$
Va : vitesse initiale, exprimée en $\mathbf{km.h^{-1}}$
Vb : vitesse acquise, exprimée en $\mathbf{km.h^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{V} = [\ (km^{+1}.h^{-1})^2\ ]^{1/2} = [\ km^{+2}.h^{-2}\ ]^{1/2} = \mathbf{km.h^{-1}}$

Exemple : calculons la vitesse qui correspond à la variation d'énergie cinétique entre 20 $km.h^{-1}$ et 25 $km.h^{-1}$ d'un cycliste circulant sur une route horizontale (on néglige les résistances naturelles et la variation d'énergie cinétique de rotation des roues) :

$$\mathbf{V} = (25^2 – 20^2)^{1/2} = (625 – 400)^{1/2} = 225^{1/2} = 15 \ \mathbf{km.h^{-1}}$$

Ce résultat signifie que, pour accélérer de 20 à 25 $km.h^{-1}$ sur une route horizontale, un cycliste doit fournir autant d'énergie que pour accélérer de 0 à 15 $km.h^{-1}$. La même différence d'énergie se retrouve au freinage ou en cas de chute.

Énergie gravitationnelle :

$$E = M \cdot g \cdot H$$

E : énergie gravitationnelle, exprimée en **J**
M : masse, exprimée en **kg**
g : accélération gravitationnelle terrestre, exprimée en $m.s^{-2}$ ($g \simeq 10$ $m.s^{-2}$)
H : hauteur de chute, exprimée en **m**
cohérence des unités : $E = kg \cdot m.s^{-2} \cdot m = kg.m^2.s^{-2} = J$

Exemple : calculons l'énergie gravitationnelle d'une masse de 1 500 kg tombant en chute libre d'une hauteur de 45 mètres (on néglige la résistance de l'air) :

$$E = 1\,500 \times 10 \times 45 = 675\,000 \text{ J}$$

Équivalence entre énergie et chaleur :

$$E = M \cdot C \cdot \Delta T$$

E : énergie, exprimée en **J**
M : masse à chauffer, exprimée en **kg**
C : capacité thermique de la matière à chauffer, exprimée en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
ΔT : variation de température, exprimée en **K**
cohérence des unités : $E = (kg^{+1}) \cdot (kg^{+1}.m^{+2}.s^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) \cdot (K^{+1}) = kg.m^{+2}.s^{-2} = J$

Exemple : calculons l'énergie nécessaire pour élever la température d'un chauffe-eau de 100 litres, de 280 K à 330 K (100 litres d'eau = 100 kg ; C = 4 200 $J.kg^{-1}.K^{-1}$) :

$$E = 100 \times 4\,200 \times 50 = 21 \text{ MJ}$$

C'est environ 30 fois plus que l'énergie cinétique d'une masse de 1 500 kg tombant en chute libre d'une hauteur de 45 m, ou d'une voiture de 1 500 kg circulant à 30 $m.s^{-1}$. Un résultat valide sauf changement d'état (la transformation de glace fondante en eau glacée absorbe environ 0,35 $MJ.kg^{-1}$, celle d'eau bouillante en vapeur, environ 2,3 $MJ.kg^{-1}$). Outre l'équivalence entre toutes les formes d'énergie, ce résultat montre que l'eau est une matière particulièrement difficile à chauffer (l'or ne réclame que 130 $J.kg^{-1}.K^{-1}$; le cuivre : 390 $J.kg^{-1}.K^{-1}$; le fer, la fonte ou l'acier : 460 $J.kg^{-1}.K^{-1}$; l'air : 1000 $J.kg^{-1}.K^{-1}$).

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *