L'ÉNERGIE

ÉNERGIE ET MOUVEMENT

Énergie solaire, énergie chimique, énergie thermique
énergie cinétique, énergie électrique, vitesse, puissance

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

L'ÉNERGIE

Rien de plus mystérieux que l'énergie ! Risquons cette définition : "*On appelle énergie toute manifestation de chaleur, de mouvement, de bruit, de lumière ou de rayonnement.*"

L'énergie de l'Univers…

L'Univers est en expansion, c'est un fait acquis. L'observation des étoiles montre en effet que les galaxies s'éloignent les unes des autres. En même temps, l'Univers se refroidit, c'est la contrepartie de son expansion.

Ces diverses constatations ont permis d'élaborer la folle et pourtant vraisemblable théorie du *Big-bang* : juste avant l'explosion primitive, toute la matière de l'Univers était concentrée dans un volume plus petit que celui d'une tête d'épingle.

Imaginons que quelqu'un ait pu assister aux derniers instants de cette tête d'épingle, juste avant l'explosion primitive : dans un froid extrême jamais atteint depuis (0 K, soit – 273 °C) et dans un silence absolu (pas un seul bruit), ce privilégié n'aurait rien vu du tout, et pour cause : totalement dépourvue d'énergie, cette tête d'épingle ne pouvait émettre ni chaleur, ni lumière, ni rayonnement.

Froid et silencieux, l'Univers était donc complètement invisible avant d'exister. De là à dire qu'il n'existait pas…

L'énergie du Soleil…

Parmi les quatre forces physiques fondamentales qui font fonctionner l'Univers depuis le *Big-bang*, il y en a une qui joue un rôle particulier, c'est la force de gravitation.

Cette force entretient l'énorme chaudière de fusion nucléaire qui se trouve au centre du Soleil et qui, par rayonnement, alimente toutes les sources d'énergies disponibles sur Terre (éolien, photovoltaïque, cycle de l'eau pour les barrages hydroélectriques, photosynthèse pour la croissance des plantes…).

L'énergie du pétrole…

Dans l'Univers il n'y a pas de mouvement sans cause, ni de déplacement fortuit. Une voiture, par exemple, est une masse inerte qui ne peut se mettre en mouvement qu'avec l'aide d'un moteur, lui-même alimenté par de l'air et du carburant.

Quel est le principe qui fait tourner le moteur ? C'est une réaction chimique due aux affinités que certains atomes manifestent les uns pour les autres, en particulier celles entre l'oxygène et le carbone d'une part, entre l'oxygène et l'hydrogène d'autre part.

L'oxygène se trouve dans l'atmosphère terrestre, celle que nous respirons à chaque instant. Le carbone et l'hydrogène sont les composants des hydrocarbures que l'on extrait du pétrole par raffinage (*).

Lorsque ces atomes sont dans le voisinage les uns des autres et si la température est suffisante, ils se mettent à vibrer puis s'agitent dans tous les sens jusqu'à finir par changer de partenaire, le tout en une fraction de seconde (**). Cette agitation est l'énergie qu'on récupère plus ou moins bien pour faire tourner un moteur.

Énergie, chaleur et mouvement…

En langage courant, cette agitation est la *combustion*, elle libère une énergie considérable : environ 36 mégajoules par litre de carburant.

Hélas, cette énergie se manifeste sous deux formes indissociables : énergie thermique (chaleur) <u>et</u> énergie mécanique (mouvement), sans qu'il soit possible d'augmenter l'une au détriment de l'autre.

Or l'énergie thermique ne sert à rien dans un moteur de voiture, sinon à chauffer l'habitacle, car seule l'énergie mécanique compte.

Cette énergie mécanique se manifeste d'abord par le mouvement des différentes pièces du moteur (piston, bielles, vilebrequin…), puis par celui de la transmission et des roues, et enfin seulement, par celui de la voiture.

La part d'énergie mécanique qui a permis à la voiture d'acquérir une certaine vitesse est appelée *énergie cinétique*.

L'énergie de la vitesse…

L'énergie cinétique se définit en effet comme l'énergie nécessaire pour accélérer une masse. C'est une grandeur abstraite qu'il est difficile de se représenter. D'autant plus qu'elle obéit à une loi particulière : elle varie comme le carré de la vitesse.

Par exemple, en 2007, un TGV expérimental a atteint la vitesse de 575 $km.h^{-1}$ (160 $m.s^{-1}$) et battu ainsi l'ancien record de vitesse sur rail qui était de 540 $km.h^{-1}$ (150 $m.s^{-1}$). Une amélioration de 35 $km.h^{-1}$, où est l'exploit ?

En réalité, un calcul montre que, pour faire varier la vitesse de 540 $km.h^{-1}$ à 575 $km.h^{-1}$, il a fallu donner au train autant d'énergie que pour l'amener de 0 à 200 $km.h^{-1}$.

Cela signifie qu'en termes d'énergie, ces 35 $km.h^{-1}$ supplémentaires en valent 200 !

Autrement dit et pour résumer, plus la vitesse de référence est élevée, plus il est coûteux d'accroître cette vitesse.

Puissance et vitesse

La puissance se définit, entre autre, comme la rapidité avec laquelle l'énergie est consommée pour compenser la résistance de l'air et maintenir ainsi une vitesse stabilisée. Tandis que la résistance de l'air augmente comme le carré de la vitesse, la puissance varie comme le cube de la vitesse. C'est donc une grandeur difficile à appréhender.

Par exemple, divers calculs montrent que, compte tenu des caractéristiques de ce fameux TGV, il faudrait disposer d'une puissance d'environ 15 mégawatts pour maintenir la vitesse du record, alors que la moitié seulement de cette puissance suffirait pour circuler à 460 $km.h^{-1}$, et un seul mégawatt pour se maintenir à 235 $km.h^{-1}$.

Le constat est cruel : l'énergie nécessaire pour que la vitesse du record devienne une vitesse commerciale permettrait à 15 trains identiques de circuler à 235 $km.h^{-1}$.

Économiser l'énergie…

C'est une loi physique incontournable : la recherche de la vitesse se paye par une débauche d'énergie, sur rails comme sur route.

À l'heure où les réserves de pétrole s'épuisent, réduire les vitesses pratiquées est une urgence.

Voilà un argument sans doute plus convaincant que celui de la sécurité routière.

Ainsi par exemple :

- Une voiture qui circule à 110 km.h^{-1} au lieu de 130 km.h^{-1} économise l'énergie nécessaire pour accélérer de 110 km.h^{-1} à 130 km.h^{-1} (économie d'énergie cinétique) ; en se maintenant à 110 km.h^{-1} plutôt qu'à 130 km.h^{-1}, cette voiture économise l'équivalent de l'énergie nécessaire pour circuler à 69 km.h^{-1} (gain d'aérodynamique).

- Un camion qui circule à 80 km.h^{-1} au lieu de 90 km.h^{-1} économise l'énergie nécessaire pour accélérer de 80 km.h^{-1} à 90 km.h^{-1} (économie d'énergie cinétique) ; en se maintenant à 80 km.h^{-1} plutôt qu'à 90 km.h^{-1}, ce camion économise l'équivalent de l'énergie nécessaire pour circuler à 41 km.h^{-1} (gain d'aérodynamique).

Voir les dossiers ADILCA ''*énergie cinétique*'' et ''*aérodynamique*''.

(*) *L'oxygène de l'air (O_2) est émis par les plantes vertes qui, grâce à l'énergie solaire, absorbent et décomposent le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère terrestre pour en faire de la matière végétale (cycle du carbone, processus de photosynthèse). Les énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) sont le résultat d'une lente décomposition des immenses forêts qui ont été enfouies dans le sous-sol ou sous les eaux il y a 350 millions d'années (ère primaire, période du carbonifère).*

(**) *Ce changement de partenaire s'opère en deux temps : en premier lieu, chaque molécule d'oxygène gazeux (O_2) capture un atome de carbone (C) pour former une molécule de dioxyde de carbone (CO_2). Ensuite, les deux atomes constitutifs de l'oxygène gazeux restant (O_2) se séparent et capturent chacun une paire d'atomes d'hydrogène (H) pour former une molécule d'eau (H_2O).*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET AUTONOMIE

L'Union Européenne vient de prononcer l'interdiction totale de la vente de voitures neuves à moteurs thermiques à partir du 1er janvier 2035. C'est la fin annoncée des énergies fossiles qui vont être progressivement remplacées par de l'énergie électrique.

La suite logique, c'est l'apparition d'une caractéristique nouvelle dans les descriptifs techniques des automobiles : le kilowattheure (symbole **kWh**) pour exprimer la capacité de la batterie de traction. Par exemple, la capacité de la batterie de la nouvelle Renault Megane 100 % électrique est de 60 **kWh**.

Qu'est-ce qu'un kilowattheure ? Contrairement à une idée reçue, le kilowattheure n'est pas une unité de puissance mais d'énergie ; de plus, cette grandeur n'est pas l'apanage de l'électricité mais peut se rapporter à toute forme d'énergie, qu'elle soit d'origine chimique, nucléaire, gravitationnelle, cinétique ou thermique, puisque toutes les formes d'énergie sont équivalentes et s'expriment avec la même unité(*).

Définition : 1 kilowattheure est la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement d'une machine de 1 kilowatt pendant 1 heure.

Ne pas confondre le kilowattheure (symbole **kWh**), unité d'énergie, avec le kilowatt (symbole **kW**), unité de puissance qui se définit comme la quantité d'énergie consommée chaque seconde (quantité d'énergie exprimée en joules, symbole **J**, ou en mégajoules, symbole **MJ**). 1 kilowatt = 1 000 joules par seconde (voir le dossier ADILCA "*Puissance des moteurs*").

La conversion entre kilowattheures, kilowatts et joules s'obtient à partir de l'égalité suivante (il y a 3 600 secondes dans une heure) :

$$1\ \mathbf{kWh} = 1\,000\ (\mathbf{J.s^{-1}}) \times 3\,600\ (\mathbf{s}) = 3\,600\,000\ \mathbf{J} = 3{,}6\ \mathbf{MJ}$$

Voici quelques exemples de ce que représente un kilowattheure :

- Un kilowattheure est l'énergie gravitationnelle d'un camion de 12 tonnes qui chuterait d'une hauteur de 30 mètres, soit l'équivalent du 10ème étage.

- Un kilowattheure est l'énergie cinétique d'un camion de 12 tonnes circulant à près de 90 $km.h^{-1}$.

- Un kilowattheure est l'énergie thermique délivrée par la combustion de 10 centilitres (0,1 litre) de carburant automobile.

Revenons à notre Renault Megane E-Tech 100 % électrique. Que signifient les 60 **kWh** de sa batterie ?

60 **kWh** x 3,6 **MJ** = 216 **MJ**

Soit l'équivalent de 6 litres de carburant, telle est la quantité totale d'énergie dont dispose cette voiture pour se mouvoir avant de tomber en panne, une autre manière d'en exprimer l'autonomie, le talon d'Achille des électriques.

Comment cette énergie est-elle consommée ? Détaillons le rôle du moteur quand la voiture circule sur une route horizontale (pas de déclivité), et passons sur la phase de démarrage qui consiste à transformer l'énergie électrique en énergie cinétique.

Une fois que la vitesse est stabilisée, le moteur ne « fabrique » plus d'énergie cinétique. Néanmoins, pour maintenir une vitesse constante, il doit équilibrer les deux forces qui s'opposent au mouvement de la voiture : la résistance au roulement et la résistance de l'air. Faute de pouvoir compenser ces deux résistances, la voiture ralentit et finit par s'arrêter, comme une bicyclette quand on cesse de pédaler.

Or, ces deux résistances, on sait les quantifier. Par exemple, à 130 $km.h^{-1}$, la résistance totale qui « freine » ce genre de voiture est voisine de 1 000 **N**. Ce qui revient à dire que, pour maintenir cette vitesse sur une distance de 100 kilomètres, le moteur devra disposer de 100 **MJ** (1 000 **N** x 100 000 **m** = 100 **MJ**), autrement dit de 27,7 **kWh**.

Exprimée en km parcouru, la consommation électrique à 130 $km.h^{-1}$ est donc de 1 **MJ**/km, soit 27,7 **kWh** aux 100 km. La capacité de la batterie étant de 216 **MJ**, cela signifie que l'autonomie de la voiture est, dans ces conditions, de… 216 kilomètres (216 **MJ** / 1 **MJ**.km^{-1} = 216 km, ou 60 **kWh** / 27,7 **kWh**.100 km^{-1} = 216 km).

Une autonomie de 216 km quand on prend l'autoroute, ce n'est pas beaucoup. Le constructeur en annonce 300 (un seuil psychologique, probablement), mais sans préciser la vitesse à laquelle ces 300 km doivent être parcourus (il ne faut pas décourager l'acheteur). La notice d'utilisation prévient toutefois le conducteur que « *l'autonomie est grandement optimisée en modérant les accélérations et la vitesse* ». Un conseil à retenir au cas où le voyant d'alerte de la batterie s'allumerait en rase campagne...

Peut-on évaluer le gain d'autonomie obtenu en réduisant la vitesse ? Si on admet que les résistances totales qui s'exercent sur la voiture sont de 1 000 **N** à 130 $km.h^{-1}$, on peut en déduire que ces mêmes résistances ne valent plus que 500 **N** à 90 $km.h^{-1}$,

puisqu'on sait que la résistance de l'air (l'essentiel de ce qui « freine » la voiture) varie comme le carré de la vitesse : de 130 km.h^{-1} à 90 km.h^{-1}, cette résistance est réduite de moitié (130 divisé par racine carrée de 2 = 92).

Par conséquent, à l'issue d'un même trajet de 100 kilomètres, cette fois-ci parcourus à 90 km.h^{-1}, ces 500 **N** n'auront mobilisé que 50 **MJ**, soit 13,9 **kWh** (500 **N** x 100 000 **m** = 50 **MJ** = 13,9 **kWh**)(**).

Rapportée à la capacité totale de la batterie (216 **MJ** ou 60 **kWh**), l'autonomie grimpe alors à… 432 kilomètres (216 **MJ** / 0,5 **MJ**.km^{-1} ou 60 **kWh** / 13,9 **kWh**.100 km^{-1} = 432 km). Nettement plus intéressant, donc.

Résumons le propos :

1. L'autonomie d'une voiture électrique dépend de la capacité de sa batterie. Pour l'estimer, il suffit de multiplier cette capacité par 3,6 et de remplacer le symbole « **MJ** » par celui de « km ». Exemple : 70 **kWh** x 3,6 **MJ** = 252 **MJ** = 252 km d'autonomie à 130 km.h^{-1}, le double à 90 km.h^{-1}.

2. En attendant une amélioration de la capacité des batteries, les utilisateurs de voitures 100 % électriques vont vite comprendre l'intérêt d'une réduction drastique de la vitesse !

(*) *L'énergie se définit comme toute manifestation de chaleur, de mouvement, de bruit, de lumière ou de rayonnement, toutes ces formes d'énergie étant équivalentes. L'unité d'énergie est le joule (symbole J) ou le mégajoule (1 million de joules, symbole MJ), en hommage aux travaux du physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889) à qui l'on doit l'une des plus surprenantes lois de l'Univers : dans un système isolé, l'énergie ne se fabrique pas, elle change de forme mais se conserve toujours intégralement (1er principe de thermodynamique). Remarque : la Terre n'est pas un système isolé puisque le globe terrestre est alimenté en énergie grâce au rayonnement solaire.*

(**) *Ce raisonnement sur la consommation n'est pas transposable aux moteurs thermiques du fait qu'en moyenne, un tiers seulement de l'énergie initiale produite par la combustion du carburant apparaît sous forme de mouvement, le reste se dissipant dans l'environnement sous forme de chaleur.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Définitions :

1 kilowattheure = **3 600 000 joules** = **3,6 MJ** ;

1 joule est l'énergie nécessaire pour lever une masse de 100 grammes (**0,1 kg**) à **1 mètre** de hauteur (**g ≃ 10 m.s^{-2}**) ;

1 watt = **1 joule** par **seconde**, c'est la puissance nécessaire pour lever une masse de 100 grammes (**0,1 kg**) à 1 **mètre** de hauteur en 1 **seconde** (**g ≃ 10 m.s^{-2}**) ;

1 joule est l'énergie nécessaire pour déplacer une force de **1 N** sur une distance de **1 mètre** ;

1 watt = **1 joule** par **seconde**, c'est la puissance nécessaire pour déplacer une force de **1 N** sur une distance de **1 mètre** en **1 seconde**.

Énergie totale libérée par la combustion d'un carburant :

Gazole ($C_{7,25}H_{13}$; densité 845 kg.m^{-3}) : **44,3 MJ.kg^{-1}** (**37,4 MJ.l^{-1}**)

Essence (C_7H_{16} ; densité 760 kg.m^{-3}) : **46,9 MJ.kg^{-1}** (**35,6 MJ.l^{-1}**)

GPL ($C_{3,5}H_9$; densité 550 kg.m^{-3}) : **48,7 MJ.kg^{-1}** (**26,8 MJ.l^{-1}**)

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** ≃ 10 **m.s^{-2}**)
H : hauteur de chute, exprimée en **m**
cohérence des unités : **E** = kg . m.s^{-2} . m = kg.m^2.s^{-2} = **J**

Exemple : calculons l'énergie gravitationnelle d'une masse de 12 tonnes (12 000 kg) tombant en chute libre d'une hauteur de 30 mètres :

E = 12 000 x 10 x 30 = 3 600 000 **J** = 3,6 **MJ** = 1 **kWh**

Énergie consommée par une force :

$$E = F . D$$

E : énergie consommée, exprimée en **J**
F : force, exprimée en **N**
D : distance parcourue, exprimée en **m**
cohérence des unités : **E** = N . m = $kg.m.s^{-2}$. m = $kg.m^2.s^{-2}$ = **J**

Exemple : calculons l'énergie consommée par une force de 500 N au bout de 100 kilomètres (100 000 mètres) :

E = 500 x 100 000 = 50 000 000 **J** = 50 **MJ** = 14 **kWh**

Énergie cinétique :

$$E = ½ M . V^2$$

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 d'un camion de masse 12 tonnes (12 000 kg) circulant à 90 $km.h^{-1}$ (25 $m.s^{-1}$) :

E = ½ x 12 000 x 25^2 = 6 000 x 625 = 3 750 000 **J** = 3,75 **MJ** ≃ 1 **kWh**

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**
Vb : vitesse acquise, exprimée en $m.s^{-1}$
Va : vitesse initiale, exprimée en $m.s^{-1}$
cohérence des unités : **E** = kg . $[(m.s^{-1})^2 – (m.s^{-1})^2]$ = $kg.m^2.s^{-2}$ = **J**

Exemple : calculons la variation d'énergie cinétique d'un camion de masse 40 tonnes lorsque sa vitesse passe de 90 $km.h^{-1}$ (25 $m.s^{-1}$) à 50 $km.h^{-1}$ (14 $m.s^{-1}$) :

ΔE = ½ x 40 000 x (25^2 – 14^2) = 20 000 x (625 – 196) =

8 580 000 **J** = 2,4 **kWh**

Conversion énergie / chaleur :

E = M . C . ΔT

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}) . $(kg^{+1}.m^{+2}.s^{-2}$. kg^{-1} . $K^{-1})$. (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 x 4 200 x 50 = 21 **MJ** = 5,8 **kWh**

Puissance :

B = E / T

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

Exemple 1 : calculons la puissance d'une machine ayant consommé une énergie de 360 000 J en 1 heure (3 600 s) :

B = 360 000 / 3 600 = 100 **W**

Exemple 2 : calculons la puissance nécessaire pour produire une énergie de 360 000 J en 60 s :

B = 360 000 / 60 = 6 000 **W** = 6 **kW**

Puissance consommée par une force :

B = F . V

B : puissance consommée, exprimée en **W**
F : force, exprimée en **N**
V : vitesse, exprimée en **$m.s^{-1}$**
cohérence des unités : **B** = $kg.m.s^{-2}$. $m.s^{-1}$ = $kg.m^2.s^{-3}$ = **W**

Exemple : calculons la puissance consommée par une force de 500 N qui se déplace à la vitesse de 90 $km.h^{-1}$ (25 $m.s^{-1}$) :

B = 500 x 25 = 12 500 **W** = 12,5 **kW**

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *