



FCHg!

Discover
the energy
of hydrogen

Grzegorz Karwasz

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Matériel didactique : collège et lycée

Partie V : « Énergie »

Énergie : origine du terme



Le terme « énergie » est dérivé du grec « energeia », *ἐνέργεια* qu'Aristote utilisait (dans sa *Métaphysique*) et qui avait le sens *d'acte, d'être, de devenir*, contrairement à *potenzia* qui n'était que la *possibilité* d'être.

La compréhension moderne de l'énergie est apparue vers le milieu du XIXe siècle avec les travaux de Carnot, Joule et d'autres, qui ont montré que le *travail mécanique* peut être transformé en chaleur : la chaleur est donc aussi une forme d'*énergie*.

Si nous regardons aujourd'hui la description de la « valeur nutritionnelle » de chaque repas/produit (diapo suivant), nous trouvons des valeurs exprimées en « joules », ou unités de *travail*, ainsi qu'en *énergie mécanique*, et en « calories » (ou plutôt kcal), qui est l'ancienne unité de chaleur.

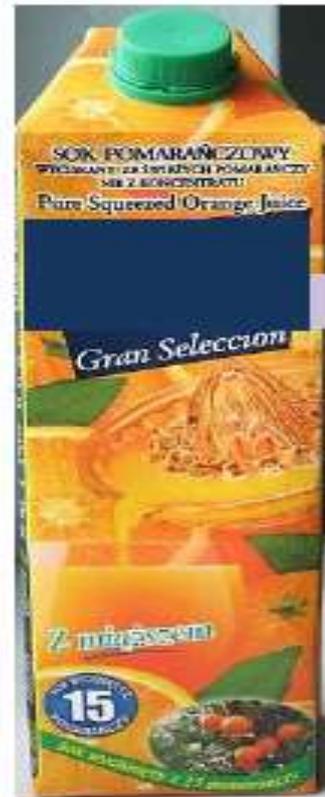


This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246.
The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Joule : l'énergie est la capacité d'un système à effectuer un travail.



Westminster Abbey, Pierre tombale de Joule



Wartość odżywcza w 100 ml:
wartość energetyczna 48 kcal (204 kJ)

białko	0,1 g
węglowodany przyswajalne	11,8 g
tłuszcz całkowity	mniej niż 0,1 g
magnez	45 mg 15%*

Witaminy:

witamina C	9,0 mg 15%*
witamina E	1,5 mg 15%*
witamina B1 /tiamina/	0,21 mg 15%*
witamina B2 /ryboflawina/	0,24 mg 15%*
witamina PP /niacyna/	2,7 mg 15%*
witamina B6	0,3 mg 15%*
falocyna	30 µg 15%*
witamina B12	0,15 µg 15%*
beta karoten	0,72 mg
/witamina A/	/120 µg/ 15%*
biatyna	0,0225 mg 15%*
kwas pantotenowy	0,9 mg 15%*
witamina D3	0,75 µg 15%*

*% zalecanego dziennego spożycia

Valeur énergétique du produit

ἐνέργεια (Aristote)

Métaphysique : act = état, action, actuation, exécution, mise en œuvre

ΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ

METAFISICA, Λ 6/7, 1071 b 35 - 1072 a 19

35 ἔτυχε κινεῖται, ἀλλὰ δεῖ τι αἰεὶ ὑπάρχειν, ὥσπερ νῦν φύσει μὲν
ὠδί, βία δὲ ἢ υ.ὸ νοῦ ἢ ἄλλου ὠδί. εἶτα ποῖα πρῶτον
17 διαφέρει γὰρ ἀμήχανον ὅσον. ἀλλὰ μὴν οὐδὲ Πλάτων
20 γε οἶόν τε λέγειν ἦν οἶεται ἐνίοτε ἀρχὴν εἶναι, τὸ αὐτὸ
ἑαυτὸ κινουῦν· ὕστερον γὰρ καὶ ἅμα τῷ οὐρανῷ ἢ ψυχῇ
ὡς φησίν. τὸ μὲν δὴ δύναμιν οἶεσθαι ἐνεργείας πρότερον
ἔστι μὲν ὡς καλῶς ἔστι δ' ὡς οὐ (εἴρηται δὲ πῶς). οὐ γὰρ
5 ἐνέργεια πρότερον, μαρτυρεῖ Ἀναξαγόρας (ὁ γὰρ νοῦς ἐνέρ-
γεια) καὶ Ἐμπεδοκλῆς φιλίαν καὶ τὸ νεῖκος, καὶ οἱ αἰεὶ λέ-
γοντες κίνησιν εἶναι, ὥσπερ Λεύκιππος· ὥστ' οὐκ ἦν ἀπειρο-
χρόνον χάος ἢ νύξ, ἀλλὰ ταῦτά αἰεὶ ἢ περιόδῳ ἢ ἄλ-
λως, εἴπερ πρότερον ἐνέργεια δυνάμεως. εἰ δὲ τὸ αὐτὸ
10 αἰεὶ [περιόδῳ], δεῖ τι αἰεὶ μένειν ὡσαύτως ἐνεργοῦν. εἰ γὰρ
μέλλει γένεσις καὶ φθορὰ εἶναι, ἄλλο δεῖ εἶναι αἰεὶ ἐνε-
ργοῦν ἄλλως καὶ ἄλλως. ἀνάγκη ἄρα ὠδί μὲν καθ' αἑ
ἐνεργεῖν ὠδί δὲ κατ' ἄλλο· ἦτοι ἄρα καθ' ἕτερον ἢ κατ'
τὸ πρῶτον. ἀνάγκη δὲ κατὰ τοῦτο· πάλιν γὰρ ἐκεί-
νο

... sia in questo o quel modo. Nulla, infatti, si muove a
... ma deve sempre esserci una causa: per esempio, que-
... si muove ora in questo modo per natura, questo altro in
... altro modo per forza, ad opera dell'intelligenza o di
... altro. E di che specie è, allora, quel movimento primo?
Questo punto ha una importanza grandissima. Ma a Platone
non sarebbe stato lecito neppure porre quello che egli ritie-
ne, talora, essere causa di movimento, ossia ciò che si dà
movimento da se stesso. Infatti questo, che, secondo lui, è
l'anima, è posteriore al movimento e nasce insieme col
mondo, come egli stesso afferma¹⁸⁶.

Orbene, ritenere che la potenza sia anteriore all'atto, in
un senso, è vero e, in un altro senso, non è vero, come si è
già detto. Che l'atto sia anteriore, attesta Anassagora,
perché l'Intelligenza di cui egli parla è atto; attesta Empe-
docele con la dottrina dell'Amicizia e della Discordia, e atte-
stano coloro che, come ad esempio Leucippo, sostengono
che il movimento è eterno. Pertanto, non ci furono per un

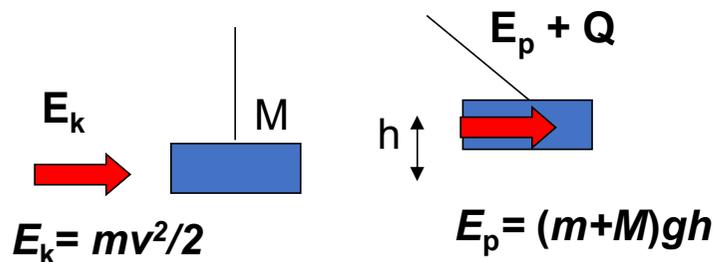


Énergie : définition

La discussion sur la définition de l'énergie est une sorte d'« histoire sans fin ».

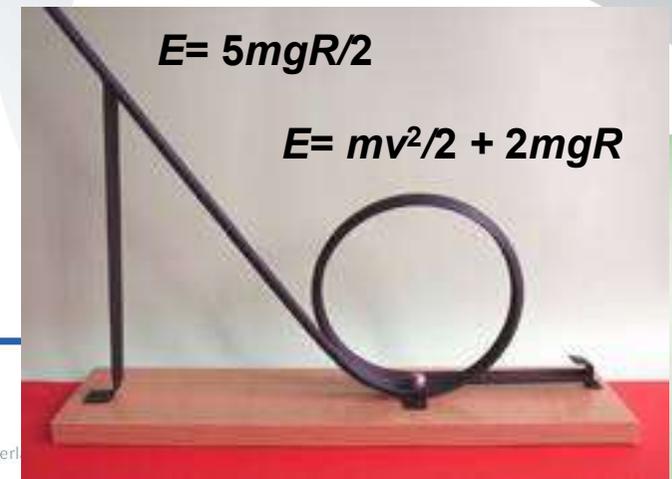
À l'heure actuelle, la définition la plus communément admise est la suivante

L'énergie est la capacité d'un corps à effectuer un travail.



Par exemple, l'énergie cinétique d'un projectile frappant ce que l'on appelle un pendule balistique, comme illustré ici, entraîne le soulèvement du poids (et une partie de l'énergie cinétique est transformée en chaleur).

Dans la deuxième expérience (une boucle de la mort de rayon R), l'énergie potentielle de la bille au début du rail se transforme au point le plus haut de la boucle en l'énergie cinétique, et une partie est encore de l'énergie potentielle.



Énergie : types

Il existe deux types d'énergie mécanique :

- associée au mouvement, appelée énergie **cinétique**, $E_k = \frac{1}{2} mv^2$, où m est la masse d'un corps en mouvement et v sa vitesse.

- associée à la hauteur du corps, appelée énergie **potentielle**, $E_p = mgh$, où h est la hauteur au-dessus de la surface de la terre et g l'accélération gravitationnelle.

L'énergie *potentielle* est également appelée l'énergie stockée dans un **ressort**. Si le ressort est harmonique, c'est-à-dire que la force nécessaire pour le maintenir à une distance x de la position d'équilibre est $F=kx$ (k est la constante élastique), l'énergie potentielle d'élasticité est $E_p = \frac{1}{2} kx^2$.

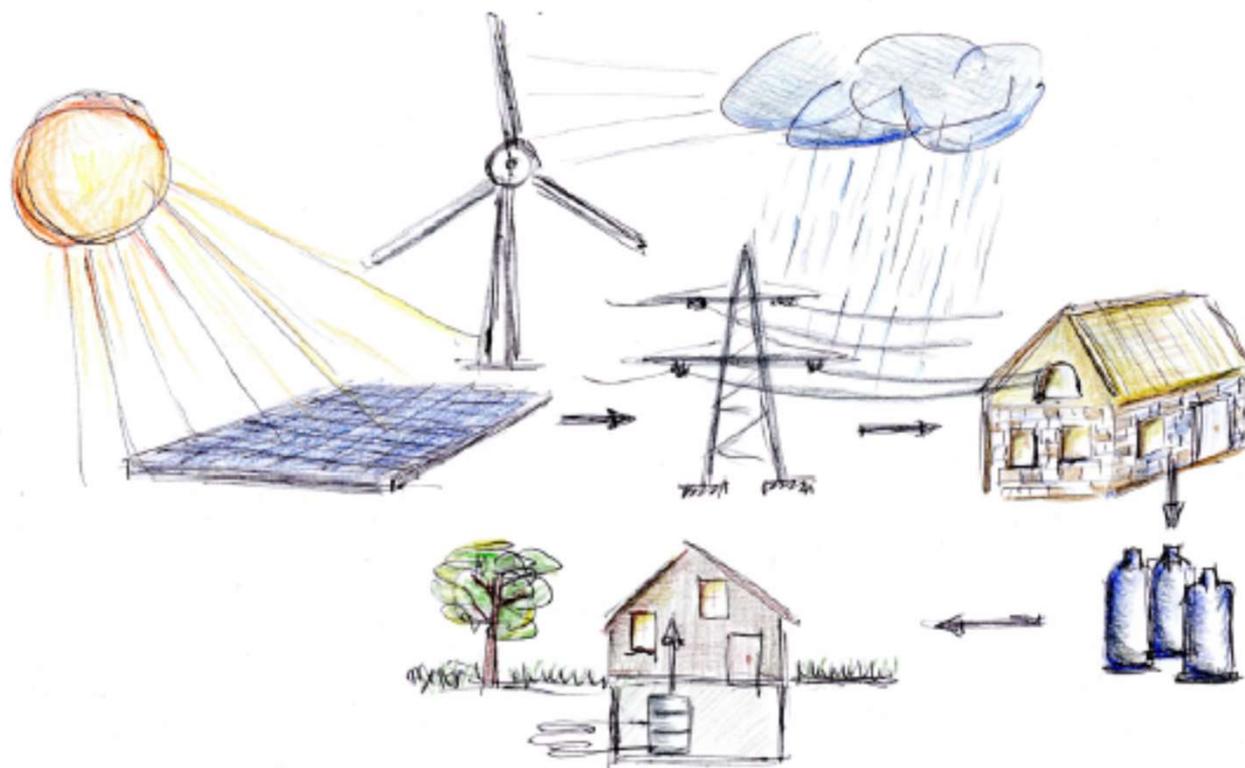
En général, l'énergie associée à une position est appelée énergie *potentielle*. Pour les champs **électrostatiques**, l'énergie *potentielle* de deux points de charges ponctuelles q et Q (dans le vide) placés à une distance r est $E_p = (1/4\pi\epsilon_0) qQ/r$, où ϵ_0 est la perméabilité électrique du vide.



Énergie : vecteurs et transformations

Comme nous l'avons dit précédemment, l'énergie se *manifeste* sous différentes formes. En pratique, nous devrions être en mesure d'identifier le *vecteur* d'énergie :

- rayonnement solaire
- courant électrique
- chaleur géothermique
- énergie cinétique du vent
- énergie chimique de l'hydrogène
- etc.



Hans. U. Fuchs,
Hydrogène et piles à combustible.
Comment, dans quel but et pourquoi ?
Matériaux didactiques de FCHGo, 2019

Énergie : limitations



Comme nous l'avons vu sur les diapos précédents, l'énergie potentielle (d'un corps dans le champ gravitationnel de la Terre, mais aussi d'un ressort) nécessite la définition d'un point de « hauteur zéro » : un corps qui tombe d'une hauteur à un *niveau zéro* acquiert de l'énergie cinétique.

L'énergie cinétique nécessite-t-elle également un point de référence ? Depuis l'époque d'Einstein, nous savons que c'est le cas ! La vitesse n'est pas une valeur *absolue* : elle dépend du système de référence : un corps peut avoir de l'énergie cinétique dans un système de référence, et dans un autre, se déplaçant à la même vitesse que lui – il peut avoir une énergie cinétique nulle.

Ainsi, pour en venir à la définition même de l'énergie, selon le système de référence (c'est-à-dire le point défini comme « énergie zéro »), la capacité à effectuer un travail peut varier : même si le système possède apparemment de l'énergie, le travail utile peut être nul.

Nous abordons ce point pour introduire les concepts de la thermodynamique.



Énergie et chaleur

Le concept d'énergie n'est apparu que lorsque Joule a démontré l'équivalence entre la chaleur et le travail. Cette observation est à l'origine du premier* principe de la thermodynamique :

Le travail W effectué **dans** un système et la chaleur Q absorbée **par** le système entraînent une augmentation de **l'énergie interne** U du système :

$$\Delta U = W + Q$$

En outre, il est clair que la chaleur ne peut être transférée que d'un corps à température plus élevée, disons T_1 , à un corps à température plus basse, disons T_2 .

Cela impose immédiatement des limites aux *performances* des machines thermodynamiques.

*Le principe zéro stipule que la chaleur s'écoule d'un corps plus chaud vers un corps plus froid.



Chaleur et température



Qu'est-ce que la température ? En expliquant aux enfants, nous dirions :

« Ce que nous sentons avec notre main comme chaleur ou froid »*.

Bien sûr, nous ne pouvons pas définir une quantité physique de cette façon. On dit que la température est une mesure de l'énergie interne du corps.

$U \sim T$, où le symbole de proportionnalité \sim nécessite quelques précisions : la constante de proportionnalité dépend de la structure interne (c'est-à-dire atomique) du corps.

Cela s'explique plus facilement pour les gaz dits parfaits, c'est-à-dire les gaz qui peuvent être assimilés à de petites sphères dures à ressort. Les gaz nobles sont une bonne approximation.

L'énergie interne signifie qu'un corps accumule de l'énergie : il doit s'agir de l'énergie mécanique des atomes (ou des molécules).

*Notre main (récepteurs de chaleur) capte le mouvement thermique des atomes, ce qui donne la sensation de température. Pour une définition plus détaillée, voir également Fuchs, 2019, *op. cit.*



This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Heat & Temperature: Equi-partition of energy



How atoms (in the approximation of hard spheres) may accumulate energy?
As a kinetic energy.

Atoms can move (as translations) in 3 dimensions, so the internal energy of noble gases (per atoms) is, within good approximation $U = 3/2 kT$
where k is Boltzman's constant $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ (we must use kelvins)

As in the absence of work the change of the internal energy corresponds to the heat transferred, the *specific heat* per atom (i.e. the heat absorbed when the temperature changes by 1K) is $c_v = 3/2 kT$. (c_v is the specific heat in conditions of the constant volume.)

To translate it to macroscopic units, i.e to the heat by one *mole* of gas we must multiply the above values by Avogadro number N_A .

Besides, so-called gas constant, R is already multiplied, $R = kN_A$ ($R=8.31 \text{ J}/(\text{mole}\cdot\text{K})$)

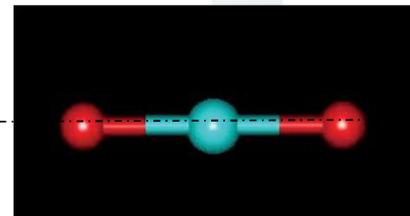


Equi-partition of energy: molecules

The principle of equipartition of energy holds also for molecules, what allows to estimate the specific heat also for them.

A diatomic molecule, apart from 3 directions of the translational energy, can rotate, theoretically along three axes. In practice, the energy is accumulated in rotations along only two axis, perpendicular to the axis joining the two atoms.

The equipartition principle holds also for these rotations, so the specific heat of diatomic gases, under a constant volume conditions, is approximately $c_v = 5/2 kT$ (per molecule), or $c_v = 5/2 RT$ per mole.



Rotations along this axis do not contribute to the specific heat.

Moteurs thermiques

Le principe de l'équivalence du travail mécanique et de la chaleur permet aux moteurs thermiques de fonctionner : puisque l'énergie mécanique peut être convertie en chaleur (comme dans l'expérience de Joule), la chaleur peut également être convertie en travail mécanique (la chaleur est équivalente à l'énergie mécanique).

Mais comme l'énergie mécanique ne peut pas être entièrement convertie en chaleur (à cause de la friction, par exemple), toute la chaleur Q_1 absorbée par le système ne peut pas être convertie en travail mécanique. Une partie de la chaleur, Q_2 , doit être cédée à l'environnement.

Dans un moteur thermique idéal, l'*efficacité énergétique* η est le rapport entre la chaleur *utilisée*, c'est-à-dire $Q_1 - Q_2$, et la chaleur absorbée.

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1$$

Comme dans les moteurs à gaz, la chaleur est proportionnelle à la température du gaz, l'efficacité énergétique (d'un moteur idéal) est $\eta = (T_1 - T_2) / T_1$.

Où T_1 est la température de la source de chaleur et T_2 est la température du radiateur (puits de chaleur).

Ainsi, l'efficacité augmente si la source de chaleur est plus chaude et le radiateur plus froid.



Moteurs thermiques

Quel pourrait être l'efficacité énergétique « maximale » d'un moteur selon les lois de la thermodynamique ?

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1.$$

”

Moteur 605 MW [General Electric](#) 9HA a atteint un rendement de 62 % à une température de **1,540 °C**.

Le rendement d'un moteur de voiture typique n'est que de 30 % environ.

Le reste est transformé en chaleur, sans parler des émissions de CO₂.



<https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/9ha>

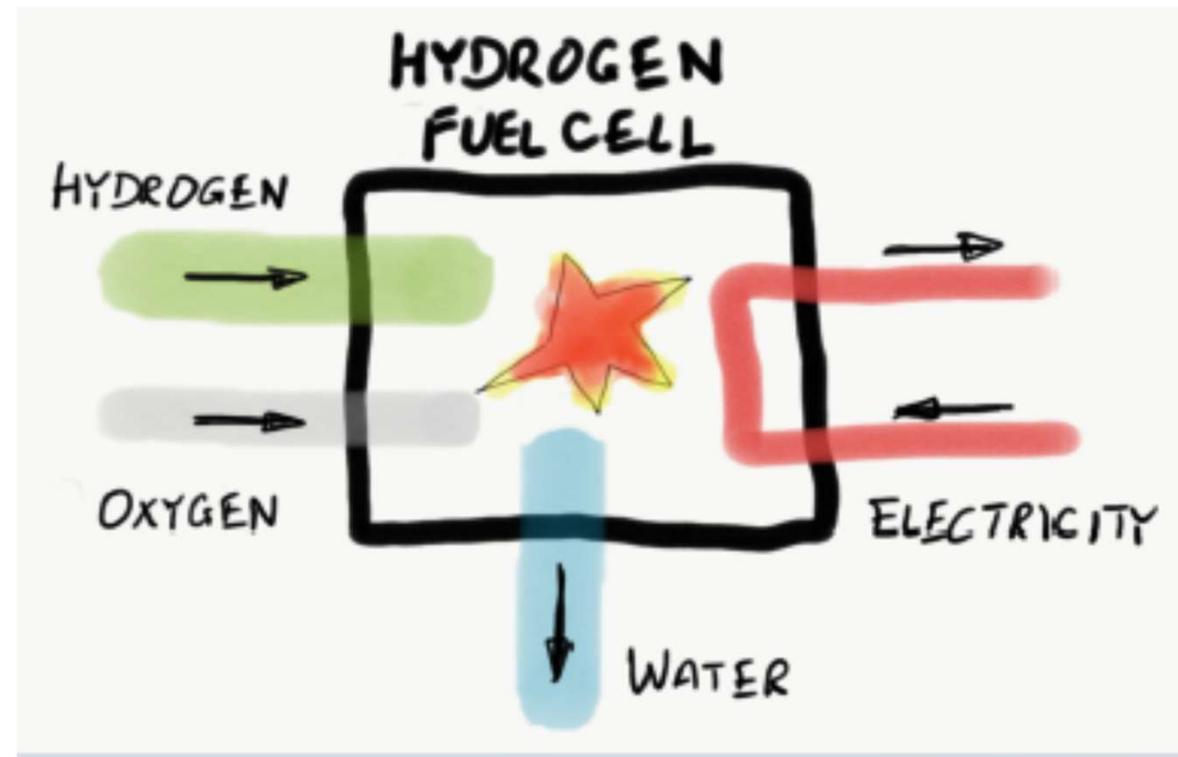
Pile à combustible (hydrogène)

L'idée d'une pile à combustible est qu'il s'agit d'un *moteur* : en fournissant de l'hydrogène H_2 et de l'oxygène O_2 , on produit de l'électricité et les deux gaz forment de l'eau H_2O .

D'un point de vue énergétique, l'énergie chimique des deux gaz est convertie en électricité.

Le rendement d'une pile à combustible est beaucoup plus élevé (jusqu'à 80 %) que celui d'un moteur à combustion interne.

Mais la thermodynamique dit que de la chaleur doit aussi être produite (voir leçon 4).



La pile à combustible « parfaite »

Un schéma détaillé de la conversion d'énergie est présenté ci-dessous.

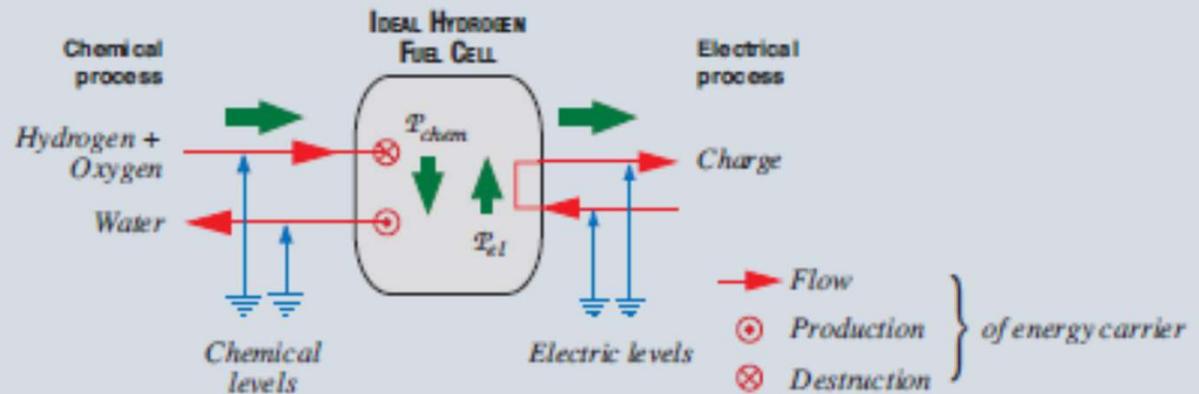
Le niveau chimique de l'eau H_2O est inférieur à celui du H_2 et du O_2 fournis séparément.

Une baisse du niveau d'énergie chimique fait passer la charge électrique à un potentiel plus élevé (d'environ 1 V), ce qui provoque le passage d'un courant électrique.

Hans Fuchs, *op. cit.*

➤ T Using hydrogen in a fuel cell

The reaction of hydrogen with oxygen that produces water makes energy available. In a fuel cell, the energy made available is used for pumping electric charge from a lower to a higher electric level, setting up an electric tension.



When hydrogen gas reacts with oxygen gas, the two gases disappear. In their place, water appears. As a result of the reaction, charge is pumped.

Pile à combustible réelle

Dans une pile à hydrogène réelle, il y a également des pertes de chaleur.

Plusieurs raisons contribuent à ces pertes :

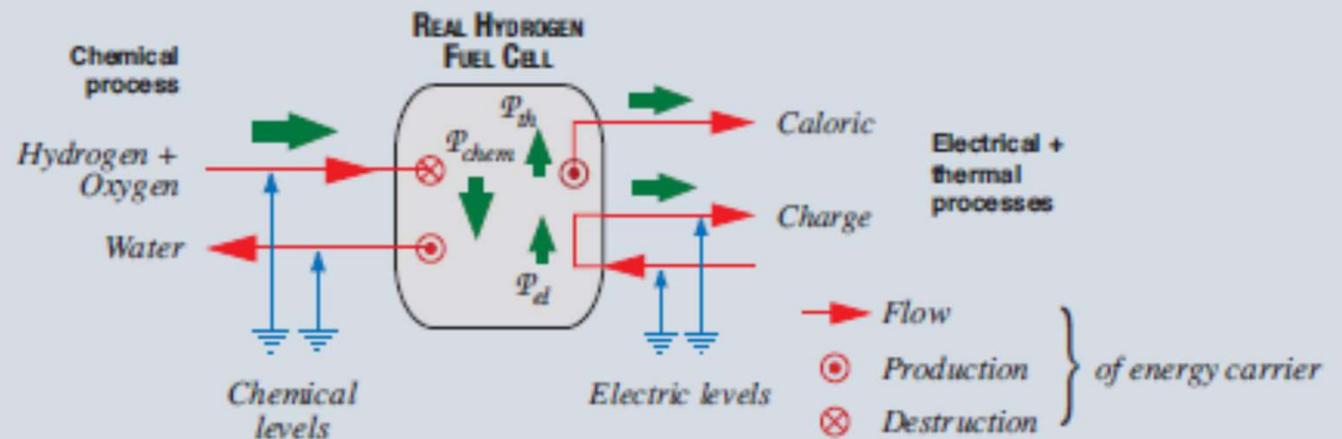
- potentiel d'activation (charge de la membrane échangeuse de protons)
- résistance interne de la cellule (pertes ohmiques)
- pertes supplémentaires dues à des imperfections techniques.

Globalement, 80 % de l'efficacité théorique est encore un objectif lointain.

Hans Fuchs, *op. cit.*, p. 27

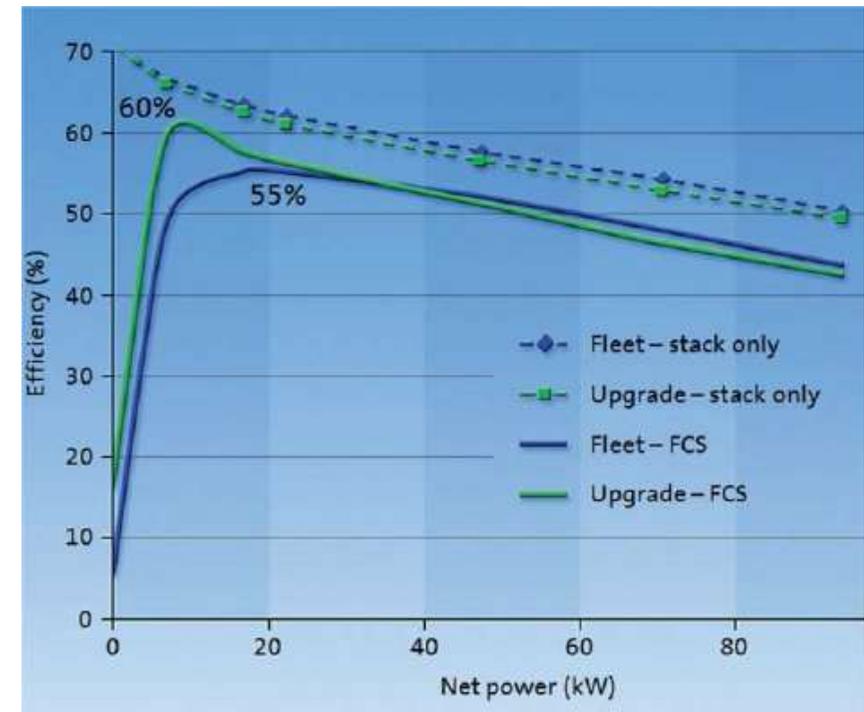
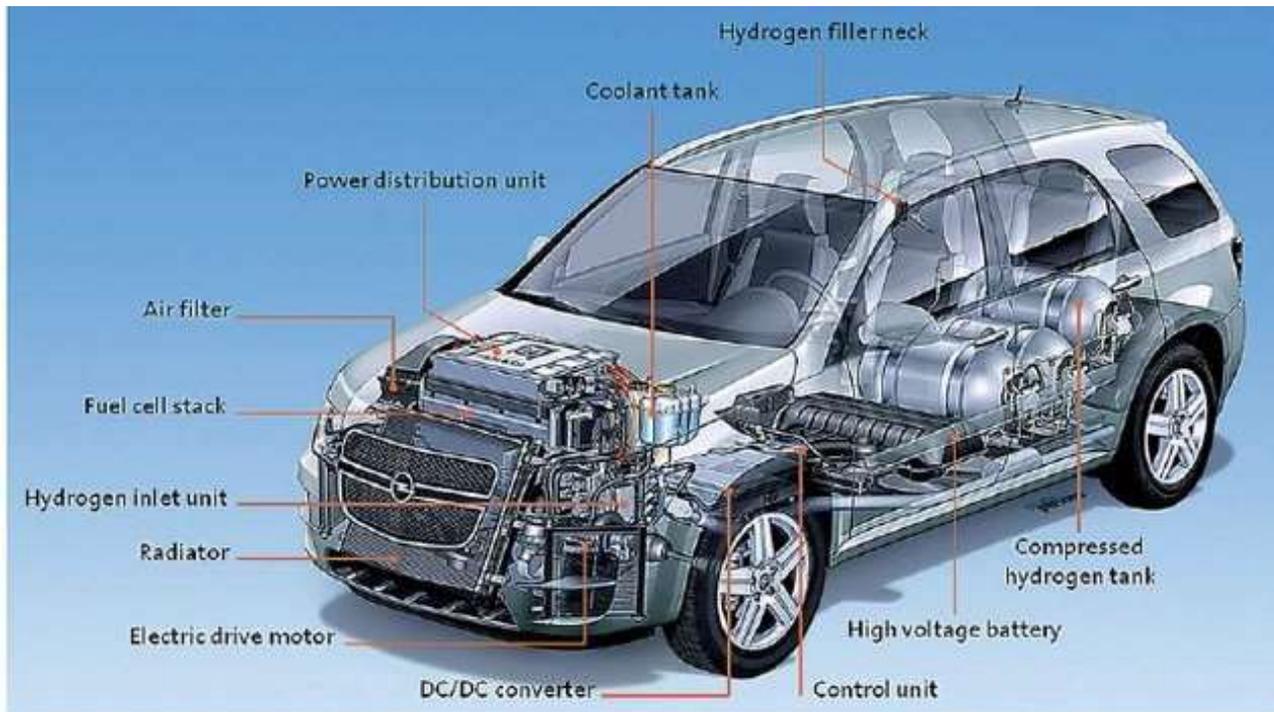
➤ T Real hydrogen fuel cells

A real (hydrogen) fuel cell is fed with hydrogen and oxygen. Their reaction drives an electric and a thermal process in parallel.



Une vraie voiture à hydrogène

En pratique, une efficacité de 50 % serait excellente.



https://www.researchgate.net/publication/233987484_Fuel_cell_electric_vehicles_and_hydrogen_infrastructure_Status_2012/figures?lo=1

Fig. 8 Fuel cell stack efficiency (dotted lines) and fuel cell system efficiency (straight line) over net power; HydroGen4 standard fleet version: blue curves; “TechDemo” system: green curves



U. Eberle *et al.*, *Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: Status 2012*
Energy & Environmental Science 5(10): 8790 (2012)

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Conclusions (des cinq leçons)



- Les enseignants ont été préparés à ajouter des activités ou des éléments d'activités au parcours didactique
- Les concepts d'environnement, d'énergie et de climat sont pertinents et utiles
- Il est possible d'effectuer quelques expériences simples sur l'électricité, l'électrochimie, l'hydrogène et l'énergie
- Des supports supplémentaires sont toujours les bienvenus
- Le récit et les expériences peuvent être facilement adaptés aux différents niveaux scolaires

NCU Group: A. Karbowski, K. Wyborska, K. Fedus, K. Rochowicz, A. Kamińska, G. Karwasz



This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246.
The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.