

Introduction aux énergies renouvelables : exercices

Olivier Lottin, Gaël Maranzana

Gaël Maranzana
LEMTA, UMR CNRS-INPL-UHP 7563
2, avenue de la Forêt de Haye - BP 160
54504 VANDOEUVRE lès NANCY cedex
Tél. direct : 33/0 3 83 59 55 48
gael.maranzana@univ-lorraine.fr

1. Sommaire

I. Introduction : calculs d'ordres de grandeurs	5
1. Contenu énergétique des actions de la vie de tous les jours	5
2. Energie solaire totale	6
3. Energie solaire en France	6
4. Agrocarburants	6
5. Consommation annuelle pour les transports	6
6. Energie nucléaire fatale	7
7. Le corps humain au repos	7
8. Le pétrole, si cher que ça ?	7
9. Cout énergétique de la liquéfaction du gaz naturel.....	8
10. Le Pétrole est-il une énergie renouvelable ?	8
11. Géothermie	8
12. Energie de rotation de la terre.....	8
13. Courant de charge d'une voiture électrique	9
II. Le point sur les besoins et la production	10
1. Efficacité énergétique de la voiture électrique.....	10
2. Chaîne énergétique aux Etats-Unis et dans le monde	10
3. Chaîne énergétique en France.....	12
4. Poids du nucléaire en France	12
5. Prix du gaz	13
6. Sortir du nucléaire ?	13
6. Evolution de la consommation de Pétrole	14
7. La croissance	15
8. Frais de chauffage.....	15
9. Du pétrole à partir du charbon ?	16
10. Eclairage des logements	17
11 Cout énergétique des transports.....	18
III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles.....	19
1. A table !	19
2. Transport de marchandises	21
3. Le bio, c'est beaucoup mieux pour le changement climatique ?	22
4. Le nucléaire contre le réchauffement climatique ?	23
5. Soixante millions d'amis	24
6. Amortissement du cout de la guerre	24
7. Véhicule électrique et production de CO ₂	24
8. CO ₂ émis par la combustion du gaz naturel.....	25
9. CO ₂ émis par la combustion du charbon.....	25
IV. Les énergies renouvelables.....	26
1. La biomasse	26
1.1 Chauffage au bois buche	26

1.2 Chauffage au bois buche, granulés ou fioul ?	27
1.3 Potentiel de la forêt française.....	27
1.4 Chauffage au bois collectif et à la campagne.....	29
1.5 Tallis à croissance rapide.....	30
1.6 Feu de paille.....	30
1.7 Le miscanthus pour faire du ciment.....	30
1.8 Agrodiesel.....	30
1.9 Chaudière à bois à condensation.....	31
2. L'hydraulique	32
2.1 Quelle quantité d'eau pour produire 1 kWh d'électricité ?	32
2.2 Usine hydro-électrique de Fessenheim	32
2.3 Puissance moyenne des installations hydraulique.....	33
2.3 Superficie des barrages de retenue.....	33
2.4 Barrage des Grands Moulins.....	33
3. Le solaire	34
3.1 Eau chaude sanitaire	34
3.2 Constante solaire.....	35
3.3 Rayonnement solaire.....	35
3.4 Capteur solaire thermique.....	35
3.5 Les masques.....	36
3.6 Facteur de charge du photovoltaïque	37
3.7 Autosuffisance électrique d'une famille de 4 personnes.....	38
3.8 Refroidissement actif des panneaux ?	38
3.9 Productivité moyenne du photovoltaïque	38
3.10 Station-service → équivalent en surface de panneau PV.....	39
4. L'éolien	39
4.1 Potentiel éolien offshore en France.....	39
4.2 Comparaison d'un investissement à terre et offshore	40
4.3 Dimensionnement d'un mat.....	40
4.4 Potentiel de l'éolien en haute altitude	41
4.5 Facteur de charge des éoliennes en europe	41
4.6 Retours sur investissement et taux d'intérêt équivalents.	42
4.7 Si cher que ça l'éolien ?	42
V. Le stockage de l'énergie : gestion de l'intermittence	43
1 Concept hybride essence-air comprimé de PSA.....	43
2 Densité énergétique d'une batterie du commerce	43
3 Véhicule électrique.....	43
4 Récupération de l'énergie de freinage	44
5 Stockage/déstockage de l'électricité.....	44
5 Hydrogène et facture énergétique.....	45

I. Introduction : calculs d'ordres de grandeurs

1. Contenu énergétique des actions de la vie de tous les jours

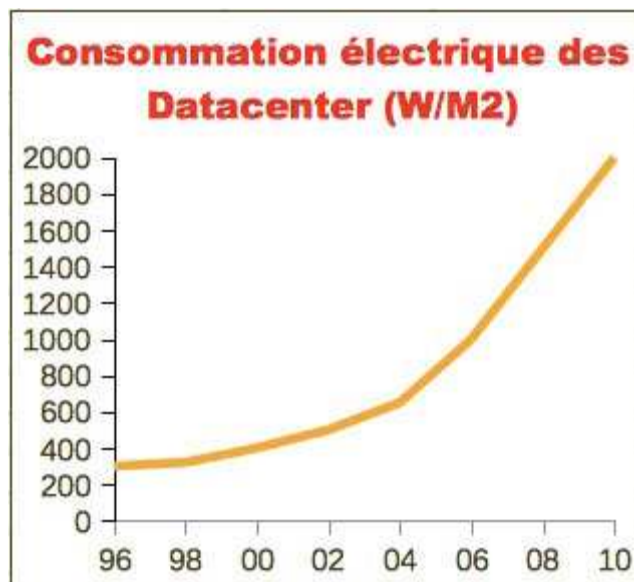
Calculer les quantités d'énergie associées aux activités suivantes :

- Prendre une douche (100 L d'eau chaude $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 37^{\circ}\text{C}$)
- Tondre sa pelouse (1/2 heure de tondeuse 2kW)
- Un trajet de 10km en voiture (contenu énergétique de l'essence : 10kWh/L) et 15000km
- Se nourrir une journée (sans excès)
- Faire un aller et retour à NewYork en avion (conso 4L /100km.passager)
- Regarder un film à la télévision (pas en streaming)
- Une charge de Smartphone (3.7V - 1500mA.h)
- Utiliser internet (la consommation électrique des data-center représente environs 1.5% de la consommation totale d'électricité qui est en France de 8000 kWh/hab.an)
- Chauffer son chez-soi (surface moyenne en France $40\text{m}^2/\text{hab}$, consommation moyenne de chauffage $150\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$).

Convertir les valeurs en J, kWh, Cal et tep.

Un français consomme en moyenne 30 000 kWh d'énergie finale toutes énergies et tous usages confondus par an. Convertir en J, tep et Cal. Calculer la puissance moyenne correspondante. Et uniquement pour l'électricité ?

Rappel : $1\text{ cal} = 4,184\text{ J}$; $1\text{ Cal} = 1000\text{ cal}$; $1\text{ tep} = 41,868\text{ GJ}$; $1\text{ baril de pétrole} = 159\text{ L}$; $7.6\text{ baril} / \text{tep}$



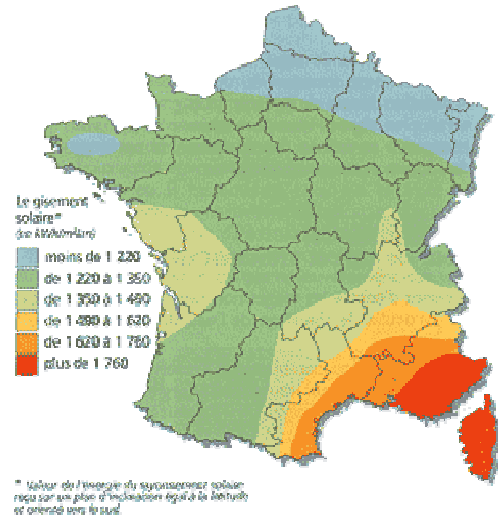
2. Energie solaire totale

Quelle est la quantité totale d'énergie reçue par la terre de la part du soleil au cours d'une année ? Exprimer le résultat en J, cal, baril de pétrole, tep et kWh. Comparer à la production annuelle d'énergie primaire mondiale qui est d'environ 13Gtep en 2012. Rayon de la terre : 6400 km. Puissance moyenne du rayonnement solaire au sol (à travers une surface perpendiculaire au rayonnement) : 1 kW/m^2 .

3. Energie solaire en France

En France, d'après l'ADEME et d'autres sources, l'énergie solaire reçue en moyenne par an est d'environ $1300 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour une surface totale de 550.000 km^2 . La consommation énergétique annuelle de la France est de 155 Million de tep. Quelle surface faudrait-il utiliser pour récupérer cette énergie sous forme d'énergie solaire ? Même question pour la consommation d'électricité de la France (436 TWh) en supposant un rendement de conversion « solaire -> électricité » de 10% ?

La surface bâtie en France est supérieure à 10.000 km^2 (hors routes, parkings, et surfaces artificielles non bâties) : conclusions ?



4. Agrocarburants

Le rendement net moyen de la production de agrocarburants est, en France, de l'ordre de 1 tep par an et par hectare. La consommation énergétique annuelle des transports en France est de 50 Million de tep. Quelle surface faudrait-il utiliser pour que la totalité de la consommation des transports soit fournie par des biocarburants ?

Pour information, la Surface Agricole Utile en France est égale à 29 Mha (54 % du territoire), dont 18 Mha (62 %) sont cultivés. On considère que 20 % du territoire est inexploité.



5. Consommation annuelle pour les transports



Considérons un individu français moyen qui n'emprunte jamais les transports en commun. Il parcourt 15000 km/an au volant de sa voiture et s'offre un voyage en avion par an sur la côte ouest des Etats-Unis. Quelle est la consommation d'énergie associée à ses transports ? Sa voiture consomme 7 l/100km d'essence, l'avion 4 l/100km de kérosène par passager. Le PCI de l'essence est de $43,8 \text{ MJ/kg}$ pour une masse volumique de 750 kg/m^3 . Le PCI du kérosène est de $43,15 \text{ MJ/kg}$ pour une masse volumique de 800 kg/m^3 . Exprimer le résultat en J, Cal, kWh et tep.

6. Energie nucléaire fatale



En 2012, la production d'électricité d'origine nucléaire en France a été de 407 TWh. Sachant que le rendement des turbines à vapeur associées aux centrales nucléaires est de 33%, calculer la quantité d'énergie thermique rejetée dans l'atmosphère par le parc nucléaire français en 2012 (en J, Cal, Wh et tep). Actuellement, chaque français dispose en moyenne de 40m^2 de logement pour lesquels la consommation d'énergie relative au chauffage est de l'ordre de $150\text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Combien de français pourraient être chauffés à partir de l'énergie nucléaire fatale ?

7. Le corps humain au repos

Le régime alimentaire journalier d'une personne pas très active sur le plan sportif se constitue de 2000 Calories.



- Quelle quantité d'énergie ingurgite-t-on par an en J, Cal, tep, kWh ? Comparer à la quantité d'énergie dépensée pour les transports.
- Calculer la puissance moyenne du corps humain au repos.
- Que devient cette énergie au final ?
- Calculer la puissance calorifique dégagée par 50 étudiants.
- Quelle surface de radiateur (400W/m^2) faut-il envisager pour dégager une puissance calorifique comparable ?

Rq : un sportif bien entraîné peut maintenir un effort de 400W pendant une heure.

8. Le pétrole, si cher que ça ?

Vous (70kg) disposez de deux esclaves et d'une chaise à porteur (30kg la chaise). Votre objectif est de vous rendre en une journée en haut d'une montagne présentant un dénivelé de 2000m. Pour cela, vous attribuez un petit supplément alimentaire de 50% à vos esclaves (3000Cal/jour).

- Calculer la quantité d'énergie utile dépensée par chacun de vos esclaves pour vous transporter en haut de la montagne.
- Calculer le rendement énergétique de vos esclaves.
- Sachant qu'un litre d'essence possède un contenu énergétique de 10kWh, à quelle quantité d'essence est équivalent le travail d'un esclave pendant un jour ?
- En l'an 2012, un Français consomme en moyenne 30 000 kWh d'énergie finale par an toutes énergies et tous usages confondus. Combien d'équivalent « esclave » avez-vous à votre disposition ?

9. Cout énergétique de la liquéfaction du gaz naturel



Pour liquéfier une masse de un kilogramme de gaz naturel initialement à température ambiante et pression atmosphérique, il faut pouvoir lui soustraire la quantité d'énergie de 560kJ. Cette énergie correspond à la chaleur sensible (à évacuer pour diminuer la température du gaz de la température ambiante jusqu'à -161°C) ajoutée à la chaleur latente de liquéfaction. Cette opération est réalisée par un système de

pompes à chaleur alimenté en électricité dont le rendement global est d'environ 30%. Sachant que l'électricité est produite à partir d'une turbine à gaz de rendement 30%, calculer la quantité de gaz nécessaire à la liquéfaction d'un kilogramme. Pouvoir calorifique du gaz naturel : $\text{PCI}=50\text{MJ/kg}$.

10. Le Pétrole est-il une énergie renouvelable ?

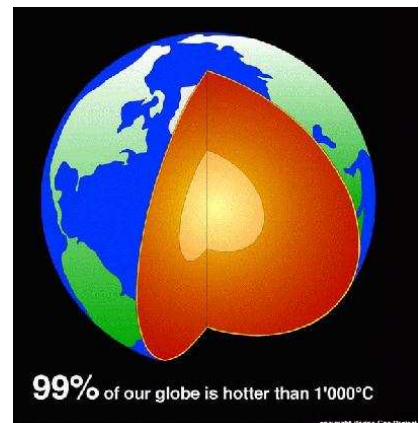
On estime à l'heure actuelle la quantité totale de pétrole récupérable à 4 500 milliards de barils. Ce Pétrole s'est formé depuis le début du Cambrien il y a 520 millions d'années.

Quelle est la réserve d'énergie stockée sous forme de pétrole (en kwh, tep et J). Calculer le débit de production du pétrole par la nature (en baril/jour et en Watt). Comparer au débit d'extraction par l'homme qui est de 86 millions de barils par jour en 2012.

Conclusion.

11. Géothermie

La perte moyenne d'énergie géothermique par la Terre est de 87 mW/m^2 . Calculer la puissance totale perdue par la terre. Comparer avec la puissance reçue de la part du soleil. Où va cette énergie ?



12. Energie de rotation de la terre

Calculer l'énergie cinétique de rotation de la terre (en supposant une terre sphérique et homogène). Masse de la terre : $M_t=6.10^{24} \text{ kg}$. Rayon de la terre : $R_t=6400 \text{ km}$.

Moment d'inertie d'une boule homogène de masse M et de rayon R : $I = 2/5.M.R^2$

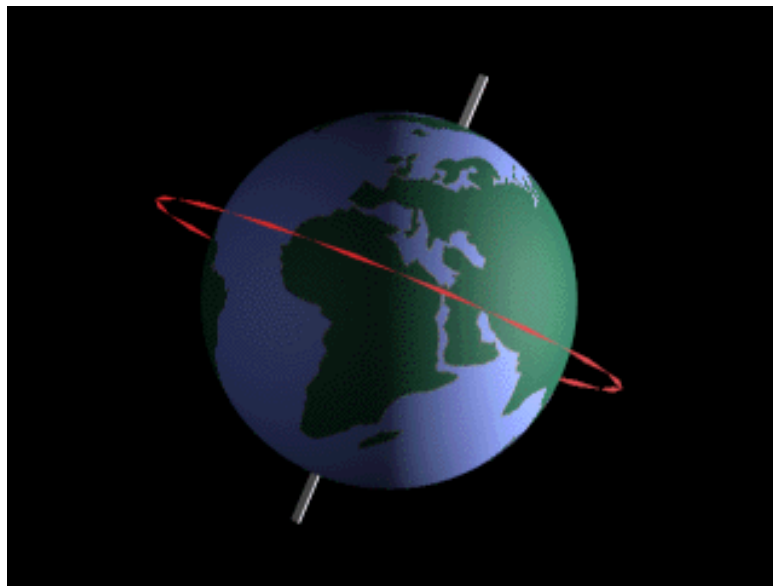
Energie cinétique de rotation : $E_c=1/2 I \omega^2$ (ω est la pulsation $\omega=2\pi/T$, T est la période).

Du fait des marées et du frottement de l'eau sur les fonds océaniques, la rotation de la Terre (durée d'une journée) ralentit de deux millisecondes par siècle. Dans combien de temps une journée ne durera plus que 23h ? Calculer la puissance dissipée par les marées en faisant l'hypothèse que le ralentissement de la rotation de la terre est du uniquement à la dissipation d'énergie associée aux marées. Quelle est la puissance moyenne dissipée en W/m^2 ?

En fait, en même temps qu'un ralentissement de la vitesse de rotation de la terre, on observe un éloignement la lune au rythme de 3,7 centimètres par an. Refaire les calculs en prenant en compte cette donnée.

Imaginons que l'on trouve une solution technologique pour utiliser l'énergie cinétique de rotation de la terre (câble tendu entre la terre et un point fixe dans l'espace) pour subvenir à nos besoins en énergie (13Gtep/an). Quelle serait la durée d'une journée au bout d'un siècle d'utilisation de ce moyen de production ?

Force d'attraction de la terre sur la lune : $2 \times 10^{20} \text{ N}$



13. Courant de charge d'une voiture électrique

Supposons que l'on arrive à fabriquer des batteries pouvant se recharger aussi rapidement que l'on fait le plein d'essence. La tension de charge étant de 220 V, calculer le courant électrique de charge pour transférer autant d'énergie qu'en faisant un plein d'essence de 40L en 3 minutes.



II. Le point sur les besoins et la production

1. Efficacité énergétique de la voiture électrique

Comparer les efficacités énergétiques globales d'une voiture électrique dont le rendement « de la prise à la roue » est de 80% et d'une voiture à essence dont le rendement « de la pompe à la roue » est de 20%. On pourra considérer une perte associée au transport de l'électricité de « la centrale à la prise » de 6% (6% de l'énergie transportée). Le coût énergétique du transport et du raffinage de l'essence est quant à lui de 15% du contenu énergétique. Envisager le cas de production de l'électricité par une centrale nucléaire (rendement de 33%), une centrale au charbon d'ancienne génération (rendement 30%), une centrale au gaz à cycle combiné (rendement 60%) et une centrale photovoltaïque.

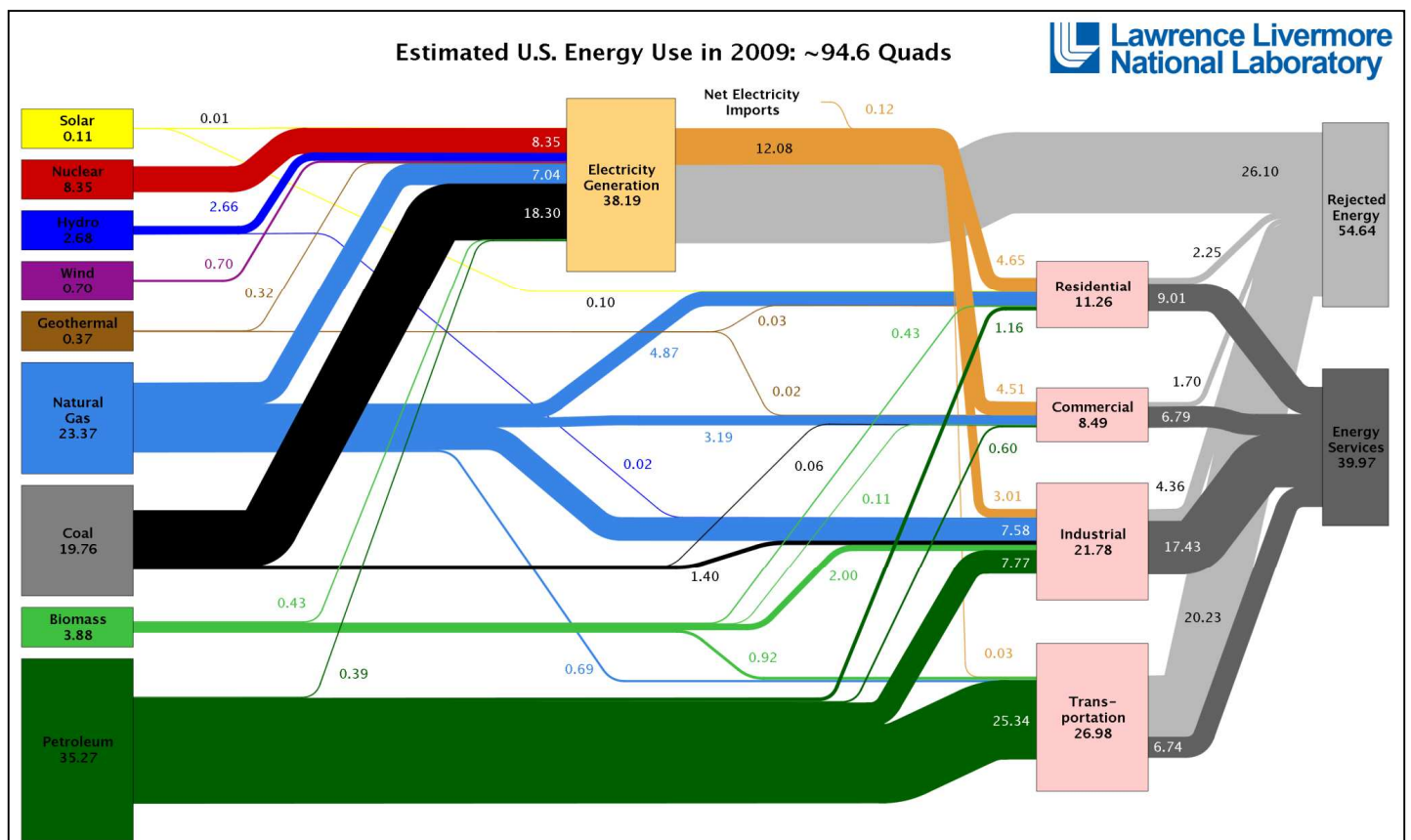
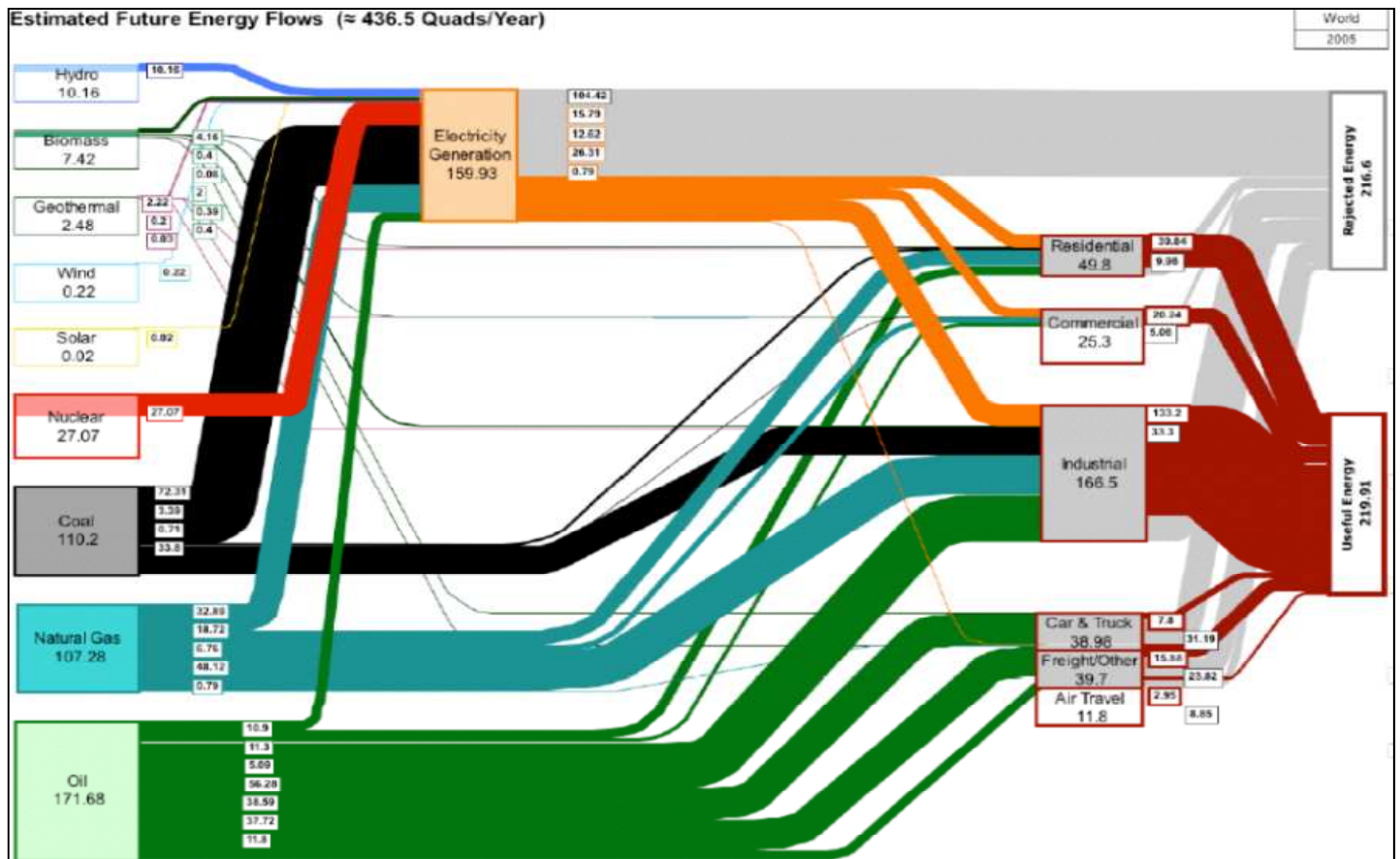
Il faudrait un peu plus de 200 TWh électriques par an pour électrifier les véhicules routiers actuels à performances identiques. Combien faudrait-il construire de tranches de centrales nucléaires (1500 MW, facteur de charge du nucléaire : 75%), ou d'éoliennes (2MW, facteur de charge de 25%), ou de m² de panneaux photovoltaïque (rendement de 10% et facteur de charge de 12%) ?

2. Chaîne énergétique aux Etats-Unis et dans le monde

Dans les deux cas (États-Unis et Monde), calculer les efficacités énergétiques dans chacun des trois secteurs -résidentiel, industriel et commercial-, expliquer les valeurs et les comparer aux rendements de production de l'électricité.

Expliquer pourquoi les rendements globaux sont si bons, et surtout meilleurs dans le monde entier qu'aux États-Unis ?

Calculer la consommation d'énergie primaire par habitant dans le monde (7 milliards d'habitants), aux États-Unis (315 millions d'habitant en 2009) et en France (64 millions d'habitants – 260 Mtep en énergies primaires en 2012). Exprimer les résultats en tep et en kWh.



Rq : 1Quad = 25.2 Mtep

3. Chaîne énergétique en France

D'après les données du tableau ci-dessous, et en supposant un rendement énergétique de 0,3 pour les transports et de 0,8 pour les autres secteurs, quel est le rendement global de la filière énergétique (E_{primaire} → E_{utile}) en France ?

Année	Consommation primaire		Consommation finale		
	Energétique	Non énergétique	Résidentiel et tertiaire	Transports	Industrie et agriculture
1973	179,7 Mtep	10,9 Mtep	56,2 Mtep	25,9 Mtep	51,5 Mtep
1990	228,3 Mtep	12,4 Mtep	57,7 Mtep	40,8 Mtep	42,2 Mtep
2002	272,0 Mtep	14,7 Mtep	67,9 Mtep	50,2 Mtep	42,7 Mtep
2012	259,4 Mtep	12 Mtep	68,7 Mtep	49,2 Mtep	36,5 Mtep

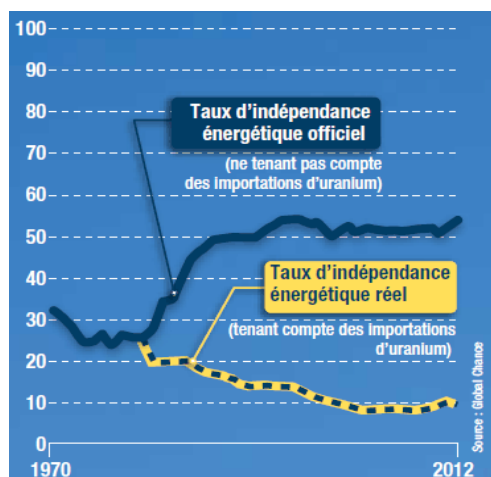


4. Poids du nucléaire en France

En 2012, d'après l'Observatoire de l'Énergie, la production brute d'électricité primaire (électricité produite hors thermique classique) était de 425,4 TWh pour le nucléaire, 63,0 TWh pour l'hydraulique, 14,9 TWh pour l'éolien et 4,1 TWh pour le photovoltaïque.

Que représente cette production dans la part de la consommation nationale d'énergie primaire (258,5 Mtep en 2012) ?

En fait, la production totale d'énergie primaire est de 136,3 Mtep. Quel est le taux d'indépendance énergétique de la France ?



Que représente le poids du nucléaire seul dans la consommation d'énergie primaire en France ?

Que représente la part du nucléaire dans la consommation d'énergies finales ?

(166,4 ou 155,4 Mtep)

Supposons que la France souhaite mettre fin à la filière nucléaire et la remplacer totalement par :

-Des centrales thermiques consommant des biocarburants.

-Des éoliennes et des installations hydrauliques.

A quoi ressemblerait dans les deux cas la consommation nationale en énergies primaires (en supposant qu'il n'y ait aucun changement dans la

consommation des énergies finales) ?

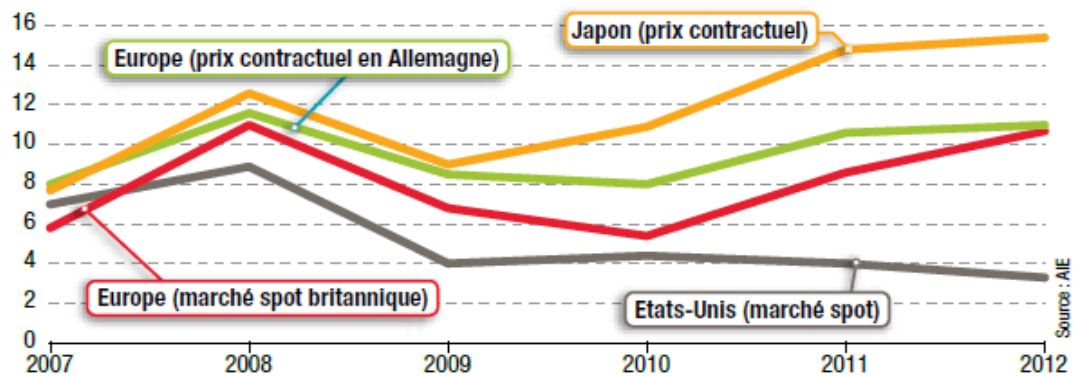
-En conservant les coefficients de conversion actuels ?

-En imaginant un nouveau rendement de conversion pour les centrales thermiques consommant de la biomasse ?

Quelle superficie de terre agricole faudrait-il mettre en œuvre dans l'hypothèse « biocarburant » ? Pour mémoire, il faut environ 1 ha pour produire 1 tep/an de biocarburant et la superficie totale de la France est d'environ 55 Mha.

5. Prix du gaz

En Europe, en 2011 le prix du gaz (industriel) était d'environ 7€/GJ. Dans le même temps, il était de \$4/Mbtu aux USA. Convertir ces prix en €/kWh. Conclusion ?
 $1 \text{ btu} = 1055 \text{ J}$. $1 \text{ €} = \$1,2$.



Prix moyens (en \$/Mbtu) du gaz sur les marchés américains, européens et japonais en octobre de chaque année

La chute du prix du gaz aux Etats-Unis, qui entraîne également par effet domino une chute du prix du charbon, est très préjudiciable au développement des énergies renouvelables qui peinent à être compétitives.

6. Sortir du nucléaire ?

Supposons que l'humanité souhaite mettre fin à la production d'électricité d'origine nucléaire.

- En les remplaçant par des centrales à charbon (rendement 38%)
- En les remplaçant par des centrales à gaz à cycle combiné (rendement 60%)

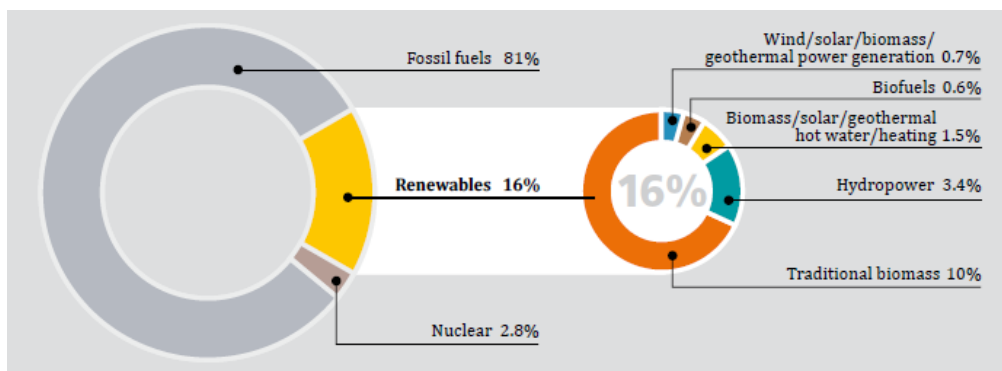
Quelles quantités de combustible fossile supplémentaires seraient consommées par an. De combien d'années serait raccourci le temps de production total (pour tout consommer) de ces deux ressources fossiles ?



Supposons maintenant que l'humanité décide de remplacer toutes ses centrales électriques à carburant fossile par des centrales nucléaires de technologie actuelles (3^{ème} génération fonctionnant avec l'uranium 235). Combien d'années seraient nécessaires pour épuiser les ressources en Uranium ?

-Et dans le cas de centrales à neutron rapide fonctionnant à partir de l'Uranium 238 ?

-Et dans le cas de centrales à neutron rapide fonctionnant à partir du Thorium ?



Répartition de la consommation d'énergie finale dans le monde (8.7Gtep)

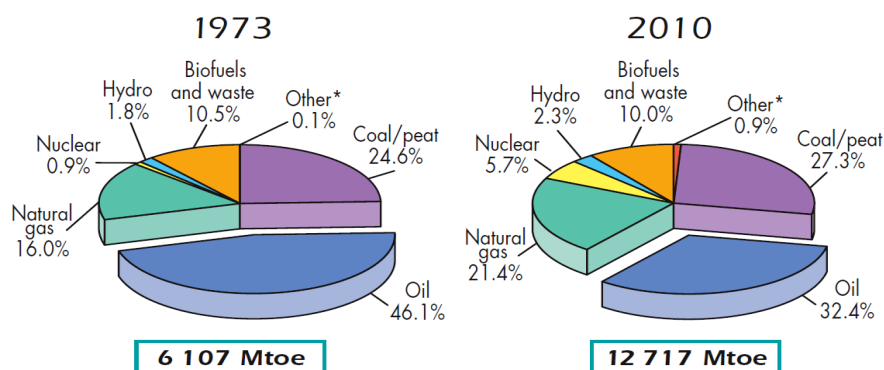
Réerves mondiales d'énergies et production annuelle 2011 par sources d'énergie

	Réerves mondiales (en unité physique)	Réerves mondiales (en Gtep)	Réerves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole ^{N 1}	1 653 GBI	234	23 %	4,0	58
Gaz naturel ^{N 2}	208 Tm ³	187	18 %	3,3	57
Charbon ^{N 3}	861 Gt	564	56 %	3,95	145
Uranium ^{N 4}	3,3 Mt	30	3 %	0,59	48
Hydroélectrique ^{N 5}	15 PWh	2,7		0,79	-
Énergie éolienne ^{N 6, N 7}	39 PWh	8,8		0,104	-
Solaire ^{N 8, N 9, 10}	1 070 000	92 000		0,016	-
Biomasse ^{N 10}	3 10 ²¹ J	70		0,074	-
Total conventionnel		1075		12,9	83

6. Evolution de la consommation de Pétrole

Les États-Unis consomment **20,7** millions de barils de pétrole par jour pour **303350706 habitants**. La Chine consomme **7,9** millions de barils de pétrole par jour pour **1312290000 habitants**. Quel représentera la consommation de la **Chine** lorsqu'elle sera équivalente à celle des États-Unis ? Comparer à la consommation mondiale actuelle.

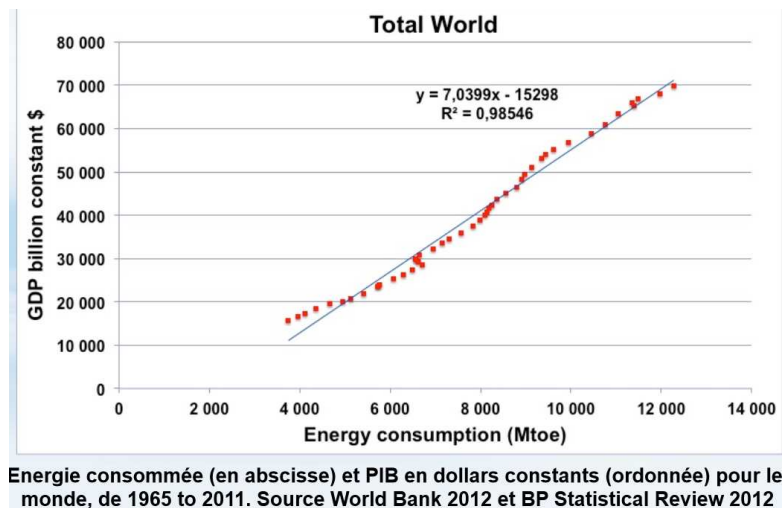
Si chacun d'entre nous sur terre consommait autant de pétrole qu'un Américain, combien d'années seraient nécessaires à l'épuisement des ressources, tout restant constant par ailleurs (population, consommation, etc..) ?



Mix énergétique mondial en 2010 (production d'énergies primaires)

7. La croissance

Nous avons vu que la consommation d'énergie primaire était fortement corrélée à la croissance (augmentation du PIB mondial). En supposant que la croissance soit effectivement une conséquence de l'augmentation de la consommation d'énergie, recalculer « le nombre d'années de production avant tarissement » des énergies fossiles dans le cas d'une croissance mondiale de 1%, 5%, 10% et d'une décroissance de 1%, 5%, 10%.

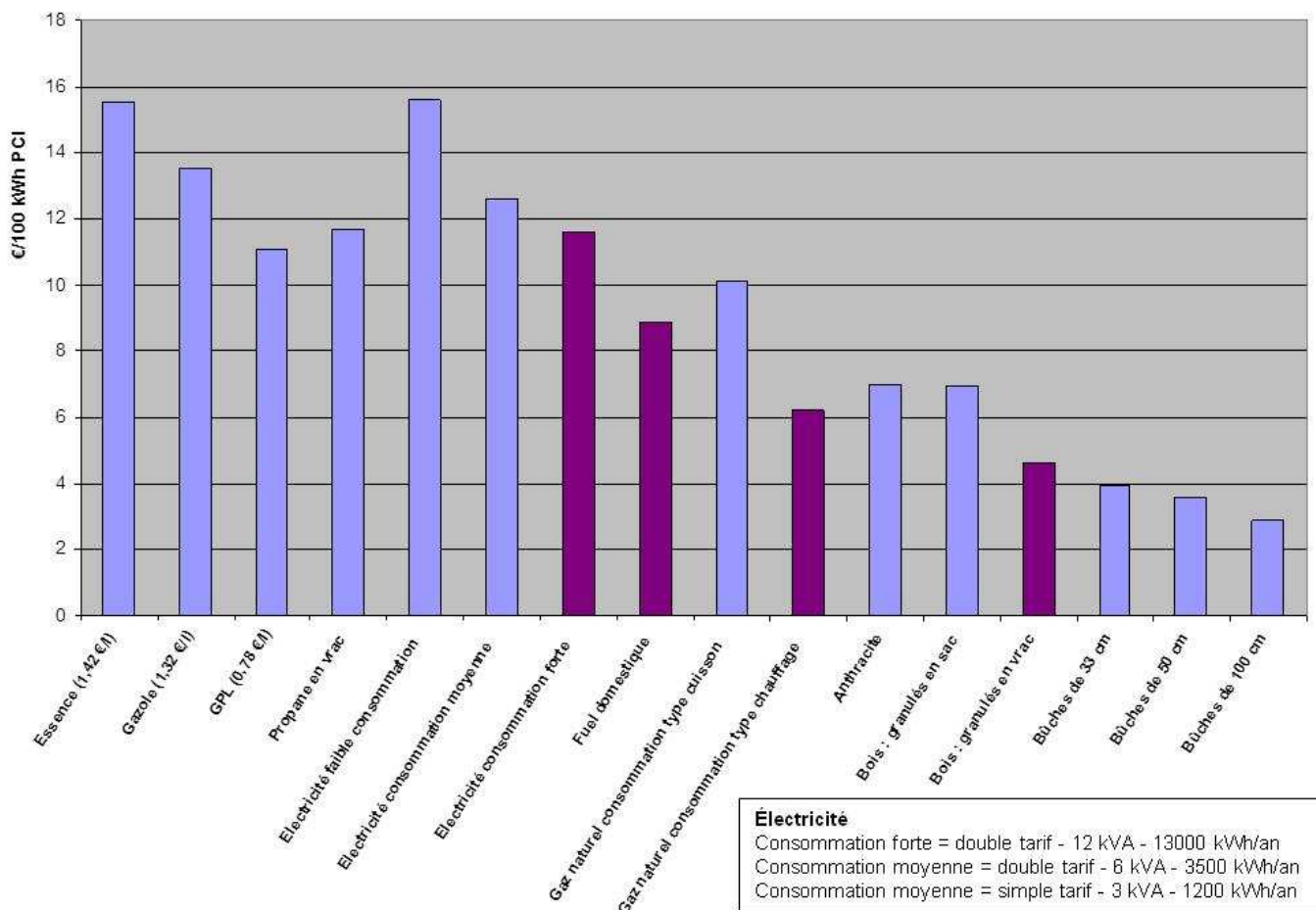


8. Frais de chauffage

La consommation d'énergie liée au chauffage dépend de l'isolation des bâtiments. Les ordres de grandeurs pour la France sont les suivant :

Logements : consommation d'énergie primaire	Total kWh/m²/an	Chauffage kWh/m²/an
Très mal isolé	368	281
Mal isolé	318	231
Moyennement isolé	268	181
Assez bien isolé	218	131
Bien isolé	168	81
Très bien isolé	113	26
Basse consommation	95	8

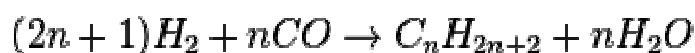
En déduire, pour chaque type d'isolation le cout annuel en chauffage dans le cas d'un logement de 40 m² (surface moyenne par habitant en France) et d'un chauffage au gaz, au fioul, au charbon, électrique type convecteur, électrique type pompe à chaleur, au bois à pellets et au bois buche. Comparer à la consommation énergétique due aux transports (15000 km/an en voiture avec une consommation de 6 L/100km).



9. Du pétrole à partir du charbon ?

Le procédé Fischer-Tropsch est un procédé chimique où intervient la catalyse de monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure. Les catalyseurs les plus courants sont le fer, le cobalt ou le ruthénium, ainsi que le nickel, mais ce dernier aura tendance à former du méthane CH_4 (on parle alors de méthanation). L'intérêt de la conversion est de produire du pétrole brut de synthèse à partir de charbon ou de gaz. C'est un procédé très performant en termes de rendement, mais qui nécessite des investissements très lourds, ce qui le rend économiquement vulnérable aux fluctuations à la baisse du cours du pétrole.

Le procédé Fischer-Tropsch tel que découvert par ses deux inventeurs est schématiquement le suivant :



Au début de 1944, le Troisième Reich produisait quelque 124 000 barils/jour de combustibles à partir de charbon, ce qui représentait plus de 90 % de ses besoins en essence d'aviation et plus de 50 % du besoin total du pays en combustibles.

Le rendement énergétique du procédé est à l'heure actuelle de l'ordre de 50%, c'est-à-dire que le contenu énergétique du carburant obtenu est 2 fois plus faible que le contenu énergétique initial du charbon.

- Calculer la quantité de Pétrole (en baril) que l'on pourrait produire à partir des réserves totales de Charbon.
- Comparer l'efficacité énergétique globale d'un véhicule électrique (électricité produite à partir du charbon) et d'un véhicule à essence (essence produite à partir du procédé Fischer-Tropsch).
- Quel est l'intérêt de ce procédé ?

10. Eclairage des logements

La norme impose une intensité lumineuse minimale pour un local en fonction de son utilisation. L'intensité lumineuse se mesure en lux (lumen par m²).

Exemples de valeurs minimales recommandées pour des locaux affectés au travail données par la norme NF EN 12464-1
«Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieur»⁴.

Activité ou lieu concerné	Éclairage moyen
Zones de circulation et couloirs	100 lux
Escaliers, escaliers roulants, tapis roulants	100 lux
Vestiaires, sanitaires, salles de bains, toilettes	200 lux
Classement, transcription, etc.	300 lux
Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500 lux
Salles de conférence et de réunions	500 lux

Pour un logement cela peut être très variable en fonction des habitudes de l'occupant. Considérons un logement de 40 m², une intensité lumineuse moyenne de 100 lux et un temps d'éclairage moyen de 4h par jour. Calculer la consommation annuelle d'énergie pour l'éclairage en fonction du type d'ampoule utilisé. Comparer à la consommation d'énergie associée au chauffage. Calculer pour chaque type d'ampoule le coût annuel lié à l'éclairage en intégrant l'amortissement du prix des ampoules.

Ampoule à incandescence Osram : 1.6€ - durée de vie 1000h – Puissance 60W / 710lm



Ampoule halogène Osram : 4.5€ - durée de vie 2000h – Puissance 42W / 580lm



Ampoule fluocompact Osram : 13.95€ - durée de vie 6000h – Puissance 12W / 620lm

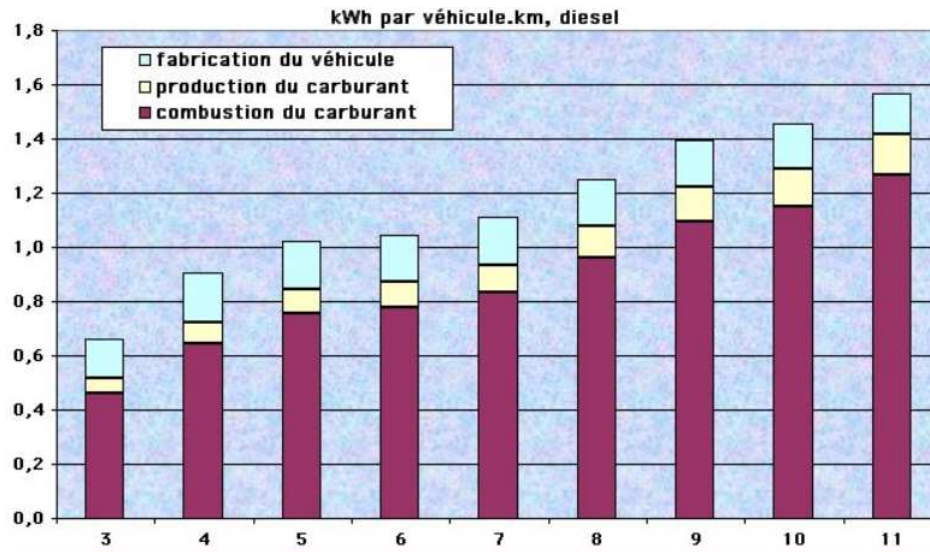


Ampoule à LED Osram : 14.95€ - durée de vie 15000h – Puissance 8W / 470lm



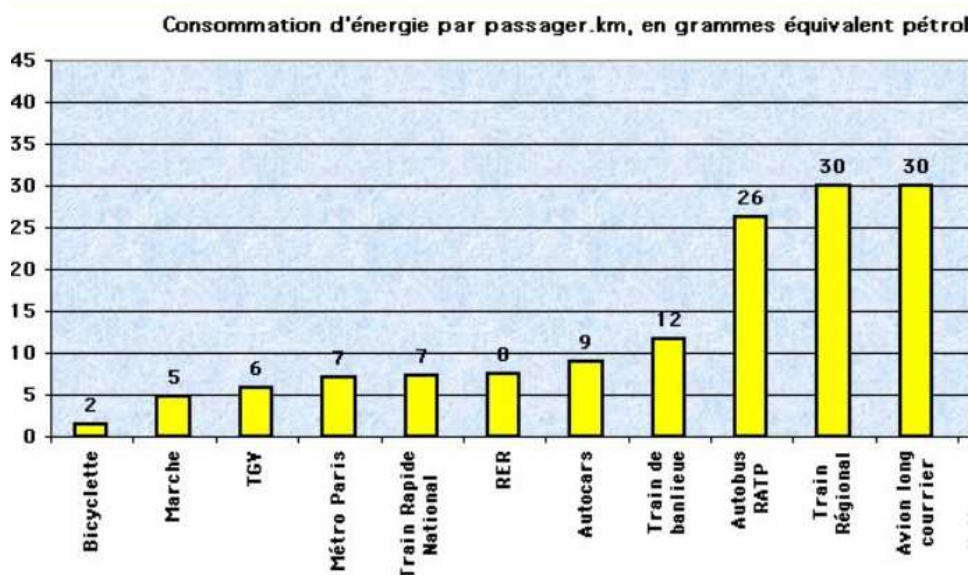
4.11 Cout énergétique des transports

Une voiture consomme de l'énergie parcequ'elle brule du carburant mais également parcequ'il a fallu de l'énergie pour la construire et produire le carburant :



Consommation d'énergie par km, selon la puissance fiscale du véhicule, pour les voitures diesel. Les consommations d'énergie concernant la fabrication du véhicule, et celle concernant l'extraction, le transport et le raffinage du carburant ("production du carburant") sont séparées de la combustion directe du carburant dans la voiture. Source Jancovici, d'après Ademe, 2004 (les consommations correspondent aux enquêtes ménage et non aux données constructeur, inférieures de 30% en moyenne !).

Pour une utilisation correspondant à 7000 km/an et 15000 km/an calculer le cout énergétique d'une petite voiture (3 chevaux fiscaux) et d'une grosse (11 chevaux fiscaux). Comparer au bus, train et vélo.



Dépense énergétique par passager.km selon les modes. Sources : ADEME, Observatoire de l'Energie

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

1. A table !

Consommations moyennes de produits laitier en France (2010)

Lait : 66 L/an.ha

Beurre : 8 kg/an.ha

Fromage : 24 kg/an.ha

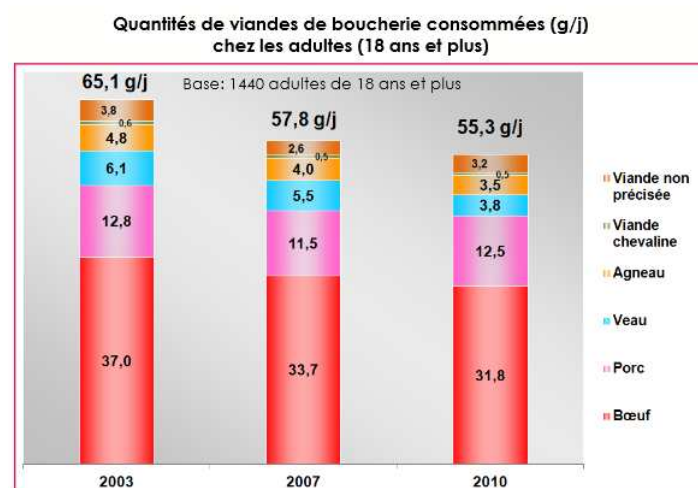
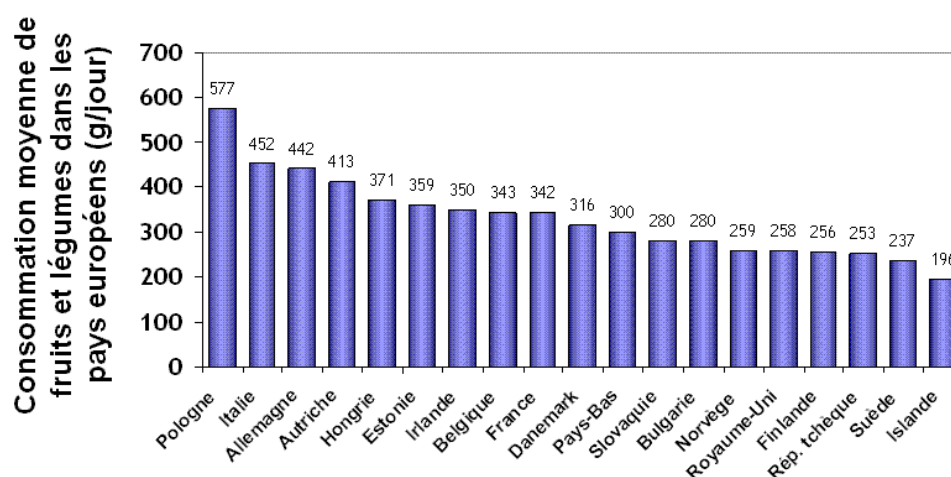
Yaourt : 21 kg/an.ha

Consommation moyenne d'œufs en France (2010)

Œuf : 15 kg/an.ha

Consommation moyenne de pain, pomme de terre et céréales en France (2010)

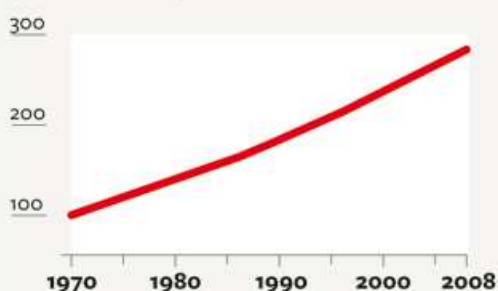
Pain, pomme de terre, céréales : 160kg/an.ha



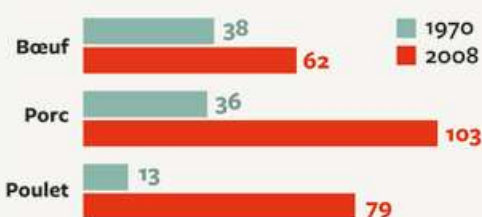
Source : CRÉDOC, Enquêtes CCAF 2003, 2007 et 2010

Un monde carnivore

Production mondiale de viande
(en millions de tonnes)

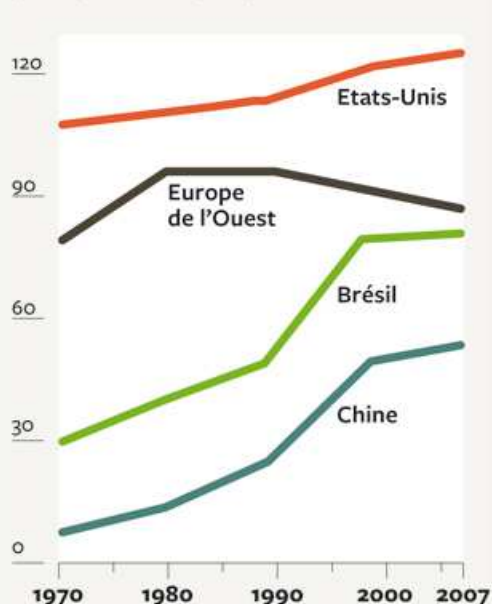


Production mondiale (en millions de tonnes)



La production de poulet, qui s'est fortement industrialisée, a été multipliée par six en trente-huit ans, alors que celle du porc a triplé et que celle du bœuf a doublé.

Consommation de viande
(en kilos par habitant et par an)

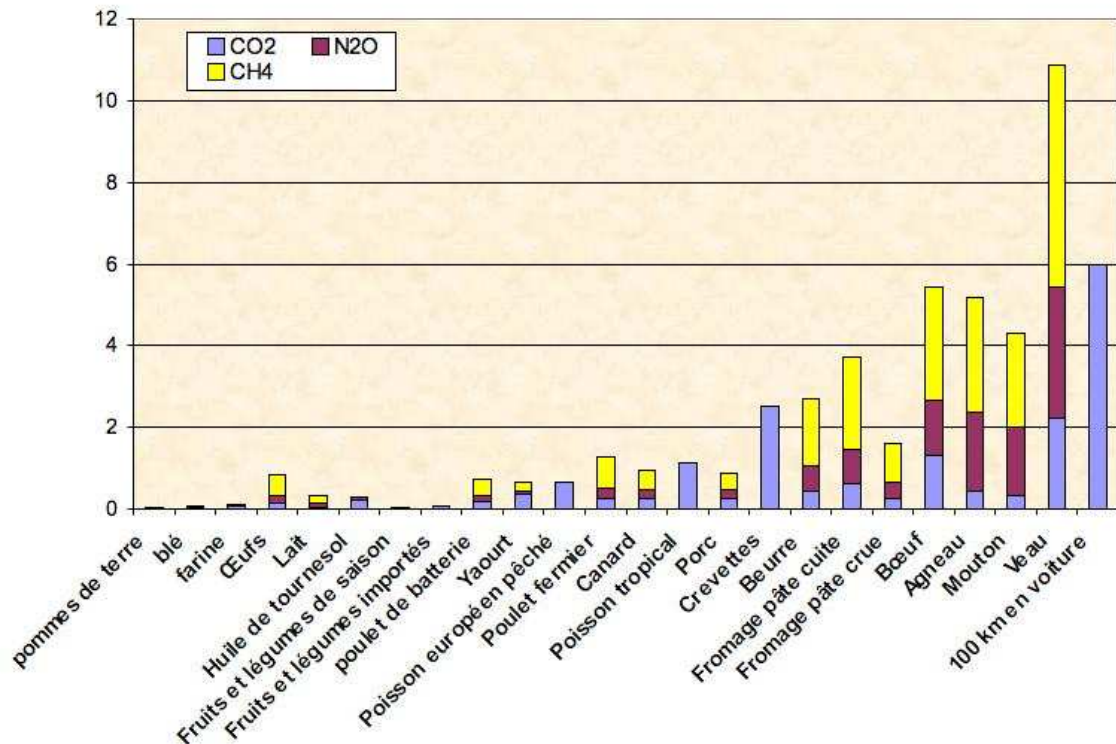


Développement rime avec modification des habitudes alimentaires, ce qui se traduit généralement par une hausse de la consommation de viande.

Sources : FAO, "New Scientist"

ESTIMATION DES ÉMISSIONS CO₂ POUR UN KILO D'ALIMENT PRODUIT

ALIMENTS	GRAMMES ÉQUIVALENTS CARBONE/KILO D'ALIMENTS
Fruits et légumes	150
Pain, pâtes et riz	200
Lait de vache	270
Œufs	450
Yaourt	490
Poisson	500
Canard	680
Poulet fermier	850
Cochon	910
Fromage pâte crue	1 500
Beurre	2 000
Fromage pâte cuite	3 000
Mouton	3 560
Bœuf	3 560
Veau	13 650



Emissions de gaz à effet de serre liées à la production d'un kg de nourriture, en kg équivalent carbone, avec une discrimination par gaz, pour les produits dits "conventionnels" (donc issus de l'agriculture intensive sauf mention contraire). La viande s'entend avec os (il s'agit "d'équivalent carcasse") mais sans traitement de l'industrie agroalimentaire ni emballages ni transports. Pour obtenir des valeurs en kg équivalent CO2, il faut tout multiplier par 3,67. Source : Jancovici/Ademe, Bilan Carbone, 2009

Calculer l'émission de gaz à effet de serre liée à la production de l'alimentation pour un régime alimentaire français moyen, dans le cas où la viande bovine est remplacée par de la volaille, et dans le cas d'un régime végétarien.

2. Transport de marchandises

Le transport d'une tonne de fruits venant d'Espagne (1.000 km) en semi-remorque engendre environ 25 kg équivalent carbone (ce chiffre tient compte du taux moyen de trajets à vide effectués par les poids lourds, ainsi que du taux moyen de remplissage du camion). Une tonne de pommes venant du maraîcher du coin en utilitaire léger (25 km) engendre environ 3 kg équivalent carbone. Une tonne de mangues venant d'Afrique du Sud par avion (et parcourant 10.000 km en chiffres ronds) engendre 3,2 tonnes équivalent carbone. Une tonne d'oranges venant de Tunisie par avion engendre environ 1,2 tonnes équivalent carbone. Une tonne de courrier Paris-Nice par train de nuit (que la Poste a abandonné il n'y a pas longtemps) engendrait 2 kg équivalent carbone, en camion elle en fera environ 20 kg, et en avion (chronopost ou équivalent) 550 kg (250 fois plus qu'en train !).

Encore une fois, tout ce qui transite par l'avion engendre des émissions considérablement plus importantes que par tout autre moyen de transport, mais cela ne rend pas le camion (et même le train dans certains pays d'Europe) "climatiquement vertueux" pour autant !

-Calculer l'émission de gaz à effet de serre lié au transport des aliments dans le cas où ils sont produit localement et dans le cas où ils sont importés d'Espagne pour les fruits et légumes, d'Amérique du sud (en avion) pour la viande, et en europe de l'est pour les produits laitiers.

3. Le bio, c'est beaucoup mieux pour le changement climatique ?

Que se passe-t-il quand on se met à cultiver bio ?

-On évite l'énergie fossile nécessaire à la fabrication des engrais de synthèse, qui sont interdits dans le système bio, et donc certains postes d'émission disparaissent.

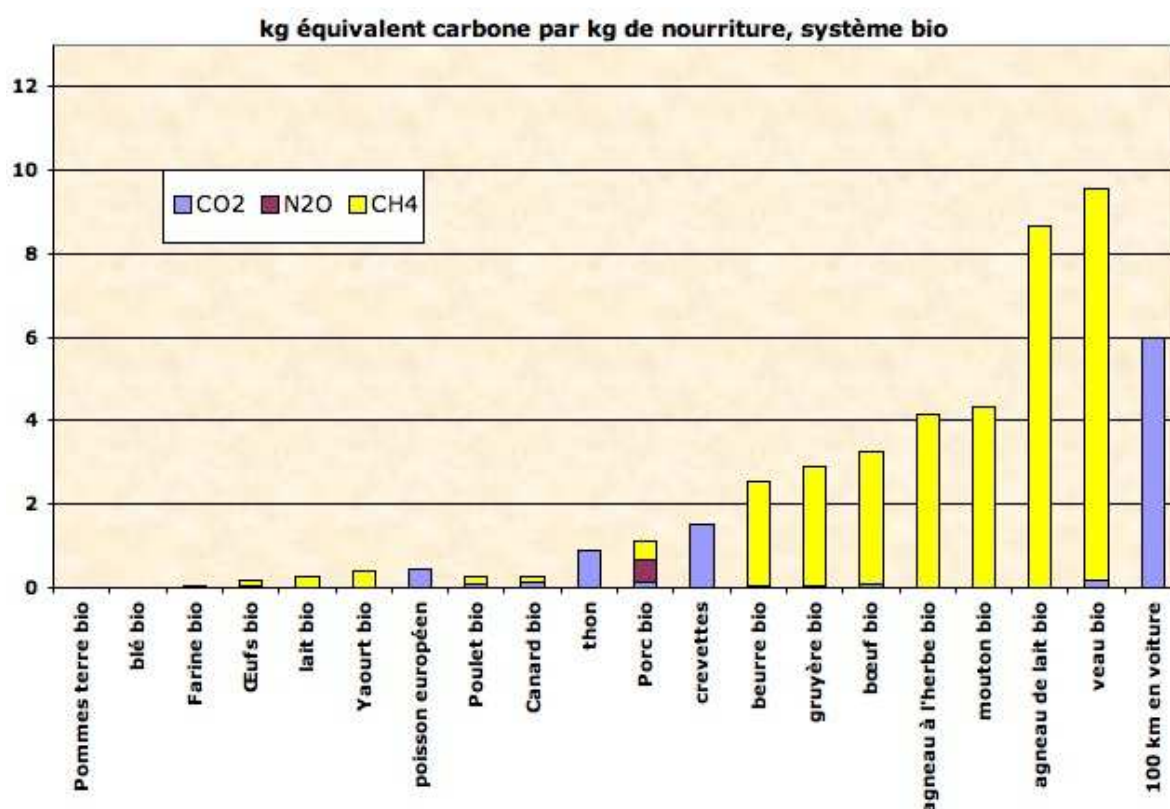
-Idem pour les phytosanitaires.

-Il y a quand même des émissions de N_2O liées à l'épandage des fumiers et autres apports d'azote

-Les rendements sont moins élevés, alors que les heures de tracteur sont à peu près les mêmes, et donc les émissions de CO_2 par unité de production augmentent pour certains postes.

-Enfin, bio ou pas bio, les ruminants continuent à roter du méthane !

Si nous faisons un bilan de tous ces effets contraires, nous parvenons au schéma suivant :



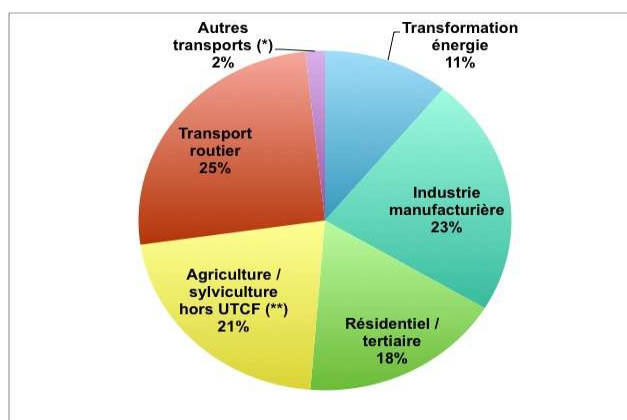
Emissions de gaz à effet de serre liées à la production d'un kg de nourriture en système bio. Les émissions de CO_2 et de N_2O baissent, et les émissions globales par kg sont diminuées de 30% environ pour les viandes rouges et de 50% - voire plus - pour les produits végétaux et les volailles. Pour le poisson, ça ne bouge pas !

Source : Jancovici, 2007

-Calculer l'émission de gaz à effet de serre liée à la production de l'alimentation bio pour un régime alimentaire français moyen, dans le cas où la viande bovine est remplacée par de la volaille, et dans le cas d'un régime végétarien.

4. Le nucléaire contre le réchauffement climatique ?

Un Français émet environ 2,2 tonnes équivalent carbone par an tous gaz à effet de serre confondus et en tenant compte des puits.



Répartition par secteur des émissions des 6 gaz à effet de serre en France en 2009.

Énergie/Technologie	Émission des centrales	Autres étapes de la filière	Total
LIGNITE			
Technologie des années 1990 (borne supérieure)	359	7	366
Technologie des années 1990 (borne inférieure)	247	14	261
Technologie de 2005-2020	217	11	228
CHARBON			
Technologie des années 1990 (borne supérieure)	278	79	357
Technologie des années 1990 (borne inférieure)	216	48	264
Technologie de 2005-2020	181	25	206
PETROLE			
Technologie des années 1990 (borne supérieure)	215	31	246
Technologie des années 1990 (borne inférieure)	195	24	219
Technologie de 2005-2020	121	28	149
GAZ NATUREL			
Technologie des années 1990 (borne supérieure)	157	31	188
Technologie des années 1990 (borne inférieure)	99	21	120
Technologie de 2005-2020	90	16	105
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE			
Technologie des années 1990 (borne supérieure)	0	76,4	76,4
Technologie des années 1990 (borne inférieure)	0	27,3	27,3
Technologie de 2005-2020	0	8,2	8,2
HYDRAULIQUE			
Centrales de lac (Brésil, théorique)	0	64,6	64,6
Centrales de lac (Allemagne, borne supérieure)	0	6,3	6,3
Centrales de lac (Canada)	0	4,4	4,4
Centrales au fil de l'eau (Suisse)	0	1,1	1,1
BIOMASSE			
Borne supérieure	0	16,6	16,6
Borne inférieure	0	8,4	8,4
EOLIENNE			
Puissance installée 25 % (Japon)	0	13,1	13,1
Puissance installée < 10 %, terrestre (Suisse)	0	9,8	9,8
Puissance installée 10 %, terrestre (Belgique)	0	7,6	7,6
Puissance installée 35 %, sites côtiers (Belgique)	0	2,5	2,5
Puissance installée 30 %, sites côtiers (RU)	0	2,5	2,5
NUCLEAIRE			
Borne supérieure	0	5,7	5,7
Borne inférieure	0	2,5	2,5

Émissions totales de GES des différentes filières de production d'électricité - gC_{eq}/kWh

Evaluer l'émission de gaz à effet de serre d'un français dans le cas où les centrales nucléaires seraient remplacées par des centrales 1. A Lignite comme en Allemagne, 2. Au charbon, 3. Au gaz naturel, 4. Solaire photovoltaïque, 5. A biomasse et 6. Eolienne ?

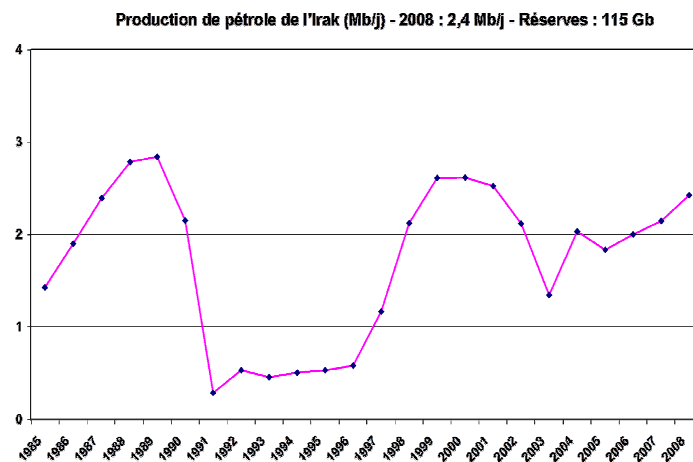
5. Soixante millions d'amis

Un chien de taille moyenne mange 164 kilos de viande et 95 kilos de céréales chaque année. Un chat de taille moyenne mange 30 kilos de viande et 17 kilos de céréales chaque année. En France, il y a environs 8 million de chien et 10 million de chats.

Quelle est l'émission de CO₂ associée à la consommation alimentaire des chiens et chats en France ? et par habitant ?

6. Amortissement du cout de la guerre

Le Watson Institute for International Studies de l'Université Brown aux USA estime que le cumul des dépenses liées à la guerre d'Irak atteignait 2000 G\$ fin 2012 et pourrait atteindre au total 6000 G\$ au cours des quatre prochaines décennies. Les réserves de pétrole de l'Irak sont de l'ordre de 100 milliards de barils. En supposant que la totalité des ressources de l'Irak soit à terme exploitée par les USA, quelles conclusions pourrait-on en tirer à propos du surcoût du baril de pétrole ?



Évolution de la production de pétrole en millions de barils par jour depuis 1965 – D'après les données de BP (Statistical Review of World Energy, 2009)

7. Véhicule électrique et production de CO₂

D'après Renault, une Fluence électrique consomme 17 kWh/100 km en ville tandis que son équivalent diesel consomme 5,3 l/100 km dans les mêmes conditions.

La combustion d'un litre de diesel dégage 2,6 kg de CO₂.

D'après l'AIE, la production d'1 kWh électrique correspond à l'émission de 40 g de CO₂ en Suède, 90 g en France, 600 g en Allemagne et 1,08 kg au Luxembourg.

Comparer les émissions de CO₂ pour 100 km parcourus dans chacun de ces pays avec une Fluence ZE et une Fluence diesel.

8. CO₂ émis par la combustion du gaz naturel

Le PCI du gaz naturel (CH₄) étant de 803 kJ/mole, calculer le nombre tonne de CO₂ émise par tonne équivalent pétrole (tep) de gaz naturel brûlée.

9. CO₂ émis par la combustion du charbon

En 2012, la planète a consommé 7,86 Gt de charbon, ce qui correspond à 3,845 Gtep.
En déduire le contenu énergétique moyen d'une tonne de charbon.

En supposant que le charbon est constitué uniquement de carbone (32,5 GJ/t) et d'éléments minéraux neutres, déterminer le % de carbone moyen du charbon et en déduire les émissions de CO₂ associées à la combustion d'une tonne équivalent pétrole de charbon.

En fait, le charbon contient environ 0,6 atome d'hydrogène par atome de carbone, le reste étant constitué d'éléments minéraux neutres. Le PCI de l'hydrogène est de 120 GJ/t et on négligera l'énergie de la pyrolyse. En déduire les émissions de CO₂ associées à la combustion d'une tonne équivalent pétrole de charbon.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse

1.1 Chauffage au bois buche

Calculer la masse d'air qu'il faut introduire dans une chaudière pour brûler 1 kg de bois.

-En supposant la combustion stoechiométrique.

-En considérant un coefficient d'excès d'air de 1,25 pour assurer une combustion complète.

Quel serait le PCI des produits issus de la pyrolyse/gazéification du bois si l'intégralité des atomes de carbone et d'hydrogène se trouvaient décomposés sous forme de carbone solide et de molécules de dihydrogène (PCI du carbone pur : 32,5 MJ/kg, PCI du dihydrogène : 120 MJ/kg). En déduire l'énergie de pyrolyse/gazéification du bois en prenant comme référence le PCI d'un bois sec (4500 kWh/t).

On suppose maintenant que la pyrolyse/gazéification du bois a lieu grâce à la combustion des braises, constituées de carbone pur. En déduire la masse d'air primaire, en $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{bois}}$ et l'exprimer en fraction de la masse totale d'air (avec un coefficient d'excès de 1,25).

- en supposant que le bois est parfaitement sec.

- en supposant que le PCI du bois n'est que de 4500 kWh/tonne

On veut chauffer une maison de 150 m² à Nancy. Le besoin thermique de la maison est en moyenne de 5 kW pour 232 jours de chauffe entre le 1^{er} octobre et le 20 mai. Quelle devra être la puissance moyenne de chauffe si on estime le rendement de la chaudière égal à 0.8 ? Quelle est sera la consommation d'énergie primaire sur une année ?

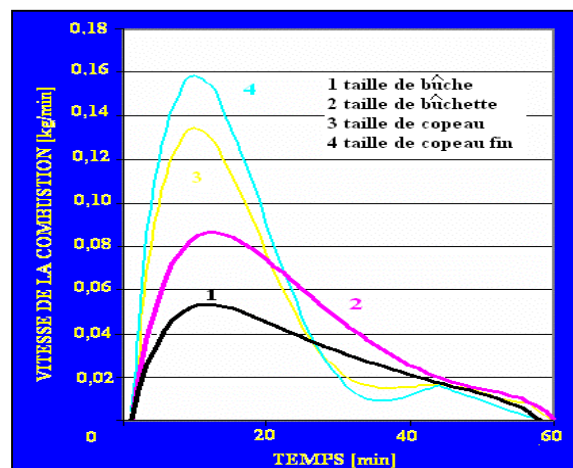
Pour fournir l'énergie de chauffage, on brûle des bûches de chêne de classe H1. Combien de stères utilise-t-on pour l'année ? (compter jusqu'à 90 € le stère pour du bois NF de classe H1, groupe 1, livré en petites bûches sur palettes). Et combien de stères de peuplier (à 70€) ?

La cinétique moyenne de combustion des bûches de petite taille est d'environ 0,04 kg/min. On considérera une masse volumique de 700 kg/m³ pour le chêne ainsi qu'une longueur de 0,33 m et un diamètre de 0,15 m pour les bûches (1 stère de chêne pèse environ 450 kg).

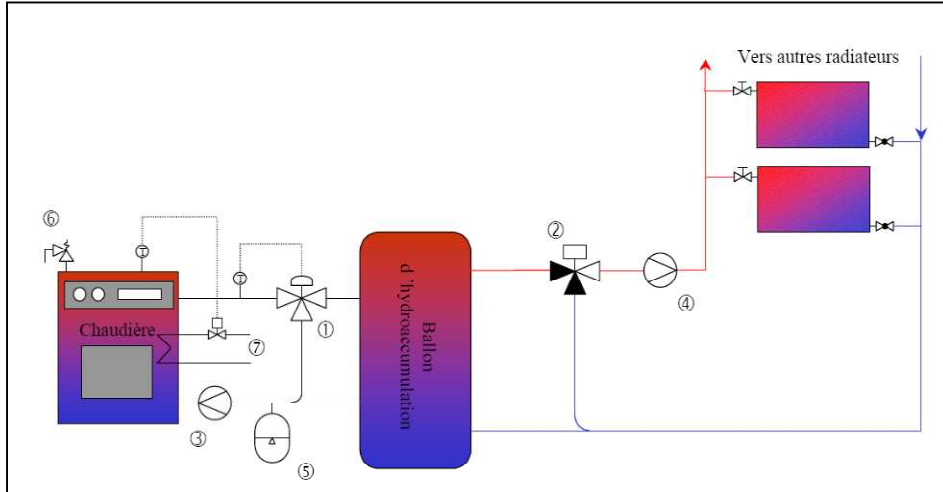
Quel est le temps nécessaire pour la combustion d'une buche ?

Calculer alors la puissance (nette) dégagée pendant la combustion d'une buche.

Combien de buches consomme-t-on en moyenne par jour ?



Pour réduire la fréquence d'approvisionnement de la chaudière, on décide d'utiliser des ballons tampon d'eau chaude placés entre la chaudière et le réseau de chauffage central. En partant sur un objectif de 2 ravitaillements de chaudière en moyenne, à quelle énergie thermique devrait correspondre le volume de stockage de l'eau ? (on considérera un ΔT utile de 30°C). Déterminer le volume des ballons.



*Composition du bois (en masse) : 51 % de carbone ; 42 % d'oxygène ; 6 % d'hydrogène.
1 % de cendre.*

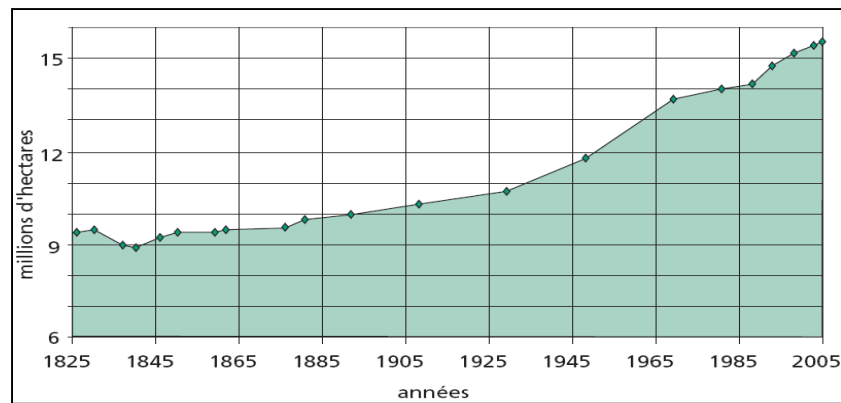
1.2 Chauffage au bois bûche, granulés ou fioul ?

Comparer la densité énergétique volumique du bois bûche (400kg/stère – PCI de 4200kwh/t), des granulés de bois (densité comprise entre 0,65 et 0,7 – PCI de 5 kWh/kg) et du fioul (densité de 0,84 et PCI de 42 MJ/kg). On considère une maison de 120m² moyennement bien isolée. Déterminer la consommation en énergie primaire, le volume de stockage du combustible et le coût annuel pour :

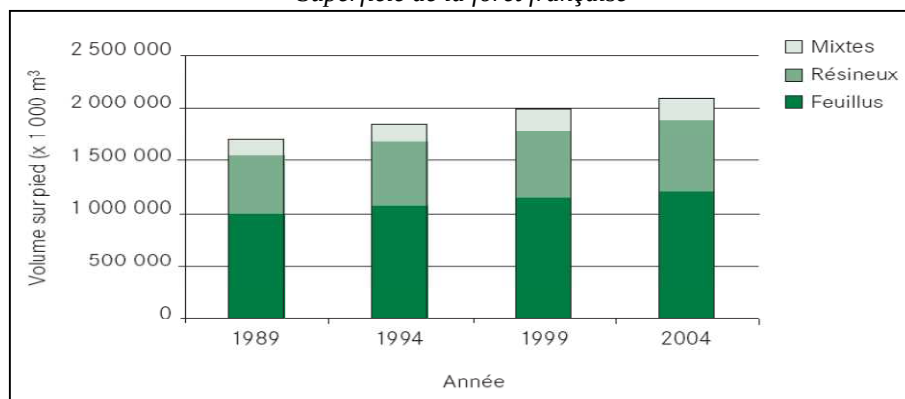
- Un chauffage au bois en bûches, avec un rendement de chaudière de 0,7 et un coût de 70 € par stère NF de catégorie 1 et de classe H1.
- Un chauffage au bois sous forme de granulés avec un rendement de chaudière de 0,85 et un coût de 220 € TTC la tonne + 25 € de livraison (2 tonnes minimum !).
- Un chauffage au fioul avec un rendement de chaudière de 0,9 et un coût de 90 €/hl.

1.3 Potentiel de la forêt française

La forêt française s'accroît régulièrement en surface et en volume : elle occupe 16,1 Mha en 2009 (rappel → SAU = 29 Mha), soit 29 % du territoire national, ce qui représente un volume de 2,4 milliards de m³ de bois sur pied.



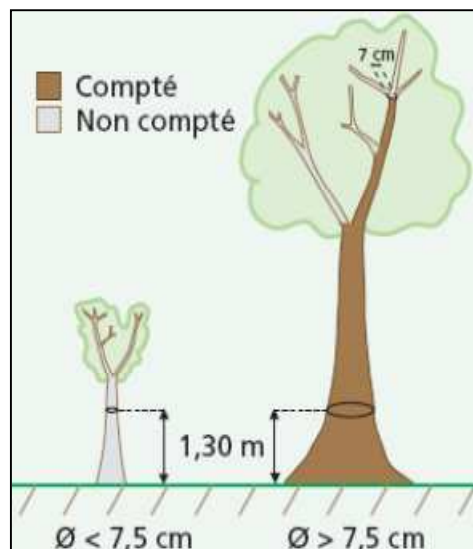
Superficie de la forêt française



Volume sur pied total de bois dans les forêts françaises

Ces 2,4 milliards de m³ de bois sur pied produisaient environ 88,3 Mm³/an en 2002 (91,2 Mm³/an avec les peupleraies) dont environ 70 % sont prélevés. Le reste participe à l'accroissement du capital forestier, qui augmente de plus de 1 % par an.

Le volume sur pied est comptabilisé de façon très précise et standardisée. Il ne prend pas en compte les rémanents, ni même la totalité du bois qui sera réellement exploité.



Le gisement énergétique constitué par les rémanents pourrait être très important : de l'ordre de 7,3 Mtep au total pour la France mais les bonnes pratiques concernant leur exploitation ne sont pas encore clairement définies.

Sur $\approx 60 \text{ Mm}^3$ prélevés chaque année, seuls $\approx 38 \text{ Mm}^3$ sont commercialisés, dont :

- ♦ $\approx 24 \text{ Mm}^3$ pour le bois d'œuvre.
- ♦ $\approx 12 \text{ Mm}^3$ pour l'industrie.
- ♦ $\approx 3 \text{ Mm}^3$ pour le bois de chauffe.

L'ADEME affirme en revanche que les 9 Mtep annuelles fournies par le bois proviennent de $35 \text{ Mm}^3/\text{an}$:

- ♦ $20 \text{ Mm}^3/\text{an}$ d'origine forestière $\rightarrow$ par conséquent, dont $\approx 17 \text{ Mm}^3/\text{an}$ hors circuits commerciaux classiques.
- ♦ $15 \text{ Mm}^3/\text{an}$ issus de sous-produits de l'exploitation forestière et de l'exploitation rurale.

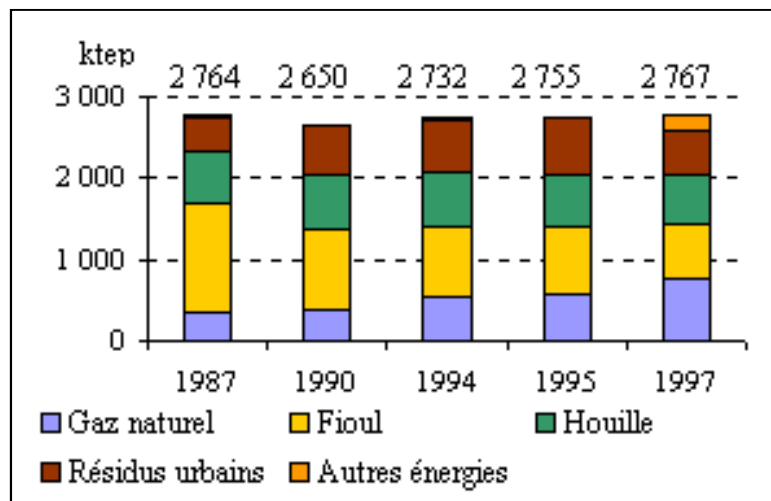
Calculer la valeur énergétique moyenne d'un m^3 de bois sur pied. Quel pourrait être le potentiel total de la forêt française, si :

- Le taux de prélèvement atteint 100 %,
- Les rémanents sont exploités à 80 %.

Quel serait alors le rendement moyen en tep/ha/an ?

1.4 Chauffage au bois collectif et à la campagne

En France, 450 réseaux de chaleur alimentent environ 2,1 millions d'équivalents logements et consomment entre 2,5 et 3 Mtep d'énergie primaire. Ces réseaux de chaleur utilisent en moyenne 30 % d'énergies renouvelables. Ils fournissent 2/3 de l'énergie pour des usages résidentiels, 1/3 pour l'activité tertiaire.



Mix énergétique des réseaux de chaleur en France

La France compte environ 15 millions de ruraux (communes de moins de 2000 ha) et la consommation totale de chauffage du pays représente 42 Mtep/an.

Combien de Mtep de bois faudrait-il mobiliser pour chauffer tous les ruraux et alimenter tous les réseaux de chaleur ?

1.5 Tallis à croissance rapide

Déterminer les rendements énergétiques bruts (en tep/ha/an) des TCR en prenant des hypothèses basse (8 t/ha/an à 14 GJ/t), haute (15 t/ha/an à 18 GJ/t) et moyenne (11t/ha/an à 16 GJ/t) .



1.6 Feu de paille

Déterminer le rendement électrique de la centrale chinoise produisant 130 millions de kWh par an, pour une consommation annuelle comprise entre 150 000 à 200 000 tonnes de paille. On supposera que le PCI de la paille est de 13 GJ/t.

Donner un ordre d'idée des émissions de carbone évitées si on suppose que des centrales au charbon qui auraient permis de produire cet électricité ont un rendement équivalent à celles utilisant la paille (pour un total 6 Mt de paille).

La houille : PCI compris entre 26 et 30 GJ/t pour une teneur en carbone d'environ 80%.

1.7 Le miscanthus pour faire du ciment

En supposant qu'une plantation de miscanthus produise 12t/ha/an et que son pouvoir calorifique soit de l'ordre de 4000 kWh/t, quel serait le rendement énergétique brut en tep/ha/an de la culture énergétique ? On produit en France 22 Mt de ciment par an ($\cong$ 1 % de la production mondiale), chaque tonne nécessitant environ 100 kg de pétrole. Quelle serait la surface à planter en miscanthus si on voulait alimenter la totalité des cimenteries ?

1.8 Agrodiesel

On produit dans le monde environ 110 Mt de corps gras animaux et végétaux dont 100 Mt d'huiles végétales. Cette production d'huiles végétales repose à 90 % sur 6 espèces (*soja*, *palme*, *colza*, *tournesol*, *arachide*, *coton*) et à plus de 70 % sur les trois premières. Quel est le contenu énergétique de la production mondiale d'huiles végétales ?

PCI d'une huile : environ 37 MJ/kg.

Quel est le contenu énergétique de la production mondiale d'agrodiesel (21 GL)?

PCI d'un EMHV : environ 33 MJ/l

1.9 Chaudière à bois à condensation

On rappelle la composition moyenne massique du bois sec (sans eau liquide) : 51 % de carbone, 42 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène. Le PCI est alors de 18 MJ/kg.

Déterminer la masse de vapeur d'eau formée lors de la combustion d'1 kg de bois sec.

Quelle serait la chaleur supplémentaire que l'on récupérerait en condensant toute cette vapeur d'eau ? (en valeur absolue et en % du PCI initial.) La chaleur latente de condensation de l'eau vaut environ 2400 kJ/kg.

En pratique, on brûle le plus souvent du bois contenant 20 % en masse d'eau liquide. Le PCI se situe alors aux alentours de 14,5 MJ/kg. Quelle est alors la masse d'eau formée lors de la combustion ? Quelle serait la chaleur supplémentaire que l'on pourrait récupérer en condensant toute cette vapeur ? (en valeur absolue et en % du PCI initial)

Et pour une chaudière industrielle conçue pour brûler des plaquettes forestières dont le PCI est donné égal à 11 MJ/kg et le contenu en eau liquide de 40 % ?

2. L'hydraulique

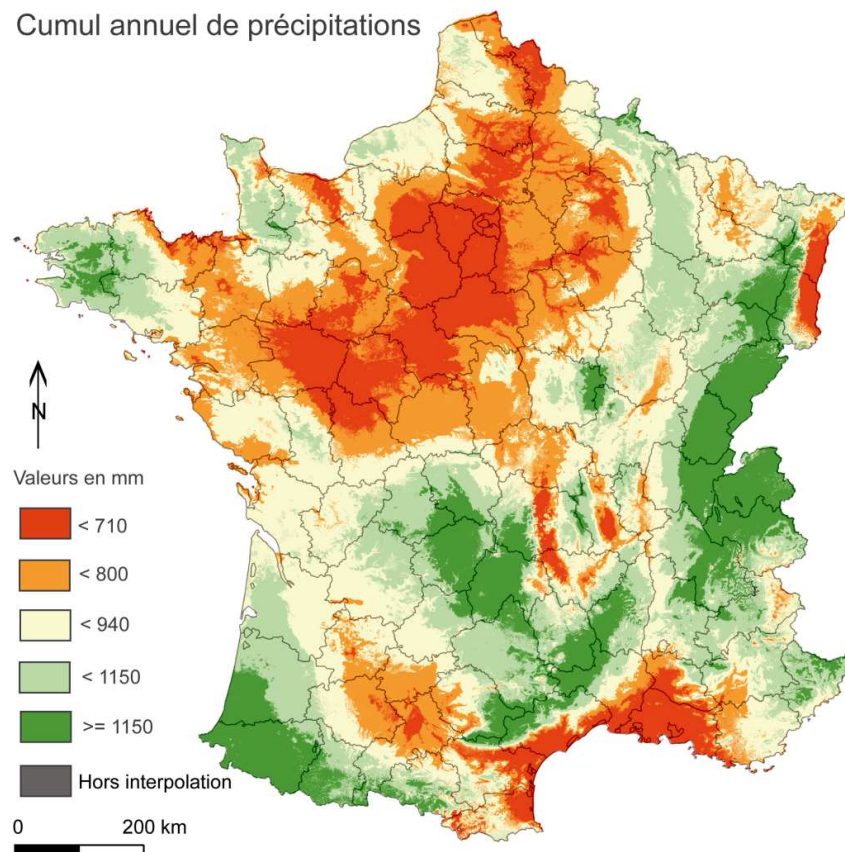
2.1 Quelle quantité d'eau pour produire 1 kWh d'électricité ?

En supposant un rendement de conversion de 90% quelle quantité d'eau est nécessaire à la production d'un kWh d'énergie électrique dans les cas suivants :

- Barrage de Tigne : 233m de hauteur de chute.
- Barrage des Trois Gorges : 113m de hauteur de chute.
- Centrale au fil de l'eau de Fessenheim : 16m de hauteur de chute.

Quel volume d'eau est nécessaire pour satisfaire la consommation annuelle d'électricité d'une ville comme Nancy (100 000 hab). Une piscine olympique : 2500m³.

Quelle surface de collecte des eaux cela représente-t-il sachant que 61 % de l'eau de pluie s'évapore, 16 % ruisselle et rejoint les cours d'eau et 23 % s'infiltre et alimente les nappes et rivières souterraines.

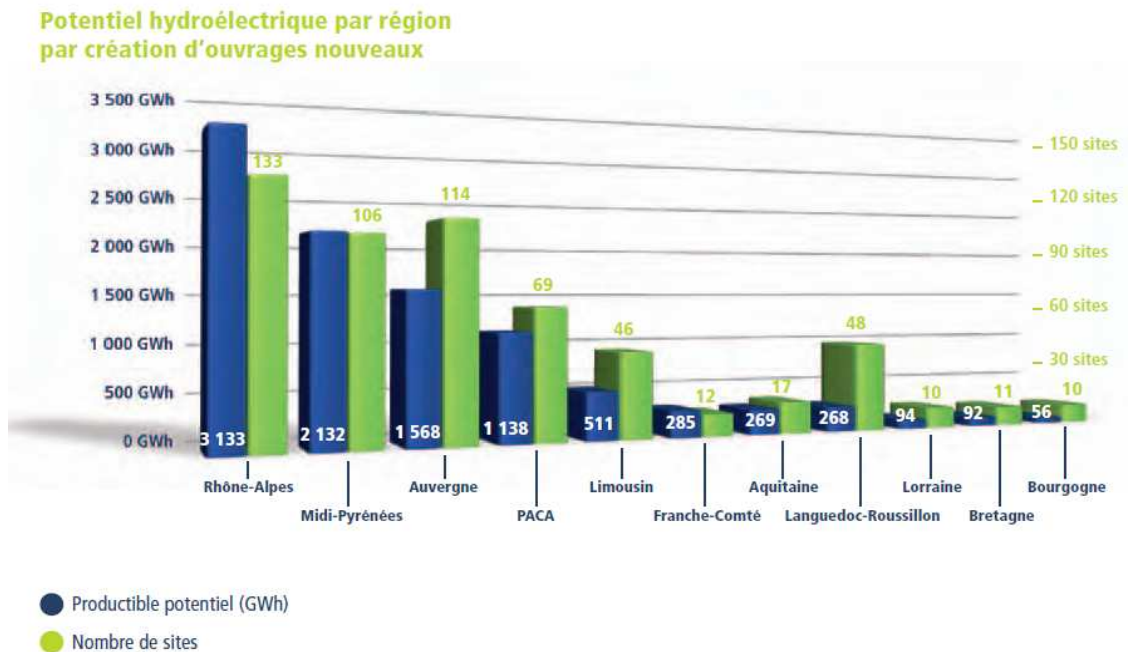


2.2 Usine hydro-électrique de Fessenheim

L'usine hydro-électrique de Fessenheim est située sur le Grand Canal du Rhin. La hauteur de chute est en moyenne de 16 m et le débit moyen de 1350 m³/s. Quelle est la puissance électrique moyenne qu'il est possible de produire en supposant que tout le débit du Rhin est turbiné et que le ou les groupes installés ont un rendement α égal à 90%. En pratique, cette usine produit en moyenne 1030 GWh/an. Quel est le débit moyen turbiné (en supposant la hauteur de chute constante) ?

2.3 Puissance moyenne des installations hydraulique

D'après l'Union Française de l'Electricité, on pourrait produire 10 TWh/an supplémentaires grâce à l'aménagement de 575 sites. Quelle serait environs la puissance moyenne de ces installations ?



2.3 Superficie des barrages de retenue

Le principal reproche qui est fait à l'hydroélectricité concerne la superficie parfois très importante des zones à inonder. On cherche à savoir l'énergie que l'on pourrait récupérer en remplaçant une retenue par des cellules photovoltaïques dont les propriétés seraient les suivantes : 10 m²/kWc et taux d'utilisation moyen annuel de 10%.

Déterminer l'énergie électrique que l'on produirait avec une superficie équivalente de PV dans le cas :

- du barrage de Roselend : 1TWh/an – 3,2 km²,
- du barrage de Serre-Ponçon : 0,76 TWh/an – 28,2 km²,
- du barrage des Trois Gorges : 87 TWh/an et 1000 km²,
- du barrage de Guri : 47 TWh/an et 4250 km².

2.4 Barrage des Grands Moulins

Le barrage des Grands Moulins situé sur la Meurthe entre Nancy et Malzéville est utilisé pour réguler le débit et la hauteur du cours d'eau. On veut estimer la puissance et la quantité d'énergie qu'il serait possible d'obtenir en y installant une usine hydroélectrique. Pour cela, on dispose des données suivantes :

- Hauteur de chute : 10 m.

- Débit moyen annuel : 40 m³/s.
- Débit mini en été : 15 m³/s.
- Débit maxi en hiver (hors crue) : 60 m³/s.

On supposera que le ou les groupes installés ont un rendement α égal à 90%.

On demande :

- Les puissances électriques mini, moyenne et maxi qu'il serait possible d'obtenir en installant des groupes adaptés aux débits de la Meurthe. On suppose que la totalité du débit de la rivière est turbiné.

- Quel type de turbine installe-t-on dans ce cas là : Kaplan, Francis ou Pelton ?

- Quelle serait la quantité d'électricité produite annuellement si on considère que la totalité du débit moyen est turbiné ?

- On considère qu'un TWh correspond à la consommation annuelle de 370000 ménages. Il y a en moyenne 2,31 personnes par ménage. Combien de personnes le barrage des Grand Moulins pourrait-il -en moyenne- fournir en électricité ? (La ville de Nancy compte environ 100000 habitants et l'agglomération 300000.)

- Par comparaison, déterminer la quantité d'électricité produite par la centrale de Blenod-lès-Pont-à-Mousson si on suppose que les 3 tranches de 250 MW fonctionnent à pleine puissance toute l'année ?

- Combien de personnes la centrale de Blenod-lès-Pont-à-Mousson peut-elle fournir en électricité ? (La Meurthe et Moselle compte environ 730000 habitants et la Lorraine 2350000.)

3. Le solaire

3.1 Eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire est estimée à 50 l par jour et par personne. On peut supposer que cette eau doit être portée à 60°C et qu'elle est puisée à 10°C. En supposant que le solaire couvre 70 % des besoins en ECS, que représenterait la consommation énergétique associée pour la France ? Quelle serait la surface de capteurs à installer en supposant un rendement de 1 ou 0,5 ?

D'après les chiffres donnés sur le tableau ci-dessous, quel est le rendement moyen des capteurs solaires ?

Quel est leur taux d'utilisation ? (En nombre d'heures équivalent pleine puissance et en %.)

	Allemagne	Autriche	Grèce	France	Europe (27)
Parc installé	9030 MWth	3031 MWth	2853 MWth	1396 MWth	22786 MWth
	12,9 Mm²	4,3 Mm ² -	4,1 Mm ²	2,0 Mm ²	32,5 Mm ²
Croissance annuelle	14 %	9 %	5 %	15 %	14 %
	11 15 MWth	256 MWth	144 MWth	230 M Wth	2819 MWth
Production réelle (conventions F)	1,6 Mm²	0,37 Mm ²	0,21 Mm ²	0,21 Mm ²	4,0 Mm ²
	0,52 Mtep (est.)	0,17 Mtep (est.)	0,16 Mtep (est.)	0,081 Mtep	1,31 Mtep (est.)

Sources : EurObserv'ER 2010, Observatoire de l'Énergie et estimations.

Quel est le cout annuel associé à la production d'eau chaude pour une famille de 4 personnes dans les cas suivants :

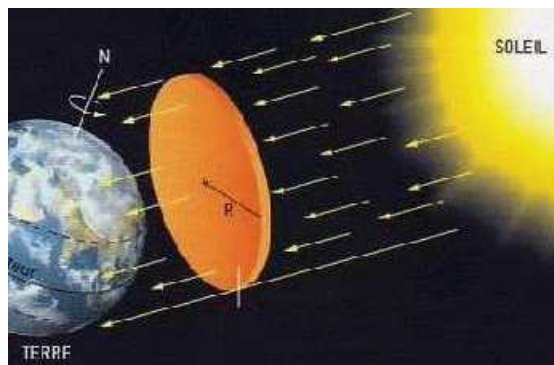
- Production instantanée par un chauffe eau électrique (15 c€/kWh)
- Production par un ballon électrique en heures creuses (10 c€/kWh)

- Production par un ballon au gaz (7 c€/kWh)
- Production par une pompe à chaleur en heure creuse de coefficient de performance 3.
- Production par une chaudière au bois buche (4 c€/kWh)

L'investissement nécessaire à la production de 70% de l'eau chaude sanitaire pour une famille de 4 personnes par un chauffe eau solaire est estimé à 4000 €. Calculer le temps de retour sur investissement pour chacun des cas précédents.

3.2 Constante solaire

Retrouver la valeur de la constante solaire (flux de chaleur échangée entre le soleil et la terre) à partir de la loi de Stefan-Boltzmann. Rayon du soleil : 695 600 kilomètres. Température de surface du soleil : 5800K. Distance Soleil-terre : 150 millions de km.



3.3 Rayonnement solaire

Utiliser le tableau ci-dessous pour vérifier que la densité de puissance rayonnée dans le domaine spectral $0,5 \times \lambda_m < \lambda < 8 \times \lambda_m$ correspond bien à 98 % de la densité de puissance totale. En supposant que le soleil est un corps noir de température $T = 5800 \text{ K}$, déterminer le domaine d'émission de la puissance solaire.

Déterminer la fraction de la puissance du soleil émise dans le domaine visible (de 400 nm à 800 nm).

Quelles sont les bandes d'émission d'objets chauffés à 30°C et à 100°C si on suppose qu'ils se comportent comme des corps noirs ?

Déterminer la densité de puissance rayonnée par ces différents objets.

Quel serait l'ordre de grandeur de la température d'équilibre d'un corps noir (qui échange uniquement par rayonnement) lorsque l'**éclairement solaire** est de 1000 W/m^2 ?

$\lambda T \text{ en } \mu\text{m} \cdot \text{K}$	1449	2320	$2898 = \lambda_m T$	4108	4640	6149	14500	23220
$F_{0 \rightarrow \lambda}$	1 %	12 %	25 %	50 %	59 %	75 %	97 %	99 %

Loi de Wien pour un corps noir : $\lambda_m T = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$

3.4 Capteur solaire thermique

On veut installer des capteurs solaires à Nancy pour produire de l'Eau Chaude Sanitaire à 50°C . Les données météo indiquent une température moyenne annuelle de 10°C , pour l'air

comme pour l'eau. On supposera que les capteurs sont éclairés en moyenne *4,2 heures* par jour tandis que leurs coefficients *B* et *K* valent respectivement *0,72* et *4,18 W/m²/K*. La température moyenne dans l'absorbeur est supposée égale à **60°C**, l'éclairement moyen annuel est de **1130 kWh/m²** par an pour des capteurs inclinés de **60°** par rapport à l'horizontale.

Déterminer le rendement moyen des capteurs ainsi que la productivité annuelle par m² de capteur installé.

Déterminer le taux de couverture moyen annuel pour une consommation de **150 l/jour**, par **m²** de capteur et pour **5 m²**.

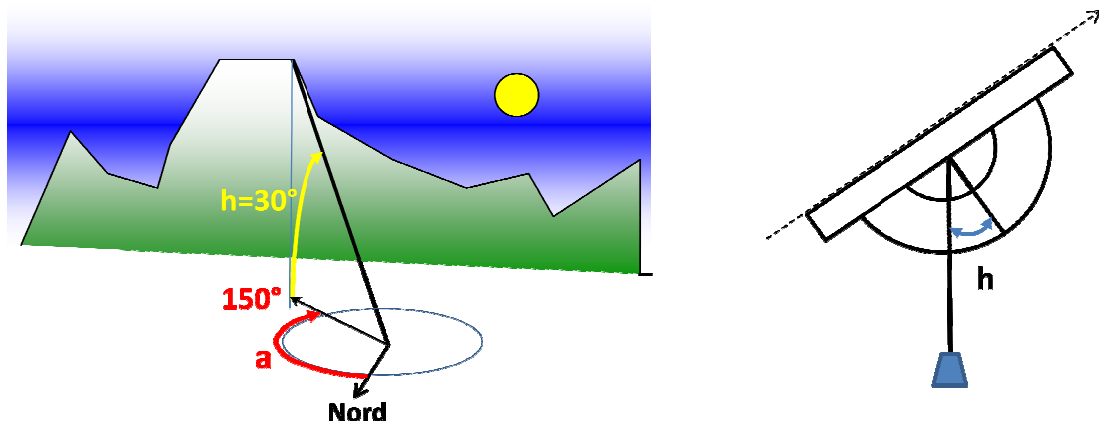
Le ballon de stockage de **300 litres** est donné pour un taux de fuite thermique de **0,1 Wh/l/jour** (dans un local à 10°C en moyenne). Estimer l'énergie supplémentaire nécessaire pour contrer les pertes du ballon, est-ce important ?

Rappel : le rendement d'un capteur thermique est donné en fonction des coefficients B et K :

$$\eta = B - K \frac{T_m - T_a}{W}$$

3.5 Les masques

Lorsque l'on veut utiliser l'énergie solaire à un endroit, il faut non seulement connaître l'ensoleillement du capteur, mais aussi déterminer si des éléments tels que les montagnes, les bâtiments les arbres ou autres vont faire de l'ombre. Il faut donc relever les masques à l'endroit où l'on désire implanter l'installation solaire. Pour cela, il faut se munir d'une boussole et d'un **clinomètre** et relever la hauteur angulaire et l'azimut de tous les obstacles potentiels.

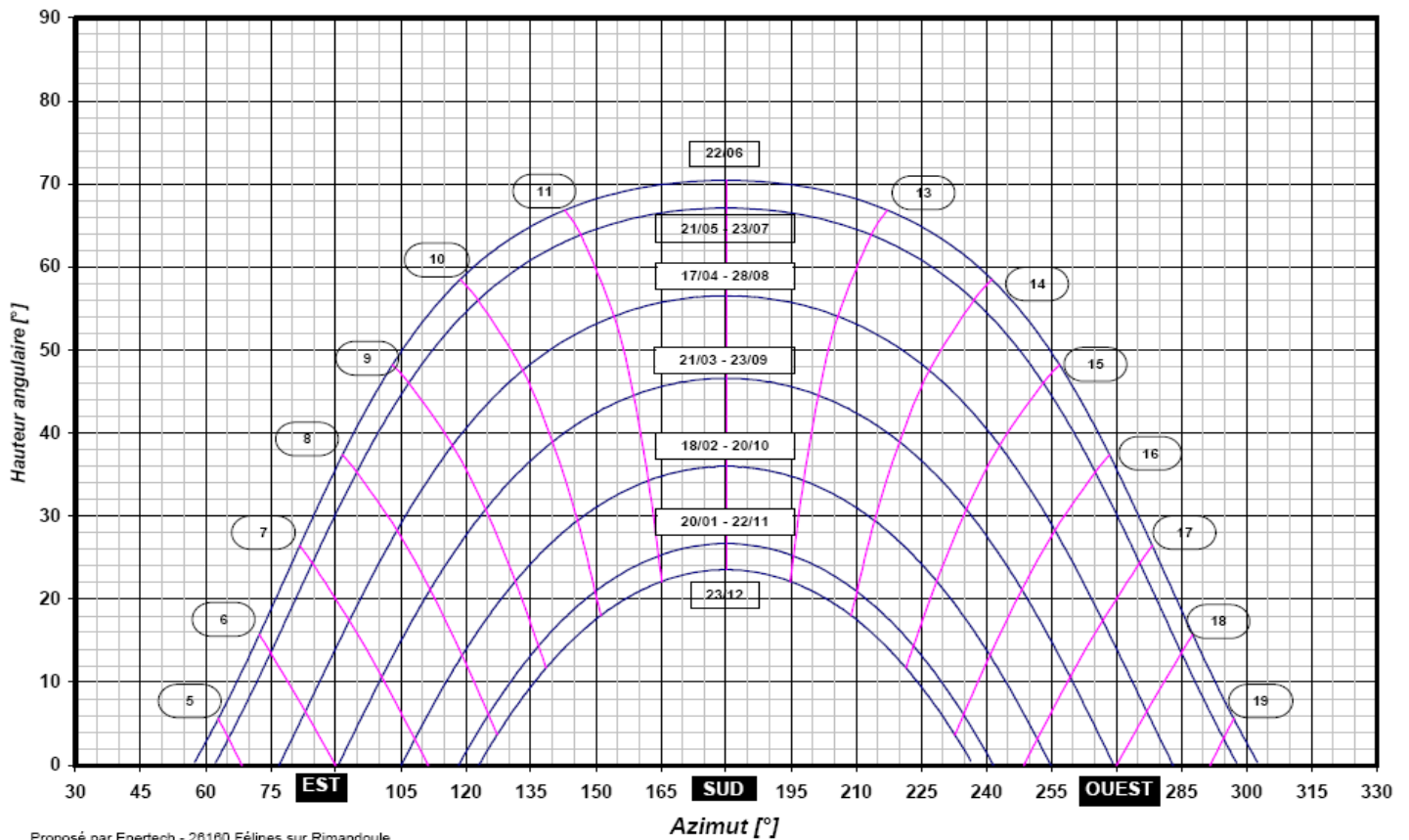


Ces données, une fois reportées sur un graphe représentant la projection de la course fictive du soleil à l'endroit du site, permettront de déterminer les heures de lever et de coucher du soleil en fonction de la saison.

Reporter sur le graphe de la trajectoire du soleil les mesures de masques relevées sur le site d'implantation de capteurs solaires. Donner la durée d'ensoleillement le 21 mars

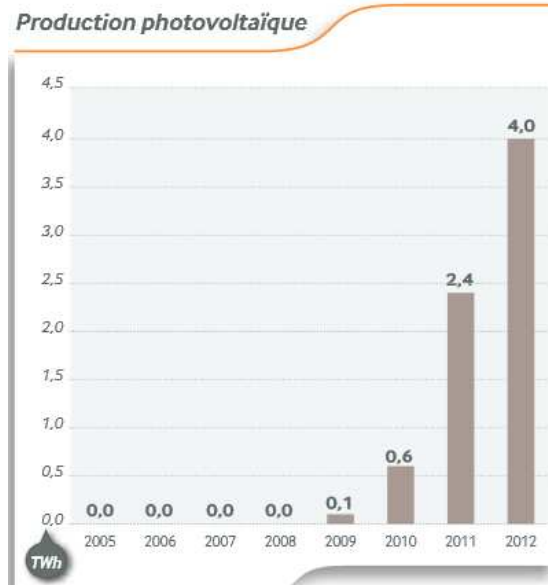
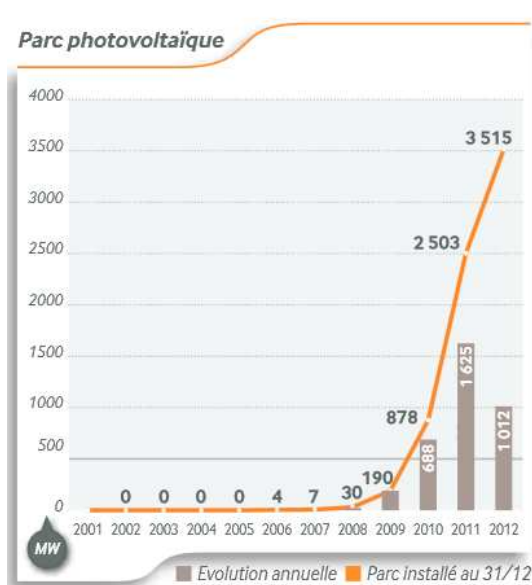
Azimut	45	75	105	120	145	180	210	225	255
Hauteur	0	14	20	30	20	26	20	10	0

TRAJECTOIRES DU SOLEIL (Latitude = 43 °N)



3.6 Facteur de charge du photovoltaïque

A partir des données suivantes fournies par RTE, calculer les facteurs de charges pour le photovoltaïque en France en 2009, 2010, 2011, 2012. Comment expliquer les différences ?



3.7 Autosuffisance électrique d'une famille de 4 personnes

La consommation annuelle d'une famille française de 4 personnes en énergie électrique est de 6800 KWh. Cette famille souhaiterait devenir auto-suffisante pour l'électricité sans changer de mode de vie. En supposant que le rendement de stockage-déstockage de l'énergie électrique dans des batteries est de 80%, calculer la surface de panneau à installer (module de 12%) pour une famille vivant à Nancy et à Marseille.

Calculer le cout de l'investissement sachant qu'il faut 2kWh de batterie par kWc de photovoltaïque. Cout du système de stockage : 1500€/kWh. Cout des panneaux, de l'onduleur et de la main d'oeuvre : 2€/Wc.

En supposant que le prix de l'électricité distribué par EDF reste stable (15c€/kWh), la famille aura-t-elle gagné de l'argent au bout d'un temps de 25 ans (durée de vie des panneaux) ?

3.8 Refroidissement actif des panneaux ?

Un jour de juillet à 14h30, les panneaux d'une installation photovoltaïque de 3kWc sont orientés parfaitement perpendiculairement aux rayons du soleil. Le temps est clair, le flux solaire à la surface des panneaux vaut alors 1000W/m². La puissance électrique produite, mesurée par l'onduleur (rendement de 95%) est de 2400 W. Pourquoi n'obtient-on pas 3000 W de puissance électrique ? Calculer la température des panneaux sachant que la perte de puissance en fonction de la température est de 0.4% / °C. L'eau du réseau est fraîche (température de 15°C). Quel débit d'eau doit être utilisé pour maintenir la température des panneaux inférieure à 25°C (on supposera un échange de chaleur parfait entre l'eau et les panneaux et que les panneaux sont assimilables à des corps noirs) ? Le prix du m³ d'eau à Nancy est de 3.5 €/m³. Est-ce que cette opération de refroidissement est rentable économiquement ? Le prix de revente à EDF du kWh électrique est de 58c€/kWh.

3.9 Productivité moyenne du photovoltaïque

Il est assez difficile de déterminer la productivité moyenne des équipements photovoltaïques en France car la puissance installée varie considérablement d'une année à l'autre : par exemple, elle était d'environ 1,15 GWc fin 2010 et de 2,65 GWc fin 2011. Cependant, on pourra considérer que la puissance moyenne installée en France en 2011 était de 1,9 GWc. Ces 1,9 GWc ont produit environ 2 TWh en 2011.

On demande :

- Le taux d'utilisation des panneaux photovoltaïques, c'est-à-dire la puissance moyenne fournie sur l'année en MW/MWc (ou en W/Wc).
- L'ADEME indique que la puissance solaire reçue sur le territoire français est en moyenne de 1300 kWh/m²/an. En supposant un rendement moyen des panneaux de l'ordre de 14%, évaluer la surface installée en m².
- Dans les zones les plus chaudes de la planète, la puissance annuelle reçue atteint ou dépasse facilement 2000 kWh/m²/an. L'Algérie par exemple consomme environ 50 TWh d'électricité chaque année, produite à 95% à partir de gaz naturel. Quelle surface de panneaux solaires photovoltaïque faudrait-il installer en Algérie pour produire la totalité de l'électricité

consommée dans le pays ? (On ne tiendra pas compte des pertes liées au stockage/déstockage.)

3.10 Station-service → équivalent en surface de panneau PV

La consommation d'énergie fossile dans les transports représente actuellement, en France, environ 50 Mtep par an. Cette énergie est distribuée dans 4500 station-service. On se projette dans le futur en imaginant qu'il n'existe plus que des véhicules électriques à batteries, dont le rendement énergétique (global, en tenant compte du cycle de charge) serait 3 fois meilleur que celui des moteurs à combustion interne de puissance équivalente.

Quel seraient alors ?

- La quantité d'énergie moyenne (en kWh) distribuée chaque jour par chaque station service.
- La surface de panneaux photovoltaïques permettant de la produire (en plein été, au sud de la France).

Retour en 2011 : un particulier décide d'acheter un véhicule électrique pour ses trajets quotidiens domicile-travail. Il fera 50 km/jour et la consommation électrique de sa voiture est d'après le constructeur, de 20 kWh/100 km. Afin d'être auto-suffisant énergétiquement, il décide d'installer des panneaux photovoltaïques sur son toit afin de produire l'énergie nécessaire ; pendant la journée, l'électricité sera stockée dans un deuxième jeu de batteries, puis transférée dans le véhicule pendant la nuit.

- Quelle serait la surface de panneaux photovoltaïques permettant de produire l'énergie nécessaire ?

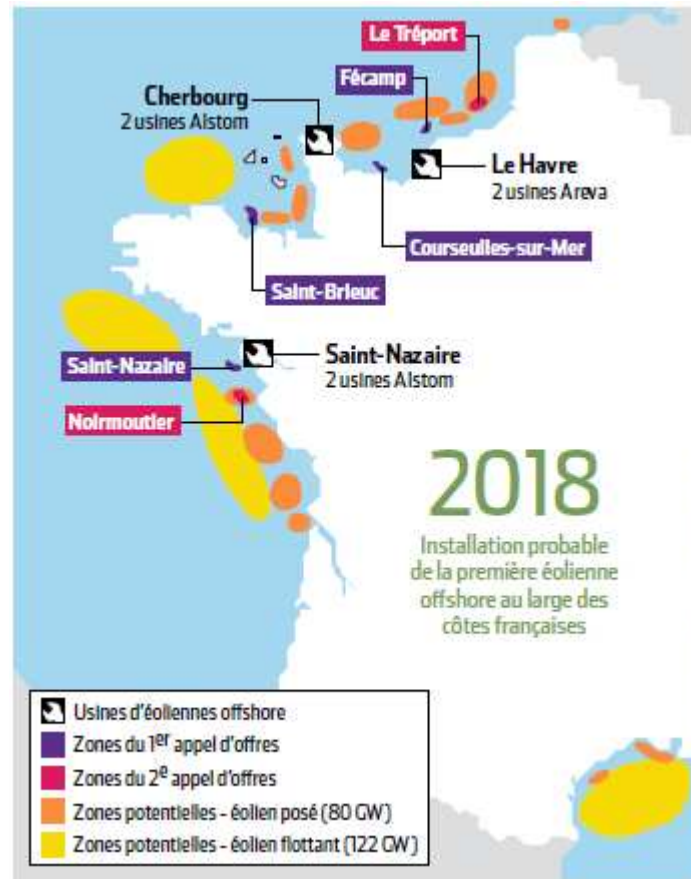
On utilisera les valeurs numériques suivantes :

- 1 tep = 42 GJ.
- Irradiation journalière des panneaux : 7 kWh/m² en été.
- Rendement des panneaux photovoltaïques et du système de conversion électrique : 15%.
- Rendement d'un cycle de charge/décharge d'une batterie au lithium : 75%.

4. L'éolien

4.1 Potentiel éolien offshore en France

Une éolienne de 5MW de puissance nominale produit 10 GWh/an d'énergie électrique à terre et 15 GWh/an offshore. Calculer les facteurs de charge. Quel est le potentiel offshore Français (en TWh/an) en considérant l'éolien posé et flottant ? Comparer à la consommation nationale actuelle.



Potentiel éolien offshore de la France

4.2 Comparaison d'un investissement à terre et offshore

On souhaite investir une somme 1M€ dans le secteur éolien. Comparer les deux investissements suivant :

-à terre : 1000 €/kW, facteur de charge de 20%, frais de maintenance& assurance de 1% de l'investissement initial.

-offshore : 1500 €/kW, facteur de charge de 33%, frais de maintenance & assurance de 2.5% de l'investissement initial.

Prix de vente de l'électricité supposé constant de 8 ct€/kWh

4.3 Dimensionnement d'un mat

La variation de la vitesse du vent avec l'altitude est généralement donnée par une loi de puissance :

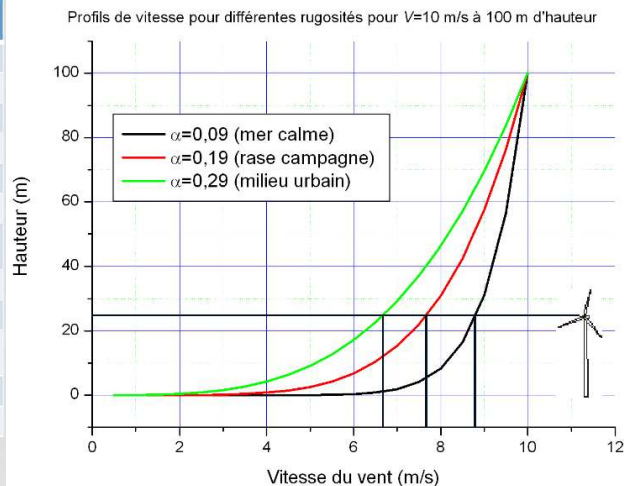
$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

- v : vitesse du vent à l'altitude H
- H_0 : altitude pour laquelle la vitesse du vent est connue
- v_0 : vitesse du vent connue à l'altitude H_0
- α : coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent

Le coefficient de gradient vertical α dépend de la nature du sol :

Topographie du lieu	Coefficient α
Glace	0,07
Neige sur sol plat	0,09
Mer calme	0,09
Littoral avec brise de mer	0,11
Herbe coupée	0,14
Prairie à herbe courte	0,16
Cultures, prairie à herbe haute	0,19
Haies	0,21
Arbres et haies épars	0,24
Arbres, haies, quelques bâtiments	0,29
Banlieues	0,31
Bois	0,43

Valeurs du coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent en fonction de la topographie (source : wind power)



On dispose de deux sites pour lesquels la vitesse moyenne du vent à 100m d'altitude est de 10m/s : un site en forêt et un site en pâturage. Le modèle d'aérogénérateur dont on dispose possède un optimum de performance pour une vitesse de vent moyenne de 7m/s. Quelle hauteur de mât faut-il envisager dans les deux cas ?

4.4 Potentiel de l'éolien en haute altitude

Calculer les dimensions d'une éolienne volante positionnée à 8000m d'altitude (vent de 100 km/h, facteur de charge de 90%) qui fournirait la même quantité d'énergie électrique qu'une éolienne à terre de 100m de diamètre (vent de 8 m/s, facteur de charge de 20%). Les coefficients de performance sont supposés égaux dans les deux cas à 0.4.

4.5 Facteur de charge des éoliennes en europe

En termes de puissance installée, les éoliennes permettent d'atteindre des fractions relativement importantes du total d'un pays ; en revanche, leur taux d'utilisation reste relativement faible, pour plusieurs raisons :

- La source d'énergie est intermittente.
- La plage d'utilisation des aérogénérateurs est limitée.
- Inadéquation temporelle entre la production et la demande d'électricité.
- Inadéquation géographique.

Déterminer le taux d'utilisation moyen (en % de la puissance installée) des éoliennes dans les différents pays ci-dessous :

Pays	Puissance installée	Energie produite
France (2010)	5165 MW	9,4 TWh
Allemagne (2009)	25777 MW	37,5 TWh
Espagne (2009)	19149 MW	37,77 TWh
Danemark (2009)	3482 MW	6,72 TWh

4.6 Retours sur investissement et taux d'intérêt équivalents.

Déterminer le retour sur investissement après 20 ans de fonctionnement (leur durée de vie) des installations suivantes ainsi que le taux d'intérêt de placements équivalents. Dans les deux cas, on supposera que les tarifs d'achat restent constants, que les frais de fonctionnement sont nuls et :

- que les gains ne sont pas placés, ou bien,
- qu'ils sont placés avec un rendement annuel de 3 %.

a) Installation solaire photovoltaïque de 250 kWc produisant 1200 kWh/kWc/an pour un coût d'achat de 50 c€/kWh et un investissement de 1 M€.

b) Champ d'éoliennes de 20 MW, produisant 5 MW en moyenne pour un coût d'achat de 8,5 c€/kWh et un investissement de 1 €/W.

4.7 Si cher que ça l'éolien ?

Le nouvel EPR en construction à Flamanville, dans la manche fournira une puissance électrique nette de l'ordre de 1650 MW. En supposant que son taux de disponibilité sera - comme pour les autres réacteurs nucléaires- de l'ordre de 80%, déterminer l'énergie électrique qu'il pourra produire annuellement (en TWh).

Quel serait la puissance totale des éoliennes qu'il faudrait installer pour produire la même énergie électrique ? On supposera pour cela qu'on installe des aérogénérateurs récents qui peuvent atteindre un taux d'utilisation de 25%.

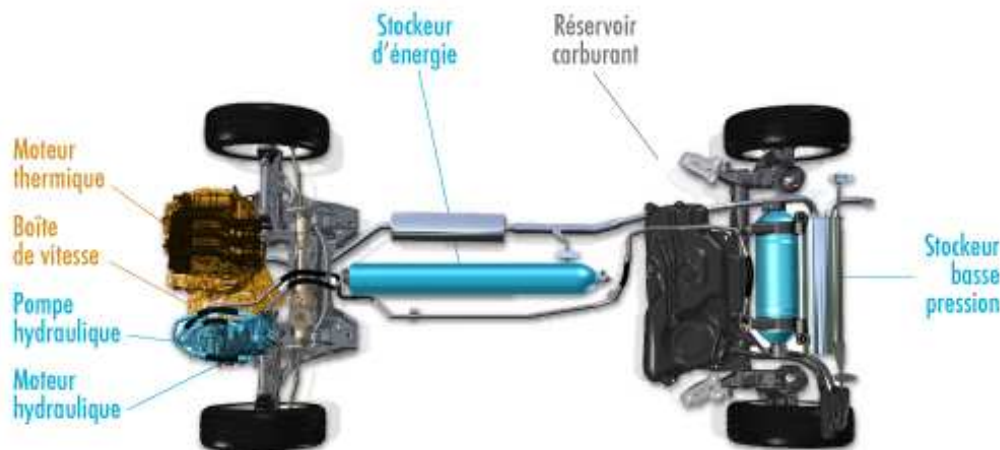
Donner l'ordre de grandeur du coût de ces nouvelles éoliennes ?

Le coût du nouvel EPR de Flamanville est estimé à 8,5 G€ (pour l'instant).

V. Le stockage de l'énergie : gestion de l'intermittence

1 Concept hybride essence-air comprimé de PSA

Lorsque le système est chargé, l'accumulateur de pression d'un volume de 17 L est rempli d'azote à une pression de 100 bars. En supposant la détente isotherme jusqu'à une pression de 50 bars, déterminer la densité énergétique du système. L'ensemble du système : accumulateur de pression + réservoir de pression + huile + moteur hydraulique pèse 100 kg. Comparer à une batterie lithium : 150Wh/kg.



2 Densité énergétique d'une batterie du commerce

Une batterie de modélisme est vendue avec les caractéristiques suivantes : 11,1 V, 1,5 Ah, 0,108 kg. Quelle est sa densité énergétique en Wh/kg ? Comparer avec la densité énergétique de l'essence 43,8 MJ/kg.



3 Véhicule électrique

Quelle masse de batterie (au plomb et au lithium) faut-il pour stocker autant d'énergie que dans 40 litres d'essence. Le PCI de l'essence est de 43,8 MJ/kg pour une masse volumique $\rho_{\text{Essence}} = 750 \text{ kg/m}^3$. On admet souvent que 24 kWh électriques remplacent 6 litres d'essence. Que signifie ce ratio en terme de rendement des véhicules ?



Tableau comparatif des différentes technologies⁵ [modifier | modifier le code]

Type	Énergie massique en Wh/kg	Énergie volumique en Wh/l	Tension d'un élément en V	Puissance en pointe (massique) en W/kg	Durée de vie (nombre de recharges)	Autodécharge en % par mois	Statut
Plomb - Acide	30 - 50 ⁶	75 - 120 ⁶	2,25	700 ⁶	400 - 800	5 ⁶	Production
Ni-Fe	20 - 60	?	?	?	?	~30 %	Abandonné
Li-Ti	50-67 ⁷	75-131 ⁷	2,4 ⁷	?	6000 ⁸	?	Production
Ni-Cd	45 - 80 ⁶	80 - 150 ⁶	1,2 ⁶	?	1 500 - 2 000	> 20 ⁶	Interdit (toxique)
Ni-H ₂	75	60	1,25	?	?	?	?
Ni-MH	60 - 110 ⁶	220 - 330 ⁶	1,2 ⁶	900 ⁶	800 - 1 000	> 30 ⁶	Production
Ni-Zn	90 ⁹	280 ⁹	1,60 ⁹	1 000	200 ⁹	> 20	Production
Na-S	100 - 110	?	?	?	?	?	Production ¹⁰
LMP	110	110	2,6	320	?	?	?
Li-Po	100 - 130	220-330 ⁶	3,7 ⁶	250 ⁶	200 - 300 ⁶	2	Production
Na-NiCl ₂	120 ⁶	180 ⁶	2,6 ⁶	200 ⁶	800 ⁶	→ 100 (12 %/jour) ⁶	?
Pile alcaline	80 - 160	?	1,5 - 1,65 ¹¹	?	25 à 500	< 0,3	Production
LFP	120 - 140 ⁶	190 - 220 ⁶	3,2 ⁶	800 ⁶	2 000 ⁶	5 ⁶	?
Li-ion	90 - 180 ¹²	220 - 400 ¹²	3,6 ⁶	1 500 ⁶	500 - 1 000 ⁶	2	Production
Li-S	250 ¹³	?	2,8 ¹³	400 ¹³	?	?	Production
Na-ion	400	?	3,6	?	?	?	?
Ni-Li	935 ⁷	?	3,49 ⁷	?	?	?	?
Li-air	1 500 - 2 500	?	3,4	200	?	?	R&D

4 Récupération de l'énergie de freinage

On souhaite dimensionner une batterie de récupération de l'énergie de freinage pour un véhicule de masse 1500 kg. Quelle énergie est dissipée par les freins lors de l'arrêt du véhicule au feu rouge lorsque celui-ci circule à 50km/h. On souhaite récupérer et stocker cette énergie dans une batterie. Quelle serait sa masse pour les technologies Plomb-acide, NiMH, Li-Po et Li-ion ? En fonction de la technologie, est-ce que la batterie satisfait le critère de puissance maximale admissible standard si le freinage est un freinage d'urgence (1s), très brusque (2s) ou assez doux (5s) ?

5 Stockage/déstockage de l'électricité

Les systèmes les plus efficaces pour stocker de l'énergie à grande échelle restent encore aujourd'hui les usines hydroélectriques réversibles qui permettent de transférer de grandes quantités d'eau entre deux réservoirs situés à des niveaux différents. La plus grande installation de France, l'usine du Lac du Verney, est équipée de 4 pompes de 149 MW

chacune permettant de remonter l'eau vers le réservoir supérieur. Les pompes fonctionnent principalement la nuit ; on supposera que leur durée d'utilisation est d'environ 8 heures/24 heures.

On demande de déterminer :

- La quantité d'énergie stockée en 24 heures.
- La masse d'eau stockée.
- La masse de batterie au lithium permettant de stocker la même quantité d'énergie.
- La superficie de panneaux solaires photovoltaïques permettant de produire cette énergie.

On utilisera les valeurs numériques suivantes :

- Rendement des pompes : 90%.
- Hauteur de chute moyenne : 900 m.
- Capacité de stockage des batteries : 200 Wh/kg.
- Irradiation journalière des panneaux : 6 kWh/m² (en été, en supposant que le pompage est réalisé pendant les heures d'éclairement maximum)
- Rendement des panneaux et du système de conversion électrique : 15%.

5 Hydrogène et facture énergétique

La consommation d'énergies finales des transports en France est de l'ordre de 50 Mtep. Quel serait la facture en énergies primaires si tous les véhicules actuels étaient remplacés par des véhicules à piles à combustible alimentés en hydrogène ? On supposera que le rendement des véhicules actuels à MCI est de l'ordre de 0,2 alors que celui des véhicules à PàC sera de l'ordre de 0,5. On supposera également que le rendement de production/distribution de l'hydrogène est de l'ordre de 0,7.

Que devient le résultat si on suppose que l'on remplace tous les véhicules actuels par des véhicules électriques à batteries d'un rendement de 0,6... si l'électricité est produite par des éoliennes et des usines hydroélectriques (avec un rendement de 1 pour respecter les conventions officielles) ou si l'électricité est produite par des centrales nucléaires (avec un rendement de 0,33 pour respecter les conventions officielles) ?