

Efficacité énergétique

Ce module « Efficacité énergétique » de 4h (diaporama et exercices corrigés à faire en dehors de la classe) s'inscrit dans l'unité d'enseignement Ingénierie des Systèmes en Master Ingénierie des Systèmes Complexes, parcours enseignement (en tronc commun de la préparation à l'agrégation de Sciences Industrielles de l'Ingénieur) à l'école normale supérieure de Rennes.

Plan du diaporama :

Introduction à l'énergie : unités physiques, exemples de conversion, définitions des énergies primaire et finale, bilan énergétique mondial, définitions de l'efficacité énergétique et des rendements, puissance et énergie.

Notions de rendement : possibilités et limites de conversion, production de chaleur, machines thermodynamiques (moteurs, production de froid et pompes à chaleurs, rendement exergetique), conversions mécaniques et électriques. Rendements instantané (en puissance) et sur cycle (en énergie).

Émissions de gaz à effet de serre : émissions de CO₂, rejets de GES associés à la production d'électricité et de carburants.

Procédés énergétiques et leur efficacité : analyse de la consommation française d'énergie finale, vision globale du convertisseur d'énergie au système énergétique et à son usage (cas de l'éclairage), consommation de l'industrie, les moteurs électriques et l'apport de la vitesse variable, les bâtiments, les alimentations électroniques, les transports.

Réglementation en matière d'efficacité énergétique : engagements de la France (plan Climat), évolution des émissions des automobiles (théorie et réalité), étiquetages énergétiques (automobiles, bâtiments, électroménager...), certificats d'économie d'énergie.

Conclusion et règles de base en matière d'efficacité énergétique.

Exercices (avec corrigés) :

- 1- Généralités et analyse de données énergétiques
- 2- Rendements d'un onduleur photovoltaïque
- 3- Amélioration de l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment
- 4- Emissions polluantes

Problème (avec corrigé) : Fondamentaux de transferts énergétiques, analogies.

Charge d'un condensateur par source de tension puis par source de courant

Charge mécanique inertielle entraînée par une chaîne réversible

Efficacité énergétique

Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

Conclusion

Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

Conclusion

Unités d'énergie

Système international : le **joule J**

1 J = 1 newton x 1m

= 1 volt x 1 ampère x 1 seconde = 1 V x 1 coulomb
(6,2.10¹⁸ électrons)

1 calorie = 4,18 J (+ 1°C un gramme d'eau)

Électricité : le **kilowatt.heure kWh**

1 kWh = 3600 000 J = 3,6 MJ

Carburants : la **tonne équivalent pétrole tep**

1 tep <=> 11 600 kWh

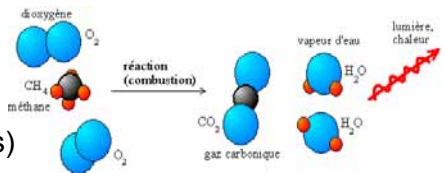
Notation en puissance de 10

k	kilo = 1000	= 10 ³
M	méga = 1000 000	= 10 ⁶
G	giga	= 10 ⁹
T	téra	= 10 ¹²
P	péta	= 10 ¹⁵
E	exa	= 10 ¹⁸

(attention 1 TWh = 10¹² Wh
et donc : 10⁹ kWh)

Energie : quelques exemples de conversions

Chimique : La combustion de 1 m³ 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**

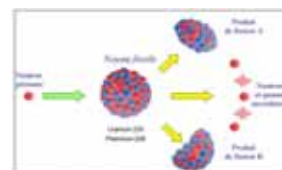
$$E = m \cdot c^2$$

0,001 kg c = 3 · 10⁸ 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/m²), une surface noire de 4 m² capte, en une seconde : **4000 J**

Travail mécanique : il faut **4000 J** pour élever de 4 m une masse d'environ 100 kg, dans un champ de pesanteur à 10 m/s², opposant donc une force résistante de 1000 N (newtons)

$$E = F \cdot d$$

1000 N 4 m

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

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

1,2 V 1 A 3300 s

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...

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

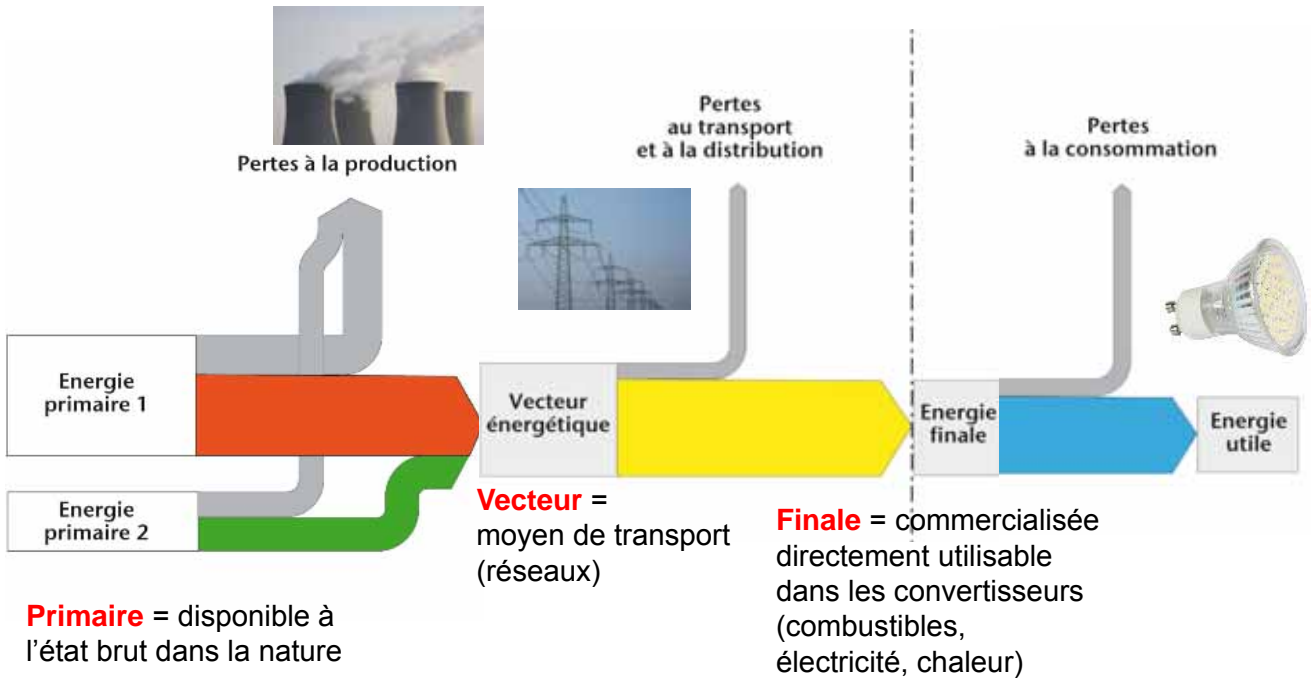


chaleur => énergie mécanique



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

Energies primaire, finale et utile : définitions

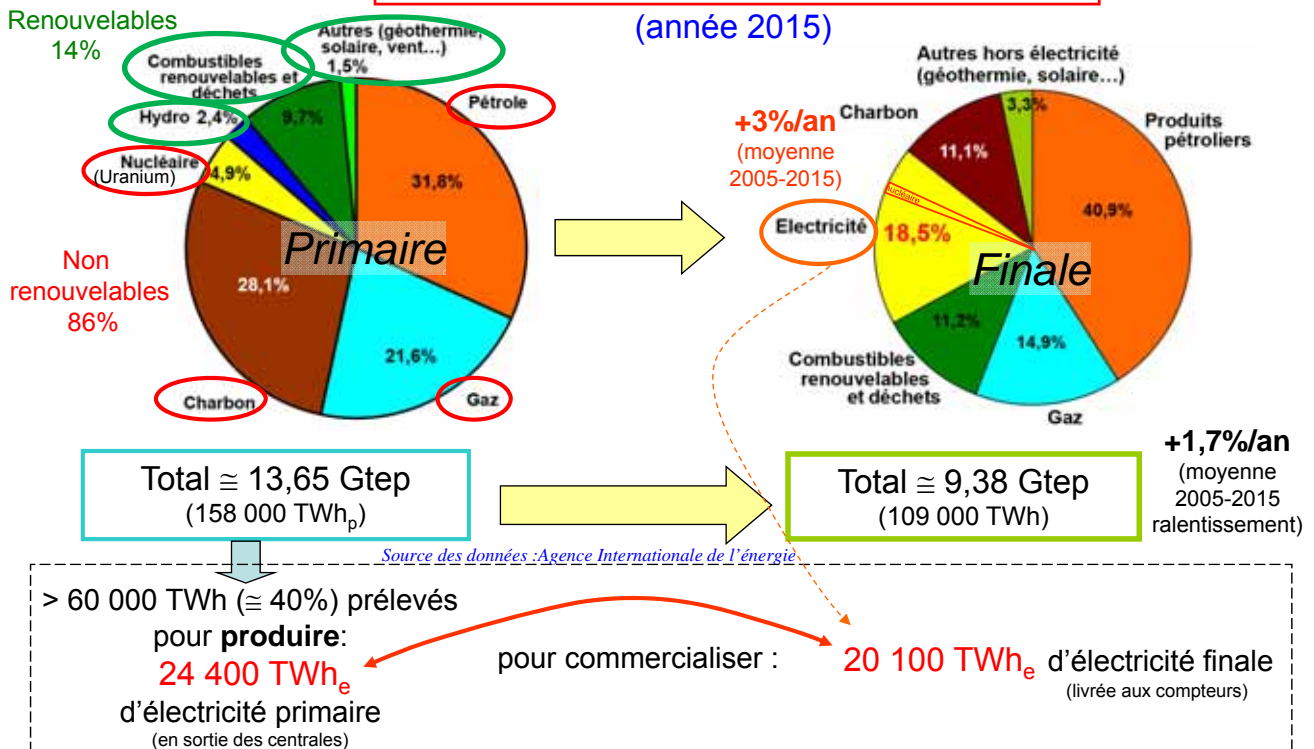


2 catégories :

Stocks non renouvelables fossiles et fissiles
Flux renouvelables soleil, géothermie

Source : négaWatt

Bilan énergétique mondial : décryptage et place de l'électricité



« Vraie » part du nucléaire : 4,9 % de l'énergie primaire
 1,9 % de l'énergie finale car 10,5% de l'électricité est d'origine nucléaire ($10,5\% \times 18,5\% = 1,9\%$)

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.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

B. Multon ENS Rennes 9

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** »



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 à faire à des **transformations** énergétiques

Cependant, il est pertinent de distinguer l'**efficacité** de :

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

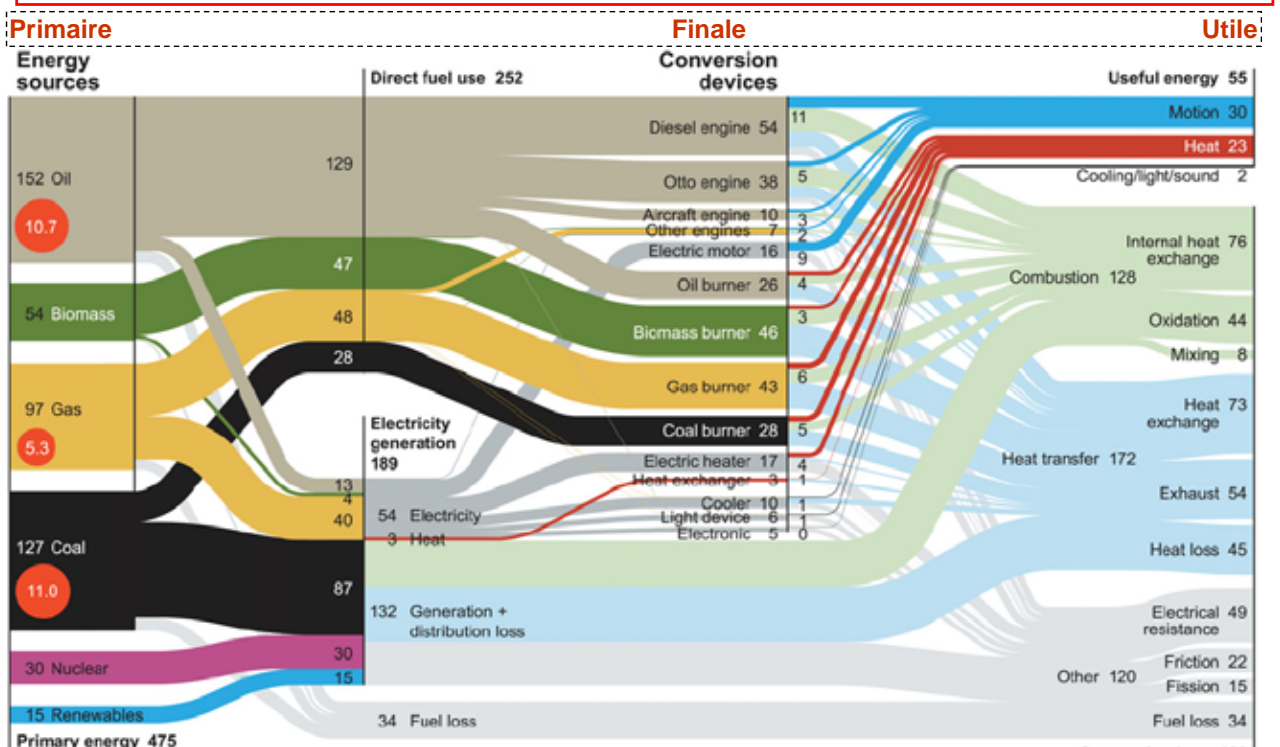
- extraction minière => machines équipées de **moteurs**
- transformation des matières premières => procédés industriels eux-mêmes exploitants divers **convertisseurs**
- transport, raffinage pour obtenir un combustible de « qualité »...
- conversion finale du combustible en électricité : **brûleurs,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

Diagramme de Sankey Monde 2005 de l'énergie primaire à l'énergie utile



Global energy demand in 2005, total = 475 EJ

Global carbon emissions in 2005, total = 27 Gt CO₂

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

11,4 Gtep

Un rendement global de 11,6% donc un immense potentiel d'économies...

1,3 Gtep « utiles »

Puissance et énergie

La **puissance P**,
c'est le débit de la conversion d'**énergie E** : $P = \frac{dE}{dt}$

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 est donc une caractéristique
du convertisseur d'énergie :

Un **brûleur** de 20 kW peut transformer un **combustible** en **chaleur**
deux fois plus vite qu'un brûleur de 10 kW

Un **moteur électrique** de 20 kW peut transformer de l'**électricité** en
travail mécanique deux fois plus vite qu'un moteur de 10 kW...

**Vouloir réaliser plus vite des services énergétiques
conduit à des convertisseurs plus gros, plus chers
et nécessitant plus de matières premières et d'énergie grise.**

Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

Conclusion

Notions de rendement

En réalité, l'énergie ne se produit pas, ni ne se consomme...
elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre

Exemples : **forme entrante** → **forme sortante**
carburant → chaleur (combustion)
carburant → mécanique (moteur à combustion)
rayonnement solaire → électricité (photovoltaïque)
électricité → mécanique (moteur électrique)

...

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

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

Pertes = $E_{\text{entrante}} - E_{\text{sortante}}$ = chaleur qu'il faut évacuer dans l'environnement

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)



Plage de valeurs : 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 CO₂ (3,7 kg CO₂ par kg de carbone) :
=> 0,2 (méthane) à 0,35 kg CO₂/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) :

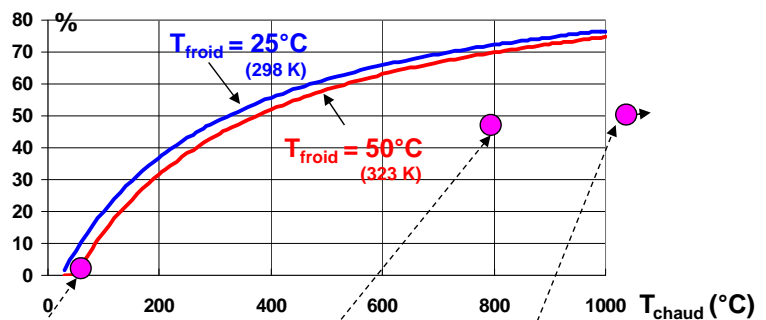
Partant d'une source de chaleur (combustion, rayonnement solaire...), il y a une **limite thermodynamique** (principe de **Carnot** ou 2^{ème} principe) :

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

Travail Mécanique (Work)

Chaleur prise à une source

Températures (en kelvins) des sources chaude et froide (environnement)
(Temp. en K = Temp. 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



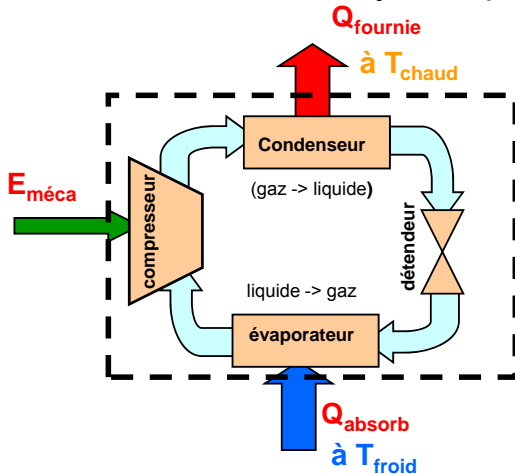
Turbine à vapeur



Moteur à explosion

Pompes à chaleur et systèmes frigorifiques

Des machines thermodynamiques inversées ($E_{méca} > 0$ si consommée)



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

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

Pompe à chaleur : récupération de chaleur dans l'environnement

COP = coefficients de performance

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

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

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

(COP_{limite} = 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_{chaud})

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{absorb}}}{E_{\text{méca}}}$$

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

Exemple : si on rejette de la chaleur dans l'air à 20°C (T_{chaud}) pour obtenir du froid à 5°C (T_{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 systèmes thermodynamiques

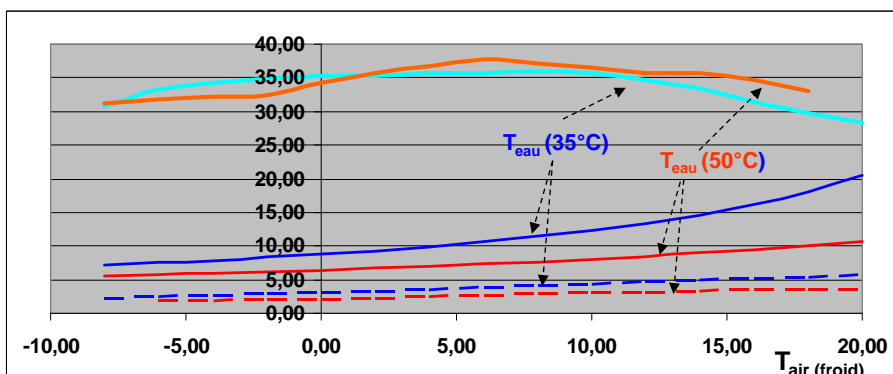
Cette notion permet de considérer le potentiel de conversion des systèmes réels sur la base de la limite de Carnot, et d'évaluer leurs performances techniques

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

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

$$\eta_{\text{Ex}} = \frac{\text{COP}_{\text{réel}}}{\text{COP}_{\text{Carnot}}} < 1$$

Exemple : PAC Air-Eau 15 kW



Rendements exergetiques ici aux alentours de 35 %

COP_{Carnot}

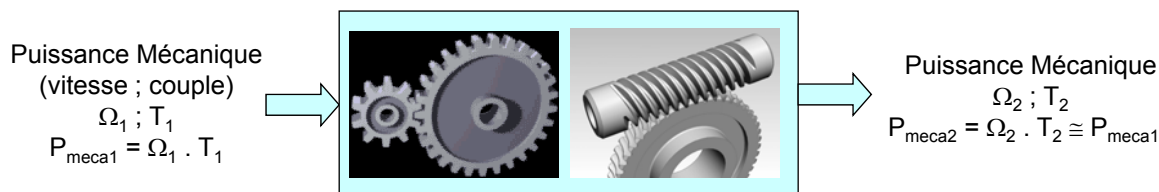
COP_{Réels}

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 à engrenages :



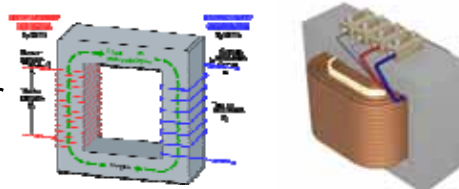
Il y a bien sûr un peu de pertes (frottements...),
mais le rendement reste proche de 100%

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



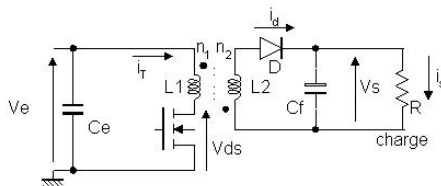
Possibilités et limites de conversion

Conversions électriques : Électromagnétique : transformateur



(pertes : effet Joule, magnétiques...)

Statiques à découpage : convertisseurs électroniques 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 100 lm/W

luminescence

≅ 60 à 120 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): Pertes (chaleur) **puissance utile** (mécanique) :

$$P_{abs} = U \cdot I$$

Tension (V) Courant (A)



$$P_u = T \cdot \Omega$$

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

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 :

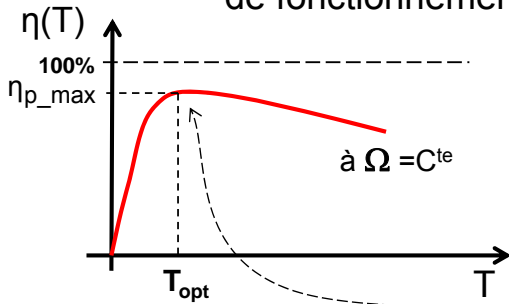
- pertes en charge : $p_{ch} \cong k_1 \cdot T^2$

- 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) :



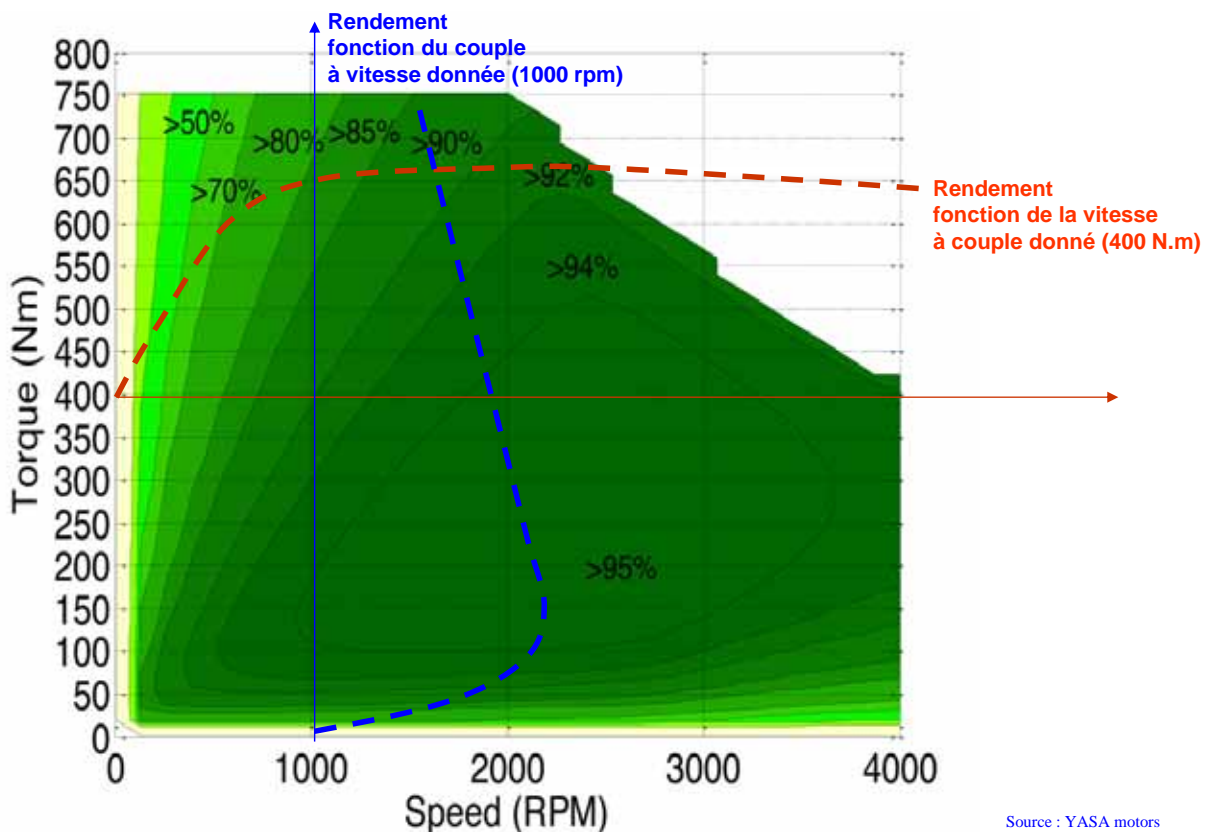
L'allure de cette courbe est représentative de tous les convertisseurs d'énergie

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

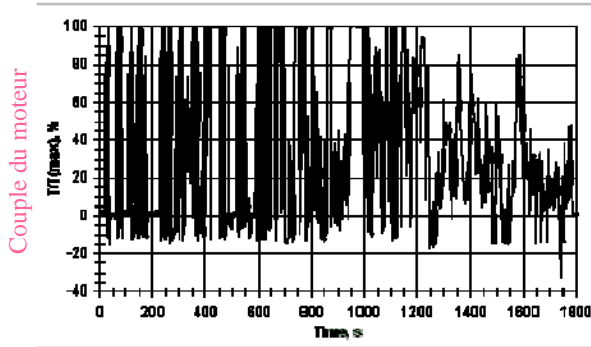
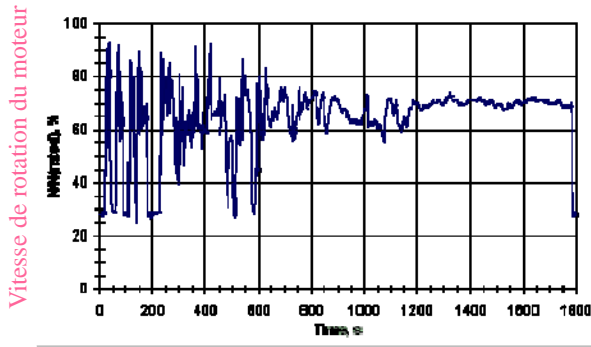
$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{\text{abs}} \cdot dt} = \frac{\int_{\text{cycle}} T(t) \cdot \Omega(t) \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} \frac{T(t) \cdot \Omega(t)}{\eta_p(T, \Omega)} \cdot dt}$$

$\eta_e \leq \eta_{p_max}$

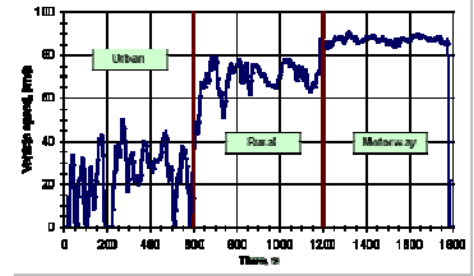
Exemple de cartographie de rendement d'un moteur électrique réel :



Exemple de cycle : automobile classique

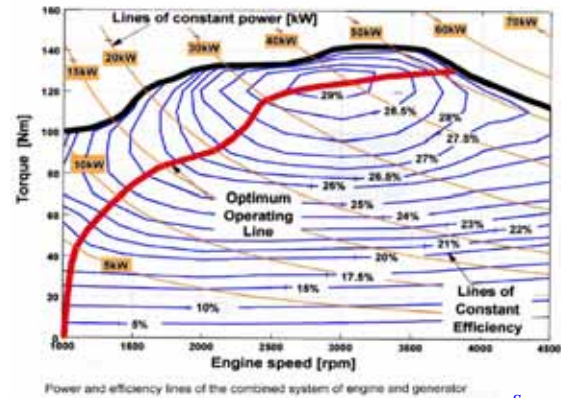


Source : <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>



Source : <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>

Courbes iso-rendement d'un moteur à combustion interne à essence



Source : IFP

➔ Calcul du rendement sur cycle

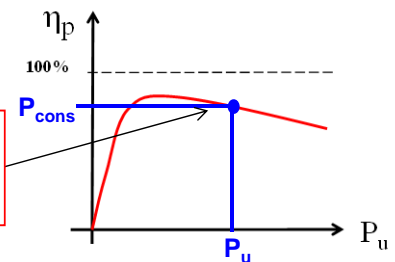
Du rendement instantané au rendement énergétique (sur cycle)

Rendement instantané ou en puissance :

Sur un point de fonctionnement particulier

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_{cons}} = \frac{P_u}{P_u + p_{loss}}$$

Puissance perdue ou dissipée

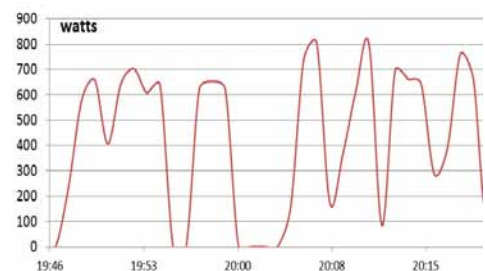


Rendement énergétique ou sur cycle :

Cycle = ensemble de points de fonctionnement rencontrés durant la réalisation d'un service

$$\eta_E = \frac{E_u}{E_{cons}} = \frac{\int_{cycle} P_u \cdot dt}{\int_{cycle} P_{cons} \cdot dt} = \frac{\int_{cycle} P_u \cdot dt}{\int_{cycle} \frac{P_u}{\eta_p(P_u)} \cdot dt} = \frac{E_u}{E_u + E_{loss}}$$

Énergie perdue ou dissipée sur tout le cycle



Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

Conclusion

Emissions de gaz à effet de serre (GES) associées à la seule phase de combustion

La combustion de 1 kg de carbone dégage 3,66 kg de CO₂

**Pouvoir calorifique et émissions de CO₂
relatives à la valeur énergétique de quelques combustibles**

Combustible (valeurs particulières)	Pouvoir calorifique inférieur PCI	Emission de CO ₂ par rapport à PCI en kgCO ₂ /kWh
Charbon (anthracite)	8,1 kWh/kg	0,35
Fuel domestique	11,6 kWh/kg	0,28
Gaz naturel	10,4 kWh/m ³	0,2

**Comparaison essence et gasoil,
effet de la densité et de la référence au litre :**

Essence : 2,37 kg CO₂/litre (12,2 kWh_{PCI}/kg, 0,75 kg/dm³)

Gasoil : 2,64 kg CO₂/litre (11,6 kWh_{PCI}/kg, 0,85 kg/dm³)

Emissions de GES associées au service

(La combustion d'un kilogramme de carbone émet 3,6 kg de CO₂)

Pour obtenir 1 kWh de **chaleur** à partir de gaz naturel, on rejette
entre 180 (100% du PCS) **et 200 g CO₂** (100% du PCI)

Pour produire 1 kWh d'**électricité** avec les
meilleures centrales thermiques au **gaz naturel** (rendement 60%),
il faut 1,7 kWh_{PCI} de chaleur ➡ rejet de **330 g CO₂**

Avec le **charbon**, on peut dépasser : **1 kg CO₂/kWh_e**

En France, 1 kWh nucléaire rejette 6 g CO₂ (moyenne mondiale : 60 g)

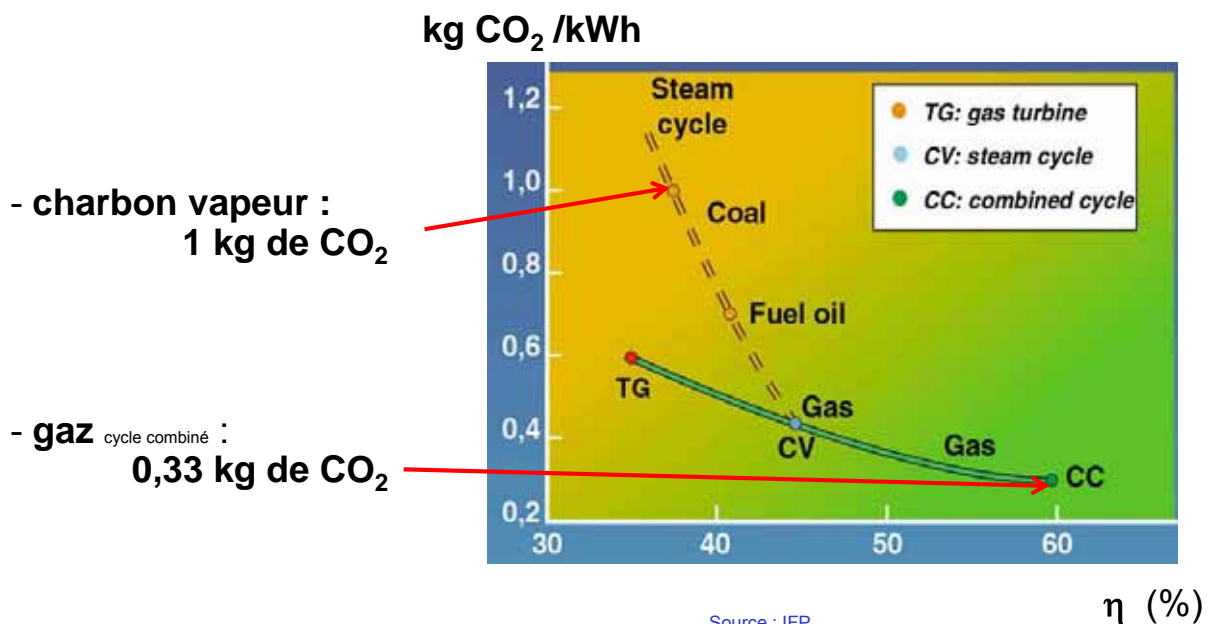
Et la **moyenne française** des émissions est d'environ **90 g CO₂ par kWh électrique**

Dans le cas de la **production électrique éolienne ou photovoltaïque** ou autre source
qui n'émet pas de gaz à effet de serre lors de la phase de conversion :
les **émissions sont liées aux phases de fabrication et de recyclage**,
donc à la quantité et au type d'énergie consommée.

C'est toujours bien plus faible que ce qui est produit avec les combustibles fossiles.

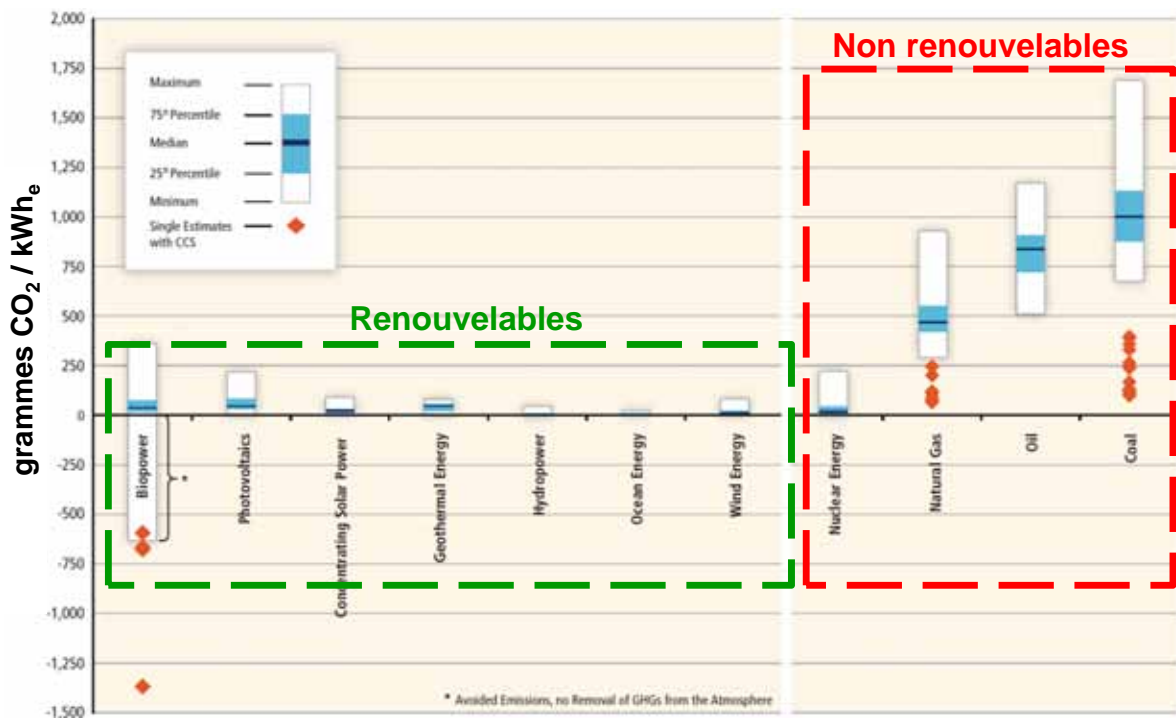
B. Multon ENS Rennes 31

Émissions de CO₂ de la production d'électricité des centrales thermiques à combustibles fossiles en fonctions du rendement



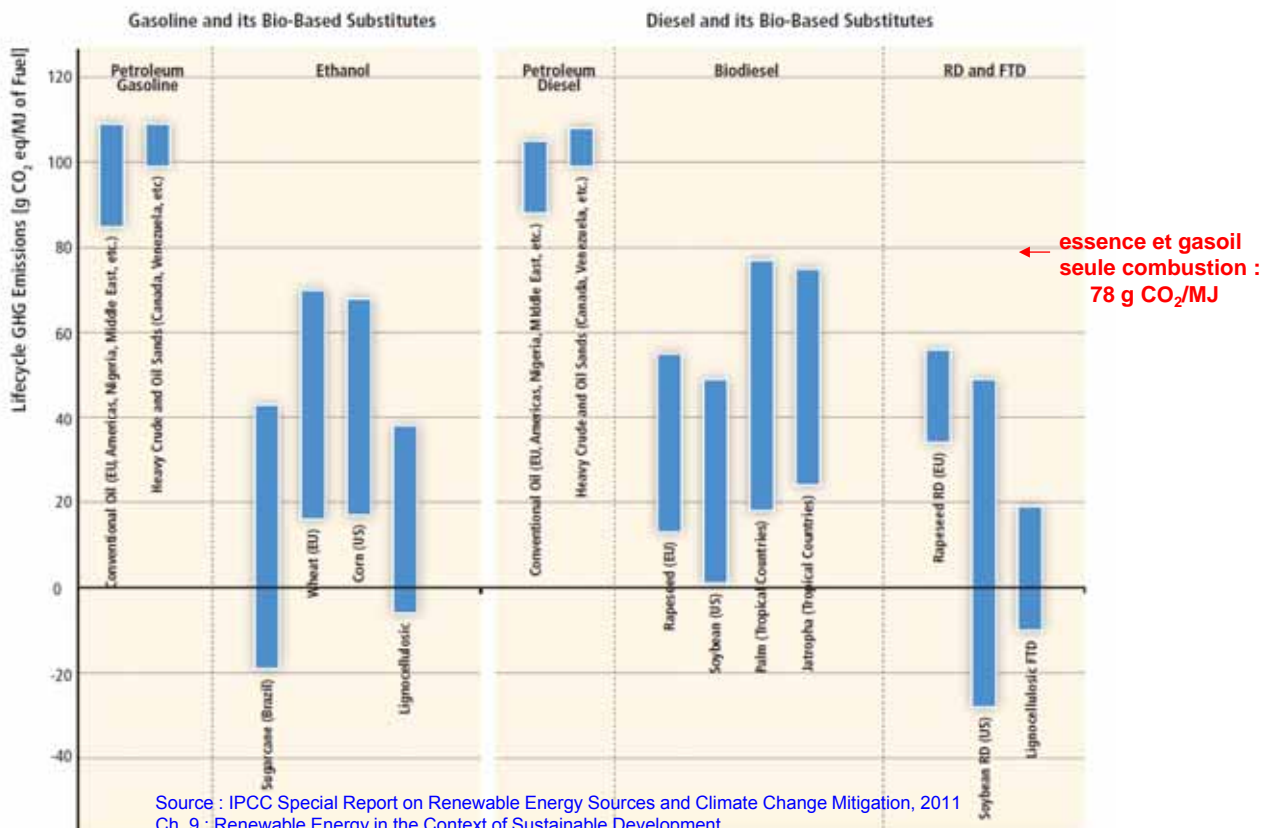
B. Multon ENS Rennes 32

Bilan des émissions de GES sur cycle de vie des diverses voies de 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

Bilan des émissions de GES sur cycle de vie des carburants (fossiles et agro)



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

Rejets de CO₂ d'un véhicule électrique pour la seule phase d'usage

Ils dépendent fondamentalement du mix énergétique de production électrique

1 kWh électrique en France : 90 g/kWh_e
en Europe : 400 g/kWh_e **en moyenne...**
au monde : 720 g/kWh_e

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

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

Rejets production d'électricité consommation électrique du véhicule

Avec de l'électricité au charbon (1 kgCO₂/kWh_e) : 200 gCO₂/km



Renault Kangoo bebop ZE



Nécessité d'une électricité « propre »
sinon le seul intérêt est de réduire la pollution locale

Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

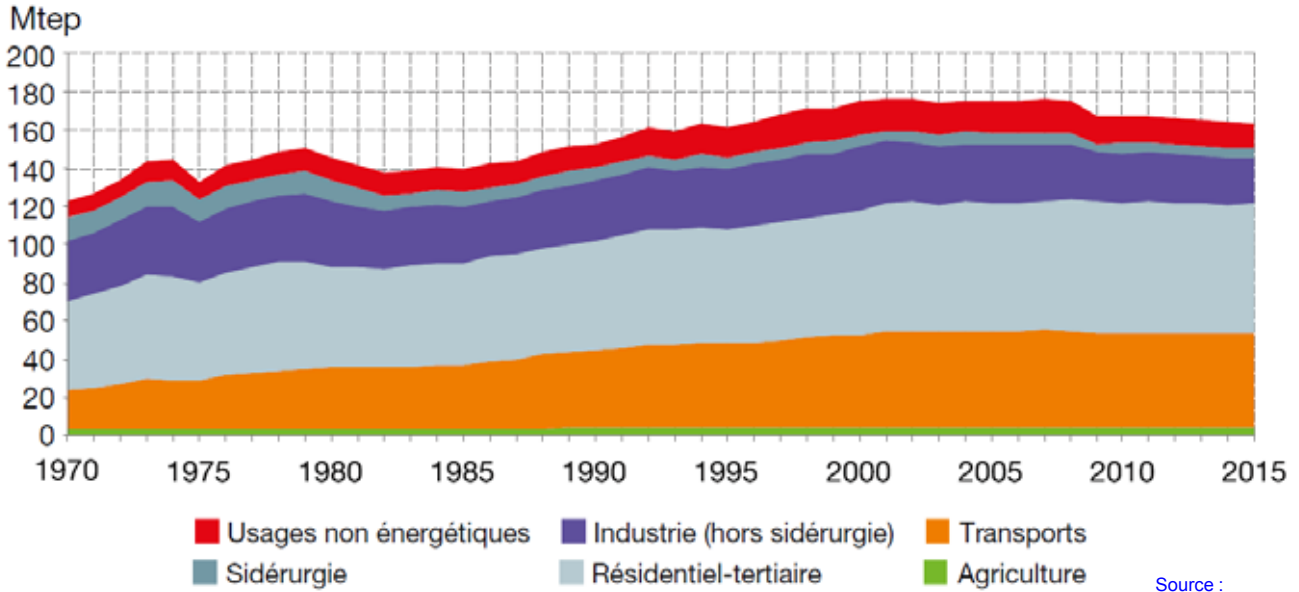
Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

Conclusion

Les services énergétiques et leur consommation

Bilan de **consommation finale** de la France, évolution 1970 – 2015

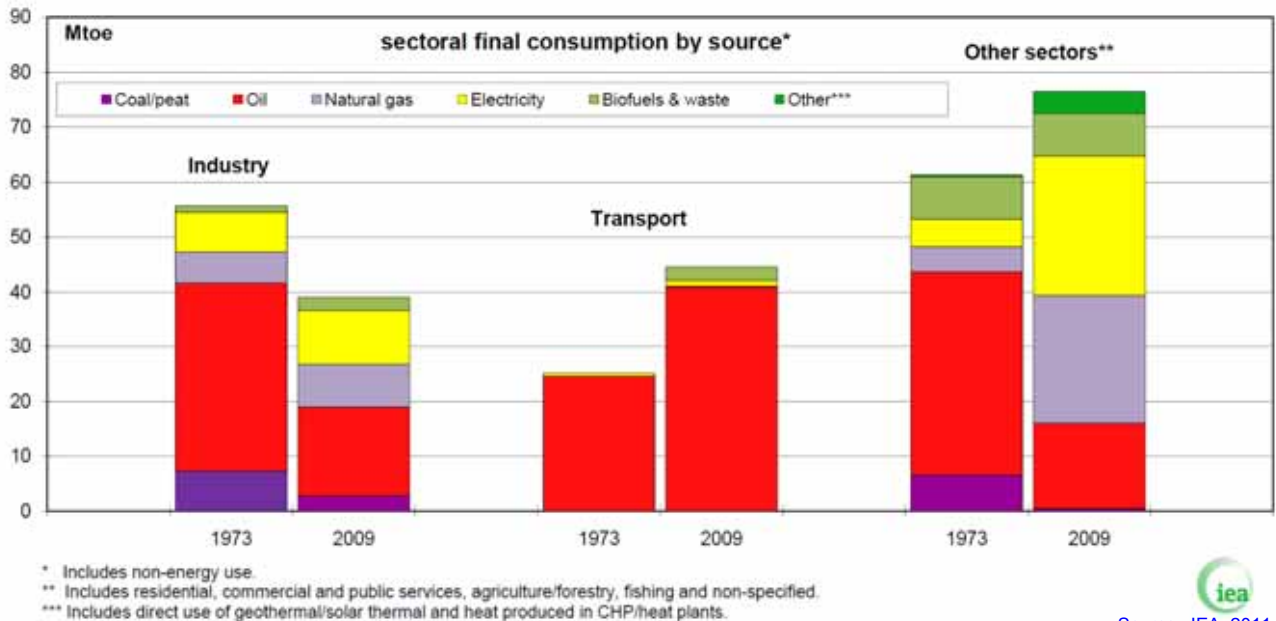


Entre 1973 et 2015, la consommation **finale** a crû de **134 à 162 Mtep** soit **21%**,
alors que la consommation d'énergie **primaire** (en annexe)
est passée de **169 à 257 Mtep** : **+60%**

B. Multon ENS Rennes 37

Les services énergétiques et leur consommation

Bilan de consommation finale de la France par formes d'énergie



La part de l'électricité croit dans tous les secteurs

La part des carburants pétroliers est totalement dominante dans les transports

Les secteurs transports, habitats et tertiaires dérivent...

B. Multon ENS Rennes 38

Du convertisseur d'énergie au système énergétique

Cas de l'éclairage :

et à son usage

Technologie de la source de lumière,

le rendement lumineux s'exprime en **lumens/watt** :



≅ 15 lm/W



50 à 100 lm/W

Rendement lumineux



60 à 120 lm/W

De la source au luminaire :



lm (lumen) = unité de puissance lumineuse

(10 lm/W correspondent à 1,8% de rendement en lumière blanche !)

η Incandescence 3 à 5%, fluorescence 15 à 30%, luminescence : 20 à 40%

Ce qui compte : l'éclairage (flux lumineux reçu en **lux** : 1 lux = 1 lumen/m²),
il décroît avec le carré de la distance et dépend fortement du luminaire...
Et les recommandations sont excessives : 200 lux suffisent dans un bureau.

B. Multon ENS Rennes 39

Le cas de l'éclairage (suite) :

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

des attentes très variables

Solution Versailles !



Sources optimisées



**Intelligence
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



+ l'allumage commandé par le besoin ou la puissance ajustable.
Les comportements et la technologie (détecteurs de présence, régulation...)
offrent des perspectives de réduction énormes de consommation





L'efficacité se mesure en kWh/an/m² ou en kWh/an/m de rue...

B. Multon ENS Rennes 40

Le cas de l'éclairage (suite) :

Éclairage intérieur secteur tertiaire : moyenne nationale environ 40 kWh/m²,
facile à abaisser à 10 kWh/m²

Exemple d'amélioration par la technologie des tubes fluorescents et par les luminaires
Pour un éclairage de 450 lux (alors que la moitié est meilleure pour la santé...) :

	Commande filaire		IR+DM+CP	
	W / m ²	W / m ² /100 lux	kWh / m ² /an*	kWh / m ² /an*
 2 X 55w	19,09	4,55	47,74	24,40
 4 X 18w	13,99	3,48	34,98	17,88
 3 X 14w	10,56	2,46	27,15	13,88
 3 X 14w HFD	8,56	2,25	21,40	10,94

*2500 heures/an

RT 2005

RT 2010 - 15%

← HFD = dimmable par télécommande (action de l'utilisateur facilitée)

Source :
Philips Lighting, Avril 2008

Et avec des **panneaux à LED** et, surtout, une plus grande tolérance aux arrêts/marches => **5 kWh/m²/an**

B. Multon ENS Rennes 41

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 :

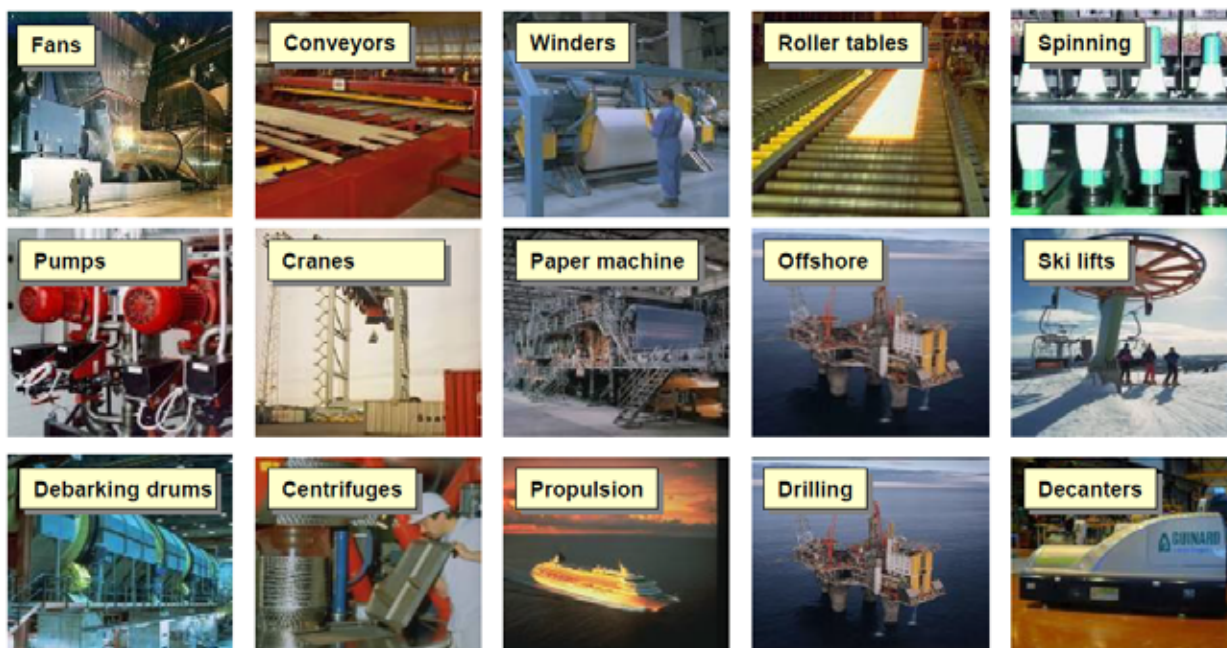
Consommation de l'ordinateur (portable vs PC de bureau),
le choix de la puissance de la machine et ses périphériques,
l'utilisation des modes économies, l'arrêt du PC...



B. Multon ENS Rennes 42

L'industrie

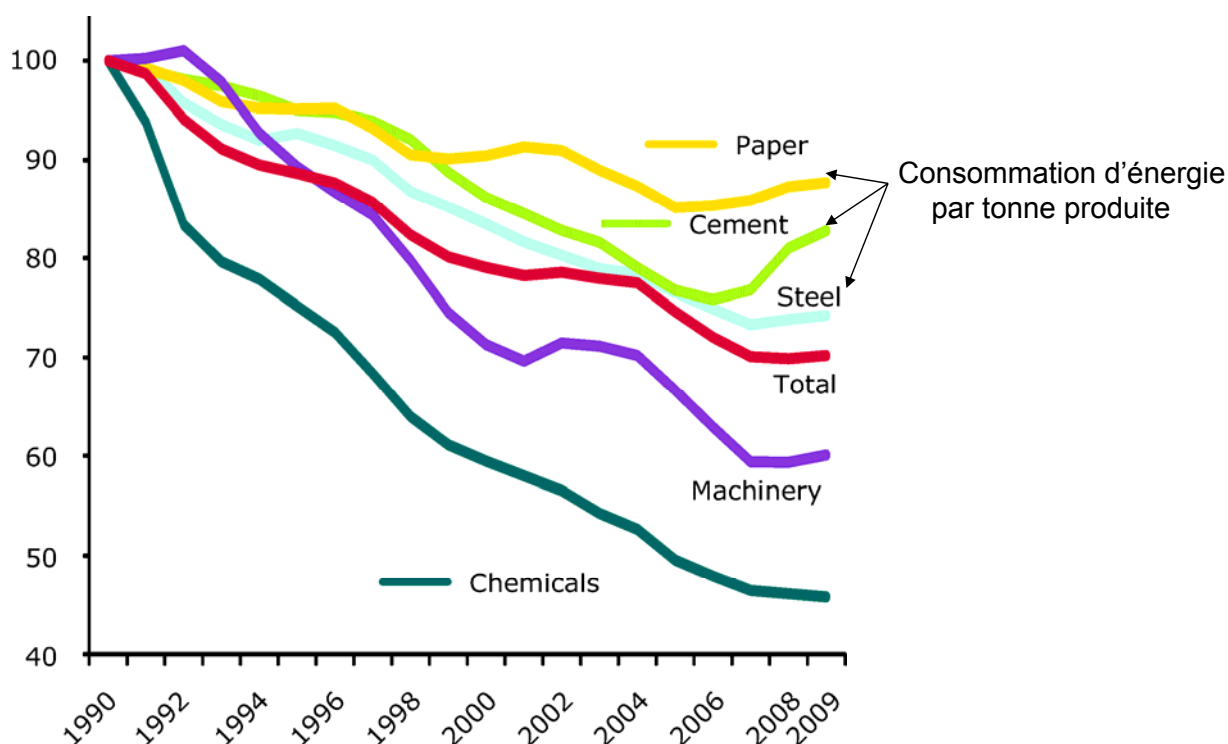
Une grande diversité de situations, quelques exemples :



Source : B. Eschermann (ABB), ECPE 29 jan. 2007

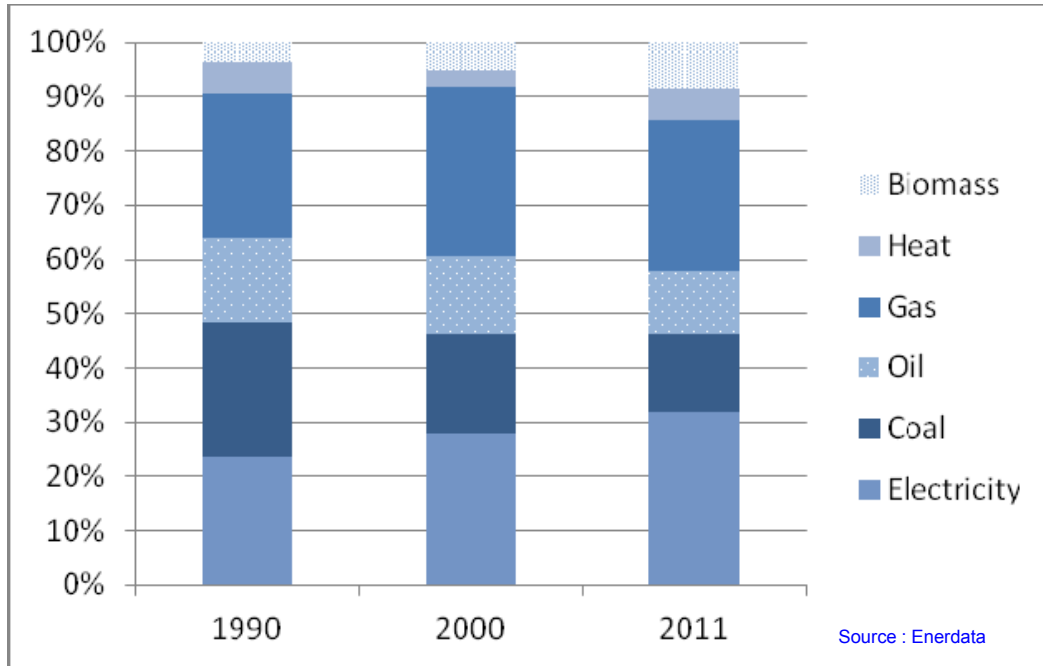
L'industrie

L'efficacité s'améliore :
Cas de l'ODEX (Energy efficiency index of industry) pour la zone EU-27



L'industrie

Évolution de la part des **sources d'énergie finale** pour l'industrie en Europe

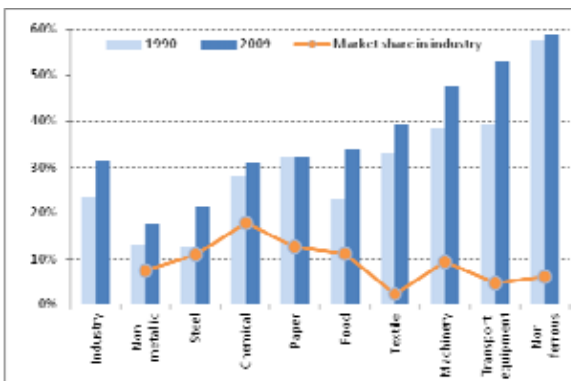


L'électricité et la biomasse progressent, le charbon et le pétrole reculent

L'industrie

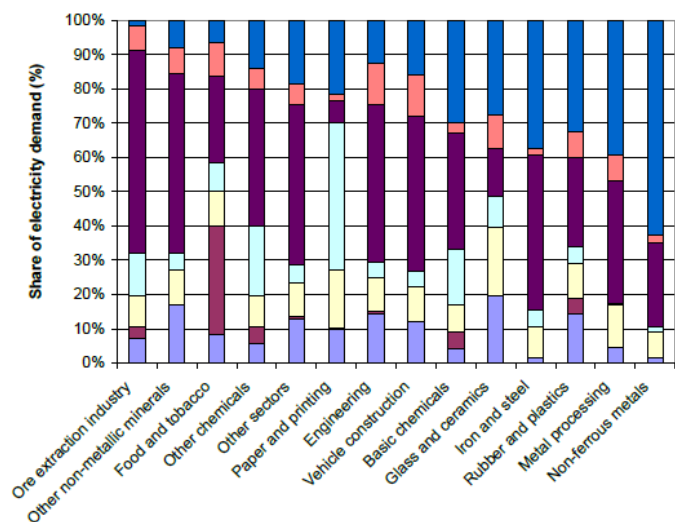
Part de l'**électricité** selon les branches industrielles en Europe

(+ parts mondiales de marché)

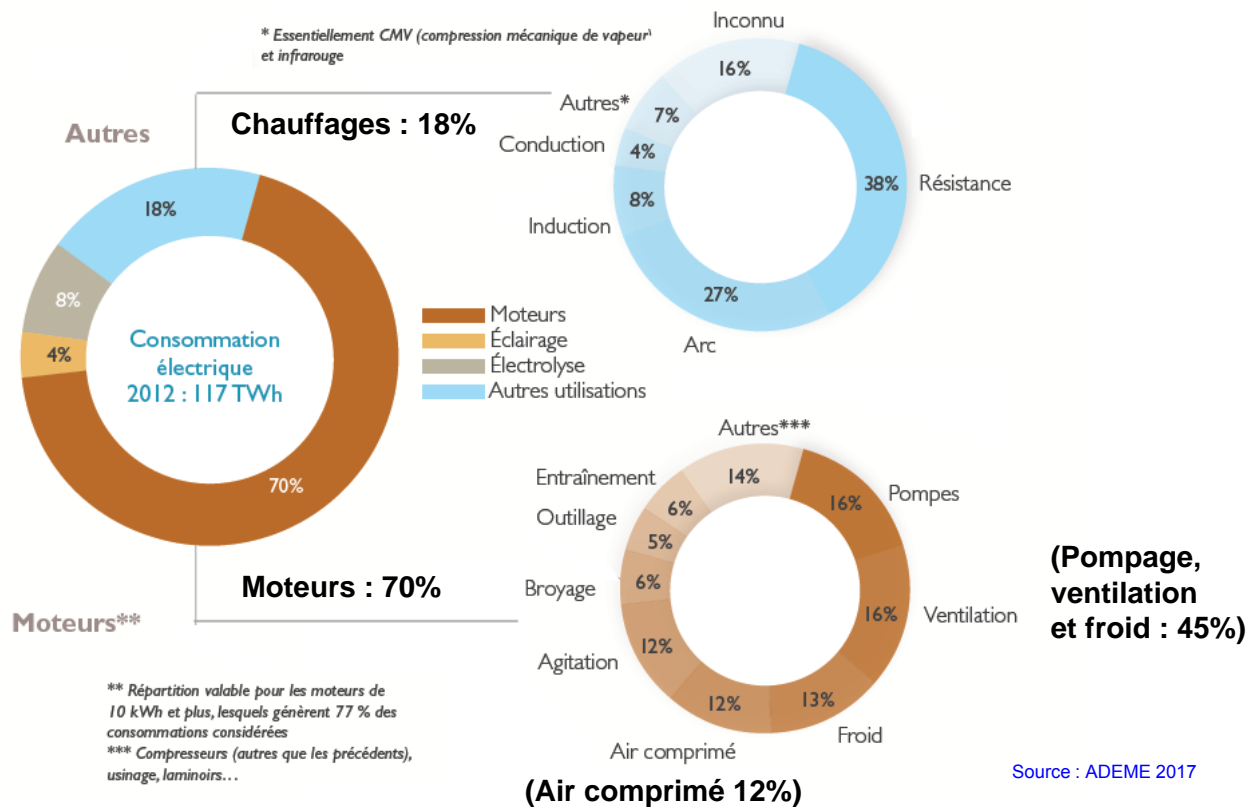


- Process technology
- Lighting
- Other motors
- Pumps
- Ventilation
- Cold supply
- Compressed air

Usages de l'électricité au sein de chaque branche

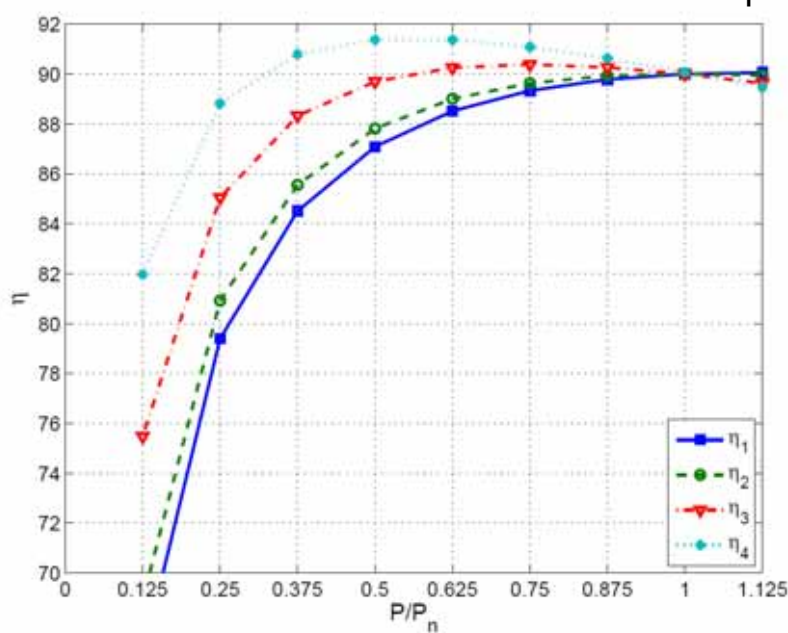


Consommation d'électricité dans l'industrie en France (117 TWh en 2012)



Les moteurs électriques

Le rendement dépend du point de fonctionnement et l'allure de la courbe dépend du design du moteur :



Leur rendement est déjà élevé, et l'essentiel du potentiel d'économie d'énergie se trouve en aval du moteur, mais il peut être enore amélioré

Les moteurs électriques (suite)

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

IE1 – Standard (équivalent EFF2 ancienne norme 1998)

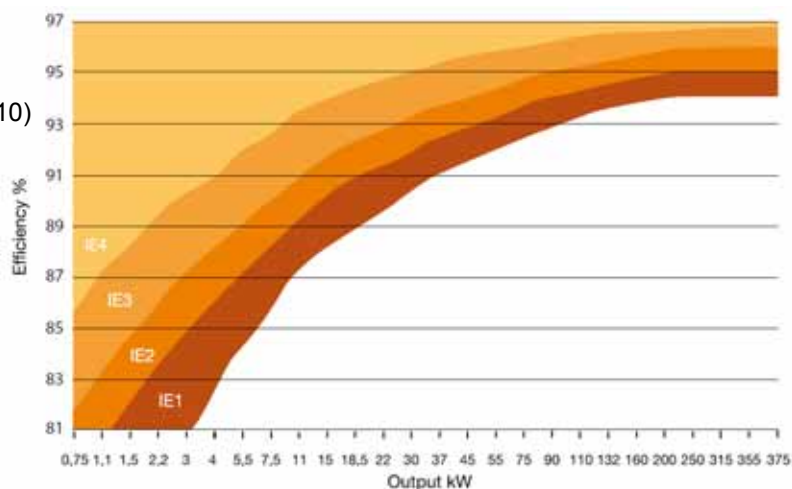
IE2 – High (équivalent EFF1)

IE3 – Premium

IE4 – Super Premium (depuis 2010)

Concerne le rendement
à la **puissance nominale**
des moteurs 2, 4 et 6 pôles

Exemple des 4 pôles :



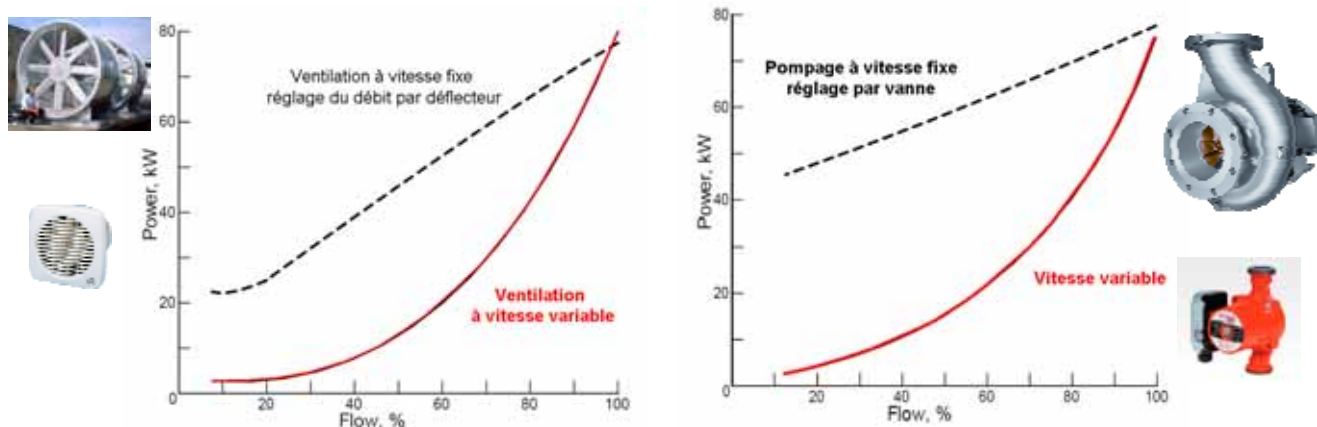
Rendement sur cycle : attention, le surdimensionnement d'un moteur conduit à de plus faibles rendements à faible charge.

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

Les moteurs électriques (suite)

Le **principal gain d'efficacité** énergétique dans les systèmes entraînés par des moteurs se trouve dans les process, et la **vitesse variable** est souvent un important facteur d'amélioration.

En pompage, ventilation, compression, des réductions très significatives :



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

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

Les variateurs de vitesse électroniques

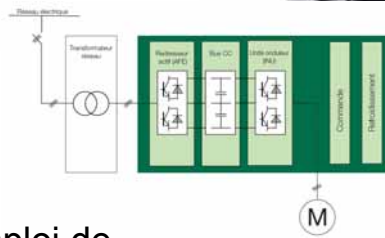
Applicables à tous les domaines : industrie, bâtiments, distribution d'eau, propulsion... du watt à la centaine de MW



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



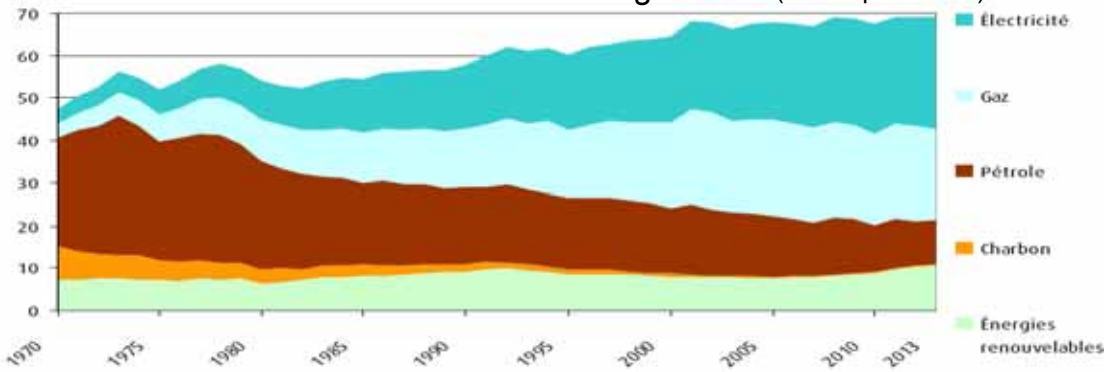
Gamme ACS 2000 ABB (250 kW à 1,6 MW)



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

Les bâtiments résidentiels et tertiaires

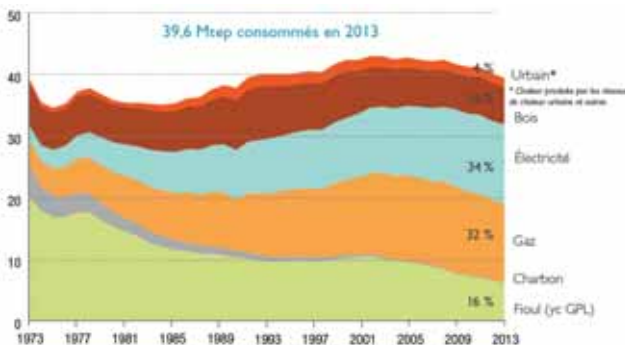
Ils consomment une très grande part de l'énergie en France :
de 45% de l'énergie finale (69 Mtep en 2013)



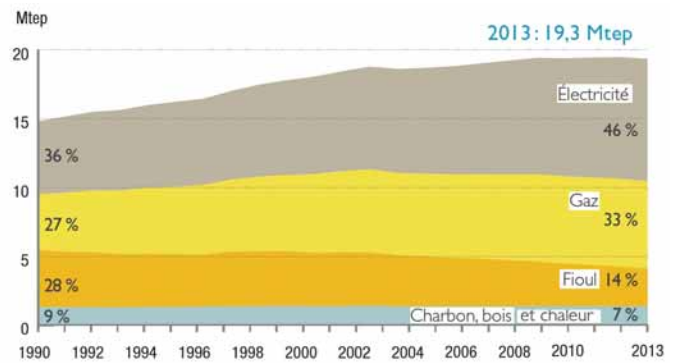
Source : DGEC, 2014

Secteur résidentiel : énergie finale tous usages

Secteur tertiaire : idem

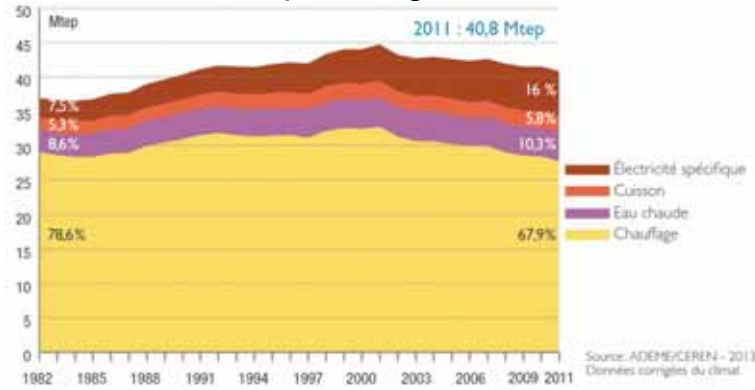


Source : Chiffres clés, ADEME, 2017



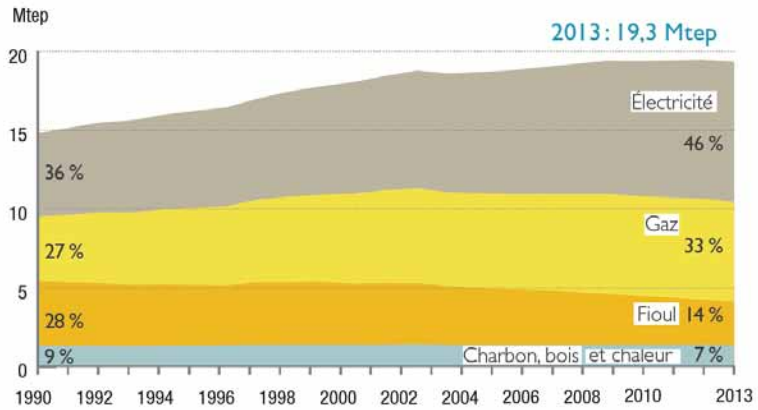
Les bâtiments résidentiels

Consommations par usages (résid. principales, bois compris) :



Source : Energie Climat chiffres clés ADEME 2013

Modes de chauffage des résidences principales :

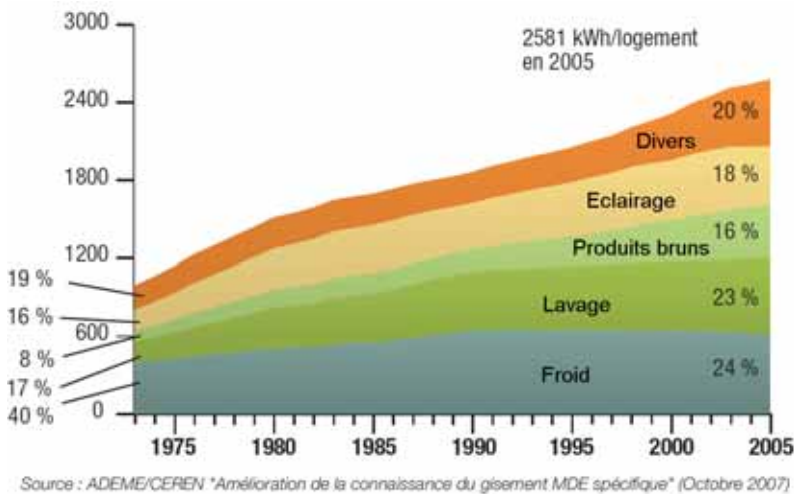


Source : Energie Climat, chiffres clés, ADEME, fev. 2017

B. Multon ENS Rennes 53

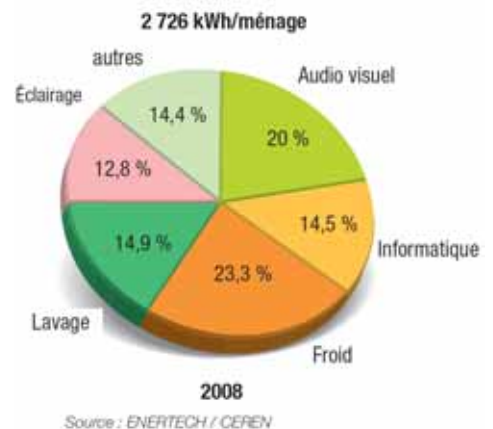
Les bâtiments résidentiels

Consommations d'électricité spécifique par logement :



Source : Energie Climat chiffres clés ADEME 2009

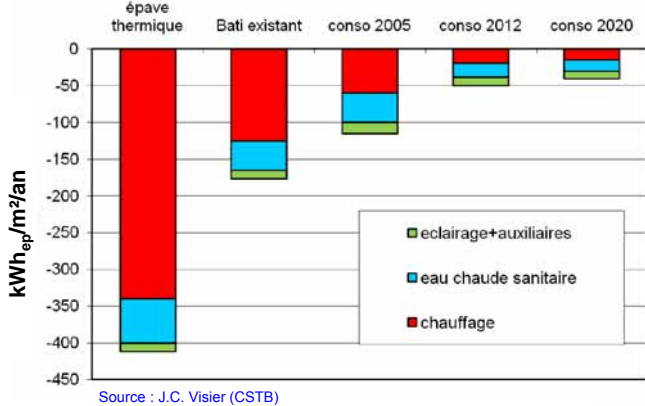
par logement (2008) :



B. Multon ENS Rennes 54

Les bâtiments : des systèmes complexes

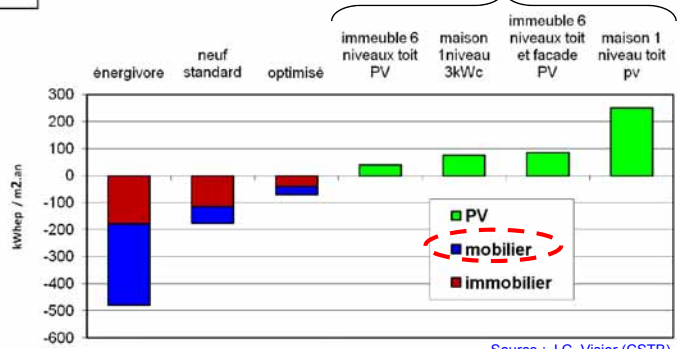
Les consommations normalisées (chauffage, ECS, ventilation et éclairage) s'expriment en kWh_{ep}/m²/an (hors énergie grise)



Source : J.C. Visier (CSTB)

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

+ possibilité d'autoproduction PV :



Source : J.C. Visier (CSTB)

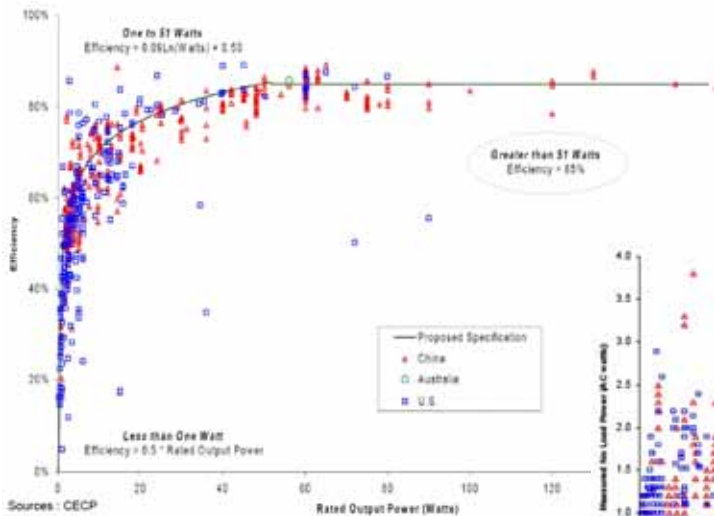
Consommation du « mobilier » (cuisson, « électricité spécifique ») non négligeable surtout si le bâtiment est performant :

L'énergie grise (sur 50 ans) peut représenter de 20 à 100 kWh_{ep}/m²/an

Les alimentations électroniques

Des rendements globalement faibles et des consommations de veilles...

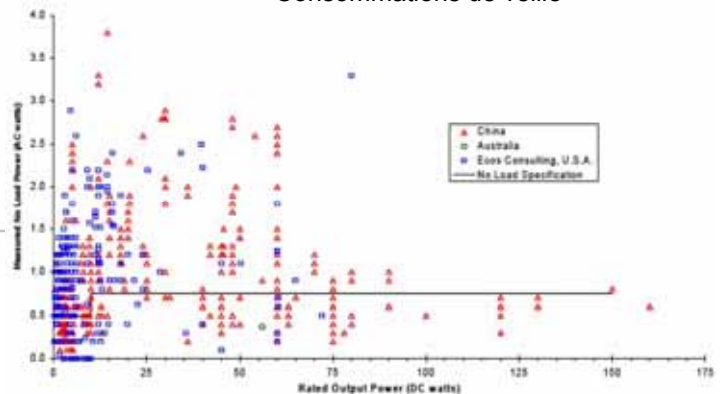
Rendement nominal d'alimentations externes



La valeur du rendement nominal résulte d'un dimensionnement à coût minimal...

Source : U. Kirchenberger (STM), ECPE 29 jan. 2007

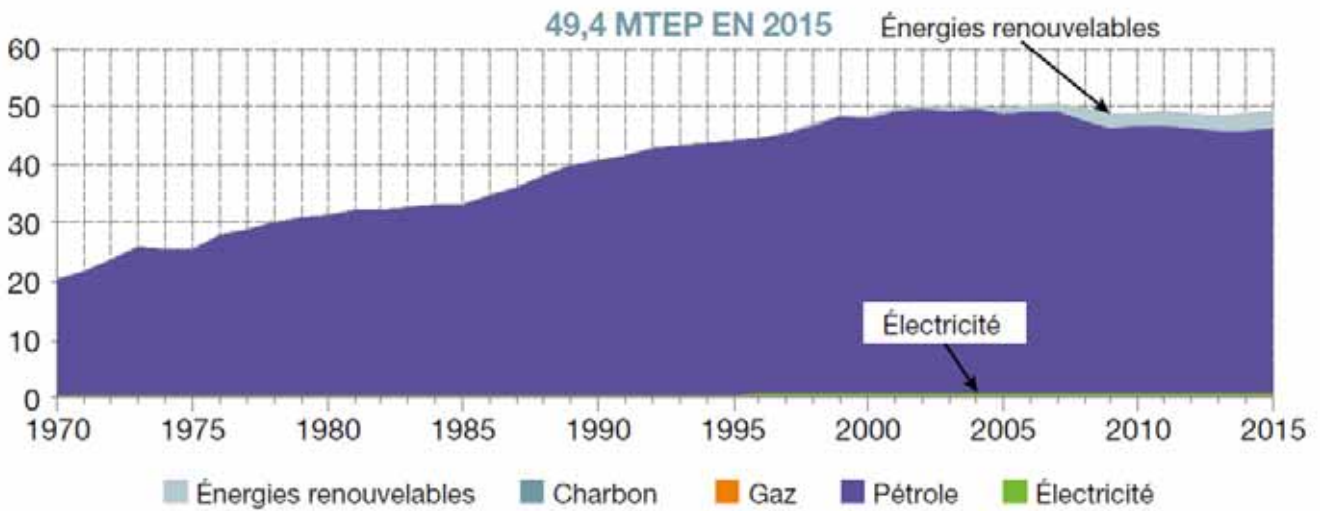
Consommations de veille



De gros progrès ces dernières années, avec des veilles de l'ordre de 0,1 W et moins

Les transports

En deuxième position après les bâtiments, ils consomment (en France)
33% de l'énergie finale (part en hausse)

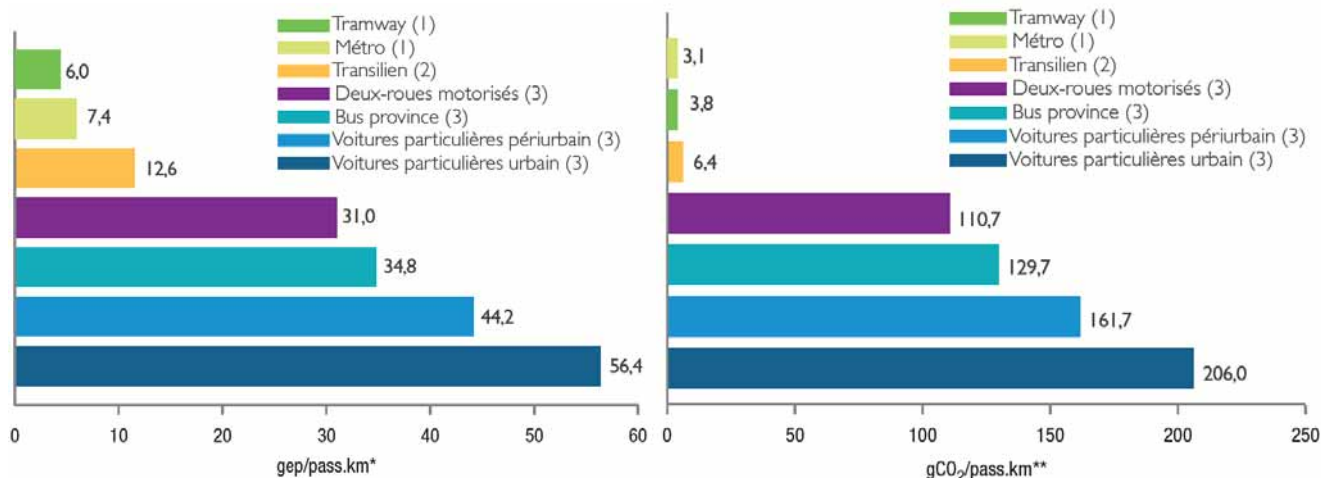


La part des combustibles pétroliers reste largement dominantes
(agrocarburants = 6%)

Source : Energie Climat, chiffres clés, ADEME, fev. 2017

Les transports

A titre d'exemple : comparaison des modes urbains et péri-urbains
en énergie (incluant énergie grise) et émissions de GES
(incluant production carburant)

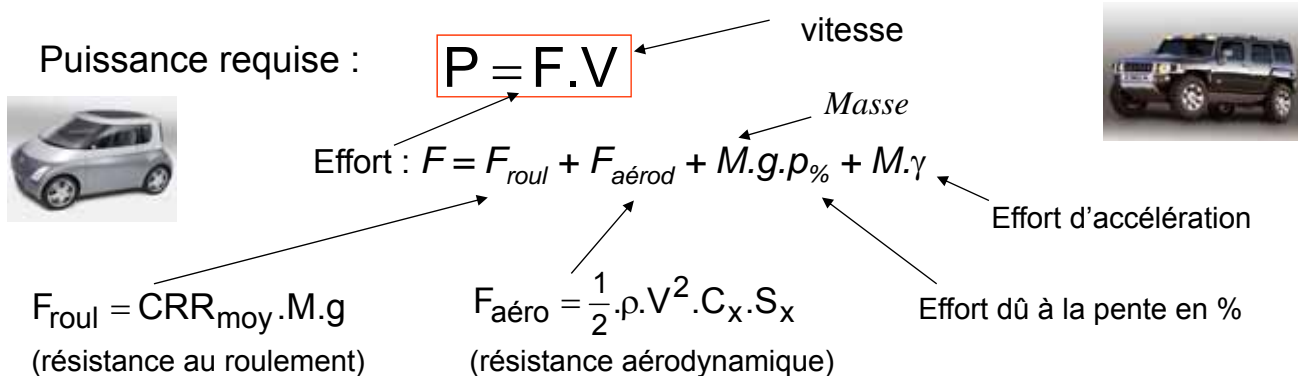


* gep = gramme équivalent pétrole,
1 gep = 11,6 Wh

Source : Energie Climat chiffres clés ADEME 2015

Importance du taux de remplissage (non spécifié dans ce rapport),
du mode de conduite (cycles normalisés)...

Véhicules terrestres : influence de la masse roulante



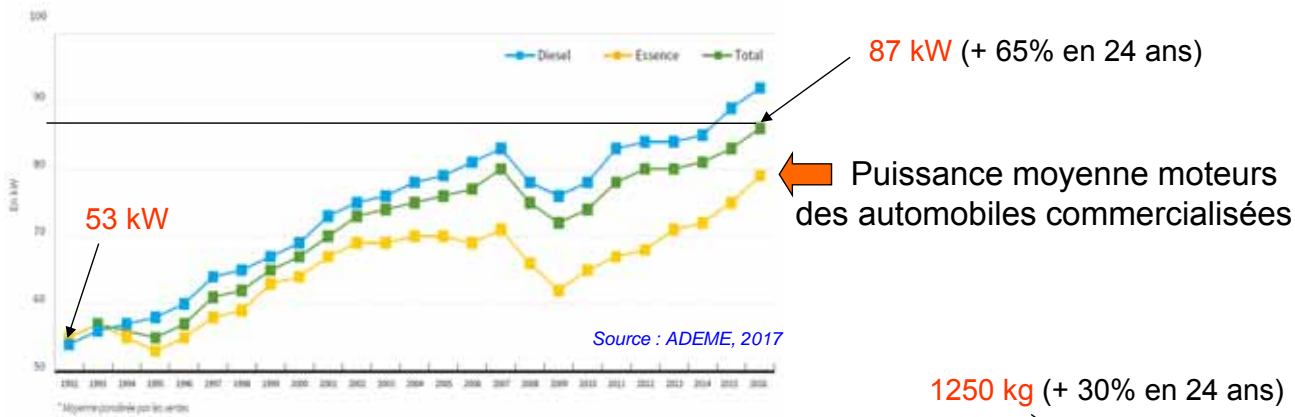
En cycle urbain (vitesses faibles) : $F \propto M$ et $P \propto M \cdot V$

+ 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 : $P \propto K \cdot M^a \cdot V^3$

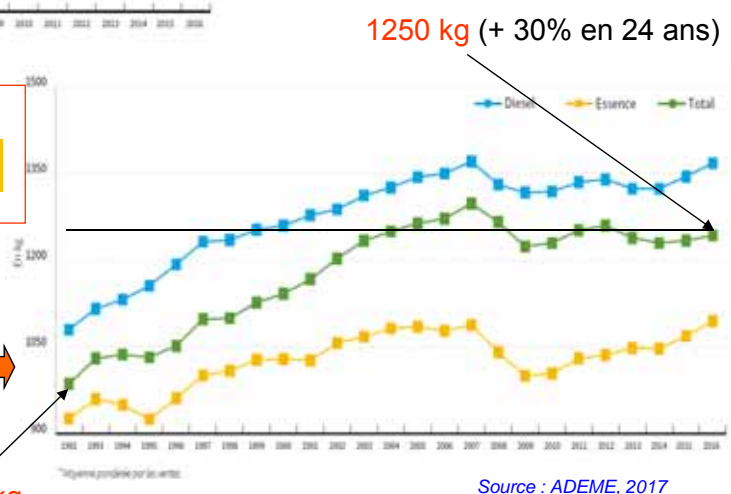
Evolution 1992-2006 du parc automobile français



Avec moteur réel à 90 km/h : $P_u = 14$ kW
 Si $P_n = 87$ kW ($P/P_n = 16\%$) : $\eta \cong 22\%$ **conso + 22%**
 Si $P_n = 53$ kW ($P/P_n = 26\%$) : $\eta \cong 28\%$

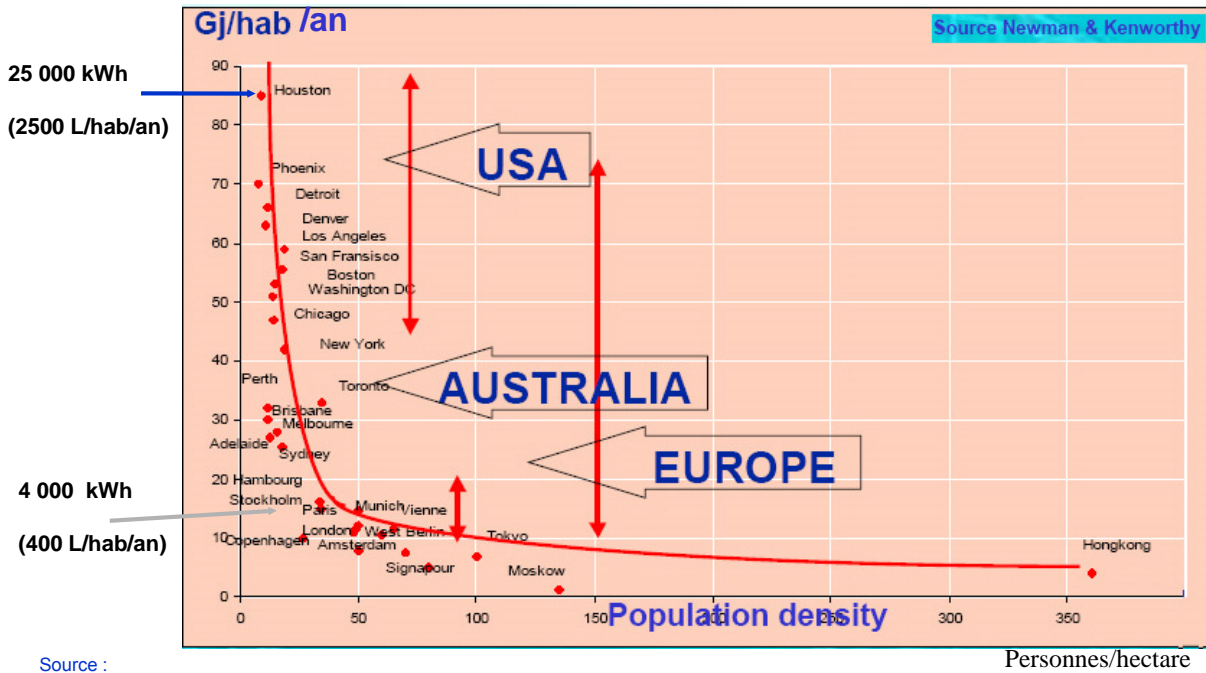
Les moteurs surdimensionnés surconsomment

Masse moyenne des automobiles →
 Consommation à peu près proportionnelle à la masse



Influence de l'urbanisme, des infrastructures...

L'étalement des villes accroît la consommation des transports



Source : Newman, P. and J. Kenworthy (1999) Sustainability and Cities : Overcoming Automobile Dependence, New York: Island Press

Et les investissements énergétiques routiers sont considérables :
 en France (étude DRAST 2007) : 1 km de 4 voies > 450 tep (5,2 GWh_{PCI})

Évaluation des solutions possibles : de la source d'énergie primaire à l'usage

- Source d'énergie primaire : Fossile, fissile, solaire...
- Forme d'énergie transportée : Essence, gasoil, éthanol, diester, méthane, hydrogène, électricité...
 Avantage des carburants liquides : 10 kWh/kg, 0,15 kWh/kg pour l'électricité
 environ 1 kWh/kg pour l'hydrogène avec son réservoir...)
- Chaîne de conversion : MCI, hybride, PAC + ME, tout électrique
- Véhicule : sa taille, sa masse, son aérodynamisme, le dimensionnement de sa chaîne de traction...
- Comportements : usages, mode de conduite...
- Infrastructures de transports : emprise routière, parkings...
- Coûts sociétaux : accidents, « morts prématurées » dues à la pollution...

Sachant qu'il existe de nombreux couplages entre tous ces volets...

Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

Conclusion

Engagements de la France : Plan Climat

Objectifs européens du Paquet énergie-climat (oct. 2014) pour 2030 (après le 3 x 20 de 2008 pour 2020)

- 40% d'émissions de GES par rapport à 1990 (-20% dans le 3 x 20) ;

27% : part d'énergie renouvelable dans la consommation finale (20% dans le 3 x 20) ;

+ 27% d'efficacité énergétique (20% dans le 3 x 20)

Engagements de la France pour 2030

(Loi de transition énergétique pour la croissance verte août 2015) :

remise en question par le gouvernement en nov. 2017...



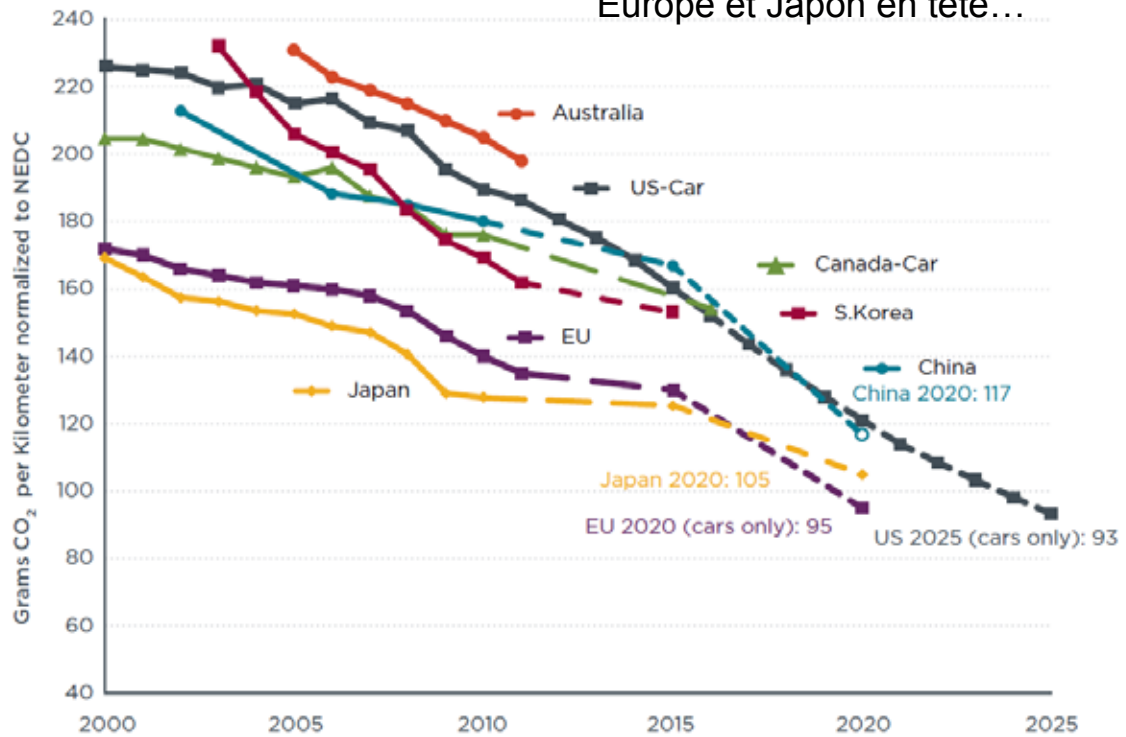
Sources : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

Nouveaux engagements européens encore plus ambitieux fin nov. 2017

à transposer dans les lois nationales

Automobiles : baisse théorique des émissions (normalisées)

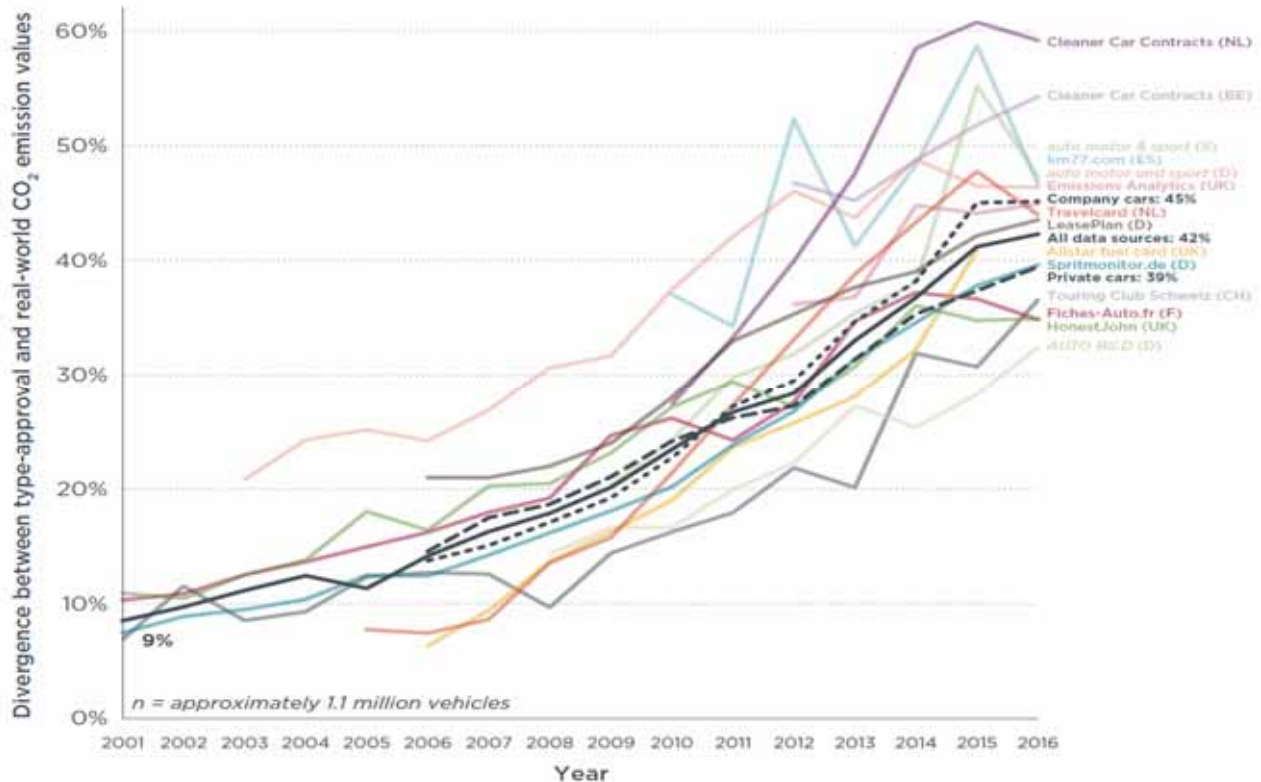
Une politique d'incitation des constructeurs à réduire les émissions de CO₂/km
Europe et Japon en tête...



Source : International Council on Clean Transportation (ICCT), 2012

Automobiles : mais... réalité des consommations

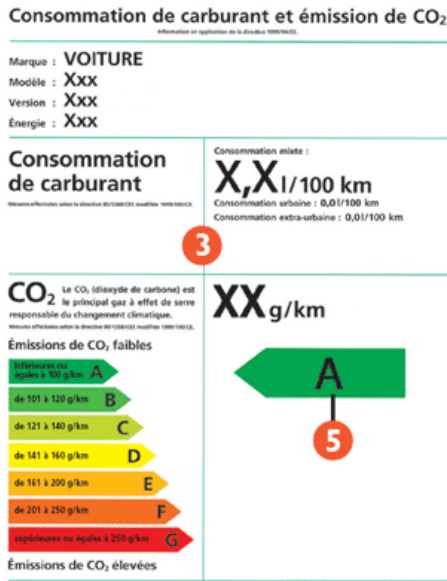
qui dérapent par rapport aux spécifications des constructeurs...



Source : From Laboratory to Road. A 2017 Update of Official and 'Real-World' Fuel Consumption and CO₂ Values for Passengers Cars in Europe, ICCT, TNO, nov. 2017

Automobiles

Étiquetage énergétique en Europe L/100 km et CO₂/km



Un raisonnement mono-impact aux effets pervers : environ 20 000 morts (prématurés) par an en France à cause des seules particules fines de diesel.



Normes Euros : autres émissions

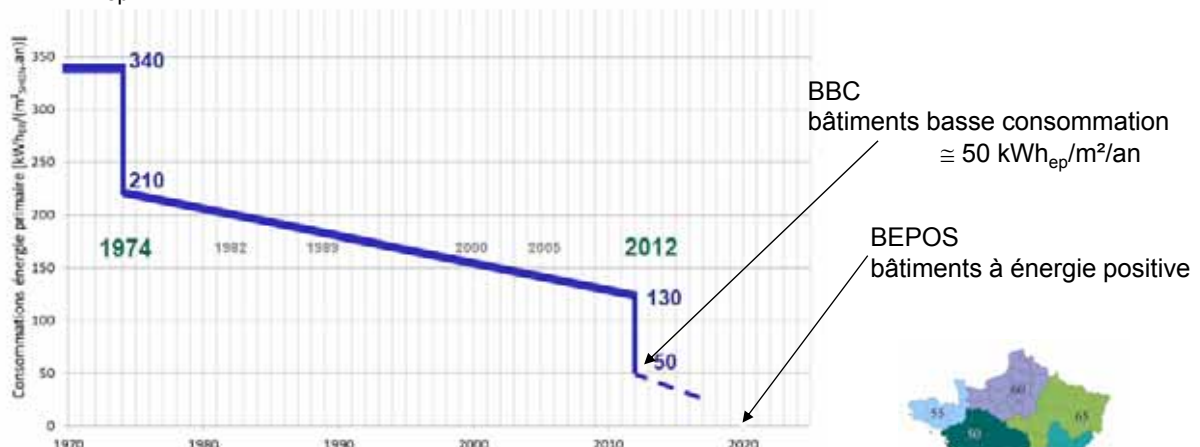
Norme Euro	A partir de	Essence				Diesel			
		CO	HC	NOx	PM	CO	HC+NOx	NOx	PM
Euro 1	1/7/1992	2,72	0,5335	0,4365	-	2,72	0,97	0,873	0,14
Euro 2	1/7/1996	2,3	0,275	0,225	-	1	0,7	0,630	0,08
Euro 3	1/1/2000 1/1/2001	2,3	0,2	0,15	-	0,64	0,56	0,500	0,05
Euro 4	1/1/2005 1/1/2006	1,0	0,1	0,08	-	0,5	0,3	0,250	0,025
Euro 5	1/9/2009 1/1/2011	1,0	0,1	0,06	0,005	0,5	0,23	0,180	0,005
Euro 6	1/9/2014 1/9/2015	1,0	0,1	0,06	0,005	0,5	0,17	0,080	0,005

Mais toujours pas de prise en compte de l'ensemble du cycle de vie.

Bâtiments résidentiels

En France évolution des réglementations thermiques

En kWh_{ep}/m²/an incluant chauffage/climatisation, ECS, éclairage et auxiliaires



Valeurs modulées selon zone climatique et altitude

RT2012, coefficients règlementaires pour le calcul de l'énergie primaire :

1 pour le fioul, le gaz, le bois (0,6 dans la RT2005)...

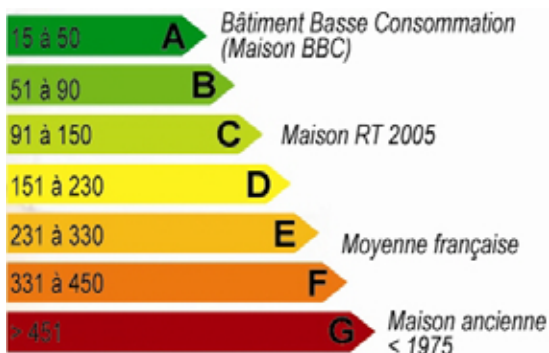
2,58 pour l'électricité

Intérêt très fort pour exploiter (enfin) les apports naturels du soleil.

Bâtiments résidentiels

Étiquette énergie :

$\text{kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2/\text{an}$ incluant chauffage/climatisation, ECS, éclairage et auxiliaires



Atteindre le niveau A nécessite :

- une très bonne isolation avec une haute étanchéité à l'air,
- une bonne inertie thermique (confort d'été)
- une ventilation contrôlée,
- un mode de chauffage performant (bois, gaz, pompe à chaleur)
- une production d'ECS performante (chauffe-eau solaire, PAC...)
- un éclairage basse consommation...

Et beaucoup de soin !

Electroménager : lave linge

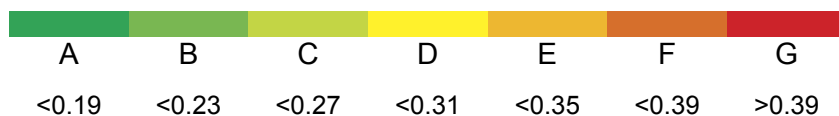
Avant 2010 :

Les performances des lave-linge sont calculées sur la base d'un cycle 60°C avec du coton à la charge maximale (typiquement 6 kg).

Indice de performance :

kWh/kg de linge avec une eau arrivant à 15°C (la part du chauffage de l'eau est très significative)

Etiquetage lave Linge (avant 2010 en kWh/kg)

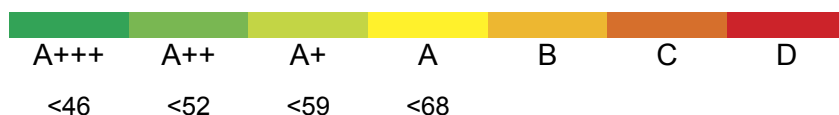


Après 2010 :

Les performances des lave-linge sont calculées sur la base de plusieurs cycles, dont 60°C avec du coton à la charge maximale et ½ charge 60°C et 40°C.

Indice de performance : kWh et Litres par an

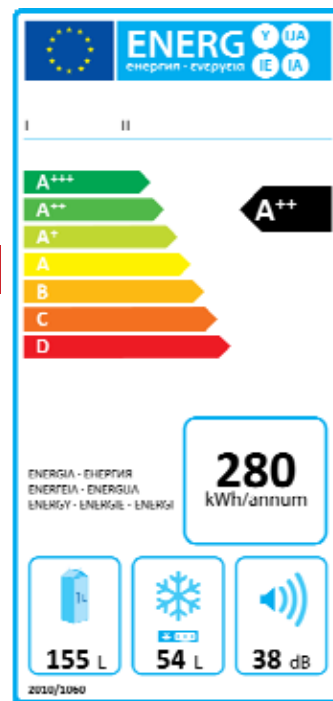
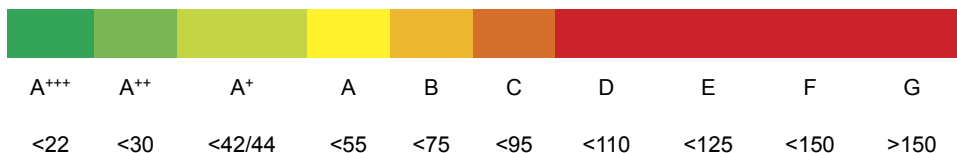
Etiquetage lave Linge après 2010 : en kWh/an



Electroménager : réfrigérateurs...

Réfrigérateur, congélateurs, combinés, caves à vin...
 Energy Efficiency Index : consommation annuelle
 relativement à la capacité et à la fonction (réfrigération, congélation)
 La limite entre les performances A+ et A
 est passée au 1er juillet 2014 de 44 à 42 kWh/an

Refrigerating appliances, as EEI



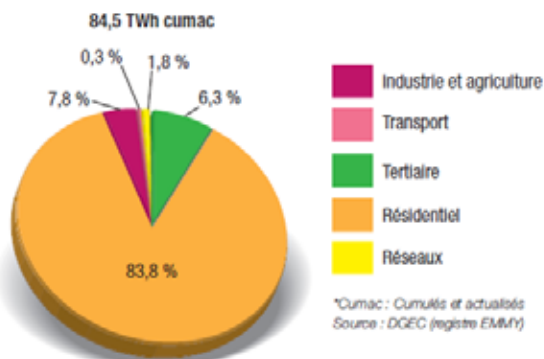
Incitations via les Certificats d'Economie d'Energie

Ce mécanisme conduit les vendeurs d'énergie à faire faire des progrès d'efficacité énergétique à leurs clients, via une incitation économique.

La compatibilité se fait en **kWh CUMAC** :
 énergie finale cumulée et actualisée (4%) sur la durée de l'action

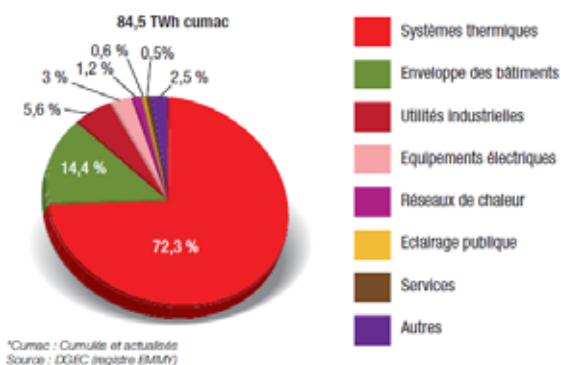
Certificats d'Economie d'Energie (CEE)
 Répartition des TWh cumac* par secteur sur la période 2006-2009

Actions réalisées sur la première période (2006-2009), soit enregistrées sur le registre au 30/09/09



Certificats d'Economie d'Energie (CEE)
 Répartition des TWh cumac* par action sur la période 2006-2009

Actions réalisées sur la première période (2006-2009), soit enregistrées sur le registre au 30/09/09

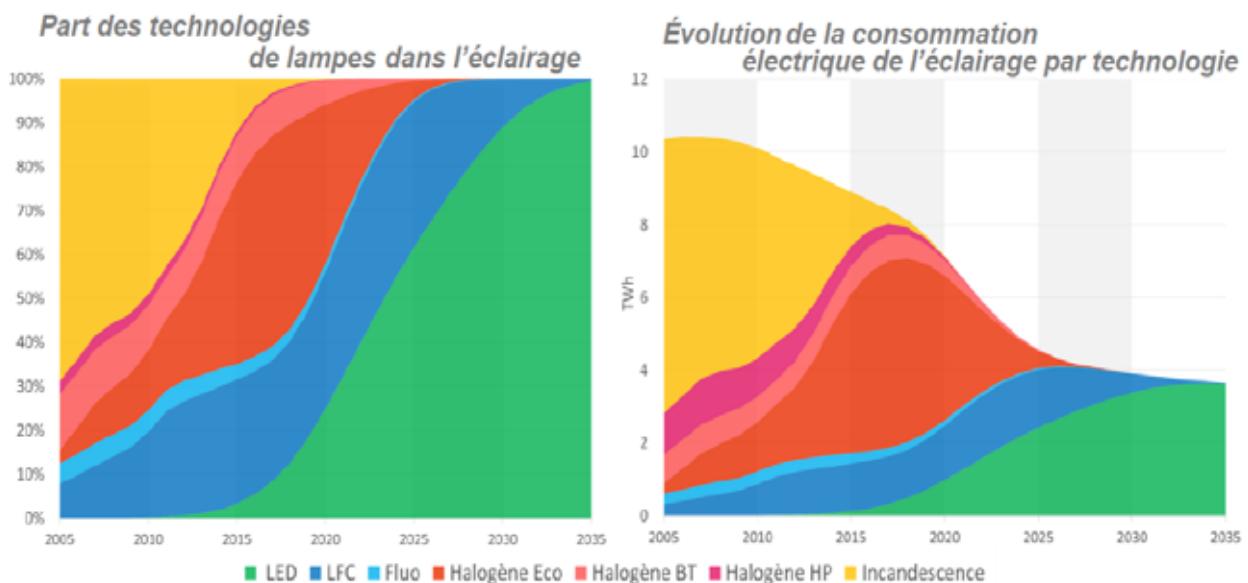


Le rôle majeur de l'électronique de puissance et de contrôle dans l'efficacité énergétique des systèmes électriques

Energy Split		Energy saving potential		Key technology	
Consumers electrical energy	Power supply: - stand-by, - active, ... - Computing	I&C Others 24%	- stand-by - active 80+ / 90+	>90% >>1% >>1%	CoolMOS, SiC Smart control IC CoolSET Low cost μ C
	EC-Ballast Daylight dimming HID, LED, ...	Lighting 21%	Electronic control	>25%	CoolMOS Smart ballast IC Low cost μ C
	Factory autom. Process engineering Heavy industry, Light industry, ...	Motor control 55%	Variable Speed Drive (VSD)	>30%	IGBT Modules CiPOS EMCON CoolMOS CT
	Transportation: Train, Bus, Car, ...		VSD + Reverse Energy	>25%	Optimized μ C 8 bit / 16 bit / 32 bit
	Home appliance: Freedge, WM, HVAC		VSD	>40%	

Source : Leo Lorenz, Conf. INIFNEON, 14 jan. 2010

Un exemple d'impact des progrès technologiques et de la réglementation : l'éclairage résidentiel



Source : issu d'un document de travail de RTE non publié (études de trajectoire du bilan prévisionnel), juillet 2017

Énergie et puissance

Rendements de conversion

Émissions polluantes (GES...)

Procédés énergétiques et leur efficacité

Réglementation en matière d'efficacité énergétique

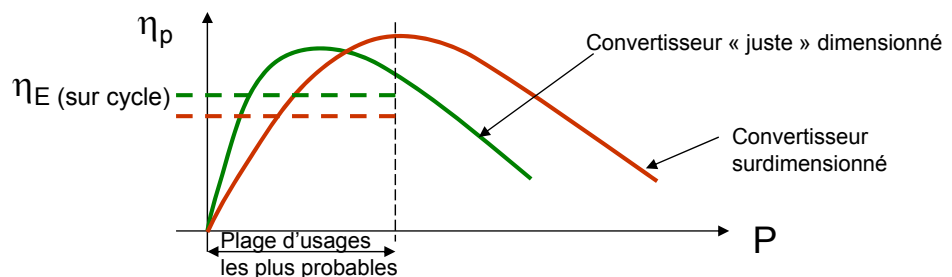
Conclusion

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

Organismes d'information sur les questions d'efficacité énergétiques

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

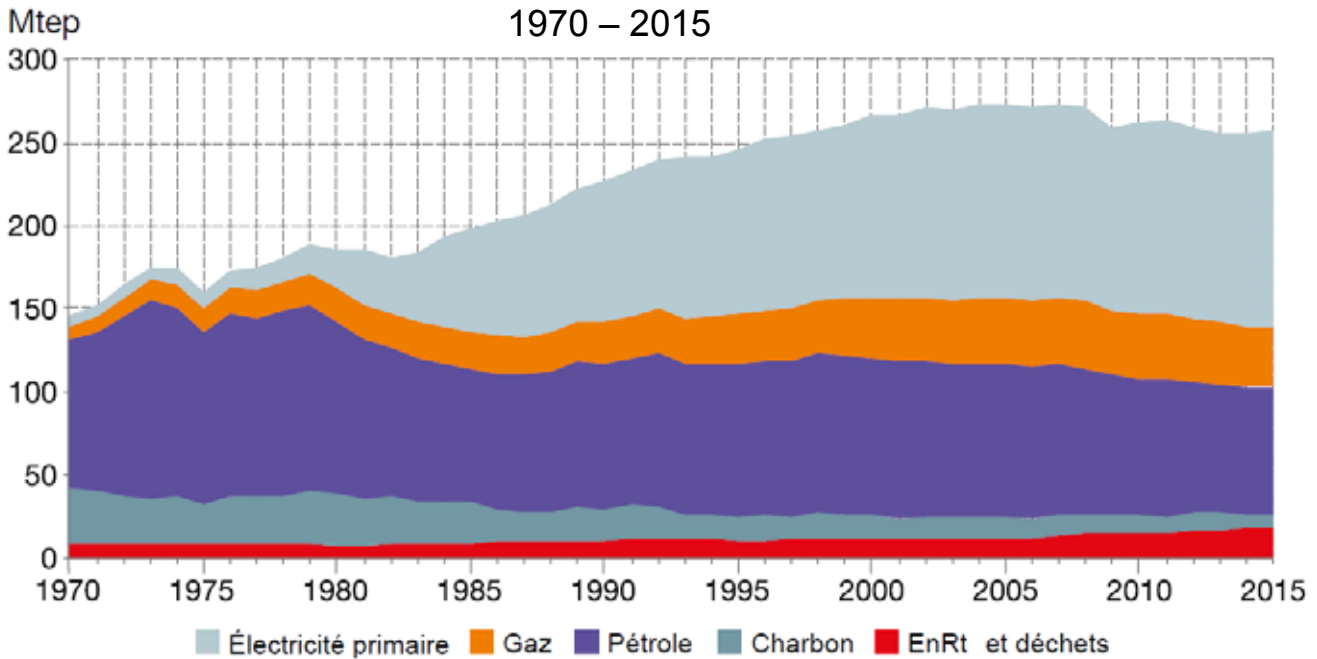
Société ENERTECH : <http://www.enertech.fr/>

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

Ministère de l'écologie solidaire : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/>

Pour les CEE : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/dispositif-des-certificats-deconomies-denergie>

Consommation d'énergie primaire en France métropolitaine



Entre 1973 et 2015, la consommation primaire hors usages non énergétiques, a crû de 169 à 257 Mtep soit 60 %, alors que la consommation d'énergie finale est passée de 134 à 162 Mtep : +21%

B. Multon ENS Rennes 79

Suite consommation véhicules : 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 ?!

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

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...

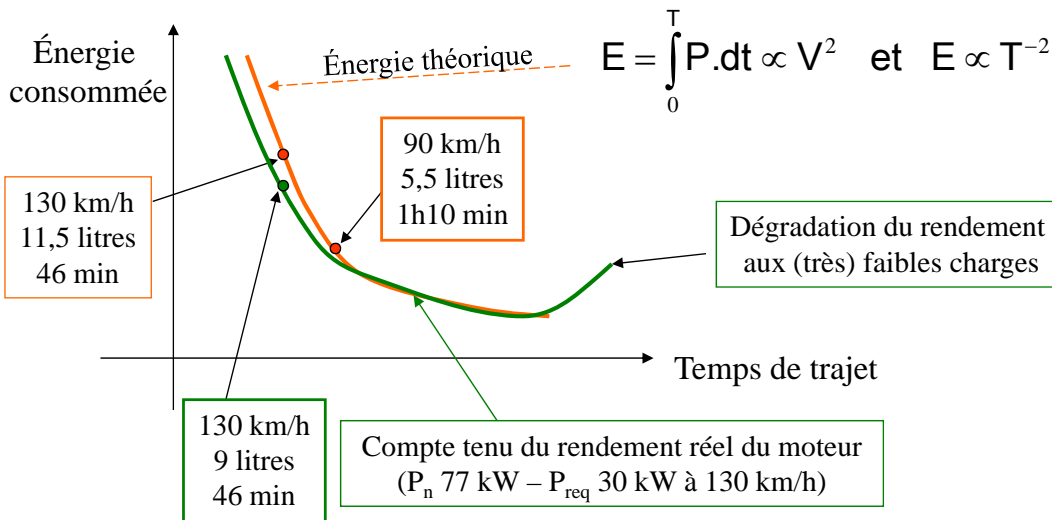
Pour un moteur de 77 kW (moyenne actuelle) :

à 10 kW : 22% => 5,5 litres/100 km
à 30 kW : 28% => 9 litres/100 km

B. Multon ENS Rennes 80

Relation temps de trajet et consommation d'énergie

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



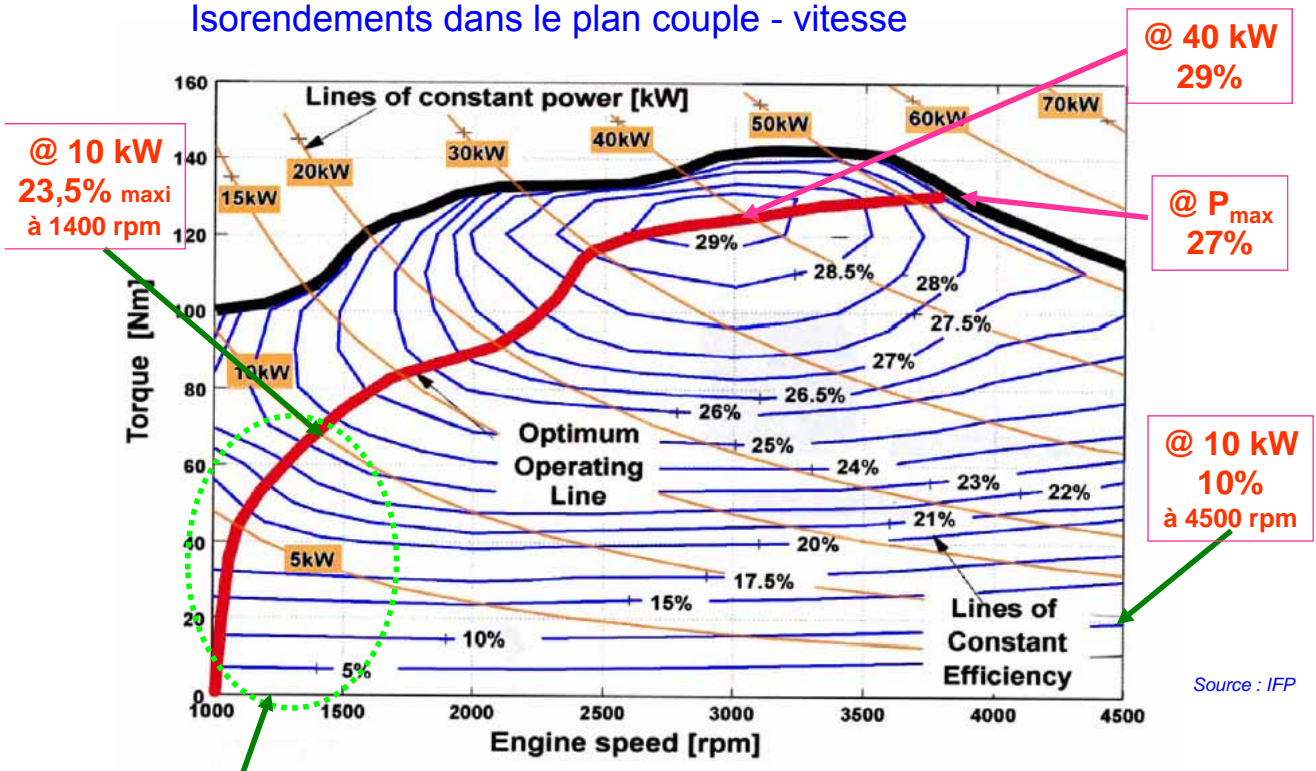
Cela vaut-il la peine de brûler 63% de carburant en plus (9 L au lieu de 5,5 L) pour gagner 24 minutes (70 min au lieu de 46 min) sur 100 km ?

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

Et avec un moteur moins surdimensionné, le gain serait encore supérieur.

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

Isorendements dans le plan couple - vitesse



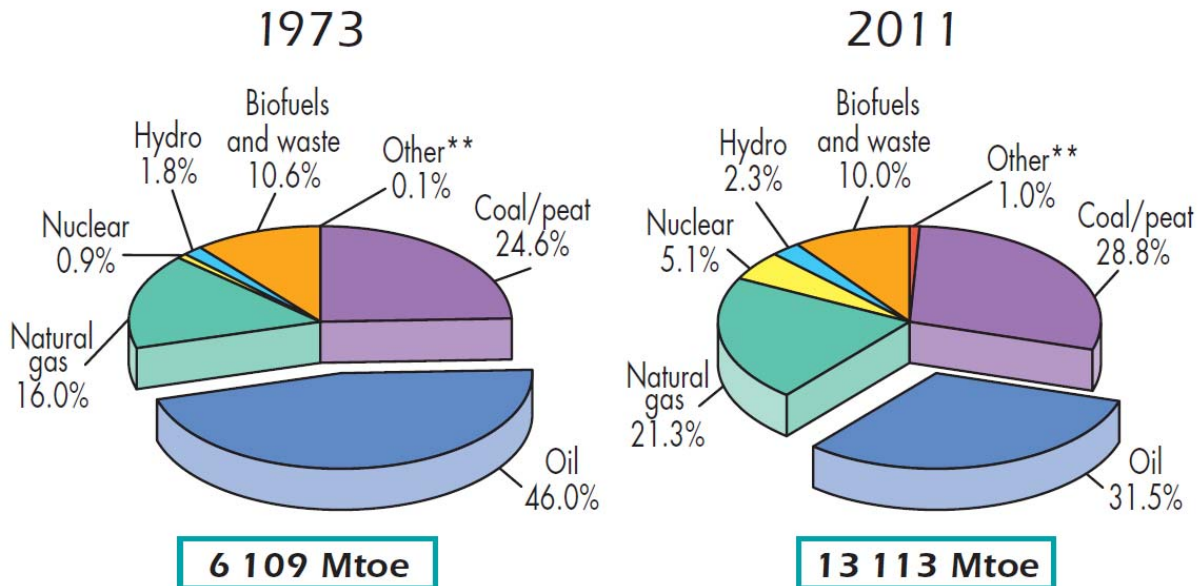
Source : IFP

Aux faibles puissances : vitesse optimale faible mais faible rendement (10% à 5 kW)

Exercices

1- Généralités et analyse de données énergétiques

On fournit ci-dessous un graphique de la consommation d'énergie primaire mondiale (1973 et 2011) issu du dernier « Key World Energy Statistics » 2013 de l'Agence Internationale de l'Énergie (Mtoe = Mtep) :



*World includes international aviation and international marine bunkers.
 **Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

Figure 1 : consommation mondiale d'énergie primaire (Source AIE)

On rappelle les équivalences suivantes :
 1 kWh = 3,6 MJ et 1 tep = 11 600 kWh

1.1- Conversions d'unités

Calculer (avec 3 chiffres significatifs) la valeur de l'énergie primaire mondiale consommée en 2011 en joules (J), exajoules (EJ), kWh et térawattheures.

1.2- Analyses

a- Donner en Mtep les valeurs de la consommation primaire de combustibles pétroliers en 1973 et 2011.

b- Convertir en TWh la consommation d'énergie primaire nucléaire en 2011.

Sachant que l'énergie nucléaire ne sert qu'à produire de l'électricité et que la production électrique mondiale d'origine nucléaire était de 2584 TWh en 2011, expliquer l'origine de la différence entre la consommation primaire et la production électrique.

2- Rendements d'un onduleur photovoltaïque

On donne, à la figure figure 2, les courbes de rendements d'un onduleur photovoltaïque (convertisseur DC-AC). Ces courbes sont paramétrées en tension continue d'entrée (325, 580 et 720 V).

Le rendement européen, qui sert de référence de comparaison des onduleurs PV en termes d'efficacité, est défini selon la formule suivante :

$$\eta_{EP} = 0.03 \eta_{5\%} + 0.06 \eta_{10\%} + 0.13 \eta_{20\%} + 0.1 \eta_{30\%} + 0.48 \eta_{50\%} + 0.2 \eta_{100\%}$$

où $\eta_{10\%}$ correspond au rendement instantané (en puissance) à 10% de la puissance nominale (P_N) et le coefficient 0.06 affecté à cette valeur suppose que sur une année le point de fonctionnement à 10% de P_N survient 6% du temps.

En outre, on rappelle l'expression du rendement énergétique (sur cycle) :

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{\text{cons}} \cdot dt} = \frac{\sum_{i=1 \text{ à } N} P_u \cdot \Delta t}{\sum_{i=1 \text{ à } N} \frac{P_u}{\eta_p(P_u)} \cdot \Delta t}$$

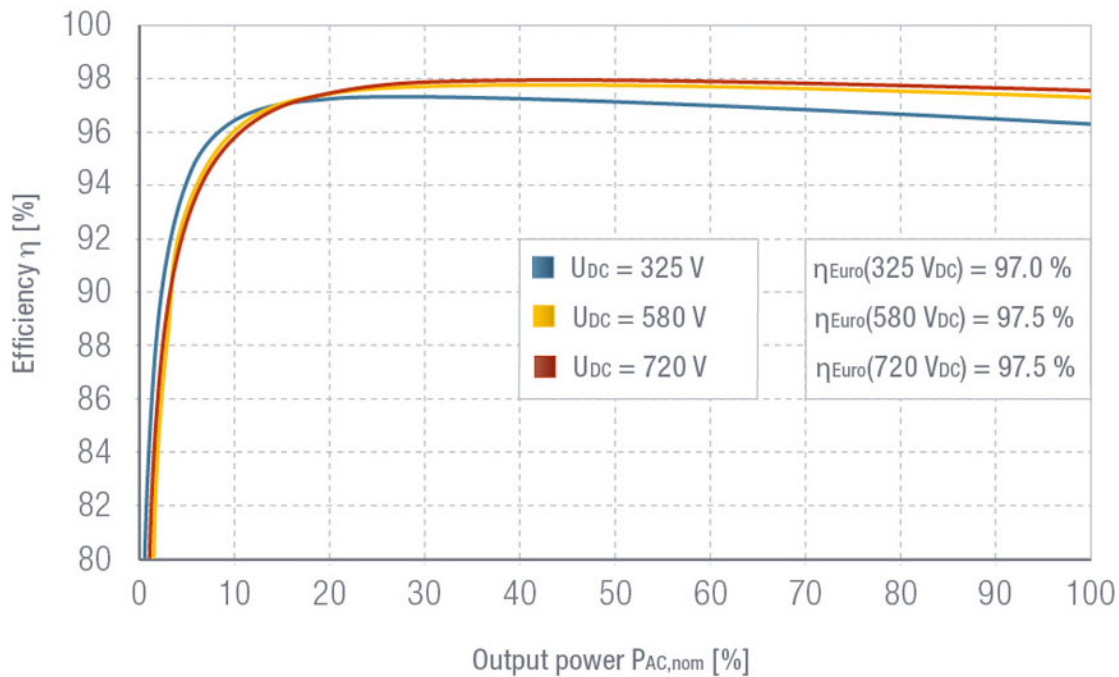


Figure 2 : Courbes de rendement d'un onduleur photovoltaïque (Source Solarmax)

2.1- Rendement instantané

Pour une tension d'entrée de 325 V, déterminer (approximativement à partir de la figure 2) les valeurs du rendement instantané correspondant aux valeurs suivantes de la puissance de sortie (utile) ramenées à la puissance nominale : 5%, 10%, 20%, 30%, 50% et 100%.

(voir agrandissement en annexe pour repérer les valeurs)

2.2- Rendement européen et rendement sur cycle

Sur la base des valeurs du rendement instantané précédentes, calculer les valeurs du rendement européen et du rendement sur cycle et les comparer.

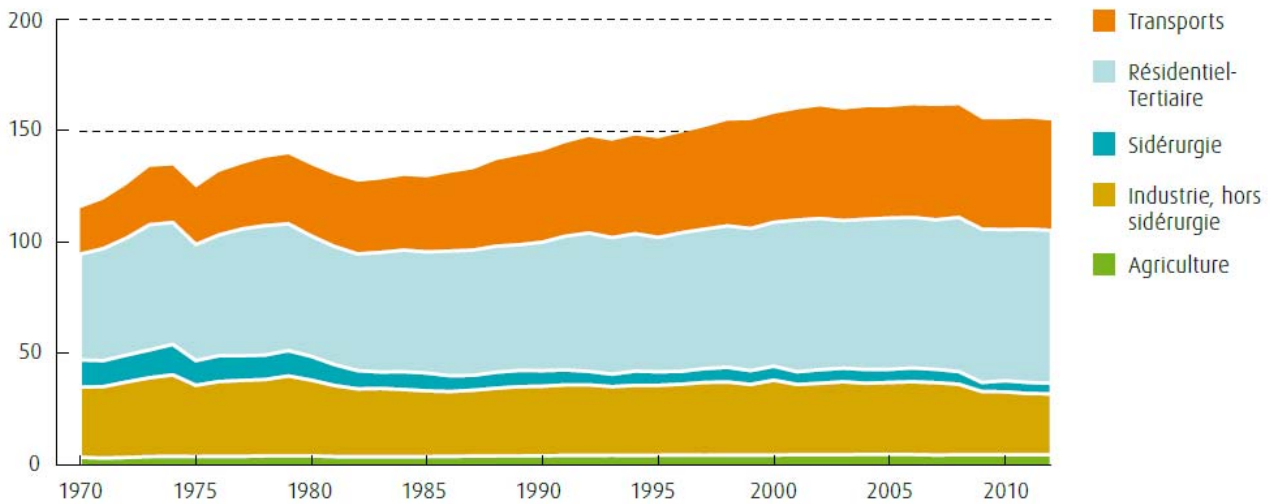
3- Amélioration de l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment

La figure 3 donne l'évolution de la consommation finale d'énergie française (en Mtep) de 1970 à 2011 ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (en MteqCO₂) de 1990 à 2011.

On notera que toutes les émissions de GES directes ne sont pas liées à l'énergie, c'est le cas notamment de celles de l'agriculture (usages des sols, méthane des ruminants...).

Évolution de la consommation finale énergétique par secteur

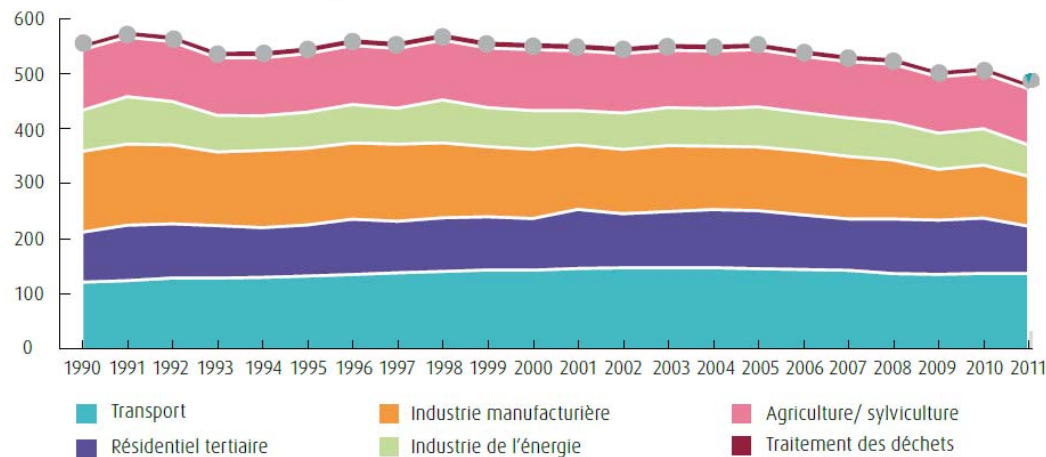
Données corrigées des variations climatiques, en Mtep



Source : calculs du service de l'observation et des statistiques (Soes), ministère du Développement durable, d'après les sources par énergie. Bilan de l'énergie 2012.

Évolution des émissions de gaz à effet de serre de la France entre 1990 et 2012

GES directs - Émissions en MteqCO₂



Source : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) - ministère du Développement durable, direction générale de l'énergie et du climat - inventaire national communiqué à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), pour la métropole et les départements d'outre-mer, avril 2013. Estimation 2012 réalisée à partir de l'inventaire SECTEN.

Figure 3 : Consommation finale d'énergie 1970-2011 et émissions de GES de la France 1990 - 2011

3.1- Secteur résidentiel et tertiaire

Ce secteur pèse pour plus de 40% dans la consommation totale d'énergie finale française alors que ses émissions de CO₂ représentent moins de 20%.

Comment expliquer cette différence ? (on pourra s'aider des diapositives du cours)

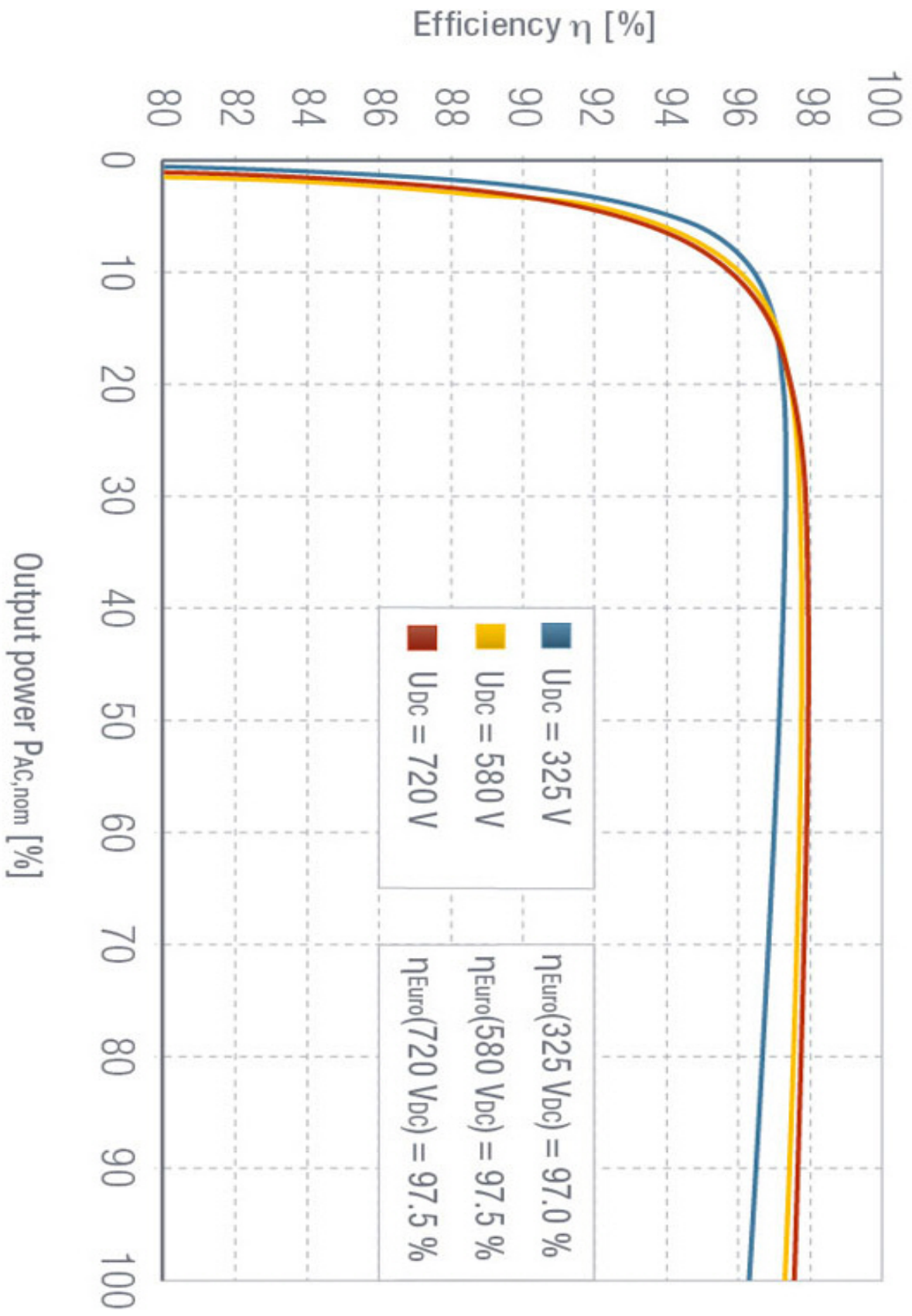
3.2- Potentiel d'amélioration via la rénovation thermique des bâtiments résidentiels

La consommation énergétique finale (tous usages compris) des bâtiments résidentiels est actuellement d'environ 550 milliards de kWh. En supposant que la consommation moyenne des bâtiments résidentiels soit très approximativement de 260 kWh_{ef}/m²/an et qu'il s'avère possible d'envisager à terme 70 kWh_{ef}/m²/an.

a- Calculer la valeur des économies annuelles possibles d'énergie finale en kWh.

b- En considérant un amortissement sur 10 ans, sans intérêts, et en supposant un prix moyen (stable) de l'énergie finale de 10 c€/kWh_{ef}, déterminer le montant total (sur 10 ans) des économies d'énergie (en euros) et le prix maximal acceptable au m² de la rénovation.

ANNEXE courbes de rendement Solarmax



4- Émissions polluantes

4.1- Calculer la fourchette de la masse en tonnes de CO₂ émise durant sa vie par une automobile classée C sur une base d'une durée de vie de 10 ans et 15 000 km par an.

4.2- Soit un véhicule électrique qui consomme à la prise 180 Wh par km (sur cycle normalisé) et une électricité avec des émissions 90 gCO₂/kWh. Calculer les émissions de ce véhicule au km parcouru, dans quelle classe se trouverait-il d'après l'étiquette fournie ?

4.3- Pourquoi, en réalité, sera-t-il important de considérer les instants de recharge pour évaluer sérieusement les émissions d'un véhicule électrique ?

Émissions de CO₂ faibles



Émissions de CO₂ élevées

Corrigés

1- Généralités et analyse de données énergétiques

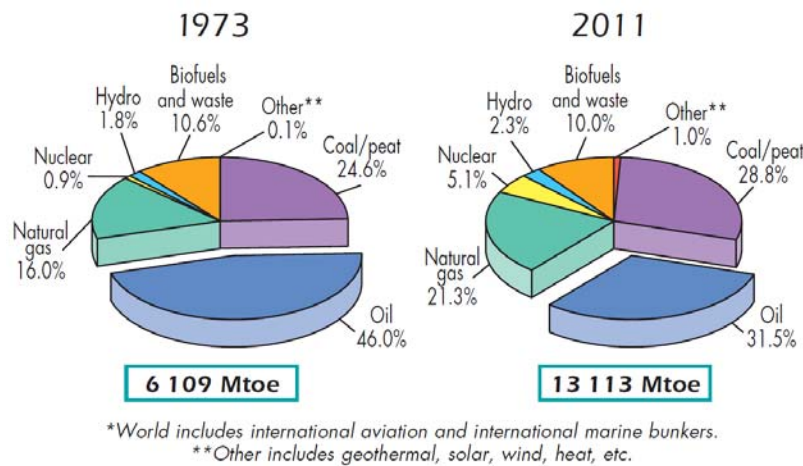


Figure 1 : consommation mondiale d'énergie primaire (Source AIE), Mtoe = Mtep

On rappelle les équivalences suivantes : 1 kWh= 3,6 MJ et 1 tep = 11 600 kWh

1.1- Conversions d'unités

Valeur de l'énergie primaire mondiale consommée en 2011 en, kWh, térawattheures, joules (J) et exajoules (EJ) :

1 tep = 11 600 kWh => 1 Mtep = 11,6 10⁹ kWh => **13 113 Mtep ≈ 152 10¹² kWh**

1 TWh = 10⁹ kWh => **13 113 Mtep ≈ 152 000 TWh**

1 tep = 11 600 x 3,6 10⁶ J ≈ 41,8 10⁹ J => **13 113 Mtep ≈ 548 10¹⁸ J**

1 EJ = 10¹⁸ J => **13 113 Mtep ≈ 548 EJ**

1.2- Analyses

a- Valeurs de la **consommation primaire de combustibles pétroliers** en 1973 et 2011.

En 1973 : 46% de 6109 Mtep = 2810 Mtep

En 2011 : 31,5% de 13 113 Mtep = 4130 Mtep

Soit une augmentation de 47% !

b- **Energie nucléaire en 2011**

Conversion en TWh de la consommation primaire d'énergie nucléaire :

5,1% de 13 113 Mtep = 669 Mtep = **7 757 TWh**

Origine de la différence entre la consommation primaire et la production électrique.

Production électrique mondiale d'origine nucléaire 2011 : 2584 TWh

On observe un rapport 3 entre énergie primaire et électricité produite, soit un rendement d'1/3, correspondant au rendement théorique.

Pour l'énergie nucléaire, le calcul de l'énergie primaire est simplement obtenu en appliquant un facteur 3 à la production d'électricité...

2- Rendements d'un onduleur photovoltaïque

Rendement européen d'un onduleur PV :

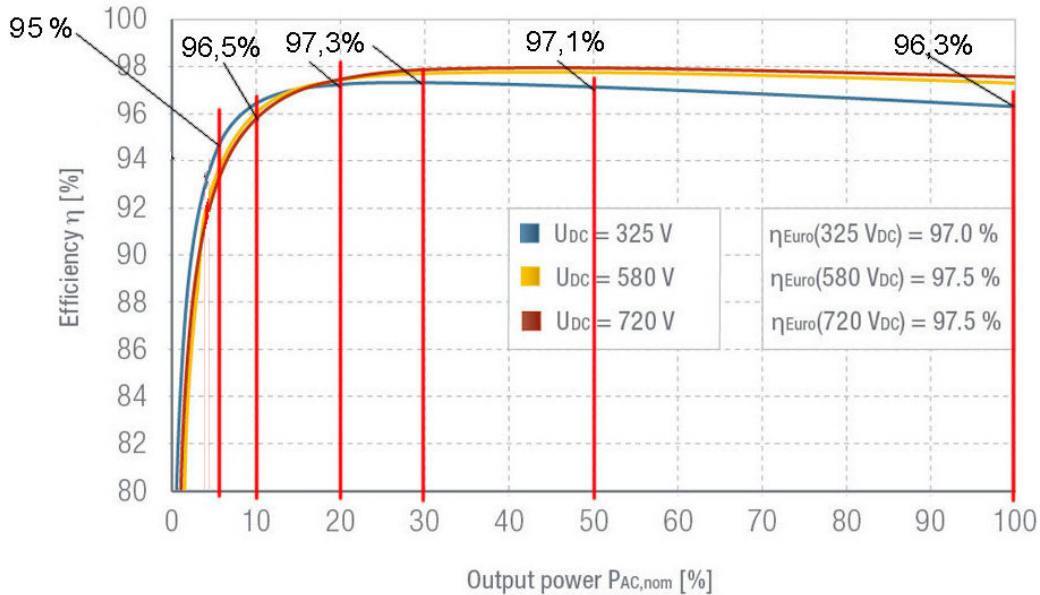
$$\eta_{EP} = 0.03 \eta_{5\%} + 0.06 \eta_{10\%} + 0.13 \eta_{20\%} + 0.1 \eta_{30\%} + 0.48 \eta_{50\%} + 0.2 \eta_{100\%}$$

Rappel de l'expression du rendement énergétique (sur cycle) :

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{\text{cons}} \cdot dt} = \frac{\sum_{i=1 \text{ à } N} P_u \cdot \Delta t}{\sum_{i=1 \text{ à } N} \frac{P_u}{\eta_p(P_u)} \cdot \Delta t}$$

2.1- Rendement instantané

Pour une tension d'entrée de 325 V, à partir de la figure 2, détermination des valeurs du rendement instantané correspondant à 5%, 10%, 20%, 30%, 50% et 100% de la puissance nominale :



2.2- Rendement énergétique sur cycle européen

En appliquant la formule du rendement européen, on obtient :

$$\eta_{EP} = 0.03 \times 94,3 + 0.06 \times 96,5 + 0.13 \times 97,3 + 0.1 \times 97,3 + 0.48 \times 97,1 + 0.2 \times 96,3$$

$\eta_{EP} \cong 96,9\%$

Rendement énergétique, en appelant N_h le nombre d'heures annuelles :

$$\eta_e = \frac{\sum_{i=1 \text{ à } N} P_u \cdot \Delta t}{\sum_{i=1 \text{ à } N} \frac{P_u}{\eta_p(P_u)} \cdot \Delta t} \cong \frac{\sum 0,03N_h \times 0,05P_n + 0,06N_h \times 0,1P_n + 0,13N_h \times 0,2P_n + 0,1N_h \times 0,3P_n + 0,48N_h \times 0,5P_n + 0,2N_h \times P_n}{\sum \frac{0,03N_h \times 0,05P_n}{0,943} + \frac{0,06N_h \times 0,1P_n}{0,965} + \frac{0,13N_h \times 0,2P_n}{0,973} + \frac{0,1N_h \times 0,3P_n}{0,973} + \frac{0,48N_h \times 0,5P_n}{0,971} + \frac{0,2N_h \times P_n}{0,963}}$$

$$\eta_e \cong \frac{\sum 0,03 \times 0,05 + 0,06 \times 0,1 + 0,13 \times 0,2 + 0,1 \times 0,3 + 0,48 \times 0,5 + 0,2}{\sum \frac{0,03 \times 0,05}{0,943} + \frac{0,06 \times 0,1}{0,965} + \frac{0,13 \times 0,2}{0,973} + \frac{0,1 \times 0,3}{0,973} + \frac{0,48 \times 0,5}{0,971} + \frac{0,2}{0,963}} \cong 96,8\%$$

3- Réglementation en matière d'efficacité énergétique

3.1- Secteur résidentiel et tertiaire

Ce secteur pèse pour plus de 40% dans la consommation totale d'énergie finale française alors que ses émissions de CO₂ représentent moins de 20%.

Explication de la différence.

D'une part, parmi les émissions de CO₂, il y a celles d'origine agricole non directement énergétique.

D'autre part, le secteur des bâtiments, contrairement à celui des transports par exemple, consomme une part élevée d'électricité. Or en France, l'électricité est faiblement carbonée.

Ce sont ces deux raisons qui conduisent à ce résultat.

3.2- Potentiel d'amélioration via la rénovation thermique des bâtiments résidentiels

Consommation actuelle d'énergie finale (tous usages compris) des bâtiments résidentiels : environ 550 milliards de kWh.

Consommation moyenne des bâtiments résidentiels $\cong 260 \text{ kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$

Amélioration possible à terme : $70 \text{ kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$.

a- Calcul des économies annuelles possibles d'énergie finale en kWh.

Les économies d'énergie finale seront une proportion de la consommation actuelle :

Economie par m^2 et par an : $260 - 70 = 190 \text{ kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$

Economie totale : $550 \text{ TWh} \times 190/260 \cong 400 \text{ TWh}$

b- Sur la base d'un prix moyen de l'énergie finale de $10 \text{ c}\text{€kWh}_{\text{ef}}$, calcul du montant total des économies d'énergie

Economies : $400 \cdot 10^9 \times 0,1 \cong 40 \text{ milliards d'euros par an}$

En considérant un amortissement sur 10 ans, sans intérêts, calcul du prix acceptable de la rénovation au m^2 :

Le nombre de m^2 habitables peut-être évalué en divisant la consommation annuelle actuelle (550 TWh) par la consommation au m^2 ($260 \text{ kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$), soit : 2,1 milliards de m^2 .

Sur 10 ans, l'économie réalisée est de 400 milliards d'euros.

Ce qui conduit à un coût acceptable de : 190 €m^2 .

4- Émissions polluantes

4.1- masse (en tonnes) de CO_2 émise durant sa vie par une automobile classée C sur une base d'une durée de vie de 10 ans et 15 000 km par an.

D'après l'étiquette : classe C : 121 à 140 gCO_2/km

10 ans 15 000 km/an $\Rightarrow 150\,000 \text{ km} \times [121, 140 \text{ gCO}_2/\text{km}] = [18, 21] \text{ tonnes CO}_2$

4.2- Soit un véhicule électrique qui consomme à la prise 180 Wh par km (sur cycle normalisé) et une électricité avec des émissions 90 gCO_2/kWh . Calculer les émissions de ce véhicule au km parcouru, dans quelle classe se trouverait-il d'après l'étiquette fournie ?

Emissions au km :

Il faut multiplier la consommation électrique du véhicule en kWh_e/km par les rejets de CO_2 de la production d'électricité en $\text{gCO}_2/\text{kWh}_e$. $\Rightarrow 0,18 \times 90 = 16 \text{ gCO}_2/\text{km}$.

Ce qui correspond à la classe A (et même A+++ qui n'existe pas !)

4-3- Pourquoi, en réalité, sera-t-il important de considérer les instants de recharge pour évaluer sérieusement les émissions d'un véhicule électrique ?

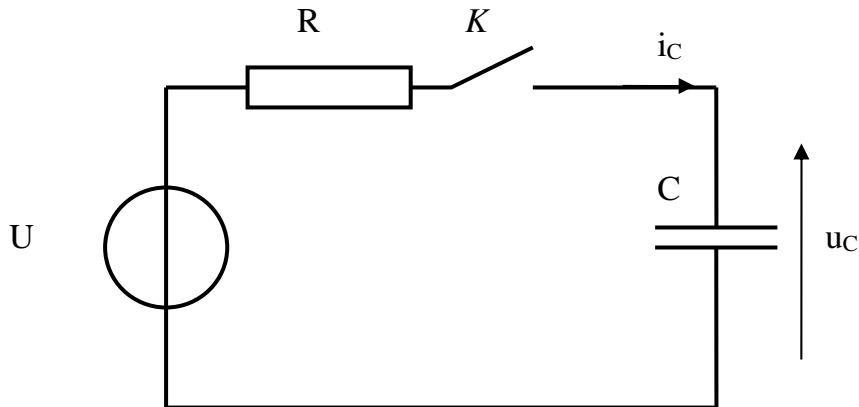
Parce que selon le moment de la recharge, le mix de production électrique (combinaison des différents types de production) varie. Au moment des pointes (journalières et saisonnières), l'électricité est beaucoup plus « carbonée » ce qui accroît donc les émissions du véhicule électrique qui serait rechargé dans de telles conditions.

Les valeurs d'émissions peuvent atteindre, même en France, plus de 500 gCO_2/kWh .

FONDAMENTAUX DE TRANSFERTS ENERGETIQUES – ANALOGIES

Charge d'un condensateur

1- Bilan énergétique dans la charge d'un condensateur de capacité C via une source de tension U .



1.1- Rappeler les équations temporelles de la tension u_c et du courant i_c lors de la charge à travers une résistance R , d'un condensateur sous une source de tension constante (à partir de la fermeture de l'interrupteur K).

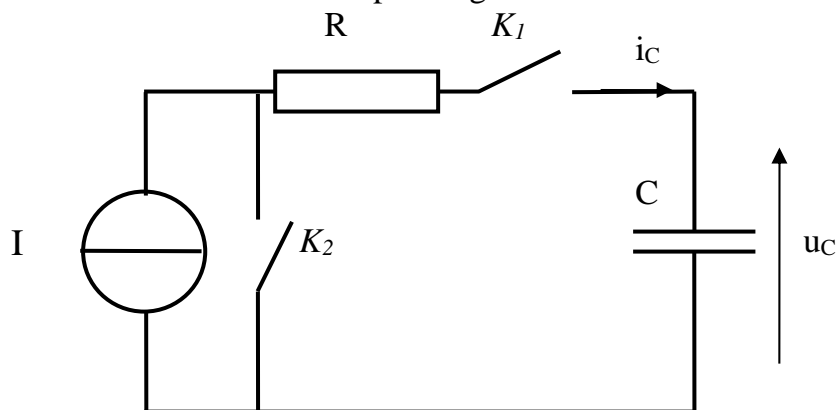
On supposera le condensateur initialement complètement déchargé.

1.2- Bilan énergétique d'une charge complète.

Exprimer, en fonction de U , R et C , l'énergie finale W_c communiquée au condensateur et celle W_R dissipée dans la résistance. Déterminer également l'expression du rendement énergétique η (l'énergie utile est celle communiquée au condensateur).

Quelle est l'influence de la valeur de R sur ce bilan ?

2- La source est maintenant réalisée par un générateur de courant I :



L'interrupteur K_2 court-circuite la source de courant lorsque l'on ne souhaite pas effectuer de transfert d'énergie. La résistance R représente d'éventuelles pertes dans les conducteurs.

2.1- Proposer une séquence de commutation des deux interrupteurs K_1 et K_2 compatible avec les exigences d'une source de courant et permettant d'effectuer la charge du condensateur.

2.2- On suppose la séquence de commutation correctement réalisée, la charge initiale est nulle et la source de courant I charge le condensateur à travers la résistance R . Déterminer, comme à la

question 1.1.1, les équations temporelles de u_c et i_c jusqu'à un instant t_{fin} tel que la tension aux bornes de u_c atteint une valeur U_{fin} .

2.3- Effectuer un bilan énergétique en déterminant, en fonction de R , C , I et U_{fin} , les expressions des énergies W_C et W_R et celle du rendement énergétique η .

Exprimer le rendement en fonction de R , C , I et U_{fin} .

Conclure sur l'influence de R .

2.4- Proposer un montage de convertisseur d'énergie (structure de puissance et mode de fonctionnement) permettant de réaliser un générateur de courant avec un rendement élevé à partir d'une source « naturelle » de tension.

Quelles sont ses limites de fonctionnement ?

Charge inertielle entraînée par une chaîne réversible

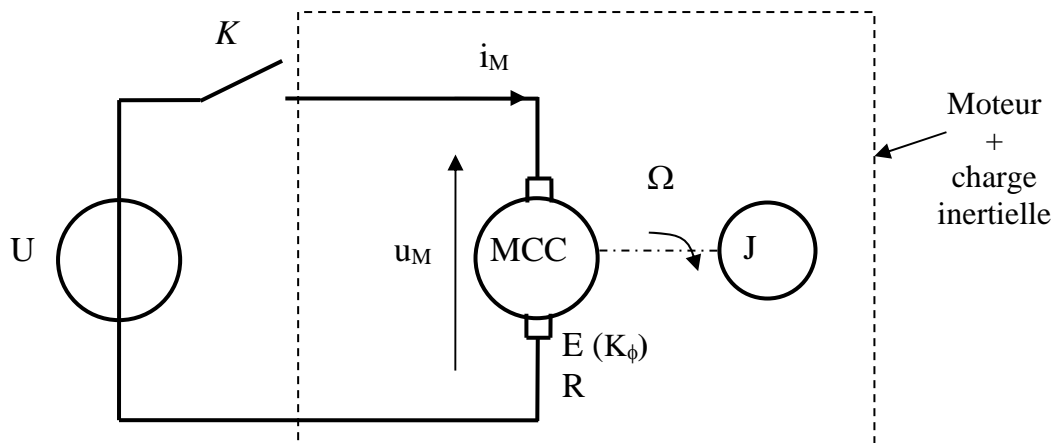
3- Mise en vitesse d'un moteur à courant continu entraînant une **charge inertielle pure**.

Le moteur à courant continu est à aimants permanents, ses caractéristiques électriques sont simplifiées à l'extrême, on ne considère que sa résistance d'induit et sa force-électromotrice.

Ses caractéristiques sont ainsi :

- R sa résistance d'induit,
- K_ϕ sa constante de flux (également constante de couple et de force électromotrice)

Le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes (rotor du moteur et charge entraînée) est noté J .



3.1- Donner le schéma équivalent électrique de ce système ainsi que l'équation différentielle fondamentale qui lie la vitesse Ω au courant i_M .

Mettre en évidence l'analogie avec l'équation de charge d'un condensateur par une source de tension à travers une résistance et notamment la constante de temps caractéristique, (nommée constante de temps électromécanique), de ce système.

3.2- Le moteur est à l'arrêt, on ferme l'interrupteur K . De préférence en exploitant l'analogie avec le condensateur, déterminer, en fonction de U , R , K_ϕ et J , les équations temporelles du courant i_M et de la vitesse Ω .

Donner l'expression de la valeur finale Ω_{fin} de la vitesse.

3.3- Sur une mise en vitesse complète (régime permanent Ω_{fin} atteint), calculer, en fonction de Ω_{fin} , R et K_{ϕ} l'énergie W_R dissipée dans R et l'énergie cinétique W_J accumulée dans les parties tournantes.

Calculer le rendement énergétique η de cette « charge », rendement que l'on définira comme le rapport de l'énergie cinétique maximale accumulée sur la somme de cette énergie ajoutée aux pertes.

3.4- Proposer une façon d'améliorer le bilan énergétique de la charge et donner un montage électrotechnique, permettant notamment la récupération d'énergie durant les phases de freinage. Donner le bilan énergétique obtenu ainsi que l'expression du rendement η (même définition que précédemment).

3.5- Dans le cadre des hypothèses précédentes (moteur simplifié et charge purement inertielle) sur un « parcours » simplifié de distance angulaire θ_{total} (qui peut correspondre à une distance linéaire parcourue) et de durée T comprenant deux phases :

- une montée en vitesse à courant constant jusqu'à Ω_{max} de durée t_1 ,
- une décélération à courant constant (négatif) égale (en valeur absolue) à l'accélération de la première phase, donc également de durée t_1 .

Le courant d'alimentation (positif durant l'accélération puis négatif durant la décélération avec récupération d'énergie) sera le paramètre de l'étude, sa valeur maximale sera notée I_{Max} . Cette valeur correspond au trajet le plus rapide, soit un cycle d'accélération-décélération au courant maximal.

On notera que la distance angulaire parcourue étant constante ($\theta_{\text{total}} = \int_T \Omega(t).dt$), la vitesse maximale atteinte diminue si l'accélération est plus faible.

3.5a- Démontrer, sur la base du parcours le plus rapide (à $I = I_{\text{Max}}$), sachant que le profil de vitesse est triangulaire, que le temps de parcours minimal vaut : $T_{\text{mini}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{J \cdot \theta_{\text{total}}}{K_{\phi} \cdot I_{\text{Max}}}}$

3.5b- Dans le cas général ($I \leq I_{\text{max}}$), la vitesse maximale atteinte devient inférieure à la valeur déterminée à la question précédente et le temps total T de parcours s'allonge. Calculer les expressions de la durée de trajet $T(I)$ ainsi que l'énergie consommée $W(I)$ en fonction de I . Représenter ces fonctions avec une échelle I commune.

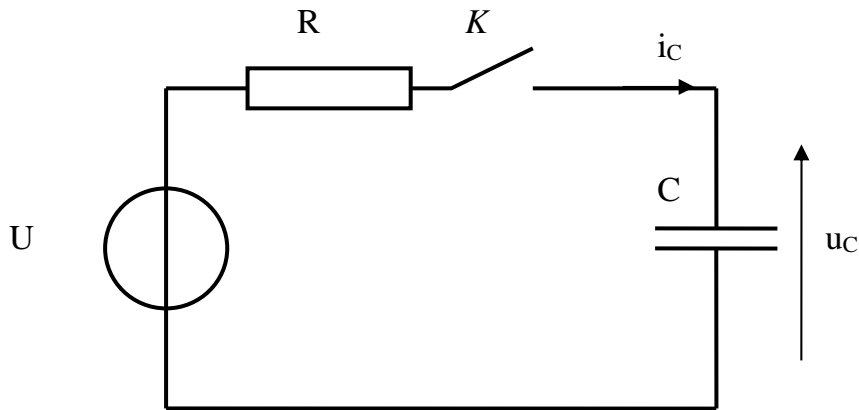
Discuter alors de l'évolution de ces courbes, mettre en évidence le compromis entre consommation énergétique sur un cycle complet et temps de parcours.

CORRIGÉ

FONDAMENTAUX DE TRANSFERTS ENERGETIQUES – ANALOGIES

Charge d'un condensateur

1- Bilan énergétique dans la charge d'un condensateur de capacité C via une source de tension U .



1.1- Équations temporelles de la tension u_c et du courant i_c condensateur initialement complètement déchargé.

$$u_c(t) = U - R \cdot i_c(t) \quad \text{et} \quad i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt}$$

$$\text{Soit : } u_c + \tau \cdot \frac{du_c}{dt} = U \quad \text{avec } \tau = R \cdot C$$

$$\text{L'équation sans second membre } u_c + \tau \cdot \frac{du_c}{dt} = 0, \text{ donne : } \frac{du_c}{u_c} = -\frac{dt}{\tau}$$

$$\text{Une solution générale est : } \ln(u_c) = -\frac{t}{\tau} + C^{te} \text{ soit : } u_c = e^{-\frac{t}{\tau} + C^{te}} = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

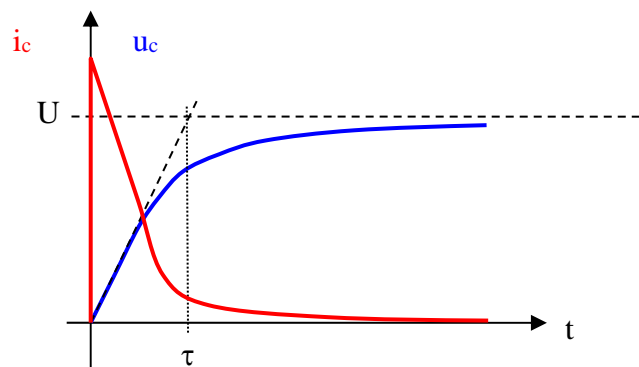
La solution particulière est la réponse à l'infini : $u_c(t \rightarrow \infty) = U$

$$\text{On obtient alors : } u_c = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + U$$

En considérant la condition initiale : $u_c(t=0) = 0$, on obtient :

$$u_c(t) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$



1.2- Bilan énergétique d'une charge complète.

Expression, en fonction de **U**, **R** et **C**, de l'énergie finale W_c condensateur et W_R dissipée celle dans la résistance.

L'énergie accumulée dans le condensateur vaut : $W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$

Celle dissipée dans la résistance :

$$W_R = \int_0^\infty R i^2(t) \cdot dt = \int_0^\infty R \cdot \left[\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]^2 \cdot dt = R \left[\frac{U}{R} \right]^2 \int_0^\infty \left[e^{-\frac{t}{\tau}} \right]^2 \cdot dt = \frac{[U]^2}{R} \cdot \left[-\frac{\tau}{2} \cdot e^{-\frac{2t}{\tau}} \right]_0^\infty$$

$$W_R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

Rendement η : $\eta = \frac{W_c}{W_c + W_R} = \frac{1}{2}$ ou 50%

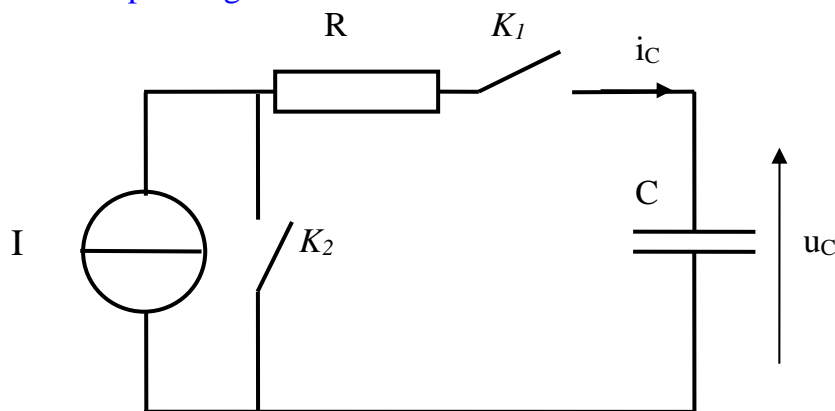
L'énergie dissipée dans la résistance est indépendante de la valeur de R.

(on peut également démontrer que c'est le cas pour une charge à travers une résistance non linéaire par exemple un transistor ballast.)

Le rendement de charge d'un condensateur, initialement complètement déchargé, sous une source de tension est indépendant de la résistance de charge et donc de la durée, il est égale à 50%.

La moitié de l'énergie est donc dissipée dans R.

2- Charge réalisée par un générateur de courant :



2.1- Séquence de commutation des deux interrupteurs K1 et K2

Lorsque l'on ne souhaite pas transférer d'énergie, la source de courant doit être court-circuitée par K2 sous peine de générer une tension excessive ou de ne pouvoir imposer son courant.

L'interrupteur K2 doit rester fermé jusqu'à ce que K1 soit mis en conduction afin d'éviter toute discontinuité de I. Il faut donc un léger chevauchement au moment de la commutation.

Une fois la charge du condensateur terminée, on ferme à nouveau K2 puis on ouvre K1 juste après.

2.2- Équations temporelles de u_c et i_c jusqu'à t_{fm} tel que $u_c = U_{fm}$.

Le courant dans le condensateur reste constant : $i_c(t) = I$

La tension suit l'équation : $u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c \cdot dt$

Ce qui donne : $u_c(t) = \frac{I}{C}.t + C^{te}$

A $t = 0$: $u_c = 0$ donc $C^{te} = 0$

Donc : $u_c(t) = \frac{I}{C}.t$

U_{fin} est atteint pour : $t_{fin} = \frac{C.U_{fin}}{I}$

2.3- Bilan énergétique : expressions des énergies W_C et W_R et du rendement η .

L'énergie accumulée dans le condensateur vaut toujours : $W_C = \frac{1}{2}.C.U^2$

Comme la charge se termine à t_{fin} , celle dissipée dans la résistance :

$W_R = \int_0^{t_{fin}} Ri^2 .dt = \int_0^{t_{fin}} R.I^2 .dt = R.I^2 . \int_0^{t_{fin}} dt$ $W_R = R.I^2 .t_{fin}$

Rendement : $\eta = \frac{W_c}{W_c + W_R} = \frac{1/2.C.U_{fin}^2}{1/2.C.U_{fin}^2 + R.I^2 .t_{fin}}$

Or : $t_{fin} = \frac{C.U_{fin}}{I}$, donc : $\eta = \frac{1}{1 + 2.\frac{R.I}{U_{fin}}}$

Influence de R : la résistance n'influe pas sur le temps de charge mais seulement sur le rendement qui est d'autant plus proche de 100% que la chute de tension RI est faible devant U_{fin} .

2.4- Montage convertisseur d'énergie générateur de courant à rendement élevé

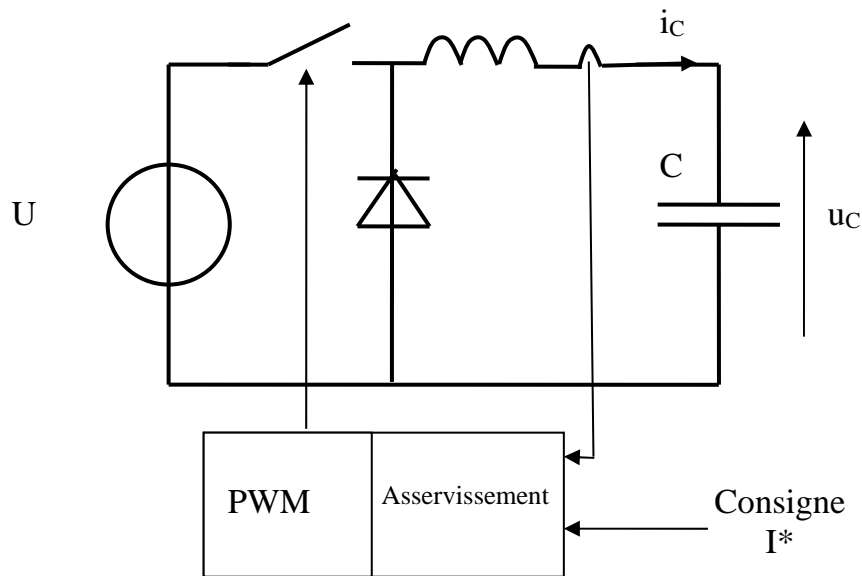
Un hacheur série, réglé en courant, permet d'obtenir les performances souhaitées :

La partie PWM correspond à la Modulation de Largeur d'Impulsions pour la commande en découpage de l'interrupteur.

Avec un tel système, le courant peut être réglé tant que la

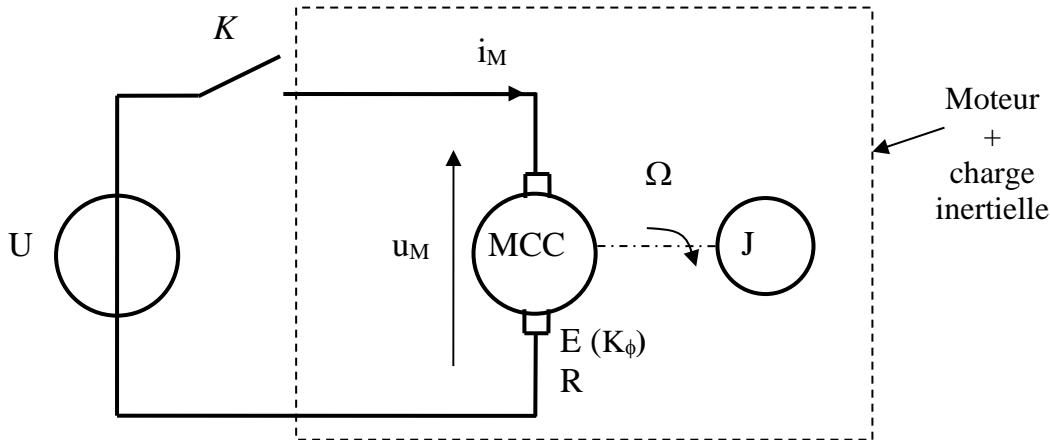
tension reste inférieure à la tension d'entrée U (aux diverses chutes de tension près, notamment dans la résistance de l'inductance qui peut être représentée par la résistance R du schéma de principe initial).

Notons cependant que ce montage permettrait un fonctionnement en décharge (réversible) à condition que la source de courant puisse s'inverser et donc que les interrupteurs soient bidirectionnels (bras de pont à deux transistors : question 3.4).

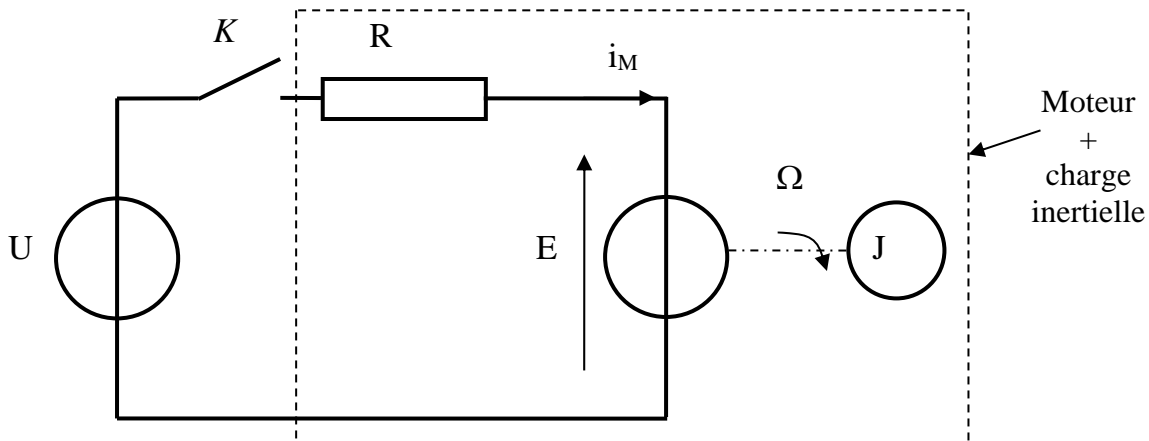


Charge inertielle entraînée par une chaîne réversible

3- Moteur à courant continu entraînant une charge inertielle pure.



3.1- Schéma équivalent



Equation fondamentale qui lie la vitesse Ω au courant i_M

$$U = R \cdot i_M + K_\phi \cdot \Omega$$

Le couple électromagnétique s'exprime par : $C_{em} = K_\phi \cdot i_M$

Le principe fondamental de la dynamique appliqué à ce système tournant simplifié, notamment

sans pertes s'écrit : $C_{em} = K_\phi \cdot i_M = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$

Et finalement, on obtient : $K_\phi \cdot \frac{U - K_\phi \cdot \Omega}{R} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$

Ou encore :
$$\Omega + \frac{R \cdot J}{K_\phi^2} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \frac{U}{K_\phi}$$

Soit une équation analogue à celle de la charge d'un condensateur à travers une résistance sous tension constante : $u_c + R \cdot C \cdot \frac{du_c}{dt} = U$

On appellera constante de temps électromécanique :
$$\tau_{em} = \frac{R \cdot J}{K_\phi^2}$$

3.2- Démarrage du moteur, équations temporelles du courant i_M et de la vitesse Ω .

Par analogie avec l'équation de charge du condensateur, on peut écrire :

$$\Omega(t) = \frac{U}{K_\phi} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{em}}})$$

et comme $i_M = \frac{J}{K_\phi} \cdot \frac{d\Omega}{dt}$, on obtient : $i_M(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{em}}}$

Expression de la valeur finale Ω_{fin} de la vitesse : $\Omega_{fin} = \frac{U}{K_\phi}$

3.3- Calcul, en fonction de Ω_{fin} , R et K_ϕ , de l'énergie W_R dissipée dans R et de l'énergie cinétique W_J

L'énergie cinétique vaut : $W_J = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega_{fin}^2$

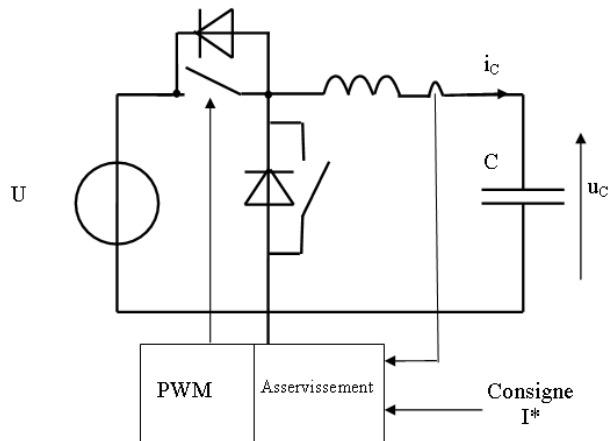
Et par analogie, celle dissipée dans la résistance est égale à l'énergie cinétique emmagasinée :

$$W_R = W_J = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega_{fin}^2$$

Rendement énergétique de cette « charge » : $\eta = \frac{W_c}{W_c + W_R} = \frac{1}{2}$ ou 50%

3.4- Solution d'amélioration du bilan énergétique de la charge

Il « suffit » d'alimenter le moteur par un générateur de courant comme on l'a fait pour le condensateur, donc par exemple, un hacheur réversible asservi :



Bilan énergétique et l'expression du rendement.

Dans ce cas, toujours par analogie avec la charge du condensateur, donc :

$$W_R = R \cdot I^2 \cdot t_{fin}$$

Rendement : $\eta = \frac{W_J}{W_J + W_R} = \frac{1/2 \cdot J \cdot \Omega_{fin}^2}{1/2 \cdot J \cdot \Omega_{fin}^2 + R \cdot I^2 \cdot t_{fin}}$

Or : $t_{fin} = \frac{J \cdot \Omega_{fin}}{K_\phi \cdot I}$, donc : $\eta = \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{R \cdot I}{K_\phi \cdot \Omega_{fin}}}$

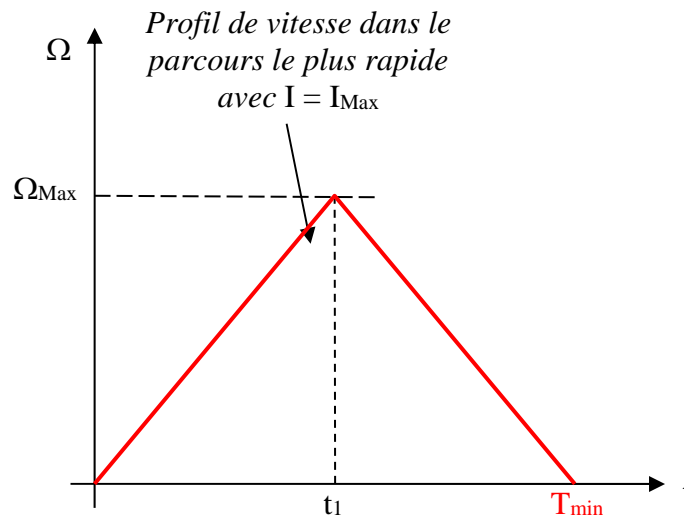
3.5- « Parcours » simplifié de distance angulaire θ_{total} et de durée T comprenant deux phases :

- une montée en vitesse à courant constant jusqu'à Ω_{max} de durée t_1 ,

- une décélération à courant constant (négatif) égale (en valeur absolue) à l'accélération de la première phase, donc également de durée t_1 .

Le courant d'alimentation (positif durant l'accélération puis négatif durant la décélération) sera le paramètre de l'étude, sa valeur maximale sera notée I_{Max} et correspond au trajet le plus rapide correspond à un cycle d'accélération-décélération au courant maximal.

3.5a- Démonstration de $T_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{J \cdot \theta_{total}}{K_\phi \cdot I_{Max}}}$



soit la valeur de l'accélération maximale : $\left. \frac{d\Omega}{dt} \right|_{Max} = \frac{K_\phi \cdot I_{Max}}{J} = \frac{\Omega_{max}}{t_{1min}}$

Vu que dans le trajet le plus rapide, le profil est triangulaire, la durée minimale t_{1min} d'accélération vaut la moitié de la durée totale du cycle :

$$\frac{T_{min}}{2} = \frac{J \cdot \Omega_{Max}}{K_\phi \cdot I_{Max}}$$

La distance angulaire parcourue étant égale à l'aire du profil ($\theta_{total} = \int_T \Omega(t) \cdot dt$) :

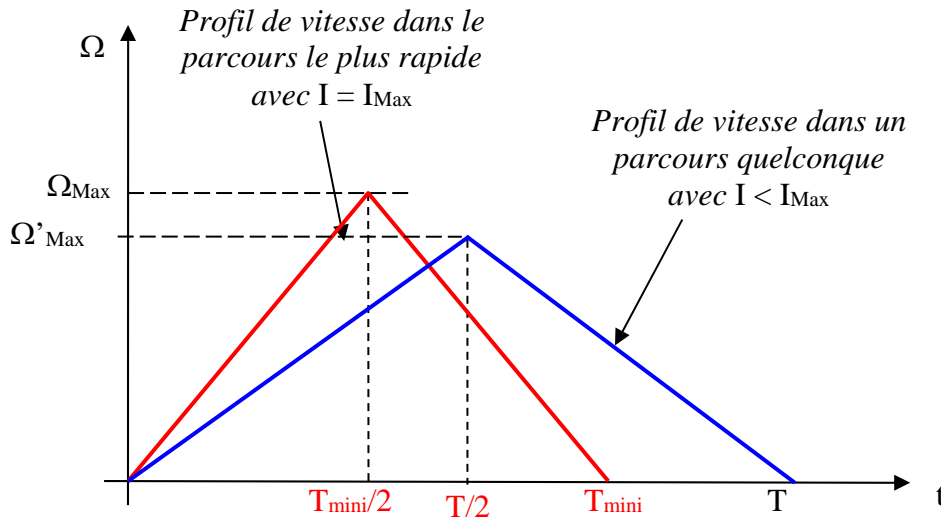
$$\theta_{total} = \frac{1}{2} \cdot \Omega_{Max} \cdot T_{min}$$

Alors, on obtient : $T_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{J \cdot \theta_{total}}{K_\phi \cdot I_{Max}}}$ et $\Omega_{Max} = \sqrt{\frac{K_\phi \cdot I_{Max} \cdot \theta_{total}}{J}}$

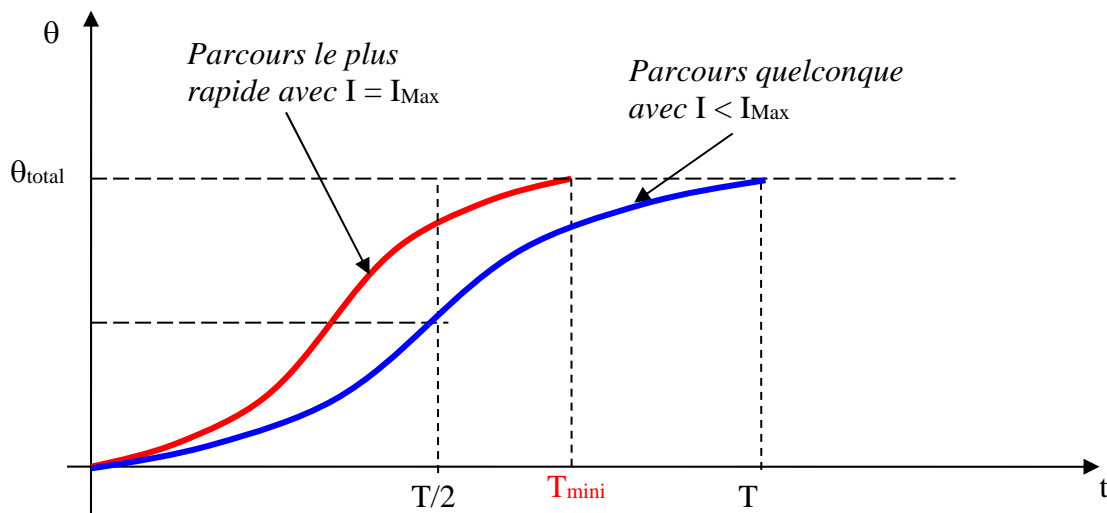
3.5b- Le courant est compris entre 0 à I_{Max} ,

Etude du compromis entre consommation énergétique sur un cycle complet et temps de parcours.

La figure ci-dessous montre les profils de vitesse angulaire qui doivent avoir la même aire :



La suivante montre les profils de déplacement angulaire obtenus par intégration de la vitesse :



Le profil étant le même que précédemment mais avec une vitesse maximale plus faible, on peut écrire que :

$$T = 2 \cdot \sqrt{\frac{J \cdot \theta_{total}}{K_\phi \cdot I}} \quad \text{et} \quad \Omega_{Max} = \sqrt{\frac{K_\phi \cdot I \cdot \theta_{total}}{J}}$$

Quant à la consommation d'énergie, elle ne se produit que durant les phases d'accélération et de décélération, sachant que l'influence de la vitesse constante n'est pas prise en compte.

D'après la question 1.3.3, l'énergie dépensée pour une accélération jusqu'à Ω_{Max} vaut :

$$W_R = R \cdot I^2 \cdot t_{acc} = R \cdot I^2 \cdot \frac{J \cdot \Omega_{Max}}{K_\phi \cdot I} = R \cdot I \cdot \frac{J \cdot \Omega_{Max}}{K_\phi}$$

pour le cycle complet (2 phases accélération et décélération), l'énergie dissipée ou consommée

totale vaut :

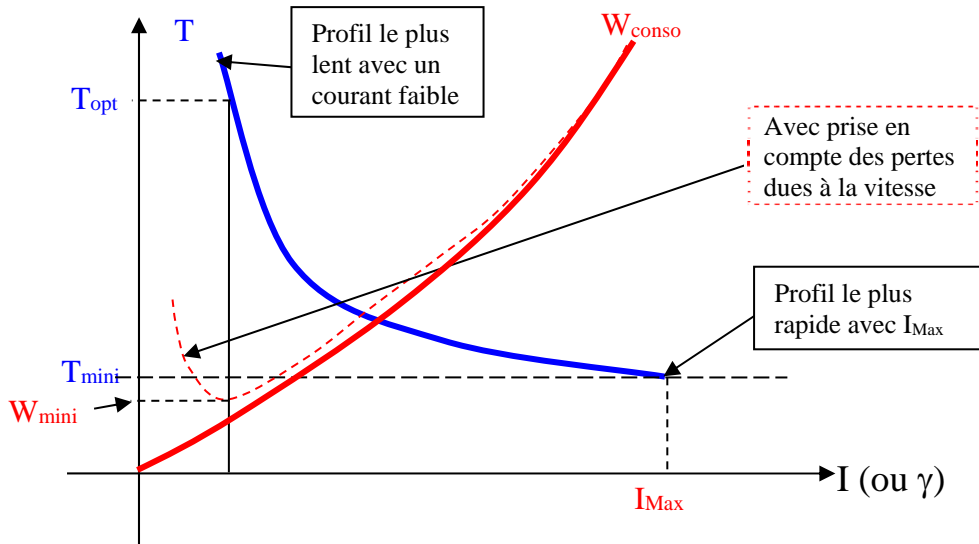
$$W_{conso} = 2 \cdot W_R = 2 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{J \cdot \theta_{total}}{K_\phi}} \cdot I^{1,5}$$

Ou encore en exprimant T et W_{conso} en fonction de l'accélération :

$$T = 2.\theta_{\text{total}}^{1/2}.\gamma^{-1/2} \text{ et } W_{\text{conso}} = 2.\frac{R.J^2}{K_{\phi}^2}.\theta_{\text{total}}^{1/2}.\gamma^{3/2}$$

Les variations de l'énergie dissipée et du temps de trajet sont donc en :

$$T \propto I^{-1/2} \text{ et } W_{\text{conso}} \propto I^{3/2} \text{ (on peut aussi remplacer } I \text{ par l'accélération } \gamma \text{)}$$



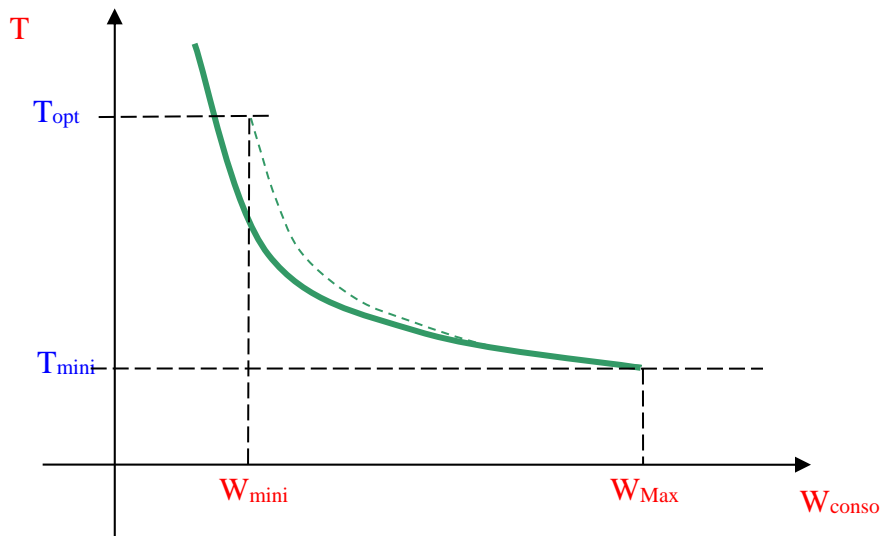
Cette analyse très simplifiée, qui ne considère pas les pertes « à vide » (dus à la vitesse), montre bien le coût énergétique des accélérations vives lors d'un déplacement entre deux points. Ce résultat est d'ailleurs parfaitement extrapolable à un entraînement quelconque, notamment avec un moteur thermique.

Considérer les pertes dues à la vitesse, qui croissent généralement comme le carré ou le cube de la vitesse, ferait apparaître un minimum de consommation W_{mini} et un temps de trajet optimal T_{opt} , en effet, des accélérations très lentes nécessiteraient un temps de fonctionnement élevé avec une puissance dissipée faible due aux pertes à vide, mais une énergie non négligeable.

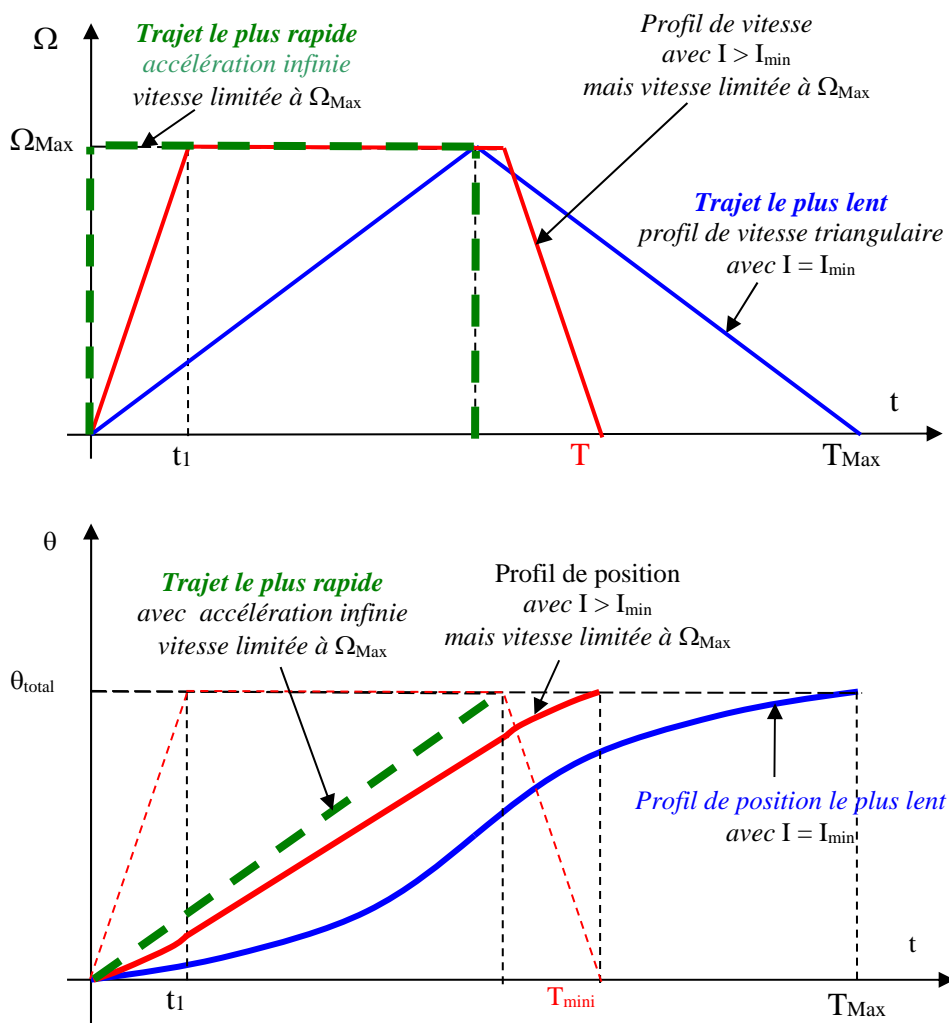
En éliminant l'accélération, on peut ainsi représenter sous forme d'un front de Pareto (ensemble des solutions minimisant les deux critères temps et énergie consommée) :

$$W_{\text{conso}} = 16.\frac{R.J^2}{K_{\phi}^2}.\frac{\theta_{\text{total}}^2}{T^3}$$

En pointillé, on a représenté le front de Pareto lorsque les pertes dues à la vitesse sont prises en compte. Pour les temps élevés, le front s'arrête au minimum de consommation car au-delà les solutions sont dégradées (pour un temps de trajet plus long, l'énergie consommée est supérieure).



L'étude aurait également pu être menée avec un profil trapézoïdal de vitesse lorsque la vitesse maximale est limitée.



Pour le **trajet le plus lent** (accélération la plus faible avec I_{\min} et temps de trajet T_{Max}) avec un profil triangulaire :

$$\frac{T_{\text{Max}}}{2} = \frac{J \cdot \Omega_{\text{Max}}}{K_{\phi} \cdot I_{\min}} \quad \text{et} \quad T_{\text{Max}} = \frac{2 \cdot \theta_{\text{total}}}{\Omega_{\text{Max}}}$$

Pour une **accélération plus forte** ($I > I_{\min}$), il est possible d'avoir une **phase à vitesse constante égale à Ω_{Max}** avec un **temps de trajet T inférieur à T_{Max}** :

$$t_1 = \frac{\Omega_{\text{Max}}}{\gamma}$$

$$T = \frac{\theta_{\text{total}}}{\Omega_{\text{Max}}} + \frac{\Omega_{\text{Max}}}{\gamma}$$

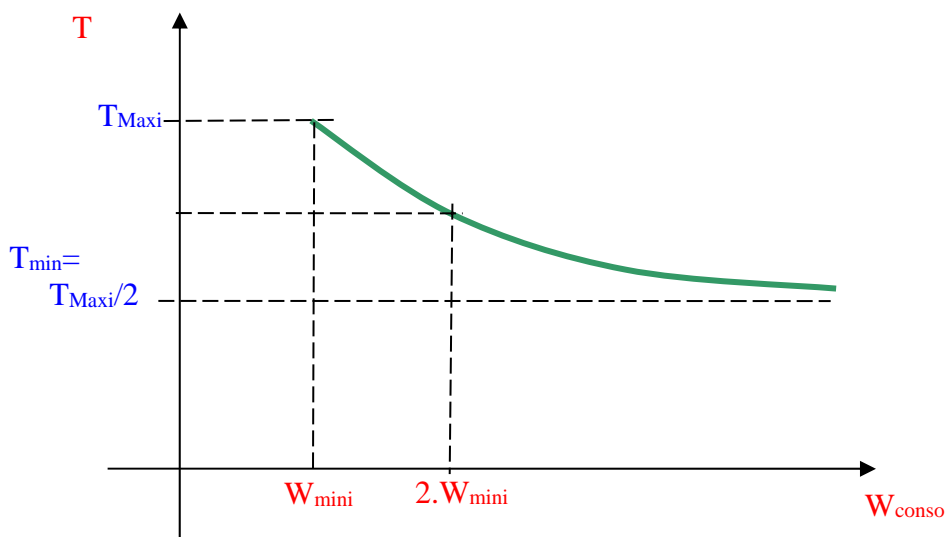
Le **temps de trajet minimal T_{\min}** est obtenu pour une **accélération infinie** (courant infini) et un profil rectangulaire et vaut :

$$T_{\min} = \frac{\theta_{\text{total}}}{\Omega_{\text{Max}}} = \frac{T_{\text{Max}}}{2}$$

L'énergie dissipée sur un cycle correspond à la somme d'une « charge » et d'une « décharge » (la phase à vitesse constante étant supposée non dissipative) :

$$W_R = 2 \cdot R \cdot I^2 \cdot t_1 = R \cdot I^2 \cdot \frac{J \cdot \Omega_{\text{Max}}}{K_{\phi} \cdot I} = \left[\frac{2 \cdot R \cdot J^2}{K_{\phi}^2} \Omega_{\text{Max}} \right] \cdot \gamma$$

L'énergie dissipée (et donc consommée) est donc proportionnelle à l'accélération. Autrement dit, pour le trajet le plus lent, elle a une valeur finie et tend vers l'infini pour permettre de diviser par 2 le temps de trajet.



$$W_{\min} = \frac{2 \cdot R \cdot J^2 \cdot \Omega_{\text{Max}}^3}{K_{\phi}^2 \cdot \theta_{\text{total}}}$$

L'ensemble de ces raisonnements met en évidence le coût énergétique élevé requis pour raccourcir la durée du cycle en effectuant des accélérations vives, y compris dans le cas d'un moteur piloté avec une régulation de courant (raisonnements effectués ici).