

I – L'unité internationale d'énergie et d'autres unités

L'unité internationale de l'énergie est le joule de symbole J.

L'EDF utilise le kilowattheure dont le symbole est kWh pour mesurer et facturer l'énergie électrique consommée par un particulier (1kWh coûte environ 0,15 € TTC).

Les diététiciens utilisent la calorie de symbole cal ou le kilocalorie (kcal) pour mesurer l'énergie apportée à l'organisme par tel ou tel aliment.

En économie on utilise la tonne équivalent pétrole de symbole tep pour comparer les consommations en énergie de différents secteurs économiques et par différentes sources d'énergie comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel, le bois, l'éolien, le solaire, etc...

Une tonne équivalent pétrole correspond à l'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole. On considère que 1 t de pétrole correspond à 1,5 t de charbon ou à 1 000 m³ de gaz naturel. On estime que 1 tep = 4 500 kWh.

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3600 \text{ kJ} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4,185 \text{ J}$$

$$1 \text{ tep} = 1,62 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

II – Les principales formes d'énergie

Energie mécanique : énergie que possède la Toyota Prius lorsqu'elle roule, grâce aux moteurs thermiques et/ou électriques qui tournent. Elle augmente lorsque la vitesse augmente et lorsque l'altitude de l'objet en mouvement augmente.

$$E_m = E_c + E_p \quad E_m : \text{énergie mécanique}, E_c : \text{énergie cinétique}, E_p : \text{énergie potentielle}$$

Energie cinétique : énergie que possède tout objet en mouvement : voiture en translation ou arbre du moteur et roues en rotation. (cinétique = vitesse)

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_c : \text{énergie cinétique}, m : \text{masse de l'objet}, v : \text{vitesse de l'objet}$$

Energie potentielle : énergie que possède un objet à cause de sa position, susceptible de se transformer en énergie cinétique. Par exemple, plus l'altitude d'un avion augmente, plus son énergie potentielle augmente.

$$E_p = mgh \quad E_p : \text{énergie potentielle}, m : \text{masse}, h : \text{altitude}, g : \text{intensité de la pesanteur (9,81 N/kg)}$$

Energie électrique : énergie délivrée par la batterie de la Toyota Prius, envoyée au moteur électrique

Energie chimique : énergie produite lors de la combustion de l'essence pour faire fonctionner le moteur thermique de la Prius. C'est également l'énergie produite dans la batterie de la Prius lors du freinage et lorsque le moteur thermique fait tourner la génératrice qui produit de l'électricité qui recharge la batterie grâce à une réaction chimique.

Energie nucléaire : Energie produite lors de la fission de l'Uranium-235 dans une centrale nucléaire → chaleur → vapeur → fait tourner des turbines → puis des alternateurs → électricité.

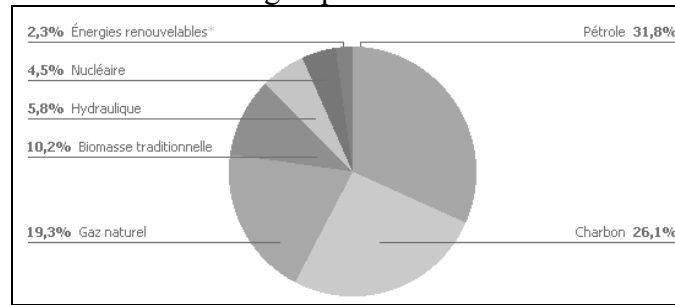
C'est également l'énergie produite dans le cœur du soleil et qui le fait briller. Il s'agit dans le cas du soleil de la fusion de l'hydrogène. C'est pour terminer l'énergie destructrice terrifiante produite lors de l'explosion d'une bombe nucléaire A (fission) ou H (fusion), encore pire que la A !

Energie rayonnante : Energie produite par le soleil qui brille ou par tout corps chauffé à haute température (fer rouge ou filament de tungstène d'une lampe à incandescence porté à 1000°C). Energie produite par un four à micro-ondes.

Energie calorifique ou thermique : Energie produite lorsque les plaquettes de frein appuient sur le disque de frein lors du freinage de la voiture ou par un radiateur électrique ou par un animal vivant. On peut la mettre en évidence grâce à des caméras ou des lunettes à infra-rouge, ce qui correspond à de l'énergie rayonnante.

III – Les sources d'énergie

Sources d'énergie fossiles	Sources d'énergie renouvelables
Pétrole	Eolien
Charbon	Hydraulique
Gaz naturel	Solaire
Uranium	Pompe à chaleur (géothermie)
Sources thermales (géothermie)	Bois
	Biocarburants
	Biogaz
	Biomasse



Répartition des ressources énergétiques utilisées sur la planète en 1996 (Conseil mondial de l'énergie)

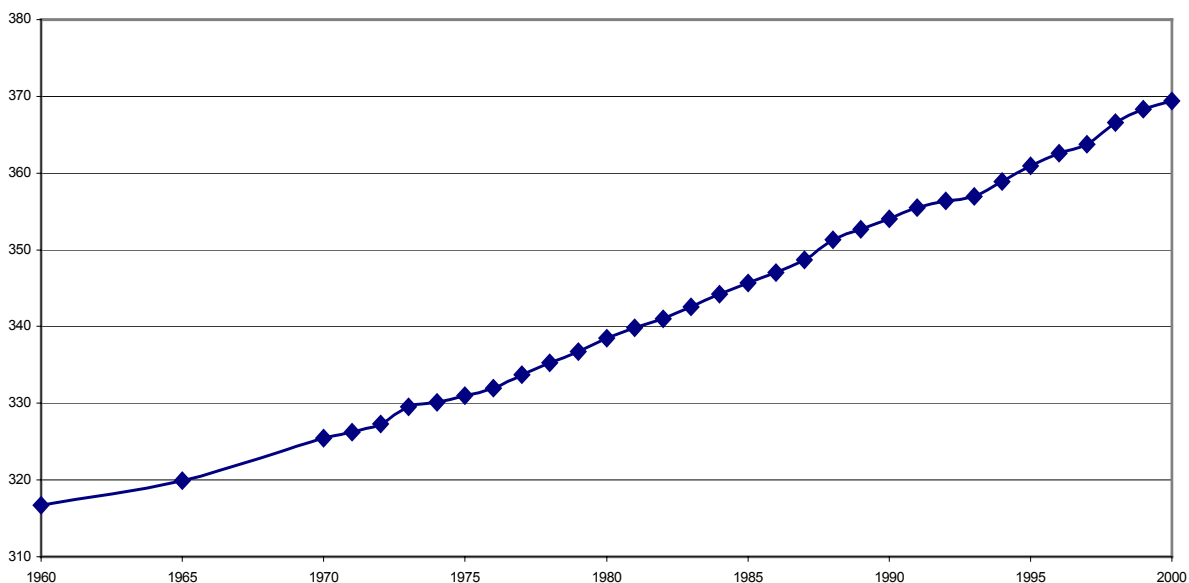
Les problèmes posés par la consommation des énergies fossiles sont très importants :

- Pour le pétrole, le charbon :
 - **l'effet de serre** par augmentation du taux de gaz carbonique (ou dioxyde de carbone CO₂) dans l'atmosphère terrestre. Ce gaz a la propriété de piéger l'énergie solaire et produit un réchauffement de la planète avec modification du climat (dérèglement climatique) et fonte des glaces aux pôles et en montagne et une augmentation du niveau de la mer ;
 - **La pollution atmosphérique** par production d'oxydes d'azote et d'oxydes de soufre et de micro-particules de carbone provoquant des maladies respiratoires (asthme) et des pluies acides (acide sulfurique) qui tuent les arbres des forêts ;
 - **Les réserves de pétrole s'épuisent** rapidement, de même que le charbon si bien que les prix montent et d'ici 20 ans, il n'y aura plus de pétrole si la consommation reste la même ;
 - L'Europe est **dépendante** des pays producteurs comme l'Irak, l'Arabie Saoudite et tous les pays d'extrême orient, **instables politiquement** (islamisme radical et terrorisme) ;
 - Le **pétrole est un enjeu stratégique** pour nos sociétés occidentales qui pousse à la **guerre** et/ou à certaines **manœuvres politiciennes** douteuses ;
 - **Marées noires à répétition** (catastrophes écologiques dues à la négligence des pollueurs qui utilisent de bateaux poubelles sous pavillon de complaisance pour économiser de l'argent et qui n'indemnisent jamais leurs victimes) ;
- Pour le gaz naturel :
 - **Effet de serre** ;
 - Moins polluant en termes d'oxyde d'azote et de soufre que le pétrole et le charbon ;
- Pour le nucléaire :
 - Production de **déchets radioactifs** à très longue durée de vie **dont on ne sait pas quoi faire**. Ils perdent la moitié de leur radioactivité tous les 100 000 ans environ, ils sont indestructibles et leur coût inestimable de gestion n'est pas pris en compte dans le prix de l'électricité nucléaire. Il devra être payé par nos très nombreuses générations futures. On espère, avec les progrès de la science, que ces générations futures trouveront un moyen efficace de s'en débarrasser. Des essais ont été effectués au CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) pour transmuter les déchets de longue durée de vie en déchets à courte durée de vie dans des accélérateurs de particules (modifier la composition en protons et neutrons du noyau des atomes radioactifs). Malheureusement, l'énergie électrique à fournir à ces accélérateurs est bien supérieure à l'énergie électrique qui a été produite par la centrale nucléaire au cours de leur fabrication et cela ne traite que des quantités infinitésimales de déchets (en conclusion : autant ne pas les fabriquer...). Des études sont faites pour enterrer ces déchets profondément dans un sous-sol sec et stable géologiquement. Il est néanmoins impossible de garantir qu'il n'y aura aucune fuite dans le sous-sol et dans les eaux des nappes phréatiques de substances radioactives au bout de plusieurs milliers d'année de stockage !...
 - **Risque d'accident**, comme l'explosion de la centrale de **Tchernobyl** le 26 avril 1986, avec ses conséquences humaines et environnementales dramatiques depuis le jour de l'accident et encore pour des milliers d'années : cancers, mutations génétiques, contamination à très long terme des plantes et des sols et des animaux par des éléments radioactifs à très longue durée de vie. Aujourd'hui, 20 ans après la catastrophe, le sarcophage est à renforcer car en très mauvais état et personne ne bouge . Une forte augmentation des cancers de la thyroïde est observée en France qui pourtant n'aurait, soit

disant, pas été touchée par le nuage radioactif...) ;

- **Risque** d'attaque et de destruction de centrales par des **terroristes** (kamikazes) ;
- Risque de **détournement de matières radioactives** par certaines mafias (russes par exemple à cause de la pauvreté qui y règne actuellement) au profit d'organisations terroristes (fabrication de bombes sales, c'est à dire non nucléaires mais contenant des éléments radioactifs capables de contaminer un quartier et d'irradier ses habitants obligés d'évacuer les lieux et risquant des cancers) ;
- Récupération du **plutonium-239** fissile fabriqué dans les centrales nucléaires civiles à partir de l'uranium-238 non fissile (absorption d'un neutron puis transformation de ce neutron en proton) **pour fabriquer des bombes A** (le nucléaire militaire n'étant jamais bien loin du nucléaire civil) au profit d'éventuels terroristes ;
- **Epuisement imminent des réserves** d'uranium-235 ;
- Les **centrales nucléaires** françaises construites dans les années 60, 70 arrivent en **fin de vie** et il faudrait les **démanteler** c'est à dire les démonter, les couper en morceaux (très radioactifs) et stocker ces morceaux (déchets), ce qui coûte extrêmement cher est dangereux pour les ouvriers et est sans cesse repoussé ;

En conclusion, **il est indispensable de développer rapidement l'utilisation des énergies renouvelables, et de limiter nos consommations d'énergie afin d'assurer un mode de développement durable** « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (définition de l'ONU en 1987). Il s'agit de trouver les moyens d'éviter une croissance destructrice de l'environnement (croissance démographique, industrielle, urbaine) et, par contrecoup, menaçant l'avenir de l'homme sur une planète dont on perçoit enfin qu'elle a des possibilités limitées et que ses ressources ne peuvent pas être exploitées et dilapidées indéfiniment.



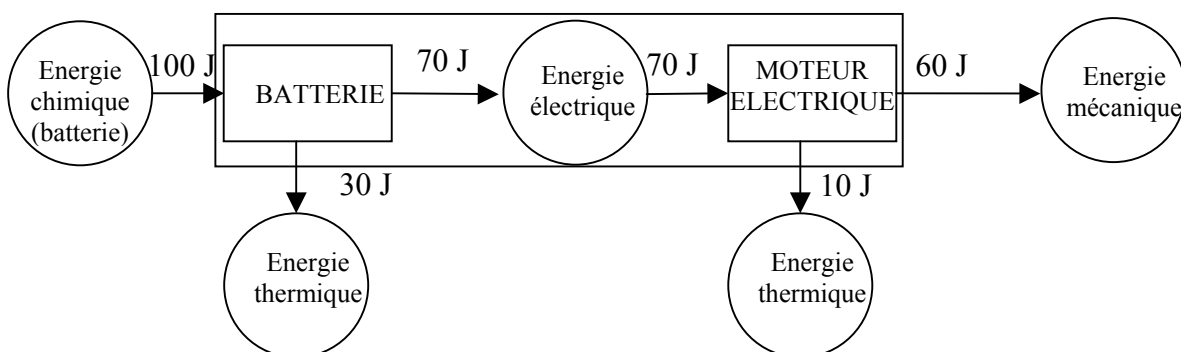
Augmentation de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère terrestre en parties par millions (ppm) entre 1960 et 2000

Celle-ci pourrait encore doubler en un siècle soit passer à 740 ppm en 2100 si rien n'est fait avec une augmentation de température moyenne de +5°C en 2100, ce qui aurait des conséquences catastrophiques (Mal de Terre de Hubert Reeves, éditions Seuil 2003).

IV – La conservation et la conversion de l'énergie

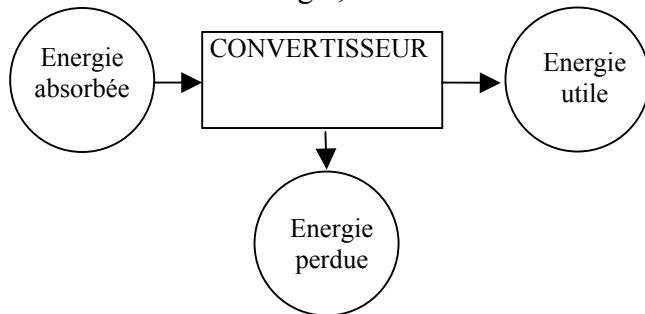
L'énergie ne peut ni être détruite, ni être créée, elle ne peut que changer de forme (se transformer ou se convertir). Par conséquent, elle se conserve au cours de ses différentes transformations.

Exemple 1 : La Prius fonctionne en mode électrique :



La batterie et le moteur sont des convertisseurs d'énergie. La voiture en elle-même peut être considérée comme une chaîne constituée des deux convertisseurs précédents.

Pour tout convertisseur d'énergie, on définira son rendement η compris entre 0 et 1 ou 0% et 100% :



$$\eta_{\text{convertisseur}} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie absorbée}}$$

$$\eta_{\text{batterie}} = \frac{70}{100} = 0,7 = 70\%$$

$$\eta_{\text{mot. elec.}} = \frac{60}{70} = 0,86 = 86\%$$

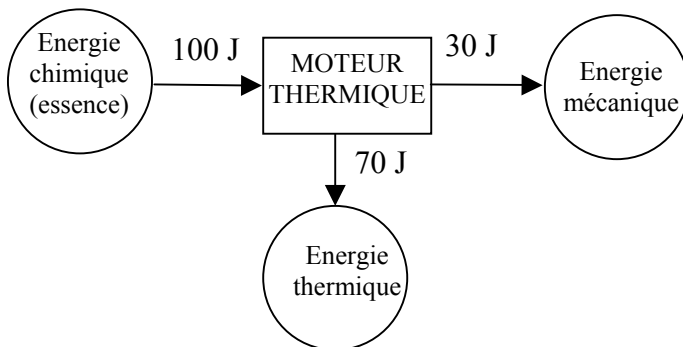
$$\eta_{\text{Prius elec.}} = \frac{60}{100} = 0,6 = 60\% = 0,7 \cdot 0,86 = \eta_{\text{batterie}} \cdot \eta_{\text{mot. elec.}}$$

On remarquera que **le rendement d'une chaîne de convertisseur est égal au produit des rendements de chacun des convertisseurs de la chaîne.**

Le rendement de la chaîne est inférieur au rendement du convertisseur qui a le plus petit rendement de la chaîne.

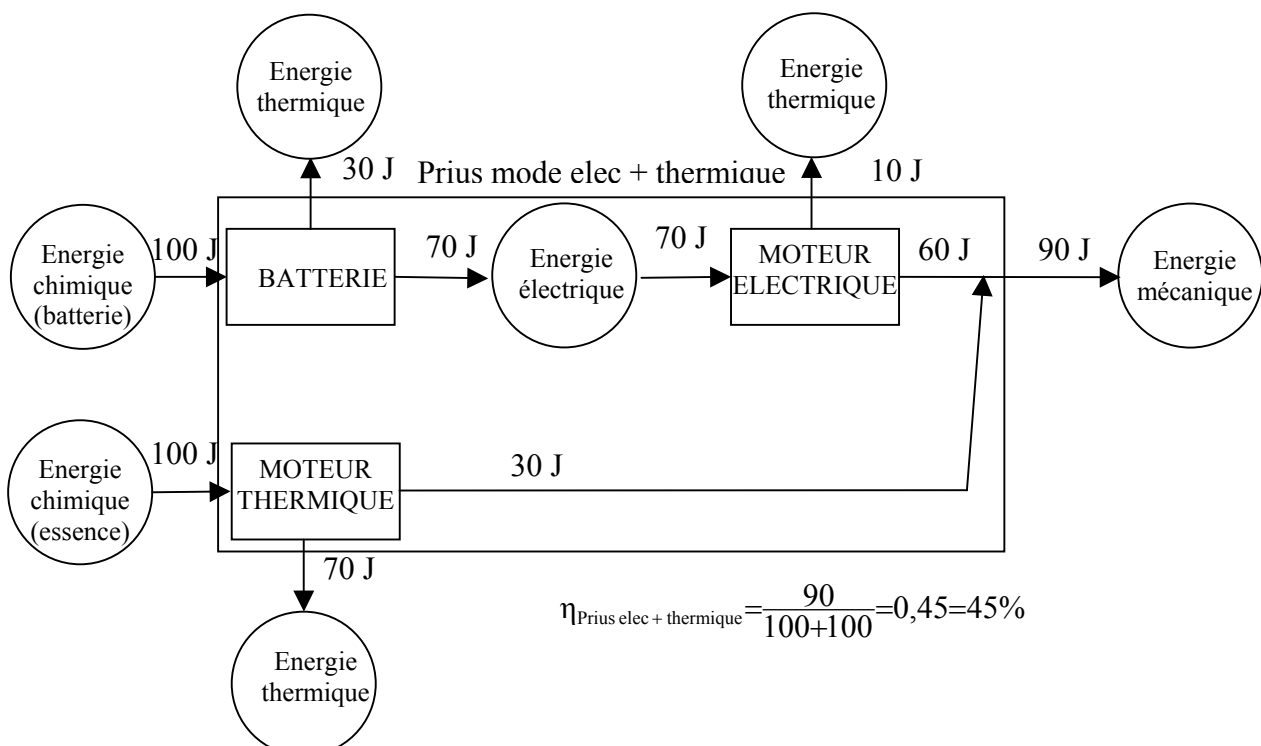
Conséquence : si on veut qu'une chaîne ait un bon rendement, il faut que chaque maillon de la chaîne ait un bon rendement et si un seul des maillons a un mauvais rendement, il pénalise à lui seul tout l'ensemble de la chaîne.

Exemple 2 : La Prius fonctionne en mode thermique



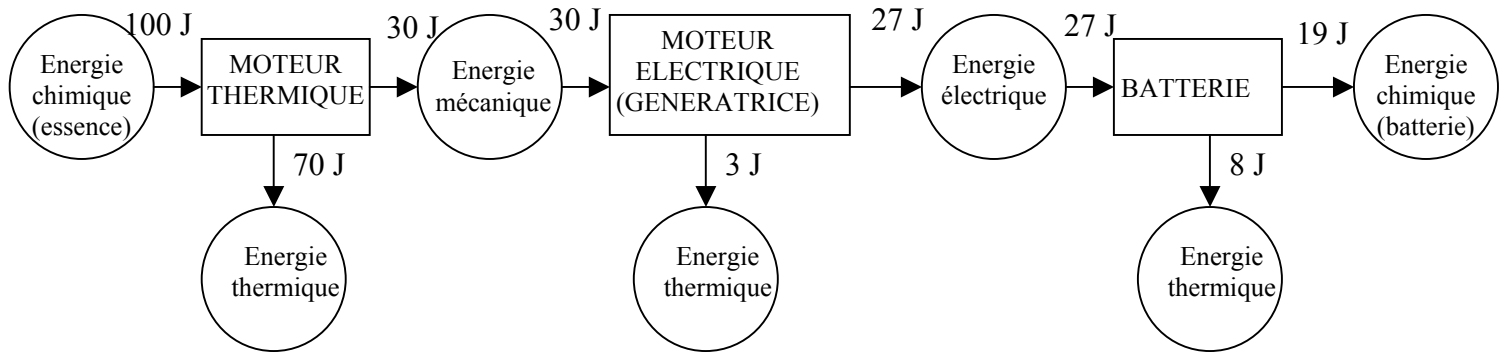
$$\eta_{\text{moteur thermique}} = \frac{30}{100} = 0,3 = 30\%$$

Exemple 3 : La Prius fonctionne simultanément en mode thermique et électrique



$$\eta_{\text{Prius elec + thermique}} = \frac{90}{100+100} = 0,45 = 45\%$$

Exemple 4 : La Prius recharge ses batteries grâce au moteur thermique :



$$\eta_{\text{chaîne}} = \frac{19}{100} = 0,19 = 19\% \quad \eta_{\text{mot thermique}} = 30\% \quad \eta_{\text{génératrice}} = \frac{27}{30} = 0,9 = 90\% \quad \eta_{\text{batterie}} = \frac{19}{27} = 0,7 = 70\%$$

$0,3 \cdot 0,9 \cdot 0,7 = 0,19$ Conclusion : l'élément pénalisant de la chaîne est encore le moteur thermique

Il existe deux sortes de convertisseurs :

- les **convertisseurs réversibles**
- les **convertisseurs non réversibles**.

La **batterie** est un **CONVERTISSEUR REVERSIBLE** car lorsqu'elle se décharge, elle transforme de l'énergie chimique en énergie électrique par contre, lorsqu'elle se charge, elle transforme de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle peut ainsi subir plusieurs milliers de cycles charge-décharge.

Le **moteur électrique** est lui-aussi un **CONVERTISSEUR REVERSIBLE** car il peut transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur) ou bien transformer l'énergie mécanique en énergie électrique si on le fait tourner (génératrice).

Par contre, le moteur thermique est un **CONVERTISSEUR NON REVERSIBLE** car en le faisant tourner, on ne fabrique pas d'essence pour remonter le niveau du réservoir contrairement au moteur électrique.

Dès qu'il y a non réversibilité d'un processus, on dit qu'il y a **DEGRADATION** de l'énergie.

On ne peut ni détruire ni fabriquer de l'énergie, en revanche, on peut la **DEGRADER**.

Les énergies chimiques, mécanique, rayonnante et électriques sont considérées comme des **formes d'énergie NOBLES** ou encore des **énergies nobles**.

L'énergie thermique est une énergie **non noble**.

La différence fondamentale entre l'énergie noble et l'énergie non noble est que l'on peut toujours transformer 100% d'énergie noble en énergie non noble, par contre, on ne pourra jamais transformer 100% d'énergie non noble en énergie noble, on est limité à un rendement de l'ordre de 30% seulement soit un tiers environ (car avec un piston, on privilégie le mouvement dans une direction sur trois possibles par les molécules de gaz), les deux tiers restants demeurent non nobles (chaleur, vibrations, bruit). Le moteur thermique a un rendement d'environ 30%, les 70% restants étant de la chaleur.

Le moteur électrique a un bien meilleur rendement car il transforme une énergie noble (électrique) en énergie noble (mouvement), il y a beaucoup moins de chaleur, de vibration et de bruit, de plus le processus est réversible (ce qui est épatant car quand on freine, on recharge la batterie donc le réservoir électrique, ce qui augmente d'autant l'autonomie du véhicule). Le moteur électrique a quant à lui un rendement d'environ 90%. Seuls 10% d'énergie est perdue en chaleur.

La batterie a un rendement de 70% environ, 30% de l'énergie étant perdue en chaleur.

Pour le transport, le moteur électrique est bien meilleur que le moteur thermique, pour de nombreuses raisons :

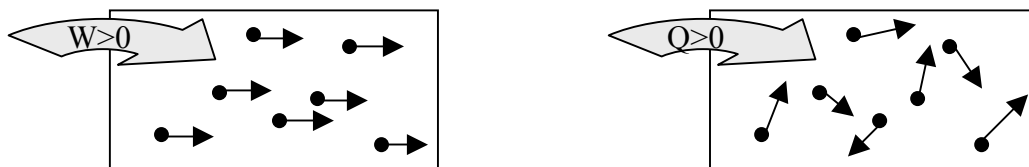
- pas de gaz d'échappement toxique ;
- pas de bruit lorsqu'on roule ;
- pas de bruit ni de consommation à l'arrêt ;
- réversibilité permettant une recharge de la batterie lors du freinage et des descentes avec un frein moteur beaucoup plus efficace qu'avec un moteur thermique qui surconsomme dans ce cas ;
- Rendement bien meilleur, l'énergie servant à avancer et non plus à chauffer l'air ambiant ;
- Pas besoin de circuit de refroidissement d'eau ;

- Entretien simplifié à l'extrême : pas de graissage vidange du moteur électrique et donc pas de fuites d'huile polluantes comme sur les voitures à essence ;
- Pas ou peu de dégradation de l'énergie qui demeure noble en majeure partie ;
- Par contre, à la fin de sa vie, il ne faudra pas jeter la batterie sous peine de polluer l'environnement, il faudra la traiter et la recycler ;
- De plus, les voitures électriques non hybrides doivent être rechargées sur le secteur et utilise dans ce cas de l'énergie nucléaire qui produit des déchets radioactifs polluants ;
- Pour terminer, les batteries actuelles des voitures tout électrique (batterie au plomb) n'autorisent pas au véhicule une très grande autonomie (de l'ordre de 100 km avec le plein d'électricité) mais c'est suffisant pour la ville.
- Le véhicule hybride est une bonne solution mais il peut-être amélioré : utilisation d'un moteur diesel HDI utilisant de l'huile de colza ou un moteur à injection de bioéthanol (énergie renouvelable et non plus fossile) consommant 2 à 3 litres aux cents kilomètres (au lieu des 4L/100km de carburant fossile de la Prius.
- L'idéal serait d'avoir une voiture électrique fonctionnant avec une pile à combustible et une batterie. La pile à combustible permettrait de transformer directement du bioéthanol (énergie renouvelable) en électricité, sans utiliser de moteur thermique qui a un mauvais rendement. On pourrait espérer descendre à 1L/100 km de carburant renouvelable.

V – Le travail W et la chaleur Q

Le travail W est un mode de transfert ordonné d'énergie entre le système et son environnement

La chaleur Q est un mode de transfert désordonné d'énergie entre le système et son environnement

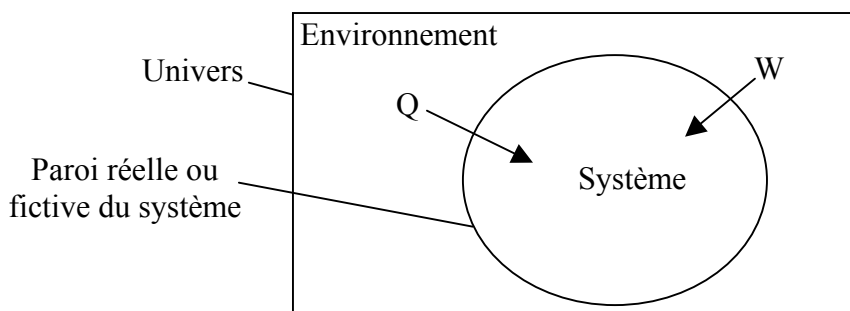


Remarques :

- Un **système** est une partie de l'**Univers** qui a été soigneusement définie (eau d'une casserole par exemple ou encore eau + casserole) entourée d'une paroi réelle (surface externe de la casserole et interface eau/air) ou fictive (interface eau/casserole). Ce qui n'appartient pas au système est appelé **environnement**.

$$\boxed{\text{système} + \text{environnement} = \text{Univers}}$$

- Le travail et la chaleur sont des transferts d'énergie entre le système et son environnement. Ils s'expriment tous les deux dans la même unité, à savoir le joule qui est l'unité internationale de l'énergie.
- W et Q sont des grandeurs algébriques positives ou négatives. La convention de la thermodynamique consiste à **compter positivement l'énergie reçue** par le système et **compter négativement l'énergie perdue** par le système.
- $W > 0$ ou $Q > 0$ si l'énergie est **reçue** par le système de la part de son environnement.
- $W < 0$ ou $Q < 0$ si l'énergie est **cédée** par le système à son environnement.



- Si $W > 0$ et/ou $Q > 0$ alors les transferts d'énergie se font **dans le sens des (de la) flèche(s) correspondante(s)**.
- Si $W < 0$ et/ou $Q < 0$ alors les transferts se font **dans le sens contraire des (de la) flèche(s) correspondante(s)**.
- Lorsque la paroi du système ne laisse pas passer la chaleur (paroi d'une bouteille thermos) cette paroi est dite **adiabatique**.

VI – La puissance P

La puissance s'exprime en watts, symbole W. Elle correspond à un **débit d'énergie**.

$$P = \frac{W}{t} \text{ avec } P : \text{puissance (watts)}, W : \text{énergie transférée (J)} \text{ et } t : \text{durée du transfert (s)}$$

Par exemple, si un appareil électrique a une puissance de 1000W (1kW), cela signifie que toutes les secondes, il consomme une énergie électrique de 1000J (1kJ).

On peut écrire également la relation :

$$W = P \cdot t$$

Si P est exprimé en kilowatts et t en heures, W s'exprime alors en kilowattheures (kWh)

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 1000 \cdot 3600 \text{ W.s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

En courant continu, on peut écrire $P = U \cdot I$

avec P : puissance électrique (W), U : tension électrique (V) et I : intensité du courant électrique (A)

Pour une résistance, on a $U = R \cdot I$ (Loi d'Ohm) avec R : résistance électrique en ohms (Ω)

On obtient $W = UIt = RI^2t$ soit $W = RI^2t = Q$ (Loi de Joule)

Tout conducteur traversé par un courant électrique produit une quantité de chaleur égale au produit de la résistance du conducteur par le carré du courant qui le traverse et par le temps d'utilisation.

Exercices :

1. Calculez la quantité de chaleur produite par une résistance de 50Ω traversée par un courant de 4,4A pendant 10 minutes. Quel est la tension d'alimentation ?
2. Un radiateur électrique a une puissance de 3000W. Il fonctionne pendant 50 minutes. Calculez l'énergie électrique consommée en kilowattheures et en déduire le prix à payer à EDF. Convertir cette énergie en unité internationale.
3. Dans le cas des voitures la puissance est exprimée en cheval-vapeur (CV). Sachant que 1CV correspond à 736 W, calculez la puissance d'une voiture de 90CV en watts. A quoi correspond cette puissance ?
4. Une voiture électrique développe pour rouler à 100 km / h une puissance de 30CV. Elle roule sur une distance de 100 km. Calculez en kWh l'énergie électrique consommée et son prix de revient. Comparez avec le prix de l'essence. Qu'en pensez-vous ?

Pour le rendement d'un convertisseur, on peut prendre comme temps de référence une seconde si bien que $P = W / 1 = W$: la puissance est égale à l'énergie échangée pendant une seconde.

