



**HAL**  
open science

**Efficacité énergétique : aspects physiques et technologiques de la conversion d'énergie (6ème Ecole Energies & Recherches Roscoff 23-28 mars 2014)**

Bernard Multon

► **To cite this version:**

Bernard Multon. Efficacité énergétique : aspects physiques et technologiques de la conversion d'énergie (6ème Ecole Energies & Recherches Roscoff 23-28 mars 2014). Doctorat. Roscoff, France. 2014, pp.56. cel-01246807

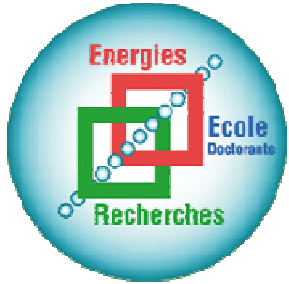
**HAL Id: cel-01246807**

**<https://cel.hal.science/cel-01246807v1>**

Submitted on 19 Dec 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



6<sup>ème</sup> Ecole Energies & Recherches  
Roscoff 23-28 mars 2014



# Effacité énergétique : aspects physiques et technologiques de la conversion d'énergie



Bernard MULTON  
Ecole normale supérieure de Rennes  
Laboratoire SATIE - CNRS

# **Introduction**

Énergie et puissance

Conversions, rendements

Procédés et leur efficacité énergétique

Conclusion

# Introduction, définitions

## **Efficacité énergétique** (*energy efficiency*) :

Minimisation de la consommation d'énergie pour assurer un **service**

Objectifs économiques, sociaux et environnementaux  
dans une logique, non dite, de soutenabilité

Exemples de **services** :

- déplacement en kilomètres
- éclairage en lumens (lux.m<sup>2</sup>)
- chauffage : m<sup>2</sup> à une certaine température...



## **Rendement énergétique** (*energy conversion efficiency*) :

Rapport de l'**énergie** « utile » (ou « produite » par un **convertisseur** d'énergie)  
sur l'**énergie** « absorbée » (ou « consommée »)

Exemples de convertisseurs :

- moteur (électrique, thermique...)
- lampe
- chaudière...



Source : Honda

# Du rendement à l'efficacité énergétique

Pour assurer un service,  
il y a nécessairement des transformations donc une dépense d'énergie

Dans la plupart des cas, nos services « consomment »  
de l' « **énergie finale** » (directement consommable)  
elle-même « produite » à partir de « **ressources primaires** »  
(accessibles dans la nature)



[Wikimedia commons](#)

D'où les dénominations de « **producteurs** » d'énergie (en fait, finale)  
et de « **consommateurs** » d'énergie finale

Mais, dans tous les cas, on a bien à faire à des **transformations** énergétiques

Cependant, il semble pertinent de distinguer l'efficacité de :

- de la production d'énergie finale à partir de ressources primaires

et

- de la consommation d'énergie finale pour la transformer en service

# Du rendement à l'efficacité énergétique

Au sein de ces procédés,

il y a un ou plusieurs « **convertisseurs** » d'énergie

**Service 1** : produire de l'électricité à partir de combustibles non renouvelables (fossiles ou fissiles)

- extraction minière => machines équipées de **moteurs**
- transformation des matières premières => procédés industriels eux-mêmes exploitants divers **convertisseurs**
- transport, raffinage pour obtenir un combustible de « qualité » ...
- conversion finale du combustible en électricité :  
**brûleurs, turbines, générateurs, transformateurs...**

**Service 2** : parcourir des km avec une automobile

- fabrication de l'automobile (puis recyclage en fin de vie)...
- consommation d'énergie finale dans le **moteur** du véhicule,  
liée à sa taille et à la façon de le conduire...

Les questions de **rendement énergétique** des convertisseurs sont centrales

**Introduction**

**Énergie et puissance**

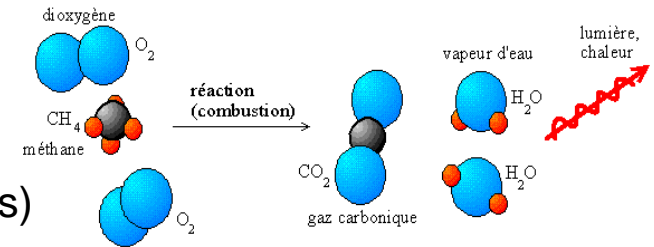
**Conversions, rendements**

**Procédés et leur efficacité énergétique**

**Conclusion**

# Energie : quelques exemples de conversions

**Chimique** : La combustion de 1 m<sup>3</sup> de méthane dégage environ **40 MJ**  
(modification des liaisons moléculaires)



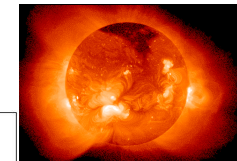
Wikimedia commons

**Nucléaire** : La **désintégration** complète d'1 gramme de matière libèrerait **90 000 GJ**

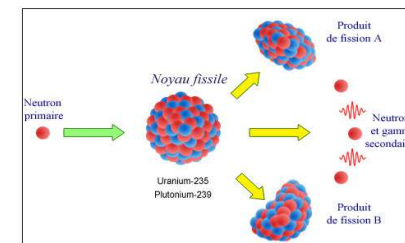
$$E = m \cdot c^2$$

0,001 kg      c = 3 · 10<sup>8</sup> m/s

La **fusion** d'1 gramme de deutérium-tritium  
(modification des liaisons des noyaux)  
libère **340 GJ**



La **fission** d'1 gramme d'uranium naturel  
libère **400 MJ**



Source : laradioactivite.com

**Chaleur** : Il faut **4180 J** pour accroître de 1°C  
la température d'1 kg d'eau

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

4180 J/kg/°C      1 kg      1 °C



## Exemples (suite)

**Rayonnement électromagnétique** : sous un flux solaire terrestre « normal » (1 kW/m<sup>2</sup>), une surface noire de 4 m<sup>2</sup> capte, en une seconde : **4000 J**

**Travail mécanique** : il faut **4000 J** (joules) pour élever de 4 m une masse d'environ 100 kg, dans un champ de pesanteur à 10 m/s<sup>2</sup>, opposant une force résistante de 1000 N (newtons)

$$E = F \cdot d$$

The diagram shows the equation  $E = F \cdot d$  enclosed in a yellow oval. An arrow points from the value '1000 N' below to the variable 'F' in the equation. Another arrow points from the value '4 m' below to the variable 'd' in the equation.

**Electricité** : Un courant de 1 ampère sous une tension de 1,2 volts durant 3300 secondes convertit **4000 J**

$$E = U \cdot I \cdot t$$

The diagram shows the equation  $E = U \cdot I \cdot t$  enclosed in a yellow oval. Three arrows point from values below to variables in the equation: '1,2 V' points to 'U', '1 A' points to 'I', and '3300 s' points to 't'.

Des lois idéales de l'énergétique permettraient de réaliser toute ces transformations d'une forme à l'autre, mais certaines sont possibles, d'autres pas...

# Unités d'énergie : équivalences

Systeme international : le **joule** (**J**)

Particules : **électron-volt eV** :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Unités de chaleur : 1 **calorie** (cal) = 4,18 J (+ 1°C un gramme d'eau)

1 BTU (**british thermal unit**) = 1050 J (+ 1°F une livre d'eau)

1 quadBTU (quadrillion BTU) =  $10^{15}$  BTU (unité US)

**kilowattheure kWh** :  $1 \text{ kWh} = 3600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$

**térawattheure TWh** :  $1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh} = 10^9 \text{ kWh}$

**tonne équivalent pétrole tep** :  $1 \text{ tep} \cong 11\,600 \text{ kWh}$

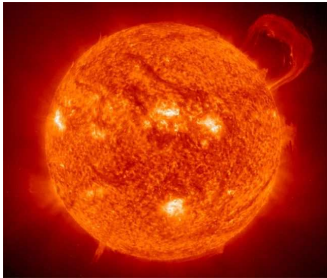
Quelques équivalences :

$1 \text{ tep} \cong 41,7 \text{ GJ}$
$1 \text{ Gtep} \cong 41,7 \text{ EJ} \cong 11\,600 \text{ TWh}$
$1 \text{ quad BTU} : 10^{15} \text{ BTU} \cong 290 \text{ TWh} \cong 25 \text{ Mtep}$
$1 \text{ baril (159 l ou 140 kg)} \cong 1700 \text{ kWh}$

# Des transformations stellaires aux conversions d'énergie terrestres...

**Stock** de matière (hydrogène stellaire) :

Fusion nucléaire d'hydrogène dans les étoiles => chaleur



chaleur => rayonnement électromagnétique (visible ou non)  
(**Flux**)



Rayonnement électromagnétique => photosynthèse de molécules organiques

=> biomasse, hydrocarbures fossiles (**Stocks**)



Combustion (réaction chimique) => chaleur

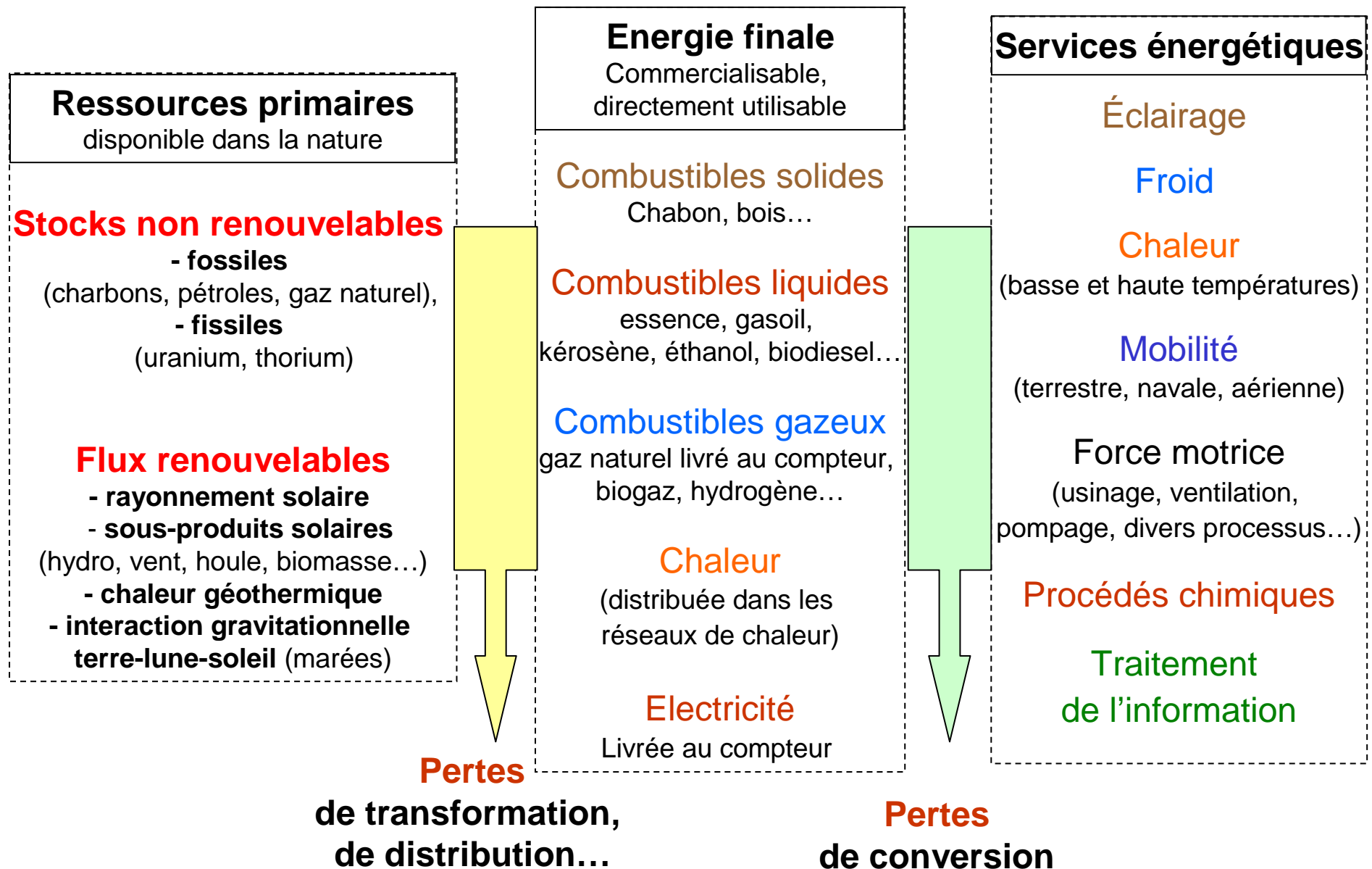


chaleur => énergie mécanique

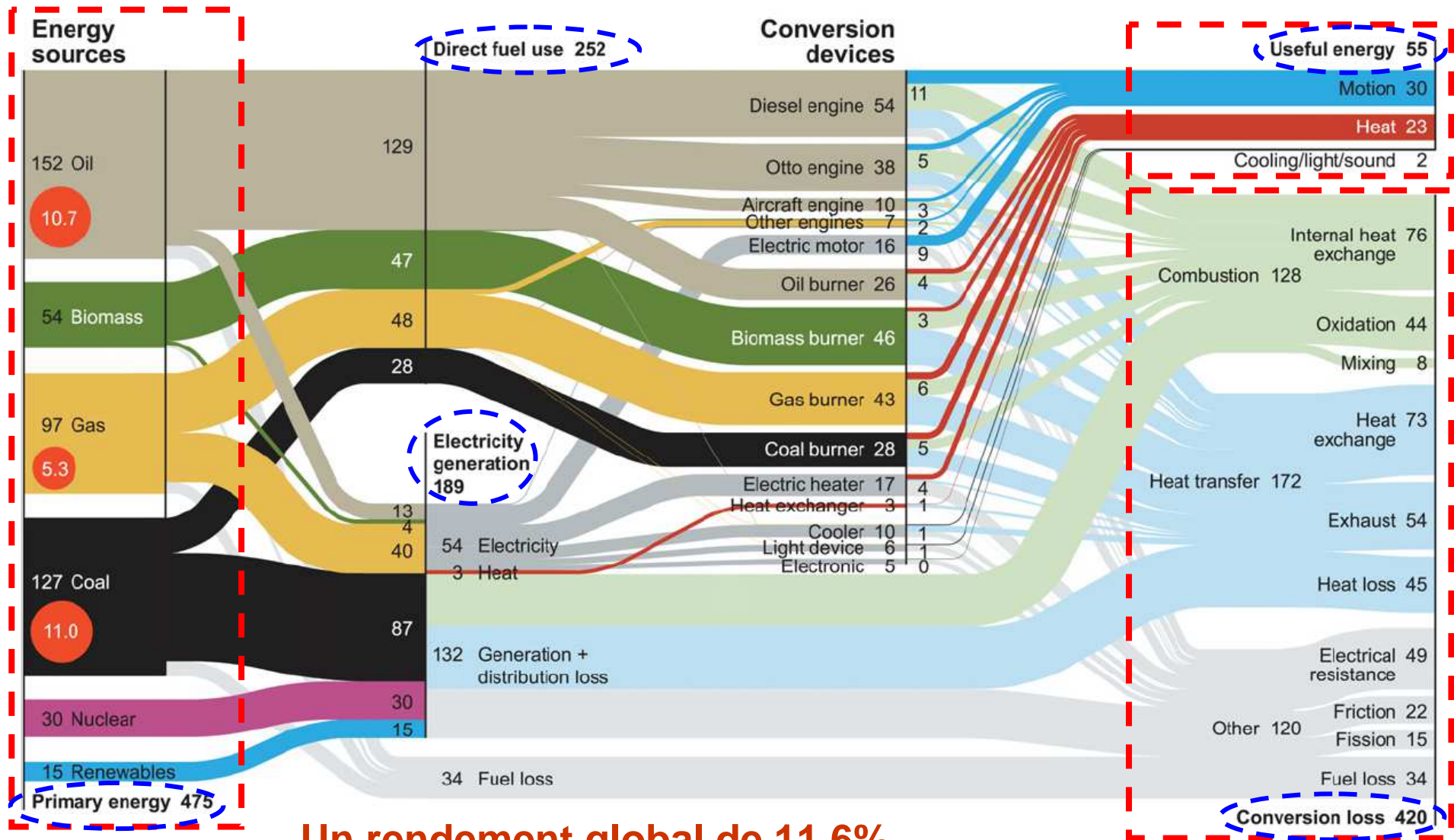


Flux ou stocks d'énergie peuvent se transformer pour rendre des services...

# Des ressources primaires aux services énergétiques



# Représentation par un diagramme de Sankey (bilan mondial 2005, en EJ exajoules)



Un rendement global de 11,6% ...

Global energy demand in 2005, total = 475 EJ

1 EJ = 24 Mtep = 278 TWh)

J.M. Cullen, J.M. Allwood / Energy 35 (2010) 2059–2069

B. Multon ENS Rennes

# Puissance : débit d'énergie lors d'une conversion

La **puissance P** (*power*)

c'est le débit d'énergie E lors d'une conversion :  $P = \frac{dE}{dt}$

**P en watts (W)** et **E en joules (J)** t en secondes (s)

-- en kilowatts (kW) et --- en kilowattheures (kWh) -- en heures (h)

La puissance caractérise le **convertisseur** d'énergie :

1- Un **brûleur** de 20 kW peut **transformer** un combustible (énergie chimique)  
2 x plus vite qu'un brûleur de 10 kW

et donc « **produire** » 2 x plus vite une quantité de chaleur donnée

2- Un **moteur électrique** de 20 kW peut **transformer** une quantité  
d'énergie électrique donnée 2 x plus vite qu'un moteur de 10 kW

et donc **convertir** 2 x plus vite l'énergie électrique qu'il reçoit en  
énergie mécanique pour effectuer un **travail** plus rapidement

Le cheval vapeur est une ancienne unité de puissance : 1 cv = 736 W

# Puissance (W) et énergie (kWh) : 2 exemples

Ex. 1 : transformation électricité ou combustible -> chaleur

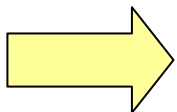
**Energie** : pour échauffer 100 litres (ou 100 kg) d'eau de **40°C**, il faut **4,6 kWh**  
(4,18 J par °C et par gramme, => 16,7 MJ = 4,6 kWh)

**Puissance** : pour faire cette conversion  
en **4 heures**, il faut un « réchauffeur » de **1,15 kW**  
en **1 heure** ---- ---- **4,6 kW**

Ex. 2 : transformation rayonnement solaire -> chaleur

**Energie** : pour obtenir 4,6 kWh de chaleur  
sous un rayonnement solaire de 1 kW/m<sup>2</sup>

**Puissance** : il faut : **4,6 h** avec un capteur solaire idéal de **1 m<sup>2</sup> (1 kW)**  
**1 h** ----- **4,6 m<sup>2</sup> (4,6 kW)**



Pour effectuer une transformation énergétique **plus vite**,  
il faut un **convertisseur plus puissant**...  
plus cher, nécessitant plus de matières premières...

Introduction

Énergie et puissance

**Conversions, rendements**

Procédés et leur efficacité énergétique

Conclusion



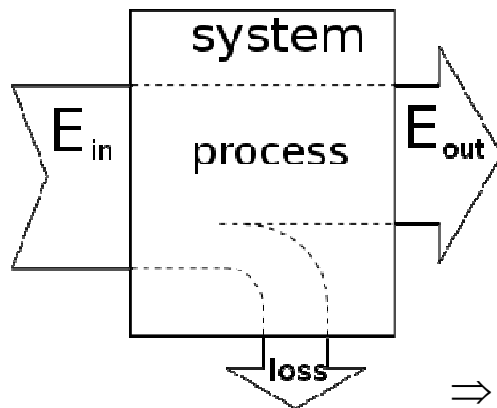
# Notion de rendement énergétique

D'un point de vue physique,

l'énergie ne se produit pas, ni ne se consomme...

**elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre**

Lors d'une transformation ou conversion, toute l'énergie entrante n'est pas transformée en énergie souhaitée à la sortie, il y a des pertes et le rendement est inférieur à 100% :



$$\text{Rendement } (\eta) = \frac{\text{Énergie sortante}}{\text{Énergie entrante}} < 100\%$$

↳ Êta pour efficiency

⇒ **Nécessité d'un système de refroidissement (échangeurs de chaleur) pour évacuer les pertes (loss)**

Source dessin :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_conversion\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_conversion_efficiency)

# Possibilités et limites de conversion

## « Production » de chaleur :



**Combustion** : réaction chimique exothermique

Valeur énergétique d'un combustible en kWh/kg sur la base :

- du PCI (pouvoir calorifique inférieur) kWh<sub>PCI</sub>

- du PCS ( --- --- supérieur) kWh<sub>PCS</sub>

(avec récupération de la chaleur latente de condensation des fumées :

+ 3 à 10% par rapport au PCI)



Valeurs typiques : 4 kWh<sub>PCI</sub>/kg (bois sec) à 39 kWh<sub>PCS</sub>/kg (hydrogène)  
en passant par 12 kWh<sub>PCI</sub>/kg (hydrocarbures liquides)

Attention, lorsque rien n'est précisé, le rendement d'une chaudière  
à combustion est calculé sur la base du PCI

d'où des rendements qui peuvent dépasser 100% !

**Émissions de GES** : lorsque les combustibles sont carbonés,

il y a dégagement, entre autres, de CO<sub>2</sub> (3,7 kg CO<sub>2</sub> par kg de carbone) :

=> 0,2 (méthane) à 0,35 kg CO<sub>2</sub>/kWh<sub>PCI</sub> (charbon)

# Possibilités et limites de conversion

## « Production » de chaleur (suite) :

**Fission nucléaire** : cassure de noyaux fissiles (uranium 235)  
environ 120 000 kWh/kg  $U_{\text{nat}}$



Source : EDF

**Energie mécanique, électrique, etc...** : toutes les formes d'énergie  
peuvent être aisément « dégradées » en chaleur  
par « frottements »  
(effet Joule en électricité)



Wikimedia commons

Dans ces conversions, presque toute la chaleur peut être récupérée  
grâce à des échangeurs performants  
=> **rendement théorique 100%**

# Possibilités et limites de conversion

## « Production » d'énergie à haute valeur (mécanique, électrique) :

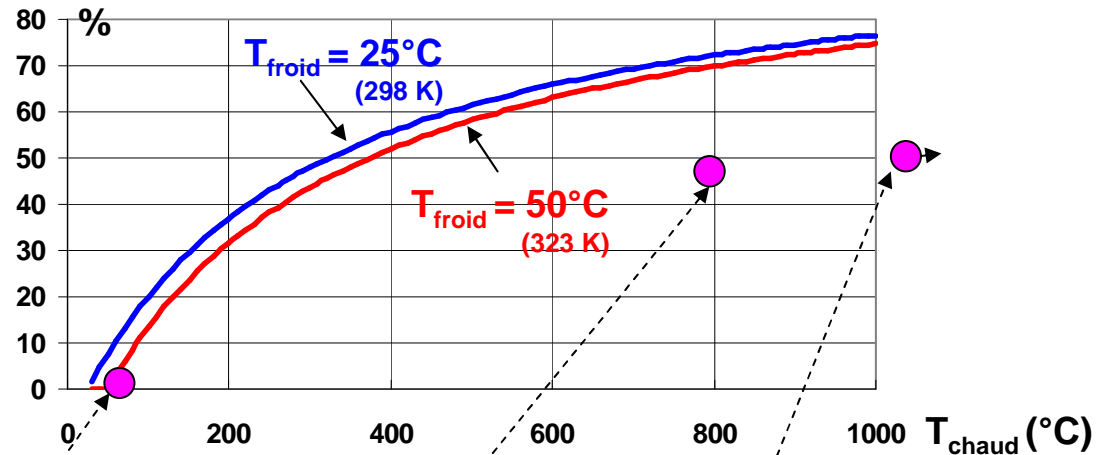
Partant d'une source de chaleur (combustion, rayonnement solaire...),  
il y a une **limite thermodynamique** (principe de **Carnot** ou 2<sup>ème</sup> principe) :

$$\eta_{\text{Carnot}} = \left[ \frac{W}{Q} \right]_{\text{Lim}} = \frac{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}$$

Travail  
Mécanique  
(Work)

Chaleur prise  
à une source

Températures (en kelvins)  
des sources chaude  
et froide (environnement)  
(T en K = T en °C + 273°C)



Le rendement des machines thermodynamiques (*moteurs à combustion, turbines à vapeur... et même les systèmes photovoltaïques et thermoélectriques*) est toujours inférieur à cette limite :



Générateur thermoélectrique



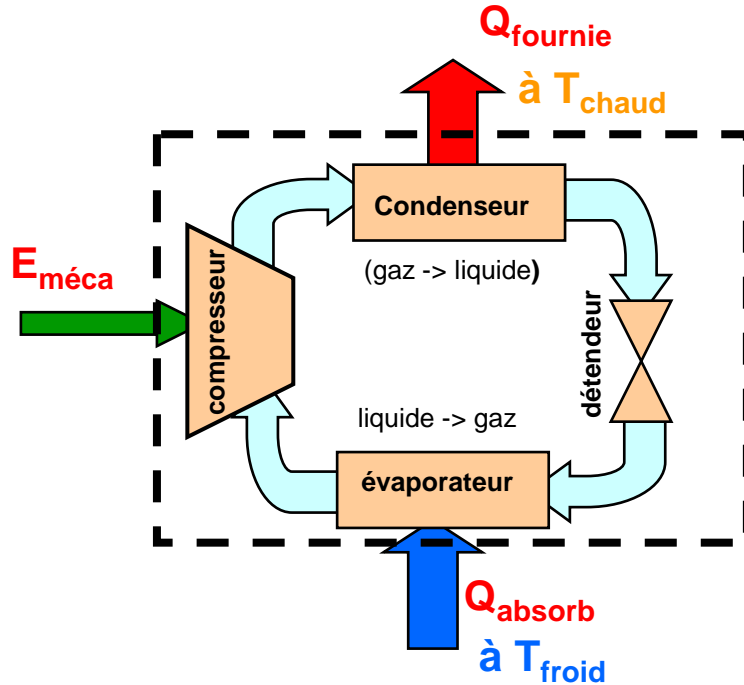
Turbine à vapeur



Moteur à explosion

# Pompes à chaleur et systèmes frigorifiques

Des machines thermodynamiques inversées



Dans le cas (précédent) de conversion de chaleur en énergie mécanique (moteur) :

$$\eta_{\text{Moteur}} = \frac{E_{\text{méca}}}{E_{\text{chaleur}}} \quad (\text{Limite Carnot: } \frac{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}})$$

**Pompe à chaleur** : récupération de chaleur dans l'environnement

COP = coefficients de performance

$$\text{COP} = \frac{E_{\text{chaud}}}{E_{\text{méca}}} = \frac{Q_{\text{fournie}}}{E_{\text{méca}}}$$

$$\text{Limite de Carnot: } \left[ \frac{T_{\text{chaud}}}{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}} \right] > 1$$

Exemple : si on puise de la chaleur dans l'air à  $5^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{froid}}$ ) pour la restituer à  $20^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{chaud}}$ ) , la limite du COP vaut 20

(COP<sub>limite</sub> = 10 si  $T_{\text{froid}} = -10^{\circ}\text{C}$ )

En pratique, le COP réel est toujours inférieur à la limite théorique.

**Production de froid** : rejet de chaleur dans l'environnement ( $T_{\text{chaud}}$ )

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{absorb}}}{E_{\text{méca}}} \quad \text{Limite de Carnot: } \left[ \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}} \right]$$

Exemple : si on rejette de la chaleur dans l'air à  $20^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{chaud}}$ ) pour obtenir du froid à  $5^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{froid}}$ ) , la limite du COP vaut 18 ( 6 si  $T_{\text{froid}} = -20^{\circ}\text{C}$  et 0,014 si  $T_{\text{froid}} = -269^{\circ}\text{C}$  )

# Rendement exergetique des systemes thermodynamique

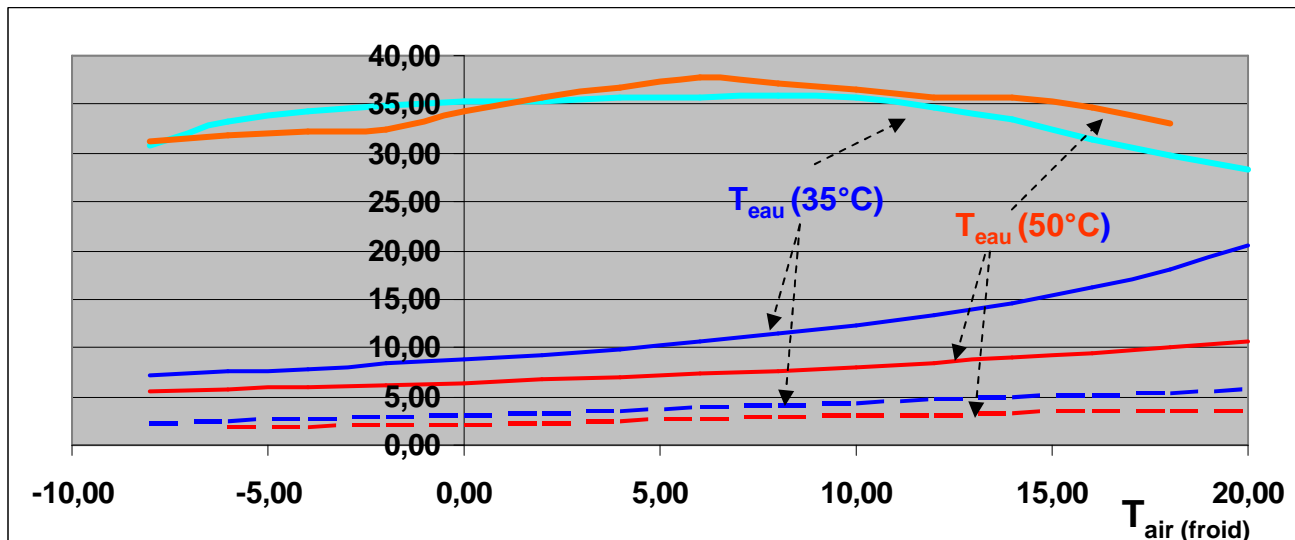
Cette notion permet de considerer le potentiel de conversion du systeme reel sur la base de la limite de Carnot, et d'evaluer ses performances techniques

Cas d'un moteur thermodynamique :  $\eta_{Ex} = \frac{\eta_{reel}}{\eta_{Carnot}} < 1$

Cas d'une pompe a chaleur ou d'un systeme de production de froid :

$$\eta_{Ex} = \frac{COP_{reel}}{COP_{Carnot}} < 1$$

Exemple : PAC Air-Eau 15 kW



Rendements exergetiques ici aux alentours de 35 %

COP<sub>Carnot</sub>

COP<sub>Reels</sub>

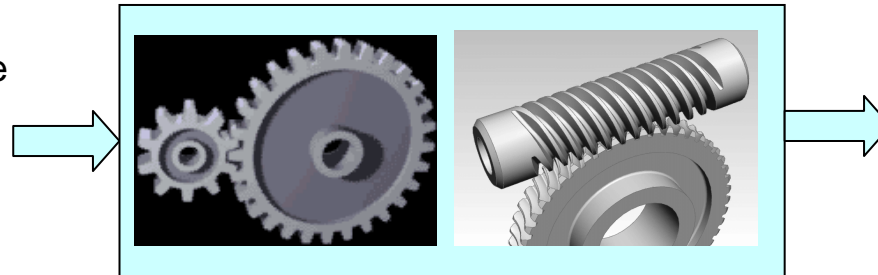
# Possibilités et limites de conversion

## Conversions mécaniques et électriques :

Pas de limite thermodynamique au sein de ces formes d'énergie  
=> possibilité de **quasi-réversibilité**

**Transmissions mécaniques**, exemple à engrenages :

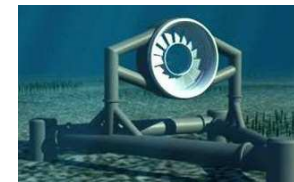
Puissance Mécanique  
(vitesse ; couple)  
 $\Omega_1 ; T_1$   
 $P_{meca1} = \Omega_1 \cdot T_1$



Puissance Mécanique  
 $\Omega_2 ; T_2$   
 $P_{meca2} = \Omega_2 \cdot T_2 \cong P_{meca1}$

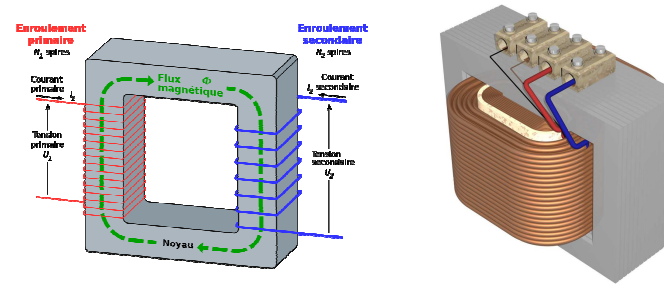
Il y a bien sûr un peu de pertes (frottements...),  
mais le rendement reste proche de 100%

Des « sources naturelles d'énergie mécanique » existent dans l'environnement :  
liées à des processus thermodynamiques (solaire) : hydraulique, éolienne...  
ou associées à la gravitation : effets de marée hydrauliques



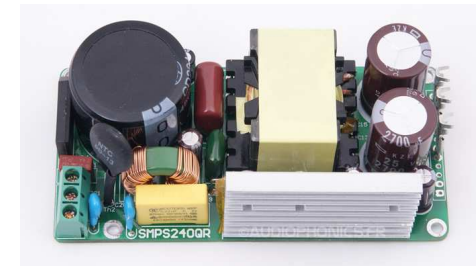
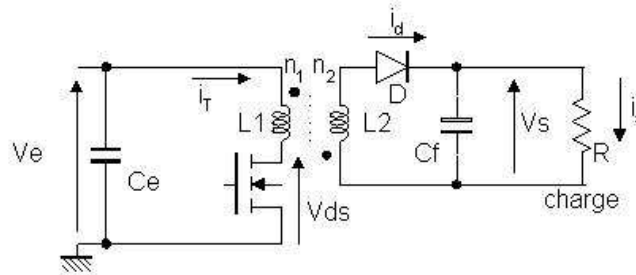
# Possibilités et limites de conversion

**Conversions électriques :**  
Électromagnétique : transformateur



(pertes : effet Joule, magnétiques...)

Conversion statique à découpage : convertisseur électronique de puissance



**Conversions électromécaniques :**  
Moteurs/générateurs électriques



Des systèmes de conversion dont les rendements peuvent tendre vers 100%



# Possibilités et limites de conversion

## « Production » de lumière visible, rendement lumineux

lm (lumen) = unité de puissance lumineuse

Le **rendement lumineux** s'exprime en **lm/W**

Sources « classiques » à incandescence ou à fluorescence

à 3000 K, 25% du rayonnement d'un corps noir est dans le domaine du visible

**Limite : 300 lumens/watt**

Quelques valeurs pour des produits commerciaux (ampoules grand public) :

Incandescence  
≅ 10 à 20 lm/W

fluorescence  
≅ 50 à 80 lm/W

luminescence  
≅ 50 à 100 lm/W

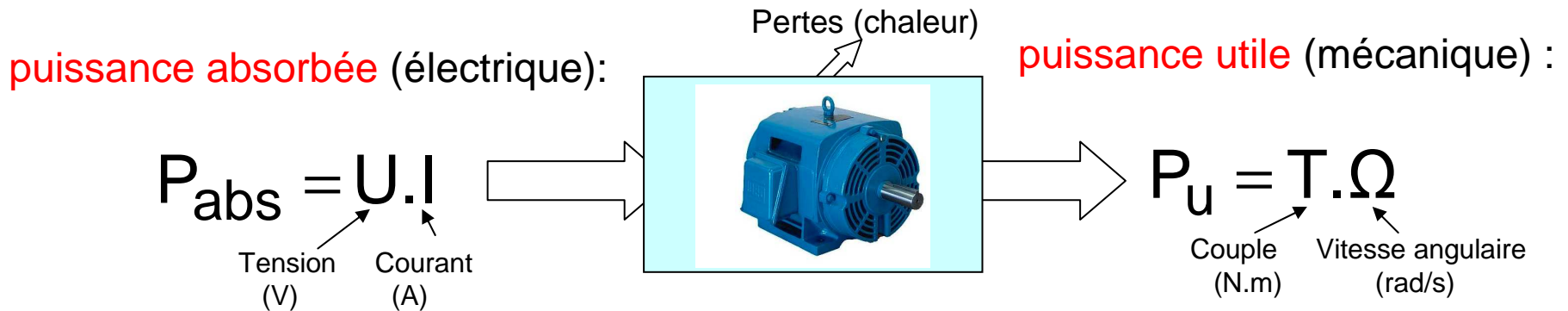


**Limites** pour la luminescence (LED) > **400 lumens/watt**

# Le rendement instantané d'un convertisseur d'énergie varie avec la puissance utile (sortie)

Raisonnement instantané (en puissance)

dans le cas d'un moteur électrique :



**Raisonnement instantané (en puissance) :**

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_u}{P_u + \text{pertes}}$$

De façon simplifiée, il y a deux familles de pertes :

- en charge : ici fonction du couple
- à vide : ici fonction de la vitesse

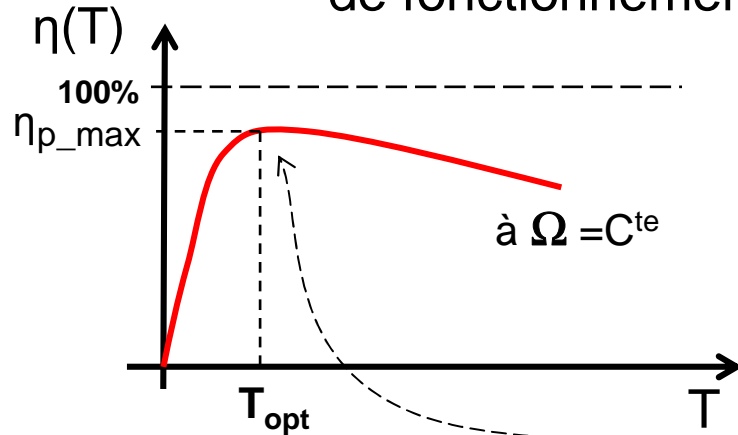
Modèle simplifié :

- pertes en charge :  $p_{ch} \cong k_1 \cdot T^2$
- pertes à vide :  $p_0 \cong k_2 \cdot \Omega^2$

**Rendement instantané :**

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_u + p_{ch} + p_0} = \frac{T \cdot \Omega}{T \cdot \Omega + k_1 \cdot T^2 + k_2 \cdot \Omega^2}$$

Le rendement d'une conversion énergétique dépend du point de fonctionnement, ici **(C, Ω)**, et il passe par un maximum (en fonction de C ou de Ω) :



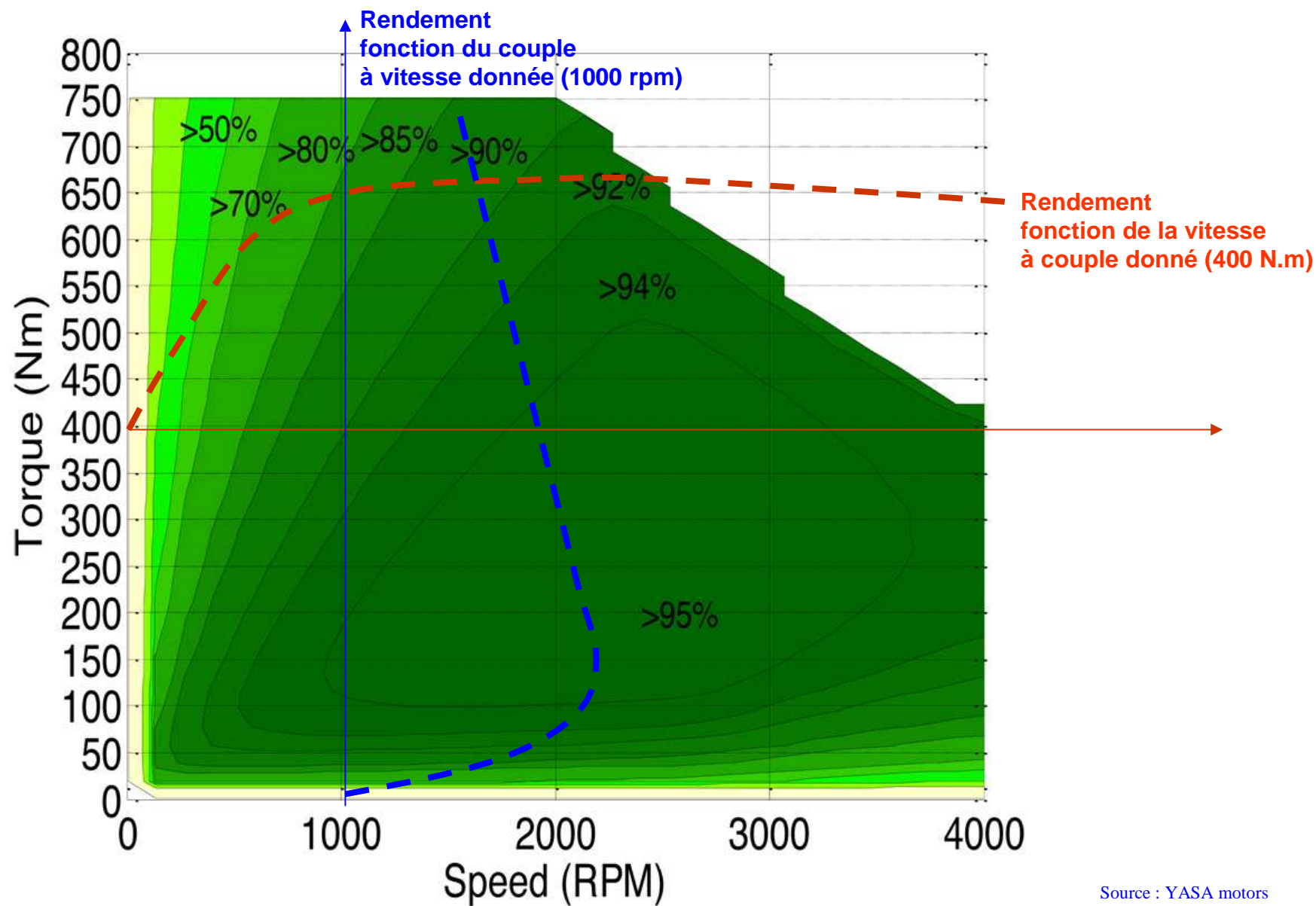
L'allure de cette courbe est représentative de tous les convertisseurs d'énergie

Sur un cycle temporel (vitesse et couple variables),  $\{T(t), \Omega(t)\}$  le **rendement énergétique** se définit sur l'ensemble du cycle :

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{abs} \cdot dt} = \frac{\int_{\text{cycle}} T(t) \cdot \Omega(t) \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} \frac{T(t) \cdot \Omega(t)}{\eta_p(T, \Omega)} \cdot dt}$$

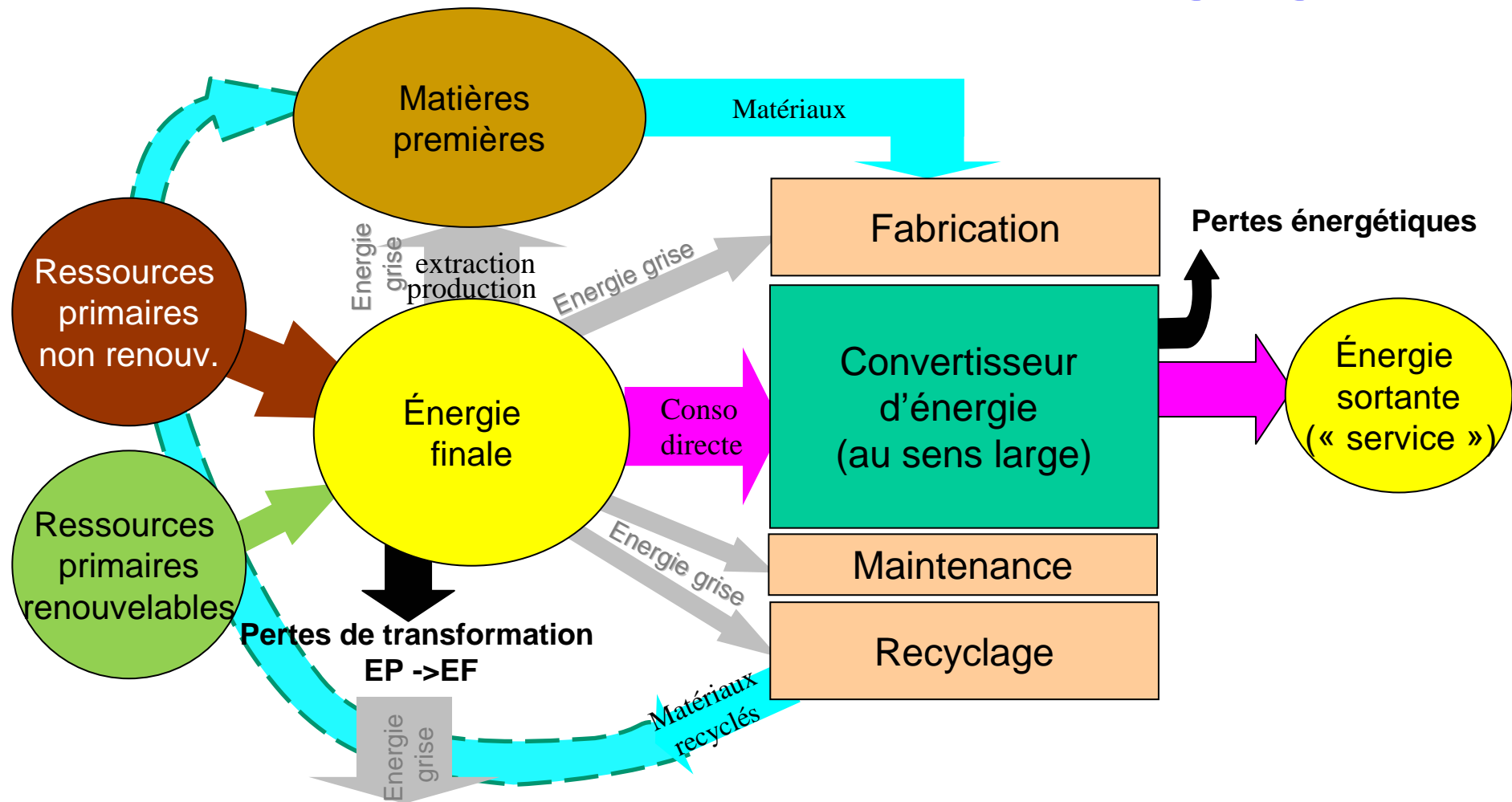
$$\eta_e \leq \eta_{p\_max}$$

# Exemple de cartographie de rendement d'un moteur électrique réel :



Source : YASA motors

# Considération du cycle de vie complet pour rendre un service : prise en compte de l'énergie grise

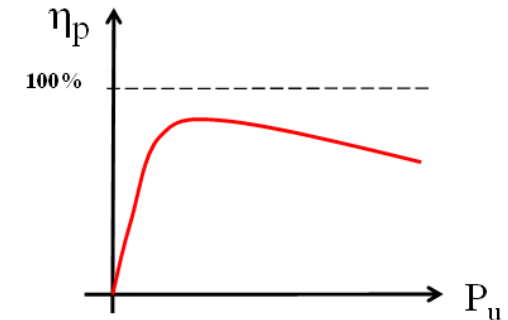


En termes de soutenabilité, ce qui compte in fine, c'est la quantité d'énergie primaire non renouvelable consommée sur la vie du convertisseur pour réaliser le service attendu.

# Rendements d'un convertisseur d'énergie

1- Rendement en puissance ou instantané :  
(sur un point de fonctionnement particulier)

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_{\text{cons}}}$$



2- Rendement énergétique ou sur cycle :  
(sur un cycle de fonctionnement correspondant à un service)

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{\text{cons}} \cdot dt} = \frac{E_u}{E_{\text{cons}}} = \frac{E_u}{E_u + E_{\text{loss}}}$$

Le COP, par exemple pour les pompes à chaleur,  
est également concerné par les notions instantanée et énergétique.

# Différents niveaux de rendement d'un convertisseur d'énergie

## 3- Rendement sur cycle de vie

(notion hélas non encore diffusée dans le domaine de l'efficacité énergétique):

(incluant l'énergie grise  
*embodied energy*)

$$\eta_{LCA} = \frac{E_{u\_life}}{E_{u\_life} + (E_{losses\_life\_p} + E_{embod\_p})}$$

Ramenées en énergie primaire

(contenue dans l'énergie grise et dans les pertes d'énergie finale à travers son mode de production)

## 4- Rendement sur cycle de vie soutenable :

(ne comptabilisant que la consommation  
de ressources primaires non renouvelables)

$$\eta_{LCA\_sust} = \frac{E_{u\_life}}{E_{u\_life} + (E_{losses\_life\_p} + E_{embod\_p})_{NR}}$$

Part non renouvelable de l'énergie primaire  
(énergie grise et pertes d'énergie finale)

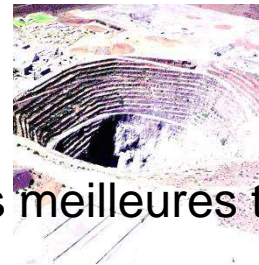
# Application du rendement sur cycle de vie aux systèmes de production d'électricité

**Nucléaire** : réacteur de 1 GW sur une durée de vie de 40 ans

Productivité : 280 TWh<sub>e</sub> (7 TWh<sub>e</sub>/an)

Consommation d'uranium naturel : 7800 tonnes (195 tonnes/an)

Extraction minière de l'uranium : 0,58 TWh<sub>p</sub>



Transformation en combustible fissile (avec les meilleures techno) : 5,1 TWh<sub>p</sub>



Construction et démantèlement : 9,3 TWh<sub>p</sub>

Stockage déchets : 0,43 TWh<sub>p</sub>

Rendement en puissance de conversion chaleur – électricité : 33%

Rendement sur cycle de vie : 
$$\eta_{lca\_sust} = \frac{280}{280 + (560 + 15,4)} = 32,7\%$$



# Application du rendement sur cycle de vie aux systèmes de production d'électricité

## Phovoltaïque : installations en toiture

(pas d'occupation de superficies supplémentaires)



Pour produire **7 TWh<sub>e</sub> par an** avec un rayonnement de **1000 kWh/m<sup>2</sup>/an**

Avec une technologie au silicium polycristallin (rendement de 14%),  
il faut : 50 TWh<sub>p</sub>, soit 50 km<sup>2</sup> (en France, 8500 km<sup>2</sup> de superficie bâtie)

Fabrication des modules : 1000 kWh<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> soit **50 TWh<sub>p</sub>**



Montage en toiture + onduleur : 120 kWh<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> soit **6 TWh<sub>p</sub>**



Rendement de conversion rayonnement solaire – électricité : **14%**

Rendement sur cycle de vie  
pour 20 ans de production :

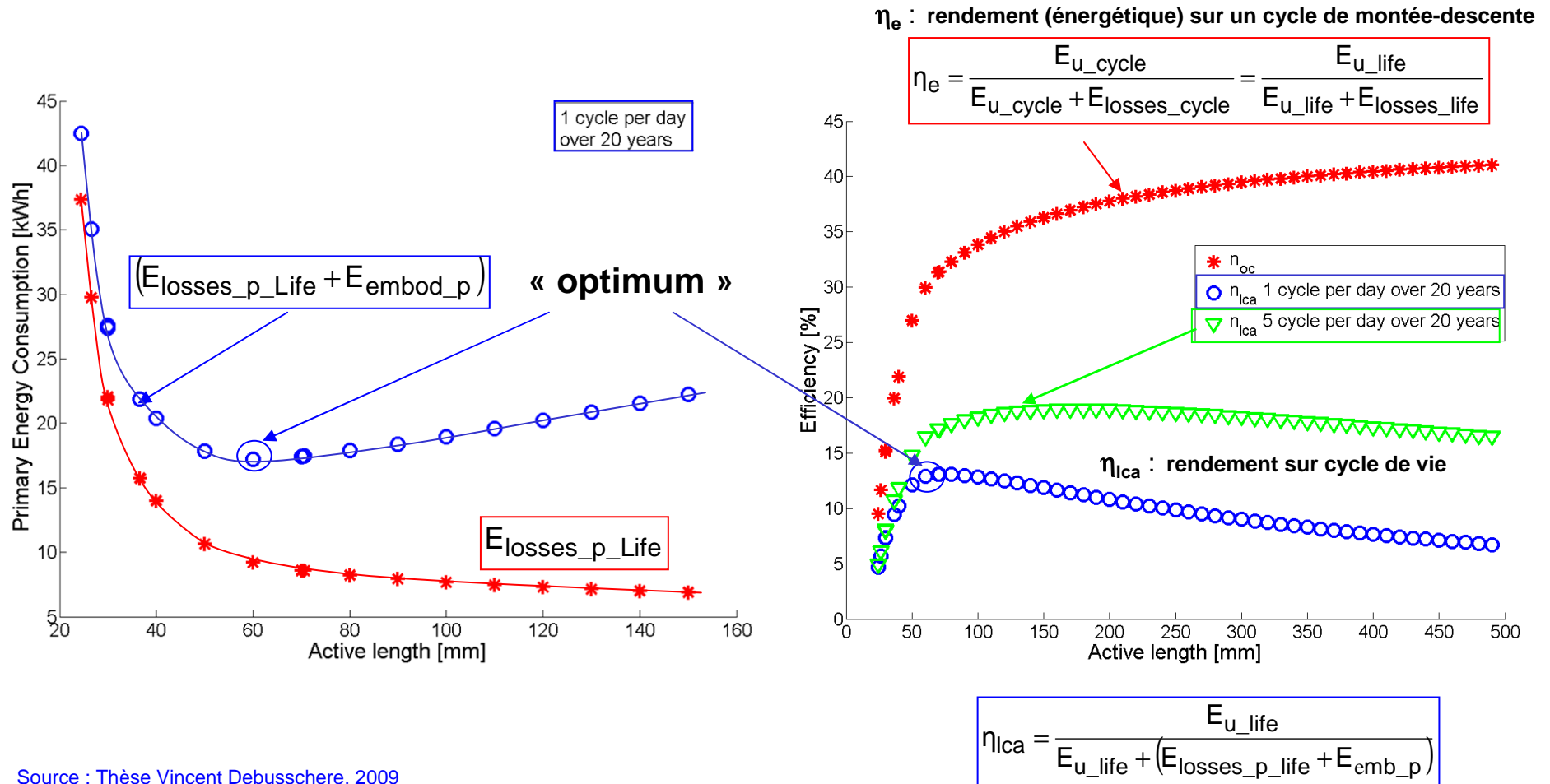
$$\eta_{lca\_sust} = \frac{7 \times 20}{7 \times 20 + (50 + 6)} = 71,4\%$$

83,3% ( $E_{emb}=28$  TWh)  
sur un site avec  
2000 kWh/m<sup>2</sup>/an

Source : *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*  
Report IEA-PVPS T12-02:2011

# Application à un moteur de volet roulant (exemple à faible durée d'usage sur sa vie)

Dans un moteur électrique, augmenter la quantité de matières actives (cuivre, fer) permet de réduire les pertes.



Source : Thèse Vincent Debusschere, 2009

**Introduction**

**Énergie et puissance**

**Conversions, rendements**

**Procédés et leur efficacité énergétiques**

**Conclusion**

# Du convertisseur d'énergie au système énergétique et à son usage

## Cas de l'éclairage :

Technologie de la source de lumière caractérisée par son rendement lumineux en **lumens/watt** :



De la source au luminaire :



Ce qui compte : l'éclairement (flux lumineux reçu) en **lux** ( $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$ ),  
il décroît avec le carré de la distance et dépend fortement du luminaire...

## Le cas de l'éclairage (suite) :

L'éclairage intérieur : ambiance, travail... des puissances requises différentes, des attentes très variables

**Solution « Versailles » !**



**Sources optimisées**



**Exploitation des apports naturels...**



L'éclairage extérieur nocturne,

des technologies de luminaires à l'efficacité très variable



Le lampadaire boule :  
Faible efficacité : 25% de la lumière utile  
Forte pollution lumineuse

Lampadaires  
efficaces



+ allumage commandé par le besoin ou puissance ajustable.

Les comportements et la technologie (détecteurs de présence, régulation...) offrent des perspectives d'importante réduction de consommation

**Ici, l'efficacité se mesure en kWh<sub>annuels</sub> par m<sup>2</sup> habitables ou par mètre de rue...**

# L'exemple de l'éclairage peut se transposer à tous les services énergétiques :

## Le chauffage/climatisation :

Efficacité du système de chauffage, isolation des locaux,  
apports naturels, usages et exigences des occupants...



## Les transports de personnes :

Efficacité de la chaîne de propulsion,  
le moyen de transport (individuel, collectif, sa taille etc...)  
la vitesse de déplacement, les usages...



## L'ordinateur personnel :

Consommation de l'ordinateur (portable vs PC de bureau, tablette...),  
le choix de la puissance de la machine et ses périphériques,  
l'utilisation des modes économies, l'arrêt du PC...



# Les moteurs électriques : exemple de classes énergétiques

Moteurs asynchrones à cage (norme CEI 60034-30, 2009) :

IE1 – Standard

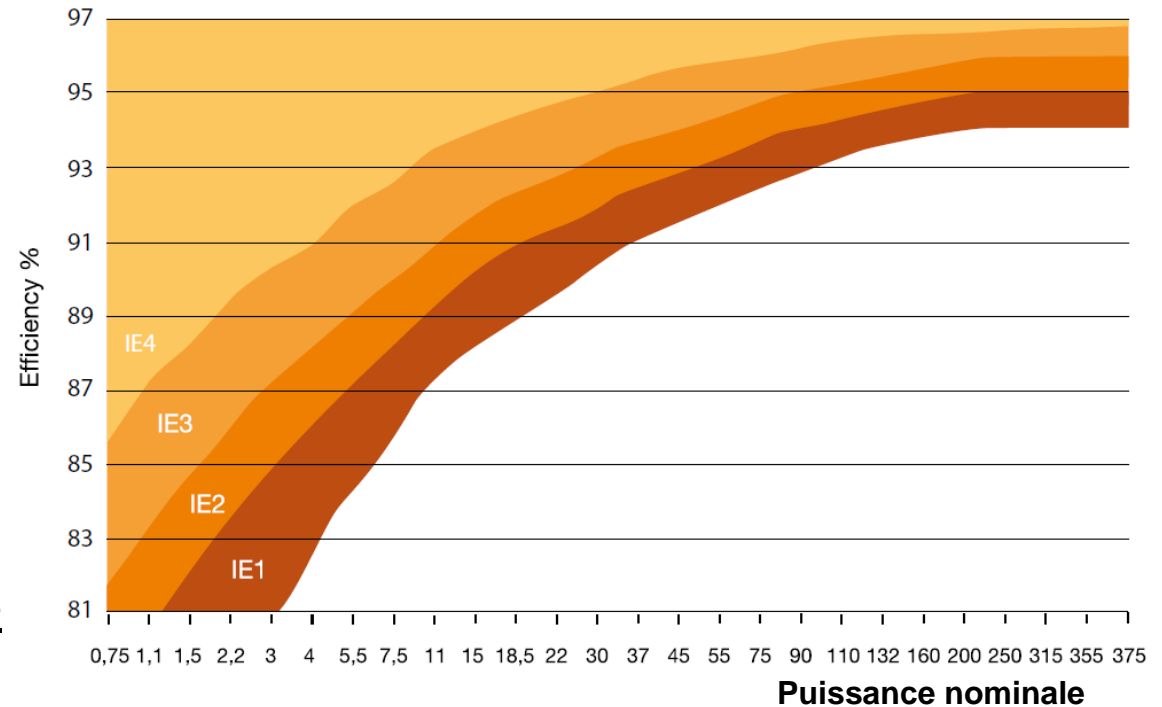
IE2 – High

IE3 – Premium

IE4 – Super premium  
(depuis 2010)

**Exemple** (moteurs 4 pôles) :

**Attention :**  
ne concerne que le rendement  
à la puissance nominale



Amélioration du rendement :

- Qualité des matériaux
- Quantité de matériaux
- Qualité des échanges thermiques

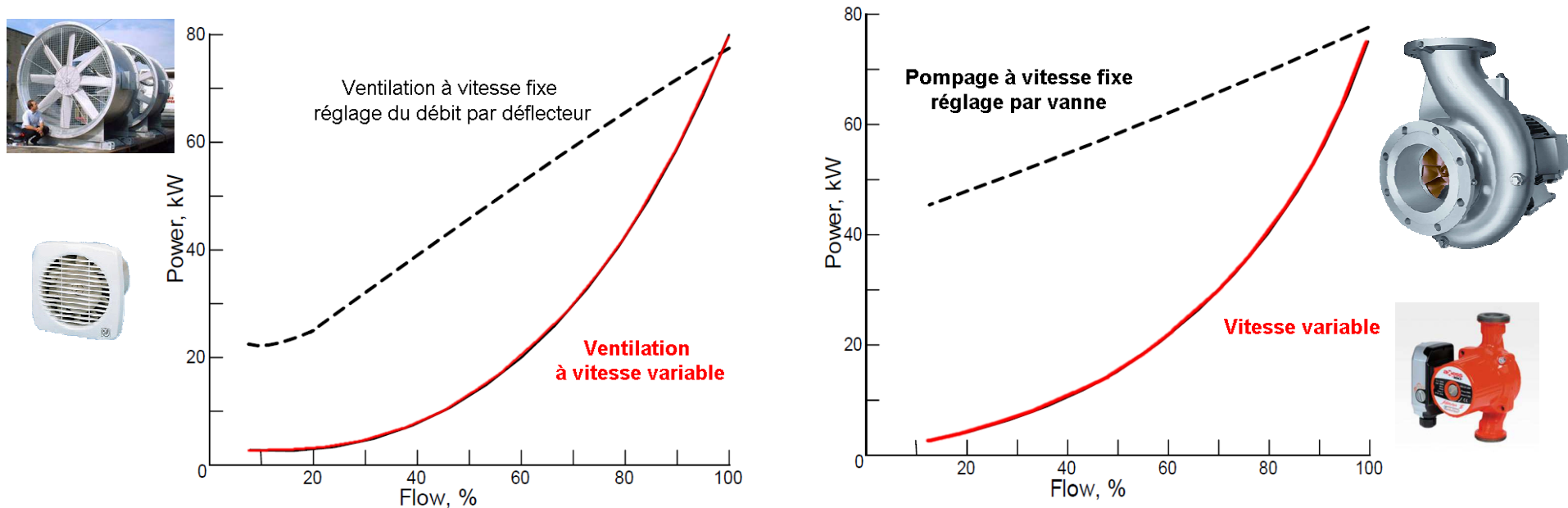
Les machines à aimants permettent encore d'améliorer les rendements, surtout en petite puissance.

# Entraînements électromécaniques : amélioration à l'échelle système

Le **principal gain d'efficacité** énergétique dans les systèmes entraînés par des moteurs électriques se trouve généralement dans les process.

La **vitesse variable** y joue un facteur majeur d'amélioration.

En pompage, ventilation, compression :



Et tout ceci est également vrai en génération d'énergie  
(éolien, machines thermiques...)



# Les variateurs de vitesse électroniques

Applicables à tous les domaines : industrie, bâtiments, distribution d'eau, propulsion... du watt à la centaine de MW

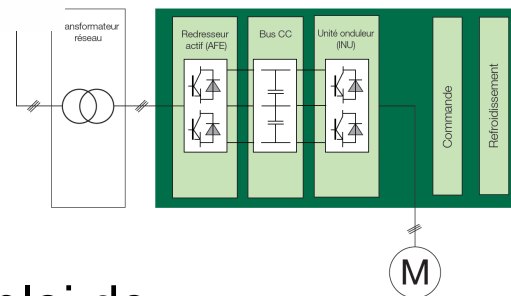


Gamme Altivar 31 Schneider (0,18 à 15 kW)

ACS 2000 (800kW/6,6kV)  
pour fonctionnement avec  
transformateur externe



Gamme ACS 2000 ABB (250 kW à 1,6 MW)



D'une façon générale, l'emploi de **convertisseurs électroniques de puissance** permet d'améliorer considérablement l'efficacité des processus énergétiques électriques

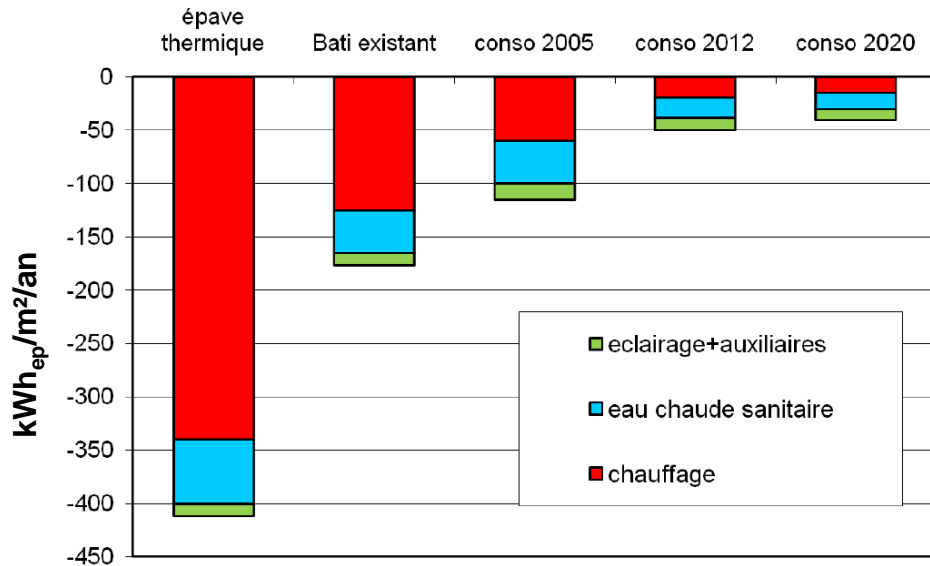
# Les bâtiments : des systèmes complexes

Les consommations normalisées (chauffage, ECS, ventilation et éclairage)

s'expriment en  $\text{kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$

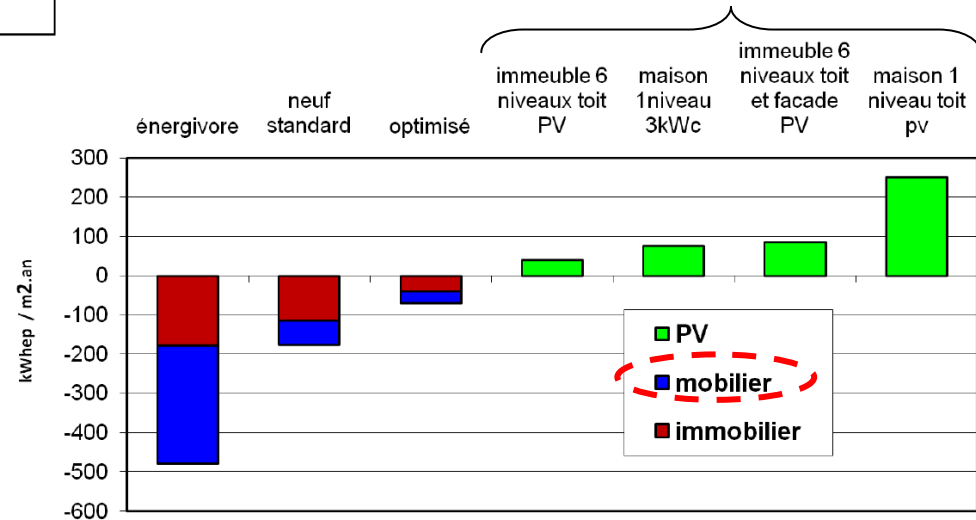
(hors énergie grise)

= kWh énergie primaire  
prend en compte le rendement  
de conversion énergie primaire  
non renouvelable en énergie finale



Source : J.C. Visier (CSTB)

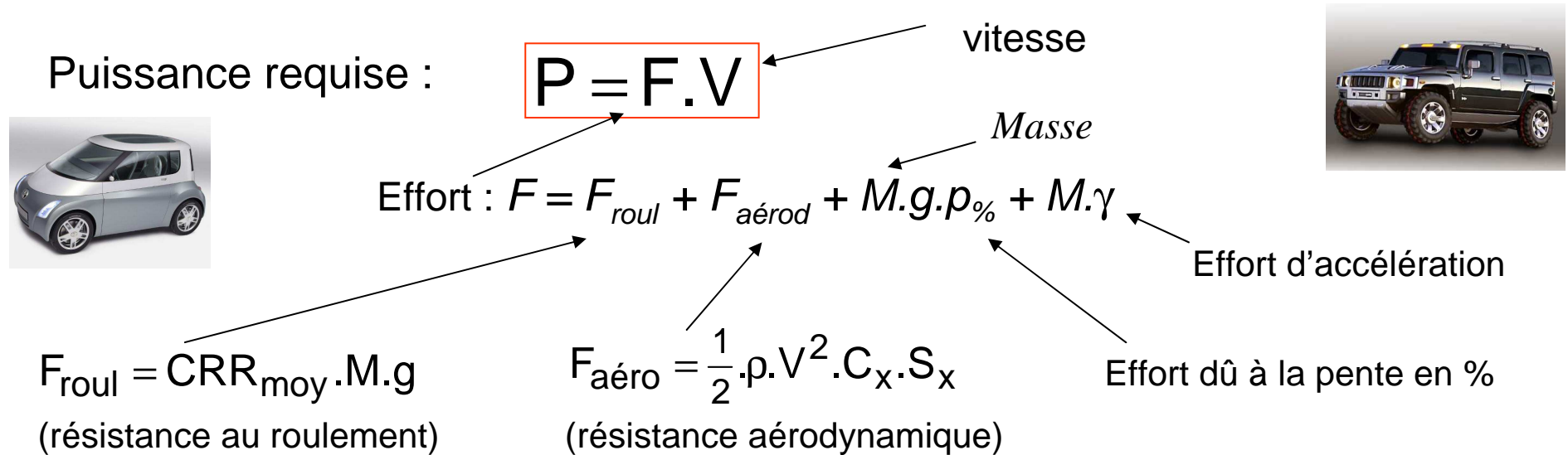
Consommation du « mobilier »  
(cuisson, « électricité spécifique »)  
non négligeable surtout si le  
bâtiment est performant :



Source : J.C. Visier (CSTB)

L'énergie grise (sur 50 ans) peut représenter de 20 à 100 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>/an

# Automobiles : influence de la masse roulante



En cycle urbain (vitesses faibles) :  $F \propto M$  et  $P \propto M \cdot V$  + effet important des accélérations...

=> Importance majeure de la masse (totale) sur la puissance requise

En cycle routiers (si  $S_x = k \cdot M^{2/3}$ ) :  $F \propto M^a$  avec  $\frac{2}{3} < a < 1$   
et :  $P \propto K \cdot M^a \cdot V^3$

# Automobiles : influence de la vitesse

A vitesse élevée (résistance aérodynamique dominante) :  $P \approx K.M^a.V^3$

Raisonnement à vitesse et rendement constants (22%) :

$$P \propto V^3$$

à 90 km/h :  $P_{\text{roues}} = 10 \text{ kW}$     5 litres/h  
à 130 km/h :  $P_{\text{roues}} = 30 \text{ kW}$     15 litres/h

Mais si l'on va plus vite, le trajet dure moins longtemps : conso en litres/100 km ?!

$$W \propto P.T \propto V^3.V^{-1} \propto V^2$$

5 litres/h  $\Rightarrow$  5,5 litres/100 km  
15 litres/h  $\Rightarrow$  11,5 litres/100 km

Mais comme les moteurs sont surdimensionnés,  
leur rendement s'améliore un peu à puissance élevée...

Pour un moteur de 77 kW (moyenne actuelle) :

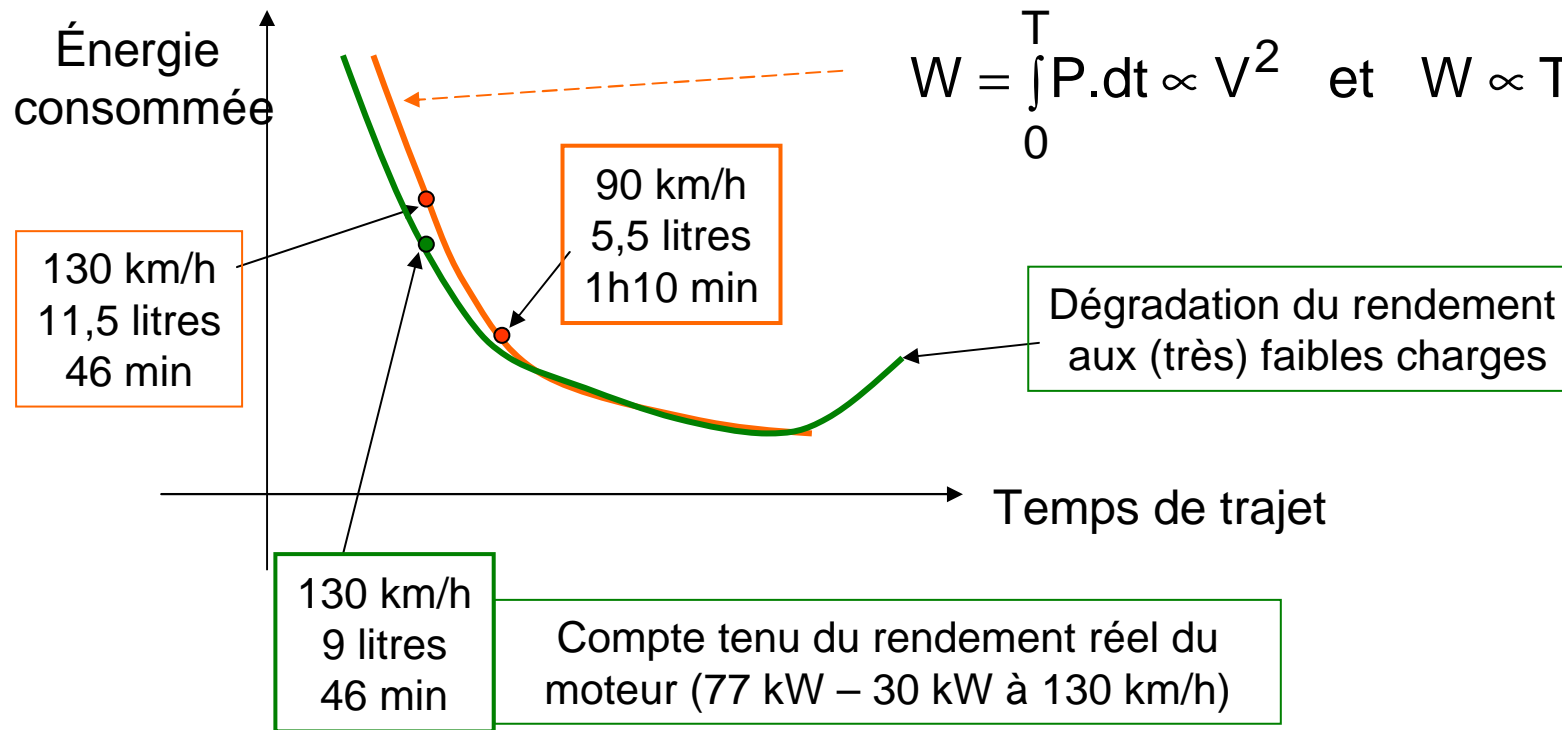
à 10 kW : 22%  $\Rightarrow$  5,5 litres/100 km

à 30 kW : 28%  $\Rightarrow$  9 litres/100 km

# Relation temps de trajet et consommation d'énergie

Sur cycle routier à vitesse constante :  $P \propto V^3$  et  $T \propto V^{-1}$

$$W = \int_0^T P \cdot dt \propto V^2 \quad \text{et} \quad W \propto T^{-2}$$



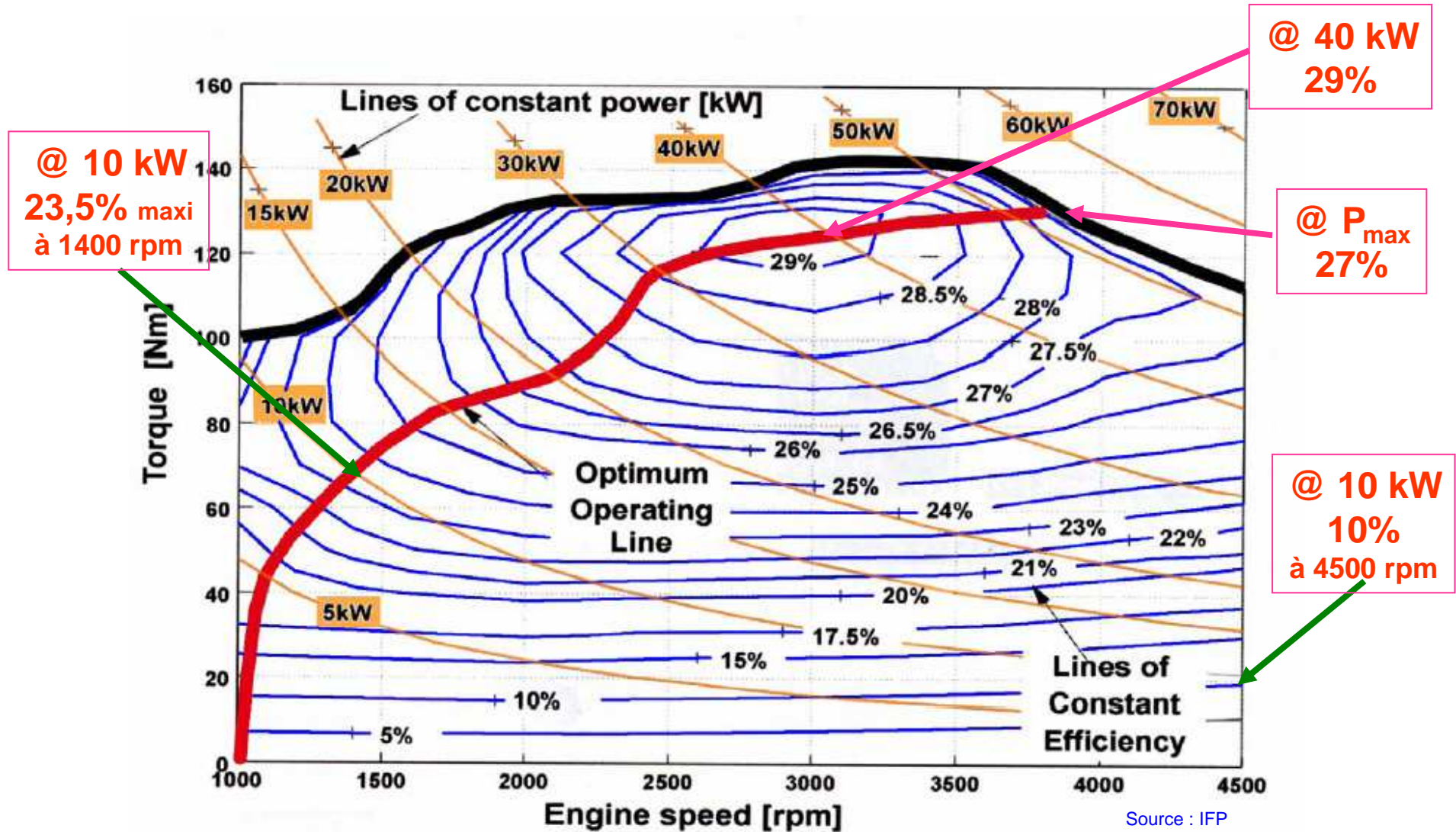
Cela vaut-il la peine de brûler 63% de carburant en plus (9 L au lieu de 5,5 L) pour gagner 24 minutes (70 min au lieu de 46 min) sur 100 km ?

10 000 km : à 130 km/h  $\Leftrightarrow$  2 tonnes  $CO_2$  et à 90 km/h  $\Leftrightarrow$  1,2 tonnes  $CO_2$

Avec un moteur plus petit, le gain serait encore supérieur.

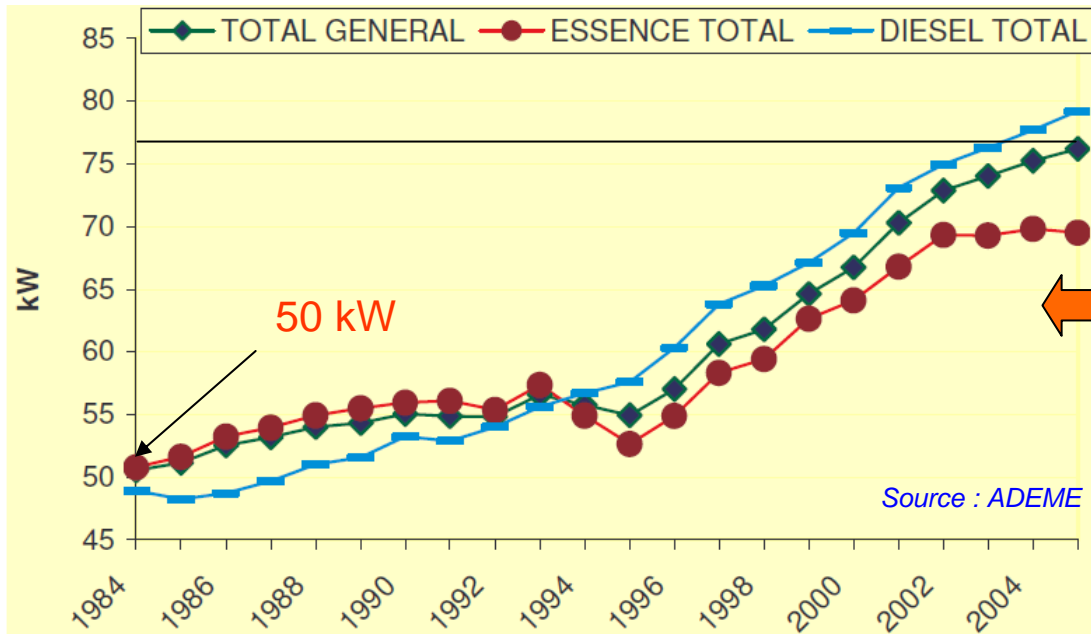
# Rendement d'un moteur à essence (53 kW – 72 cv)

## Isorendements dans le plan couple - vitesse



Power and efficiency lines of the combined system of engine and generator

# Evolution 1984-2006 du parc automobile français



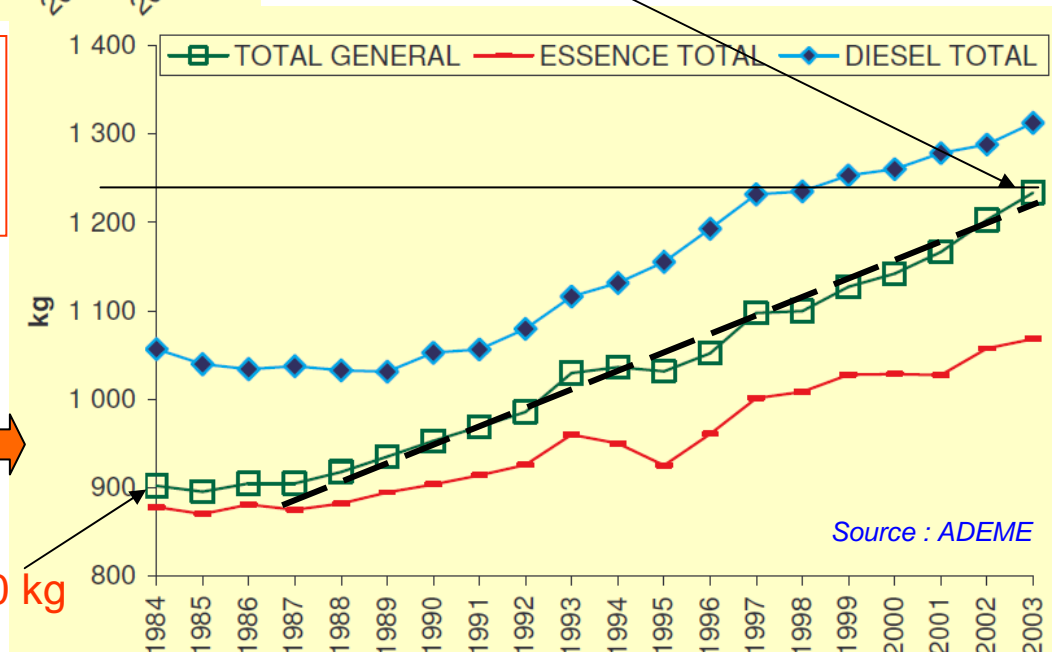
Puissance moyenne des moteurs des automobiles commercialisées

Moteur précédent, à 90 km/h :  $P_u = 14 \text{ kW}$   
 Si  $P_n = 77 \text{ kW}$  ( $P_u/P_n = 18\%$ ) :  $\eta \cong 23\%$   
 Si  $P_n = 53 \text{ kW}$  ( $P_u/P_n = 25\%$ ) :  $\eta \cong 28\%$  **conso + 22%**

**Les moteurs surdimensionnés surconsomment**

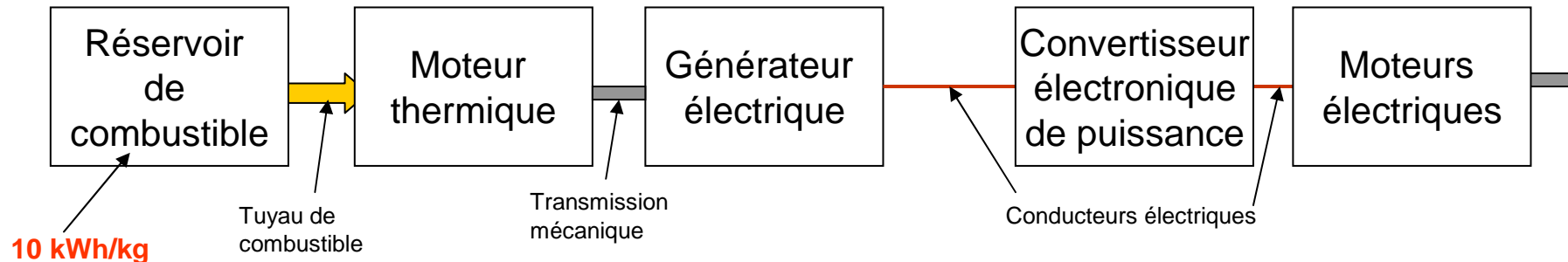
Masse moyenne des automobiles

**Les gains de performances des moteurs sont partiellement effacés par l'accroissement de masse**



# Electrification de la propulsion

Largement utilisée dans les domaines ferroviaire et naval,  
à des niveaux élevés de puissance : 100 kW à 20 MW



Permet, malgré une cascade de convertisseurs « sources de pertes »,  
d'améliorer le rendement global grâce à l'optimisation  
du régime de rotation du moteur thermique

Cette solution est dite **hybride série**, il existe d'autres architectures :  
parallèle, série/parallèle (Prius)

En embarquant un moyen de stockage électrique de faible capacité,  
on peut encore mieux améliorer le bilan  
(récupération d'énergie cinétique, etc...)



# Electrification de la propulsion (suite)

Si la capacité de stockage du système hybride est sensiblement accrue, on peut recharger à l'arrêt et profiter une électricité « plus propre »

⇒ Véhicule hybride rechargeable  
(quelques 10 km d'autonomie électrique, zéro émissions locales)

## Véhicules électriques :

- à **batteries** (environ 100 Wh/kg,  
à comparer avec les 10 kWh/kg d'un hydrocarbure liquide)
- à **pile à combustible** : groupe électrogène statique  
fonctionnant à l'hydrogène  
+ réservoir d'hydrogène  
(environ 1 kWh/kg, mais rendement chaîne 40%)

Le bilan énergétique global nécessite de prendre en compte :

- la production d'électricité
- ou celle d'hydrogène

Et de considérer le cycle de vie complet du véhicule,  
coûts énergétiques, durée de vie des composants...

# Emissions de CO<sub>2eq</sub> associées aux véhicules électriques à batteries

Elles dépendent fondamentalement du mix énergétique  
de production électrique au moment de la recharge

$$N \text{ gCO}_2/\text{km} = X \text{ gCO}_2/\text{kWh}_e \times Y \text{ kWh}_e/\text{km} \Rightarrow 18 \rightarrow 80 \rightarrow 140 \text{ gCO}_2/\text{km}$$

Emissions de GES

Rejets production d'électricité

consommation électrique du véhicule

Un (petit) véhicule électrique consomme environ **0,2 kWh/km** (avec auxiliaires)

1 kWh électrique en France : 90 g/kWh<sub>e</sub>  
en Europe : 400 g/kWh<sub>e</sub>      **en moyenne...**  
au monde : 720 g/kWh<sub>e</sub>

Avec de l'électricité au charbon (1 kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>) => 200 gCO<sub>2</sub>/km



Renault Zoé

Le véhicule électrique peut réduire  
les émissions globale à condition  
de le recharger avec  
une électricité peu polluante

# Rouler à l'énergie solaire photovoltaïque ?



Consommation d'un véhicule électrique :

- Citadine en cycle urbain : 150 Wh/km
- Prius rechargeable : 200 Wh/km

Une place de parking : 12 m<sup>2</sup>  
avec des modules de 180 W<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>,  
et 1000 h<sub>epp</sub>/an (epp = équivalent pleine puissance)

=> **2200 kWh/an**



Soit : 11 000 à 15 000 km/an  
parcourus à l'énergie solaire

Rejets de CO<sub>2</sub> :

Fabrication du système PV :

1700 kg CO<sub>2</sub> par kW<sub>c</sub> installé,  
pour une durée de vie de 20 ans

Des trajets avec **6 à 8 gCO<sub>2</sub>/km**

Source images : auteur (Le Bourget du Lac, Institut Energie Solaire)

La production solaire ne doit pas être nécessairement sur le parking...

**Introduction**

**Énergie et puissance**

**Conversions, rendements**

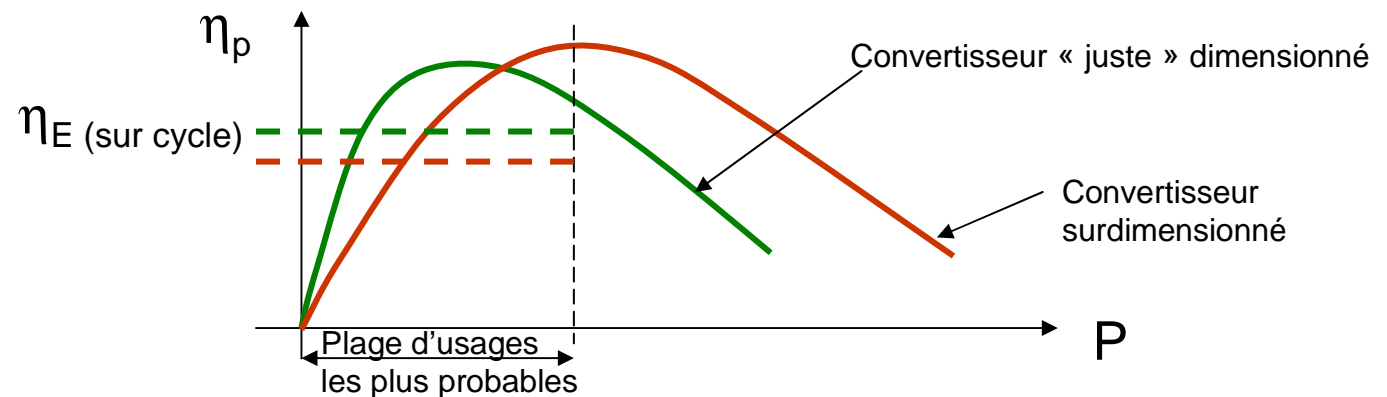
**Procédés et leur efficacité énergétiques**

**Conclusion**

# Quelques règles

## Juste dimensionnement des convertisseurs :

L'usage de convertisseurs surdimensionnés conduit à des rendements sur cycle plus faibles



Ceci vaut pour tous les convertisseurs : moteurs dans les transports, alimentations électriques, chaudières, production industrielle, éclairage...

Et en plus, on économise des matières premières et donc de l'énergie grise !

## Juste dimensionnement des systèmes énergétiques :

- moyens de transport (seul dans un gros véhicule...)
- électroménager (gros réfrigérateur, lave-linge 8 kg...)
- logement...

Volet sociologique complexe...

# Conclusion

Un **énorme potentiel d'efficacité** :

amélioration des technologies (matériaux, concepts...) dans tous les domaines

Mais plus les performances deviennent élevées,

plus il est **nécessaire d'inclure des approches sur cycle de vie...**

La durée de vie doit elle-même être optimisée,

notamment en fonction du potentiel d'améliorations technologiques

Et encore d'importantes possibilités d'économies grâce à la **sobriété**

(organisation de société, urbanisme, législation, comportements individuels...)

**In fine, le plus important est de réduire la consommation  
de ressources primaires non renouvelables  
sur tout le cycle de vie**

**Dans ce contexte, l'optimum économique et environnemental :**  
mieux optimiser les usages des matières premières  
non énergétiques et recyclables

# Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) : <http://www.ademe.fr>

Cabinet SIDLER - Société ENERTECH : <http://www.enertech.fr/>

Leonardo Energy : <http://www.leonardo-energy.org/>

Ministère de l'écologie et du DD : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

## Questions ?



# Quelques valeurs d'énergie grise (embodied energy)

## Acier

Primaire (pas recyclé) :	8,3 kWh/kg
Acier secondaire (100% recyclé) :	4,1 kWh/kg
Acier européen 47% recyclé :	6,4 kWh/kg
Acier inoxydable (13% chrome) Europe :	9,7 kWh/kg

<b>Cuivre</b> Primaire :	27 kWh/kg
<b>Magnésium</b> :	54 kWh/kg
<b>Plomb</b> :	5 kWh/kg

## Aluminium

Primaire (0% recyclé) :	44,7 kWh/kg
Secondaire (100% recyclé) :	5 kWh/kg
Européen : 30% recyclé :	33 kWh/kg
Profilé alu Europe :	34 à 37 kWh/kg

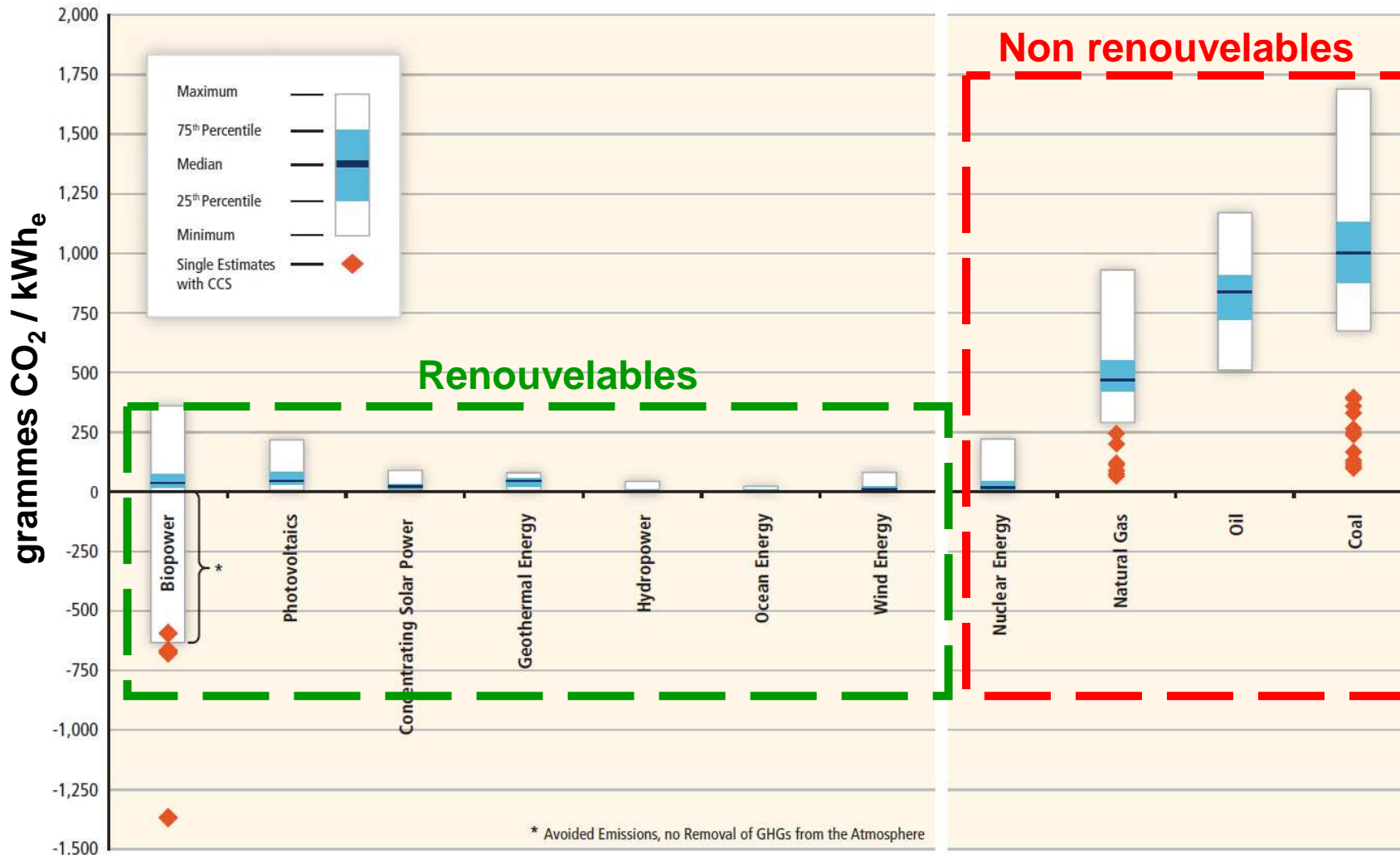
**Thermoplastiques** : 7,8 (polypropylène) à 25 kWh/kg (PMMA Poly méthacrylate de métyle)  
**Thermodurcissables** (résines) : 17 (mélamine) à 27 kWh/kg (phénoplaste époxy)

**Verre** : 3 (alimentaire ou recyclé 99%) à 3,9 kWh/kg (verre alimentaire blanc)  
**Bois massif** : 1,2 kWh/kg  
**Panneaux agglomérés** : 5 kWh/kg  
**Panneaux de particules** : 2,2 kWh/kg

**Attention, ces valeurs sont des ordres de grandeur,  
variables selon les zones géographiques, les procédés...**



# Bilan des émissions de GES sur cycle de vie dues à la production d'électricité



Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011  
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development