6ème Ecole Energies & Recherches
Roscoff 23-28 mars 2014

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

Bernard MULTON
Ecole normale supérieure de Rennes
Laboratoire SATIE - CNRS

Source dessin : Actu-Environnement.com, © Sven

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
- éclairement en lumens (lux.m²)
- chauffage : m² 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 dénomminations 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

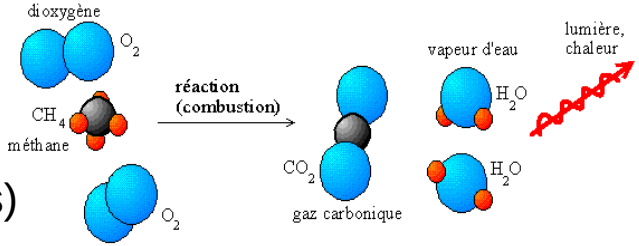
Conversions, rendements

Procédés et leur efficacité énergétique

Conclusion

Energie : quelques exemples de conversions

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



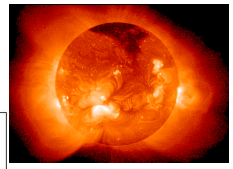
Wikimedia commons

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

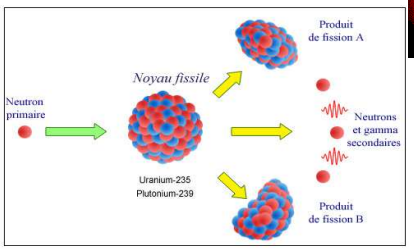
$$E = m.c^2$$

0,001 kg *c = 3 10^8m/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

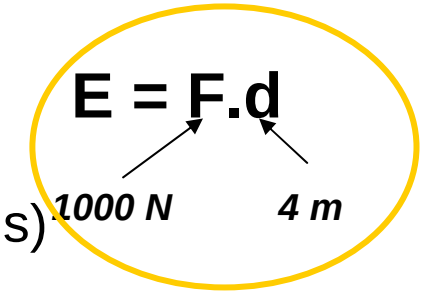
$$E = c.M.\Delta T$$

4180 J/kg/°C *1 kg* *1 °C*

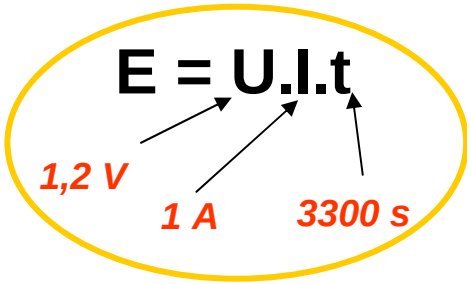
Exemples (suite)

Rayonnement électromagnétique : sous un flux solaire terrestre « normal » (1 kW/m²), une surface noire de 4 m² 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/s², opposant une force résistante de 1000 N (newtons)



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



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

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

Particules : électron-volt **eV** : 1 eV = 1,6 10^{-19} 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 kWh** = 3600 000 J = **3,6 MJ**

térawattheure ***TWh :*** 1 TWh = 10^{12} Wh = 10^{9} **k**Wh)

tonne équivalent pétrole ***tep*** **:** 1 tep ≅ 11 600 kWh

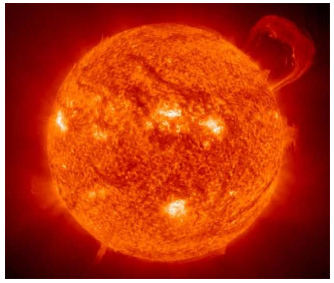
Quelques équivalences :

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

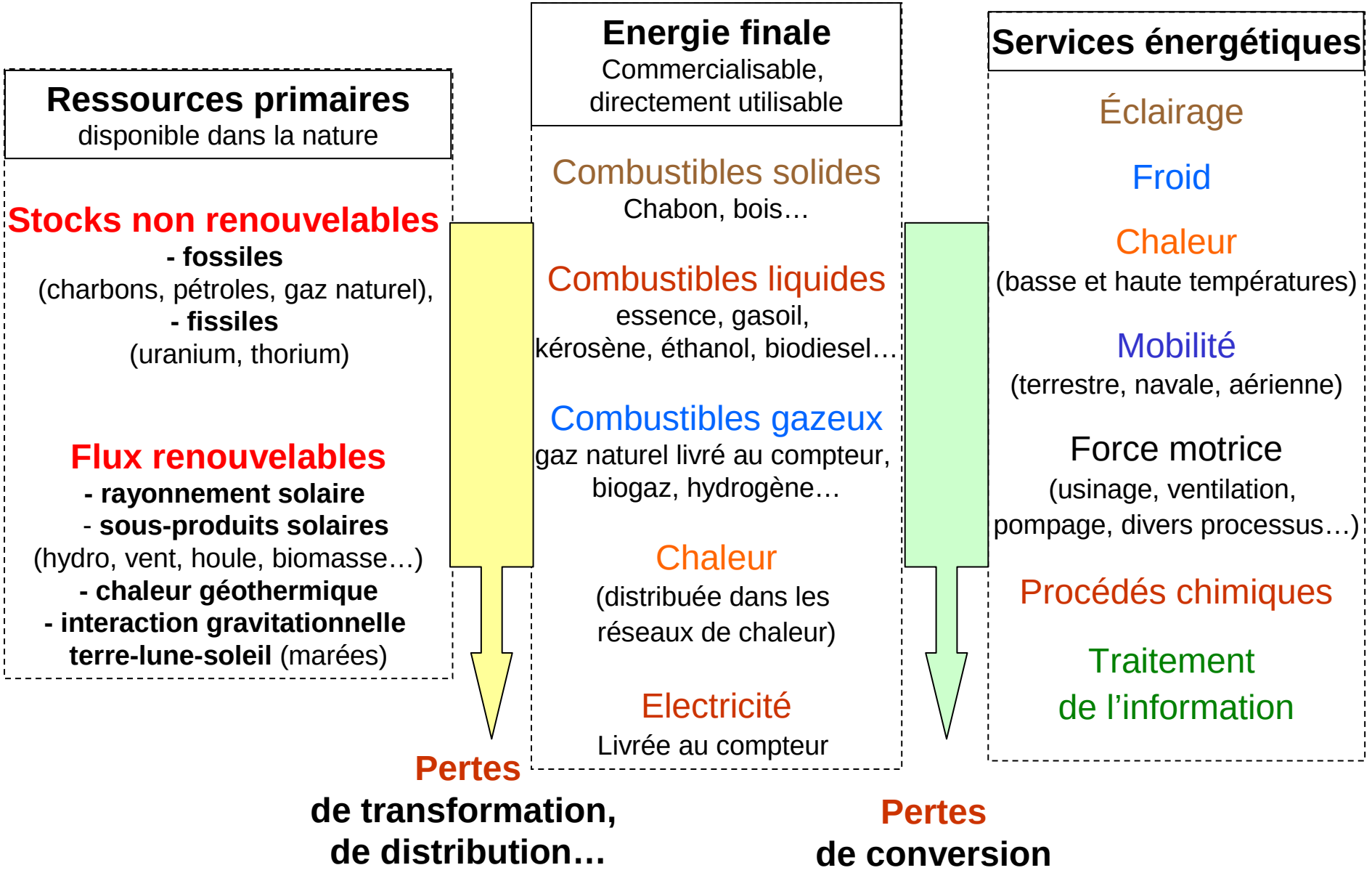
=> biomasse, hydrocarbures fossiles (Stocks)

Combustion (réaction chimique) => chaleur

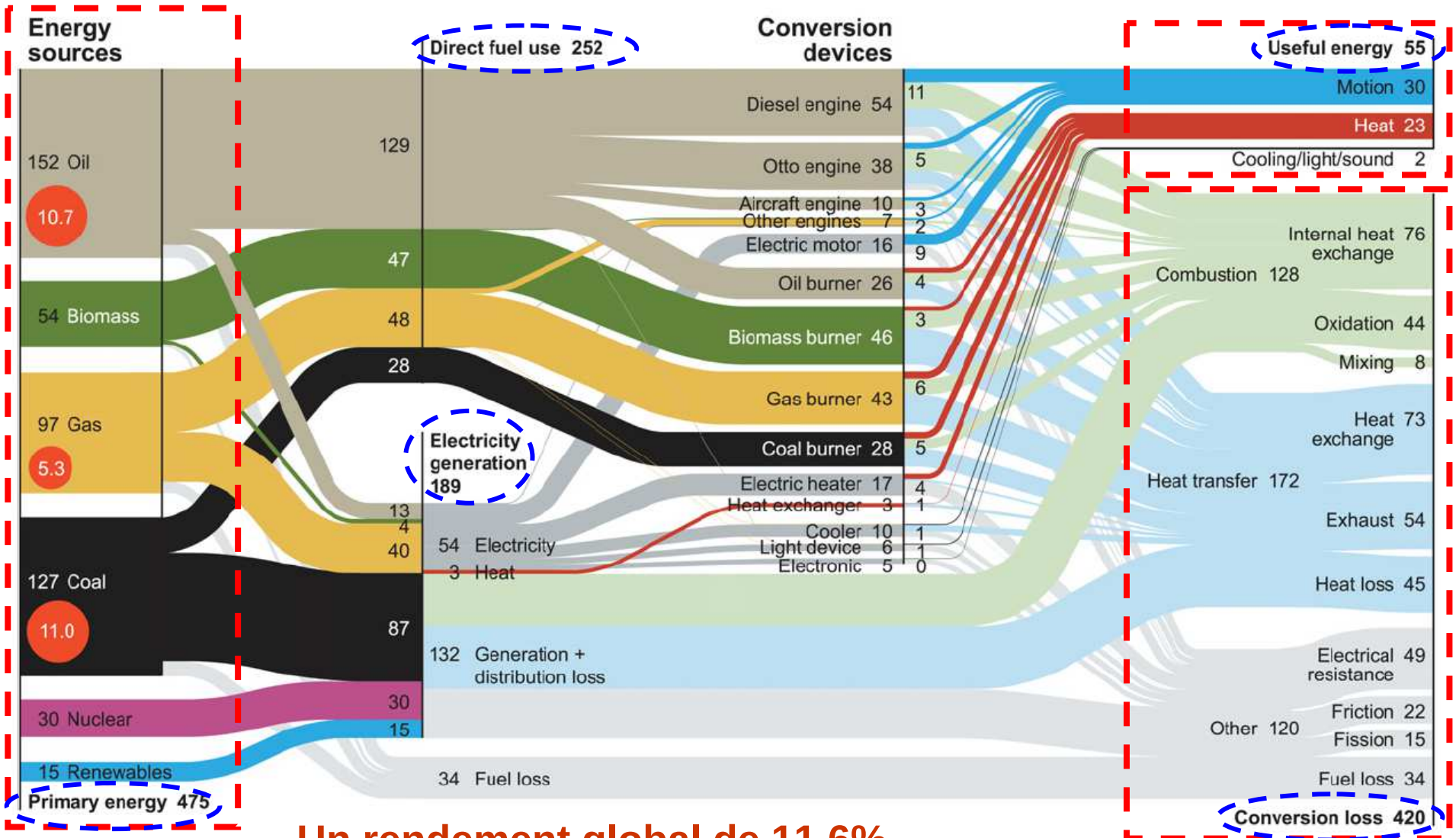
chaleur => énergie mécanique

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)



Global energy demand in 2005, total = 475 EJ

Un rendement global de 11,6% ...

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

1 EJ = 24 Mtep = 278 TWh)

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/m²

Puissance : il faut : 4,6 h avec un capteur solaire idéal de 1 m² (1 kW)
1 h ---------- 4,6 m² (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

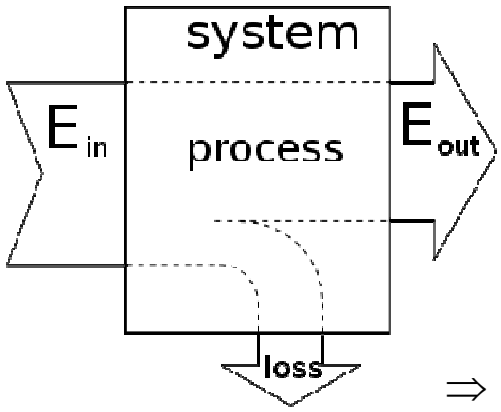
Notion de rendement énergétique

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

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_{PCI}
- du PCS (--- --- supérieur) kWh_{PCS}

(avec récupération de la chaleur latente de condensation des fumées : + 3 à 10% par rapport au PCI)

Valeurs typiques : 4 kWh_{PCI}/kg (bois sec) à 39 kWh_{PCS}/kg (hydrogène)
en passant par 12 kWh_{PCI}/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_2 (3,7 kg CO_2 par kg de carbone) :
=> 0,2 (méthane) à 0,35 kg CO_2/kWh_{PCI} (charbon)

Possibilités et limites de conversion

« Production » de chaleur (suite) :

Fission nucléaire : cassure de noyaux fissiles (uranium 235)
environ 120 000 kWh/kg U_{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) :

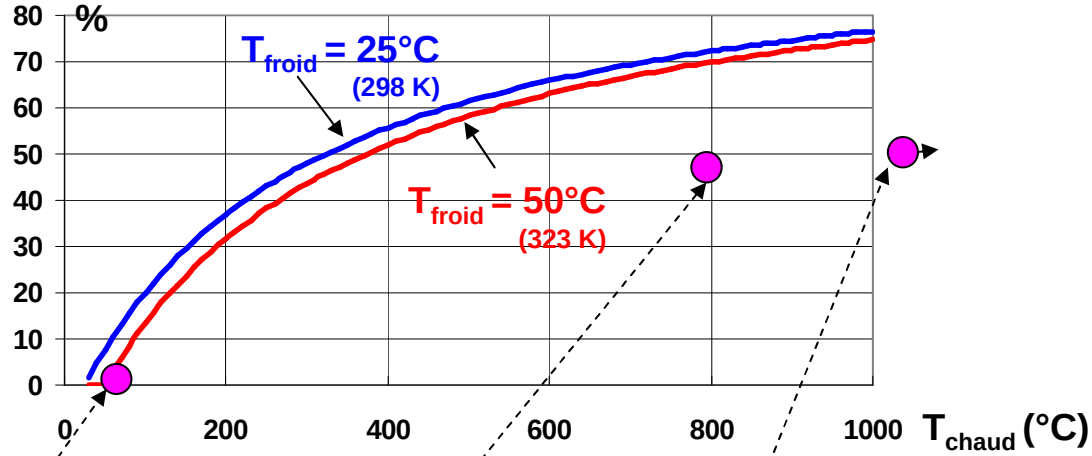
Partant d'une source de chaleur (combustion, rayonnement solaire…),
il y a une limite thermodynamique (principe de **Carnot** ou 2ème principe) :

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

Travail Mécanique (Work)

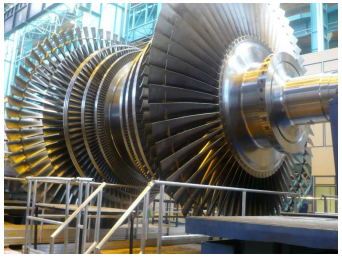
Chaleur prise à une source

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

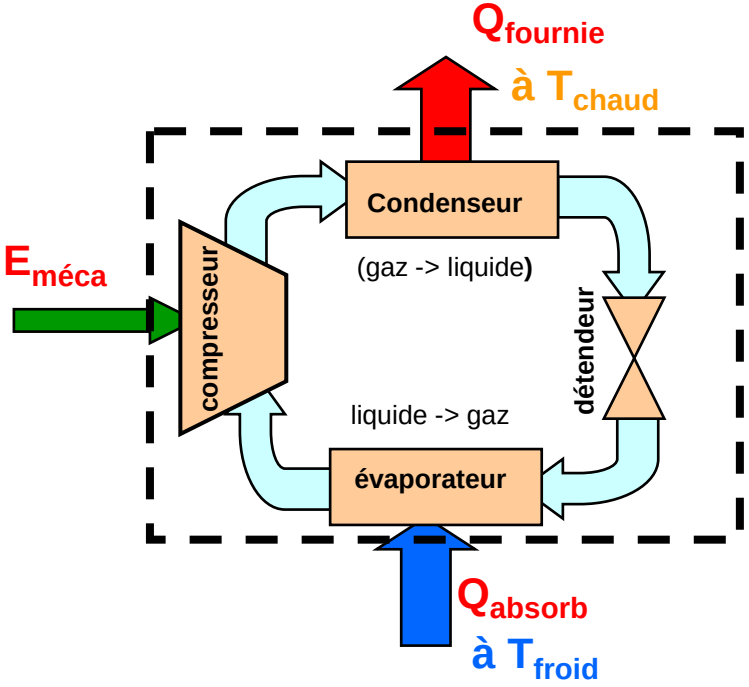


Turbine à vapeur

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) :

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

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

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

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

Pompe à chaleur : récupération de chaleur dans l'environnement

COP = coefficients de performance

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

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

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

(COP_{limite}= 10 si T_{froid} = -10°C)

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

Rendement exergétique des systèmes thermodynamique

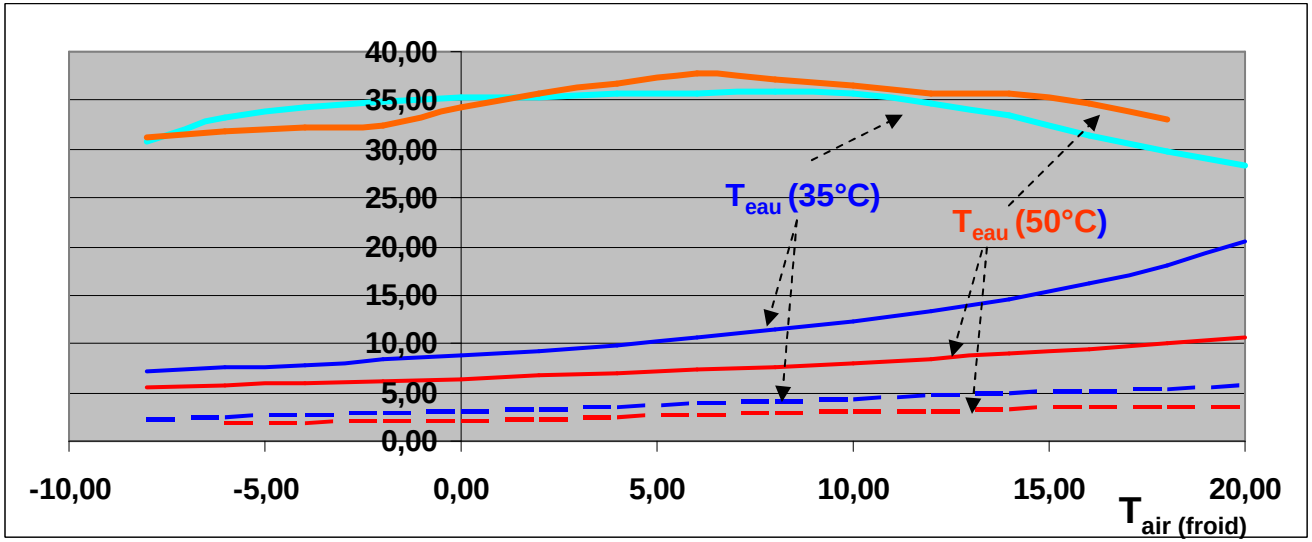
Cette notion permet de considérer le potentiel de conversion
du système réel sur la base de la limite de Carnot,
et d'évaluer ses performances techniques

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

Cas d'une pompe à chaleur ou d'un système de production de froid :

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

Exemple : PAC Air-Eau 15 kW



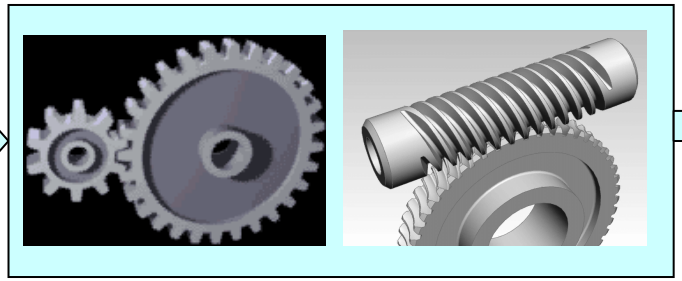
Possibilités et limites de conversion

Conversions mécaniques et électriques :

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

Transmissions mécaniques, exemple à engrenages :

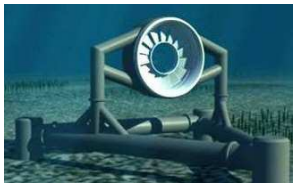
Puissance Mécanique
(vitesse ; couple)
Ω_1 ; T_1
$P_{meca1} = \Omega_1 . T_1$



Puissance Mécanique
Ω_2 ; T_2
$P_{meca2} = \Omega_2 . T_2 \cong P_{meca1}$

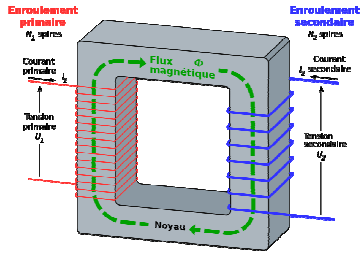
Il y a bien sûr un peu de pertes (frottements…),
mais le rendement reste proche de 100%

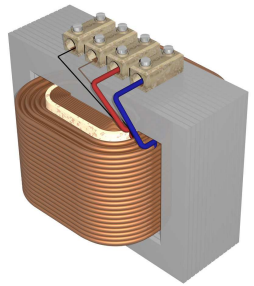
Des « sources naturelles d'énergie mécanique » existent dans l'environnement :
liées à des processus thermodynamiques (solaire) : hydraulique, éolienne…
ou associées à la gravitation : effets de marée hydrauliques



Possibilités et limites de conversion

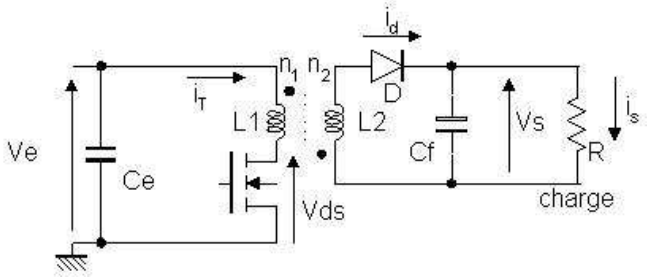
Conversions électriques :
Électromagnétique : transformateur





(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	fluorescence	luminescence
≅ 10 à 20 lm/W	≅ 50 à 80 lm/W	≅ 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 :

puissance absorbée (électrique):

$P_{abs} = U.I$

Tension (V) — Courant (A)

puissance utile (mécanique) :

$P_u = T.\Omega$

Couple (N.m) — Vitesse angulaire (rad/s)

Raisonnement instantané (en puissance) :

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

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

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

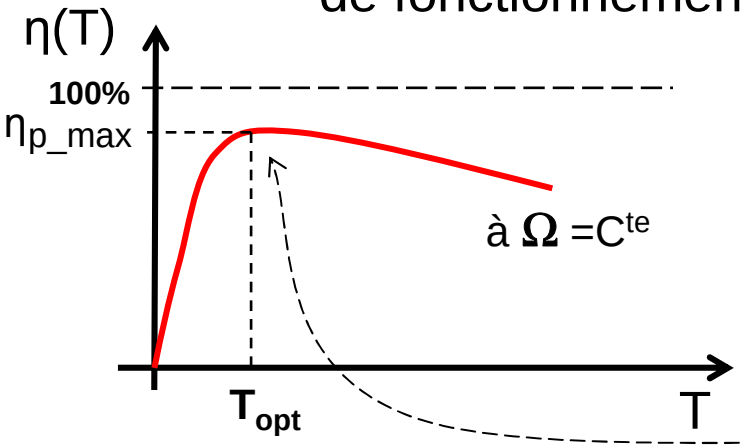
Modèle simplifié :

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

Rendement instantané :

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

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)** :



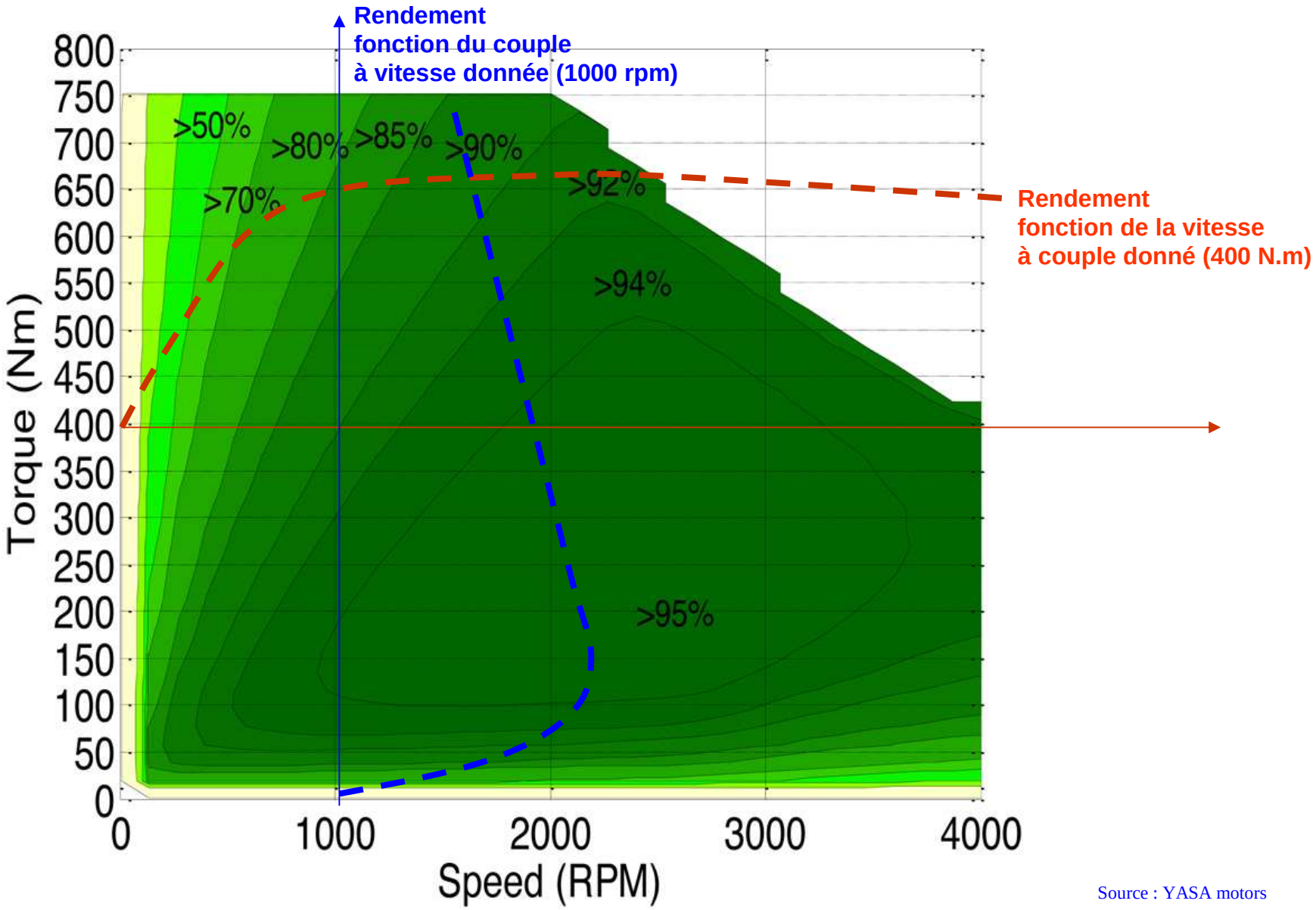
L'allure de cette courbe est représentative de tous les convertisseurs d'énergie

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

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

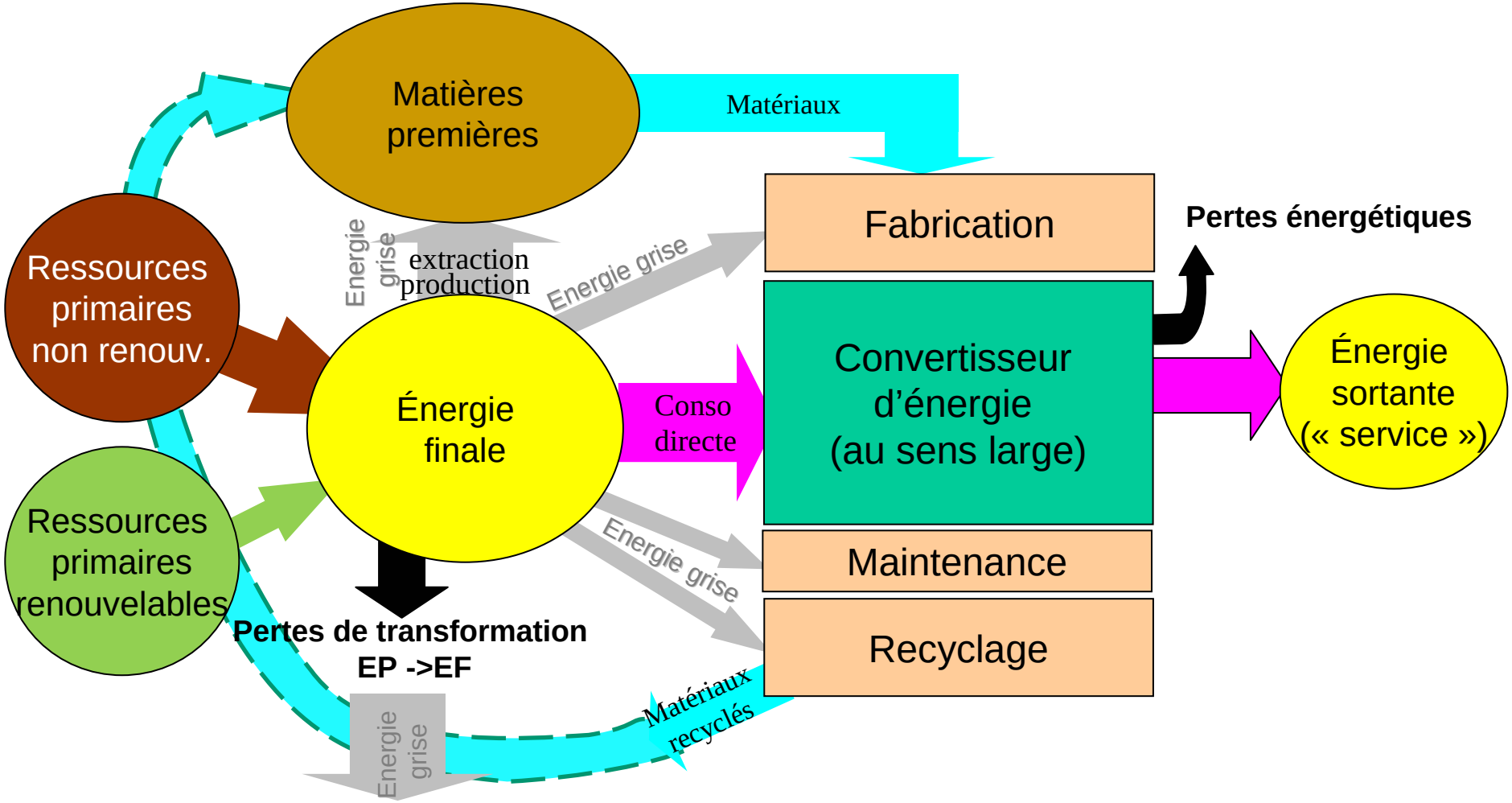
$$\eta_e \leq \eta_{p_max}$$

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



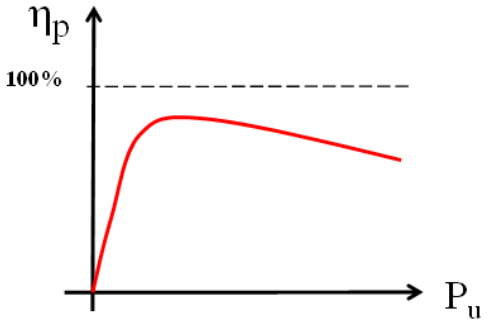
En termes de soutenabilité, ce qui compte in fine,
c'est la quantité d'énergie primaire non renouvelable consommée
sur la vie du convertisseur pour réaliser le service attendu.

Rendements d'un convertisseur d'énergie

1- Rendement en puissance ou instantané :

(sur un point de fonctionnement particulier)

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



2- Rendement énergétique ou sur cycle :

(sur un cycle de fonctionnement correspondant à un service)

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

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_e **(7 TWh_e/an)**
Consommation d'uranium naturel : 7800 tonnes **(195 tonnes/an)**

Extraction minière de l'uranium : 0,58 TWh_p

Transformation en combustible fissile (avec les meilleures techno) : 5,1 TWh_p

Construction et démantèlement : 9,3 TWh_p

Stockage déchets : 0,43 TWh_p

Rendement en puissance de conversion chaleur – électricité : 33%

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

Source : Energy Analysis of Power Systems, dec. 2013, World Nuclear Association
http://world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Energy-Analysis-of-Power-Systems/

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_e par an avec un rayonnement de 1000 kWh/m²/an

Avec une technologie au silicium polycristallin (rendement de 14%),
il faut : 50 TWh_p, soit 50 km² (en France, 8500 km² de superficie bâtie)

Fabrication des modules : 1000 kWh_p/m² soit 50 TWh_p

Montage en toiture + onduleur : 120 kWh_p/m² soit 6 TWh_p

Rendement de conversion rayonnement solaire – électricité : 14%

Rendement sur cycle de vie pour 20 ans de production :

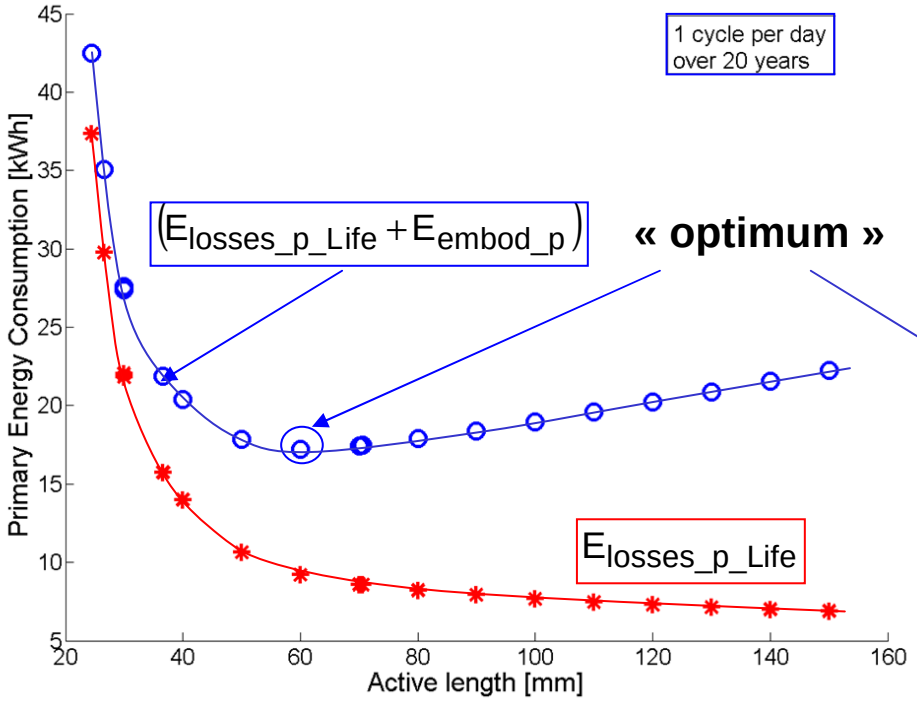
$$\eta_{lca_sust} = \frac{7 \text{ x } 20}{7 \text{ x } 20 + (50+6)} = 71{,}4\%$$

83,3% (E_{emb}=28 TWh) sur un site avec 2000 kWh/m²/an

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

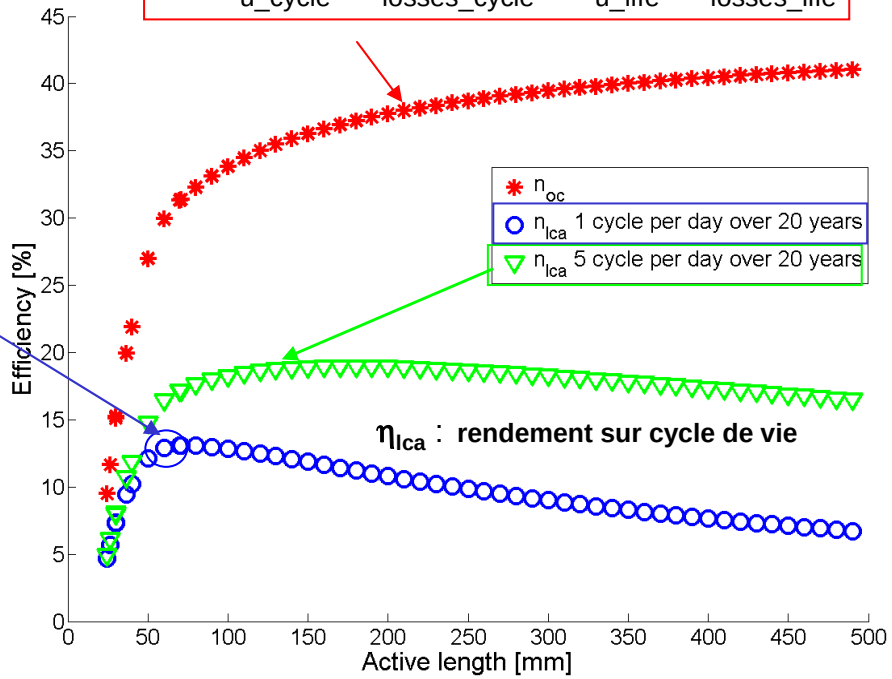
Application à un moteur de volet roulant
(exemple à faible durée d'usage sur sa vie)

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



η_e : **rendement (énergétique) sur un cycle de montée-descente**

$$\eta_e = \frac{E_{u_cycle}}{E_{u_cycle} + E_{losses_cycle}} = \frac{E_{u_life}}{E_{u_life} + E_{losses_life}}$$



$$\eta_{lca} = \frac{E_{u_life}}{E_{u_life} + (E_{losses_p_life} + E_{emb_p})}$$

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 lux = 1 lumen/m²), il décroit avec le carré de la distance et dépend fortement du luminaire…

Le cas de l'éclairage (suite) :

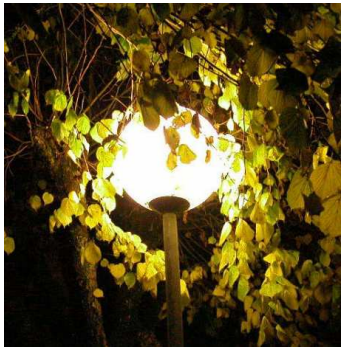
L'éclairage intérieur : ambiance, travail… des puissances requises différentes,
des attentes très variables

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 $kWh_{annuels}$ par m² 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…

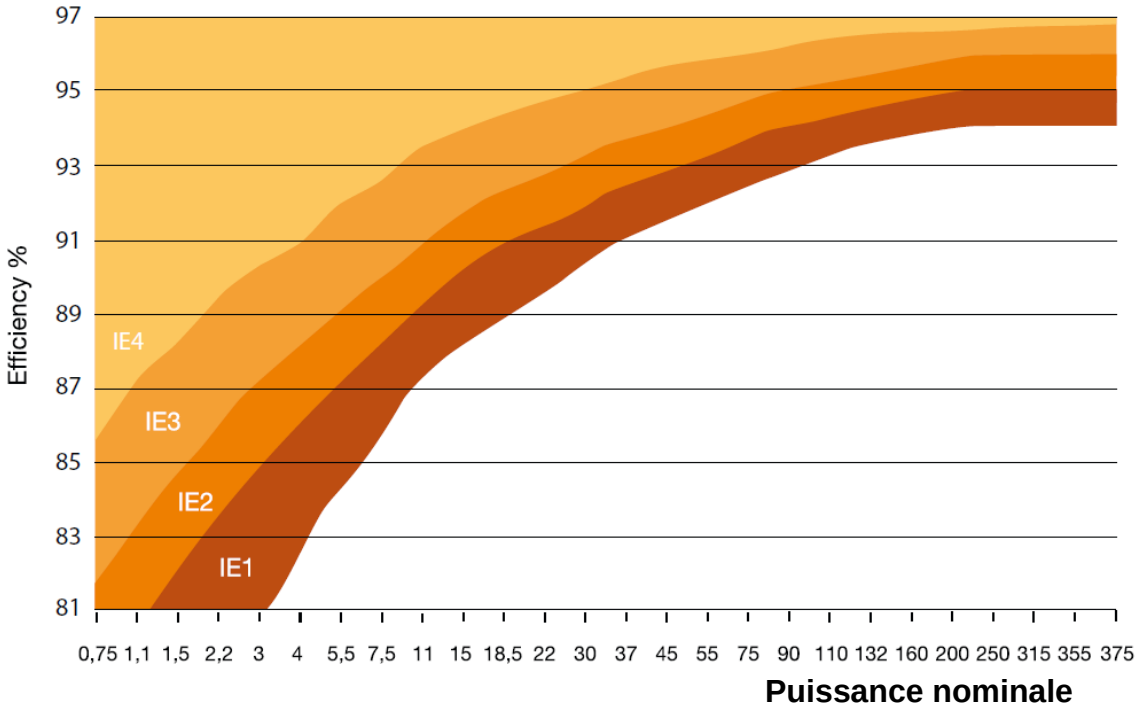
L’ordinateur personnel :
Consommation de l’ordinateur (portable vs PC de bureau, tablette…),
le choix de la puissance de la machine et ses périphériques,
l’utilisation des modes économies, l’arrêt du PC…

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

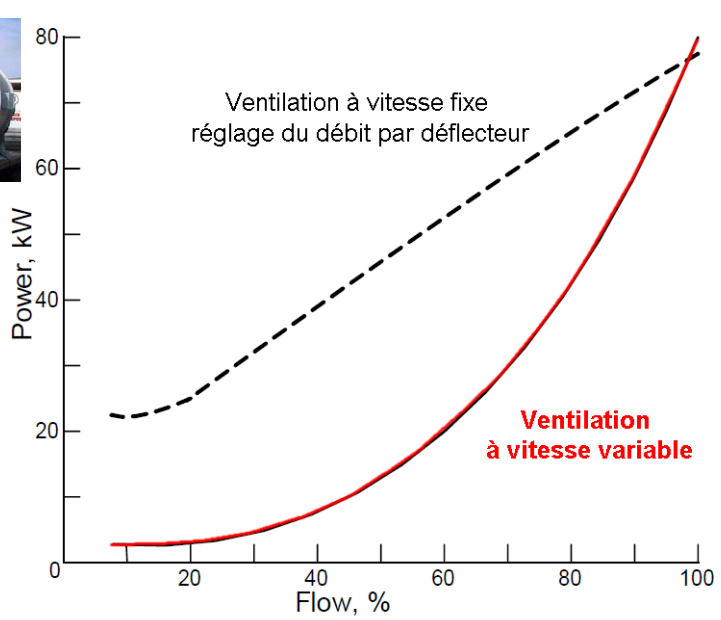
Amélioration du rendement :
- Qualité des matériaux
- Quantité de matériaux
- Qualité des échanges thermiques

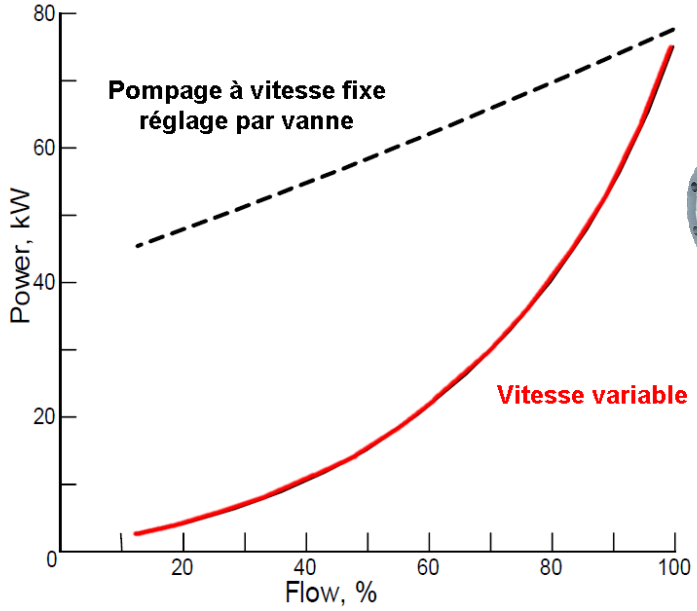
Les machines à aimants permettent encore d'améliorer les rendements, surtout en petite puissance.

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 :





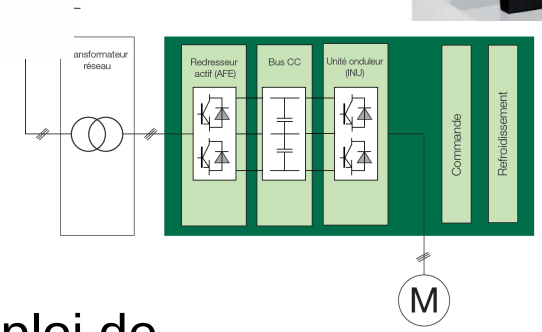
Et tout ceci est également vrai en génération d'énergie (éolien, machines thermiques…)

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)

Gamme ACS 2000 ABB (250 kW à 1,6 MW)



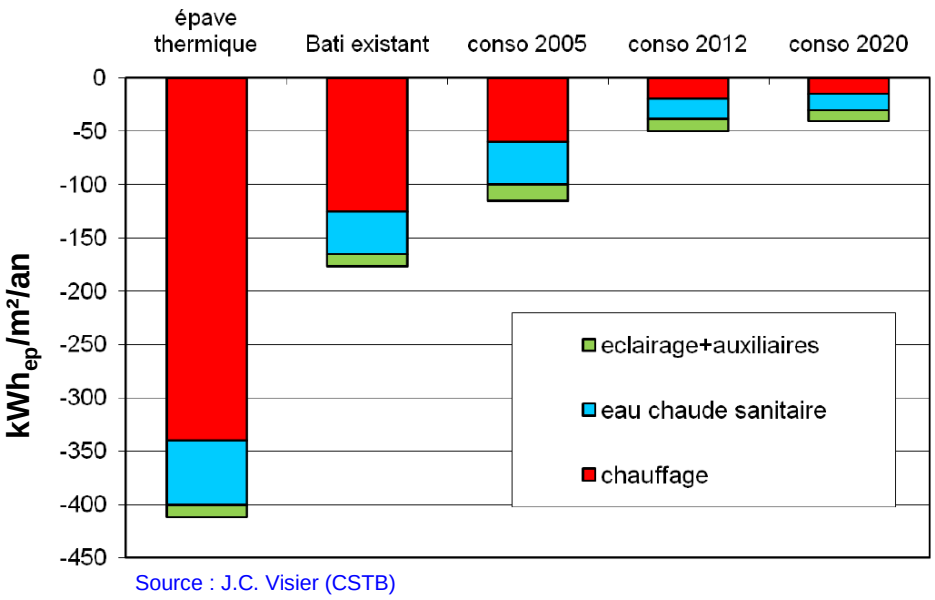
D'une façon générale, l'emploi de **convertisseurs électroniques de puissance** permet d'améliorer considérablement l'efficacité des processus énergétiques électriques

Les bâtiments : des systèmes complexes

Les consommations normalisées (chauffage, ECS, ventilation et éclairage) s'expriment en $kWh_{ep}/m^2/an$

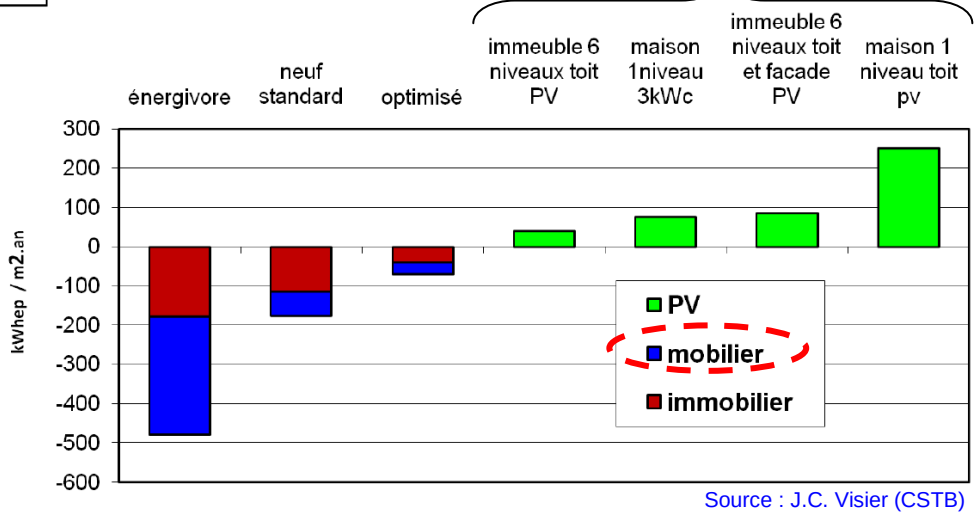
(hors énergie grise)

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



Source : J.C. Visier (CSTB)

+ possibilité d'autoproduction PV :



Source : J.C. Visier (CSTB)

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

L'énergie grise (sur 50 ans) peut représenter de 20 à 100 $kWh_{ep}/m^2/an$

Automobiles : influence de la masse roulante

Puissance requise : $P = F.V$ (vitesse)

Effort : $F = F_{roul} + F_{aérod} + M.g.p_{\%} + M.\gamma$ (Masse)

Effort d'accélération

$F_{roul} = CRR_{moy}.M.g$
(résistance au roulement)

$F_{aéro} = \frac{1}{2}.\rho.V^2.C_x.S_x$
(résistance aérodynamique)

Effort dû à la pente en %

En cycle urbain (vitesses faibles) : $F \propto M$ et $P \propto M.V$

+ effet important des accélérations…

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

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

et : $P \propto K.M^a.V^3$

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_{roues} = 10 kW 5 litres/h
à 130 km/h : P_{roues} = 30 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 => 5,5 litres/100 km
15 litres/h => 11,5 litres/100 km

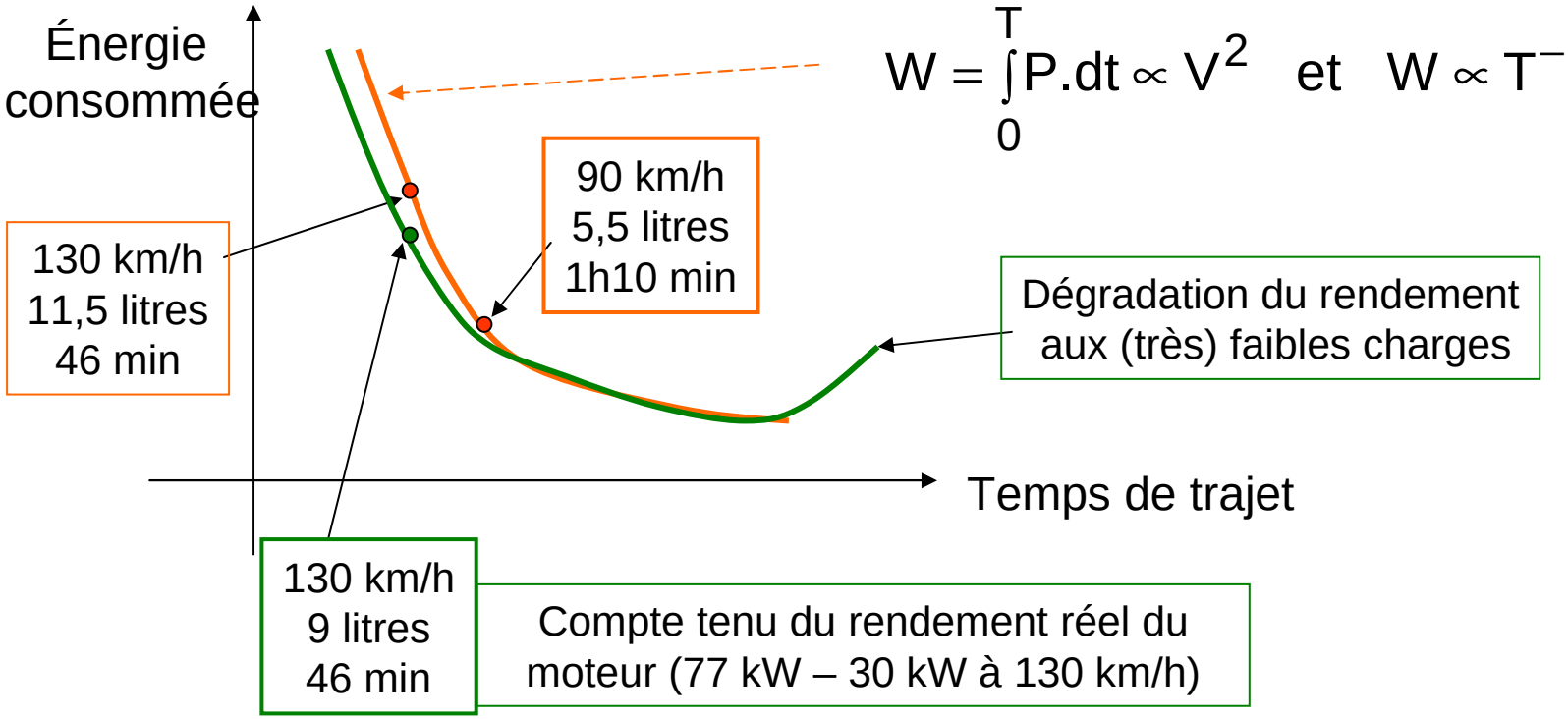
Mais comme les moteurs sont surdimensionnés,
leur rendement s'améliore un peu à puissance élevée…

Pour un moteur de 77 kW (moyenne actuelle) :
à 10 kW : 22% => 5,5 litres/100 km
à 30 kW : 28% => 9 litres/100 km

Relation temps de trajet et consommation d'énergie

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

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



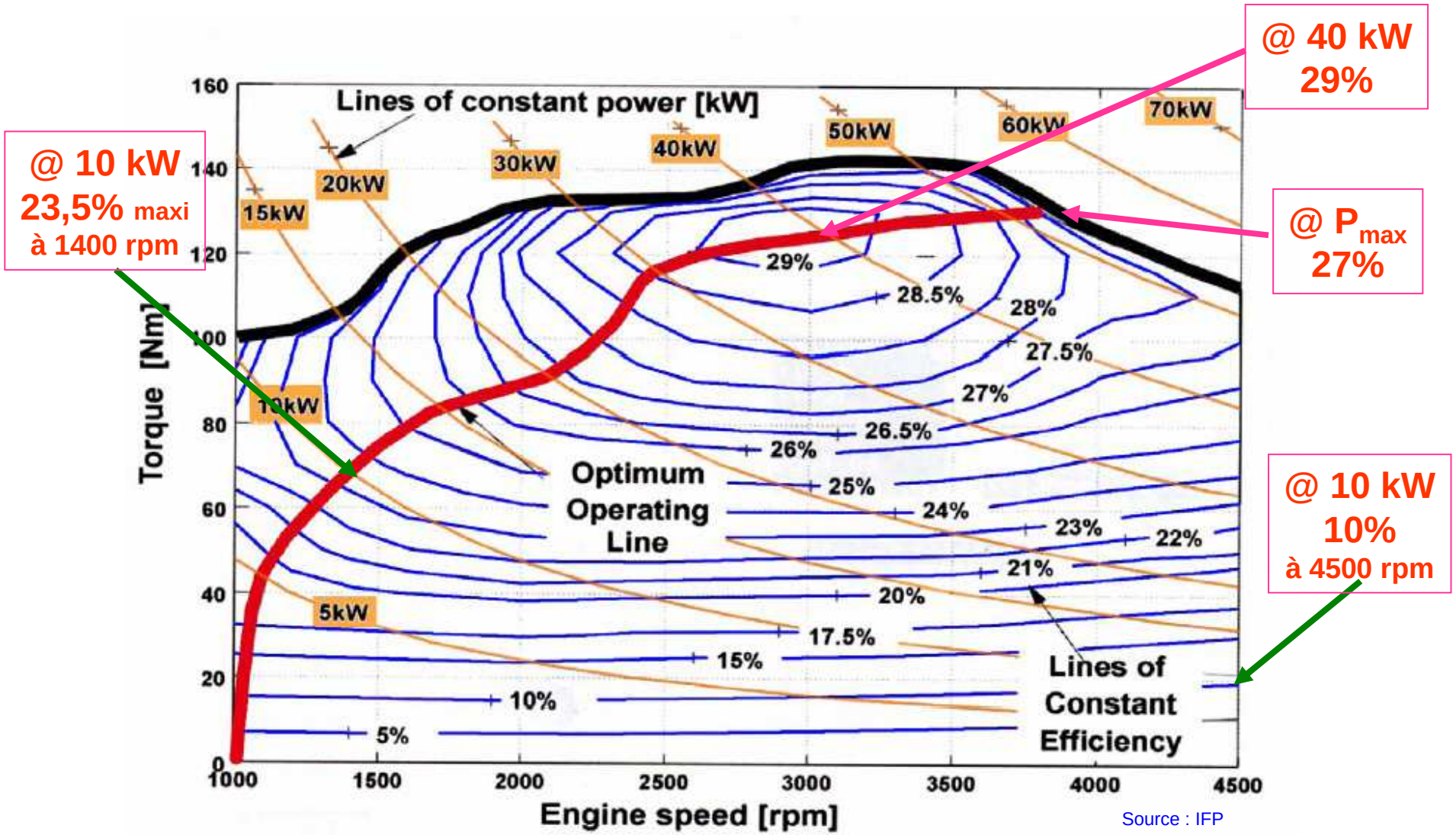
Cela vaut-il la peine de brûler 63% de carburant en plus (9 L au lieu de 5,5 L) pour gagner 24 minutes (70 min au lieu de 46 min) sur 100 km ?

10 000 km : à 130 km/h ⇔ 2 tonnes CO_2 et à 90 km/h ⇔ 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)

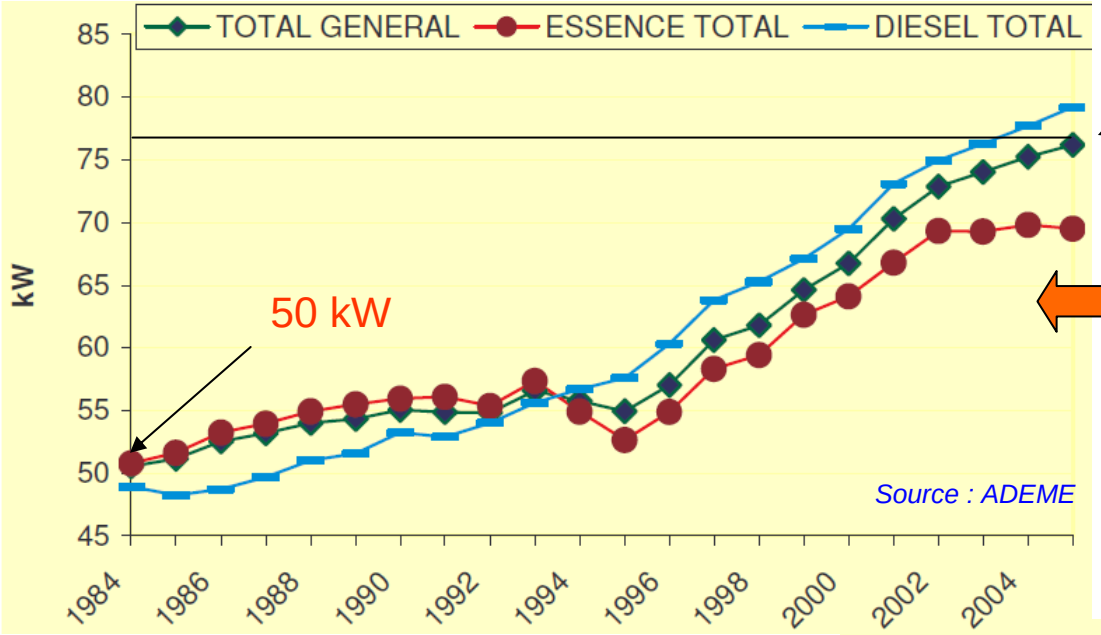
Isorendements dans le plan couple - vitesse



Source : IFP

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

Evolution 1984-2006 du parc automobile français



77 kW (+ 50% en 20 ans)

Puissance moyenne des moteurs des automobiles commercialisées

Moteur précédent, à 90 km/h : P_u = 14 kW

Si P_n = 77 kW (P_u/P_n = 18%) : $\eta \cong 23\%$

Si Pn = 53 kW (P_u/P_n = 25%) : $\eta \cong 28\%$

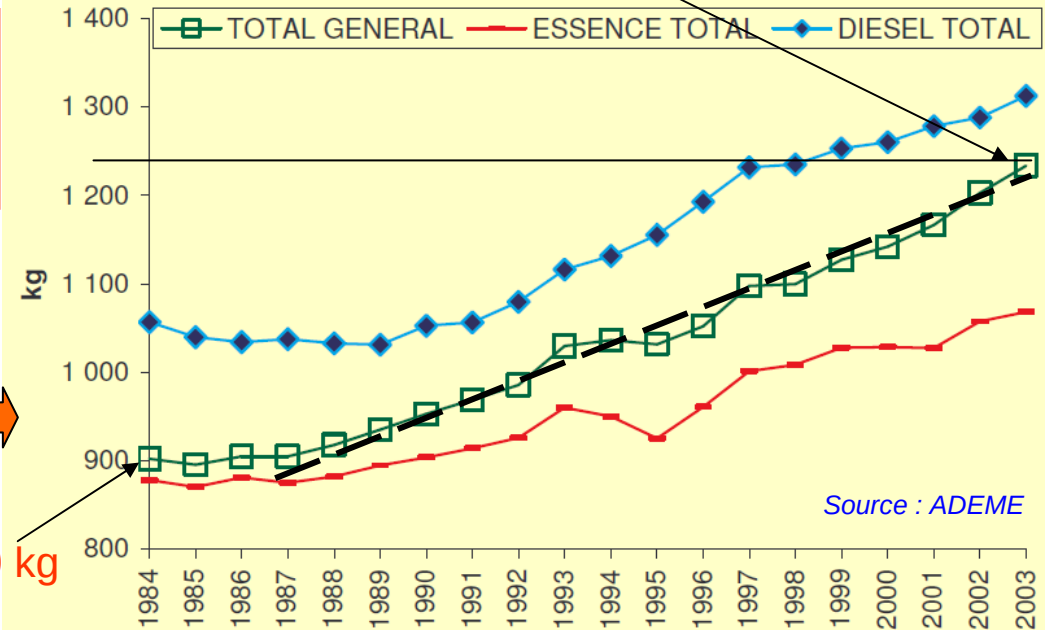
conso + 22%

Les moteurs surdimensionnés surconsomment

Masse moyenne des automobiles

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

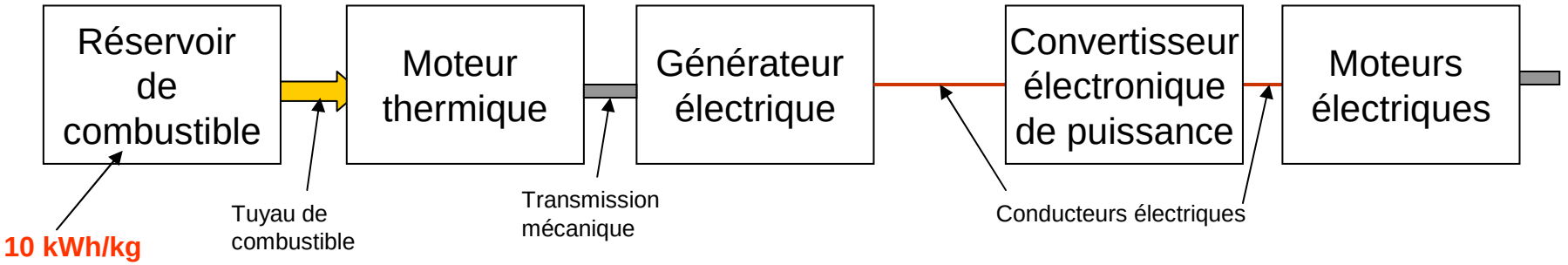
1250 kg (+ 40% en 20 ans)



900 kg

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_{2eq} associées aux véhicules électriques à batteries

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

N gCO_2/km = **X** gCO_2/kWh_e x **Y** kWh_e/km => 18 -> 80 -> 140 gCO_2/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_e
en Europe : 400 g/kWh_e **en moyenne…**
au monde : 720 g/kWh_e

Avec de l'électricité au charbon (1 $kgCO_2/kWh_e$) => 200 gCO_2/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 m²
avec des modules de 180 W_c/m²,
et 1000 h_{epp}/an (epp = équivalent pleine puissance)
=> **2200 kWh/an**

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

Rejets de CO_2 :
Fabrication du système PV :
1700 kg $C0_2$ par kW_c installé,
pour une durée de vie de 20 ans

Des trajets avec **6 à 8 gCO_2/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

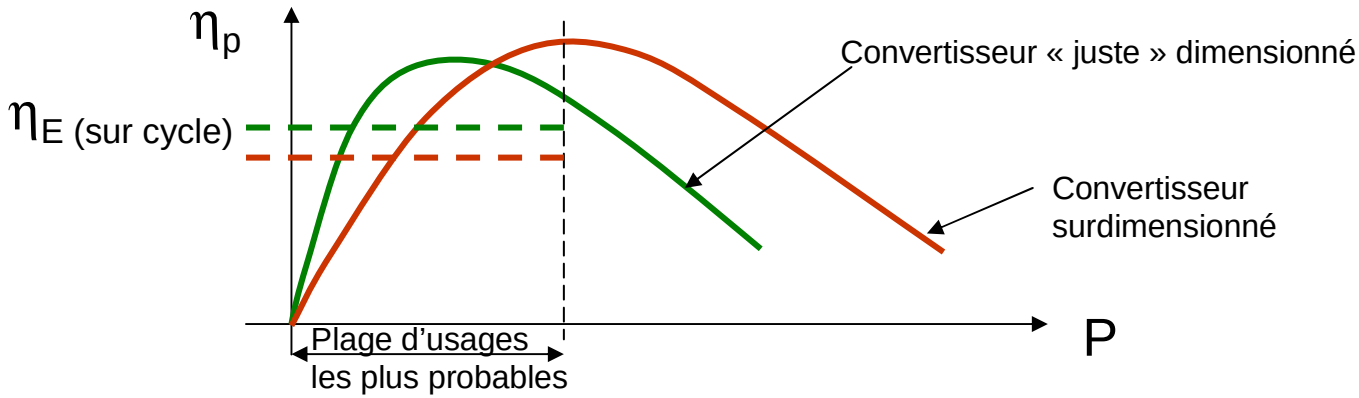
Conclusion

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'Energie (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

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

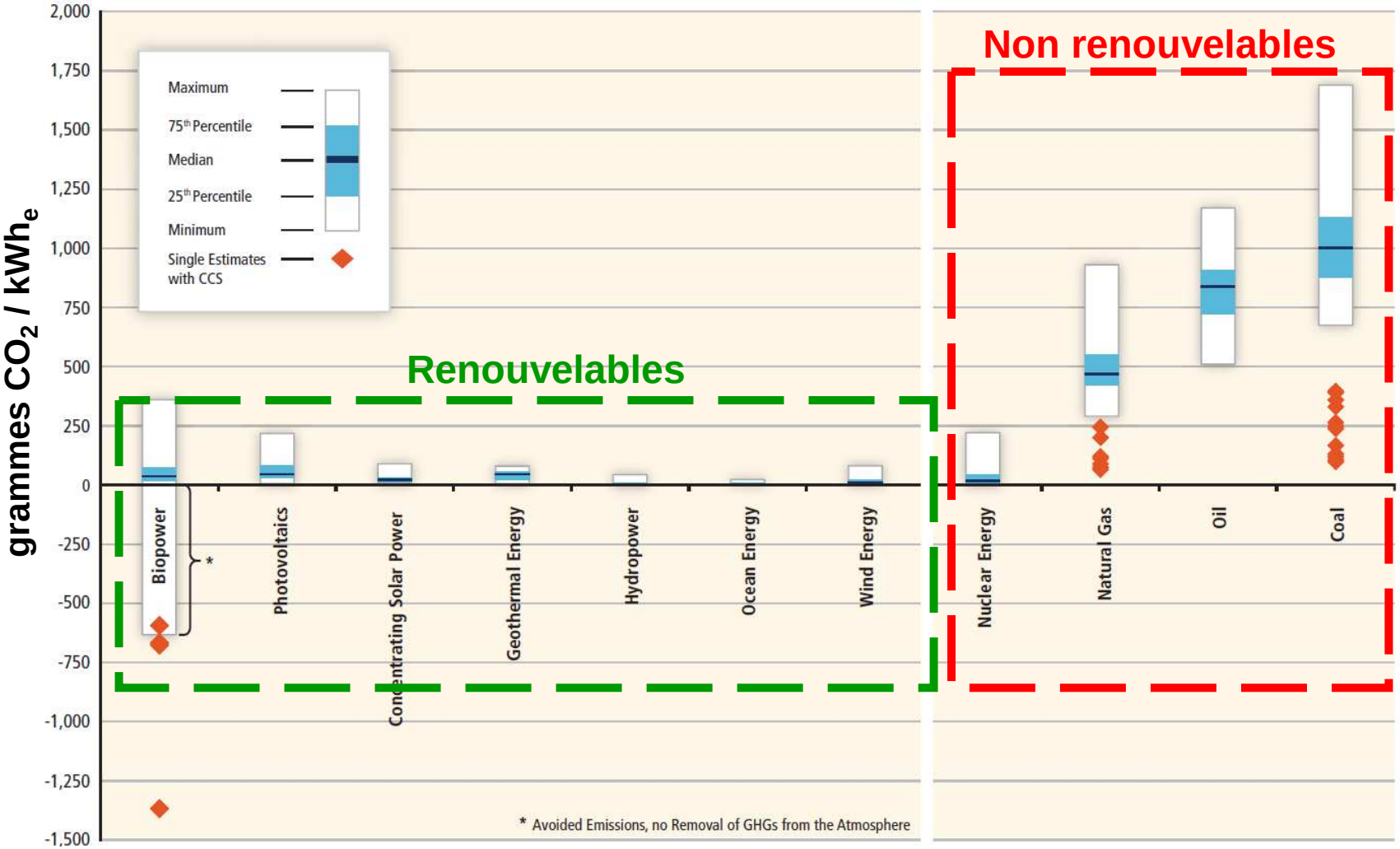
Cuivre Primaire :	27 kWh/kg
Magnésium :	54 kWh/kg
Plomb :	5 kWh/kg

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