



HAL
open science

Energie : ressources, consommation, conversions d'énergie et cycle de vie (diaporama et exercices corrigés)

Bernard Multon

► To cite this version:

Bernard Multon. Energie : ressources, consommation, conversions d'énergie et cycle de vie (diaporama et exercices corrigés) . Licence. France. 2018. cel-01844243

HAL Id: cel-01844243

<https://cel.hal.science/cel-01844243>

Submitted on 19 Jul 2018

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

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

Energie : ressources, consommation, conversions d'énergie et cycle de vie

Energie, puissance, rendements et conversions
Ressources énergétiques et en matières premières
Énergie électrique
Émissions de gaz à effet de serre

1



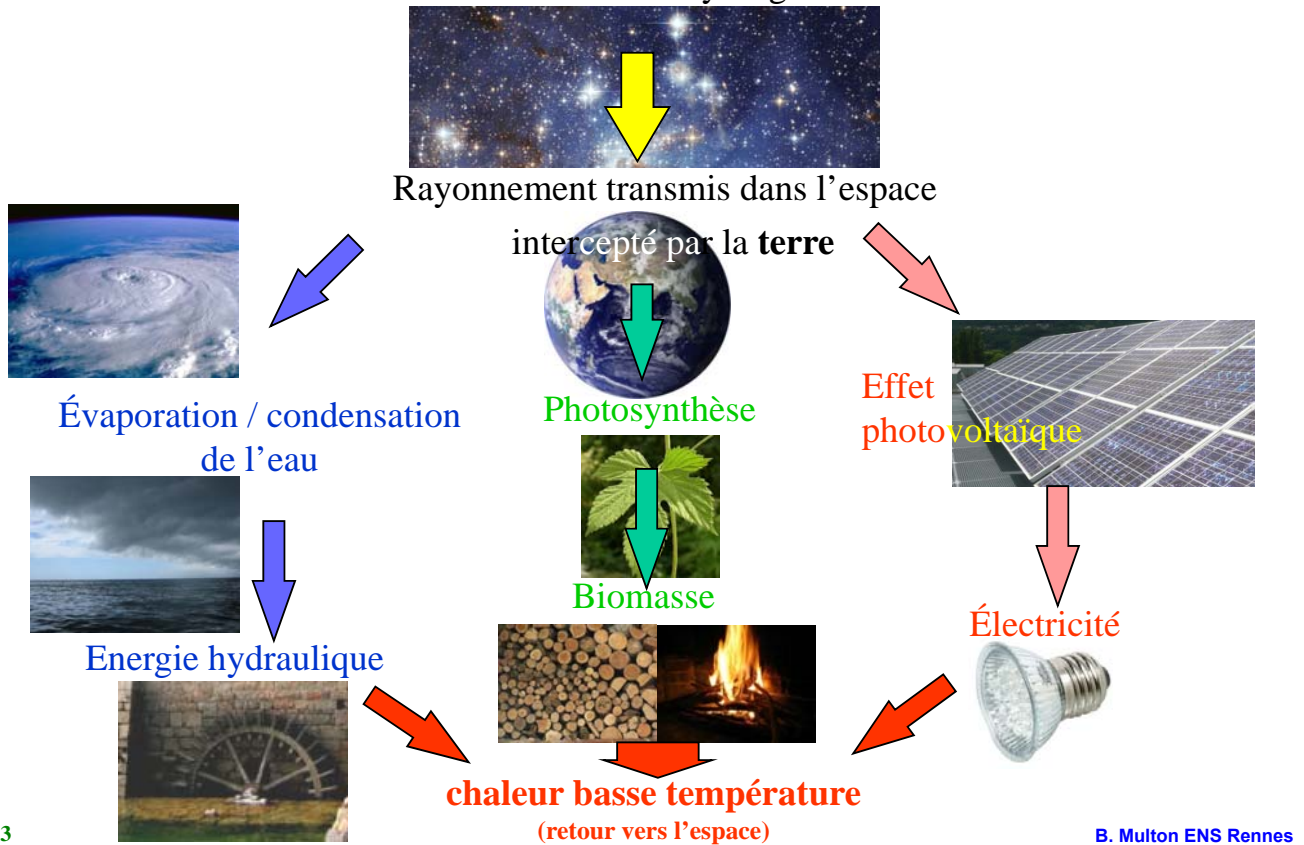
Introduction sur l'énergie

Ressources énergétiques et en matières premières
Énergie électrique
Emissions de gaz à effet de serre

2

« Vie » de l'énergie dans l'univers : exemples

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles



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 $6,2 \cdot 10^{18}$ électrons

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

Facture d'électricité : le **kilowatt.heure kWh**

1 kWh = 3600 000 J = $3,6 \cdot 10^6$ J (MJ)

Carburants : la **tonne équivalent pétrole tep**

1 tep \Leftrightarrow 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 = 10^{12} Wh
et donc : 10^9 kWh)

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)

Et donc : $E = \int P \cdot dt$

La puissance caractérise le 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...

L'énergie caractérise le service (énergétique) : travail, éclairage...

5

B. Multon ENS Rennes

Puissance et énergie : 2 exemples concrets

Exemple 1 : transformation électricité ou combustible en chaleur

Energie : pour échauffer **200 litres** (ou 200 kg) d'eau de **40°C**, il faut **9,3 kWh**
(4,18 J par °C et par gramme, ce qui donne 33,4 millions de joules ou encore 9,3 kWh)

Puissance : pour faire cette conversion

en **3 heures**, il faut un « réchauffeur » de **3,1 kW**

en **1 heure** ---- ---- **9,3 kW**

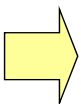
Exemple 2 : transformation rayonnement solaire -> chaleur

Energie : pour obtenir 10 kWh de chaleur

avec un rayonnement solaire de 1 kW/m²

Puissance : il faut : **10 h** avec un capteur solaire de **1 m² (1 kW)**

2 h ----- **5 m² (5 kW)**



Pour effectuer une transformation énergétique **plus vite**,

il faut un **convertisseur plus puissant...**

plus cher, nécessitant plus de matières premières...

6

B. Multon ENS Rennes

En outre, effectuer une transformation plus rapidement consomme souvent plus d'énergie :

Exemple :

Pour déplacer une automobile sur un trajet de 100 km :

- à **100 km/h**, la résistance à l'avancement est de **400 newtons**,
il faut donc **40 MJ** ($400 \times 100\,000$) et **11 kW** (11 kWh/1h)

- à **130 km/h**, la résistance à l'avancement augmente et vaut **650 N** :
65 MJ et **23,5 kW** (18 kWh/0,77 h)

Aller plus vite :

- consomme **plus d'énergie utile**
- nécessite un convertisseur d'énergie (moteur)
plus puissant donc plus cher

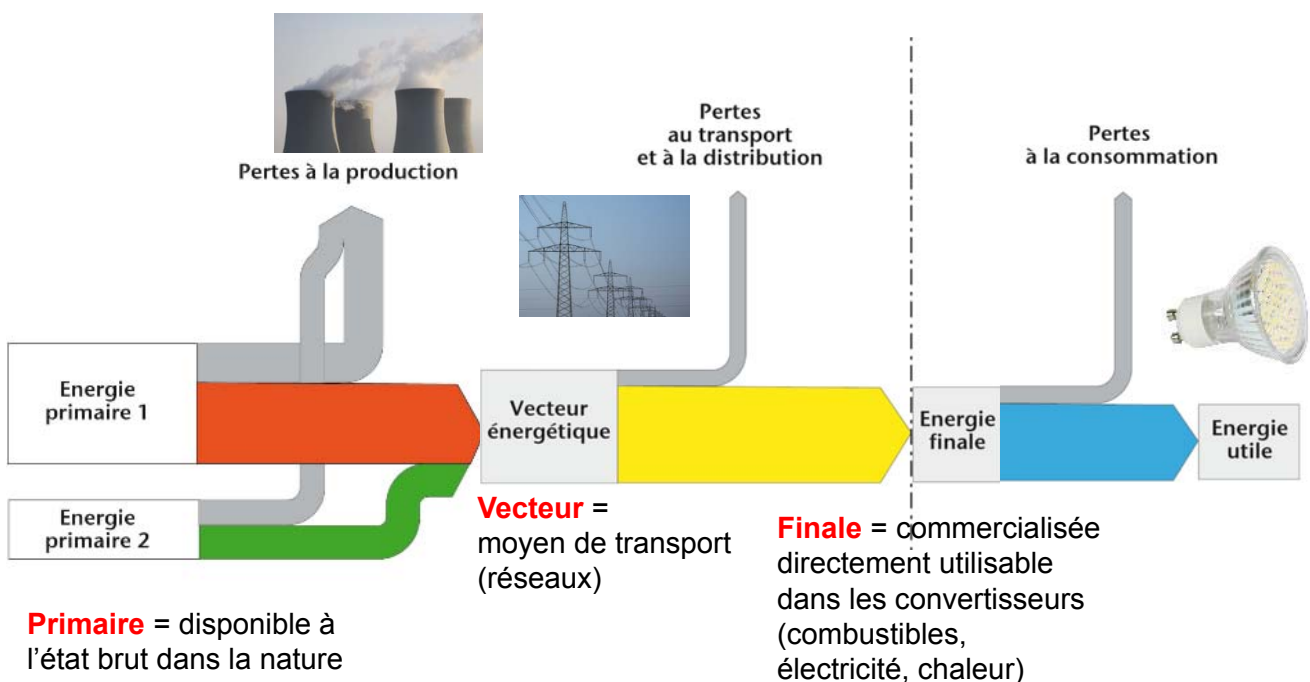
En termes d'écobilan :

- plus d'énergie consommée pour assurer le service
- plus de matières premières requises
- plus d'énergie grise pour la fabrication du moteur

7

B. Multon ENS Rennes

Energies primaire, finale et utile : définitions



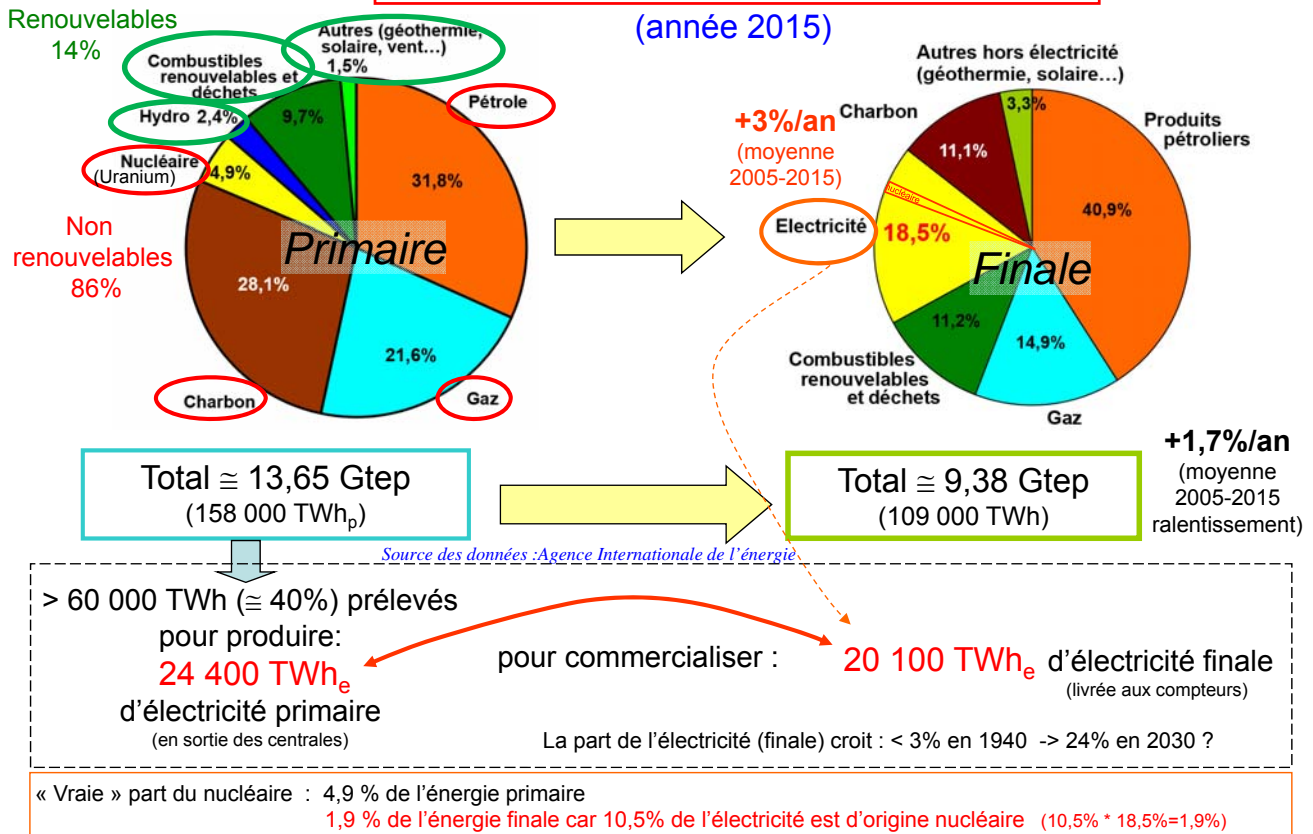
Primaire = disponible à l'état brut dans la nature

2 catégories :

Stocks non renouvelables fossiles et fissiles
Flux renouvelables soleil, géothermie

Utile = service rendu éclairage, mobilité, froid...

Bilan énergétique mondial : décryptage et place de l'électricité



9

B. Multon ENS Rennes

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** \rightarrow **forme sortante**

carburant \rightarrow chaleur (combustion)

carburant \rightarrow mécanique (moteur à combustion)

rayonnement solaire \rightarrow électricité (photovoltaïque)

électricité \rightarrow 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% :

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

Les pertes se manifestent sous forme de chaleur

qu'il faut évacuer dans l'environnement :

$$\text{Pertes énergétiques} = \text{Énergie entrante} - \text{Énergie sortante}$$

10

B. Multon ENS Rennes

Rendement : exemples en « production d'énergie »

Exemple 1 : production d'électricité à partir d'un combustible (centrale thermique)

Rendement : entre 30% (nucléaire) et 60% (cycles combinés : combustion + vapeur)

Pour « produire » 1 kWh électrique
avec un rendement de 30%,
on « consomme » 3,3 kWh de combustible



Si l'énergie entrante est non renouvelable,
un mauvais rendement est le signe d'un grave
gâchi de ressources

(dégradation irréversible de matière premières énergétiques polluantes)

Exemple 2 : production d'électricité à partir d'une ressource renouvelable

Cas d'un générateur photovoltaïque : rendement entre 8% et 30%



Si l'énergie entrante est renouvelable, un mauvais rendement a
des conséquences très différentes :

- plus d'espace occupé
- convertisseur éventuellement plus gros...

Il peut même exister un optimum de rendement en considérant tout le cycle de vie...

11

B. Multon ENS Rennes

Le rendement instantané (ou en puissance) varie en fonction du point de fonctionnement.

Exemple d'un moteur tournant

De façon caricaturale, il y a deux catégories de pertes :

- en charge : ici fonction du couple (ou de l'effort)
- à vide : ici fonction de la vitesse

Modèle simplifié :

- pertes en charge fonctions du couple : $p_{ch} \cong k_1.C^2$
- pertes à vide fonctions de la vitesse : $p_0 \cong k_2.\Omega^2$

Raisonnement instantané (en puissance) :

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

Puissance utile : $P_u = C.\Omega$

Rendement :

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

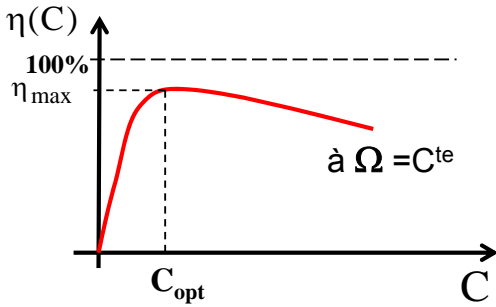
12

B. Multon ENS Rennes

Rendement instantané :

$$\eta_p = \frac{C\Omega}{C.\Omega + k_1.C^2 + k_2.\Omega^2}$$

A vitesse Ω ou couple C donné, la courbe du rendement passe par un maximum :



Le rendement d'une conversion énergétique, dépend du point de fonctionnement, ici : (C, Ω)

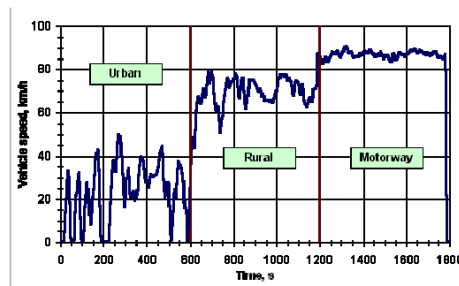
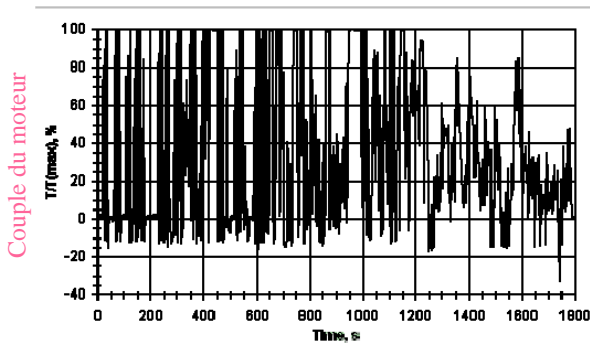
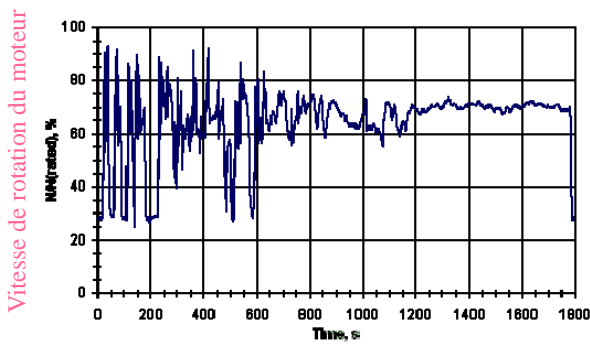
Cette courbe de rendement est en réalité générique, au-delà de cet exemple

Rendement énergétique (ou sur cycle) :

sur un cycle temporel, il nécessite de connaître la fonction $\eta_p(C, \Omega)$, ce qui donne notamment dans en situation discrétisée : $\{C(t), \Omega(t)\}$

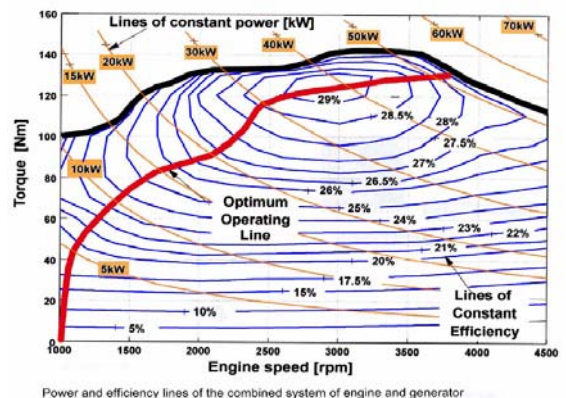
$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u . dt}{\int_{\text{cycle}} P_{\text{cons}} . dt} = \frac{\int_{\text{cycle}} C(t) . \Omega(t) . dt}{\int_{\text{cycle}} \frac{C(t) . \Omega(t)}{\eta_p(C, \Omega)} . dt} = \frac{\sum_{i=1 \text{ à } N} C_i . \Omega_i . \Delta t}{\sum_{i=1 \text{ à } N} \frac{C_i . \Omega_i}{\eta_p(C_i, \Omega_i)} . \Delta t}$$

Exemple : cycle automobile



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

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

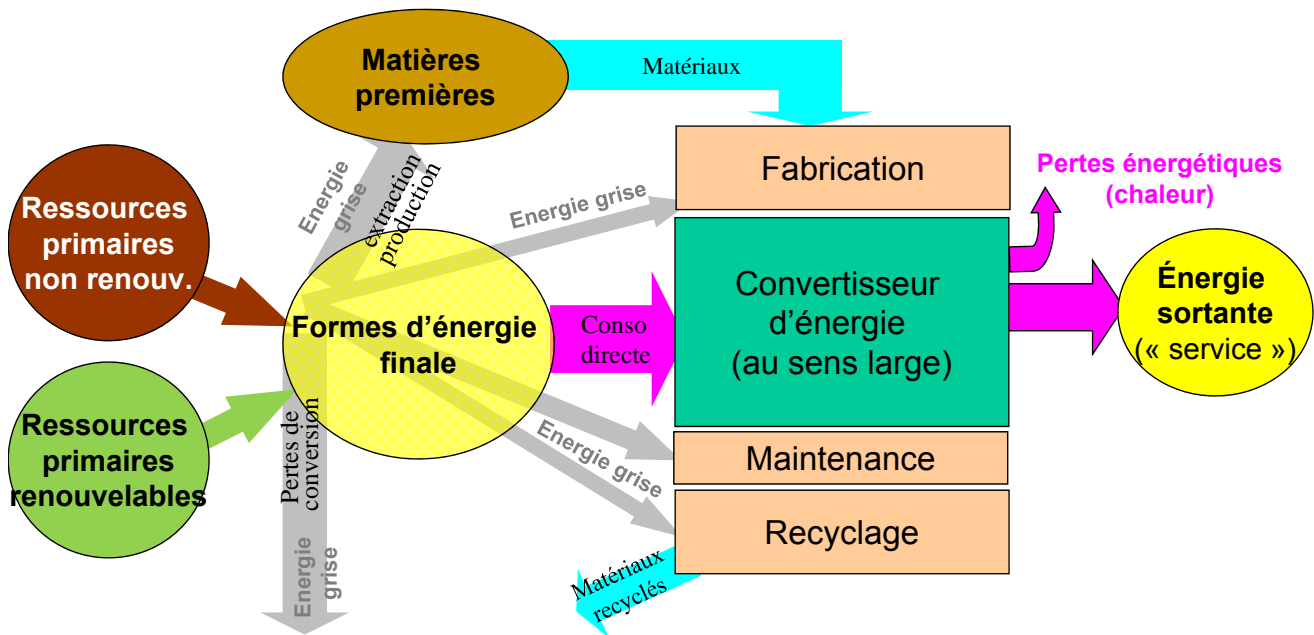


Power and efficiency lines of the combined system of engine and generator

Source : IFP

➔ **Calcul du rendement sur cycle**

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



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

15

B. Multon ENS Rennes

Valeurs d'énergie grise par unité de masse de matériaux (embodied energy)

Acier

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

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

Aluminium

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

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

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

Attention, ces valeurs peuvent varier significativement selon la date de production des données, les zones géographiques, les procédés...

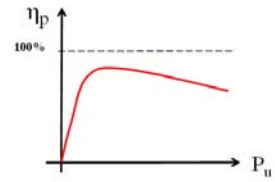
16

B. Multon ENS Rennes

Bilan des rendements d'un convertisseur d'énergie

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

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

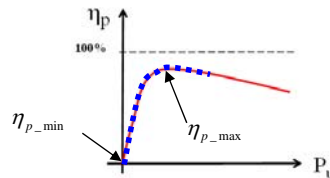


2- Rendement énergétique (sur cycle) :
(sur un cycle de fonctionnement, incluant un ensemble de points...)

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

Attention, le rendement sur cycle n'est pas égal à la moyenne pondérée du rendement instantané :

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u(t) \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} \frac{P_u(t)}{\eta_p(P_u)} \cdot dt} \neq \frac{1}{T_{\text{cycle}}} \int_{\text{cycle}} \eta_p(P_u) \cdot dt$$



$$\eta_{p_min} < \eta_e < \eta_{p_max}$$

17

B. Multon ENS Rennes

Différents niveaux de rendement d'un convertisseur d'énergie

3- Rendement sur cycle de vie soutenable :
(ne comptabilisant que la consommation de ressources primaires non renouvelables)

$$\eta_{lca_sust} = \frac{E_{u_life}}{E_{PNR_life}}$$

Totalité de l'énergie utile « produite » sur la vie

Totalité de l'énergie primaire non renouvelable « consommée » sur la vie

$$\eta_{lca_sust} = \frac{E_{u_life}}{\frac{E_{u_life} + E_{losses_life}}{\eta_{p-f_{NR}}} + E_{emb_{NR}}}$$

Rendement de transformation
Énergie primaire **non renouv.** en énergie finale

$$\eta_{p-f_{NR}} = \frac{E_{finale}}{E_{p-NR}}$$

Electricité basse tension en France : $\eta_{p-f_{NR}} = 0,3$

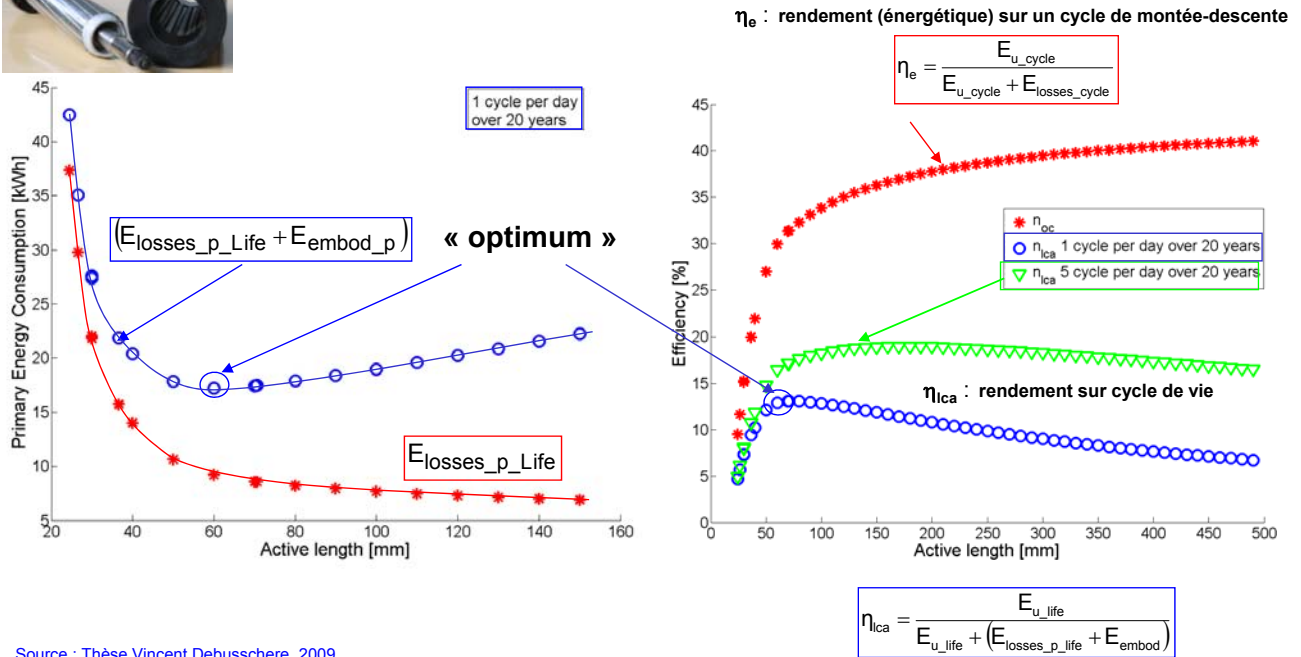
Énergie grise
(primaire non renouvelable)

18

B. Multon ENS Rennes

Application à un moteur asynchrone d'actionneur de volet roulant (faible durée d'usage)

Dans un moteur électrique, augmenter la quantité de matières actives (Fe, Cu, Al) permet de réduire les pertes.



19

B. Multon ENS Rennes

« Production » d'énergie : 2 autres indicateurs pour prendre en compte le cycle de vie des systèmes de « production »

Energy Pay Back Time : EPBT

$$EPBT = \frac{\text{Energie primaire (NR) consommée sur la vie}}{\text{Energie annuelle primaire substituée}} \quad \text{en années}$$

dépend du mix électrique local de production, de la technologie...

Avantage environnemental sur le plan énergétique si : **EPBT < durée de vie**

Energy Returned On Energy Invested (EROEI)

$$EROEI = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie investie}}$$

« rentabilité » si **EROEI > 1**

Attention, l'EROEI ne prend pas en compte la nature non renouvelable des ressources consommées durant la vie, ainsi l'EROEI de la production d'électricité au pétrole peut être supérieur à celui de l'éolien ou du PV !

Nécessité de comptabiliser la part non renouvelable consommée sur la vie :

$$EROEI_{sust} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Part non renouv. de l'énergie investie}}$$

soutenabilité si
EROEI_{sust} > 1

20

B. Multon ENS Rennes

Application de l'**EROEI_{sust}** 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**

Énergie grise : **15,4 TWh_p**

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie :
Avec un rendement de production électrique de 33% :

$$E_{pNR} = 3 \times 280 + 15,4 \approx 855 \text{ TWh}_p$$

$$EROEI_{sust} = \frac{280}{855} = 0,33 < 1$$

+ des déchets à longue durée de vie
+ beaucoup de matière non recyclable...

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 de l'**EROEI_{sust}** aux systèmes de production d'électricité

Phovoltaïque : cas des installations en toiture

Pour produire **7 TWh_e par an** avec un rayonnement de **1000 kWh/m²/an**
(valeur basse française)



Avec une technologie au silicium polycristallin avec 16% de rendement
et un taux d'utilisation (PR) de 75%, soit **58 km²** sont nécessaires
(note : en France, il y a 8500 km² de superficie bâtie...)

Fabrication des modules + montage en toiture + onduleur
fourchette de données (voir source) : 280 à 730 kWh_p/(m² PV)



Énergie grise : **16 à 42 TWh_p**

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie :
sur 40 ans (1 renouvellement au bout de 20 ans) $E_{pNR} \approx 2 \times (16 \text{ à } 42) = 32 \text{ à } 84 \text{ TWh}_p$

Production d'énergie sur 40 ans : $E_u \approx 2 \times 20 \times 7 = 280 \text{ TWh}_e$

$$EROEI_{sust} = \frac{280}{32 \text{ à } 84} = 3,3 \text{ à } 8,7 > 1$$

(en réalité, énergie grise en baisse)

+ matériaux recyclables
et beaucoup moins de déchets toxiques

EPBT de la production photovoltaïque et de l'éolien

Cas des installations photovoltaïques en toiture

Pour des durées de vie de 20 à 30 ans



Source image : auteur

Source informations : Energy Research Centre of the Netherlands, Workshop Photovoltaik-Modultechnik, nov. 2009.

Technologie/ Rendement PV/ Energie grise	Nord Europe (900 heures par an 2,02 kWh _{pNR} compensés/an ⁽²⁾)	Sud Europe (1700 heures par an 3,82 kWh _{pNR} compensés/an ⁽²⁾)
Silicium cristallin / 14% / 5,8 kWh _p / W _c ⁽¹⁾	2,9 années Meilleur rendement PV	1,5 an
Silicium couches minces 9% / 3,8 kWh _p / W _c ⁽¹⁾	1,9 an Meilleur compromis matériaux / écobilan	1 an
CdTe / 11% / 2,1 kWh _p / W _c ⁽¹⁾	1 an Meilleur EPBT	0,55 an

⁽¹⁾ kWh_p / W_c = kilowattheures primaires par kilowatts crêtes de capacité de production PV

⁽²⁾ Conditions de calcul de l'EPBT : durée de vie 20 ans,

PR = 75% et conso de 3 kWh_{pNR} par kWh_e substitué

Cas de l'éolien (terrestre, grandes machines)

Pour une durée de vie de 20 ans



Source image : Gamesa

Exemple Gamesa G8X (2 MW – 80 m) : E_{emb} = 1,6 GWh_p

Site normalement venté : 2000 h/an => 4 GWh_e/an => **0,13 année**⁽³⁾

Site terrestre bien venté : 2700 h/an => 5,4 GWh_e/an => **0,1 année**⁽³⁾

⁽³⁾ Conditions de calcul de l'EPBT : durée de vie 20 ans,

et conso de 3 kWh_{pNR} par kWh_e substitué

Source informations :

E. Martinez et al., "Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine", Elsevier Ren. Energy 2009

B. Multon ENS Rennes

23

Cas des transports : raisonnement du puits à la roue

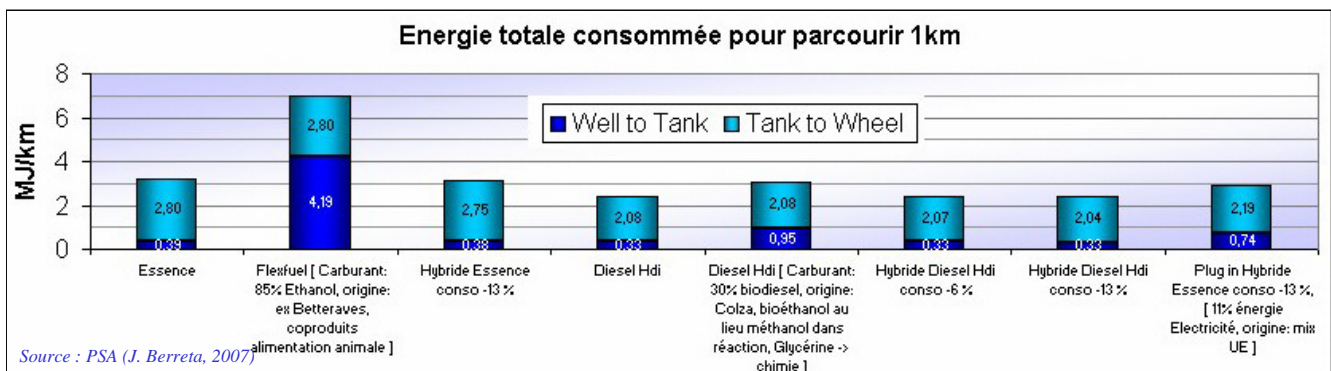
Source primaire
« Puits » (Well)



Energie embraquée primaire
Réservoir (Tank)



Energie utile
« À la roue » (Wheel)



Mêmes questions avec les véhicules tout électriques ou à air comprimé :

Comment est produite l'électricité ?

Quel est le rendement de charge ou de la compression (air comprimé) ?

Quel est le rendement de la chaîne de traction ?

Le produit des rendements est parfois très faible,

bien plus que celui des chaînes de traction traditionnelle...

Alors, si la ressource primaire est conventionnelle (fossiles), les solutions à faible rendement ont peu d'intérêt sinon celui de déporter les pollutions ailleurs.

24

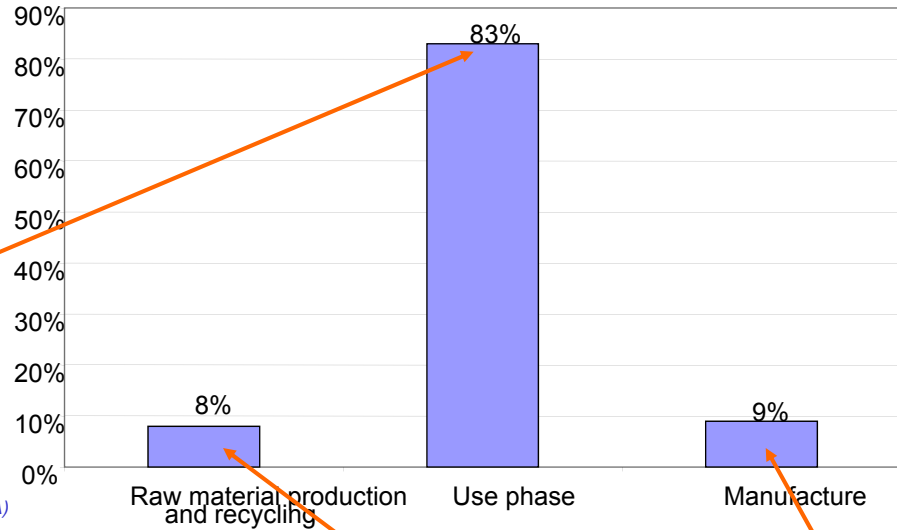
B. Multon ENS Rennes

Un progrès : le raisonnement sur tout le cycle de vie

Énergie consommée pendant la vie d'une 406 HDI :

Vie de référence :
150 000 km – 10 ans

5,6 L / 100 km
↓
84 MWh_{PCI}



Source : J. Beretta (PSA) 2007 (JEEA)

Dans cet exemple, la production de matière première et le recyclage ainsi que la fabrication coûtent respectivement 9,1 et 8,1 MWh_{PCI} soit, pour ce véhicule de 1350 kg, environ **12 kWh_{PCI}/kg**

La part de l'énergie grise du véhicule doit être considérée.

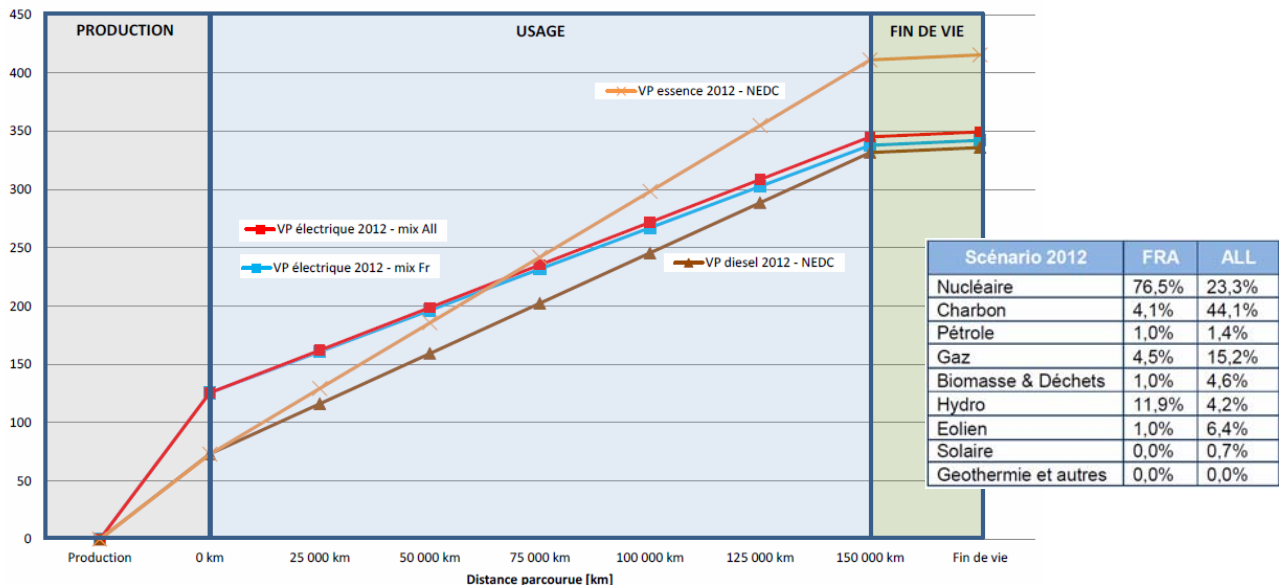
La réduction de la consommation peut s'accompagner d'un accroissement de l'énergie grise (hybridation, aluminium...)

25

B. Multon ENS Rennes

Comparaison de la consommation d'énergie primaire sur cycle de vie des véhicules thermiques et électriques

Indicateur de consommation d'énergie primaire totale [GJ]



Indicateur de la consommation d'énergie primaire totale pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence

Source : rap. ADEME 2013, « Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux Induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020 »

26

B. Multon ENS Rennes



Introduction sur l'énergie

Ressources énergétiques et en matières premières

Énergie électrique

Emissions de gaz à effet de serre

Matières premières : différence entre réserves et ressources

Ressources :

- **identifiées** ou démontrées (en lieu, teneur, qualité et quantité)
liées aux connaissances géologiques
et à la prospection par échantillonnage ;
- **présumées** définies par extrapolation
des connaissances sur les ressources identifiées.

Réserves : relatives aux critères techniques, économiques (voire écologiques ??)
d'exploitation, tiennent compte des pertes à l'extraction

Réserves < Ressources

Le rapport R/P (Réserves en tonnes sur Production annuelle en tonnes/an) :

Il se chiffre **en années** et correspond au nombre potentiel d'années de production au rythme en cours.

Mais **attention**, les réserves peuvent être ré-évaluées (progrès techniques ou nouvelles contraintes...) à la hausse ou à la baisse.

Ressources énergétiques non renouvelables (stocks épuisables)

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbons, pétroles, gaz naturel) :

Ressources : ≈ 5000 Gtep

Réserves prouvées : ≈ 1000 Gtep (240 pétroles, 170 gaz, 650 charbons)

Source : BP Energy Outlook 2017

URANIUM FISSILE :

Ressources : ≈ 150 Gtep (avec réacteurs actuels)

Réserves estimées : ≈ 70 Gtep (7,6 Mtonnes U_{nat})

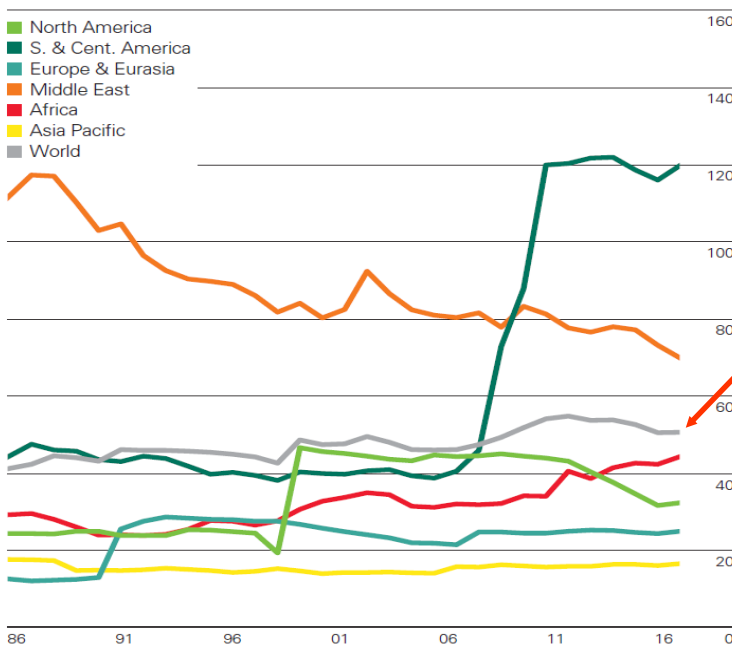
Source : Uranium 2017: Resources, Production and Demand, AIEA

RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :
100 000 Gtep... par an !

Réserves en matières premières énergétiques non renouvelables :

en Gtep et **rapport R/P** (réserves sur production annuelle)

Pétrole



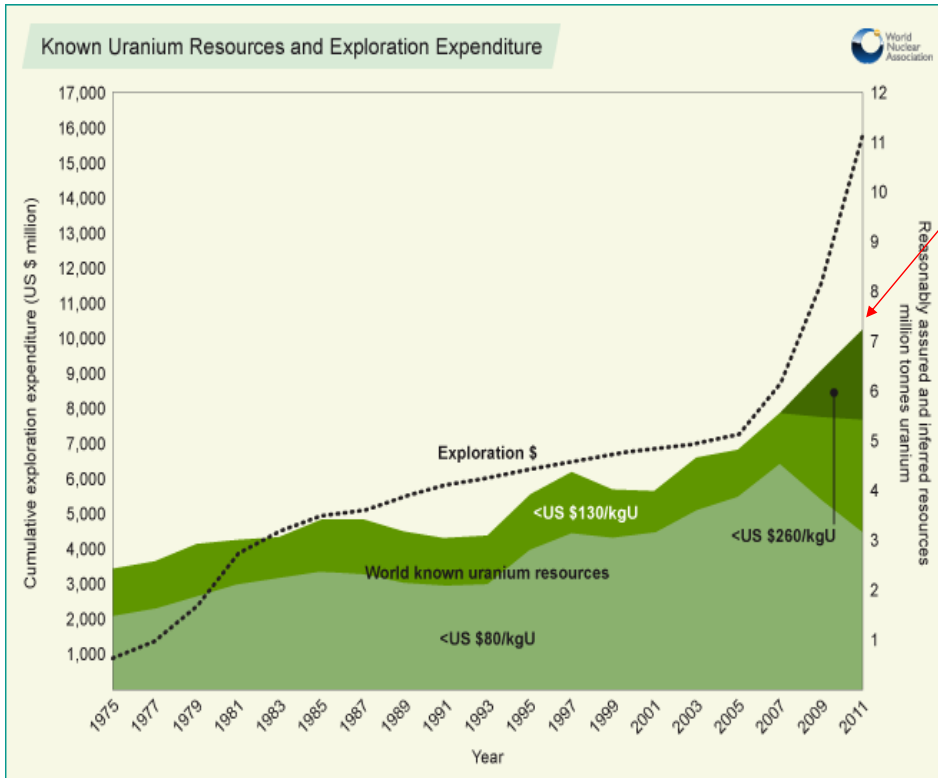
R/P = 51 ans

Gaz naturel : 52 ans
Charbons : 153 ans

La consommation
de charbon diminue...

Source : BP Statistical review 2017

Evolution des ressources en uranium (« red book »)

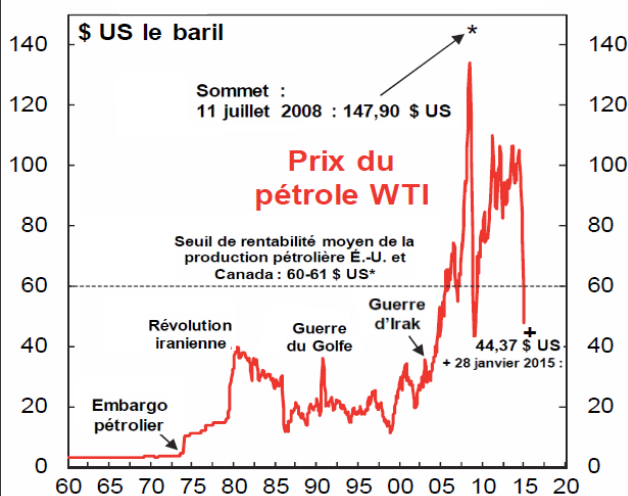


7,6 M tonnes (MAJ 2016)
à < 260 \$/kg

un doublement des dépenses d'exploration et du prix a permis d'augmenter de 25% les réserves...

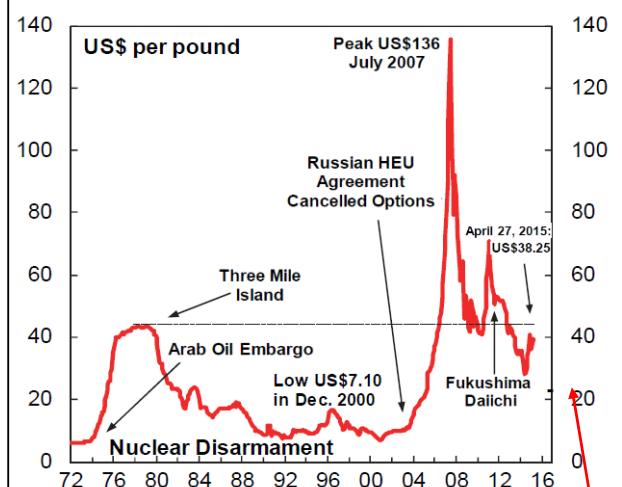
Les cours des matières premières énergétiques fluctuent et affectent économie et stabilité politique...

Le baril de pétrole brut : la référence



Et (en Europe), le prix du gaz naturel fluctue comme celui du pétrole...

Le cours de l'uranium (U₃O₈): également instable

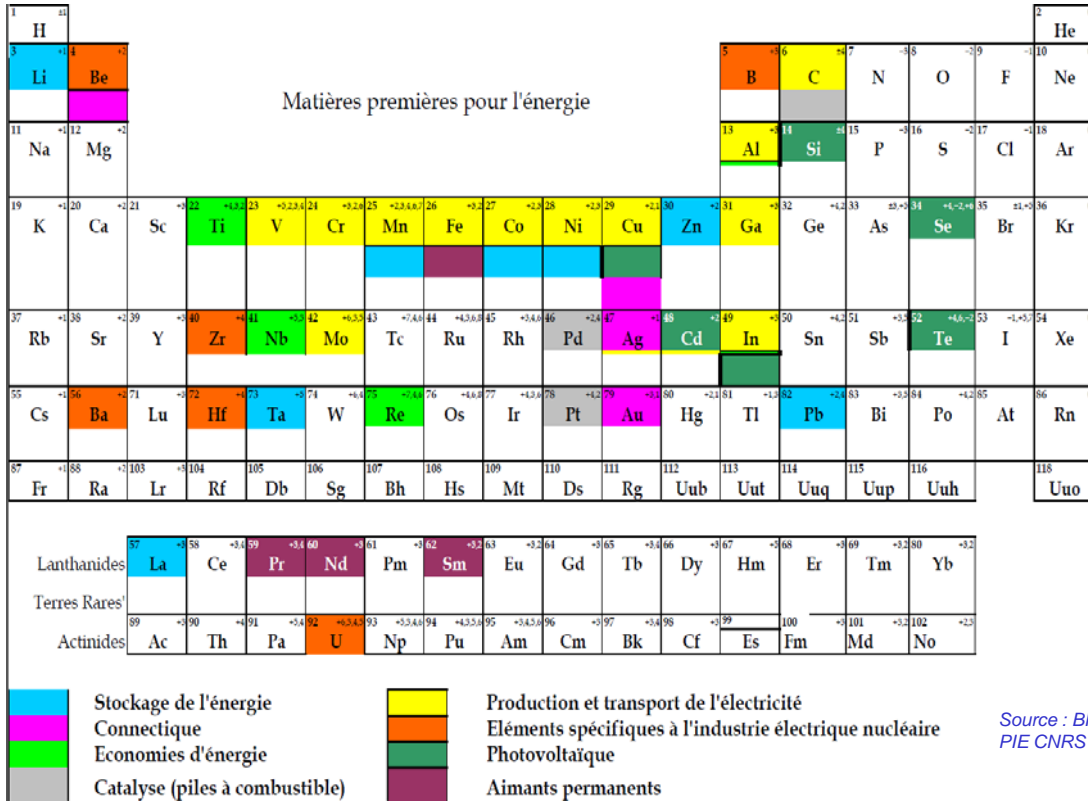


10 \$/lb = 26 \$/kg

Fin 2017 : 22 \$/lb
(30 \$/lb contrats long terme)

Matières premières non énergétiques :

Dans le **domaine énergétique**, elles sont nécessaires notamment pour fabriquer les convertisseurs d'énergie. Elle sont généralement **recyclables**

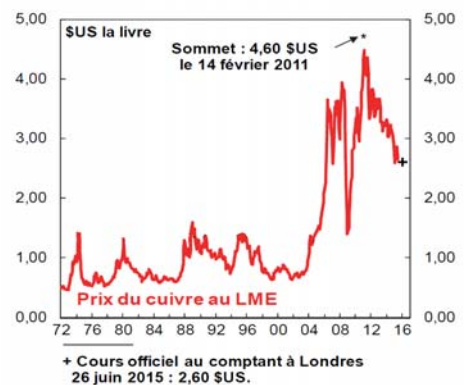
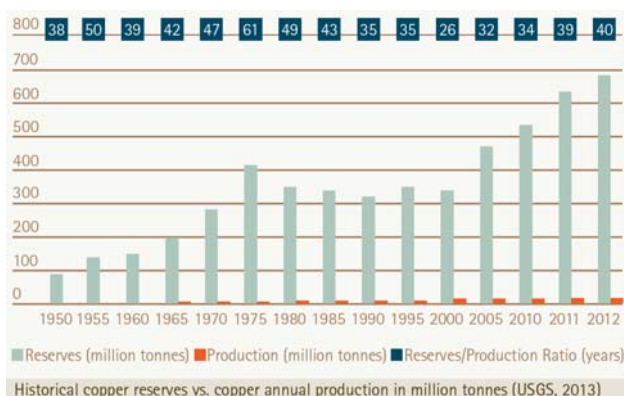


Matières premières non énergétiques :

	Ressources (USGS 2017)	Réserves (USGS 2017)	Production Mondiale (estimations 2016)		Réserves/ Production annuelle primaire (années)
			primaire	secondaire % total	
Acier	> 230 Gt	82 Gt	1,2 Gt	0,4 Gt (25%)	68
Alu	27 à 37 Gt	13 Gt	59 Mt	56 Mt (49%)	220
Cu	2,1 à 5,6 Gt	720 Mt	19,4 Mt	3,9 Mt (17%)	37
Pb	2 Gt	88 Mt	4,8 M	6,4 M (57%)	18
Co	25 à 145 Mt	7 Mt	123 kt	?	57
Ni	130 Mt	78 Mt	2,25 Mt	?	35
Pt	50 kt ?	13 kt	170 t	53	76
Nd (néodyme)	?	8 à 20 Mt	21 kt	(< 1%)	> 380
Li (Metal)	40 Mt	14 Mt	35 kt	(≈ 0%)	400

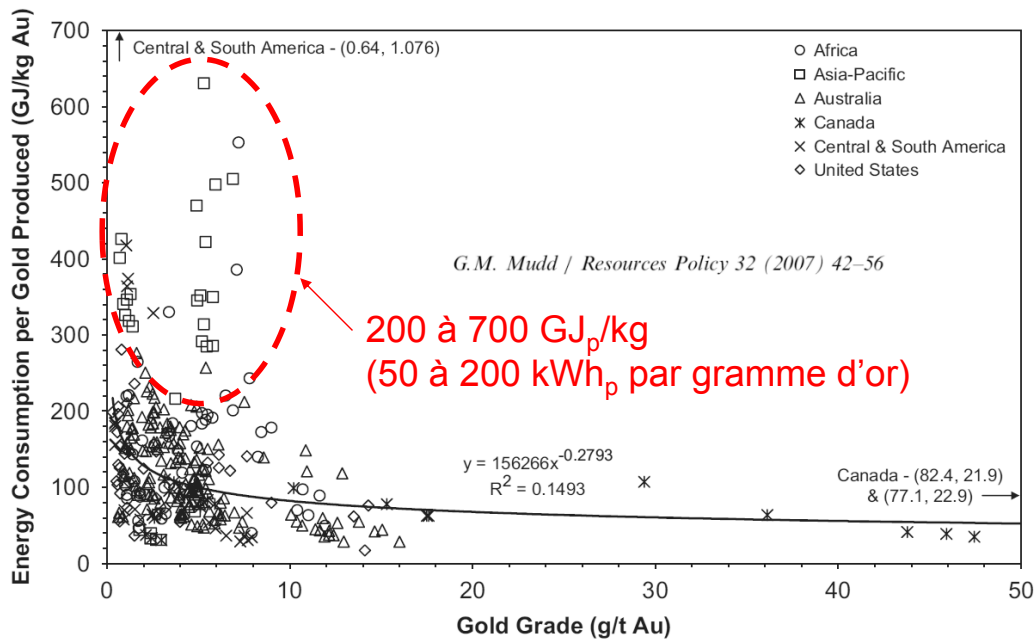
USGS = US Geological Survey

Evolution du **rapport R/P** et des cours, **cas du cuivre** :



Dépense énergétique d'extraction minière

Plus la concentration en minerai est faible (les gisements à haute concentration sont généralement épuisés), plus la consommation d'énergie spécifique est élevée.
Cas de l'or :

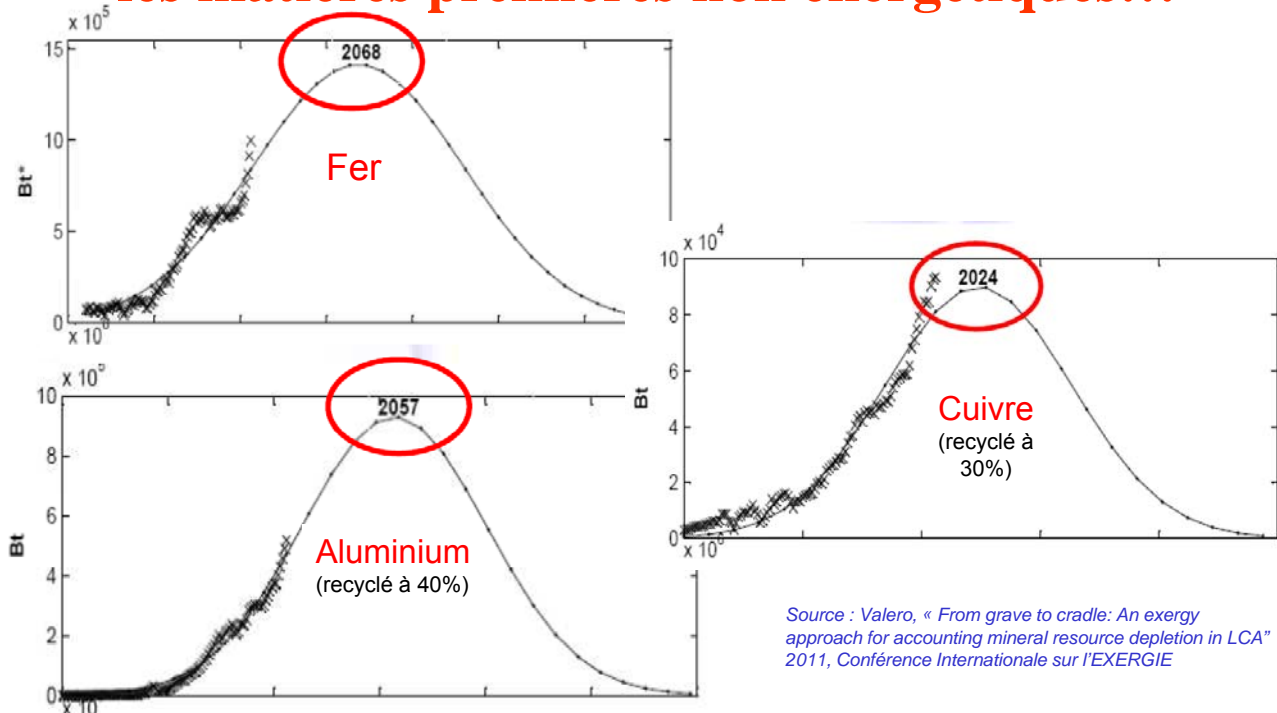


Source : Mudd, « Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability? » Resources Policy 2007

35

B. Multon ENS Rennes

Le pic de Hubbert concerne aussi les matières premières non énergétiques...



Mais contrairement aux matières premières énergétiques, elles sont recyclables et doivent impérativement être recyclées...

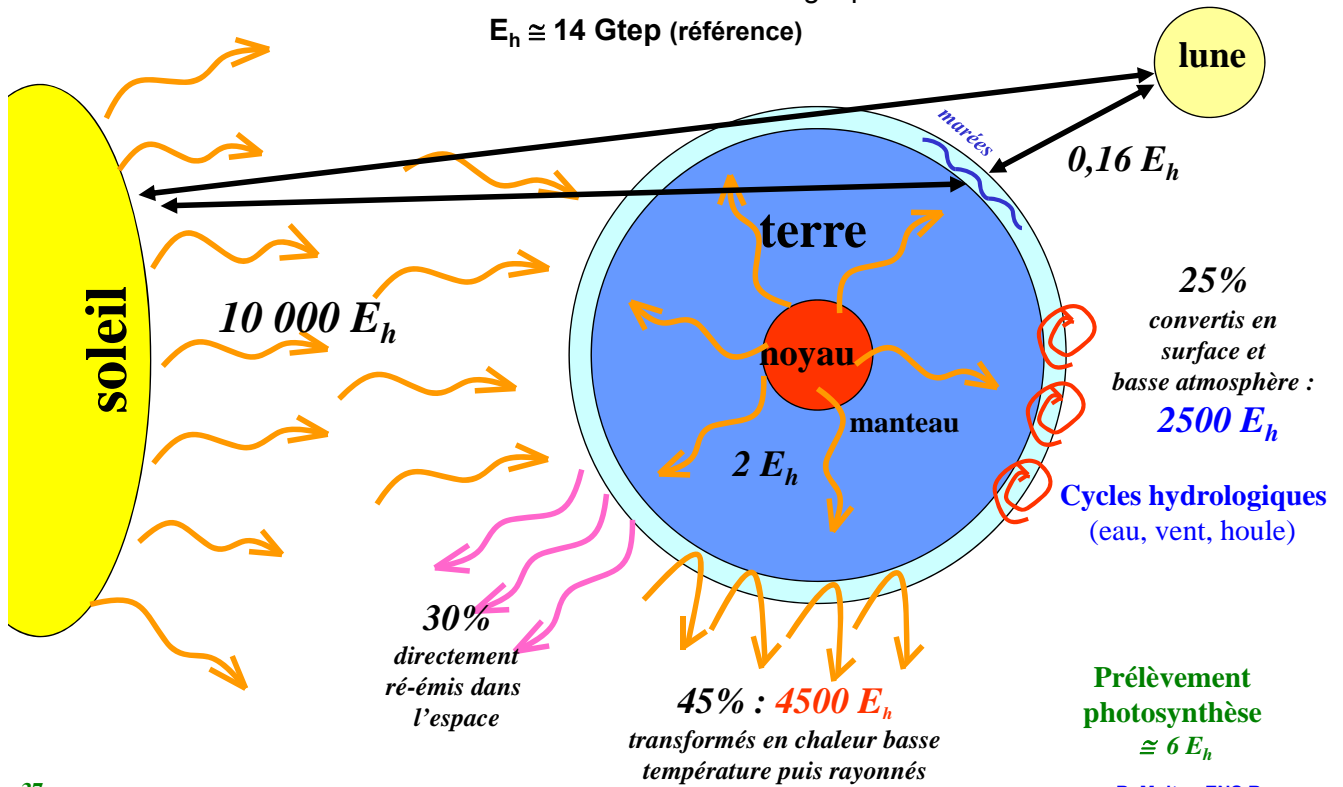
36

B. Multon ENS Rennes

Ressources énergétiques renouvelables (flux annuels)

Valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité

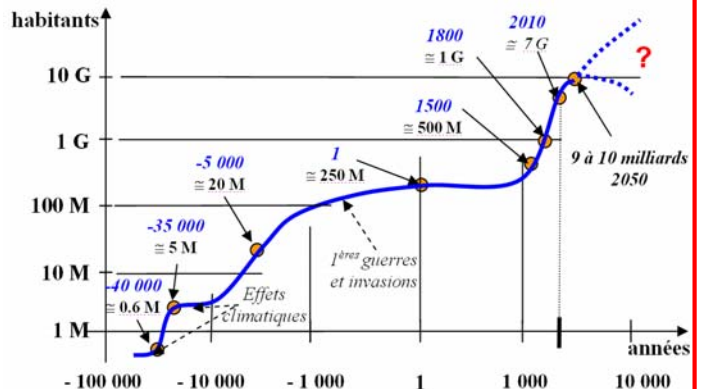
$E_h \cong 14 \text{ Gtep}$ (référence)



37

B. Multon ENS Rennes

Evolution la population humaine sur la terre :



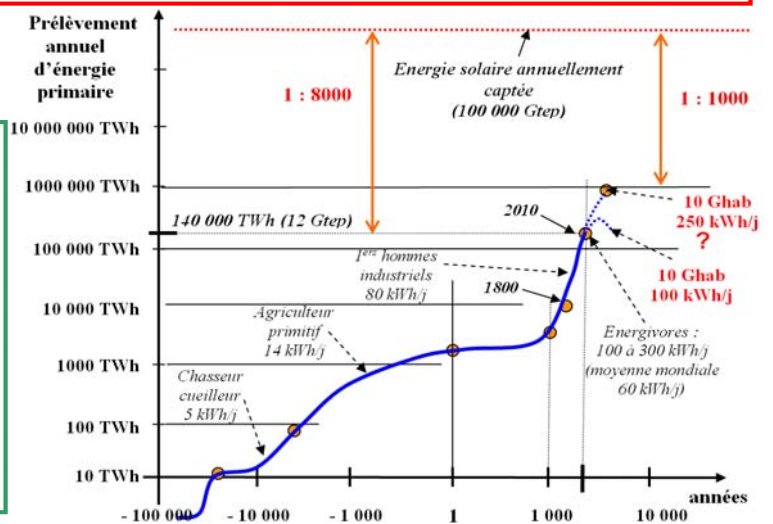
Consommation énergétique des activités humaines :

Besoins métaboliques (nourriture) :
3,5 kWh/jour/personne

Energie primaire, par habitant :
(énergie commerciale, hors biens importés)

Moyenne mondiale : 60 kWh/j
Africain : 14 kWh/j

US américain : 270 kWh/j
Français : 140 kWh/j



38

Source image : auteur

B. Multon ENS Rennes



Introduction sur l'énergie

Ressources énergétiques de la planète

Énergie électrique

Emissions de gaz à effet de serre



Part de l'électricité énergie en croissance rapide dans l'énergie finale

(hors énergie électrique produite dans les systèmes embarqués.)

10 ³ kWh	Énergie primaire	Energie finale	Production électrique (pertes comprises)	Rapport E _{élect} /E _{primaire} %	Rapport E _{élect} /E _{finale} %
1940	20	?	0,5	2,5%	?
1960	40	?	2	5%	?
1980	80	64	8	10%	12,5%
2010	147	102	21,2	14,4%	20,8%
<i>France 2010</i>	3,2	2	0,55 (pertes et exports compris)	17%	27,5%

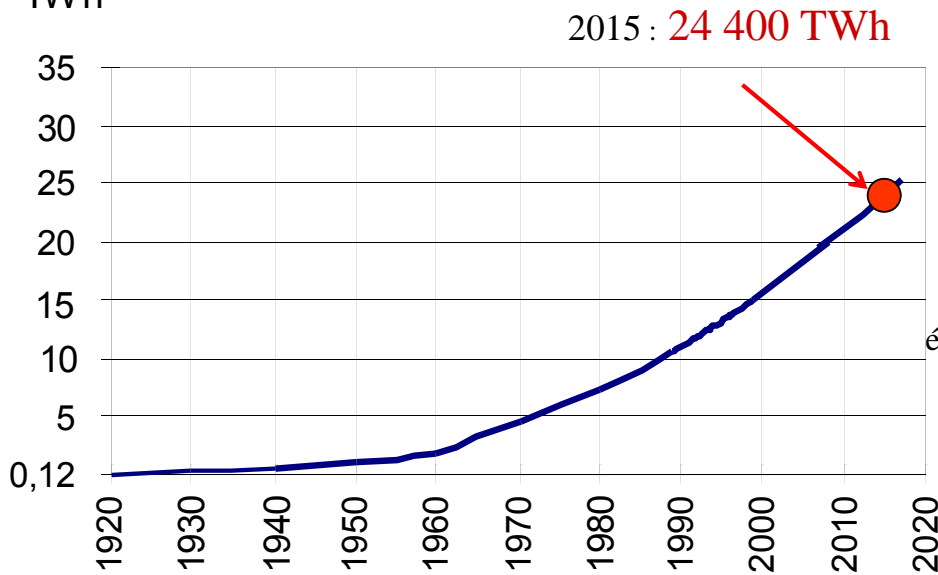
La part de l'électricité progresse à un rythme rapide qui devrait se poursuivre dans les années à venir...

En outre si l'électricité est encore très polluante aujourd'hui (75% d'origine non renouvelable), la situation s'améliore rapidement.

L'énergie électrique : croissance de la production

(Entre 1973 et 2008 : doublement de la part de l'électricité dans le bouquet final)

10^3 TWh



2015 : 24 400 TWh

$\cong +3\%$ / an
Moyenne 10 ans
(2005-2015)
en léger ralentissement

(pour $+1,7\%$ /an
conso mondiale totale
énergie finale 2005-2015)

France (2015)
Production : 546 TWh
(dont 62 TWh exportés)
Consommation brute
intérieure : 476 TWh
dont environ 38 TWh
de « pertes »

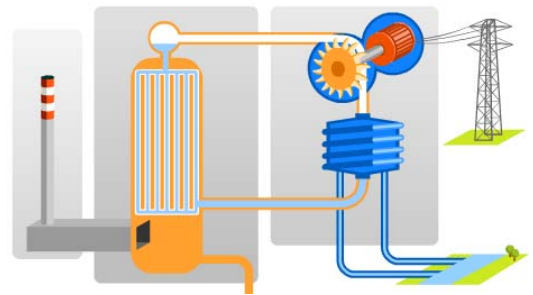
Capacité de production mondiale : 6400 GW dont 1850 renouvelables
(France 2015 : 129 GW, dont 63.1 nucléaires, 24,4 fossiles, 25,4 hydro, 9,1 éolien, 5,3 PV...)

Comment produit-on l'électricité ?

Surtout en « brûlant » des **combustibles non renouvelables** :

3/4 de l'électricité
mondiale actuelle

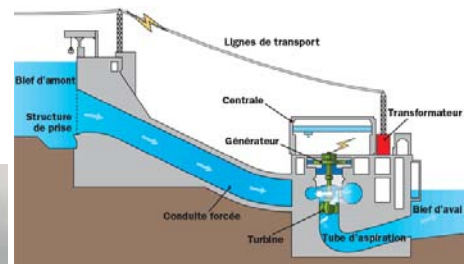
- turbines à vapeur (chaudière + turbine)
(charbon, gaz, pétrole : combustions
uranium : fission)
- turbines et moteurs à combustion
(gaz, fuel)



Mais aussi **à partir de ressources renouvelables**

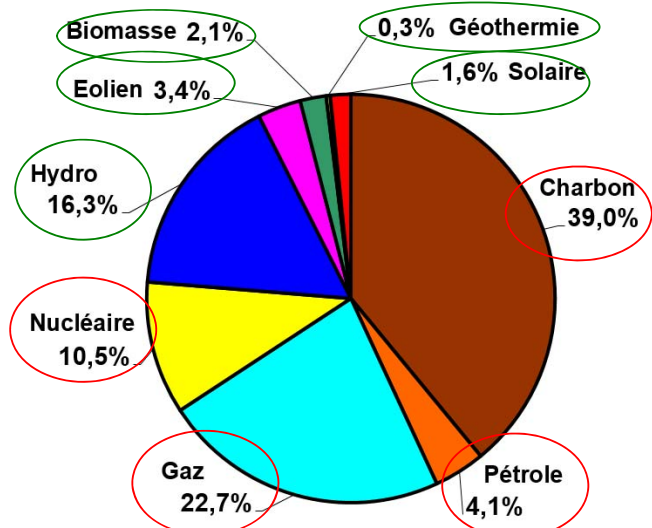
Environ 1/4 de l'électricité
mondiale actuelle

- turbines à vapeur ou à combustion
(solaire thermodynamique, biomasse, géothermie)
- turbines à eau (hydraulique)
à vent (éolienne)
- générateurs photovoltaïques
- autres...



Origine de la production mondiale d'électricité (2015)

24 400 TWh (+3% moy. 10 ans)

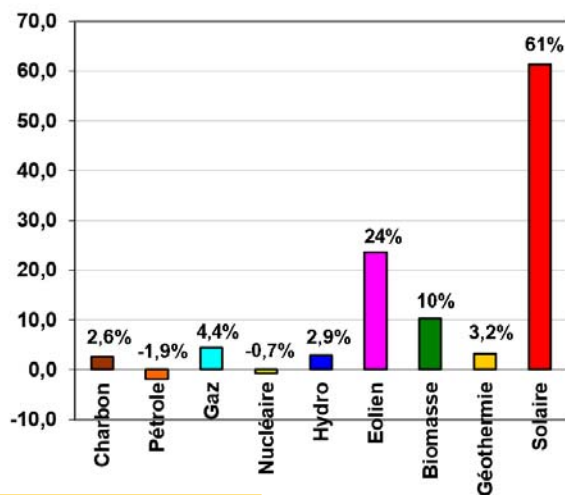


23,7 % d'origine renouvelable :
+ 5,7% par an sur 10 ans

76,3% d'origine non renouvelable
+ 2,3% par an sur 10 ans

65,8% fossile (+ 2,8% par an sur 10 ans)
10,6% fissile (- 0,7% par an -----)

Evolution moyenne en % par an sur 10 ans (2005-2015)



Source : données AIE

En 2016 : 24 800 TWh 75,5% NR et 24,5% Ren.

Sources : Renewables 2017 Global Status Report et BP Stat. Review 2017

Productivité, coût de production

Exemple centrales thermiques fossiles (gaz, charbon, fuel) :

Flexibles => le facteur de charge dépend de la demande

Cas d'une centrale à gaz à cycle combiné

(turbine à gaz + turbine à vapeur => rendement de 60%)



Exemple : Investissement : 1 €/W (ou 1 M€ / MW)

Fonctionnement annuel équivalent à P_{max} entre 1000 h et 5000 h
(facteur de charge 11,4% à 57%)

Durée de vie : 20 ans

1 W produira en 20 ans entre : 20 et 100 kWh pour 1€ : soit entre 5 et 1 c€/kWh_e

Coûts de combustible et des émissions de GES

Prix du gaz : 1 c€ à 5 c€/kWh_{PCI}

1 kWh électrique nécessite 1/(60%)=1,7 kWh_{PCI} de gaz

soit entre 1,7 et 8,3 c€/comb/kWh_e

Gaz : 1 kWh_{PCI} => 0,2 kg CO₂ + pénalité CO₂ : 5 € à 100 €/tonne CO₂

soit entre 0,17 et 3,4 c€/CO₂/kWh_e

Total : fourchette de 3 à 17 c€/kWh_e + coûts de maintenance + actualisation



Introduction sur l'énergie

Ressources énergétiques et en matières premières

Énergie électrique

Emissions de gaz à effet de serre

Emissions polluantes : indicateurs agrégés

- **Globales** (affectent l'ensemble de la planète) :
 - gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O ...) comptées en **équivalent CO_2**
 - destruction de la couche d'ozone (CFC) en **équiv. CFC-11**
 - émissions radio-actives (essais militaires, extraction minière, rejets industriels, déchets, accidents...) **en Bq**
- **Locales** (affectent la santé humaine, les écosystèmes...) :
 - émissions de gaz toxiques (NO_x , soufre...)
 - eutrophisation de l'eau (nitrates) en **équiv. ions $\text{PO}_3^-/4$**
 - cancérogènes (particules fines, COV et polluants chimiques, radioactifs...)
 - ...

Attention aux raisonnements trop simplistes, notamment mono-critères, qui conduisent à promouvoir de fausses bonnes solutions...

Emissions de CO₂ associées à la combustion de combustibles fossiles

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

Les combustibles fossiles contribuent à 60% des émissions anthropiques de GES.

Combustible	Émissions en gCO ₂ /kWh _{th}
Charbon (anthracite)	350
Fuel domestique	280
Gaz naturel	200

Comparaison essence et gasoil, effet de la vente au litre :

Essence : 2,37 kg CO₂/litre (0,75 kg/dm³, 12,2 kWh_{PCI}/kg)
Gasoil : 2,64 kg CO₂/litre (0,85 kg/dm³, 11,6 kWh_{PCI}/kg)

Mais attention, ces valeurs correspondent à **la seule phase de combustion...**

Il faut également considérer les **autres émissions** :

- à l'extraction (fuites de méthane etc...), **actuellement non prises en compte**
- associées à l'énergie grise (extraction, conversions...)

**Les émissions sur cycle de vie associées sont bien plus élevées.
Le bilan est particulièrement mauvais avec les gaz de schistes.**

Rejets de gaz à effet de serre associés au service

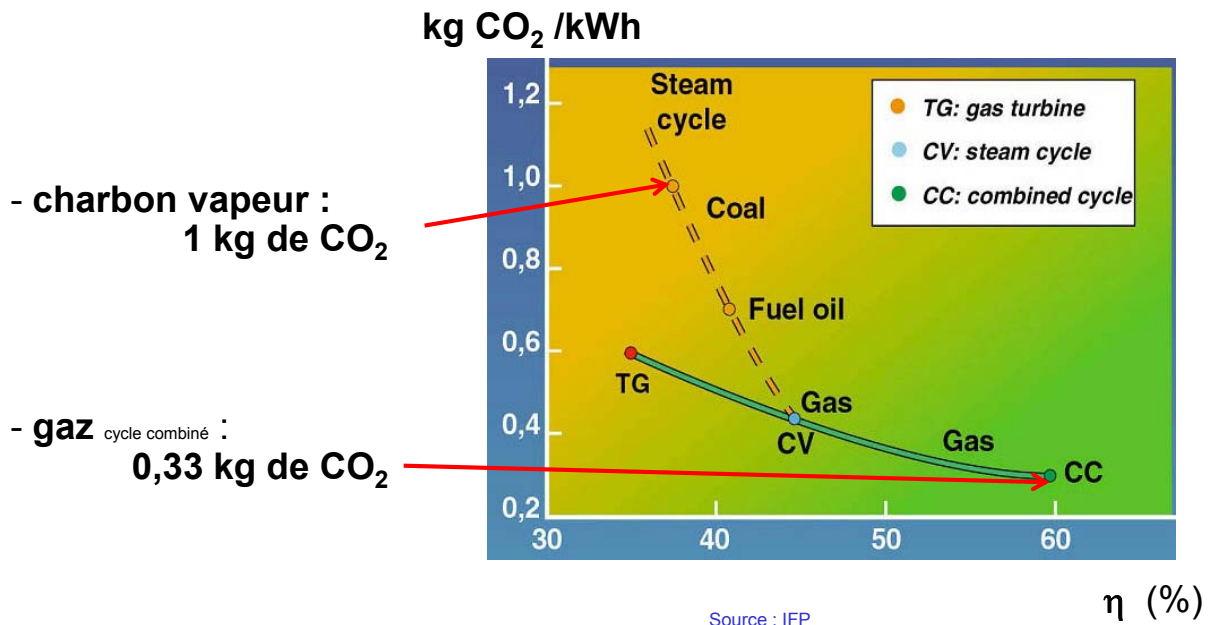
Pour obtenir **1 kWh de chaleur**, avec du gaz naturel et une chaudière dont le rendement est de 100%, on rejette **200 g CO₂**

Pour produire **1 kWh d'électricité** (kWh_e) avec les meilleures centrales thermiques au gaz (rendement 60%), il faut 1,7 kWh de chaleur (1 / 0,6)
➡ rejet lors de la combustion : **330 g CO₂/kWh_e**

Charbon : si le rendement est faible (30%), on peut dépasser : **1 kg CO₂/kWh_e**

Nucléaire : en France 8 g CO₂/kWh_e (moyenne mondiale = 60 gCO₂/kWh_e)

Émissions de CO₂ fonctions du rendement des centrales thermiques à combustibles fossiles



49

B. Multon ENS Rennes

Rejets issus de l'exploitation des ressources renouvelables

Rejets surtout associés à l'utilisation de ressources non renouvelables pour la fabrication (**énergie grise**) des convertisseurs d'énergie

Même fabriqué en Chine (forte proportion de charbon), un **système photovoltaïque** émettra, sur sa vie, moins de gaz à effet de serre ou de radiations ionisantes que toute autre solution conventionnelle électrique.

Cas des **grands barrages hydrauliques** : inonder de vastes superficies végétalisées peut conduire à des émissions de GES très élevées (cas des forêts tropicales)

Biomasse solide et liquide (« biofuels ») : le carbone s'inscrit dans des cycles naturels, ce sont les apports externes et les usages des sols qui peuvent parfois conduire à un excès d'émissions de GES

La **combustion de la biomasse** peut émettre d'autres polluants similaires à ceux associés aux combustibles fossiles : NOx, COV, particules fines...

50

B. Multon ENS Rennes

Exemple de calcul des émissions de la production photovoltaïque

1- Influence de la technologie et de la taille de l'installation (petite installation en toiture, grande ferme au sol)

2- Influence du mix énergétique (surtout électrique) de fabrication des composants (modules PV, électronique de puissance, etc...)

➔ Émissions de CO₂ spécifiques E_{GES} en kgCO₂/kW_p
de capacité de production

3- Influence du site géographique de production (conditions climatiques)
+ efficacité et disponibilité de l'installation (Performance Ratio)

➔ Nombre d'heures annuelles en équivalent pleine puissance N_{hepp}

4- Influence de la durée de vie : N_v en années

Emissions ramenées au kWh_e produit : $GES = \frac{\text{Emissions totales de CO}_2 \text{ sur la vie}}{\text{Energie récupérée sur la vie}}$

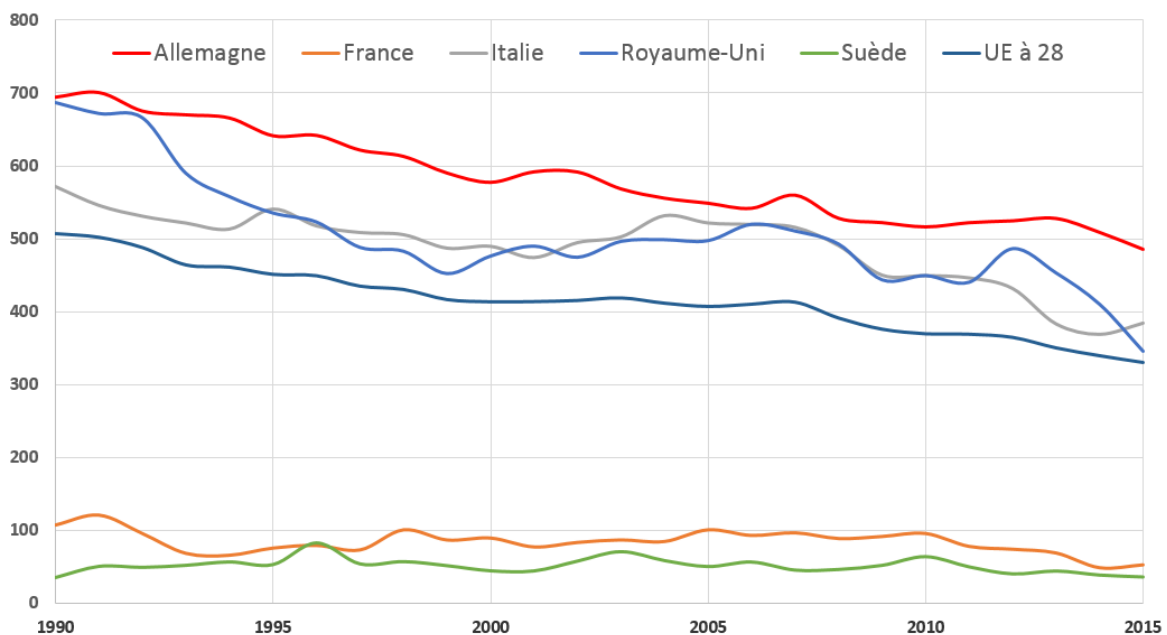
$$GES = \frac{E_{GES} \times P_N}{N_{hepp} \times N_v \times P_N} = \frac{E_{GES}}{N_{hepp} \times N_v} \text{ en kgCO}_2/\text{kWh}_e$$

51

B. Multon ENS Rennes

Evolution des émissions de GES du parc électrique en Europe

Emissions électricité en gCO₂/kWh_e



Source : Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde, nov. 2017

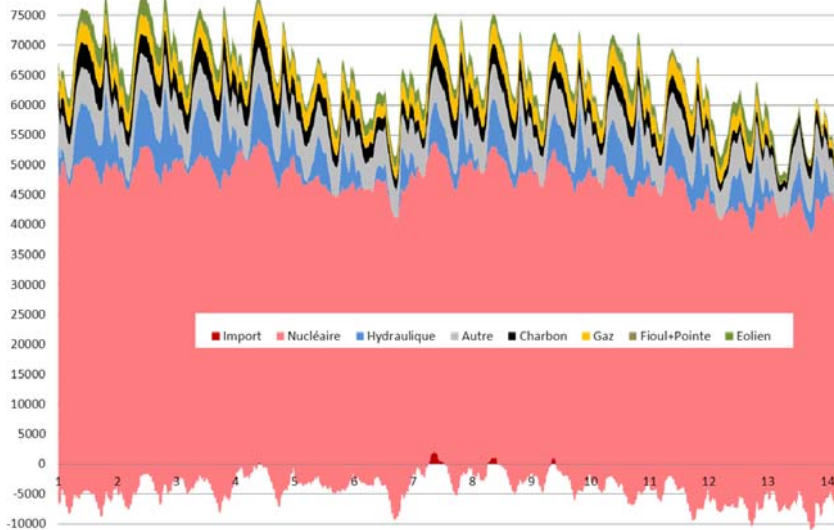
52

B. Multon ENS Rennes

Emissions instantanées de CO₂ de l'électricité

Elles dépendent du mix énergétique instantané (heure de la journée, saison...).

Il en résulte une dépendance des émissions de CO₂/kWh par usages



Thermo-sensibilité en France

En 1980-81 :
+ 400 MW/°C

Hiver 2010-11 :
+ 2 300 MW/°C

Un effet principalement dû à un fort taux d'équipement en chauffage électrique

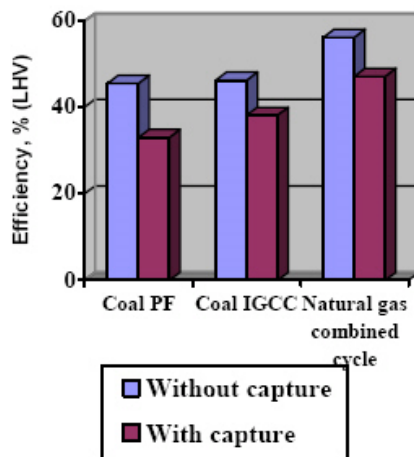
Se chauffer à l'électricité (au moment des pointes de consommation d'hiver) rejette beaucoup de CO₂, car la production nucléaire n'est pas assez modulable et il faut faire appel à de la production fossile, notamment au charbon.

En 2005, la France a convenu que le chauffage électrique rejetait 180 gCO₂/kWh_e et c'est bien plus aujourd'hui (sans doute plus de 500 gCO₂/kWh)

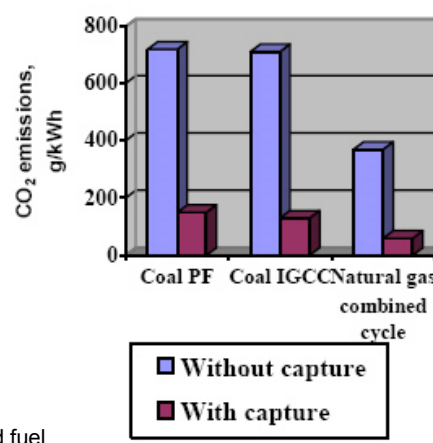
Possibilité de capture du CO₂ lors de la production d'électricité à partir des combustibles carbonés : une solution de lutte contre les émissions de GES ??

Une importante dégradation du rendement :

Power generation efficiencies



Power station CO₂ emissions



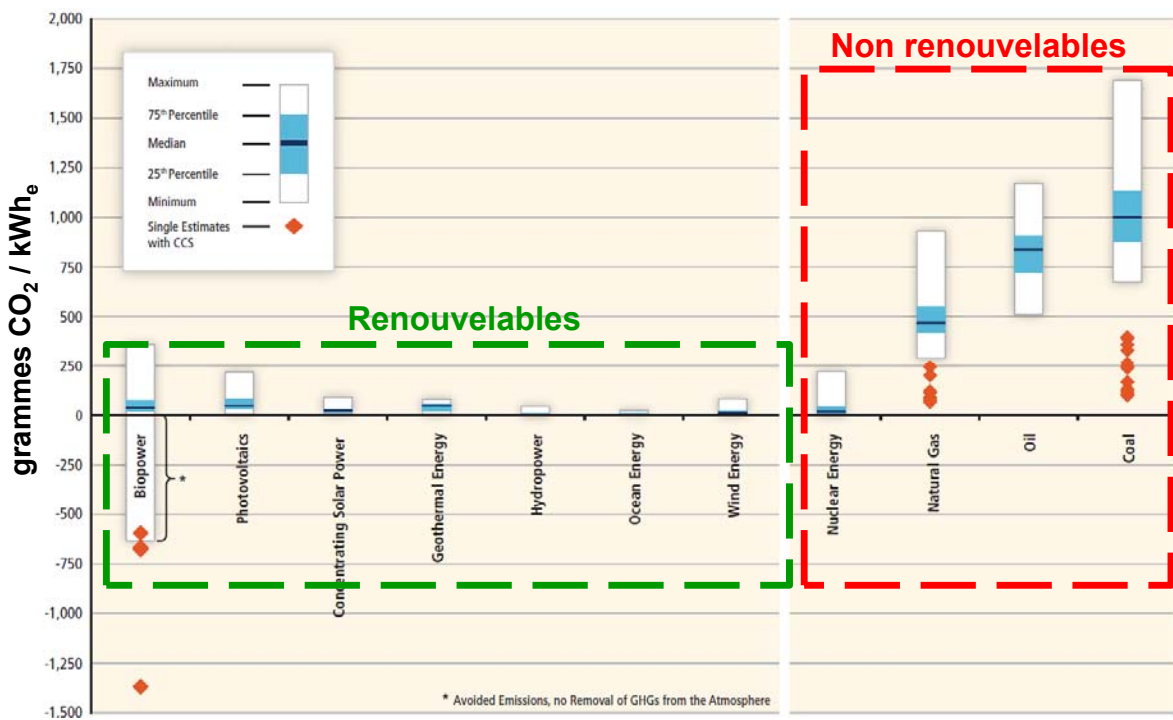
PF = pulverised fuel

IGCC = Integrated Gasification Combined Cycle

Source: IEA Greenhouse Gas R&D Program

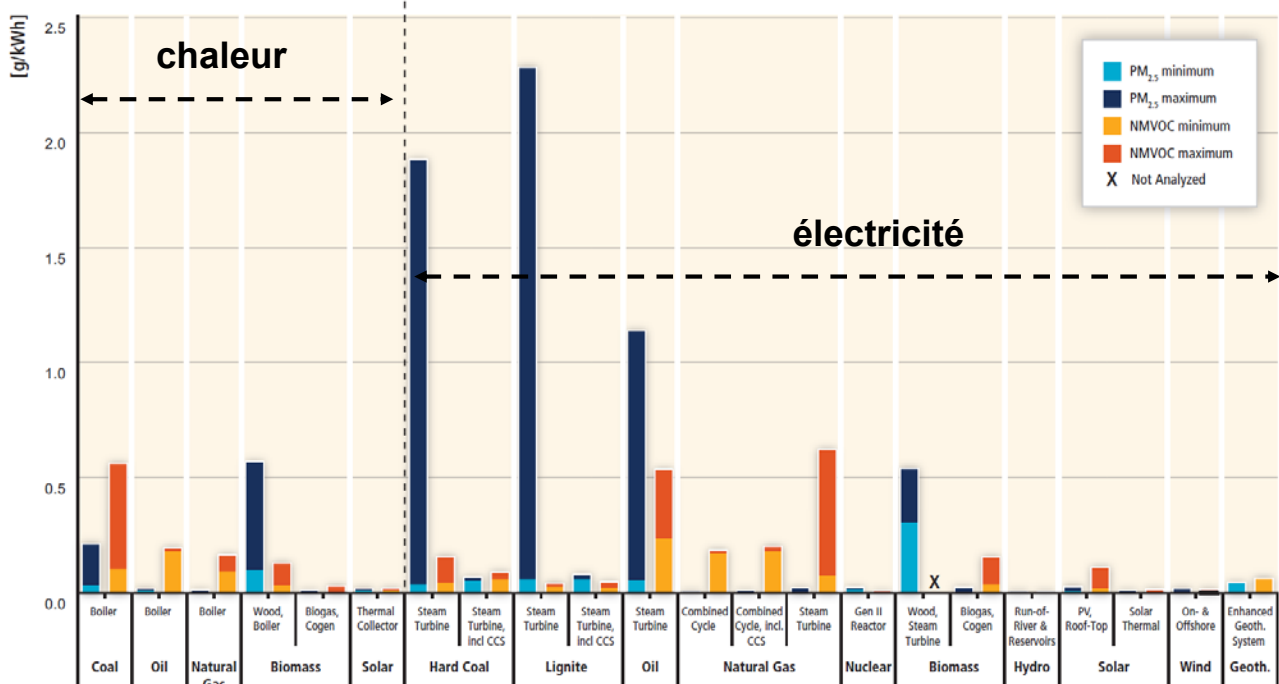
Et de forts doutes sur la durabilité de la séquestration...

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



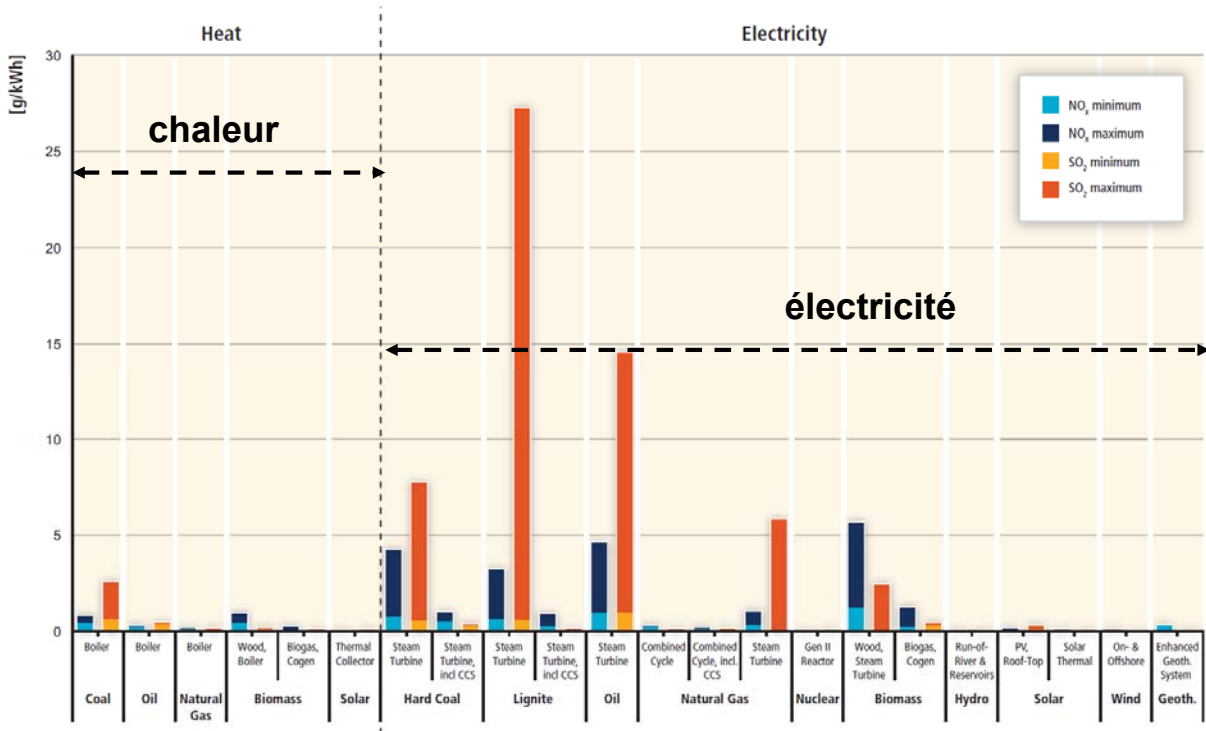
Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development

Bilan des émissions de particules fines et de COV en g/kWh sur cycle de vie pour la production d'électricité et de chaleur



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 Nox et SO₂ sur cycle de vie



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

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

1 kWh électrique en France : 52 g/kWh_e
en Europe : 330 g/kWh_e **en moyenne...**
au monde : 540 g/kWh_e

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

$$N \text{ gCO}_2/\text{km} = X \text{ gCO}_2/\text{kWh}_e \times Y \text{ kWh}_e/\text{km} \Rightarrow 10 \rightarrow 66 \rightarrow 108 \text{ gCO}_2/\text{km}$$

Emissions de GES Rejets production d'électricité consommation électrique du véhicule

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



Renault Zoé

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

Une solution réaliste pour rouler à l'énergie solaire : les parkings/ombrières photovoltaïques



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

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/an équivalent pleine puissance
=> **2200 kWh/an**



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

Rejets de CO₂ :
Fabrication du système PV
1700 kg CO₂ par kW_c installé,
sur une durée de vie de 20 ans
Des trajets avec **6 à 8 gCO₂/km**

59

B. Multon ENS Rennes



Bibliographie

Articles

B. MULTON, Y. THIAUX, H. BEN AHMED, «Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité», Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3900v2, 2011.

R.H.E.M.KOPPELAAR, Solar-PV energy payback and net energy: Meta-assessment of study quality, reproducibility, and results harmonization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 72, May 2017

Organismes d'information sur les questions énergétiques et électriques

Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

Agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency) : <http://www.iea.org>

Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council) : <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>

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

Electricité de France (EDF) : <http://www.edf.fr/>

Energy Information Administration (Département de l'Énergie du gouvernement US) : <http://www.eia.doe.gov/>

Réseau de Transport d'électricité (RTE) : <http://www.rte-France.com>

Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) : <http://www.cea.fr/>

Comité de liaison Énergies Renouvelables (CLER) : <http://www.cler.org>

Observateur des Énergies Renouvelables (Observ'ER), revues Systèmes Solaires et Renewable Energy Journal :

<http://energies-renouvelables.org>

Institut Français du Pétrole (IFP) : <http://www.ifp.fr>

Institut de l'Énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) : <http://www.iepf.org/>

60

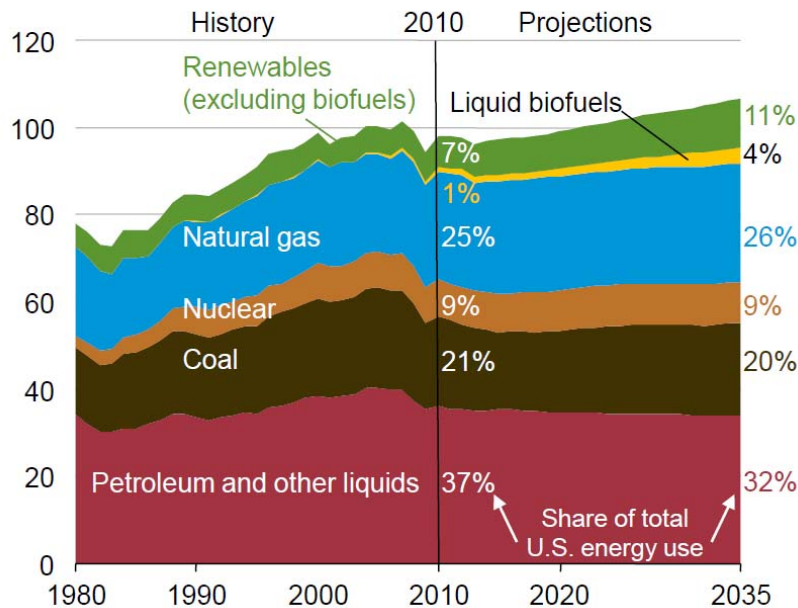
B. Multon ENS Rennes

Exercices Ecoconception et Energie

Exercice 1- Conversions et analyses générales de données énergétiques

On fournit ci-dessous un graphique issu de l'Annual Energy Outlook 2012 du département de l'énergie des USA : [www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2012\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2012).pdf) :

Primary energy use by fuel, 1980-2035 (quadrillion Btu)



En outre, en 2010, la consommation **mondiale** d'énergie primaire était de 12,7 Gtep

1- Convertir en Gtep et en TWh la consommation US 2010 (d'après le graphique, on supposera que la valeur 2010 sur le graphique vaut environ 98 quad. BTU).

2- Analyses

Dans un bilan énergétique global, de quelle forme d'énergie (primaire, finale, utile) s'agit-il ?
Quelle proportion de la consommation mondiale d'énergie cette valeur représente-t-elle ?

3- Valeur énergétique des ressources d'uranium

On estime (données 2014) que les « ressources raisonnablement assurées associées aux ressources supplémentaires récupérables à moins de 130 \$/kg » représentent 5,9 millions de tonnes d'uranium naturel.

3a- Si on considère que la fission d'un kilogramme d'uranium naturel dégage en chaleur 120 000 kWh (après enrichissement et sans compter les coûts énergétiques de l'extraction, des traitements, de l'enrichissement, etc.), calculer la valeur énergétique de ces ressources en Gtep d'énergie primaire.

3b- En considérant un rendement de 33% des centrales électronucléaires, calculer la quantité d'électricité productible à partir de ces ressources en TWh.

3c- Sur la base de la production électronucléaire mondiale de 2012, soit 2460 TWh_e et des données de ressources en uranium 2014, déterminer le rapport R/P (ressources sur production annuelle) de l'uranium.

3d- La production mondiale d'électricité en 2012 était de 22600 TWh_e, en combien d'années épuiserait-on ces ressources si toute l'électricité était d'origine nucléaire ?

4- Rayonnement solaire

Sur la base d'un rayonnement annuel moyen de 1000 kWh/m², en supposant qu'une superficie de 11 000 km² (2% de la superficie totale de la métropole) soit exploitée pour transformer ce rayonnement en différentes formes d'énergie finale (carburant, chaleur, électricité) avec un rendement de conversion de 20%, quelle quantité d'énergie exprimée en TWh et en Mtep obtiendrait-on annuellement ?

Pour information, la consommation 2012 d'énergie finale en France était de 166 Mtep.

Exercice 2- Rejets de CO₂ d'un véhicule sur cycle de vie

On considère une automobile qui consomme sur cycle 5 litres de gasoil aux 100 km et dimensionnée pour réaliser 100 000 km.

Le coût énergétique pour la fabriquer et la recycler est de 4 MWh électriques (électricité produite avec un rendement moyen de 40% et des rejets de gaz à effet de serre de 400 g CO₂/kWh_e, moyenne européenne) et 8 MWh thermiques au gaz naturel.

Caractéristiques énergétiques du gasoil ramenées au litre : 9,86 kWh/L

Rejets de CO₂ du gasoil et du gaz naturel lors d'une combustion dans l'air respectivement : 2,64 kg CO₂ par litre et 0,2 kg CO₂/kWh_{PCI}.

- 1- Déterminer la masse de CO₂ rejetée par km due au seul carburant consommé.
- 2- Déterminer la part des rejets de CO₂ due aux phases de fabrication et recyclage et la ramener au km parcouru.
- 3- Corriger les calculs précédents pour déterminer les rejets au km sur cycle de vie si l'on prend en compte les coûts énergétiques d'extraction, de production et de conditionnement du gasoil et du gaz naturel (d'après la norme EN 15603:2008) :
 1 kWh de gasoil « coûte » 1,35 kWh
 1 kWh de gaz naturel « coûte » 1,36 kWh
 Rq : on supposera que ces coûts ont déjà été intégrés dans ceux de production d'électricité.
- 4- Calculer (avec les facteurs correctifs de la question 3) enfin, toujours sur l'ensemble du cycle de vie, l'énergie primaire (en kWh) consommée par km.

Exercice 3- Calcul de rendements d'un convertisseur d'énergie

On considère une alimentation à découpage simplifiée qui fournit une tension continue régulée de 3,3 V à partir du réseau 230 V-50 Hz (supposé parfaitement stable), sa puissance nominale P_R est de 330 W. Ses pertes énergétiques peuvent s'exprimer de façon simpliste en fonction de la puissance de sortie P_0 :

- pertes à vide (par définition indépendante de la charge) : $P_{NL} = 20$ W

- pertes en charge : proportionnelles au carré de la puissance de sortie $P_L = \alpha \cdot P_0^2$ avec $P_L = 30$ W à la puissance nominale.

1- Rendement (instantané) en puissance

Calculer le rendement à la puissance nominale, à la moitié de cette puissance puis à vide.

Tracer approximativement la courbe du rendement en fonction de la puissance de sortie.

2- Rendement énergétique sur cycle

On suppose un cycle de fonctionnement, sur 24h, dans lequel la puissance de sortie est égale à :

- la valeur nominale (P_R) durant 6h,
- la moitié de P_R durant 4h
- zéro le reste du temps

2a- Calculer le rendement énergétique de cette alimentation sur 24h dans les conditions générales de l'énoncé.

2b- Supposons que lors des phases à puissance de sortie nulle, on utilise un mode veille dans lequel l'alimentation ne consomme plus que 1 W, calculer la nouvelle valeur du rendement sur cycle.

3- Rendement énergétique sur cycle de vie

Le coût énergétique de fabrication et de recyclage de cette alimentation est égal (valeur totalement hypothétique) à 20 kWh primaires et l'électricité consommée est produite et transportée avec un rendement global de 40% (ne pas oublier de comptabiliser les pertes énergétiques de l'alimentation en énergie primaire).

On suppose une durée de vie de 3 ans avec 300 jours d'activité par an durant lesquels le cycle est celui défini à la question 2.

Calculer le rendement sur cycle de vie dans les trois cas suivants :

3a- l'alimentation reste branchée en permanence et consomme une puissance égale à la puissance à vide lorsqu'elle n'est pas utilisée ;

3b- l'alimentation est débranchée durant les jours d'inactivité et fonctionne dans les conditions de la question 2a le reste du temps ;

3c- mêmes conditions que précédemment mais avec mode veille (conditions questions 2b).

Exercice 4- Stockage d'électricité via l'hydrogène

On propose de convertir de l'électricité du réseau alternatif en hydrogène (masse volumique $0,09 \text{ kg/m}^3$) via un électrolyseur, alimenté en courant continu, dont le rendement η_{EI} est supposé constant et égal à 70% (sur la base du PCI, 34 kWh/kg). Le stockage de l'hydrogène est supposé réalisé à la pression atmosphérique à coût énergétique nul. Pour récupérer l'énergie stockée, l'hydrogène est converti en électricité via une pile à combustible dont le rendement η_{FC} est également supposé constant et égal à 50%. On supposera que les pertes dues aux éventuelles conversions électroniques de puissance sont négligeables et que celles des systèmes auxiliaires (pompes, compresseurs...) sont déjà incluses dans le rendement de la pile.

3.1- Dessiner un schéma fonctionnel d'un tel système de stockage en mentionnant les principaux blocs de conversion et les sens de transferts de l'énergie.

3.2- Calculer le rendement global sur un cycle complet de charge et décharge (énergie électrique récupérée sur énergie électrique initiale) de ce type de stockage.

3.3- Déterminer la masse d'hydrogène à stocker pour restituer 10 kWh d'électricité ainsi que le volume de réservoir nécessaire pour stocker la quantité d'hydrogène associée.

Exercice 5- Hybridation d'une chaîne de traction pour véhicule urbain

On suppose, dans un cas particulier d'automobile, que le surcoût d'investissement énergétique (incluant le recyclage en fin de vie) des éléments de la chaîne de traction hybride par rapport à celle, plus classique, à base de moteur à essence, est égal à 4000 kWh (noté ΔW_{inv}).

Valeur énergétique d'1 litre d'essence : $9,15 \text{ kWh}_{PCI}$

En supposant la durée de vie en cyclage suffisante pour qu'il n'y ait pas de nécessité de remplacement de composants (notamment accumulateur) sur la durée de référence de l'étude, calculer le kilométrage à partir duquel on amortirait le surcoût énergétique de l'accumulateur seul, si le gain de consommation que procure la chaîne de traction avec accumulateur est de 3 litre d'essence au 100 km .

Exercice 6- Coût de production d'électricité et émissions de CO_2

Sur la base d'un prix du charbon à 100 €/tonne avec une valeur énergétique de $9 \text{ kWh}_{PCI}/\text{kg}$ et d'un coût d'investissement égal à $1,8 \text{ €/W}$ pour une centrale à cycle vapeur moderne, évaluer, sur une durée de vie de 20 ans (hors intérêts d'emprunt et coûts de maintenance) :

- le coût (en c€/kWh) dû à la seule part du combustible
- le coût (en c€/kWh) dû à l'investissement seul, en supposant une durée annuelle de fonctionnement de 6000 heures (fonctionnement de base)
- le coût total (en c€/kWh) incluant l'investissement et le combustible.

On supposera le rendement électrique (sur la base du PCI) de la centrale égal à 45%.

Coût de la capture et du stockage du CO_2 :

Sur la base d'un coût (encore hypothétique) de 70 €/la tonne de CO_2 et sachant que la production de 1 kWh de chaleur à partir du charbon rejette 350 grammes de CO_2 , calculer le surcoût de production (en c€/kWh) du kWh électrique.

Exercice 7- Rejets de CO₂ de la production photovoltaïque

Soit une installation photovoltaïque comprenant des modules en silicium polycristallin, un onduleur électronique et des câbles de connexion. Un bilan moyen européen a montré que la fabrication des composants de cette installation, pour une durée de vie de référence de **30 ans**, conduit à des émissions de gaz à effet de serre d'environ 1700 kg CO₂ par kW_c (kilowatt crête) de puissance installée.

1- Calculer, sur l'ensemble du cycle de vie de l'installation (hors recyclage) les émissions de gaz à effet de serre par kWh électrique produit en fonction du lieu de production solaire, avec des productivités :

- au nord de l'Europe 900 kWh_e/kW_c
- au sud de l'Europe 1700 kWh_e/kW_c

2- Comparer les valeurs obtenues avec les autres moyens de production d'électricité.

Exercice 8- Emissions de CO₂ de l'électricité produite par une éolienne terrestre

D'après la publication suivante :

P.Y. PADEY et al., "A Simplified Life Cycle Approach for Assessing Greenhouse Gas Emissions of Wind Electricity" Journal of Industrial Ecology, 2012,

les émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble du cycle de vie (sur 20 ans) d'une éolienne de 2 MW (80 m) fabriquée et installée en Europe représentent environ 1200 tonnes de CO₂ (tout compris y compris son démantèlement).

8.1- Déterminer les rejets de la production d'électricité éolienne en kg CO₂/kWh_e, sur l'ensemble du cycle de vie, lorsque les caractéristiques du site conduisent respectivement à des productivités annuelles de 1800 et 2500 h équivalent pleine puissance.

8.2- Comparer les valeurs obtenues avec celle de la « meilleure » production électrique obtenue avec un combustible fossile.

Exercice 9- Bilan d'énergie primaire d'un système PV autonome

Soit une installation photovoltaïque en site isolé comprenant un générateur en silicium polycristallin, un onduleur électronique, une batterie électrochimique au plomb-acide et des câbles de connexion. Cette installation doit satisfaire un profil de demande annuel dans un contexte d'ensoleillement variable (annuellement mais également d'une année sur l'autre).

Dans ce contexte, l'installation PV doit satisfaire durant 30 ans une demande annuelle cumulée de 5,5 MWh électriques (MWh_e), la seule énergie primaire consommée correspond à la fabrication et au transport de ses constituants (le recyclage n'est comptabilisé que pour les batteries). En prenant en compte le vieillissement (dégradation des caractéristiques dans le temps) et les remplacements des batteries, on arrive à un investissement en énergie primaire de **250 MWh_p** (correspondant à 17 kW PV installés et une capacité de stockage de 11 kWh)

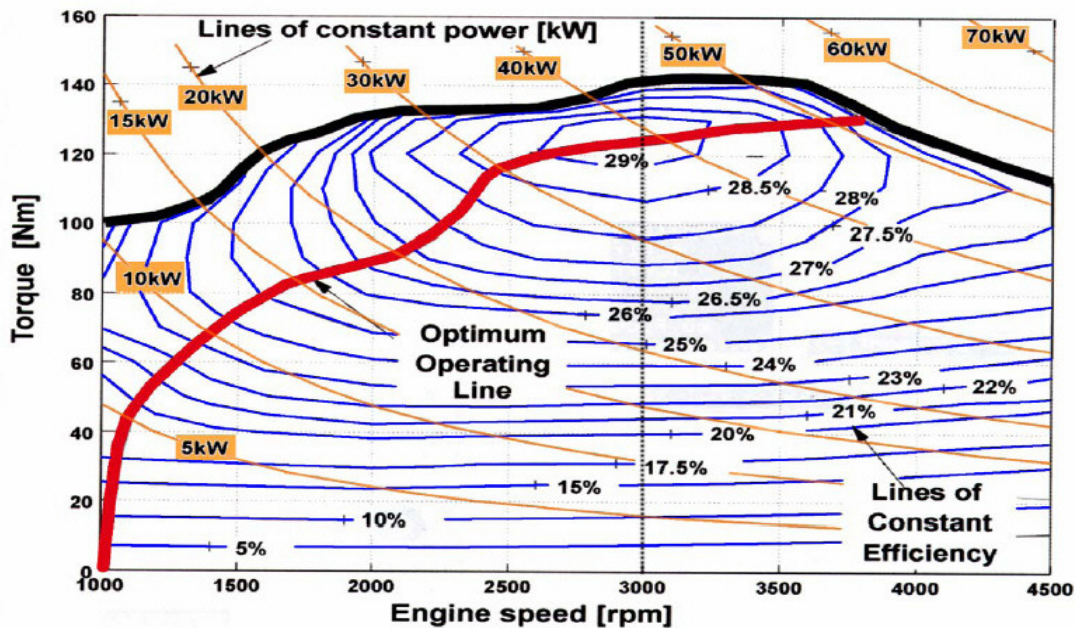
La source de l'étude est un mémoire de thèse accessible ici :

http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/24/28/PDF/Manuscrit_YaelThiaux.pdf

Comparez cette consommation d'énergie primaire avec la seule consommation (hors énergie grise) d'énergie primaire qu'il aurait fallu pour satisfaire cette production d'électricité avec le mix français actuel. La base de données Bilan Produit 2008 de l'ADEME fournit le coefficient de calcul de l'énergie primaire par kWh d'électricité distribué en basse tension : 3,61.

Exercice 10- Rendements d'un groupe électrogène

On considère un moteur à combustion interne (MCI) à essence dont les caractéristiques de rendement (sur la base du pouvoir calorifique inférieur, pci) dans le plan couple vitesse sont les suivantes, on remarquera la ligne des points de rendement maximum (trait gras et rouge).



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

Ce moteur est utilisé pour faire un groupe électrogène. Il est accouplé à une chaîne de génération électrique dont on supposera (pour simplifier le problème) le rendement constant quels que soient les points de fonctionnement.

La valeur énergétique du carburant est supposée égale à 10 kWh_{pci}/litre.

1- Rendements à vitesse de rotation constante (3000 tr/min)

1a- Donner les valeurs approximatives du rendement instantané (en puissance) η_p du MCI pour des valeurs de la puissance mécanique respectivement égales à 40, 20 et 10 kW.

1b- Estimer le rendement énergétique (sur cycle) η_e du MCI pour un fonctionnement de 1h par jour à 40 kW, 2h à 20 kW et 21 h à 10 kW.

Quelle est la quantité de carburant consommée sur le cycle de 24 h ?

1c- Estimer le rendement énergétique total sur cycle de production d'électricité incluant la chaîne électrique (alternateur avec excitation bobinée régulée) en supposant que son rendement vaut 90%.

2- Rendements à vitesse de rotation variable optimisée

La vitesse de rotation est ajustée pour que le MCI travaille à son point de puissance maximale quelle que soit la puissance demandée.

2a- Dans ces conditions, rechercher les valeurs optimales de la vitesse et donner les valeurs correspondantes approximatives du rendement instantané η_p du MCI pour des valeurs de la puissance mécanique respectivement égales à 40, 20 et 10 kW.

2b- Estimer le rendement énergétique (sur cycle) η_e du MCI pour un fonctionnement de 1h par jour à 40 kW, 2h à 20 kW et 21 h à 10 kW.

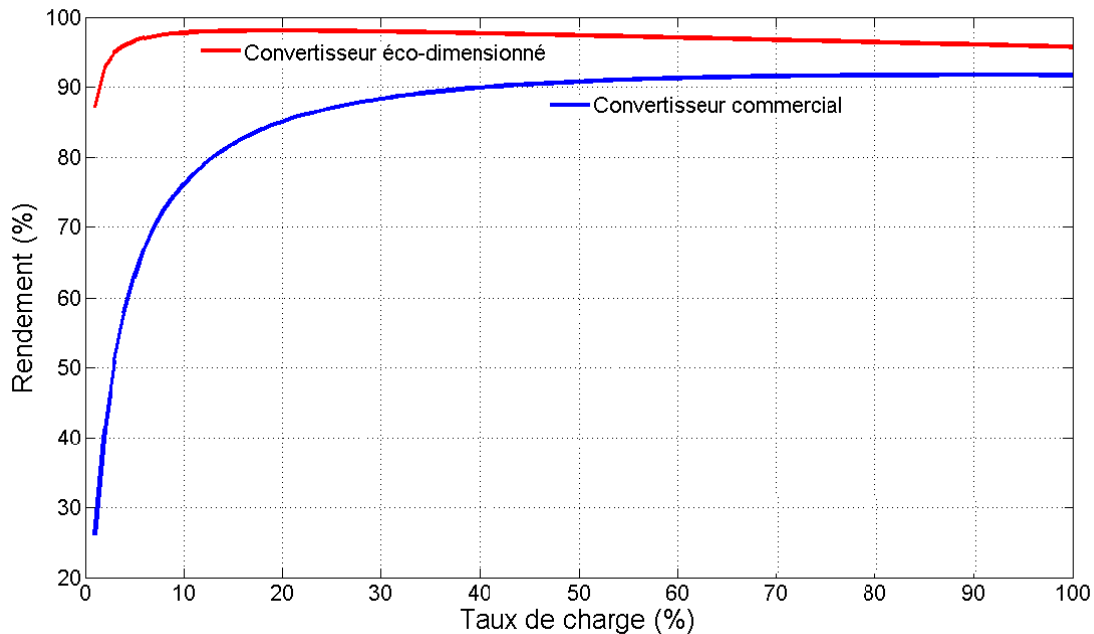
Quelle est la quantité de carburant consommée sur le cycle de 24 h ?

2c- Estimer le rendement énergétique total sur cycle de production d'électricité incluant la chaîne électrique en supposant que son rendement vaut 80% (alternateur à aimants, redresseur, filtres et onduleurs).

Exercice 11- Rendement sur cycle de vie d'une alimentation à découpage

On considère un adaptateur de PC portable de 70 W fonctionnant à partir du réseau 230 V-50 Hz. On propose de comparer deux alimentations, l'une qualifiée de commerciale (investissement minimal), l'autre dite éco-dimensionnée permettant d'améliorer la consommation totale d'énergie primaire sur le cycle de vie. Toutes deux ont une consommation à vide (veille) de 0,4 W constante (attention, il s'agit de la puissance absorbée, à vide, la puissance utile étant nulle).

Leurs courbes de rendement en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie sur la puissance nominale) sont fournies ci-dessous :



Les valeurs d'énergie grise sont de 8 et 12 kWh_p respectivement pour les convertisseurs commercial et éco-dimensionné.

On considère un cycle de fonctionnement répété quotidiennement sur 5 ans :

Sur 24h :

- 30 min à pleine puissance (recharge partielle de la batterie)
- 9h30 h à 20 W
- 14 h à vide (veille)

1- Rendements du convertisseur commercial

Donner les valeurs du rendement instantané (en puissance) sur les 3 points de fonctionnement rencontrés durant le cycle de fonctionnement quotidien.

Calculer les valeurs des énergies utile et absorbée (en watt.heures) sur le cycle quotidien puis le rendement énergétique (sur cycle) quotidien.

En considérant un facteur de 3,61 sur le kWh électrique pour le transformer en kWh primaire compte tenu du rendement de production/distribution de l'électricité basse tension en France, calculer le rendement sur cycle de vie dans les conditions précisées dans l'introduction.

2- Comparaison des rendements sur cycle de vie

Comparer les dépenses d'énergie primaire (énergie grise et pertes ramenées en énergie primaire) sur le cycle de vie des deux convertisseurs et leurs rendements sur cycle de vie.

Corrigés exercices Ecoconception et Energie

Exercice 1- Conversions et analyses générales de données énergétiques

1- Conversion en Gtep et en TWh la consommation US 2010 : 98 quad. BTU

D'après la diapo 6 du diaporama de cours Energie : 1 quad BTU = 290 TWh ou 25 Mtep

La consommation vaut donc : **28 400 TWh** ou **2,45 Gtep**

2- Analyses

Dans un bilan énergétique global, de quelle forme d'énergie s'agit-il ?

Quelle proportion de la consommation mondiale d'énergie cette valeur représente-t-elle ?

Il s'agit de l'**énergie primaire**

La consommation mondiale d'énergie était en 2010 de 12,7 Gtep (en prenant les chiffres 2009 du diaporama, le résultat sera compté juste). La consommation américaine représente donc **19,3% de la consommation mondiale**.

3- Valeur énergétique des ressources d'uranium

Ressources d'uranium : 5,9 millions de tonnes d'uranium naturel

3a- Calcul de la valeur énergétique de ces ressources en Gtep d'énergie primaire.

Uranium naturel : 120 000 kWh/kg

$$E_{p_uranium} = 5,9 \cdot 10^9 \text{ kg} \times 120 \cdot 10^3 \text{ kWh} = 708 \cdot 10^{12} \text{ kWh}_p$$

$$\text{Conversion en Gtep : } 1 \text{ Gtep} = 10^9 \text{ tep} = 11,6 \cdot 10^{12} \text{ kWh}$$

$$\text{Donc } 708 \cdot 10^{12} \text{ kWh}_p = 708/11,6 = \mathbf{61 \text{ Gtep}}$$

3b- En considérant un rendement de 33% des centrales électronucléaires, calculer la quantité d'électricité productible à partir de ces ressources en TWh_e.

Avec 33% de rendement, les 61 Gtep deviennent 20,3 Gtep

$$\text{Converties en kWh, cela donne : } 20,3 \times 11,6 \cdot 10^{12} \text{ kWh}_e = 236 \cdot 10^{12} \text{ kWh}_e$$

$$\text{Or } 1 \text{ TWh} = 10^9 \text{ kWh}$$

Au final, ces ressources permettraient de produire **236 000 TWh_e**

3c- Rapport R/P de l'uranium sur la base de de 2460 TWh_e : **95 ans**.

3d- Si l'on souhaitait produire toute l'électricité mondiale à partir du nucléaire sur la base de 22600 TWh_e, on épuiserait ces ressources en **10,4 ans**.

4- Rayonnement solaire

Rayonnement annuel moyen de 1000 kWh/m²,

Une superficie de 11 000 km² capterait annuellement une énergie primaire de :

$$11 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \times 1000 \text{ kWh} = 11 \cdot 10^{12} \text{ kWh}_p$$

Ce qui conduirait, avec un rendement de transformation de 20%, à une énergie finale de :

$$\mathbf{2,2 \cdot 10^{12} \text{ kWh}_f}$$

$$\text{soit : } \mathbf{2200 \text{ TWh}_f}$$

$$\text{Ou en Mtep sachant que } 1 \text{ Mtep} = 10^6 \text{ tep} = 11,6 \cdot 10^9 \text{ kWh} = 11,6 \text{ TWh}$$

$$\text{soit : } \mathbf{189 \text{ Mtep}}$$

C'est plus que les 166 Mtep d'énergie finale consommée en 2012 par la France.

Exercice 2- Rejets de CO2 d'un véhicule sur cycle de vie

On considère une automobile qui consomme sur cycle 5 litres de gasoil aux 100 km et dimensionnée pour réaliser 100 000 km.

Le coût énergétique pour la fabriquer et la recycler est de 4 MWh électriques (électricité produite avec un rendement moyen de 40% et des rejets de gaz à effet de serre moyens de 120 g CO₂/kWh_e) et 8 MWh thermiques au gaz naturel.

1- Rejets CO₂ par km dus au seul carburant consommé

la combustion d'1 litre de gasoil rejette 2,64 kg de CO₂, donc 5 litres au 100 km conduisent à : **132 g CO₂**

2- Part des rejets de CO₂ due aux phases de fabrication et recyclage :

4 MWh électriques => 1600 kg CO₂

gaz naturel : 200 g CO₂/kWh_{PCI}

Donc : 8 MWh de gaz => 1600 kg CO₂

Au total, ce sont 3200 kg de CO₂ pour 100 000 km soit **32 g CO₂/km**

3- Correction avec prise en compte des coûts énergétiques d'extraction, de production et de conditionnement du gasoil et du gaz naturel (d'après la norme EN 15603:2008) :

1 kWh de gasoil coûte 1,35 kWh et 1 litre de gasoil rejette alors : 3,56 kg CO₂

La part des rejets due au seul fonctionnement passe ainsi à : 178 g CO₂/km

1 kWh de gaz naturel coûte 1,36 kWh et rejette ainsi : 0,272 kg CO₂/kWh

Celle due à l'électricité reste constante et celle due au gaz passe à 2176 kg CO₂, soit un total de 3776 kg CO₂ pour la fabrication et le recyclage, ce qui donne 37,8 g CO₂/km.

Le total sur cycle de vie passe donc de 164 (132 + 32) g CO₂/km à **216 g CO₂/km**

Ce qui représente une sérieuse augmentation par rapport à la valeur initiale calculée sur la seule base de la consommation sur cycle et sans prise en compte des coût d'extraction, production et conditionnement.

4- Calcul, sur cycle de vie, de l'énergie primaire (en kWh) consommée par km.

Consommation de carburant : 1 litre de gasoil = 9,86 kWh

Avec facteur correctif : dépense 5 litres/100 km = 5 x 1,35 x 9,86 /100 = **665 Wh/km**

Fabrication + recyclage :

Electricité : 4 MWh produits avec 40% de rendement moyen = 10 MWh primaires

Gaz naturel : 8 MWh produits avec facteur 1,36 = 10,9 MWh primaires

Soit sur 100 000 km : **209 Wh/km**

Sur cycle de vie : **874 Wh/km**

Exercice 3- Calcul de rendements d'un convertisseur d'énergie

1- Rendement (instantané) en puissance

$$\eta_P = \frac{P_0}{P_0 + P_{NL} + \alpha \cdot P_0^2}$$

Soit pour :

- P₀ = 330 W (pleine charge) :

$$\eta_P \cong 86,8\%$$

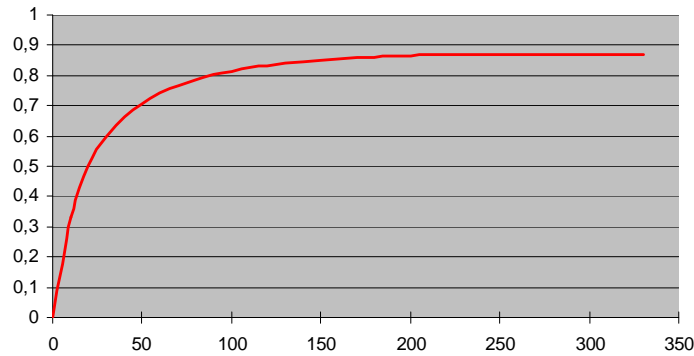
- P₀ = 165 W (demi-charge) : pertes = 20 + 7,5 W alors :

$$\eta_P \cong 85,7\%$$

- P₀ = 0 W (à vide) : pertes = 20 W et :

$$\eta_P \cong 0\%$$

Courbe du rendement :



2- Rendement énergétique sur cycle

Puissance de sortie sur 24h : valeur nominale (P_R) durant 6h, $P_R/2$ durant 4h, zéro le reste du temps

Le rendement sur cycle vaut :
$$\eta_{cy} = \frac{E_{util}}{E_{cons}} = \frac{E_{util}}{E_{util} + E_{loss}} = \frac{\int_{cycl} P_0 \cdot dt}{\int_{cycl} P_0 \cdot dt + \int_{cycl} P_{loss} \cdot dt}$$

On exprime ici les énergies en Wh (plus simple que de passer en joules).

2a- Rendement énergétique de cette alimentation sur 24h

Ainsi sur 24h :

$E_{util} \cong 330 \times 6 + 165 \times 4 + 0 = 2640 \text{ Wh}$

$E_{loss} \cong 20 \times 24 + 30 \times 6 + 7,5 \times 4 = 690 \text{ Wh}$

$\eta_{cycl} \cong 79,3\%$

2b- Rendement énergétique sur 24h avec veille faible consommation (1 W)

$E_{util} \cong 330 \times 6 + 165 \times 4 + 0 = 2640 \text{ Wh}$

$E_{loss} \cong 20 \times 10 + 30 \times 6 + 7,5 \times 4 + 1 \times 14 = 424 \text{ Wh}$

$\eta_{cycl} \cong 86,2\%$

3- Rendement énergétique sur cycle de vie

Fabrication + recyclage : 20 kWh primaires

Electricité consommée produite et transportée avec un rendement global de 40%.

Durée de vie de 3 ans avec 300 jours d'activité par an.

$$\eta_{LCA} = \frac{E_{util}}{E_{cons} + E_{fabrication+recyclage}} = \frac{E_{util}}{\frac{(E_{util} + E_{loss})}{\eta_{elec}} + E_{fabrication+recyclage}}$$

3a- Alimentation branchée en permanence et consomme une puissance égale à la puissance à vide lorsqu'elle n'est pas utilisée ;

$E_{util} = 3 \times 300 \times 2640 = 2376 \text{ kWh}$

Pertes électriques : $E_{e_loss} = 3 \times (300 \times 690 + 65 \times 24 \times 20)$
 $= 621000 + 93600 \cong 715 \text{ kWh}_e$

Avec le rendement de production d'électricité: $(E_{loss} + E_{util})/\eta_{elec} = (715+2376)/0,4 = 7727 \text{ kWh}_p$

L'énergie de fabrication et recyclage vaut : 20 kWh

$\eta_{LCA} \cong 2376 / (7727 + 20) \Rightarrow \eta_{LCA} \cong 30,7\%$

3b- Alimentation débranchée durant les jours d'inactivité et fonctionne dans les conditions de la question 2a le reste du temps ;

$E_{util} = 2376 \text{ kWh}$

$E_{e_loss} = 3 \times (300 \times 690) \cong 621000 = 621 \text{ kWh}_e$ et $(E_{loss} + E_{util})/\eta_{elec} = (621+2376)/0,4 = 7492 \text{ kWh}_p$

$\eta_{LCA} \cong 2376 / (7492 + 20) \Rightarrow \eta_{LCA} \cong 31,6\%$

3c- mêmes conditions que précédemment mais avec mode veille (1 W).

$$E_{\text{util}} = 2376 \text{ kWh}$$

$$E_{e_loss} = 3 \times (300 \times 424) \cong 382 \text{ kWh}_e \text{ et } (E_{\text{loss}} + E_{\text{util}})/\eta_{\text{elec}} = (382+2376)/0,4 = 6895 \text{ kWh}_p$$

$$\eta_{\text{LCA}} \cong 2376 / (6895 + 20) \Rightarrow \eta_{\text{LCA}} \cong 34,4\%$$

Remarque sur le coût des seules pertes :

Sur la base d'un kWh_e facturé à 0,12 €

- le cas a (715 kWh) conduit à une dépense pour les pertes sur 3 ans de 86 €;
- le cas b (621 kWh) : 74,5 €
- le cas c (382 kWh) : 45,8 €

Exercice 4- Stockage d'électricité via l'hydrogène

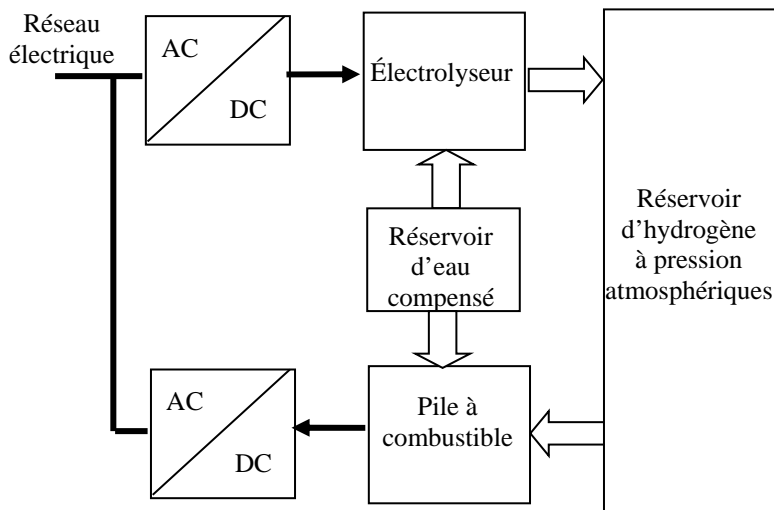
Hypothèses :

Electrolyseur « rendement PCI » constant égal à 70%

Stockage de l'hydrogène à la pression atmosphérique à coût énergétique nul

Conversion de l'hydrogène en électricité via une pile à combustible rendement constant 50%. Autres pertes négligeables.

1- Schéma fonctionnel



2- Rendement global sur un cycle de charge-décharge

Vu que l'on néglige les pertes dans les convertisseurs électroniques AC/DC et DC/AC ainsi que dans le réservoir d'hydrogène, le rendement global est égal au produit des rendements de l'électrolyseur et de la pile à combustible, soit :

$$\eta_{\text{st}} = \eta_{\text{FC}} \cdot \eta_{\text{EI}} = 35\%$$

3- Masse d'hydrogène à stocker pour récupérer 10 kWh d'électricité après un cycle de stockage et volume de réservoir nécessaire.

Avec un rendement de la pile à combustible de 50%, en supposant que toute l'énergie est consommée sur l'hydrogène, il faut 20 kWh_{PCI} d'hydrogène pour restituer 10 kWh d'électricité, si on considère que l'énergie massique de l'hydrogène vaut 34 kWh/kg (d'après le cours), il faut une masse : $M_H = 0,59 \text{ kg}$.

Et avec une masse volumique de 0,09 kg/m³, à la pression atmosphérique, il est nécessaire de disposer d'une capacité de 6,5 m³ (soit un cube de près de 2 m de côté).

Remarque : un accumulateur lithium de 12 kWh (pour prendre en compte les rendements de charge et décharge) aurait une masse d'environ 100 kg et occuperait un volume de 100 dm³.

Exercice 5- Hybridation d'une chaîne de traction pour véhicule urbain

Hyp. :

- surcoût d'investissement énergétique de la chaîne de traction hybride : 4000 kWh.
- pas de remplacement de composants sur la durée de référence de l'étude.

Si 100 km permettent d'économiser 3 litres d'essence,

l'énergie correspondante vaut 27,5 kWh

Les 4000 kWh de surcoût énergétique sont donc amortis en $4000/27,5 \times 100 = 14\,500$ km.

Exercice 6- Coût de production d'électricité et émissions de CO₂

Hyp. :

- prix du charbon 100 €/tonne (charbon à 9 kWh_{PCI}/kg)
- coût d'investissement égal à 1,8 €/W
- durée de vie de 20 ans (hors intérêts d'emprunt et coûts de maintenance)
- rendement électrique (sur la base du PCI) de la centrale : 45%

Calcul du coût de production :

- dû à la seule part du combustible

Pour produire 1 kWh d'électricité, compte tenu du rendement, il faut 2,22 kWh_{PCI} de charbon.

A 100 €/tonne et 9 kWh_{PCI}/kg, le coût du kWh_{PCI}/kg vaut 0,011 € donc le coût du kWh électrique sera égal à 0,025 €: **2,5 c€/kWh_e**.

Remarque ce prix fluctue énormément avec les variations de cours.

- dû à l'investissement seul, en supposant une durée annuelle de 6000 heures

1 W de puissance installée, coûte 1,8 € et produira durant 20 ans (6000 h/an) 120 kWh, donc le coût de production dû à l'investissement sera égal à : **1,5 c€/kWh_e**.

- total : **4 c€/kWh_e**.

Coût de la capture et du stockage du CO₂ :

Si 1 kWh_{PCI} de chaleur à partir du charbon rejette 350 grammes de CO₂, sachant que le rendement vaut 45%, **1 kWh_e conduira au rejet de 778 grammes de CO₂**

Sur la base de 70 €/la tonne de CO₂ ou 7 c€/kg, cela engendrerait un surcoût de **5,5 c€/kWh**, valeur tout à fait significative devant le coût de production.

Exercice 7- Rejets de CO₂ de la production photovoltaïque

Installation PV : rejets de GES 1700 kg CO₂ par kW_c (kilowatt crête) installé.

1- Emissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie (30 ans de fonctionnement) de l'installation par kWh électrique produit :

- au nord de l'Europe **900 kWh_e/kW_c**

1 kW_c produit $1 \times 900 \times 30 = 27\,000$ kWh_e => $1700 \text{ kg CO}_2/27\,000 \text{ kWh}_e$ => **62 g CO₂/kWh_e**

- au sud de l'Europe **1700 kWh_e/kW_c**

1 kW_c produit $1 \times 1700 \times 30 = 51\,000$ kWh_e => $1700 \text{ kg CO}_2/51\,000 \text{ kWh}_e$ => **33 g CO₂/kWh_e**

2- Comparaison des valeurs obtenues avec les autres moyens de production d'électricité.

60 gCO₂/kWh nucléaire moyenne mondiale, 330 g (gaz cycles combinés) à plus de 1 kg pour le charbon.

Exercice 8- Emissions de CO₂ de l'électricité produite par une éolienne terrestre

Sur 20 ans, éolienne 2 MW fabriquée et installée en Europe ; émissions d'environ 1200 tonnes de CO₂

1- Rejets de la production d'électricité éolienne en kg CO₂/kWh_e, sur l'ensemble du cycle de vie, pour des productivités annuelles de 1800 et 2500 h équivalent pleine puissance.

La production sur 20 ans vaut respectivement :

$$1800 \text{ h} \times 20 \times 2 \text{ MW} = 72 \text{ GWh}$$

$$2500 \text{ h} \times 20 \times 2 \text{ MW} = 96 \text{ GWh}$$

Ce qui donne ramené au kWh_e produit: **17 à 12,5 gCO₂/kWh_e**

2- Comparaison avec la « meilleure » production électrique d'origine fossile.

La moins mauvaise production électrique d'origine fossile est issue du gaz naturel converti dans une centrale à cycles combinés, soit **330 gCO₂/kWh_e**. C'est donc bien meilleur.

Exercice 9- Bilan d'énergie primaire d'un système PV autonome

Sur 30 ans, fourniture annuelle de 5,5 MWh électriques (MWh_e), énergie grise = 250 MWh_p

Comparaison de cette consommation d'énergie primaire avec la seule consommation (hors énergie grise) d'énergie primaire qu'il aurait fallu pour satisfaire cette production d'électricité avec le mix français actuel. Le coefficient de calcul de l'énergie primaire par kWh d'électricité distribué en basse tension : 3,61.

Pour satisfaire cette consommation, il faut consommer : 3,61 x 30 x 5,5 = **596 MWh_p**, dont l'essentiel n'est pas d'origine renouvelable.

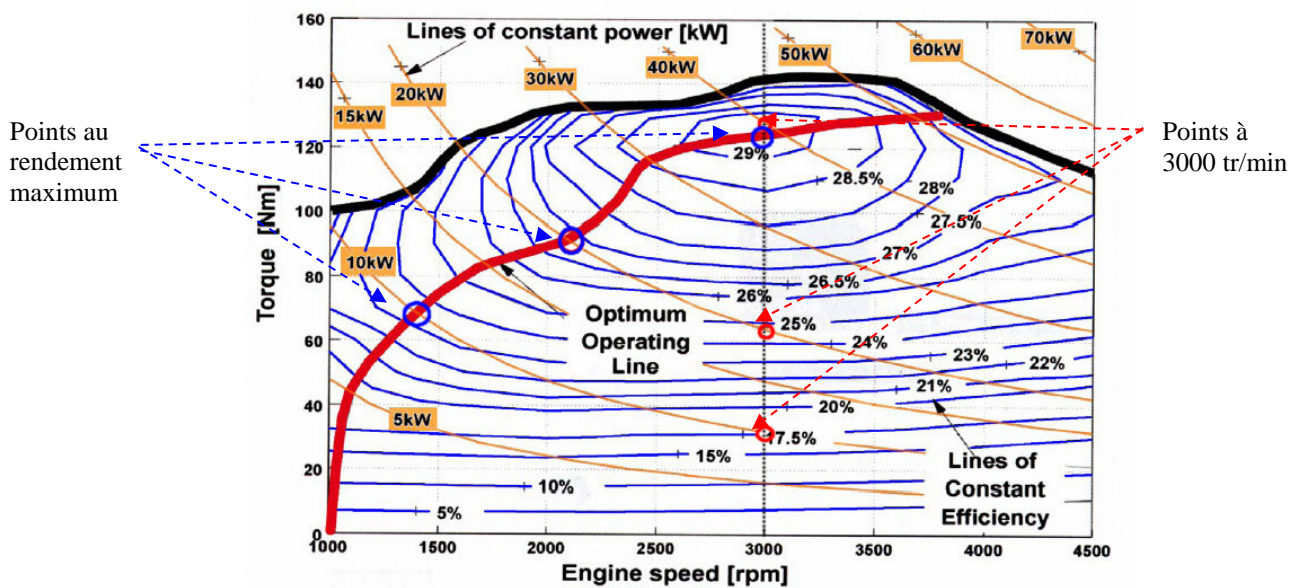
Cette valeur est plus de deux fois supérieure à celle correspondant à l'investissement énergétique d'un système PV isolé, ne profitant d'aucune mutualisation. En outre, l'énergie grise des réseaux et d système de production d'électricité actuelle n'a pas été comptabilisée.

Exercice 10- Rendements d'un groupe électrogène

Moteur à combustion interne accouplé à une chaîne de génération électrique dont on supposera (pour simplifier le problème) le rendement constant et égal à 90% quels que soient les points de fonctionnement.

Valeur énergétique du carburant est supposée égale à 10 kWh_{pci}/litre.

Les points de fonctionnement à 10, 20 et 40 kW sont représentés, pour répondre aux questions, sur la figure ci-dessous : à vitesse constante (3000 tr/min) et à vitesse optimale (rendement maximum).



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

1- Rendements à vitesse de rotation constante (3000 tr/min)

1a- Valeurs approximatives du rendement instantané (en puissance) du MCI (d'après le graphique ci-dessus)

P :	40 kW	20 kW	10 kW.
η_p :	29%	24,5%	17,5%

1b- Estimation du rendement sur cycle η_e du MCI pour un cycle de 1h par jour à 40 kW, 2h à 20 kW et 21 h à 10 kW

Energie mécanique utile : $E_{\text{util}} = 40 \text{ kW} \times 1\text{h} + 20 \text{ kW} \times 2\text{h} + 10 \text{ kW} \times 21 \text{ h} = 290 \text{ kWh}$

Energie consommée :

$E_{\text{cons}} = 40 \text{ kW} \times 1\text{h}/0,29 + 20 \text{ kW} \times 2\text{h}/0,245 + 10 \text{ kW} \times 21 \text{ h}/0,175 \cong 138 + 163 + 1200 = 1501 \text{ kWh}$

Le rendement η_e vaut : **19,3%** et la consommation de carburant correspond à **150 litres** de carburant (10 kWh/litre).

ATTENTION : le rendement sur cycle n'est pas égal à la valeur moyenne pondérée des rendements instantanés, il est bien compris entre les deux valeurs extrêmes rencontrées (17,5% et 29%).

1c- Rendement total sur cycle de production d'électricité incluant la chaîne électrique 90%) :

$$0,9 \times 0,193 = \mathbf{17,4\%}$$

2- Rendements à vitesse de rotation variable optimisée

Vitesse de rotation ajustée pour que le MCI travaille à son point de puissance maximale.

2a- Valeurs approximatives (d'après le graphique) du rendement instantané du MCI et de la vitesse correspondante

P :	40 kW	20 kW	10 kW.
η_p :	29%	27,5%	23,5%
N :	3000 tr/min	2100 tr/min	1400 tr/min

2b- Estimation du rendement sur cycle du MCI pour un cycle de 1h par jour à 40 kW, 2h à 20 kW et 21 h à 10 kW

Energie mécanique utile : $E_{\text{util}} = 40 \text{ kW} \times 1\text{h} + 20 \text{ kW} \times 2\text{h} + 10 \text{ kW} \times 21 \text{ h} = 290 \text{ kWh}$

Energie consommée :

$E_{\text{cons}} = 40 \text{ kW} \times 1\text{h}/0,29 + 20 \text{ kW} \times 2\text{h}/0,275 + 10 \text{ kW} \times 21 \text{ h}/0,235 \cong 138 + 145 + 893 = 1176 \text{ kWh}$

Le rendement η_e vaut : **24,6%** et la consommation de carburant correspond à **118 litres** (32 litres économisés)

2c- Rendement total sur cycle de production d'électricité incluant la chaîne électrique 90%) : $0,8 \times 0,246 = \mathbf{19,7\%}$

La solution à vitesse variable, malgré une chaîne électrique de conversion plus complexe et un rendement plus faible, permet une amélioration sensible du rendement global qui valait précédemment 17,4% (question 1.c).

Remarque importante :

Notons que pour faire correctement cette évaluation, il aurait fallu considérer des points de fonctionnement à des valeurs données de la puissance électrique et non de la puissance mécanique, ce qui imposait de prendre en compte le rendement (en réalité non constant) de la chaîne électrique dès le départ.

Exercice 11- Rendement sur cycle de vie d'une alimentation à découpage

Adaptateur de PC portable de 70 W

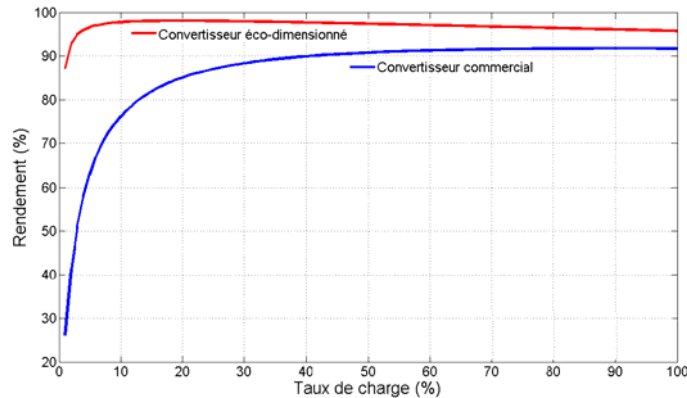
Consommation à vide (veille) de 0,4 W constante.

Les valeurs d'énergie grise sont de 8 et 12 kWh_p respectivement pour les convertisseurs commercial et éco-dimensionné.

Cycle de fonctionnement répété quotidiennement sur 5 ans :

Sur 24h :

- 30 min à pleine puissance (recharge partielle de la batterie)
- 9h30 h à 20 W
- 14 h à vide (veille)



1- Rendements du convertisseur commercial

Rendement instantané (en puissance) :

A vide : 0%

A 20 W (28%) : 88%

A 70 W : 92%

Rendement énergétique (sur cycle) quotidien :

Energie convertie : $E_u = 20 \text{ W} \times 9,5 \text{ h} + 70 \text{ W} \times 0,5 \text{ h} = 190 + 35 = 225 \text{ Wh}$

Energie électrique (et non primaire à ce niveau) consommée :

$E_{\text{abs}} = 20 \times 9,5 / 0,88 + 70 \times 0,5 / 0,92 + 14 \times 0,4 \cong 216 + 38 + 5,6 = 259,6 \text{ Wh}$

Rendement sur cycle = 86,7%

Rendement sur cycle de vie

Avec 3,61 kWh_p/kWh_e

Energie primaire consommée sur la vie pour les **seules pertes d'électricité** :

$$(259,6 - 225) \times 365 \times 5 \times 3,61 = 228 \text{ kWh}_p$$

En ajoutant l'énergie grise (négligeable), on atteint : **236 kWh_p**.

Energie électrique utile sur la vie : $225 \times 365 \times 5 = 410 \text{ kWh}_e$

Le **rendement sur cycle de vie** vaut alors : $410 / (410 + 236) = 63,5\%$

2- Comparaison des rendements sur cycle de vie des deux convertisseurs

Rendements instantanés du convertisseur éco-dimensionné :

A 20 W : 98%

A 70 W : 96%

Energie électrique consommée :

$E_{\text{abs}} = 20 \times 9,5 / 0,98 + 70 \times 0,5 / 0,96 + 14 \times 0,4 \cong 193,9 + 36,4 + 5,6 = 235,9 \text{ Wh}$

Energie primaire consommée sur la vie pour les **seules pertes d'électricité** :

$$(235,9 - 225) \times 365 \times 5 \times 3,61 = 71,8 \text{ kWh}_p$$

En ajoutant l'énergie grise (négligeable), on atteint : **83,8 kWh_p**.

Soit 35% de la consommation énergie grise plus pertes du convertisseur commercial.

Energie électrique utile sur la vie : $225 \times 365 \times 5 = 410 \text{ kWh}_e$

Le **rendement sur cycle de vie** vaut alors : $410 / (410 + 83,8) = 83\%$