

Énergies renouvelables (ou pas)

Objectifs

Dresser un état des lieux des différentes filières

- ◆ Energies fossiles
- ◆ Énergies renouvelables : biomasse, hydraulique, solaire, éolienne, géothermie...

Envisager la transition énergétique

- ◆ Conséquences de la consommation d'énergie fossile ?
- ◆ Gérer l'intermittence des énergie renouvelables ?
- ◆ Quels sont les scénario pour le futur ?

I. Introduction

1. L'énergie, c'est quoi ?
2. Les sources d'énergies

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1. Définitions
2. Les besoins
3. Les ressources
4. Les coûts de l'énergie

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

1. Les accidents de production et transport
2. Les pollutions associées à la consommation
3. Le réchauffement climatique
4. Les conséquences du réchauffement climatique
5. Les tensions géopolitiques

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse
2. L'hydraulique
3. Le solaire
4. L'éolien

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentiel
2. Stockage sous forme d'énergie chimique
3. Stockage sous forme d'énergie cinétique

VI. Réduction de la consommation

VII. Les scénarios pour le futur

I. Introduction : l'énergie, c'est quoi ?

Le mot « **énergie** » vient du mot Grec « **energia** » qui signifie « **force en action** »

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail

un système "possède" de l'énergie s'il est capable de produire une transformation de son énergie (l'énergie chimique de nos cellules est transformée dans nos muscles en énergie mécanique) ou d'échanger de l'énergie (chaleur transmise par un radiateur)

L'énergie est conservée au cours des transformations

Les unités de l'énergie



James P. JOULE
(1818-1889)

Le Joule (J) : unité S.I. ($\text{kg.m}^2\text{s}^{-2}$)

La calorie (cal) : quantité de chaleur
nécessaire pour élever 1g d'eau d'1 °C
 $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$ (**1000 cal = 1 Cal**)

La tonne équivalent pétrole (tep)
 $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ}$

Le kilowatt-heure (kWh)
 $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$

Unité de puissance

Le Watt (W) : $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$



James WATT
(1736-1819)

Les grandes dates de l'énergie



Préhistoire

L'homme domestique le feu



-8000

L'homme invente l'agriculture et utilise la force animale

-5000

Les premiers bateaux à voile utilisent la force du vent

-1000

L'homme construit les premières machines

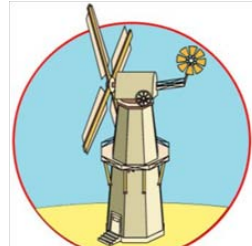


-100

L'homme crée des moulins à eau pour moudre le grain avec la force des rivières

10^e siècle

Les Chinois inventent la poudre, pour projeter des objets

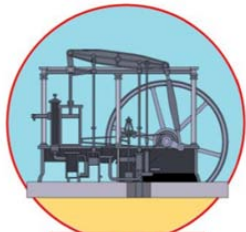


13^e siècle

L'homme crée des moulins à vent pour moudre avec la force éolienne

1690

Le français Papin conçoit la machine à **vapeur**

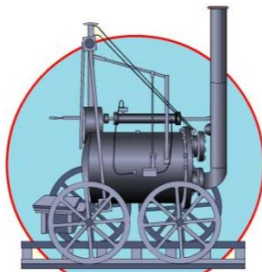


1769

L'Écossais Watt perfectionne la machine à vapeur

1800

L'italien Volta invente la pile électrique

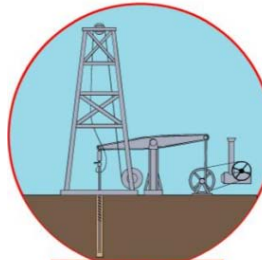


1814

La première locomotive à vapeur roule en Angleterre

1821

L'anglais Faraday crée le premier moteur électrique

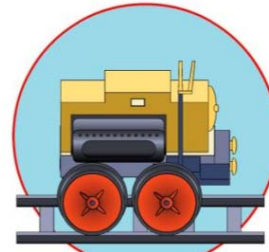


1859

Le premier puits de pétrole est exploité aux Etats-Unis

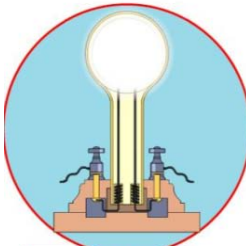
1866

L'allemand Siemens perfectionne la dynamo



1879

L'allemand Siemens fait rouler la première locomotive électrique

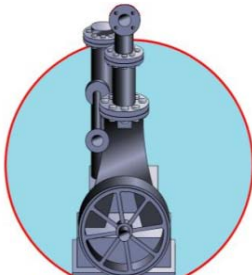


1882

L'américain Edison crée l'ampoule électrique

1885

L'allemand Benz lance la première automobile à essence

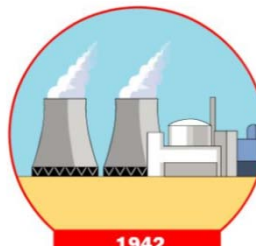


1893

L'allemand Diesel invente le moteur qui porte son nom

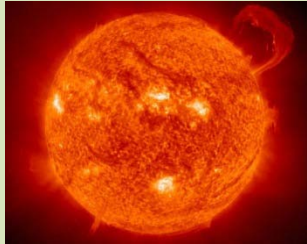
1903

Les frères Wright font voler le premier avion à hélices



1942

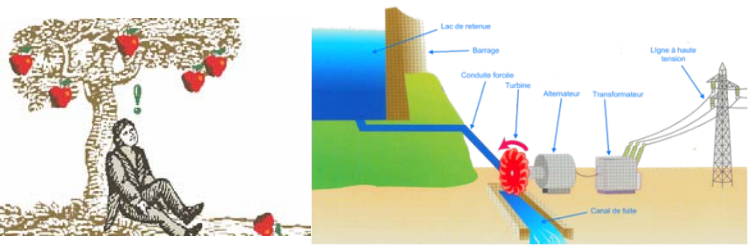
L'italien Fermi réalise la première **réaction nucléaire** marquant le début de l'industrie nucléaire



2xxx
fusion nucléaire

On distingue plusieurs formes d'énergie

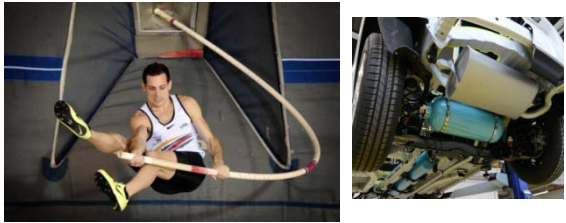
- L'énergie de gravitation



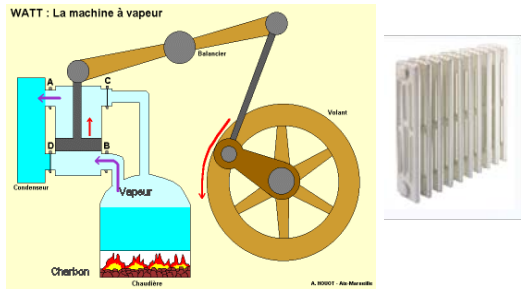
- L'énergie cinétique



- L'énergie élastique



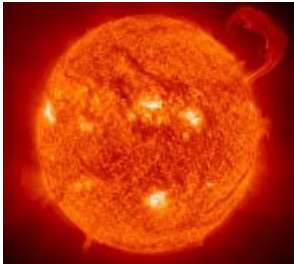
- L'énergie calorifique



- L'énergie électrique



- L'énergie nucléaire



- L'énergie chimique



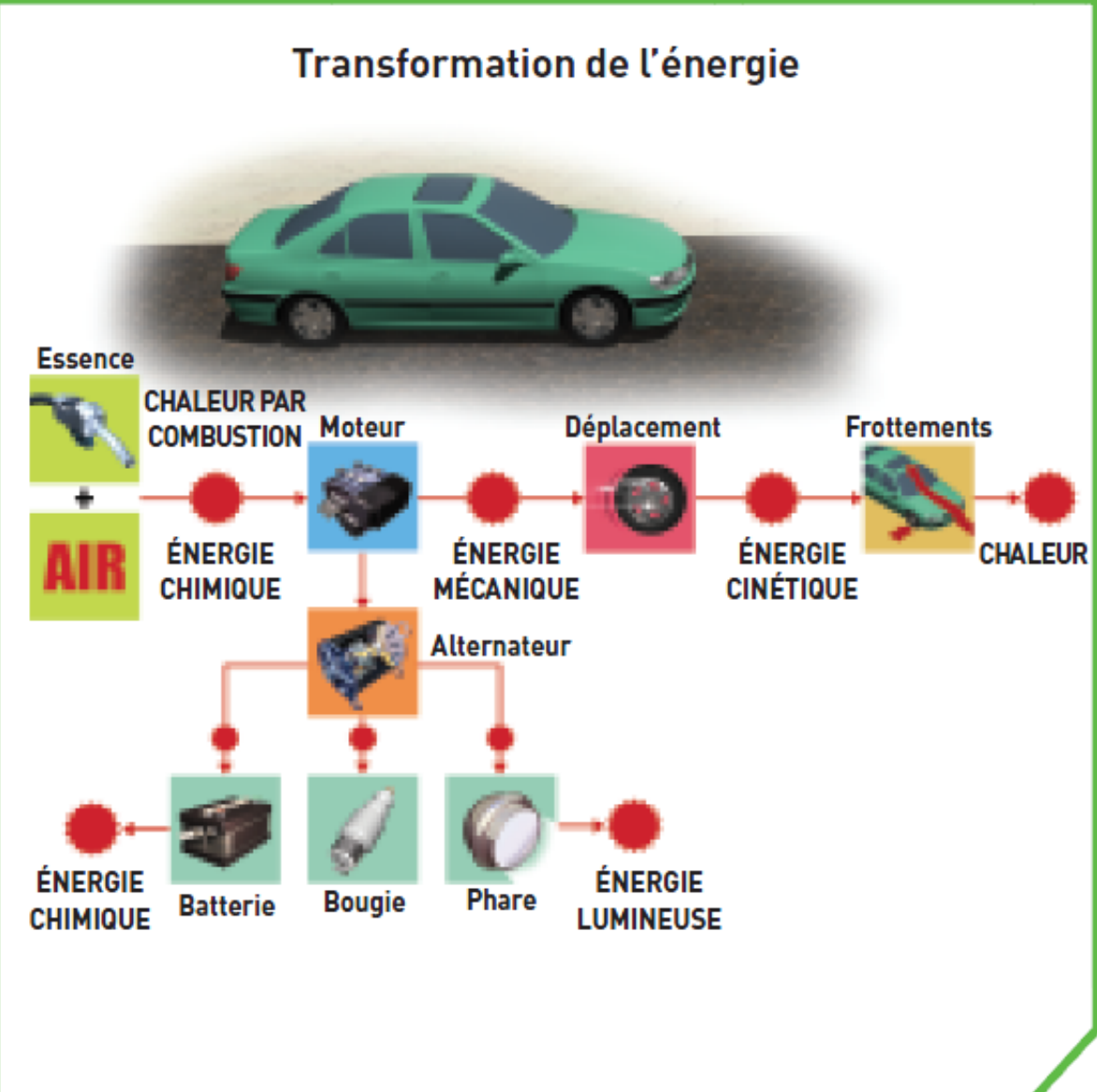
- L'énergie radiative



L'énergie se transforme

En exemple, les transformations d'énergie produites dans une voiture :

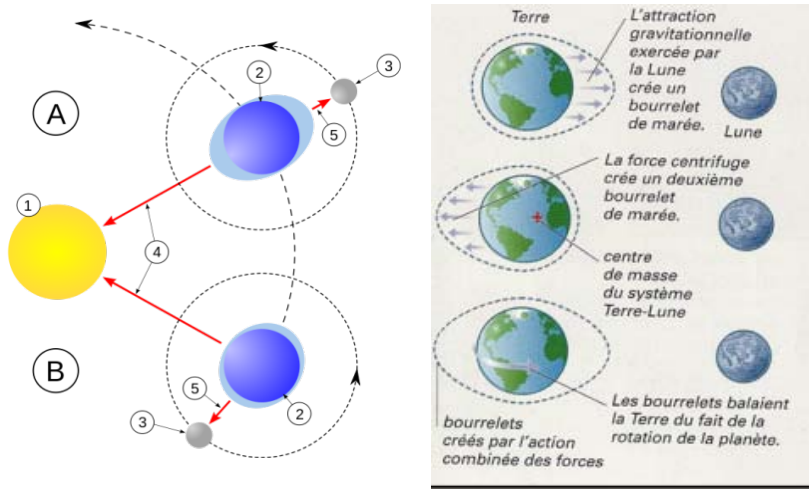
- 1 L'énergie chimique de l'essence et de l'air est transformée en chaleur par combustion. Celle-ci est transmise, par la production de gaz chauds, aux cylindres, puis aux pistons. À ce stade, elle se transforme en énergie mécanique et déclenche le mouvement de la voiture, qui acquiert une certaine énergie cinétique.
- 2 Les frottements de l'air sur la carrosserie, et des roues sur le sol, transforment intégralement cette énergie en chaleur (en terrain plat et à vitesse constante).
- 3 Une partie de l'énergie issue du moteur est convertie en énergie électrique, alimentant un alternateur. Le courant ainsi engendré sert à produire les étincelles dans les bougies pour enflammer le combustible, et à recharger la batterie, dont l'énergie chimique augmente. Il sert aussi à allumer les phares pour émettre de l'énergie lumineuse ; on consomme donc, à vitesse donnée, un peu plus d'essence de nuit que de jour.



I. Introduction : les sources d'énergie

Au départ, sur terre, il existe 4 sources d'énergie

- La force d'attraction Terre – Lune (et soleil)

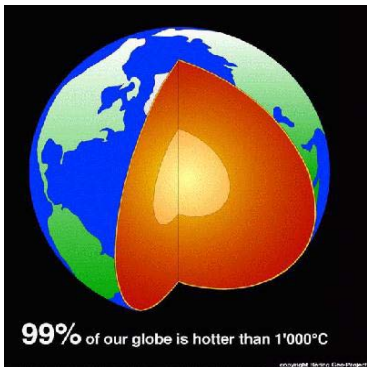


- La chaleur interne terrestre

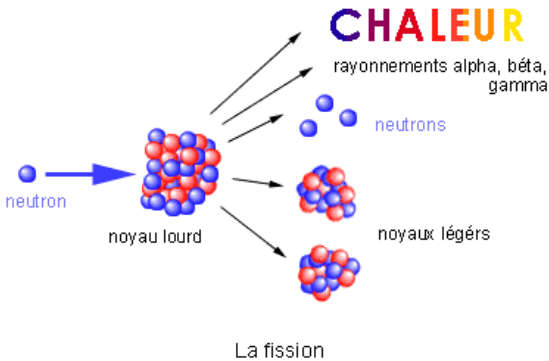
Accrétion planétaire (20 %)

Éléments radioactifs (80%)

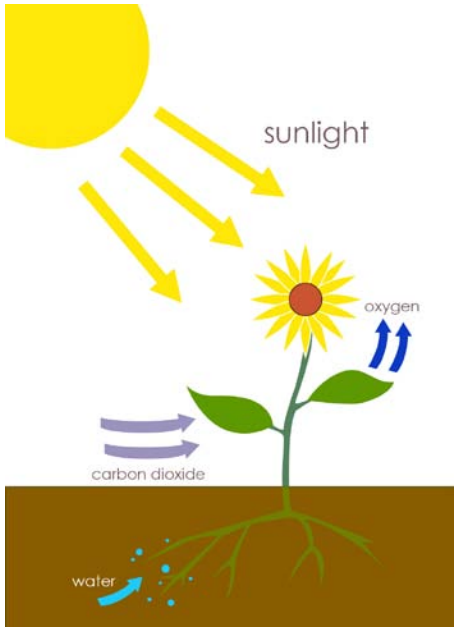
⇒ 87 mW/m²



- L'énergie nucléaire



- Le rayonnement solaire



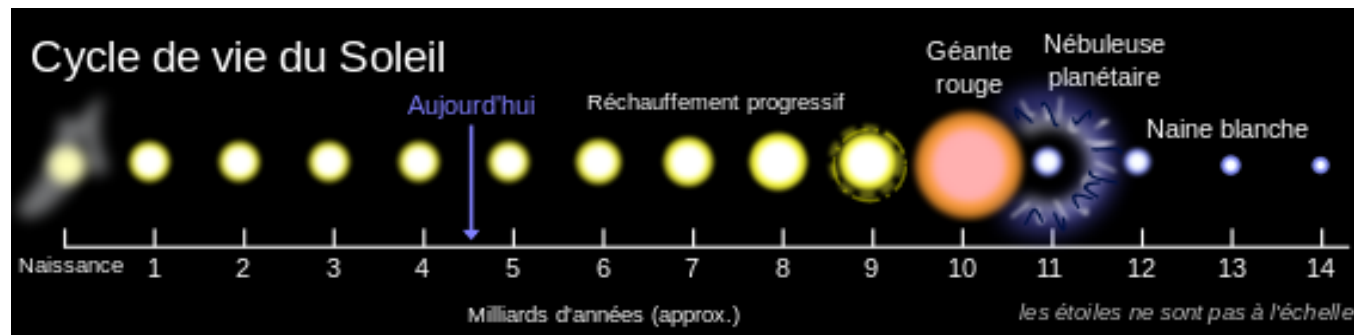
Énergie radiative
Cycle de l'eau
Vent
Énergies fossiles

I. Introduction : les sources d'énergie

En pratique, on distingue les énergies fossiles des énergies renouvelables

Une source d'énergie peut être considérée comme **renouvelable** si elle se régénère naturellement ou si « **on** » la régénère au rythme où on la consomme

- Pétrole, gaz naturel et charbon : énergies fossiles
- Nucléaire : énergie fossile (fission) ou renouvelable (fusion)
- Solaire, éolien, hydraulique, géothermie : énergies renouvelables à une échelle de temps raisonnable



- Biomasse : renouvelable à condition de ne pas surexploiter

I. Introduction : les sources d'énergie

1. Le pétrole → énergie thermique



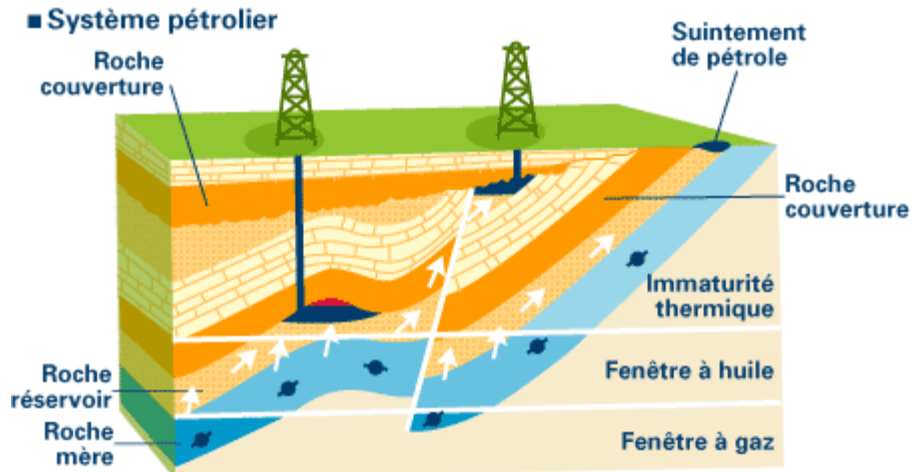
Source d'énergie dense 42 GJ /tonne ($0.57 \text{ tep} \cong 1 \text{ t}_{\text{charbon}}$)

Matière liquide : facile à pomper, à transporter, à utiliser

⇒ **Transports**

Comment se forme le pétrole ?

dégradation thermique de matières organiques
« kérogène » 2000 m < profondeur < 5000 m



Comment transporte-t-on le pétrole ?



I. Introduction : les sources d'énergie

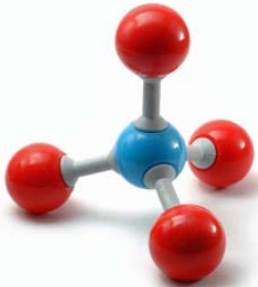
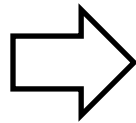
2. Le gaz naturel → énergie thermique

Le gaz naturel est essentiellement du méthane CH_4

Nécessité de le purifier (H_2S , H_2O , CO_2)

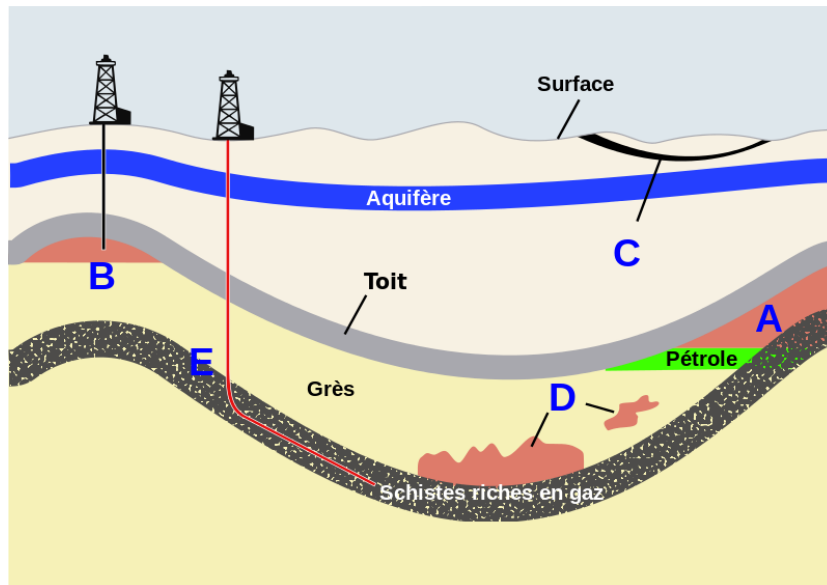
Bon rendement énergétique

Avantages environnementaux : peu de SO_2 – NO_x – CO_2



Comment se forme le GAZ naturel ?

Craquage du pétrole 5000 m < profondeur



A Gaz naturel associé (à un réservoir de pétrole)

B Gaz naturel conventionnel non associé

C Gaz de couche (ou gaz de houille)

D Gaz de « réservoir ultracompact »

E Gaz de schiste

Comment transporte-t-on le GN ?



Gaz naturel liquéfié (GNL) : $T = -162\text{ °C}$

I. Introduction : les sources d'énergie

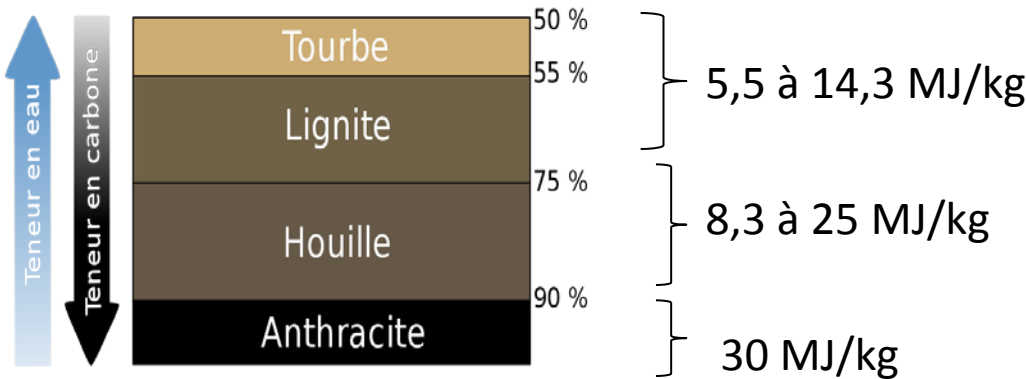
3. Le charbon → énergie thermique



- À l'origine de la révolution industrielle
- Combustible privilégié en Asie
- Très polluant (CO_2 , H_2S , particules, cendres)



Sa formation remonte à l'ère "carbonifère",
il y a 200-300 Millions d'années



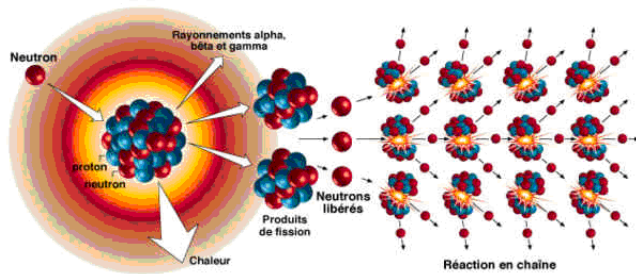
Différents types de charbons

Pouvoir calorifique

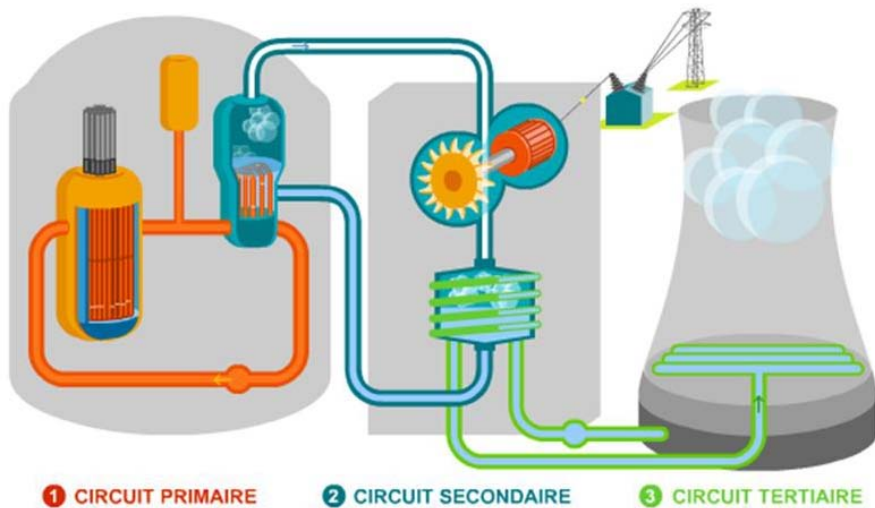


I. Introduction : les sources d'énergie

4. Le nucléaire → énergie thermique



Réaction de fission



Principe d'une centrale nucléaire

- En France 78% de l'électricité est d'origine nucléaire
- Enorme densité énergétique de l'uranium 235
- 50 ans de réserve d'uranium 235
- Coût assez faible (semble-t-il ?)

Contraintes



Déchets nucléaires à vie longue



Risque d'accident (Fukushima)

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

- 19 % de la consommation d'énergie finale dans le monde (14% en France)
- Objectif de 23 % d'ENR en Europe pour 2020

5.1 La biomasse → énergie thermique ou chimique



Ensemble de la matière végétale

→ importante réserve d'énergie captée par photosynthèse à partir de l'énergie du rayonnement solaire

- Biomasse lignocellulosique : bois, paille, cultures dédiées..
- Biomasse alcooligène : betterave, blé, maïs, etc...
- Les oléagineux : colza, soja, tournesol, etc...

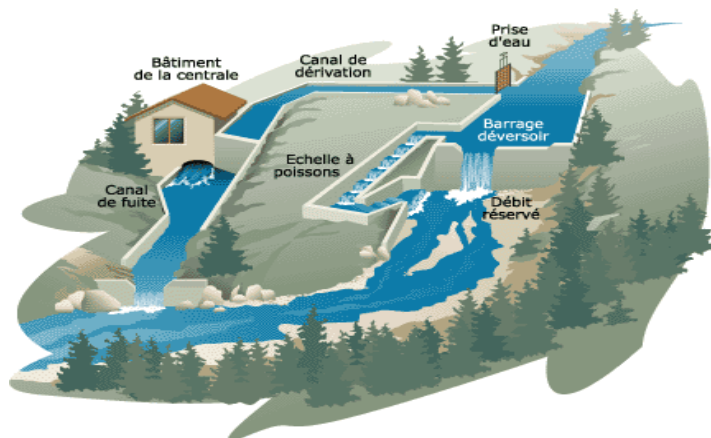
I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.2 L'hydraulique → énergie mécanique

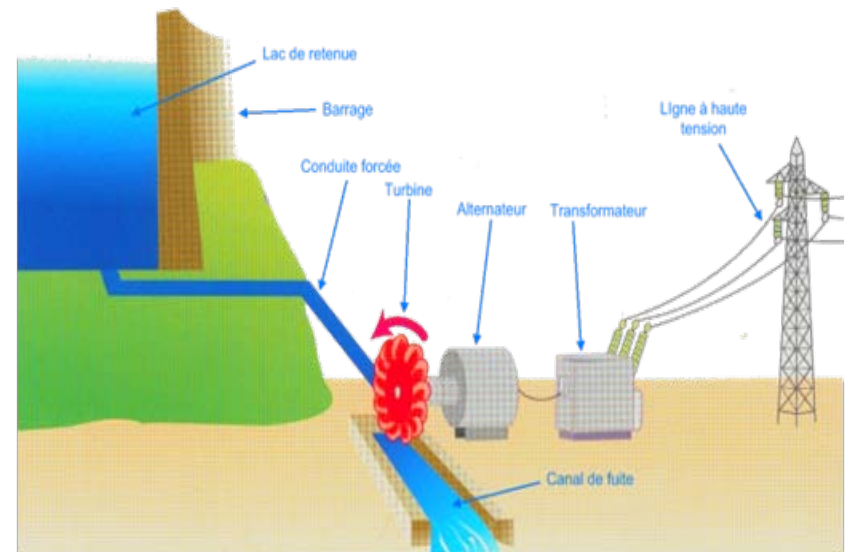


Hydraulique de lac



Hydraulique au fils de l'eau

450 barrages en France
→ 12 % de la production d'électricité
(16% de la production mondiale)



Principe d'une centrale Hydroélectrique

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.3 Le solaire thermique → énergie thermique



*Panneau solaire thermique
(tubes sous vide)*
→ eau chaude sanitaire & chauffage



Centrale solaire à concentration
→ **production d'électricité**

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.4 Le solaire photovoltaïque → énergie électrique



Intégré au bâti



*Centrale de rozière (base militaire de Toul)
360 hectares - 115 MWc
consommation d'environ 55.000 habitants
Économie de 4.600 tonnes de CO2 par an
(Tarif de rachat 18% supérieur à une région du sud)*

→ 1 % de la production d'électricité en France (2014)

→ 0.6 % de la production d'électricité mondiale (2014)

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.5 L'éolien → énergie mécanique



Éolien terrestre



Éolien offshore

→ 3.1 % de la production d'électricité en France (2014)

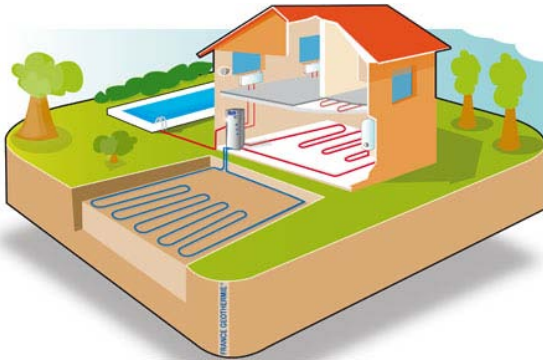
→ 2.7 % de la production d'électricité mondiale (2014)

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

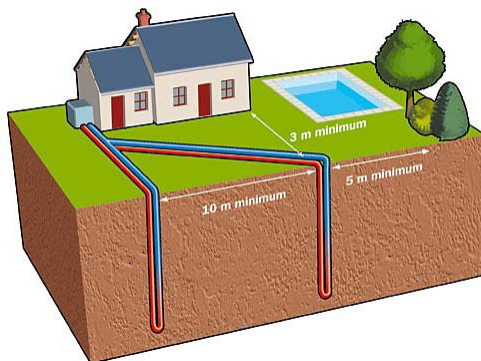
5.6 La géothermie → énergie thermique

Dans le manteau terrestre (30km d'épaisseur)
la T° augmente en moyenne de 3°C tout les 100 m



Géothermie de surface $T \approx 7-10^\circ\text{C}$

→ chauffage résidentiel (pompe à chaleur)



Géothermie à captage vertical $T \approx 10-12^\circ\text{C}$

→ chauffage résidentiel (pompe à chaleur)



Géothermie haute énergie $T > 150^\circ\text{C}$

→ Production d'électricité

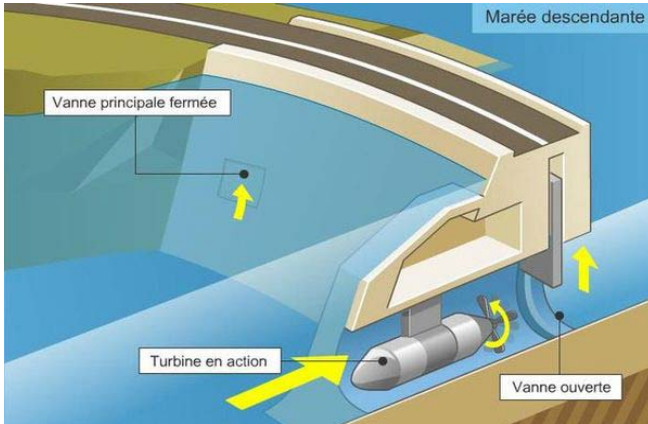
→ 0.3 % de la production d'électricité mondiale (2014)

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.7 Les énergies marines : marémotrice → énergie mécanique

Le marnage peut dépasser 10 mètres → courants de près de 10 km/h.



Principe



Barrage de la Rance

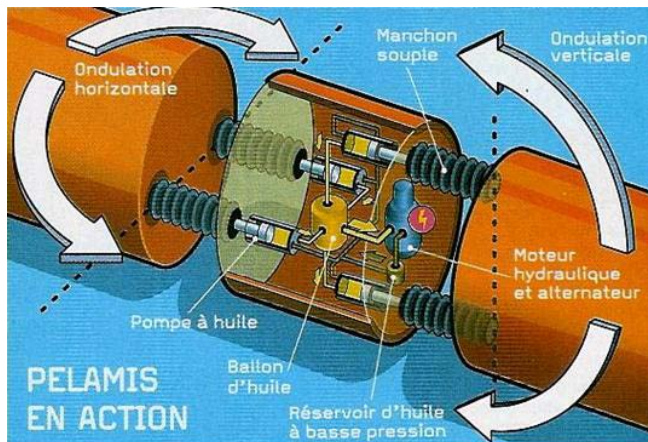


*Barrage de la Rance (Ille-et-Vilaine)
240 MW (2^{ème} plus puissante au monde)*

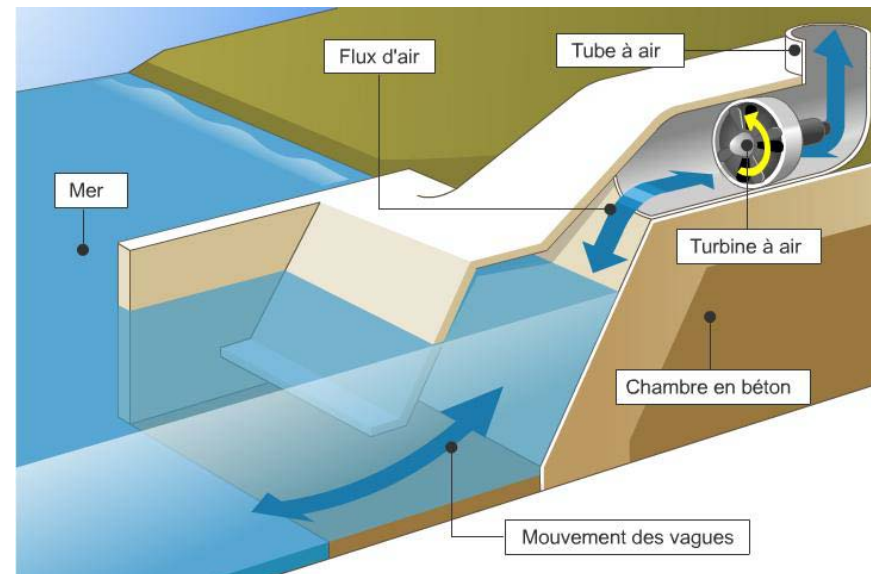
I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.8 Les énergies marines : houlomotrice → énergie mécanique



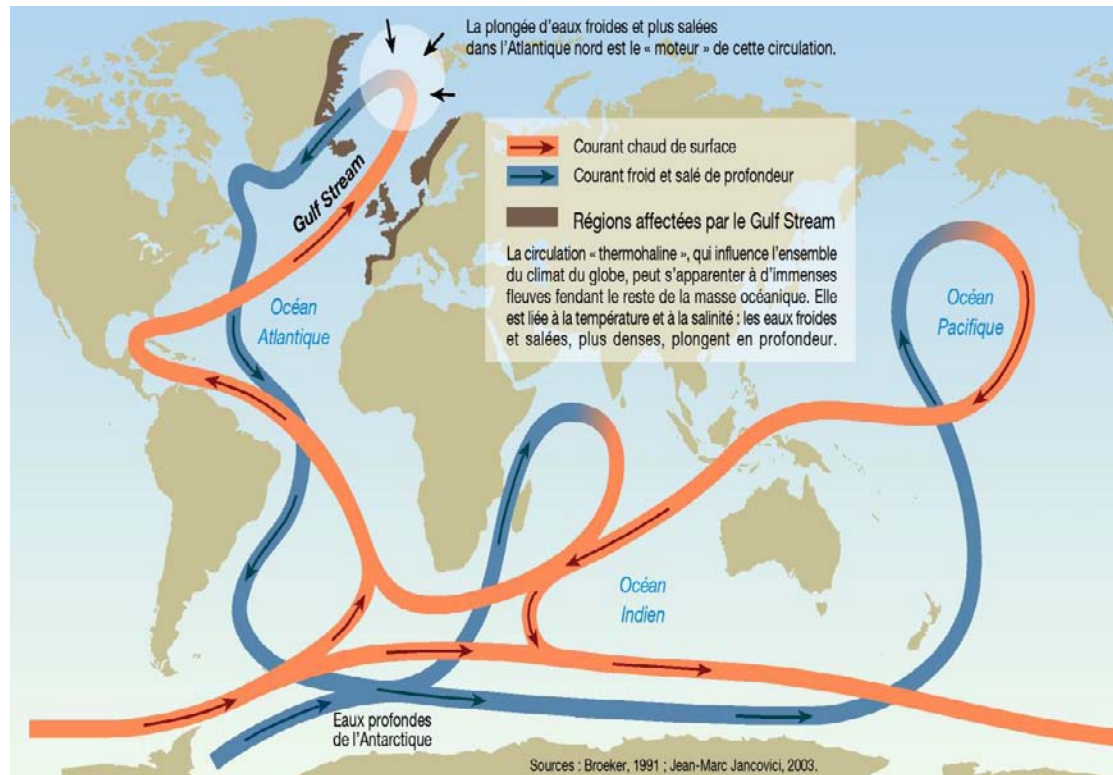
Potentiel : 1W/m^2
Vagues de la façade atlantique : 420 TWh/an
(90 % de la consommation d'électricité de la France)



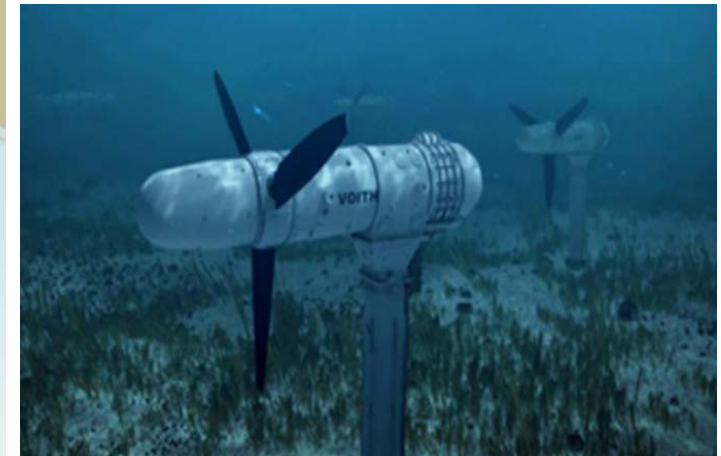
I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.9 Les énergies marines : hydrolienne → énergie mécanique



Courants marins

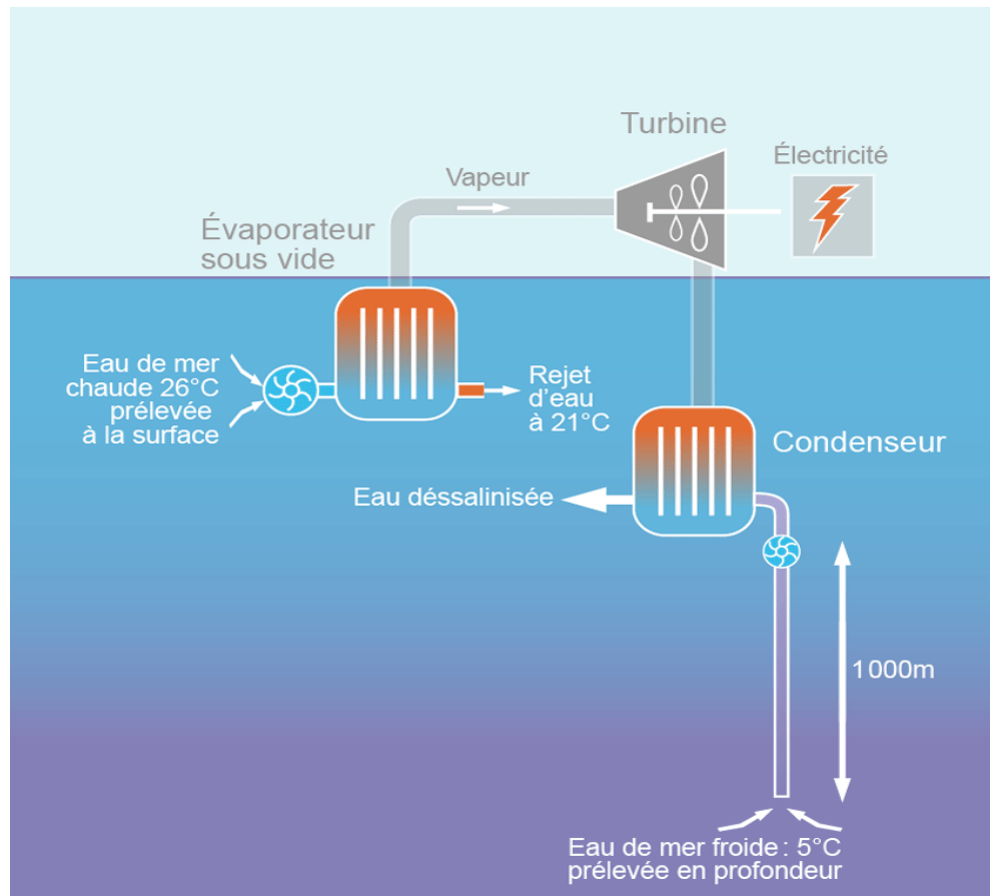


Hydrolienne

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.10 Les énergies marines : énergie thermique des mers → énergie thermique

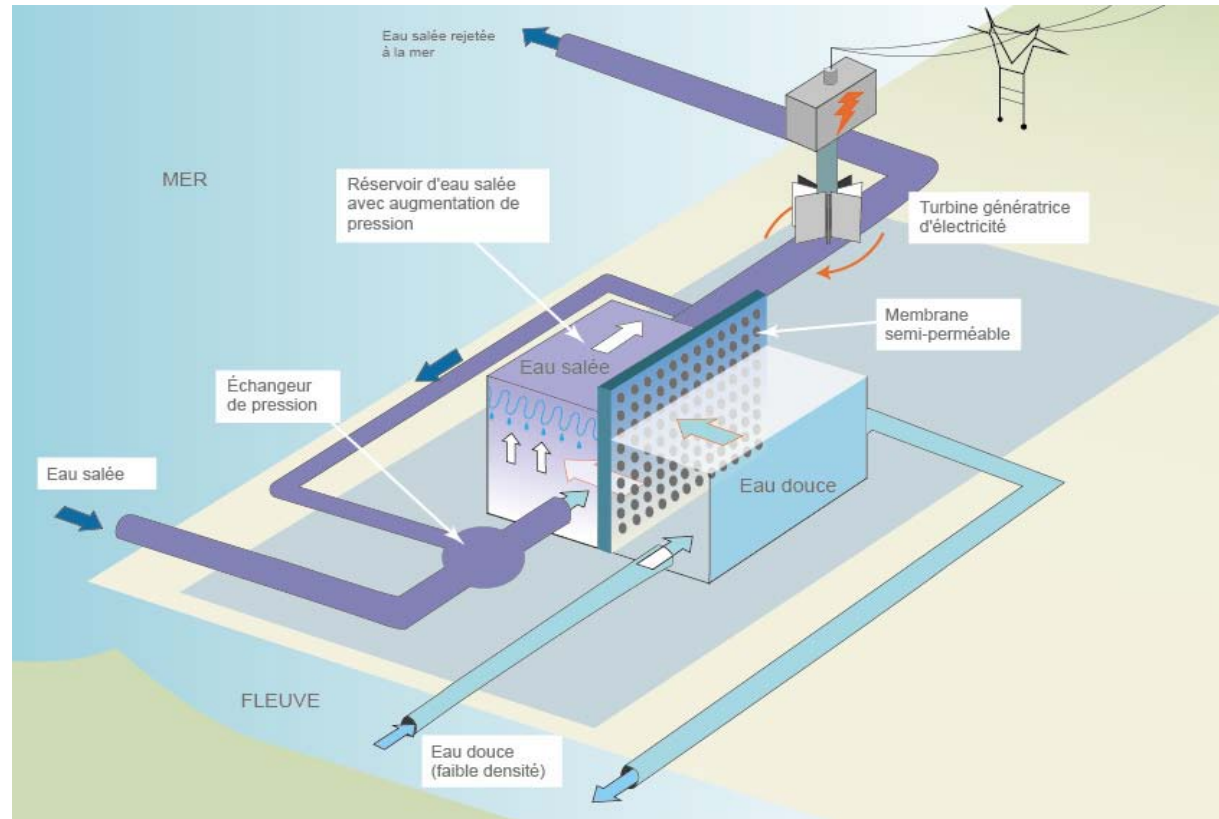


Principe d'une centrale thermique marine

I. Introduction : les sources d'énergie

5. Les énergies renouvelables

5.11 Les énergies marines : énergie osmotique → énergie chimique



*Différence de pression théorique entre eau douce et eau de mer : 27 bars
en pratique 10 bars & débit $1 \text{ m}^3/\text{s}$ → puissance 1MW
250 000 m^2 de membrane / MW (**3 W/m²**)*

Exercices : calculs d'ordres de grandeurs

I. Introduction

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1. Définitions
2. Les besoins
3. Les ressources
4. Les coûts de l'énergie

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

IV. Les énergies renouvelables

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

VI. Réduction de la consommation

VII. Les scénarios pour le futur

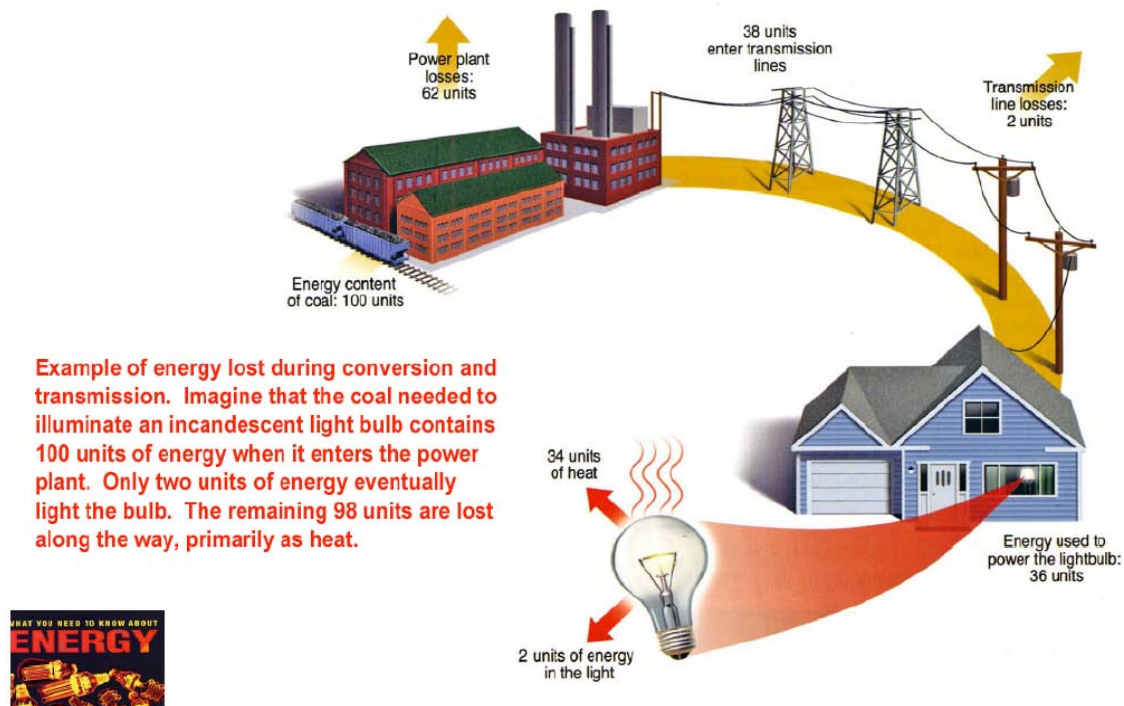
II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1. Définitions

La Chaine énergétique

Ensemble des processus de production/transformation/transport/utilisation de l'énergie

Elle peut être très longue, par exemple pour le pétrole : extraction, transport, raffinage, distribution, utilisation, ou très courte comme pour le solaire thermique : production, utilisation.



Production **brute** d'électricité en France : **561 TWh** en 2012
Somme de la consommation et des échanges : **480 TWh**.

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1. Définitions

Energie primaire

Energie comptabilisée au début de la chaîne énergétique. En pratique, on considère comme énergie primaire, l'énergie qui résulte de la première transformation (chaleur nucléaire, chaleur de combustion des carburants fossiles, électricité éolienne ou électricité hydraulique).

Energie finale

L'énergie finale est celle qui va être consommée (payée) par l'utilisateur : essence, électricité, gaz naturel au compteur. Elle est donc égale à l'énergie primaire utilisée pour la produire moins les pertes de conversion et de transport.

Energie utile

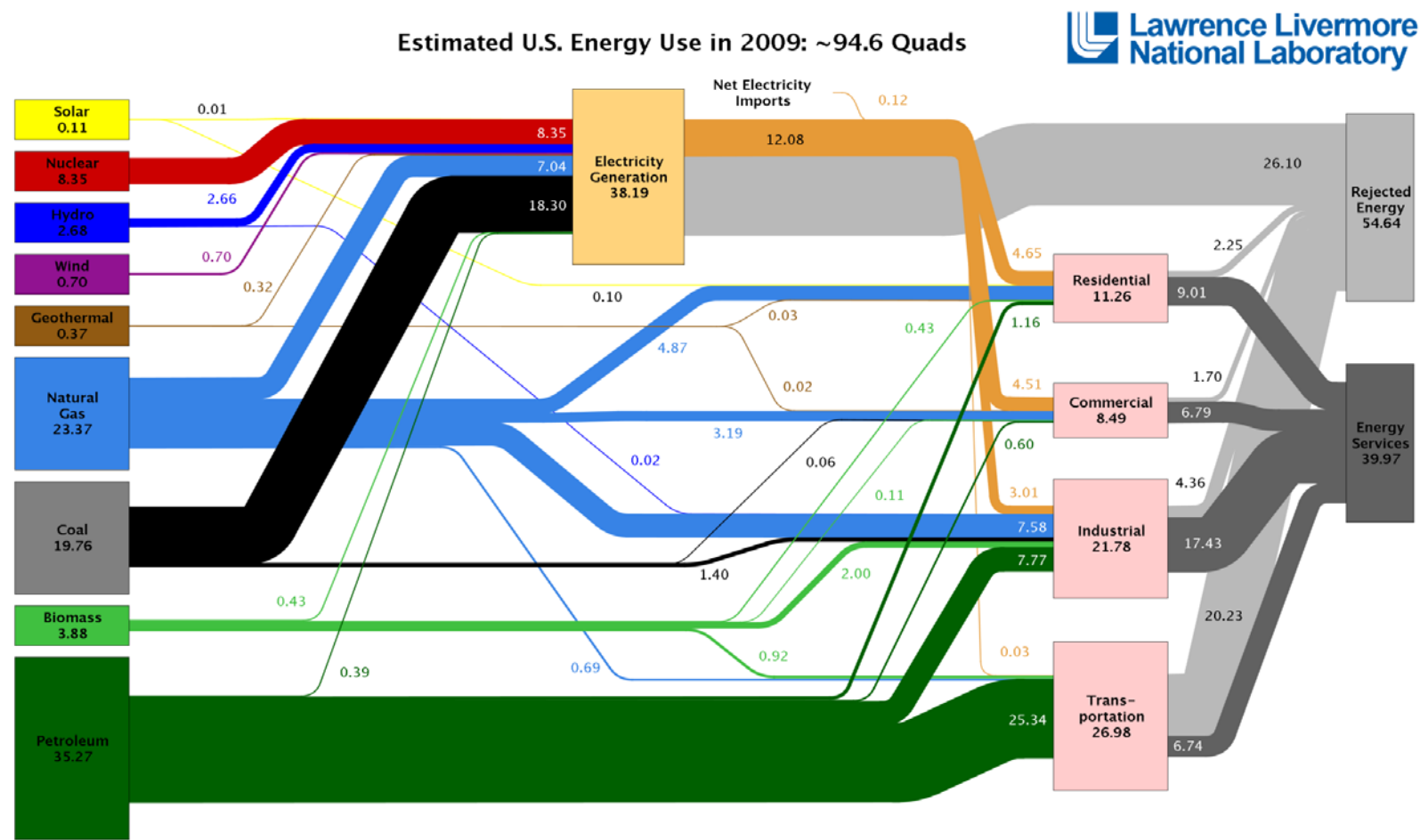
Une énergie utile est une énergie que l'on utilise pour ses effets : chaleur, énergie mécanique, énergie électrique. Elle est égale à l'énergie finale moins la perte de conversion du système de l'utilisateur. Par exemple, pour une voiture à essence (rendement de 20%) l'énergie utile (énergie mécanique) sera égale à 20% de l'énergie finale (essence). Pour une voiture électrique (rendement de 80%) l'énergie finale (électricité) sera en grande partie convertie en énergie utile (énergie mécanique).

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1. Définitions

L'efficacité énergétique : rapport de l'énergie utile sur l'énergie primaire consommée.

Diagramme de Sankey – efficacité énergétique aux USA : 42 %

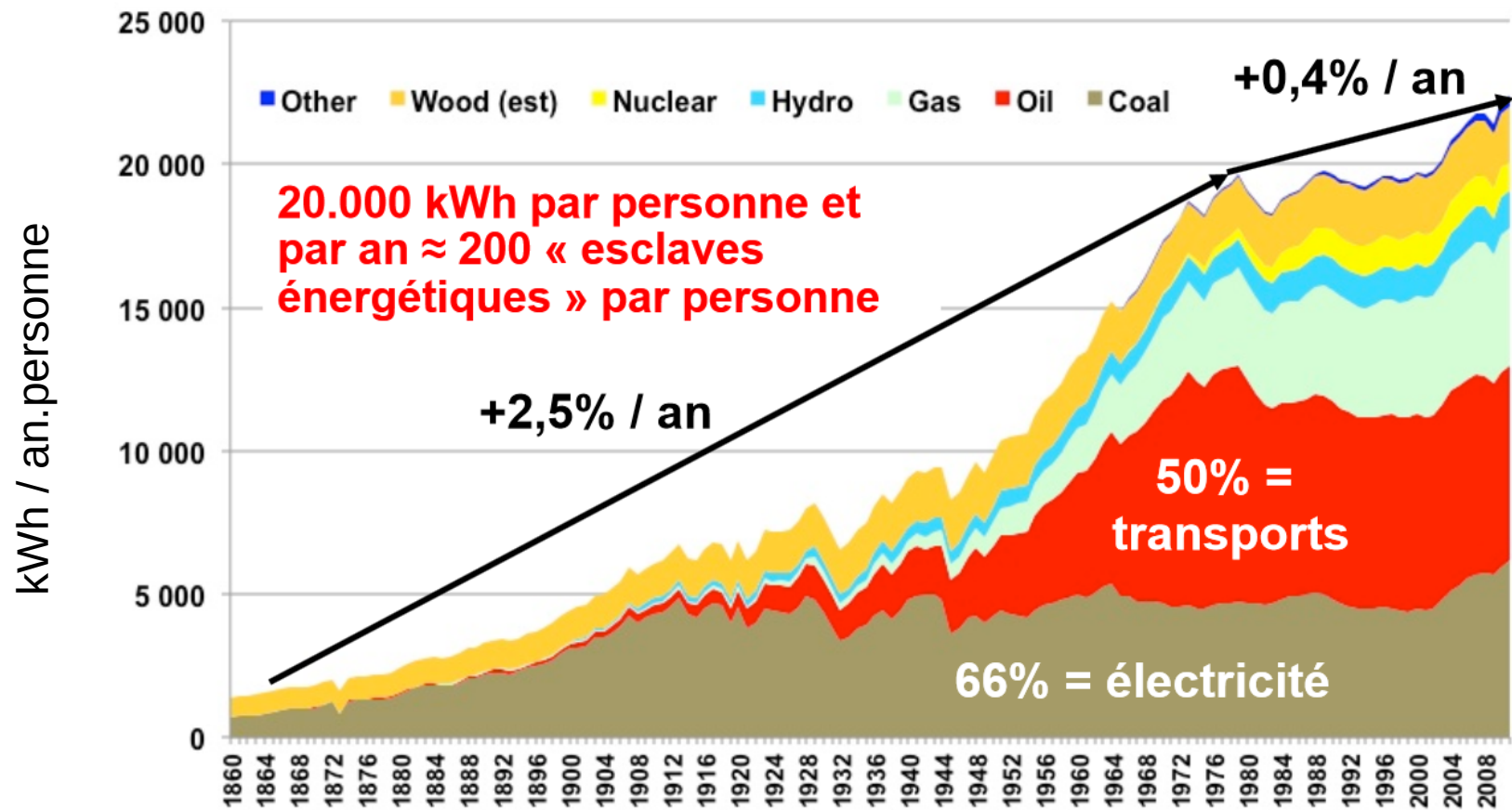


1Quad = 25.2 Mtep

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Besoins en énergie primaire par personne

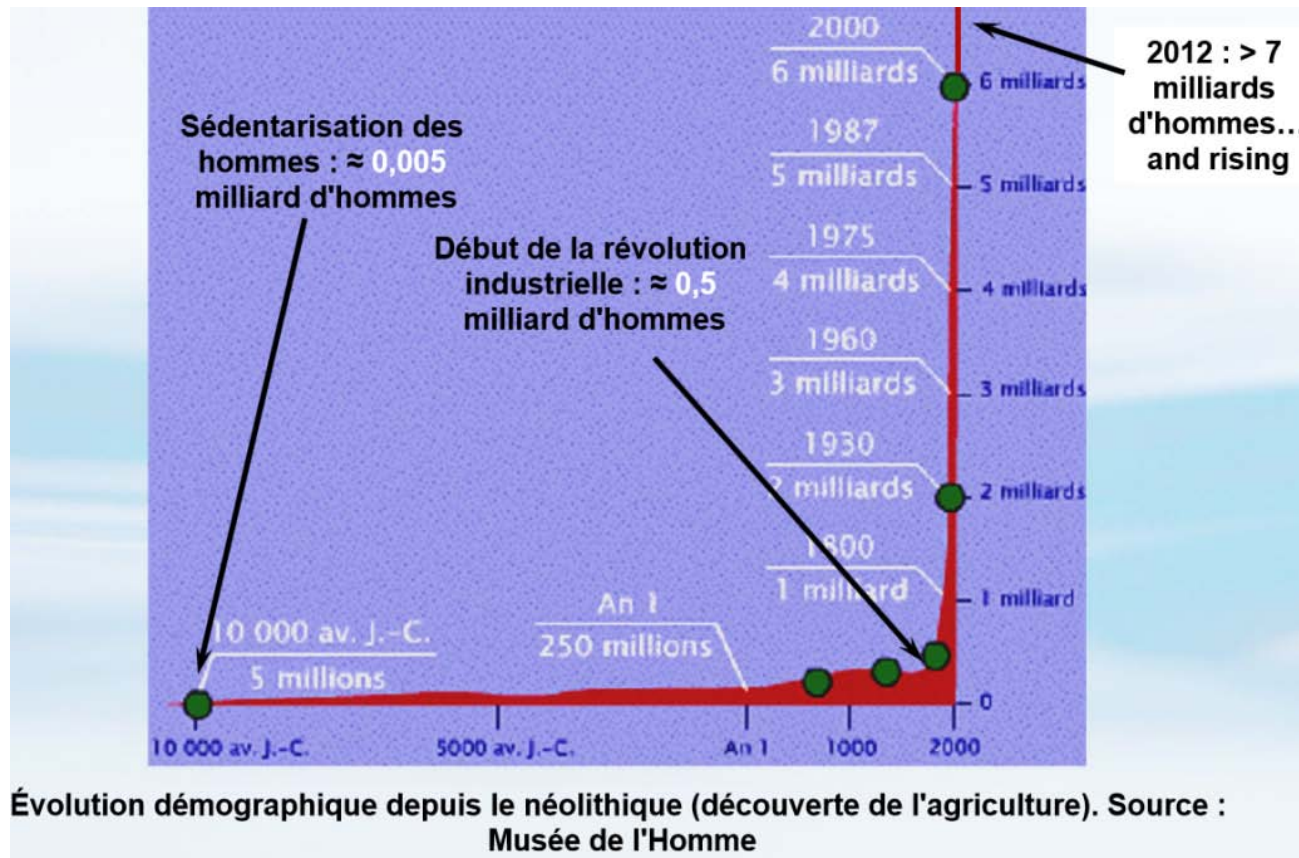


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale, de 1880 à 2011.
Source : Jancovici, 2012, sur données primaires Schilling et al., 1977, BP Statistical Review

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Evolution démographique mondiale

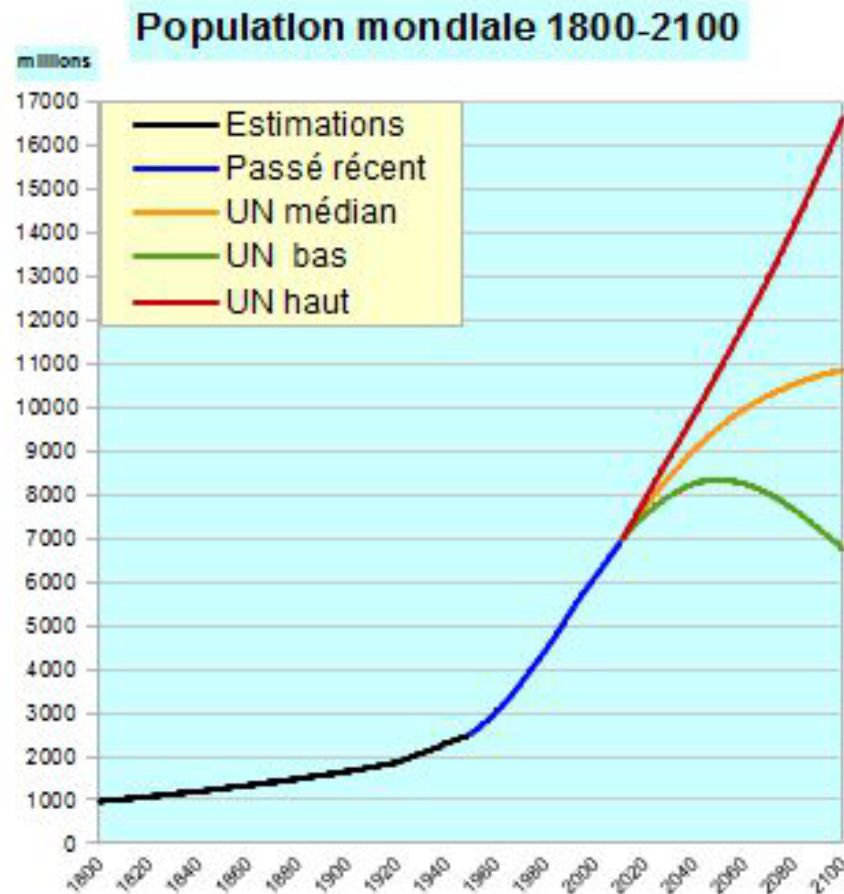


Et ce n'est qu'un début...

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Evolution démographique mondiale



2014
4 naissances /s
2 morts /s

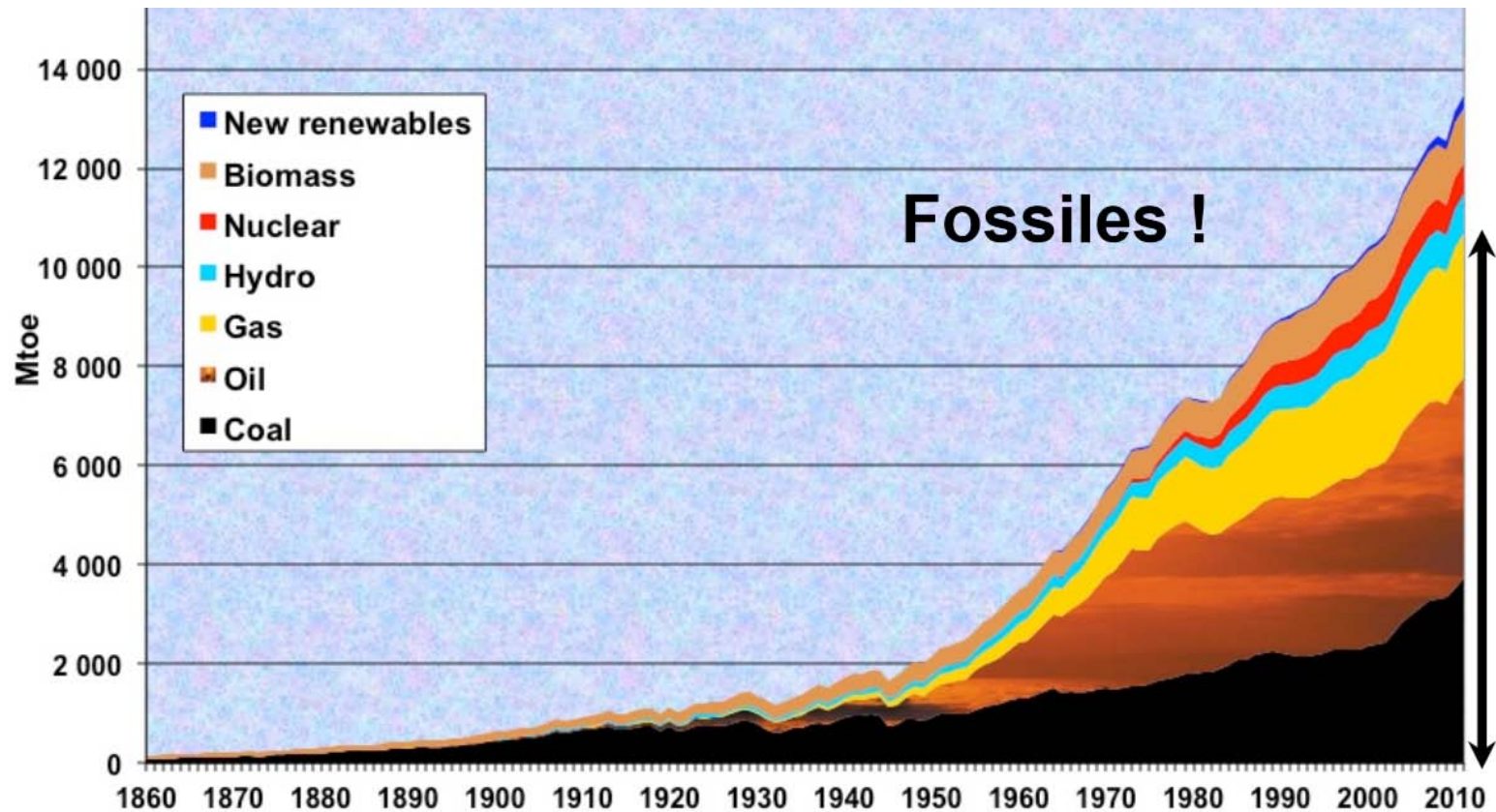
Population mondiale : 3 scénarios d'évolution possible de la population mondiale.

sources : Nations Unies, Projections de population 2013 ; 1800-1950 : estimations US Census Bureau

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Besoins en énergie primaire dans le monde

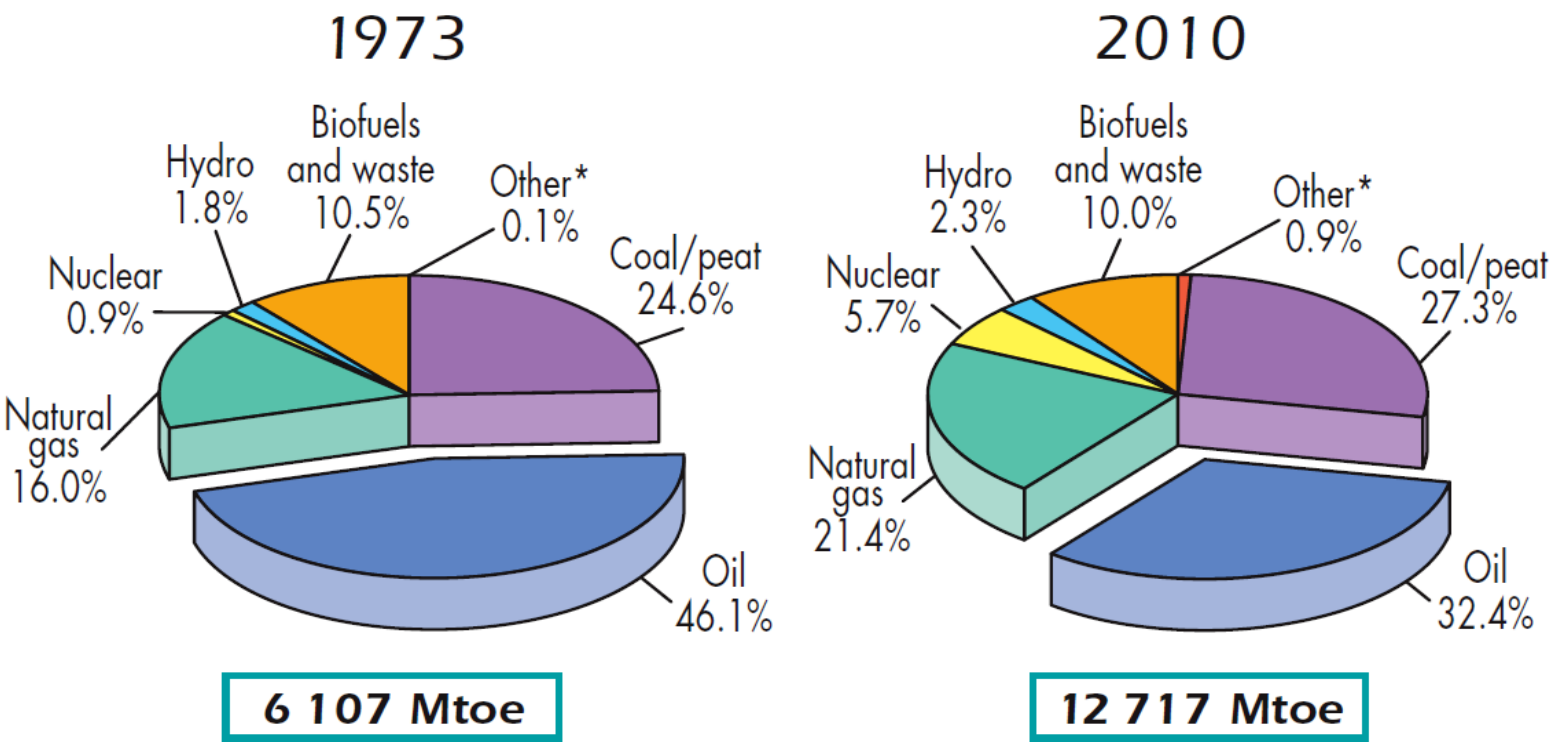


Consommation mondiale d'énergie, de 1880 à 2011. Source : Jancovici, 2012, sur données primaires Schilling et al., 1977, BP Statistical Review, 2012, World Bank, 2012

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Besoins en énergie primaire dans le monde

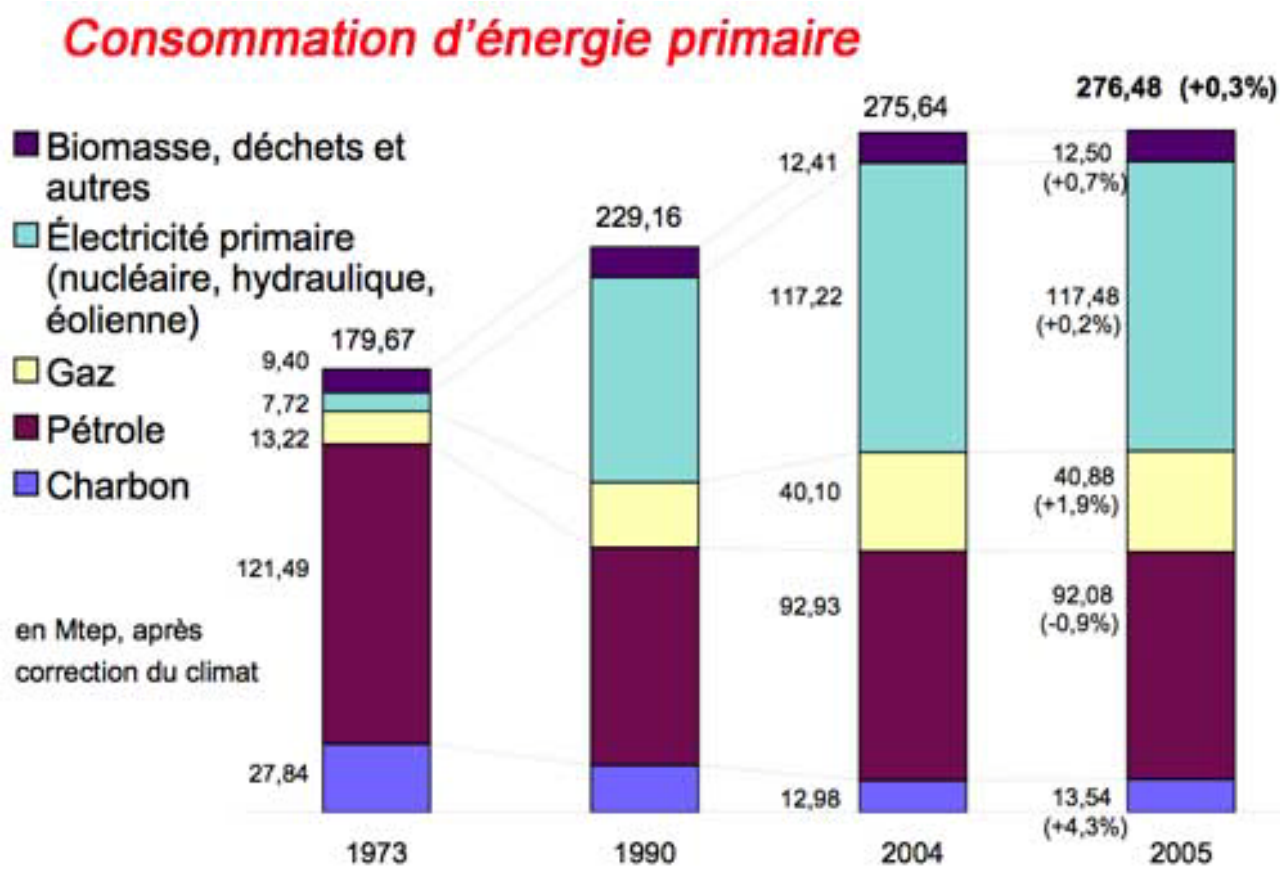


Mix énergétique mondial (**production d'énergies primaires**) en 1973 et 2010 – La part des énergies fossiles n'est passée que de 86% à 81% (75% à 67% pour la consommation d'énergies finales). 2012 Key World Energy Statistics – International Energy Agency

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Besoins en énergie primaire en France



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

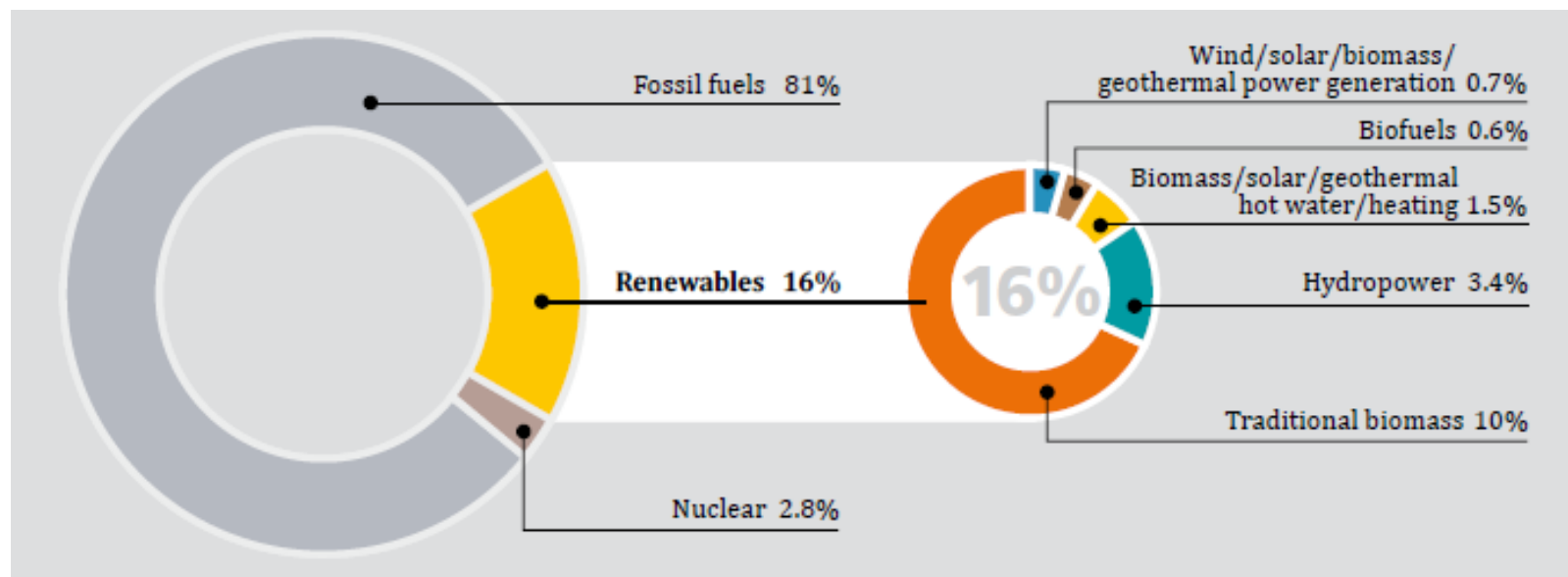
Consommation en énergie finale dans le monde

En 2010 :

Consommation d'énergie **finale** dans le monde : 8.7 Gtep

Production **primaire** : 13 Gtep

Energie **utile** : 6.5 Gtep, -> efficacité énergétique mondiale moyenne de l'ordre de 50%.



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Consommation en énergie finale dans le monde

La consommation d'énergie est bien sûr géographiquement très inégalement répartie

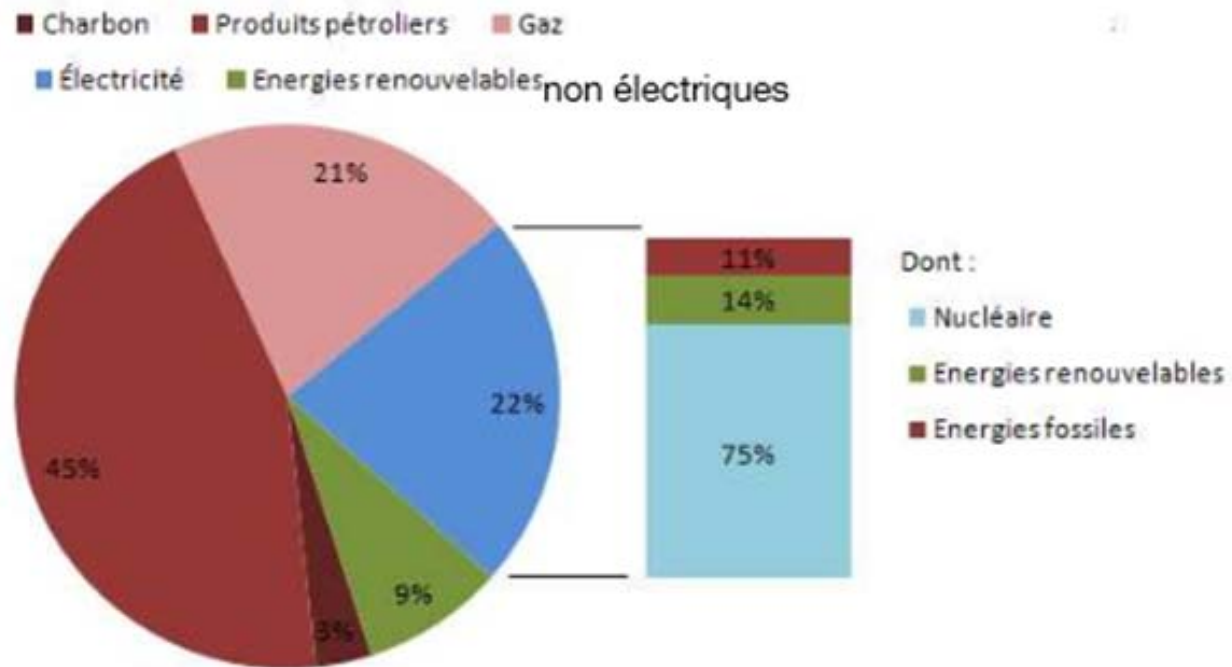
Consommations d'énergie finale de quelques grands pays
en 2009

Région/Pays	Consommation Mtep	% conso mondiale	Cons./hab. tep
 États-Unis ¹	1 463	17,5	4,76
 Chine ²	1 317	15,8	0,98
 Inde ³	449	5,4	0,39
 Russie ⁴	423	5,1	2,98
 Japon ⁵	314	3,8	2,46
 Allemagne ⁶	224	2,7	2,73
 Canada ⁷	194	2,3	5,75
 Brésil ⁸	191	2,3	0,98
 France ⁹	160	1,9	2,48
 Royaume-Uni ¹⁰	132	1,6	2,14

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Consommation en énergie finale en France



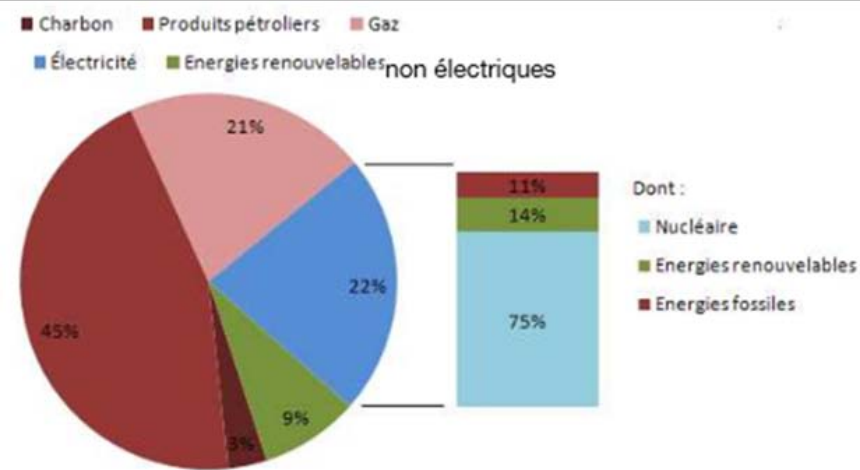
II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins



Bien savoir de quoi on parle

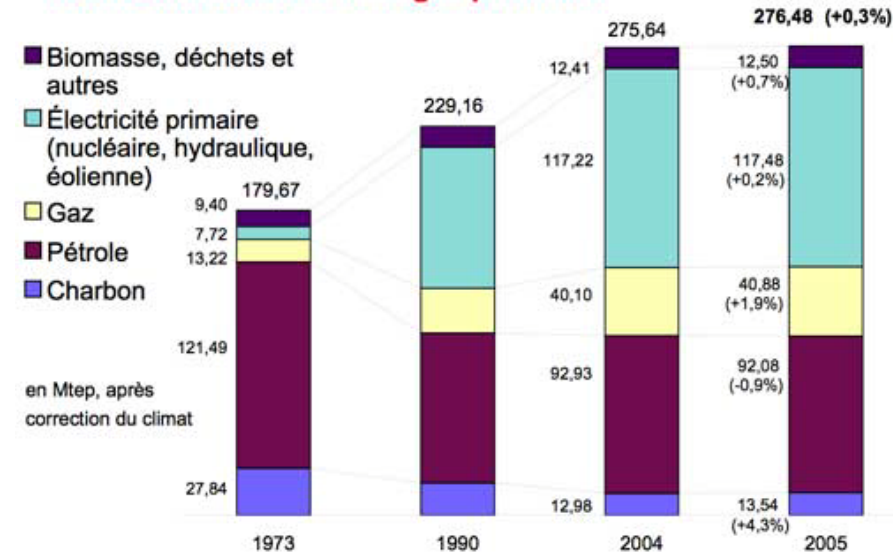
énergie finale en France



Source : SOeS, bilan de l'énergie 2010

énergie primaire en France

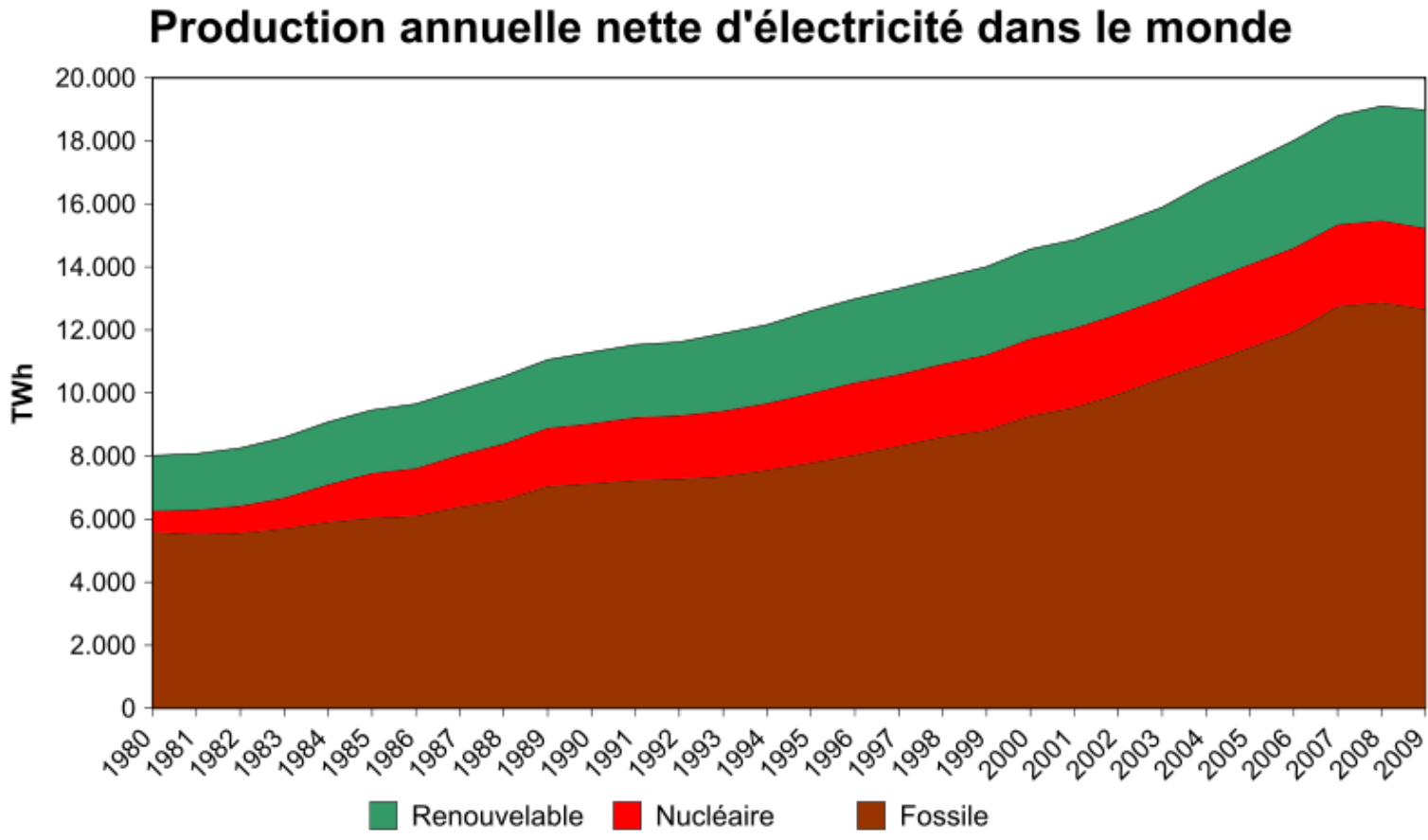
Consommation d'énergie primaire



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Besoins en électricité dans le monde



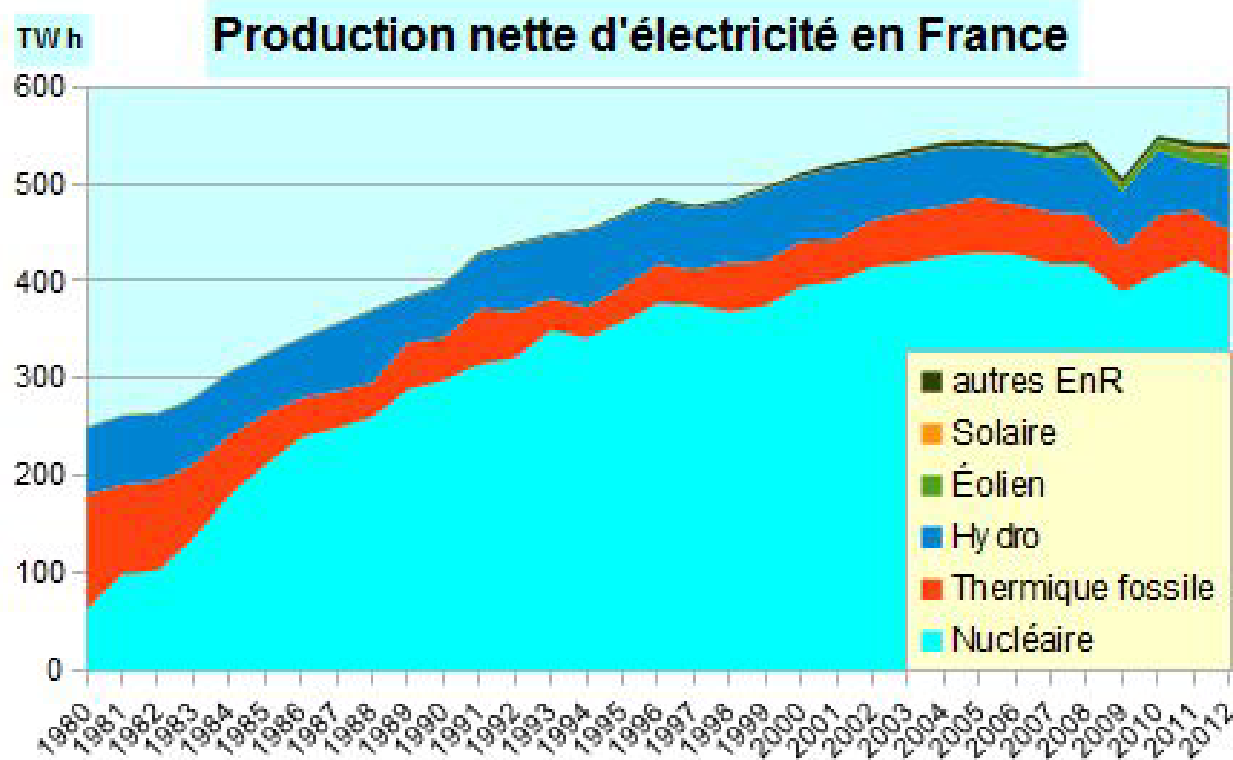
17% de la consommation d'énergie finale (22% en France)

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Besoins en électricité en France

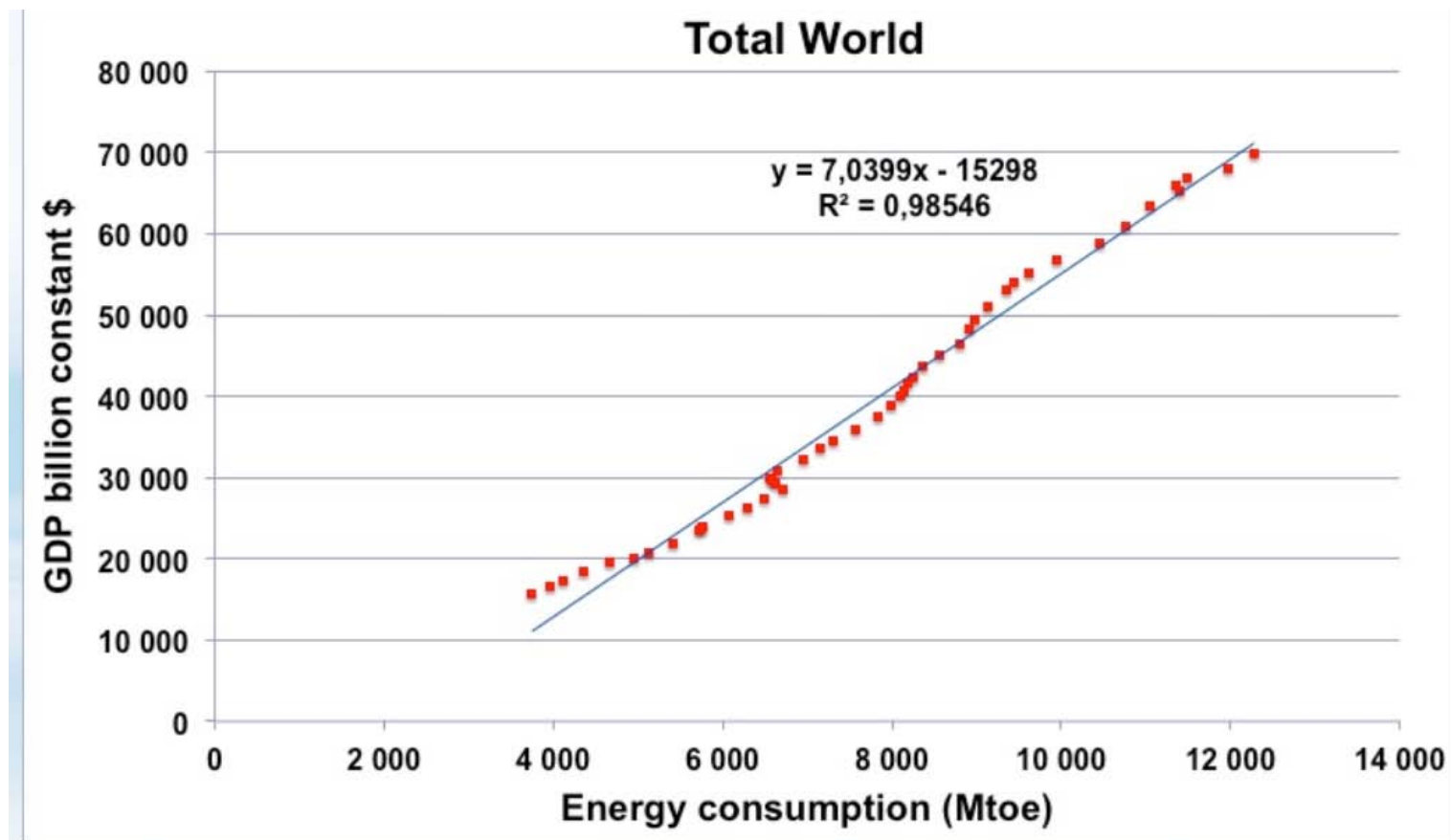
En France près de 80% de la production d'électricité est d'origine nucléaire. La puissance totale installée est d'environ 130 GW, la puissance moyenne consommée de 50 GW et le pic de consommation (record du 8 février 2012) de 102.1 GW.



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Consommation d'énergie ↔ croissance



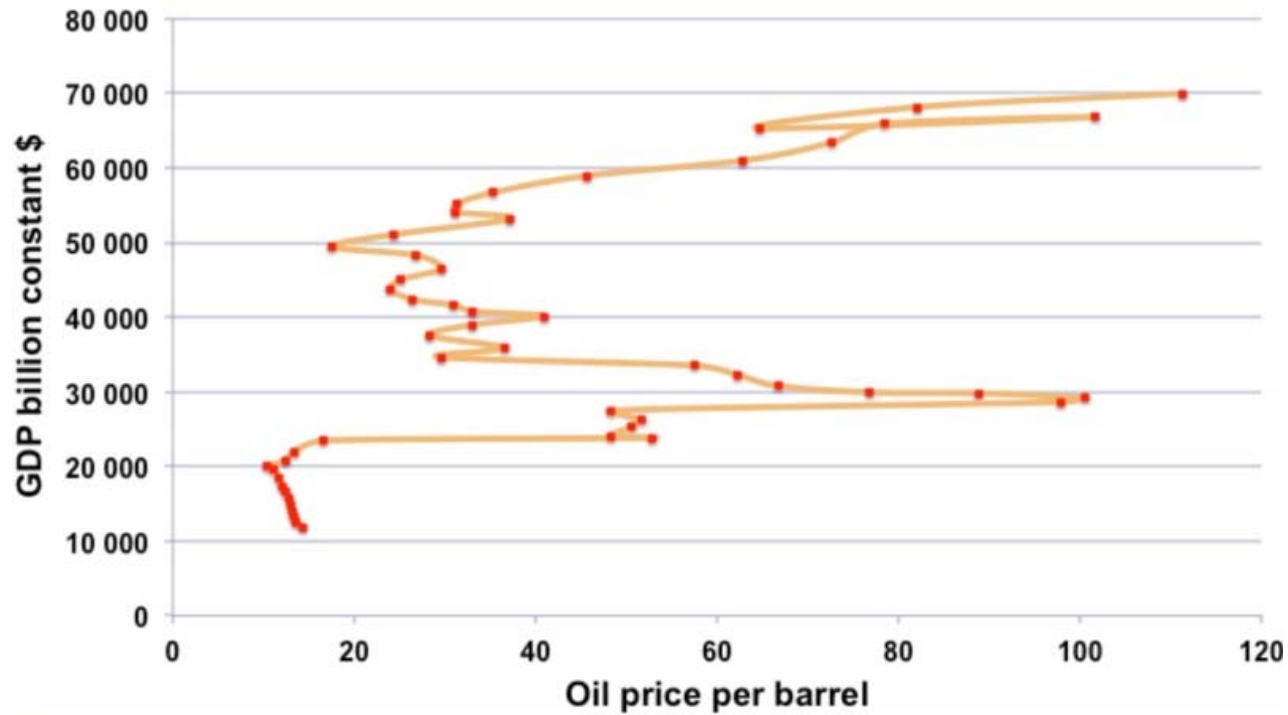
Energie consommée (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde, de 1965 to 2011. Source World Bank 2012 et BP Statistical Review 2012

la croissance n'est-elle possible que si l'on consomme plus d'énergie ?

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

2. Les besoins

Consommation d'énergie $\leftrightarrow$ croissance



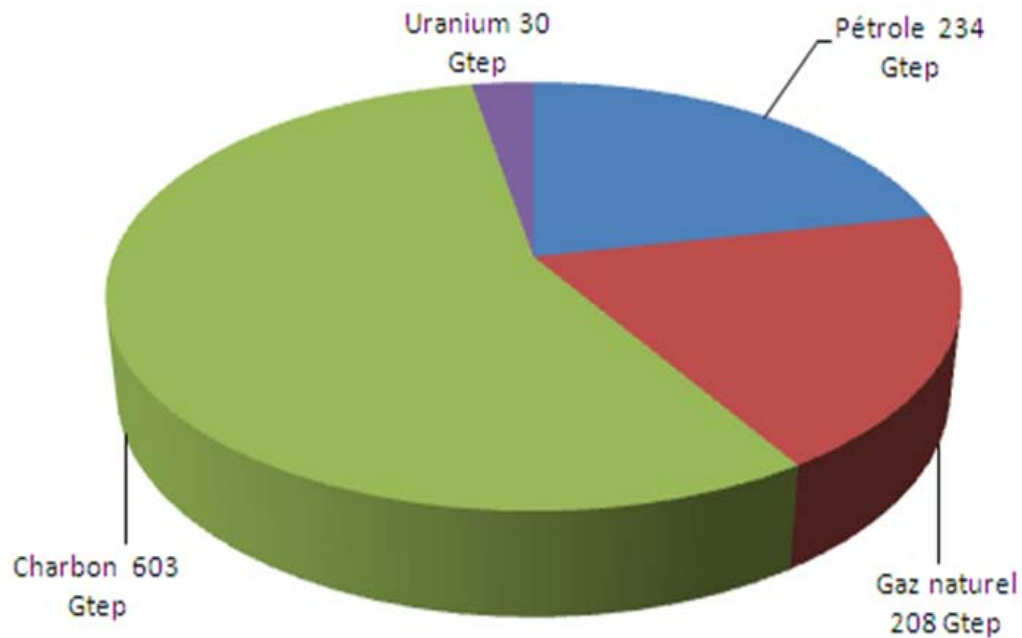
Prix du pétrole (abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde, de 1965 to 2011. Source World Bank 2012 et BP Statistical Review 2012

Le PIB ne dépend pas du prix de l'énergie mais bien de la quantité d'énergie consommée

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources

Total de 1000 Gtep, soit 83 ans de production actuelle



Reserve énergétiques mondiales conventionnelles et prouvées
[*BP Statistical Review of World Energy 2012*](#)

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources

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

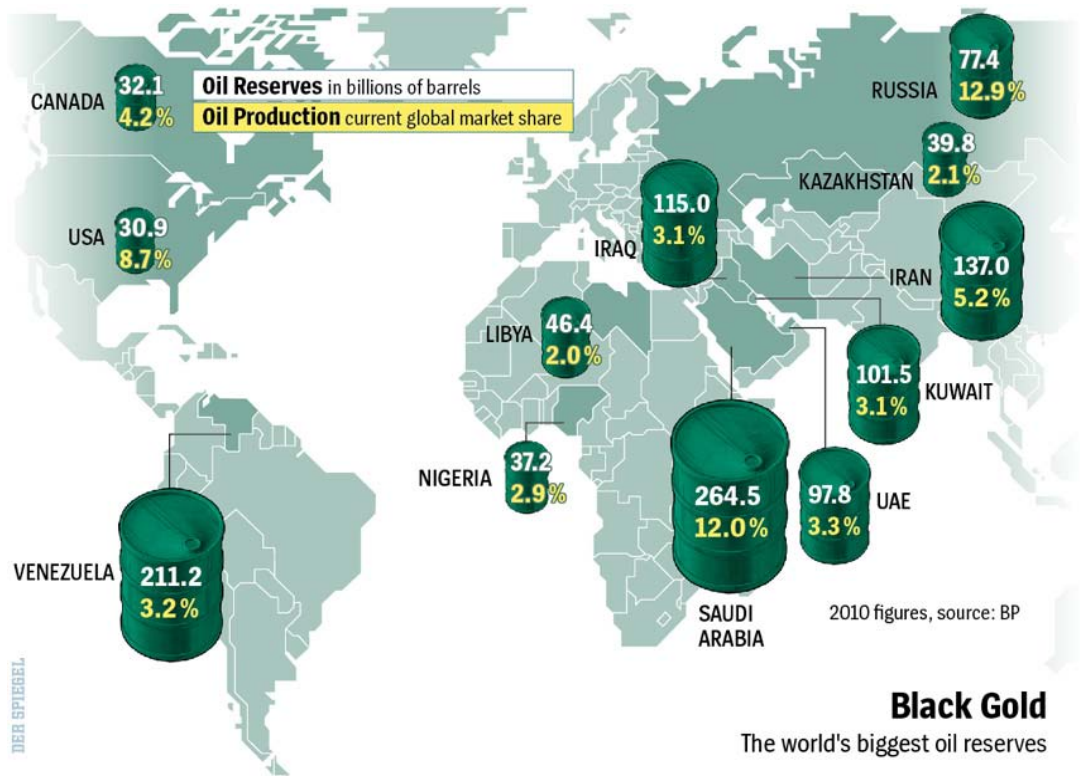
	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en Gtep)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole ^{N 1}	1 653 GBI	234	23 %	4,0	58
Gaz naturel ^{N 2}	208 Tm ³	187	18 %	3,3	57
Charbon ^{N 3}	861 Gt	564	56 %	3,95	145
Uranium ^{N 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

Source : [BP Statistical Review of World Energy 2012 \(chiffres 2011\)](#), sauf réserves d'uranium et réserves (ou potentiel) renouvelable. Pour les **énergies renouvelables**, les réserves indiquées correspondent aux potentiels annuels disponibles sur toute la surface terrestre.

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1 baril = 159 litre = 130 kg de pétrole (en moyenne).

3. Les ressources – Le Pétrole



Réerves prouvées de pétrole conventionnel en Milliard de barils (2010)

3 catégories

- ◆ Les **réerves prouvées** (1P ou P90) ressources que l'on est **raisonnablement certains** (90%) d'extraire en utilisant les techniques actuelles et au prix actuel.
- ◆ Les **réerves probables** (2P ou P50) ressources qu'il est **raisonnablement probable** (50%) d'extraire en utilisant les techniques actuelles et au prix actuel.
- ◆ Les **réerves possibles** (3P ou P10) sont celles qu'il serait possible (10%) d'extraire dans les circonstances les plus favorables.

Techniques d'extraction actuelles : 10 à 50 % du pétrole extrait (moyenne mondiale de 35% en 2009).

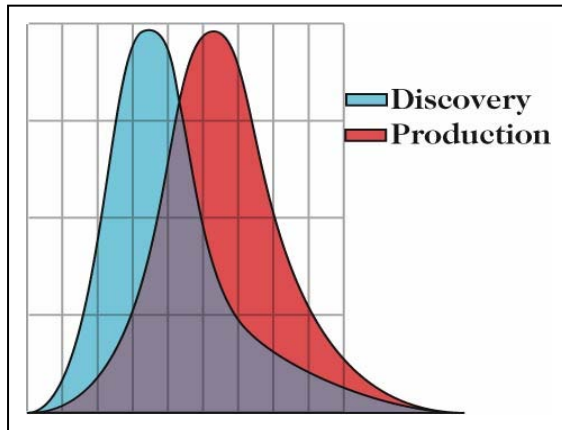
Stratégies de communication sur les réserves → chiffres précis difficiles à obtenir.

Par exemple, pour l'OPEP, les quotas de production sont attribués depuis au prorata des réserves : les réserves déclarées par l'Irak sont passées de 47,1 à 100 milliards de barils en 1987.

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

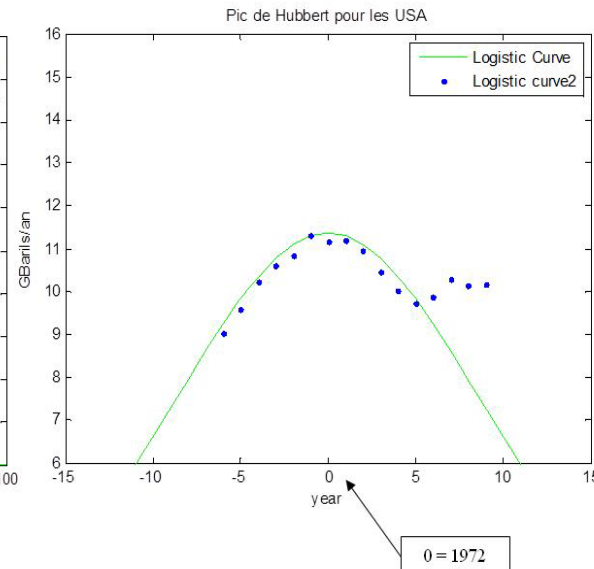
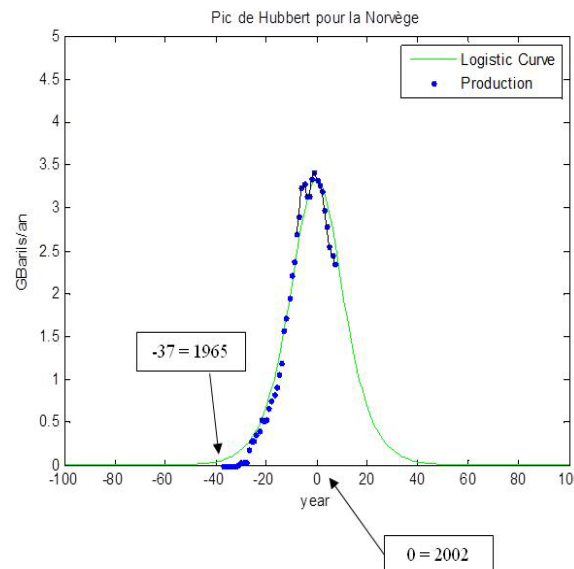
3. Les ressources – Le Pétrole

Le « peak oil »



En 1956 King Hubbert, un géologue de Shell, annonce que la production de pétrole des États-Unis déclinera à partir de la fin des années 1960. La plupart n'y ont pas cru, et pourtant... on parle maintenant du Pic de Hubbert (Hubbert's Peak).

En réalité, les choses sont un peu plus compliquées (mise à part pour la Norvège) :

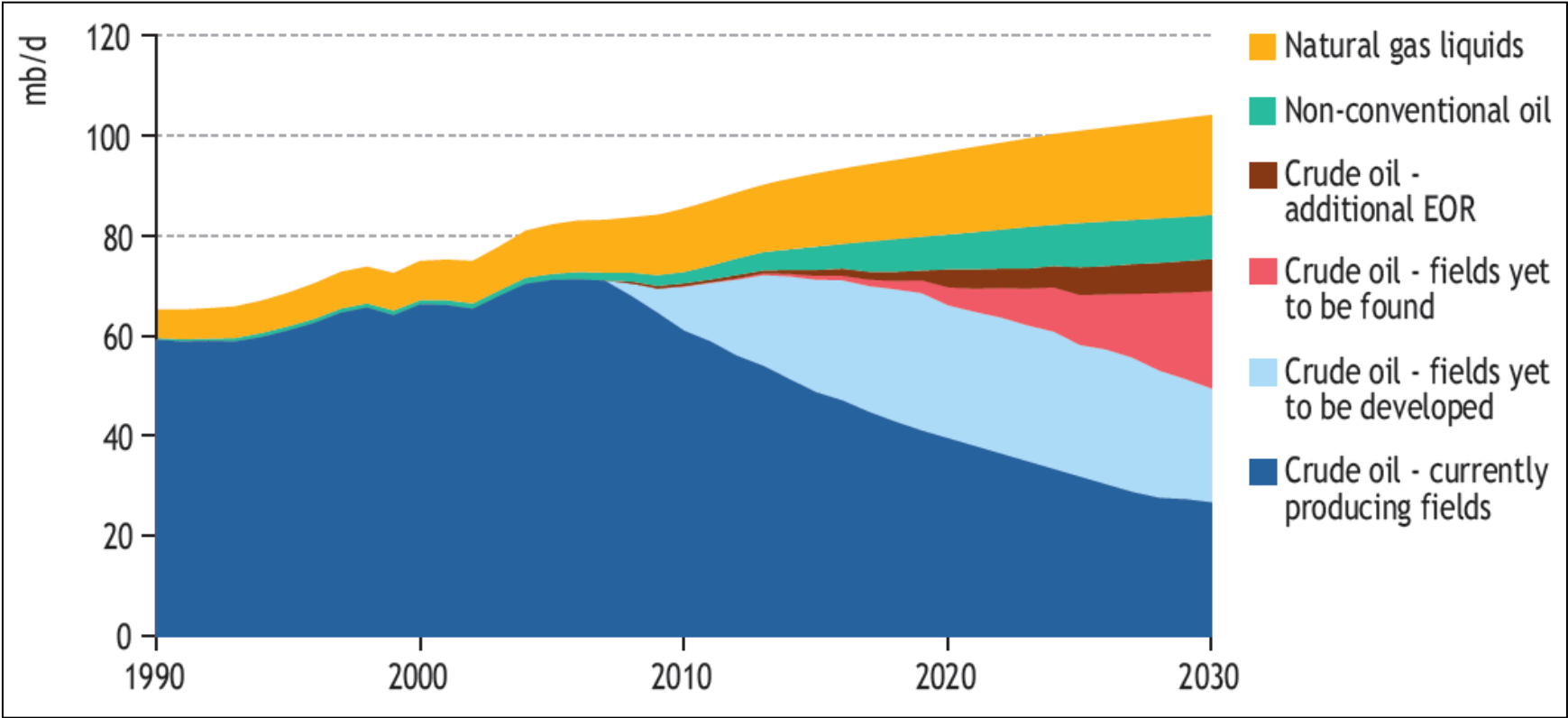


II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le Pétrole

Les scénarios

Scénario de L'IEA (International Energy Agency) considéré comme plutôt **optimiste**



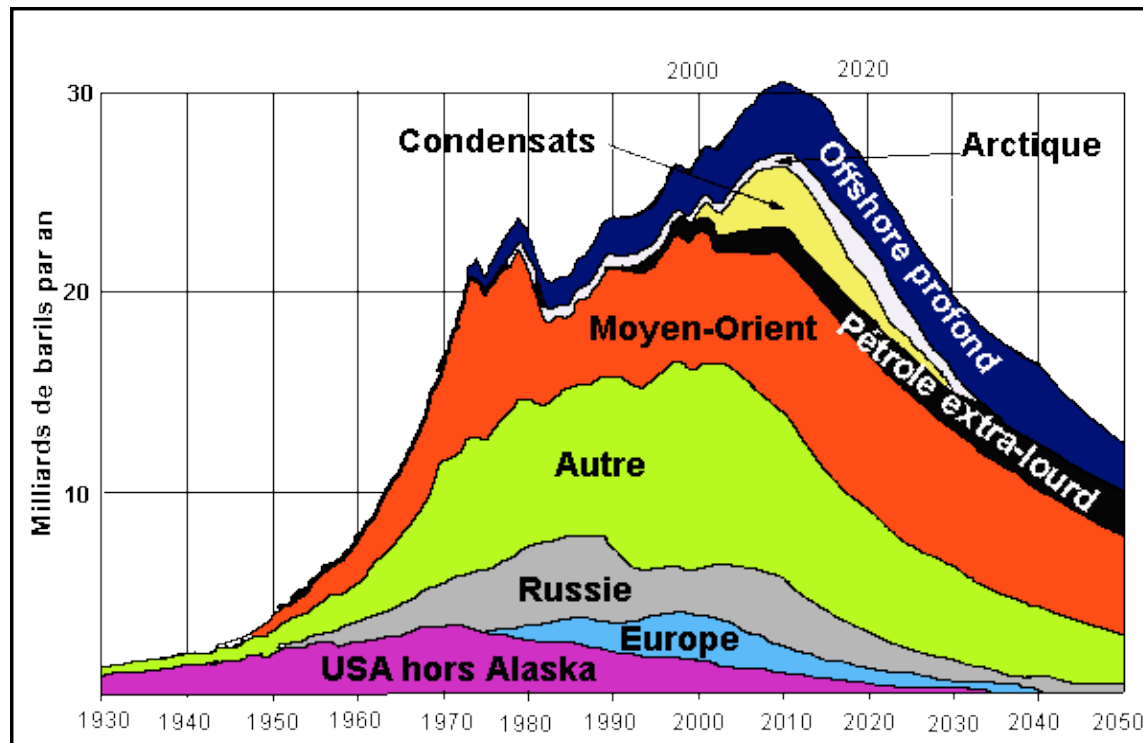
- Les pétroles dits non-conventionnels ne représenteront que quelques % de la production totale.
- L'amélioration des techniques d'extraction (EOR) offre peu de perspectives.
- En 2030, 40 Mb/j devront provenir de champs non exploités ou non connus aujourd'hui.
- En 2030, une grande partie de la production (20 Mb/j) provient des sous-produits du gaz naturel.

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le Pétrole

Les scénarios

Scénario de L' ASPO (Association for the Study of Peak Oil) considérée comme pessimiste



→ Tous les scénarios sont d'accord sur le fait que la production de pétrole conventionnel va décroître

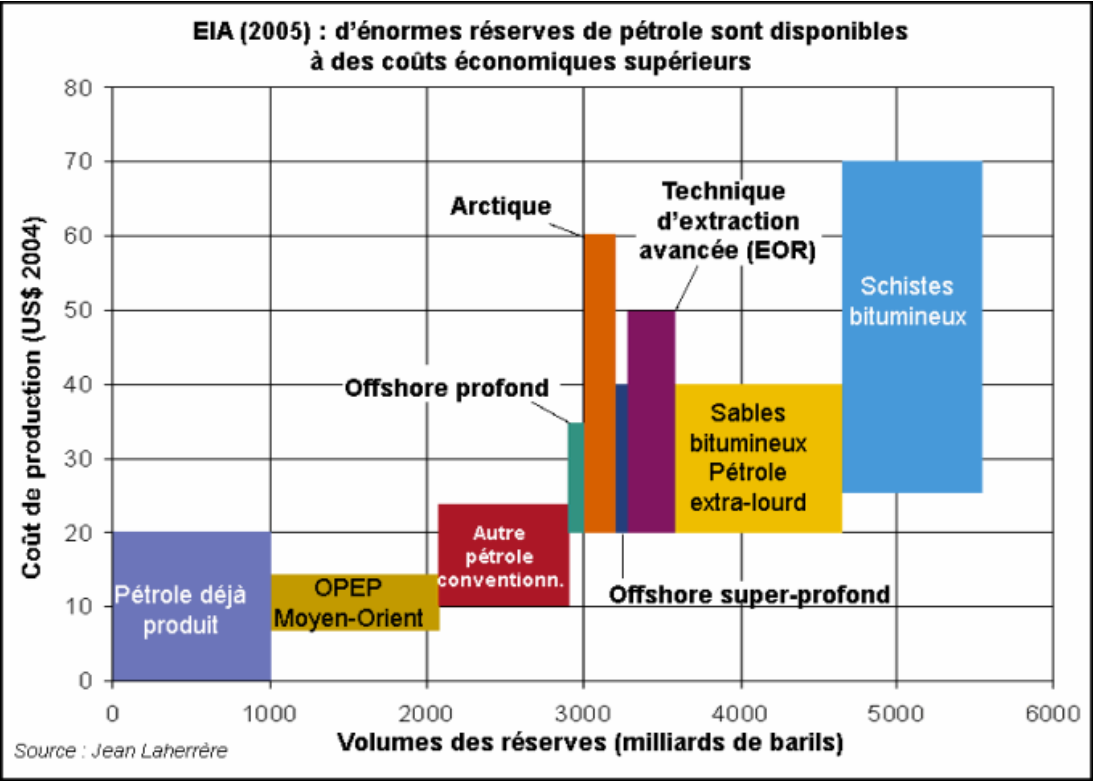
II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le Pétrole

Différentes sources de pétroles → différentes qualité & contenu énergétique.

→ en 2009, le brut traditionnel représentait (d'après l'ASPO) 86% de la production mondiale en volume...mais environ 91% en équivalent énergétique (sans parler de l'énergie nécessaire à l'extraction).

→ Les alternatives au brut traditionnel ne présentent donc pas le même intérêt ! Bien sûr, avec un cout du pétrole cher, il peut être rentable d'exploiter des sources de mauvaise qualité (schistes bitumineux). C'est pourquoi la quantité totale de pétrole récupérable dépend essentiellement du cout de l'énergie.



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le gaz naturel

PCI : 10kWh/m³

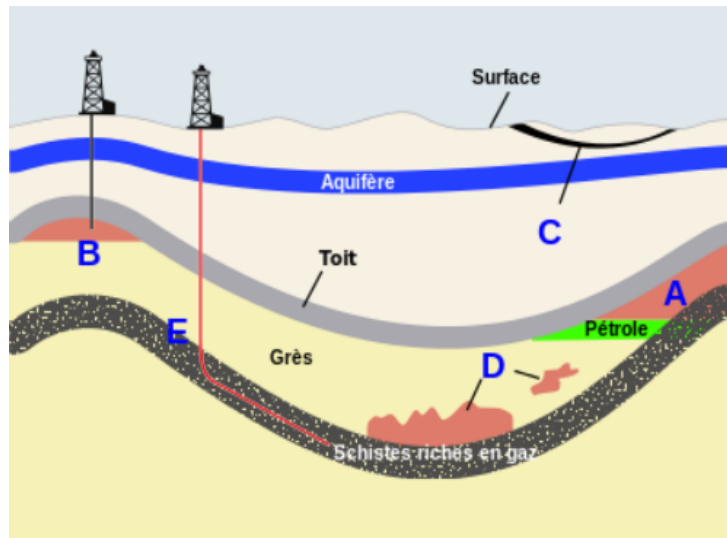


Schéma des différents types de source géologique du gaz naturel A Gaz associé (aux gisements de pétrole), B Gaz conventionnel non associé, C Gaz de houille, D Gaz de réservoir ultracompact, E Gaz de schiste

Les réserves de gaz naturel conventionnelles sont estimées à environ 200 000 Gm³ pour une production annuelle de 3000 Gm³, soit 60 années de production au rythme actuel

- ◆ Gaz conventionnel non associé : forme la plus exploitée de gaz naturel

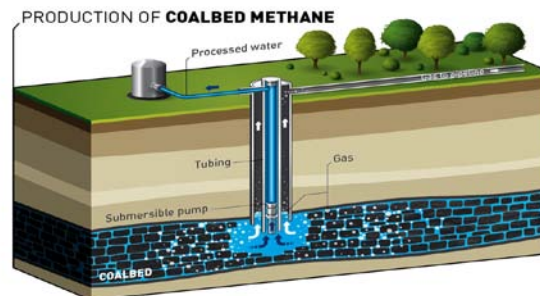
- ◆ Gaz associé : gaz présent en solution dans le pétrole, séparé lors de l'extraction.

Avant : considéré comme un déchet et détruit en torchère → pollution inutile.

Aujourd'hui : réinjecté dans les gisements de pétrole & valorisé (torchère 150 Gm³ /an en 2007)

- ◆ Gaz biogénique : fermentation de sédiments organiques - cycle rapide - faible profondeur – petits gisements → 20 % des réserves connues de gaz conventionnel

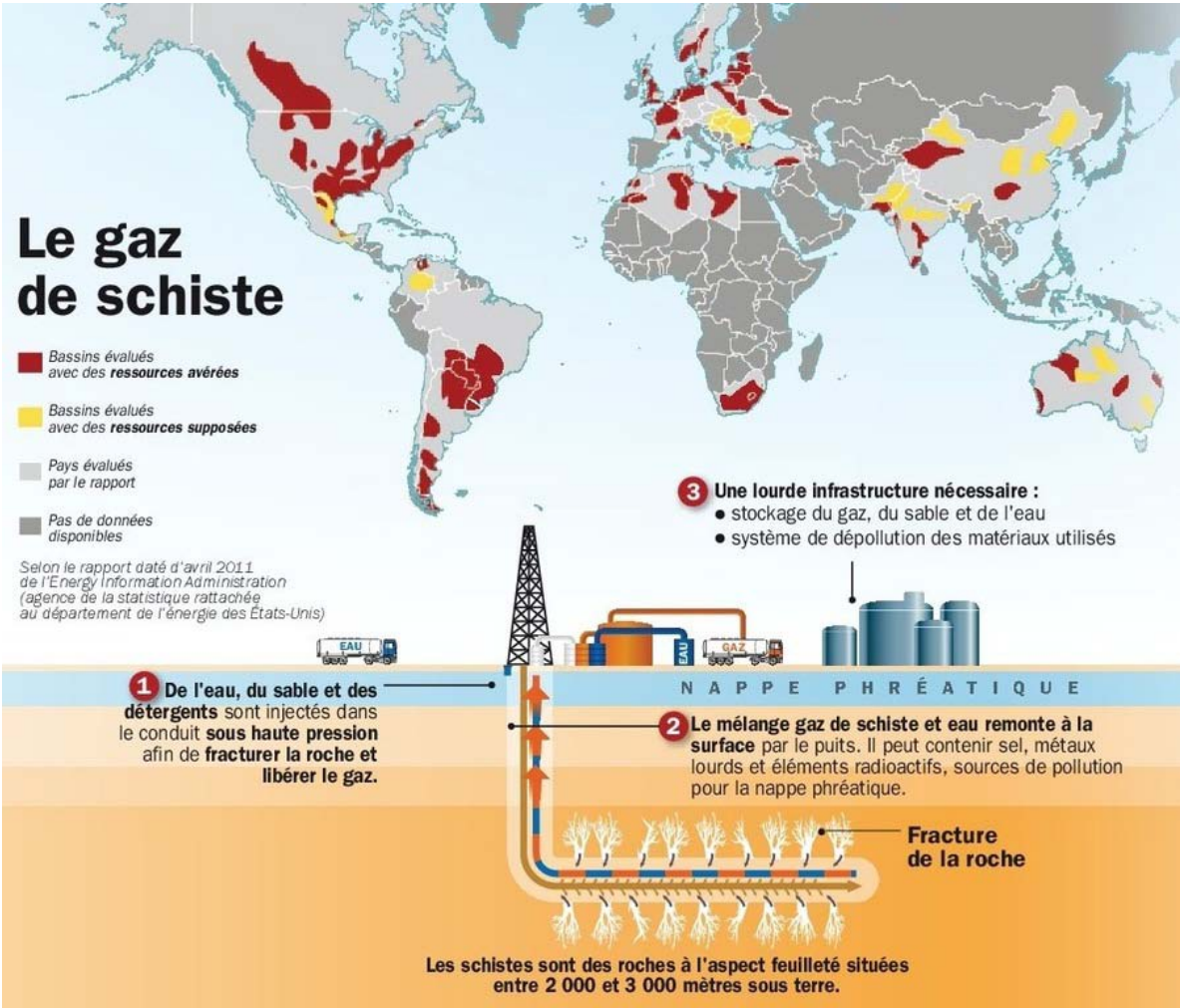
- ◆ Gaz de charbon :



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

◆ Gaz de schiste :

3. Les ressources – Le gaz naturel



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

◆ Gaz de schiste :

3. Les ressources – Le gaz naturel

Dans le monde, les ressources en gaz de schiste seraient du même ordre de grandeur que celles de gaz conventionnel, et ces ressources seraient mieux réparties (chiffres difficiles à vérifier). Les ressources seraient de l'ordre de 200.000 Gm³

Réerves de gaz de schiste

(techniquement exploitables, par zones géographiques, fin 2011, en billions de m³)

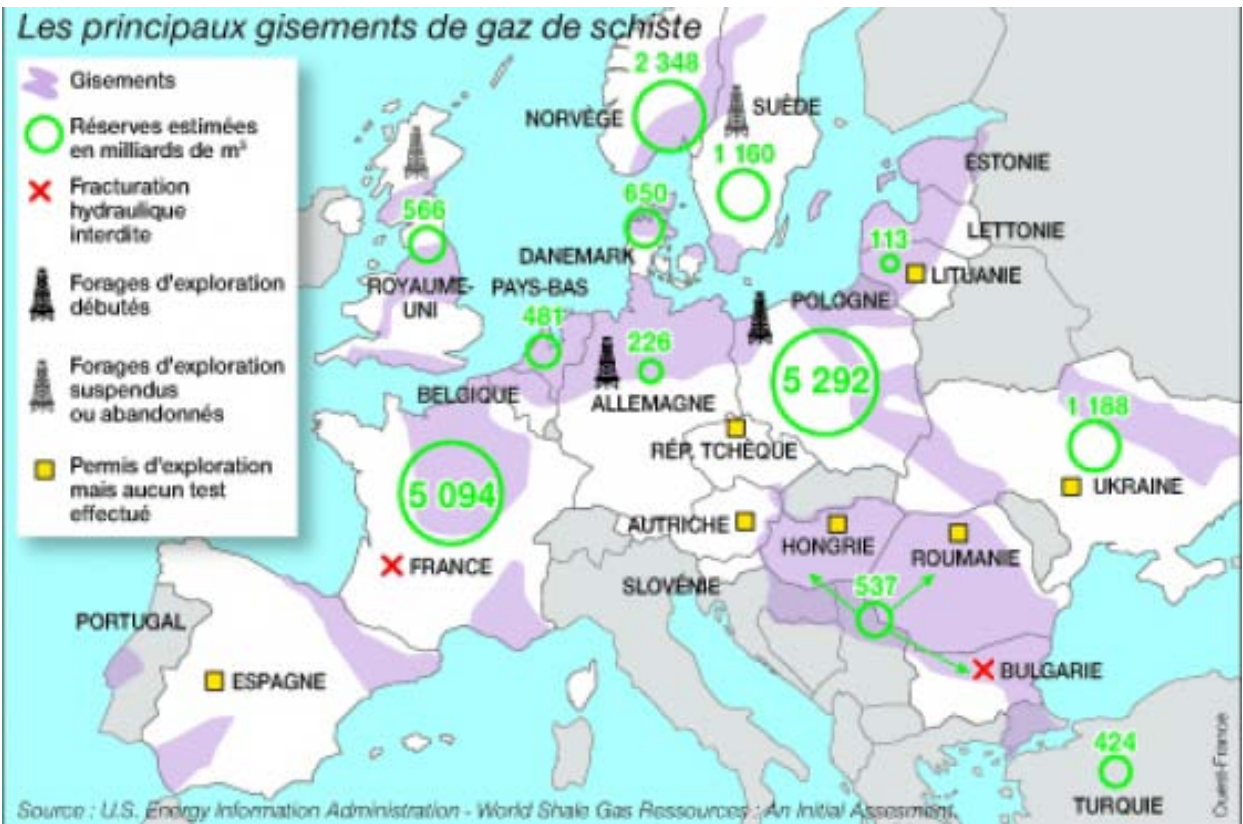


SOURCE : "WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT ON UNCONVENTIONAL GAS" (AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, 2012)

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le gaz naturel

◆ Gaz de schiste :



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le gaz naturel

◆ Gaz de schiste :



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le gaz naturel

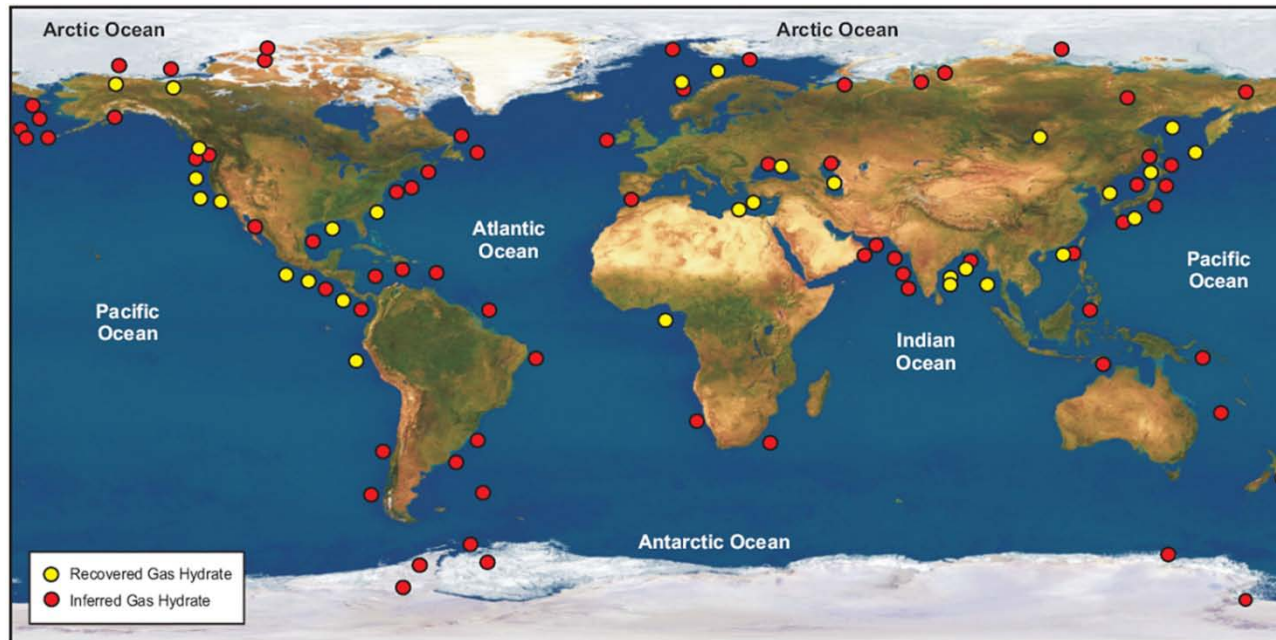
◆ les hydrates de méthane:

→ composé solide, résultat de la cristallisation d'un mélange d'eau et de méthane sous certaines conditions de température et de pression.

→ localisé principalement dans les régions où se trouve le pergélisol (couche du sol gelée en permanence) ou dans les couches sédimentaires des fonds océaniques

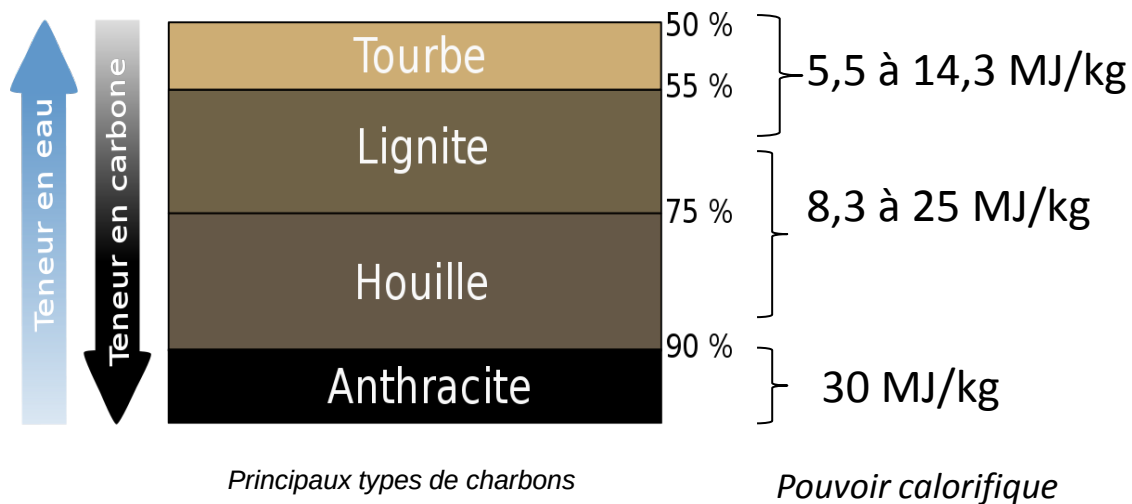
→ la quantité d'hydrate pourrait être énorme : $\approx 1\,000\,000\text{ Gm}^3$

→ ressource difficilement exploitable (tentatives au Japon)



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le charbon



Nombreuses variétés de charbon - les critères :

- Humidité
- Teneur en matières minérales (cendres)
- Pouvoir calorifique
- Inflammabilité, liée à la teneur en matières volatiles

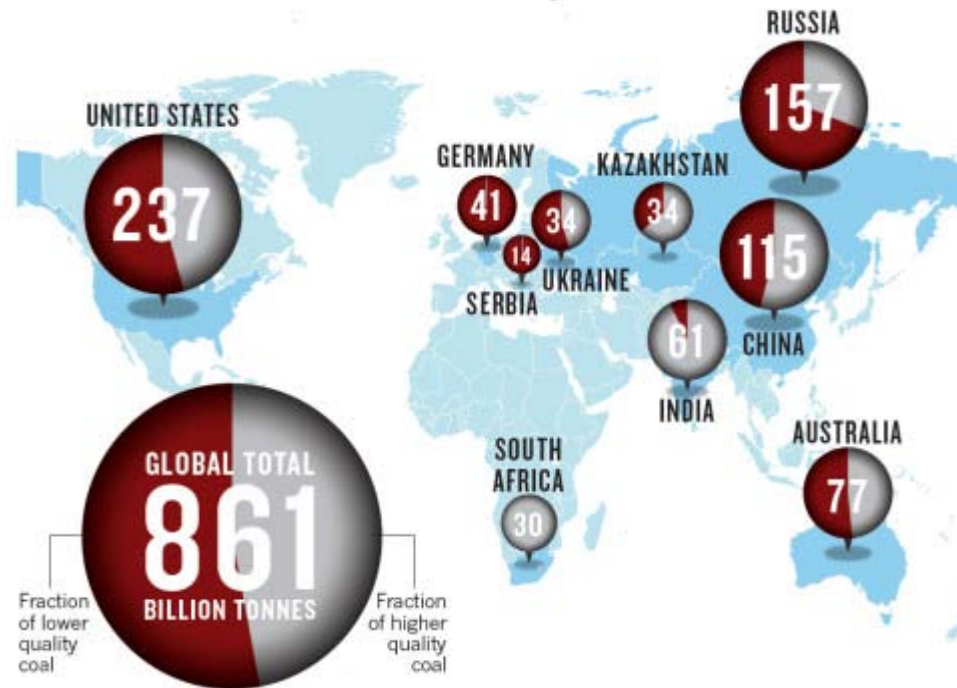


II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – Le charbon

Réserves prouvées de charbon : 861 Gt selon le World Energy Council (WEC)

→ 120 années de production au rythme actuel d'extraction



Cinq pays représentent à eux seuls 78 % des réserves mondiales : les États-Unis (28,9 %), la Russie (19 %), la Chine (13,9 %), l'Australie (9,2 %) et l'Inde (7,1 %). Les 60 autres pays en représentent en tout 22 %, dont l'Europe, 6 %, l'Afrique, 3,9 %, l'Ukraine, le Kazakhstan et l'Afrique du Sud 3,5 à 4 % chacun.

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

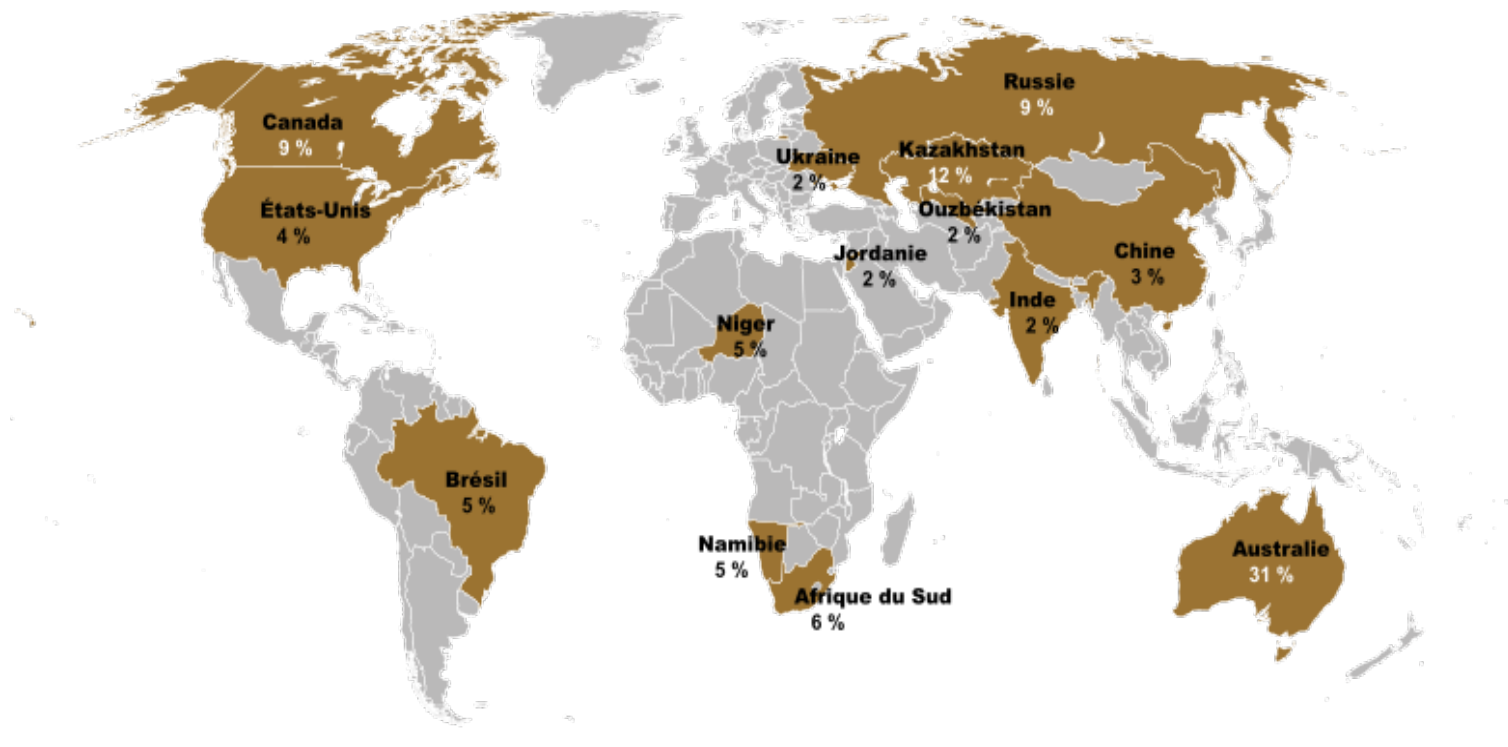
3. Les ressources – L'uranium

Selon l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique)

Ressources mondiales identifiées (en 2009) → à **5.4 Mt U** (coût < 130 US\$/Kg U)

Ressources potentielles non découvertes → à **10 Mt U**

→ 70 ans de fonctionnement du parc de réacteur actuel

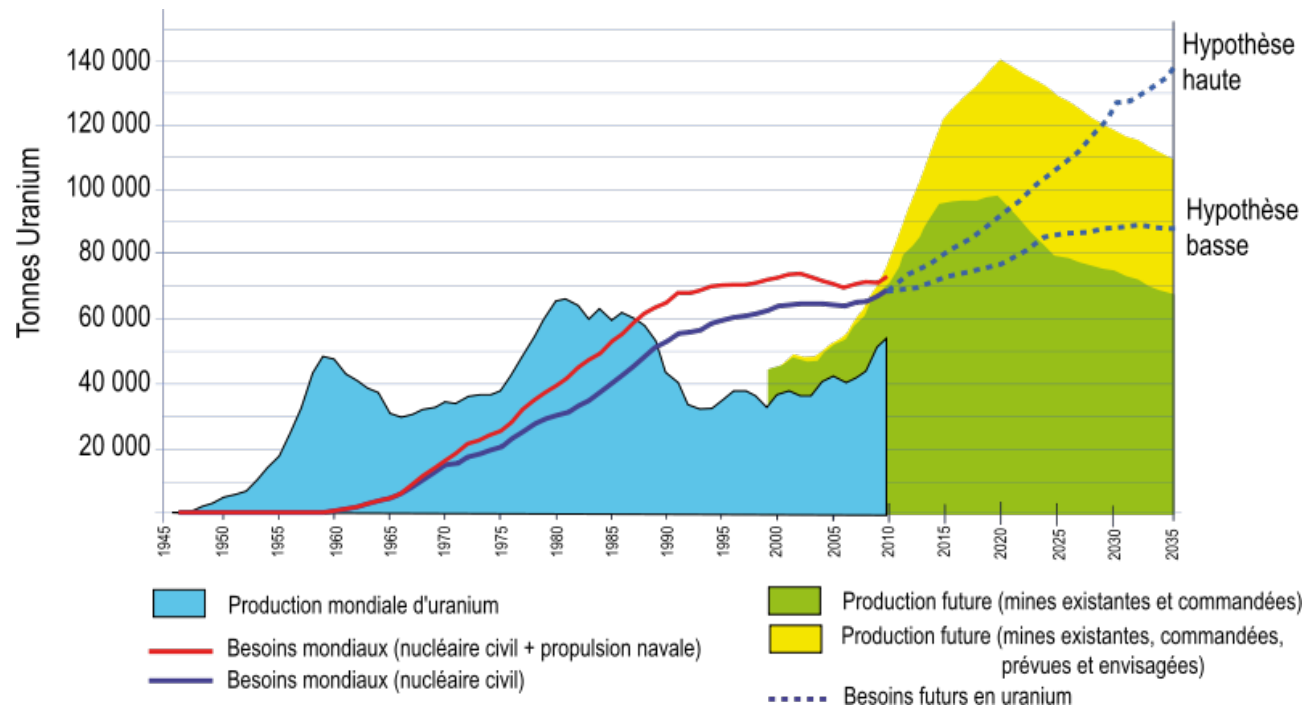


Répartition des réserves mondiales d'uranium (AIEA - livre rouge 2010)

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

3. Les ressources – L'uranium

Perspectives de production d'uranium



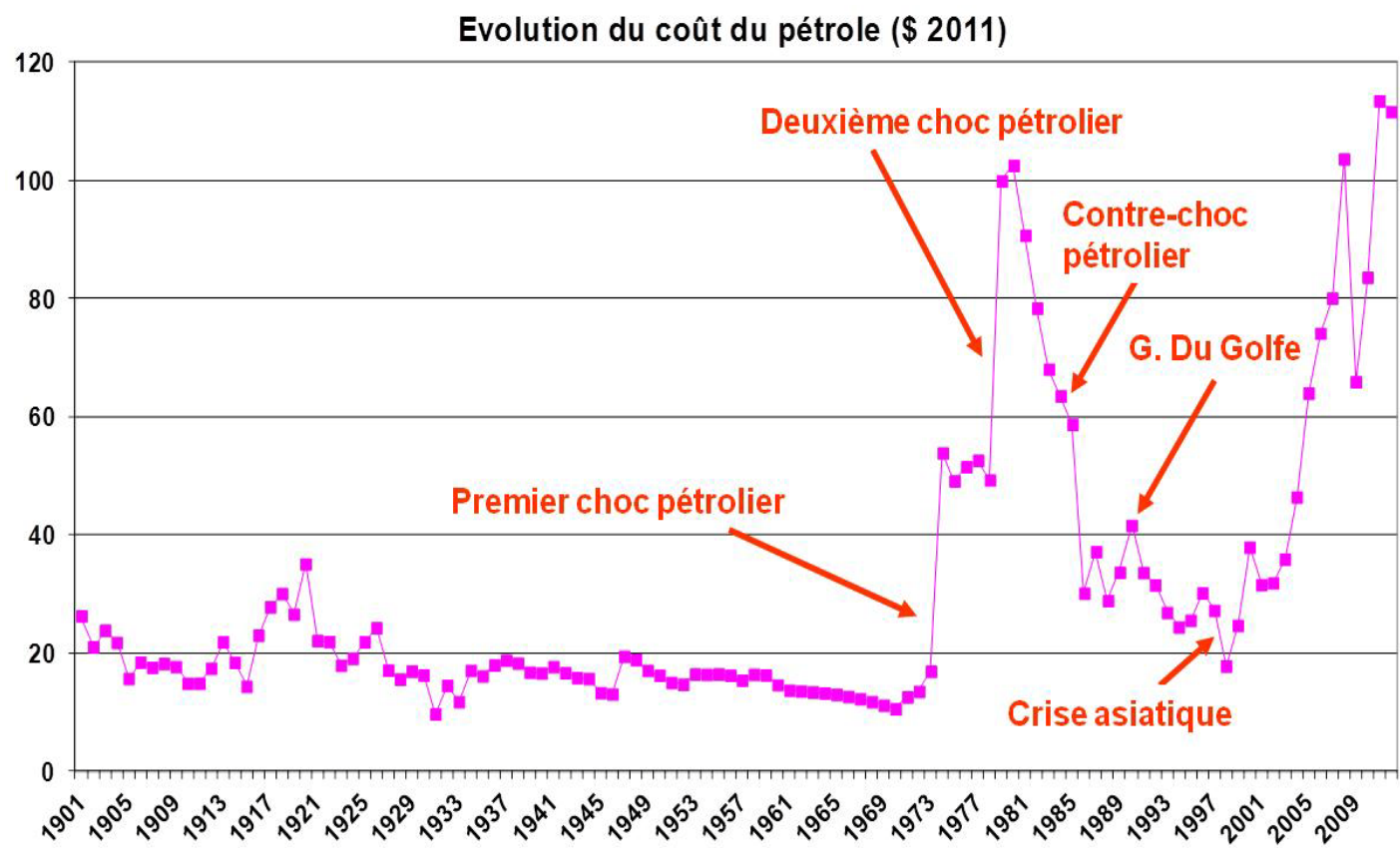
Hypothèse : développement des réacteurs à neutrons rapides (de 4^{ème} génération) :

- utilisation directe de l'isotope U238 : 100 × plus abondant que l'uranium 235
- utilisation pendant des millénaires des milliers de tonnes d'uranium appauvri en U235 stockés et considérés actuellement comme des déchets.
- utilisation du thorium : 4 × plus abondant que l'uranium dans le manteau terrestre
- 4000 ans de réserves

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – le pétrole

Le marché du pétrole est très instable depuis 1973 (premier choc pétrolier)



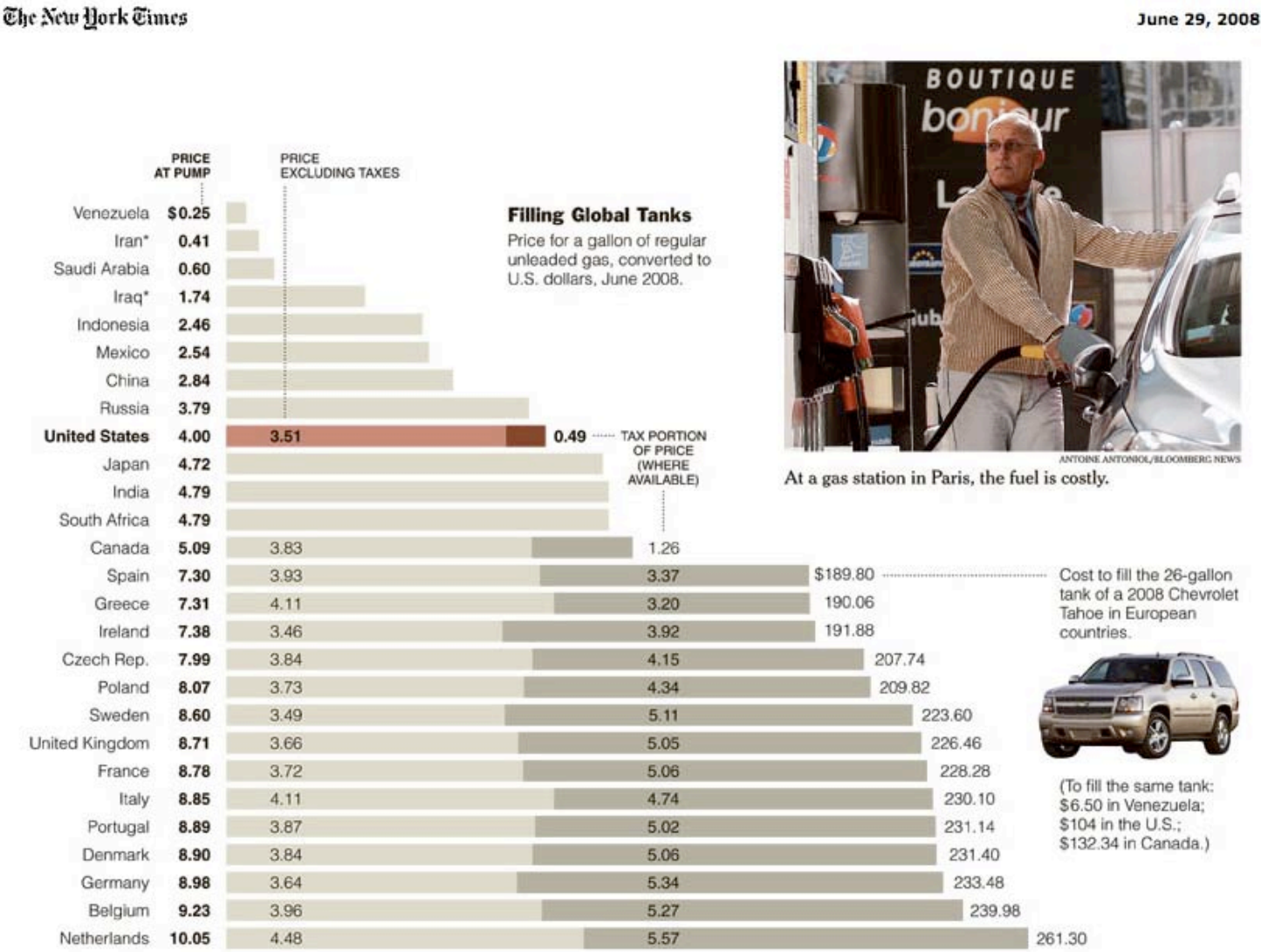
Évolution du prix moyen annuel du baril en dollars constants (2011) depuis 1900 – D'après les données de BP (Statistical Review of World Energy, 2013)

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

1 gallon = 3.78 L

4. Le coût des énergies – le pétrole

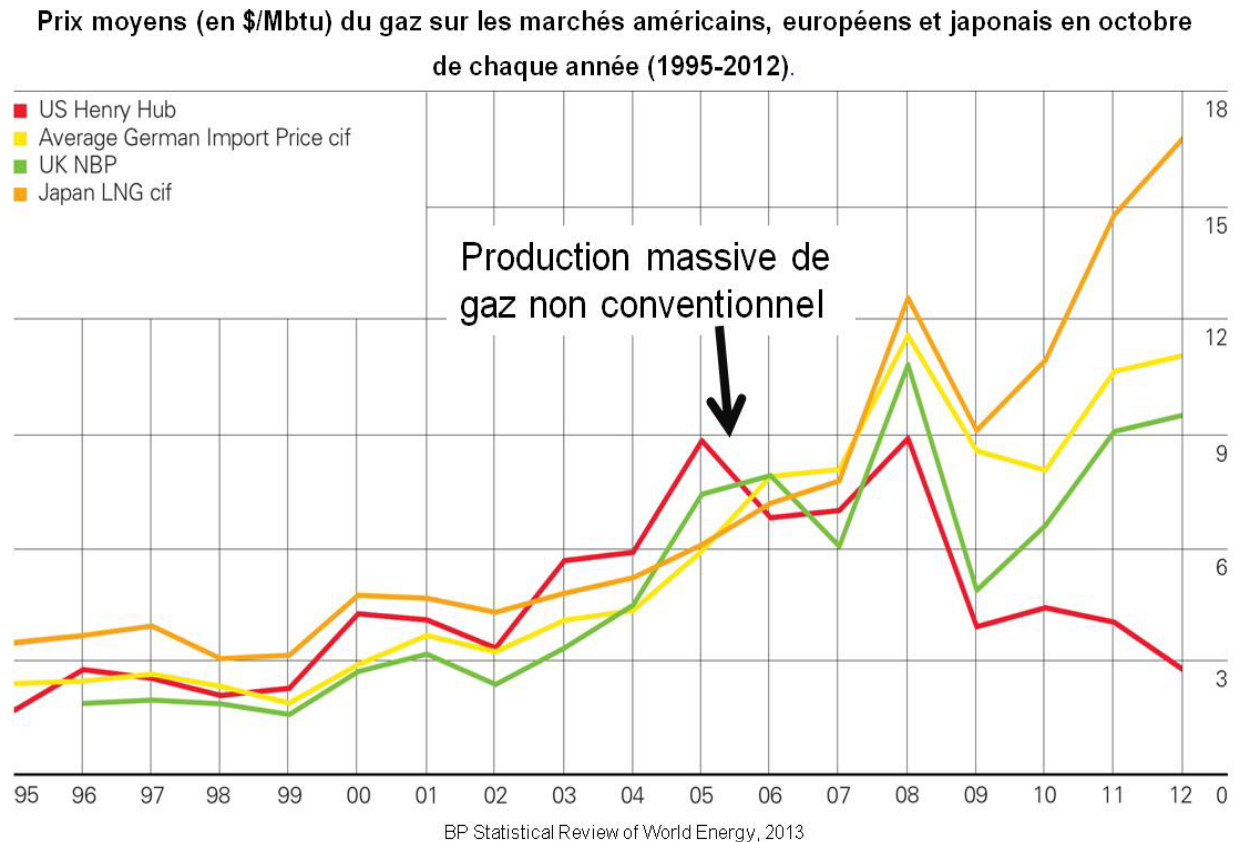
... mais le prix payé à la pompe dépend beaucoup des taxes



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – le gaz naturel

Il n'existe pas de marché mondial du gaz : 6 fois plus cher au Japon qu'aux EU !!



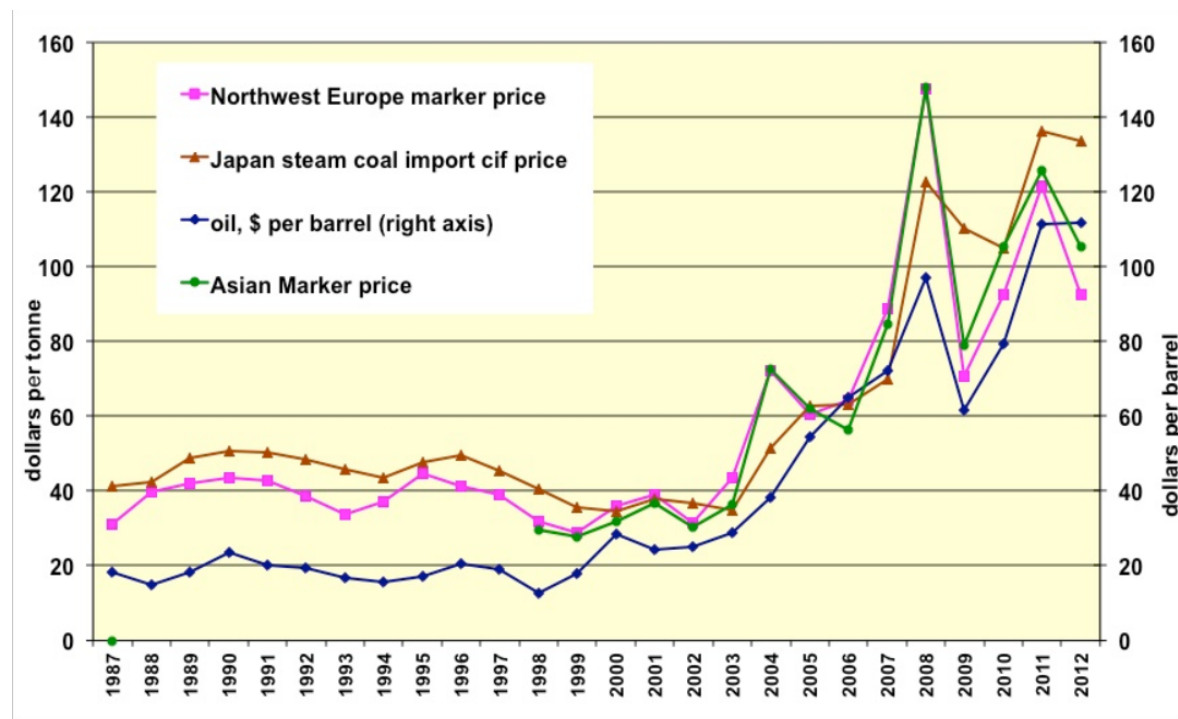
II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – le charbon

Prix du charbon :

→ varie du simple au triple en fonction de la qualité (lignite-houille-anthracite).

→ Importance des frais de transport



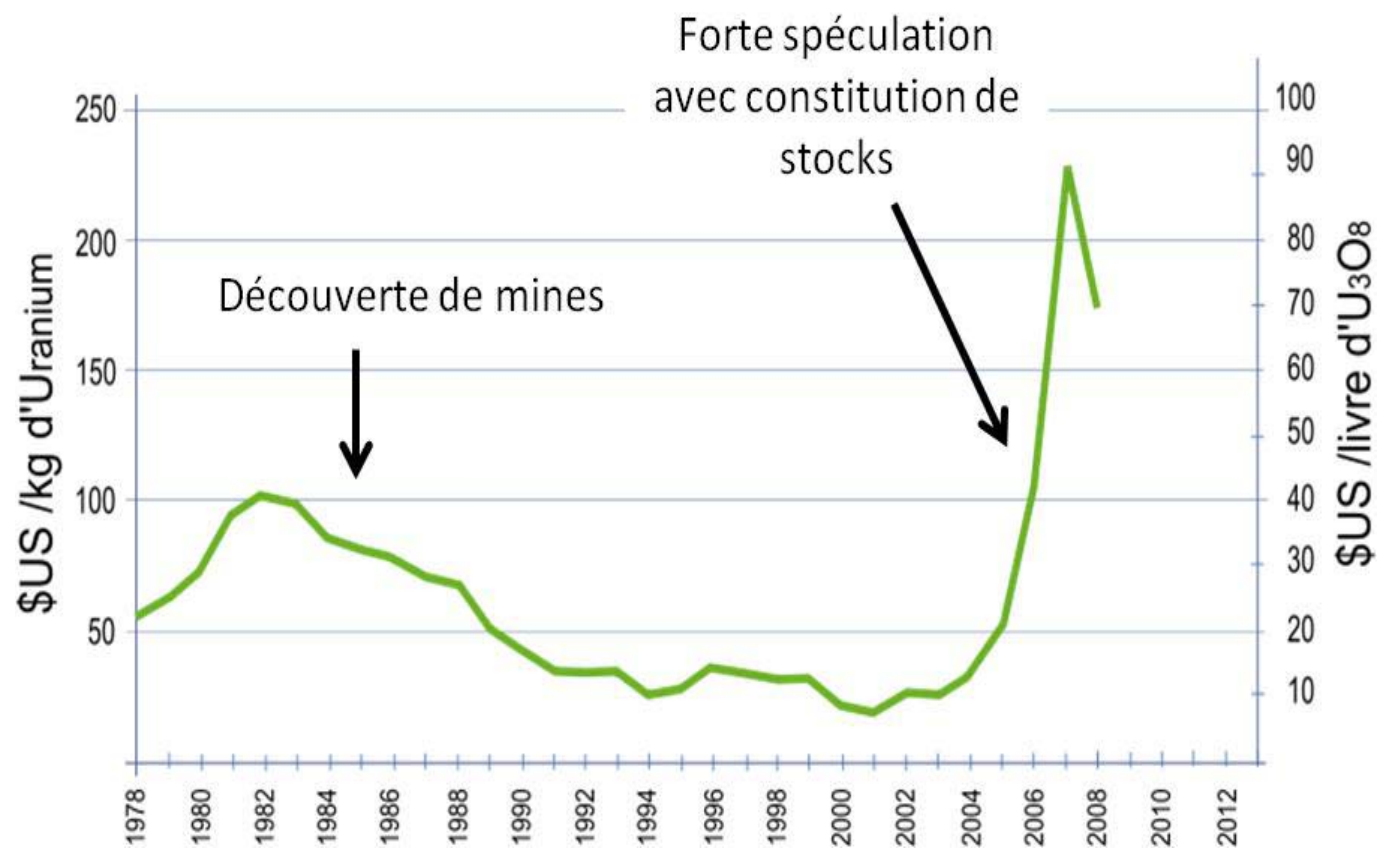
Evolutions respectives des prix spot (donc pour achat immédiat) du charbon pour deux zones importatrices (échelle de gauche, en dollars par tonne) et du pétrole (échelle de droite, dollars par baril). NB : les USA n'importent pas de charbon.

→ le prix du charbon est très corrélé au prix du pétrole

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – l'uranium

Le prix de l'uranium semble être decorrélié du prix du pétrole, obéissant à la loi d'un marché qui lui est propre

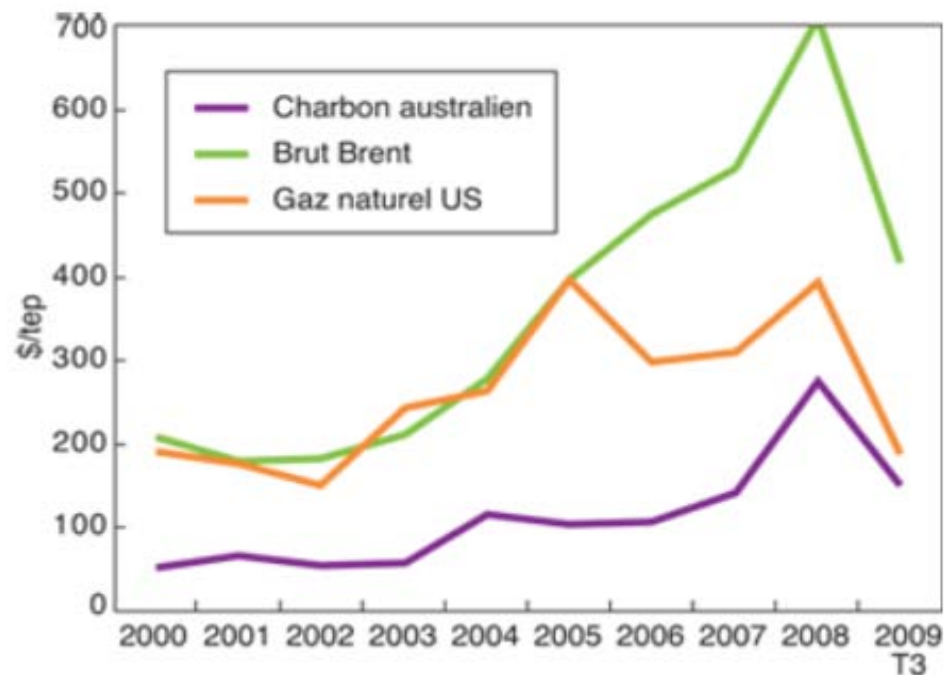


II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – comparaisons EF

Le pétrole reste la source d'énergie fossile la plus chère, suivie par le gaz naturel et le charbon.

Évolution des prix des énergies fossiles
(source : IFP Energies nouvelles, base Platt's)

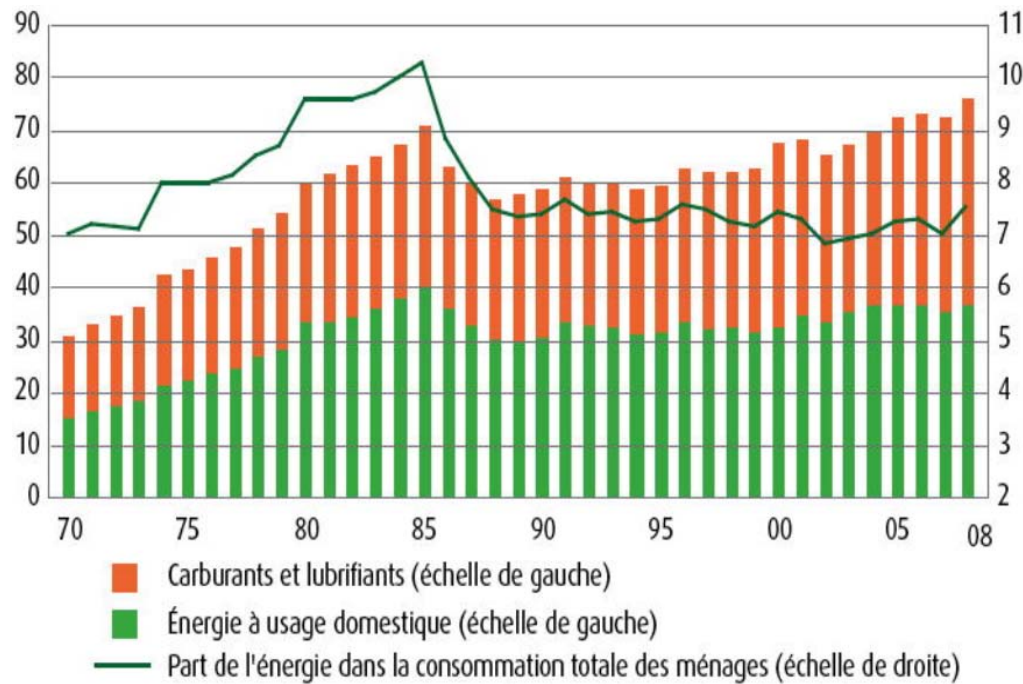


→ baisse globale des prix de l'énergie en 2008 suite à l'exploitation massive des gaz de schiste et pétroles de schiste aux Etat-Unis

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – pour le particulier

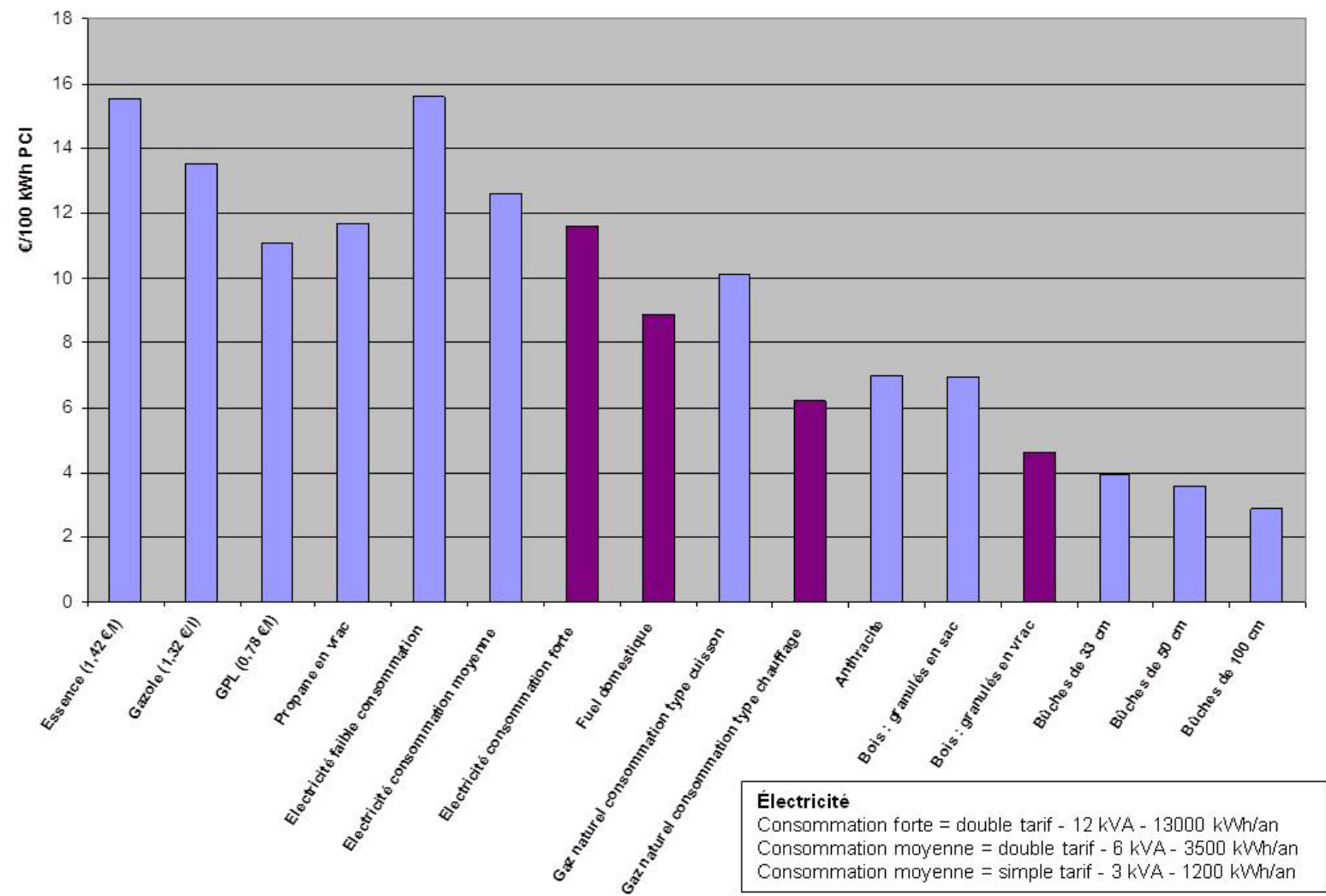
Contrairement aux idées reçues, la part de l'énergie dans la consommation des ménages n'a pas augmenté, mais a bien diminuée depuis les années 70



→ Surprise ! En termes réels, c'est-à-dire rapportée à ce que nous gagnons, l'énergie vaut de moins en moins cher (7.5% de nos dépenses) en 2008

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

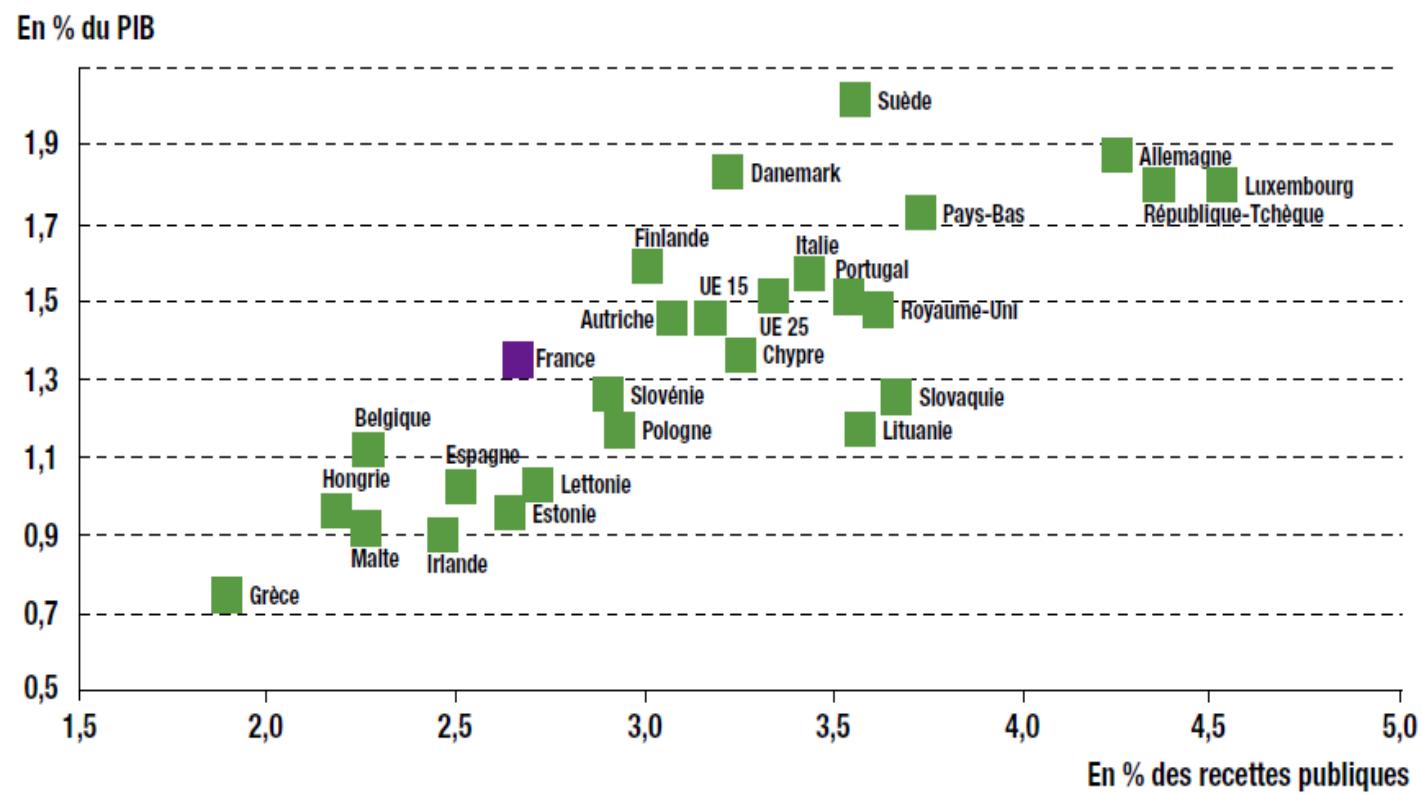
4. Le coût des énergies – pour le particulier



II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – taxes sur l'énergie

Comparées au reste de l'Europe, les taxes sur l'énergie restent relativement faibles en France (en % du PIB et des recettes publiques)

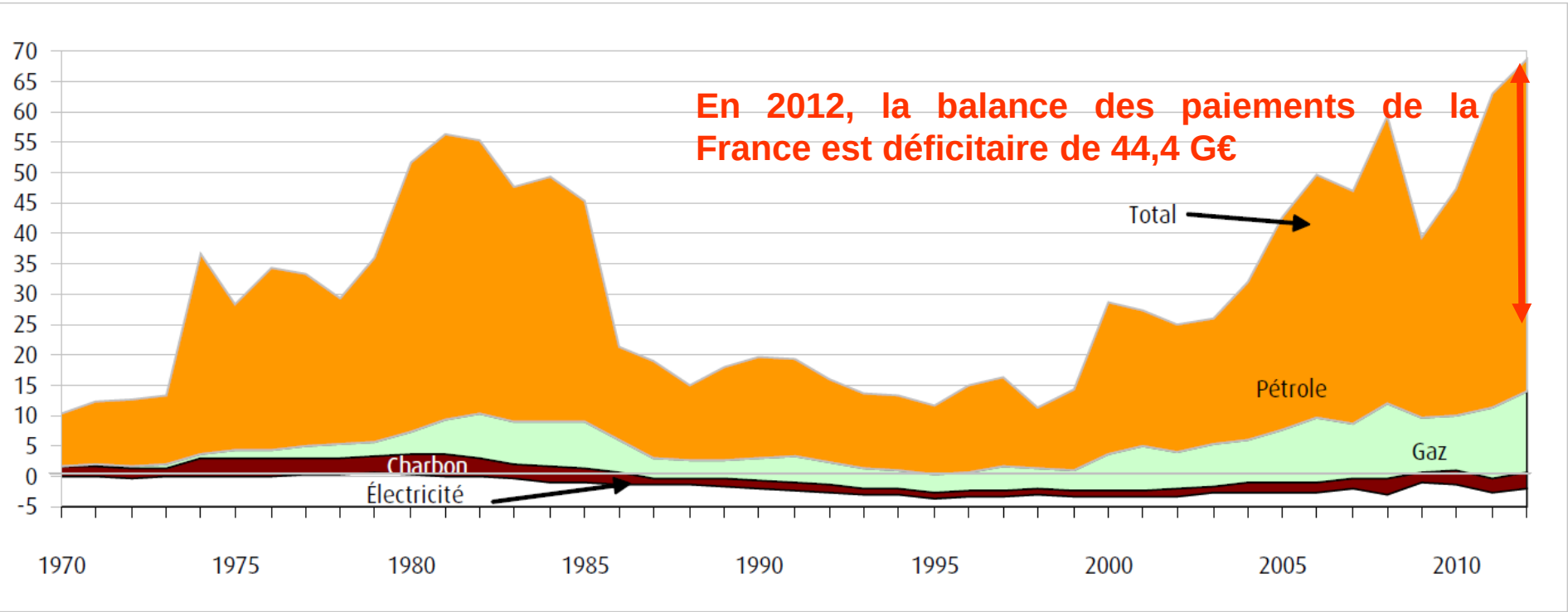


II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – facture énergétique de la France

La facture énergétique déclinée par type d'énergie

En milliards d'euros 2012

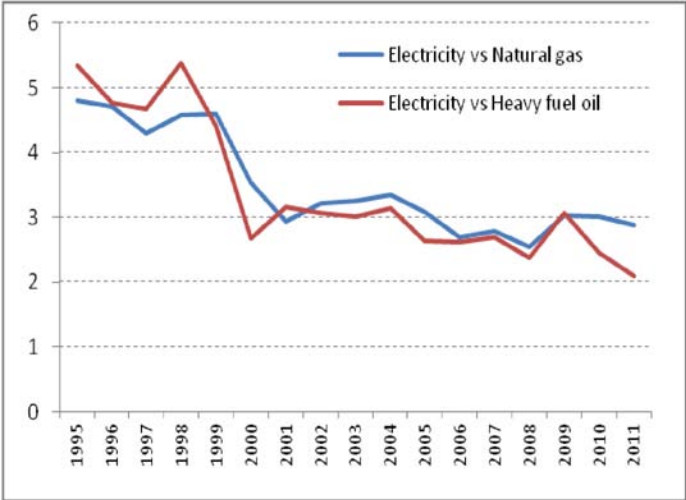


→ La facture énergétique de la France ne cesse de croître. Elle représentait en 2012 environ 3,4% du PIB, soit 69 G€ (Milliards d'euros)

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – coût de l’électricité

	Électricité	
	Entreprises Prix ¹ hors TVA	Ménages Prix TTC
Allemagne	11,3	20,9
Autriche	10,6	17,0
Belgique	11,5	18,8
Bulgarie	5,9	7,8
Chypre	16,0	19,4
Danemark	10,6	25,5
Espagne	10,0	14,3
Estonie	5,5	8,0
Finlande	6,6	11,4
France	7,0	11,5
Grèce	9,1	12,6
Hongrie	11,7	15,6
Irlande	13,4	18,0
Italie	14,6	22,3
Lettonie	7,3	9,2
Lituanie	8,2	8,2
Luxembourg	11,1	14,6
Malte	12,1	14,8
Pays-Bas	11,5	19,3
Pologne	9,3	12,2
Portugal	9,4	14,2
République tchèque	11,3	11,9
Roumanie	8,8	10,8
Royaume-Uni	10,4	14,3
Slovaquie	12,4	12,9
Slovénie	9,9	11,2
Suède	7,5	15,8
Union européenne	10,4	15,8



Evolution comparée des prix moyens de l’électricité, du gaz naturel et du fuel lourd en Europe.

→ tout en restant plus élevé, le prix de l’électricité devient de plus en plus compétitif par rapport aux énergies fossiles

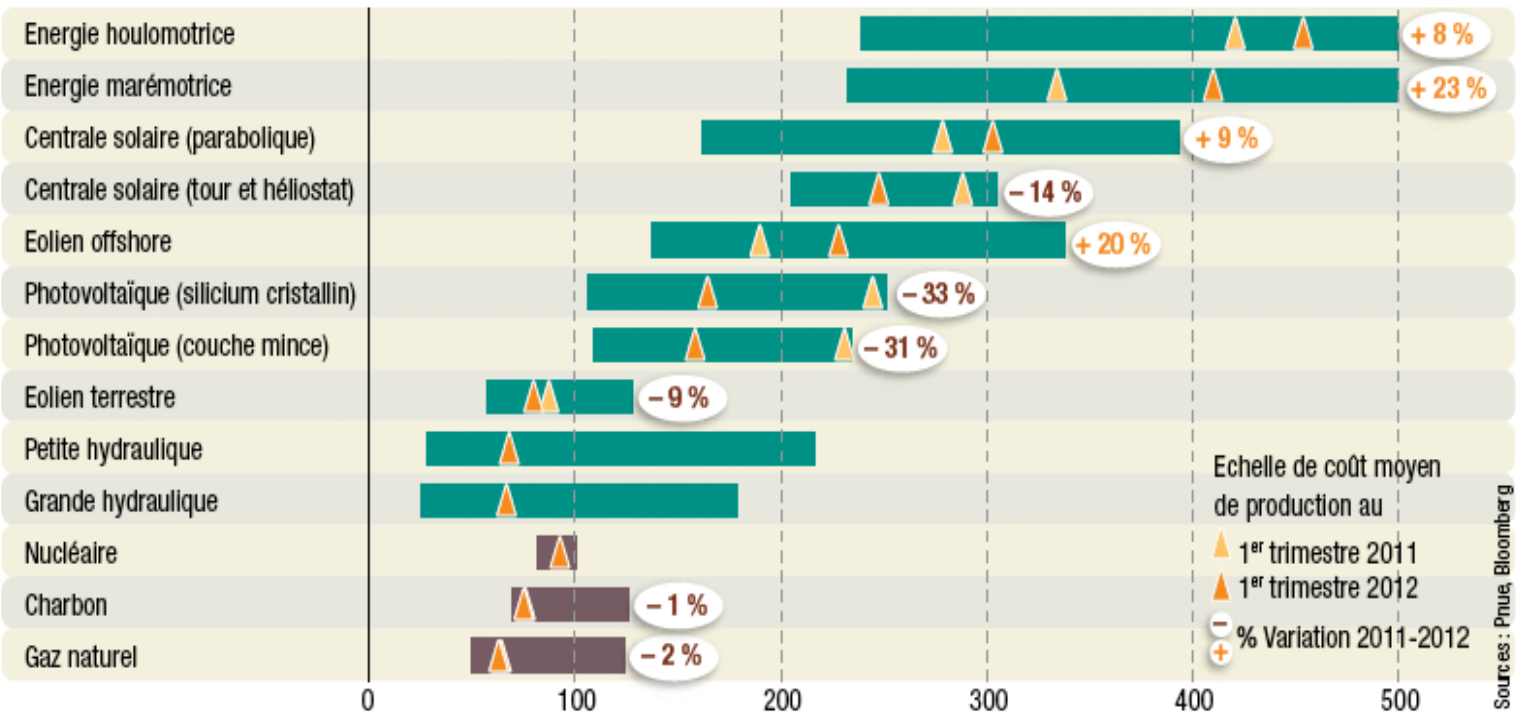
→ prix de l’électricité extrêmement variable suivant les quantités achetées et la fiscalité adoptée. Il peut varier d’un facteur 3 en Europe !

Prix de l’électricité en Europe en 2008 (en c€/kWh).

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

4. Le coût des énergies – coût de l'électricité

Le cout de production de l'électricité dépend des technologies adoptées, dont certaines évoluent très rapidement : c'est le cas par exemple de l'électricité photovoltaïque.



Coûts de production de l'électricité suivant la source d'énergie utilisée, en dollars par MWh (1^{er} trimestre 2012)

Exercices : calculs d'ordres de grandeurs

I. Introduction : les sources d'énergie

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

1. Les accidents de production et transport
2. Les pollutions associées à la consommation
3. Le réchauffement climatique
4. Les tensions géopolitiques

IV. Les Energies renouvelables

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

VI. Réduction de la consommation

VII. Les scénarios pour le futur

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

1. Les accidents de production et transport

Pétrole & gaz $\approx$ 300 morts/an (plus les blessés)

Charbon $\approx$ 10 000 morts/an



Tchernobyl :

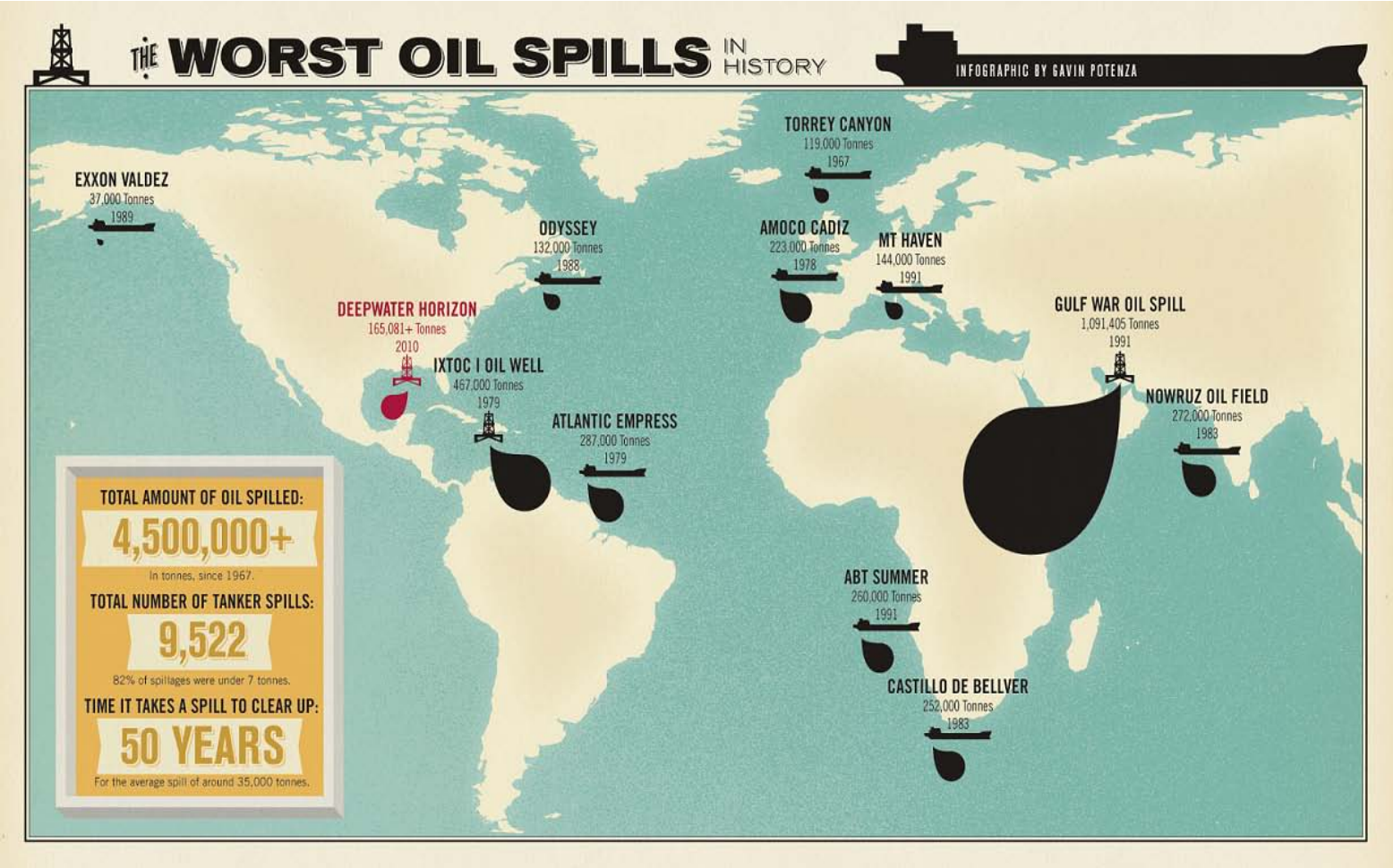
- officiellement 47 morts
- Centre international de recherche sur le cancer : 16 000 morts d'ici 2065
- Greenpeace : 95 000 morts



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

1. Les accidents de production et transport

Les marrées noires

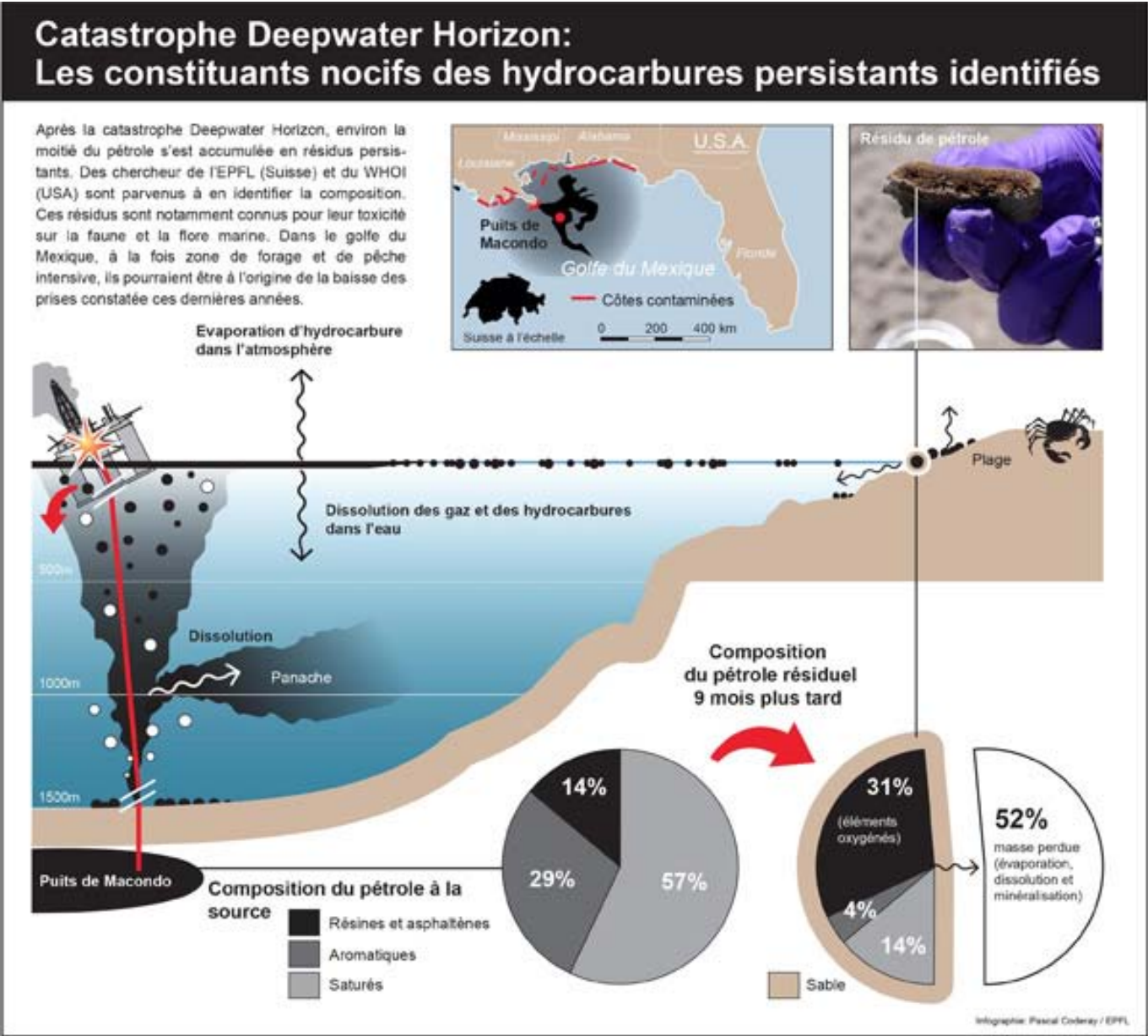


→ 4.5 Mtep de pétrole déversées en mer sans compter les dégazages sauvages

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

1. Les accidents de production et transport

Les marrées noires



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

2. Les pollutions associées à la consommation : pollution de l'air

Pollution de l'atmosphère (gaz toxiques, particules fines)
& des sols (acidification, métaux lourds présents dans les cendres)

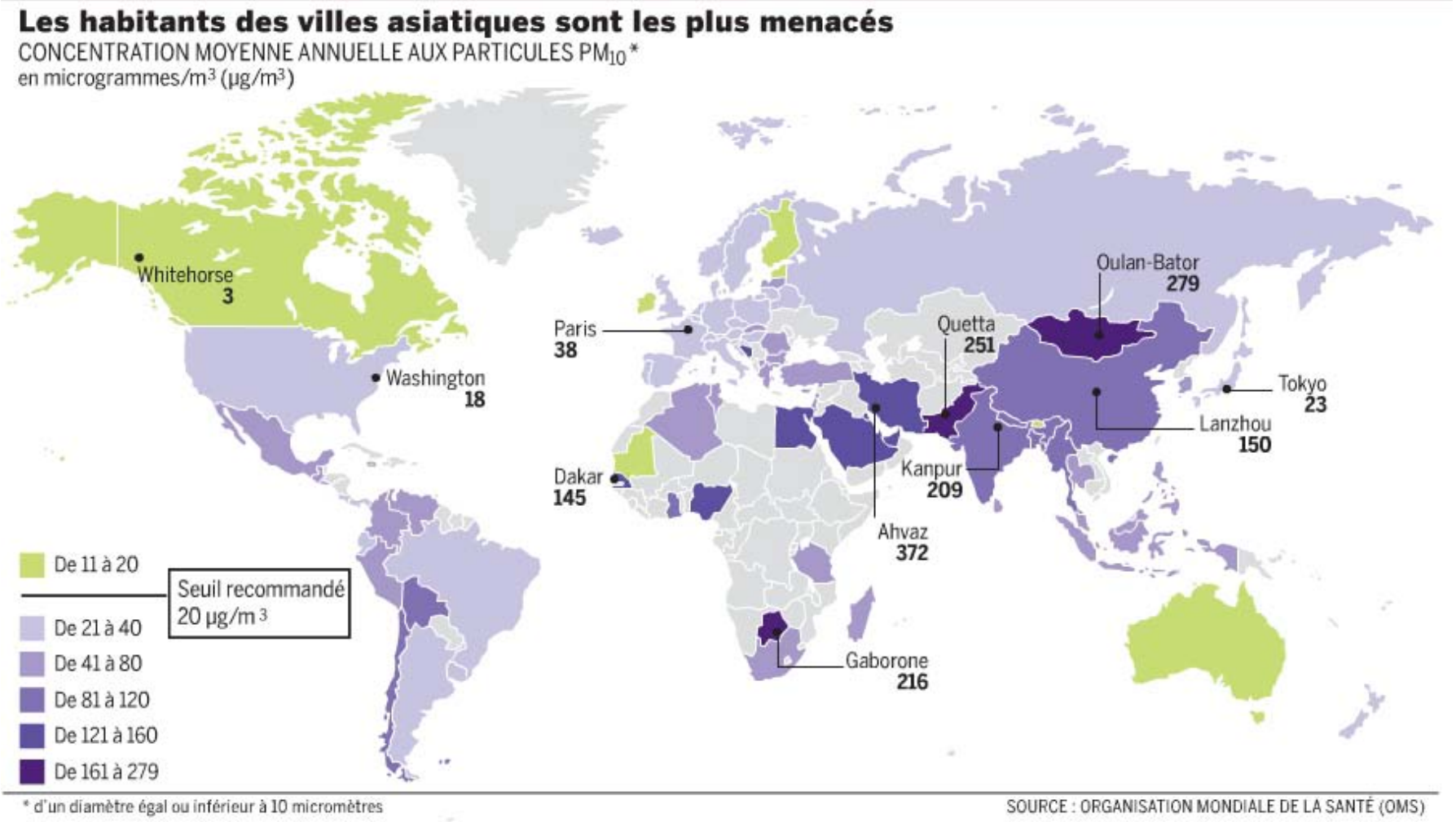
- NO_x : automobile → troubles respiratoires
- O_3 : polluant secondaire (provient des NO_x) → troubles respiratoires
- CO : combustion incomplète → troubles cardiovasculaires
- SO_2 : combustion fossile & biomasse → troubles respiratoires, pluies acides

Chine : premier émetteur de SO_2 : augmentation de 27% entre 2000 et 2005

- Hydrocarbures aromatiques polycycliques : moteur diesel → cancérigènes
- Particules fines : diesel, charbon, biomasse → allergies, troubles respiratoire, cancerigène
 - Particule $\phi > 10\mu\text{m}$ → retenues par les voies aériennes supérieures (nez, bouche)
 - PM_{10} : $\phi < 10\mu\text{m}$: particules fines → pénètrent dans les bronches
 - PM_1 & $\text{PM}_{0.1}$: $\phi < 1\mu\text{m}$ & $\phi < 0.1\mu\text{m}$: particules ultrafine → passent dans le sang
 - $\text{PM}_{2.5}$: $\phi < 2.5\mu\text{m}$: particules très fines → pénètrent dans les alvéoles pulmonaires

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

2. Les pollutions associées à la consommation : pollution de l'air

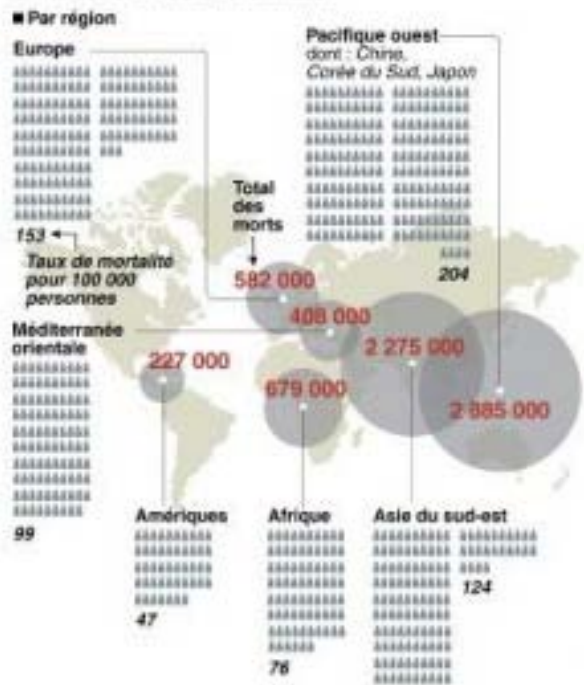


III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

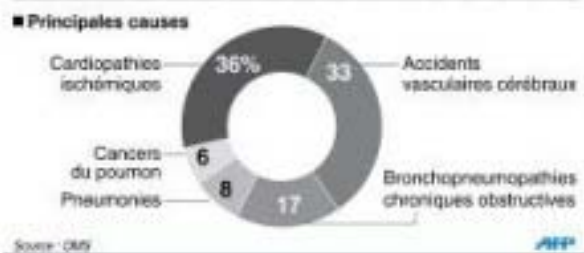
2. Les pollutions associées à la consommation : pollution de l'air

Les victimes de la pollution de l'air

La pollution atmosphérique a tué 7 millions de personnes en 2012 soit 12,5% des décès dans le monde*

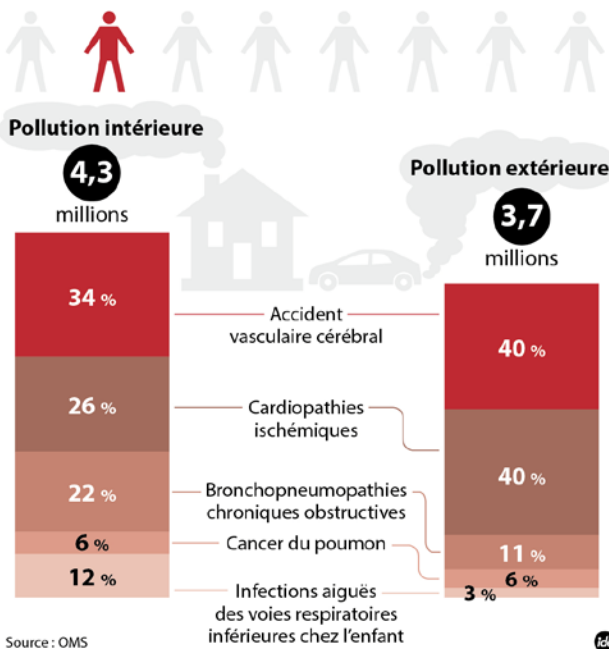


*Incluant la pollution de l'air domestique (fumées et émissions d'appareils de cuisson et de chauffage)



La pollution responsable de 7 millions de morts par an

En 2012, **une mort sur huit** serait due à la pollution



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

2. Les pollutions associées à la consommation : pollution de l'air



nuage brun d'Asie : 3 000 mètres d'épaisseur, surface équivalente à celle des É-U.

Pendant 4 mois en hiver, le ciel n'est pas lavé de ses poussières

Cette épaisse « brume de pollution » est considérée comme la *plus grosse pollution au monde*.

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

2. Les pollutions associées à la consommation : pollution de l'air



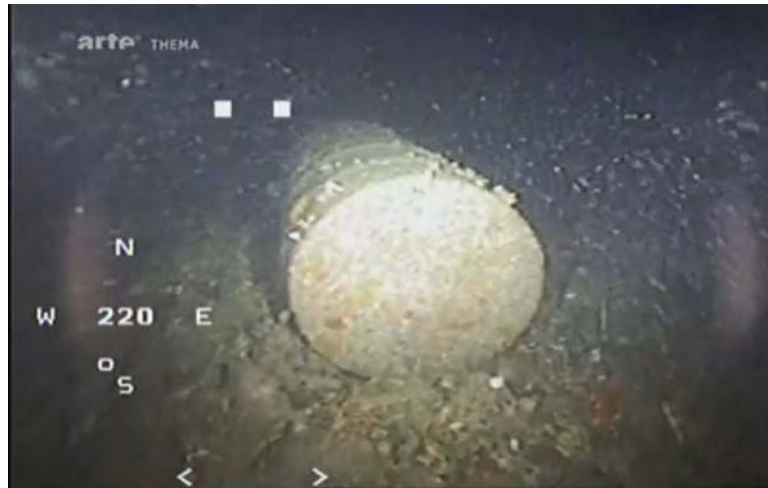
L'air de Pékin un jour après la pluie (gauche) et un jour ensoleillé (droite)

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

2. Les pollutions associées à la consommation : pollution radioactive

- Pollution radioactive :

- Essais nucléaires (atmosphériques)
- Fonctionnement des installations, déchets

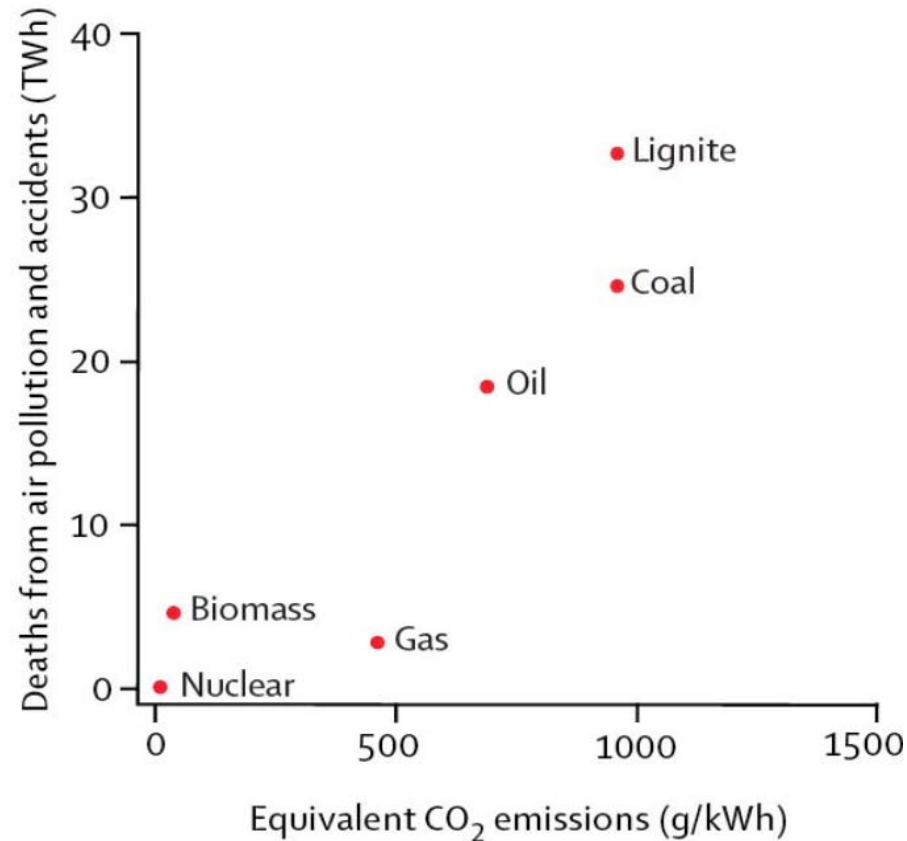


A Hurd deep, une dépression sous-marine située au cœur de la Manche, plus de 28.000 fûts radioactifs ont été immergés à seulement 100 m de profondeur.

« A une demi-heure de bateau de France, il y a de quoi s'inquiéter, surtout quand on sait que sur une île anglaise proche, le taux de leucémie infantile est bien trop élevé ».

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

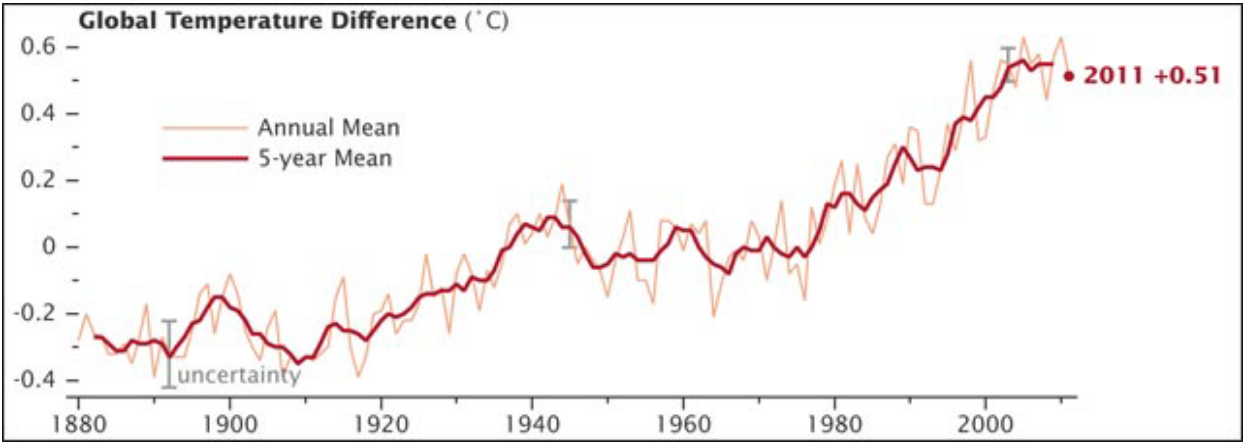
2. Les pollutions associées à la consommation : comparaison des sources



Electricity generation and health, Anil Markandya & Paul Wilkinson, The Lancet, 2007; 370: 979–90.

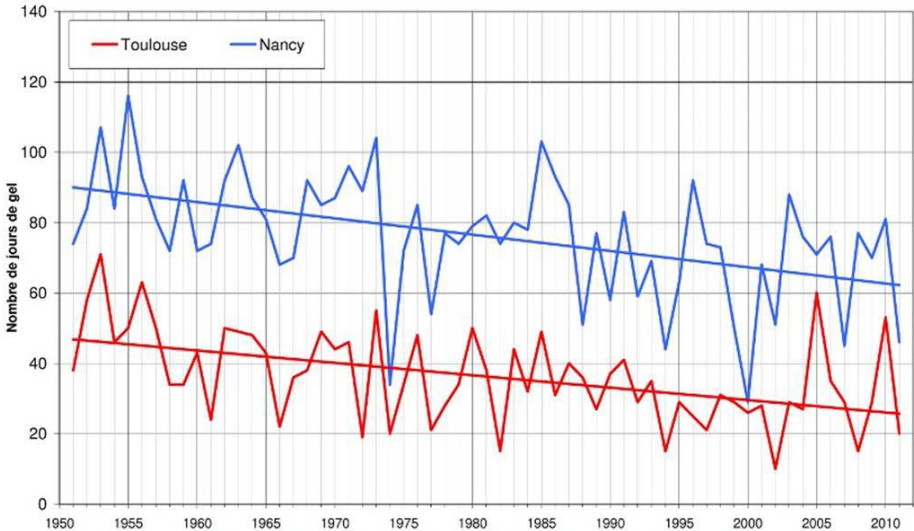
III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les preuves



http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=EoOrtvYTKeE#t=9

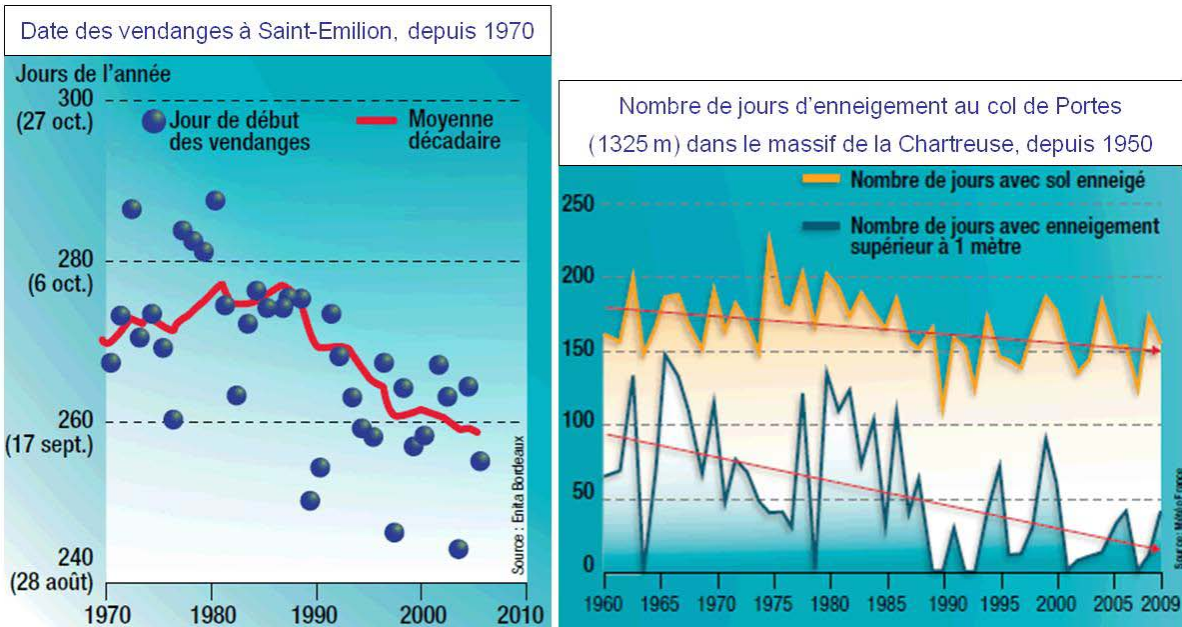
A Nancy, le nombre de jours de gel a diminué d'environ 30% entre 1950 et 2012.
A Toulouse, il a diminué de 40 à 50%.



<http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/fr/indicateur/nombre-de-jours-de-gel>

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les preuves



Alternatives économiques – Septembre 2013



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

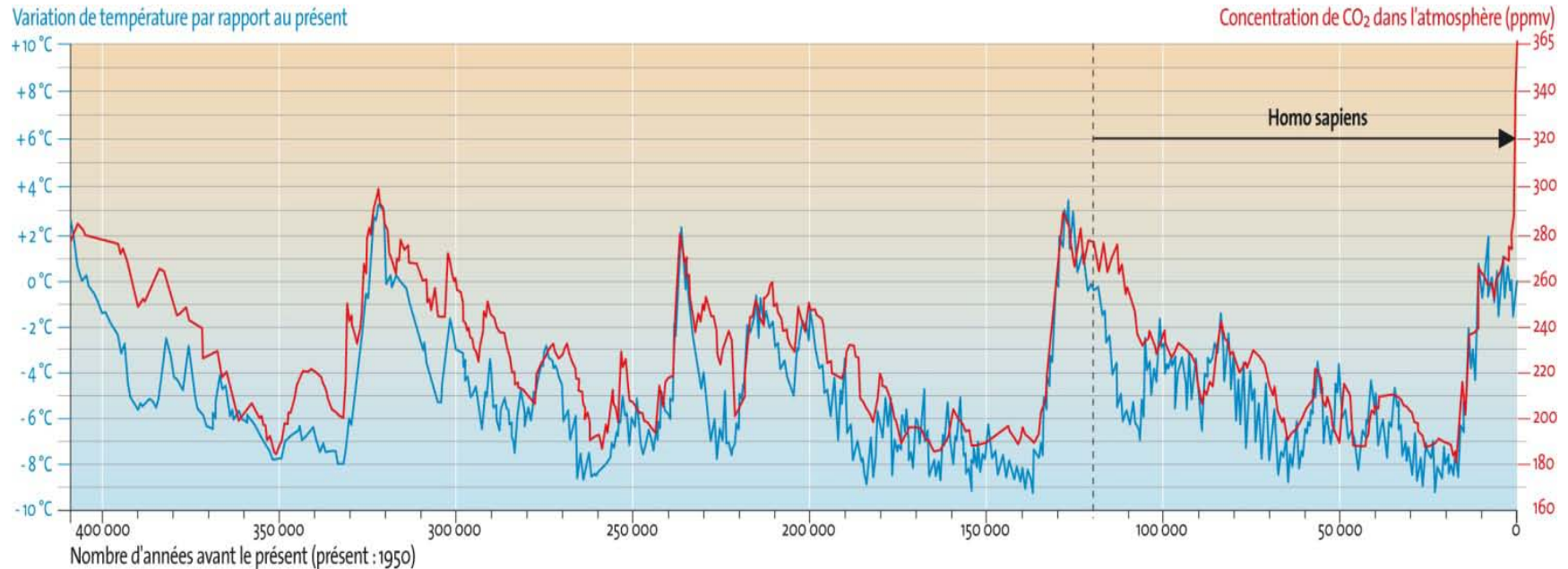
3. Le réchauffement climatique : les preuves



Atmosphère plus chaude → amplification du cycle de l'eau

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les preuves



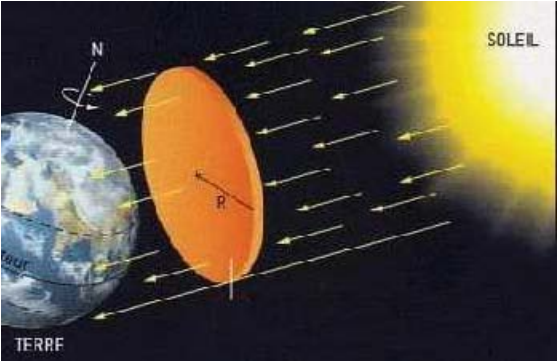
Ce qui est inquiétant, ce n'est pas l'augmentation de température dans l'absolu, c'est la rapidité de l'augmentation → peu de temps d'adaptation de la flore & faune

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

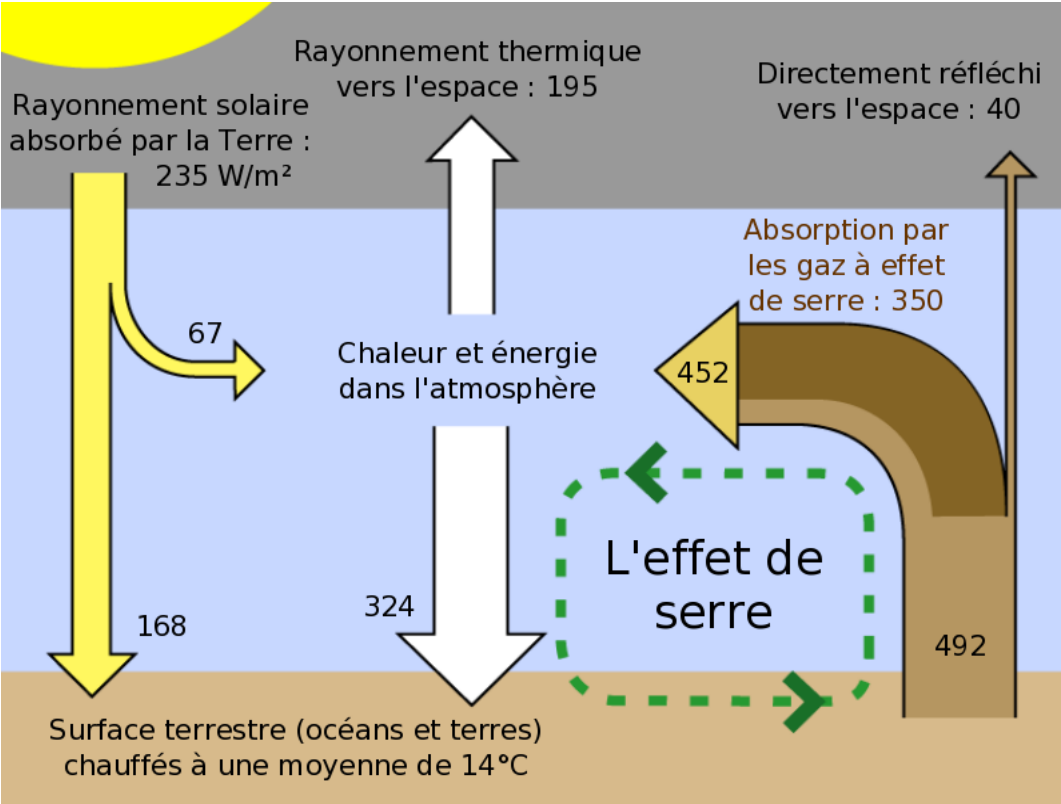
3. Le réchauffement climatique : l'effet de serre

- Albédo : réflexion du rayonnement solaire par les nuages, le sable blanc, la glace, l'atmosphère → 30% du rayonnement solaire
- Absorption par l'atmosphère → 20%
- Absorption par la surface terrestre → 50%

Rayonnement solaire



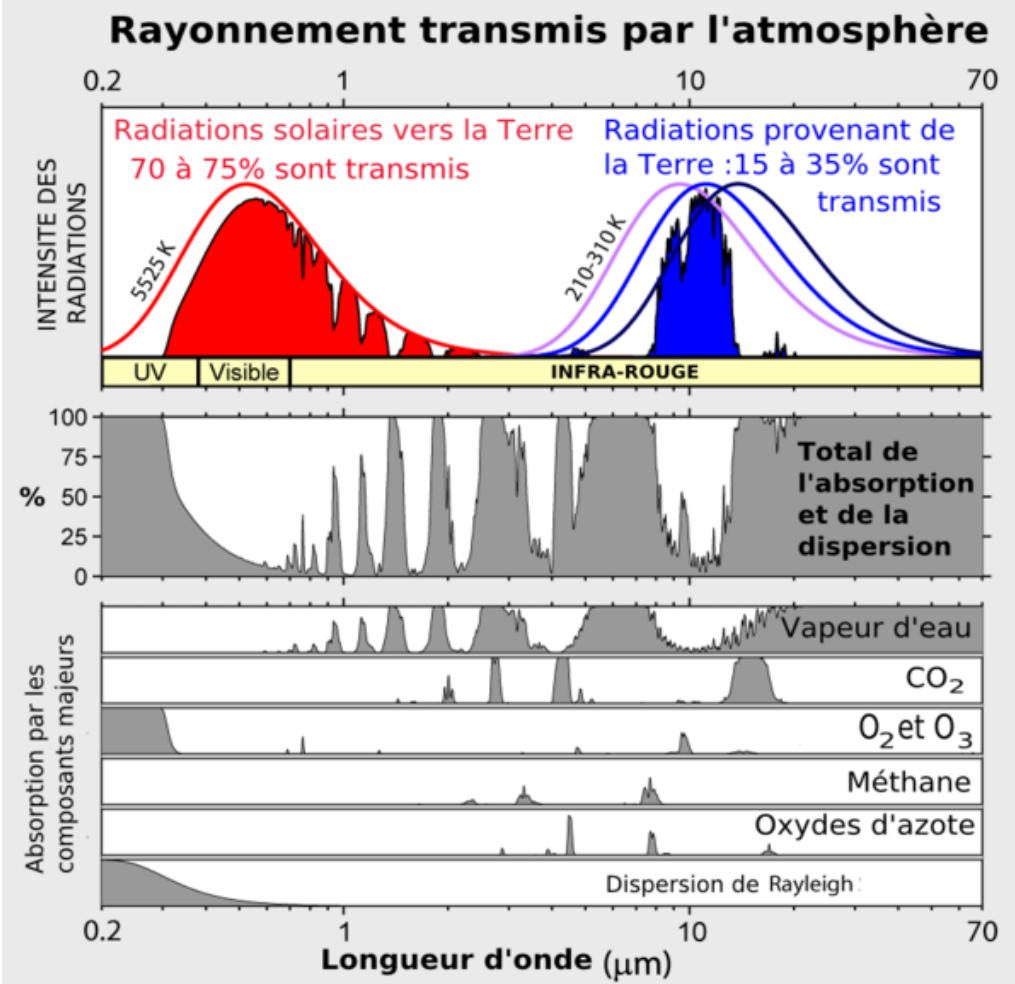
→ 1300 W/m² ⊥ au rayonnement
→ moyenne de 330 W/m² au sol
moins l'Albédo → 235 W/m²



Sans effet de serre la température de la terre serait de -18°C
(voir -50°C si on prend en compte l'augmentation de l'albédo du à la glace)

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : l'effet de serre



Si la majorité du rayonnement solaire traverse l'atmosphère pour toucher le sol (en rouge), la plus grande partie du rayonnement émis par la Terre n'est pas transmise (en bleu) mais absorbée par l'atmosphère (en gris). L'absorption des rayons infrarouges est principalement due à la vapeur d'eau.

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les gaz à effet de serre (GES)

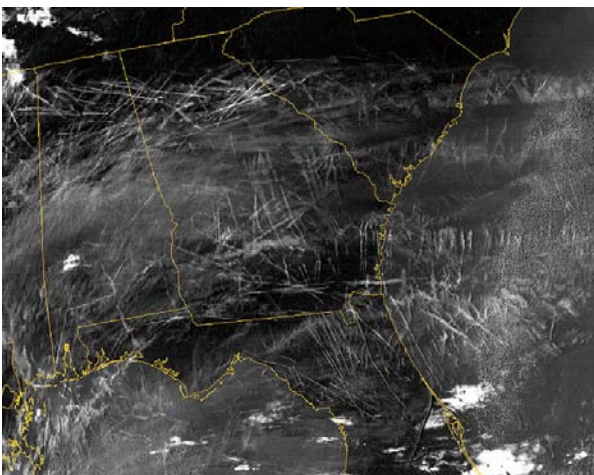
Contributions approximatives à l'effet de serre des principaux gaz, d'après le GIEC :

- Vapeur d'eau (H_2O) : 60 %
- Dioxyde de carbone (CO_2) : 26%
- Ozone (O_3) : 8%
- Méthane (CH_4) et Oxyde nitreux NO_x : 6%

→ Seule une partie de ces gaz sont émis par l'homme.

● Les **émissions directes de vapeur d'eau** des hommes (centrales électriques - irrigation, barrages, déforestation...) ne contribuent pas à augmenter l'effet de serre de manière décelable et ne sont donc pas prises en compte dans les émissions humaines.

Cas particulier du transport aérien et des trainées de condensation.



→ refroidissement en journée (augmentation de l'albédo)

→ réchauffement diurne (H_2O & CO_2 & O_3)

Mais globalement l'effet serait plutôt réchauffant

Expérience du 11 septembre 2001 : 3 jours d'interdiction de vol

→ 1 °C d'amplitude jour-nuit supplémentaire

Photo satellitale prise au-dessus de la Géorgie

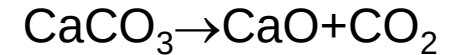
III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les gaz à effet de serre (GES)

- Le **gaz carbonique** d'origine humaine → 55% de l'effet de serre anthropique.

- combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz)

- industries (par exemple production de ciment)



- déforestation, notamment en zone tropicale.

- Le **méthane** → 15% de l'effet de serre anthropique

- combustion de matière organique (brûlis en zone tropicale)

- élevage des ruminants (vaches, moutons, chèvres, yaks...)

- culture du riz

- décharges d'ordures ménagères

- exploitations pétrolières et gazières (10% de fuite de méthane), & charbon

- Les **halocarbures** → 10% de l'effet de serre anthropique

- gaz réfrigérant CFC HFC

- gaz propulseurs

- procédés industriels (mousses plastiques, de composants électroniques)

- L'**ozone** (O₃) troposphérique → 10% de l'effet de serre anthropique

- combustion des hydrocarbures

- Le **protoxyde d'azote** (N₂O) → 5% de l'effet de serre anthropique

- engrais azotés en agriculture

- certains procédés chimiques

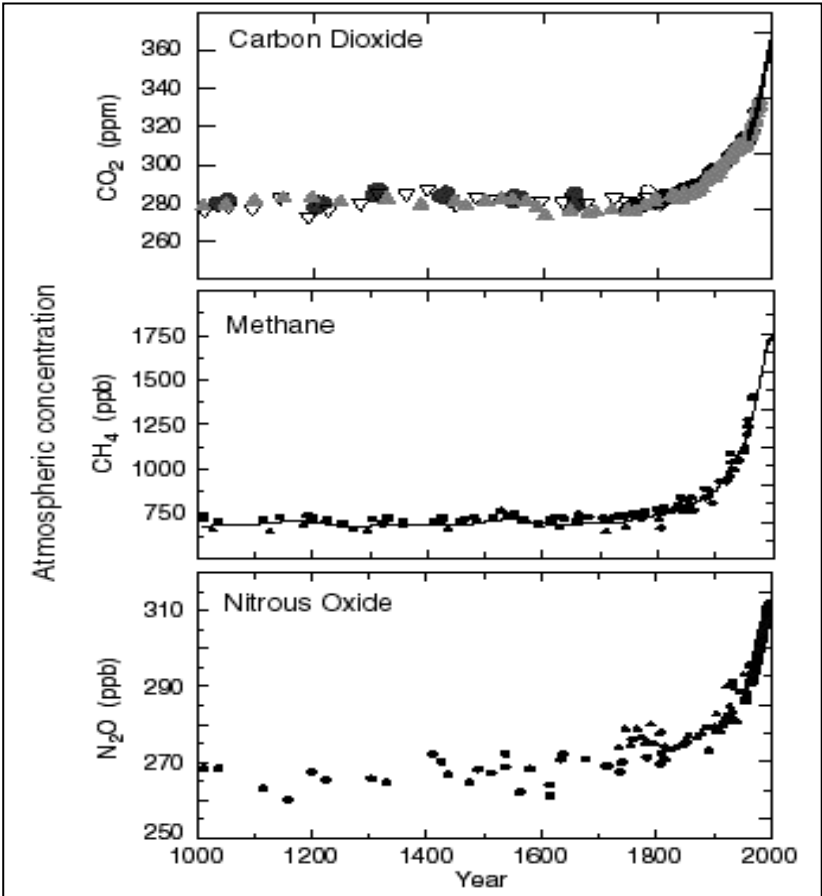
III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les gaz à effet de serre (GES)

Pouvoir de réchauffement global (PRG ou *GWP*, pour *Global Warming Potential*)

Bulles d'air emprisonnées dans la glace

Gaz	Formule	équivalent carbone par kg émis
Gaz carbonique	CO ₂	0,273
Méthane	CH ₄	6,82
Protoxyde d'azote	N ₂ O	81,3
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	2.015 à 3.330
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	34 à 4.040
Hexafluorure de soufre	SF ₆	6.220



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les aérosol (suspension dans l'air de gouttelettes ou de poussières)

Aérosols d'origine anthropique :

- particules fines émises lors de la combustion
- poussière directement soulevée par la circulation routière, ou l'exploitation de carrières

Précurseurs d'aérosols :

- dioxyde de soufre (SO_2) émis lors de la combustion → particules de sulfate (SO_4) solides

Les aérosols ont deux effets :

- 1-Ils réfléchissent ou absorbent la lumière
- 2-Ils constituent des "noyaux de condensation" → modifications dans la formation des nuages

Nuages hauts (cirrus)



Translucides pour la lumière solaire
& opaque pour l'infrarouge

↗ réchauffant

Nuages bas (cumulus, stratus)



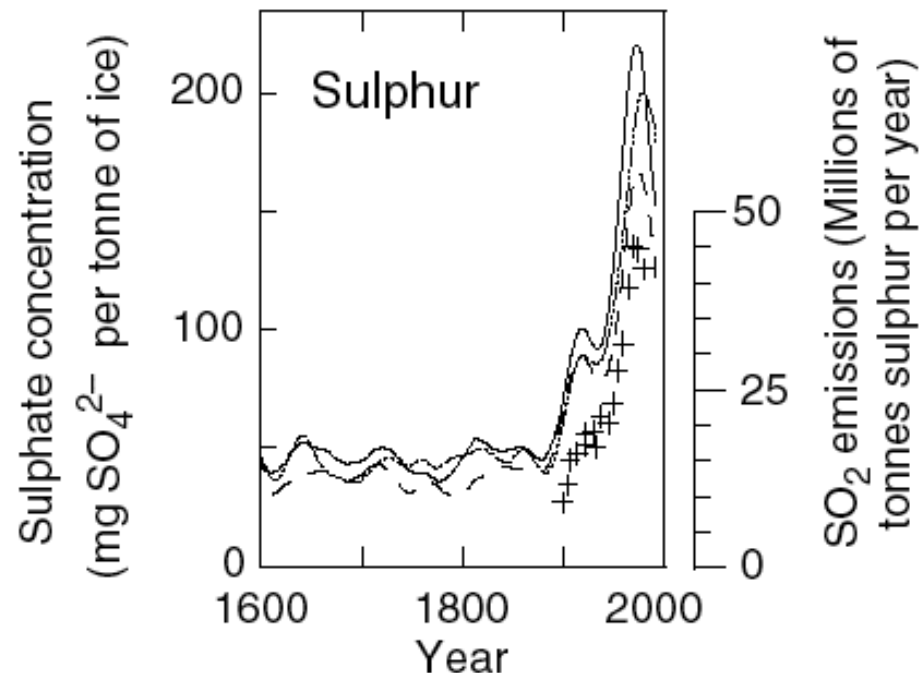
réfléchissant pour la lumière solaire

↖ refroidissant

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les aérosol

Le SO_2 (particules de SO_4) a tendance à favoriser la formation de nuages bas
→ c'est un **refroidisseur du climat**

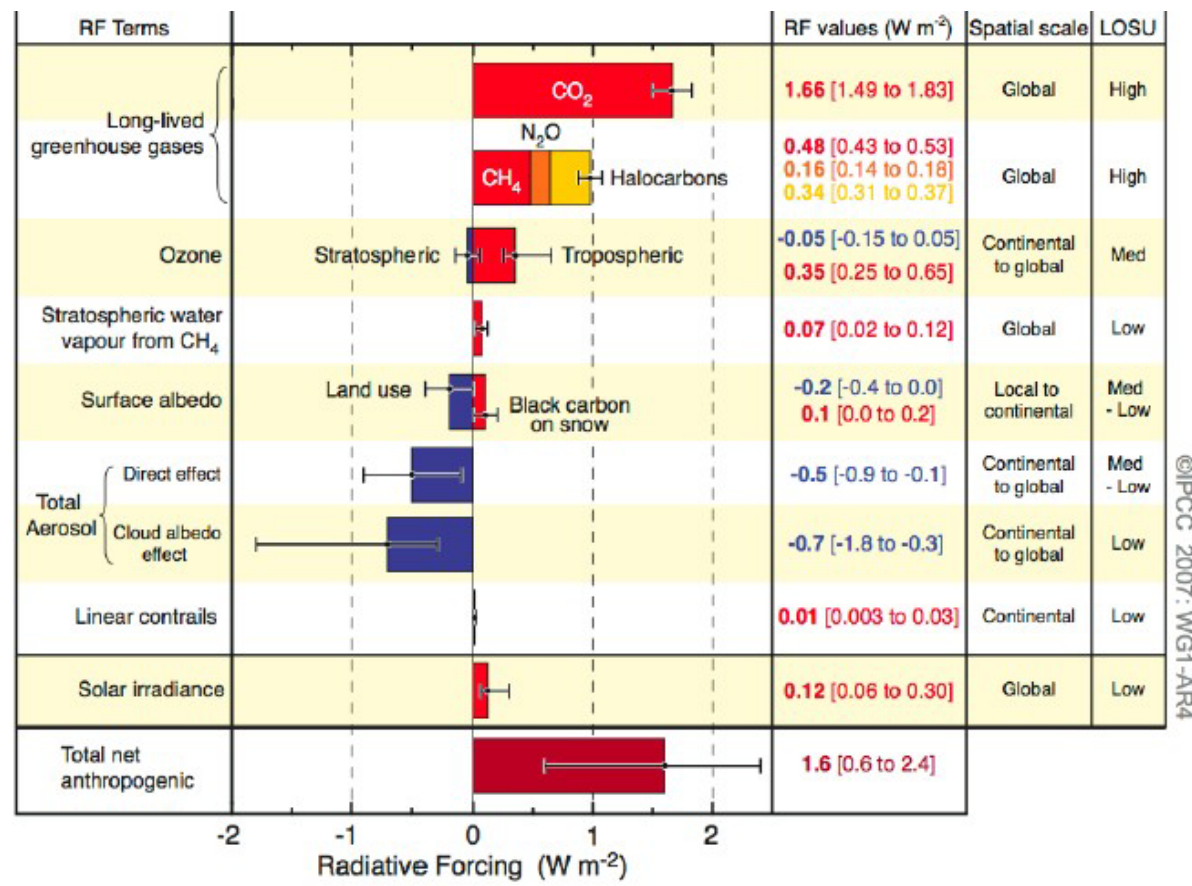


Eruption du Pinatubo : baisse mesurable des températures mondiales (0,1 - 0,2 °C)

Durée de vie des particules : quelques semaines $\ll$ durée de vie des GES

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

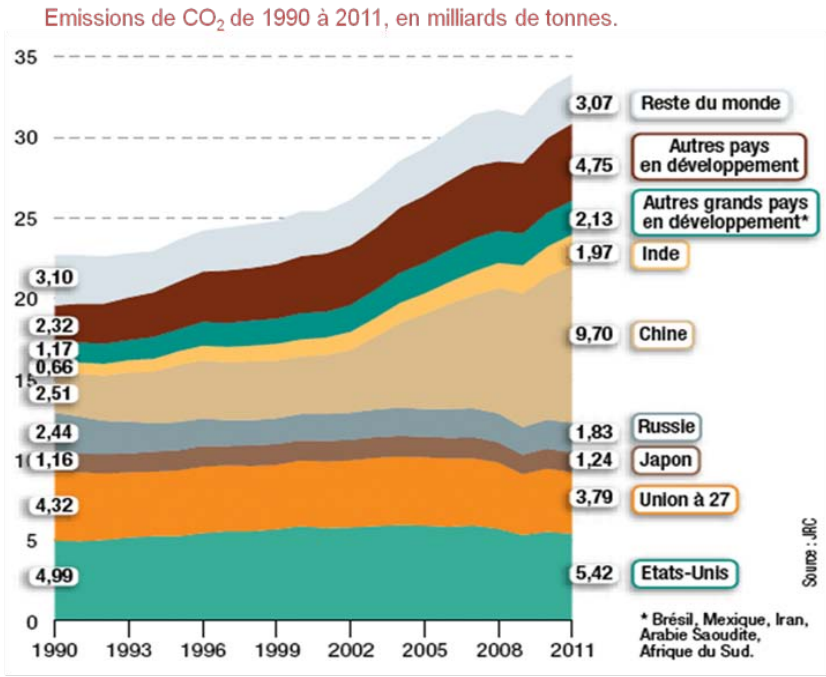
3. Le réchauffement climatique : bilan



→ Depuis le début de l'ère industrielle, (1750) ce que nous avons émis dans l'atmosphère a pour effet d'introduire un "forçage radiatif" de l'ordre de **1%** du rayonnement reçu : **"comme si" le soleil avait augmenté sa puissance d'environ 1%**

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

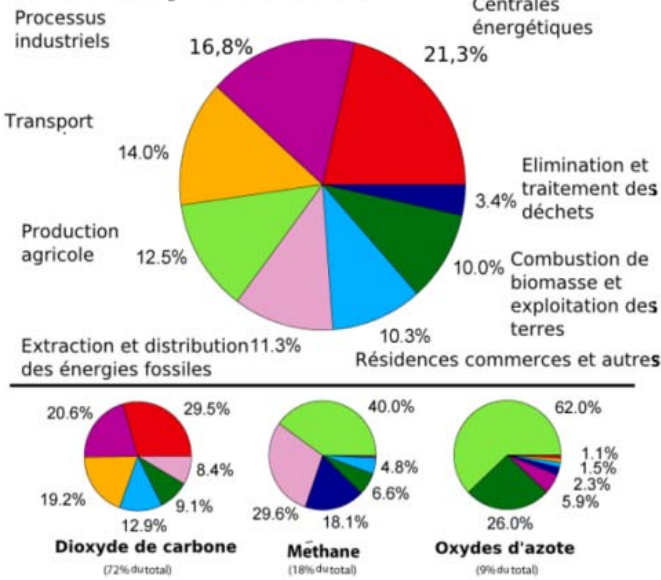
3. Le réchauffement climatique : origine des emissions de GES



Alternatives économiques – Les chiffres de l'économie 2013

→Augmentation due au development de la Chine

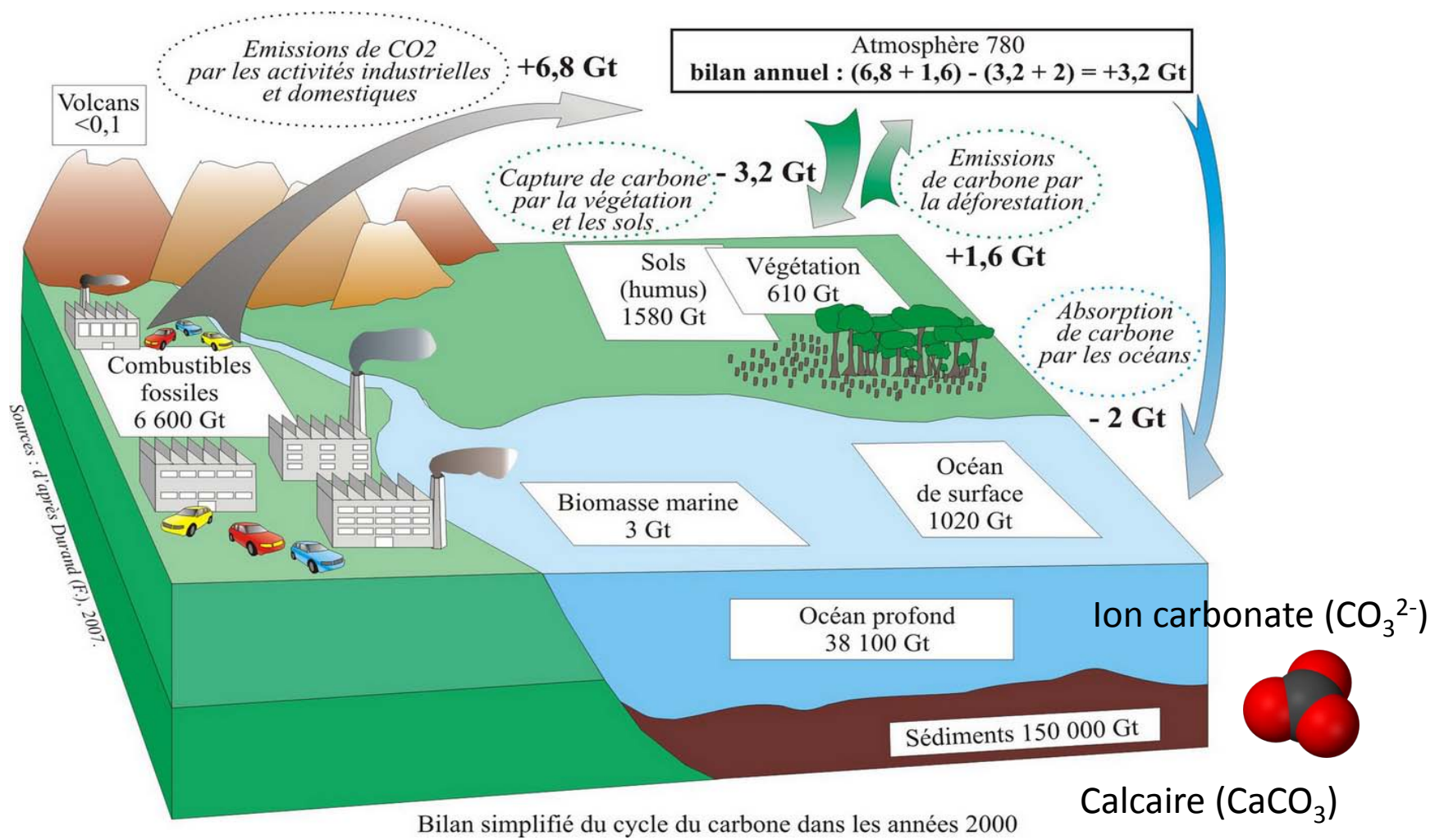
Emissions annuelles de gaz à effet de serre par secteur



→CO₂ : production d'électricité
→CH₄-NO_x : agriculture

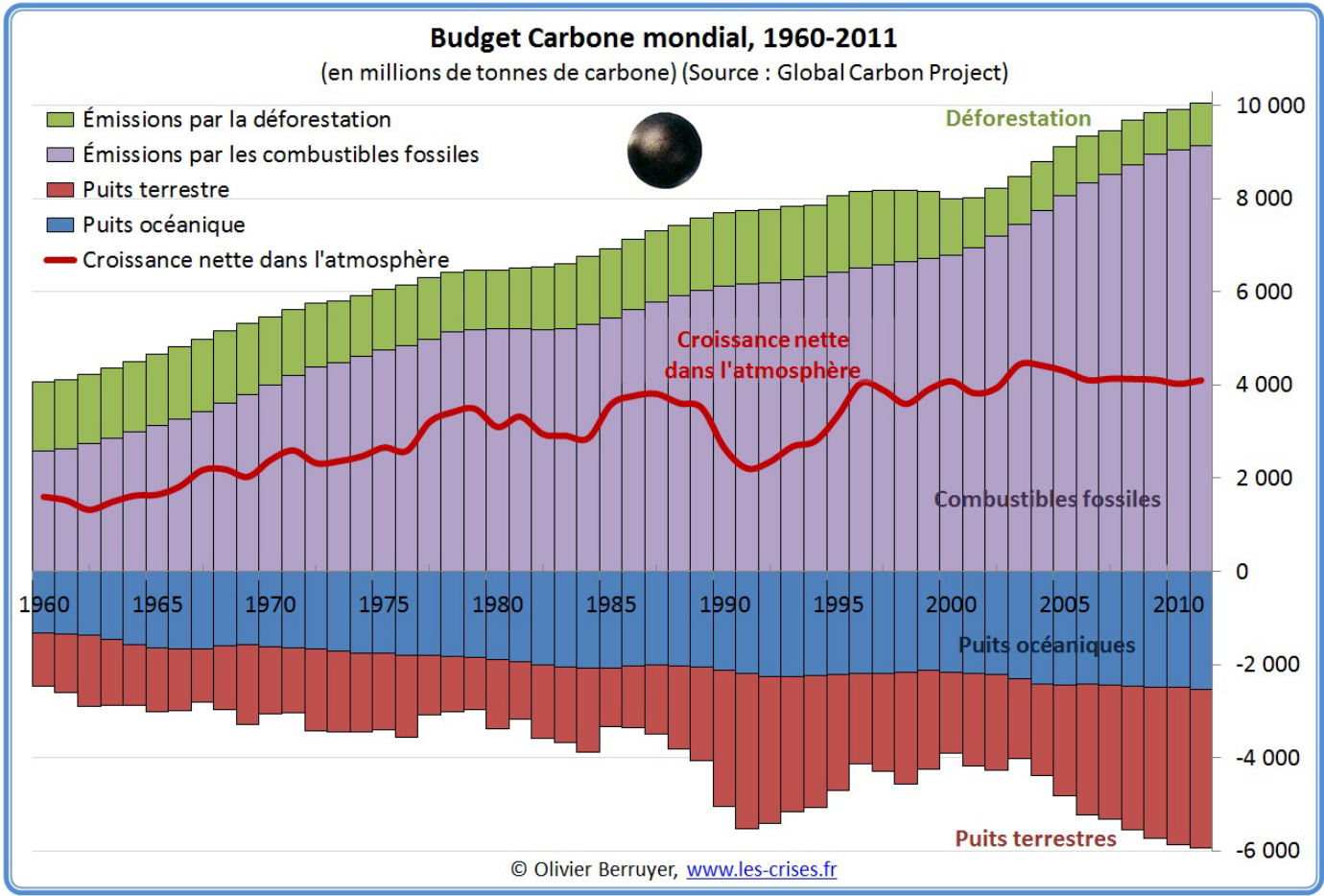
III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : cycle du carbone



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : cycle du carbone

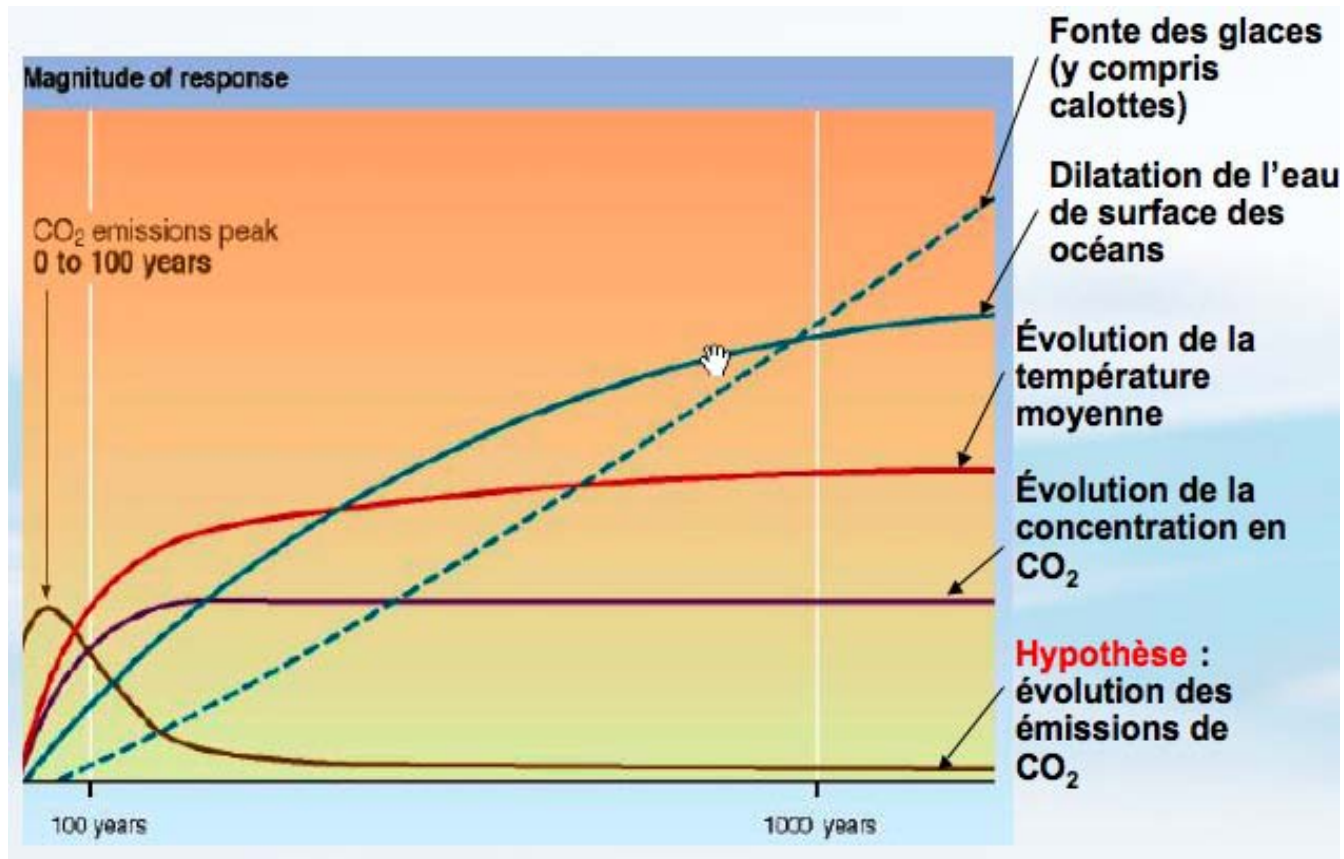


III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : cycle du carbone

Problème : le cycle du carbone a une constante de temps très longue, du fait de la très grande inertie de la machine climatique.

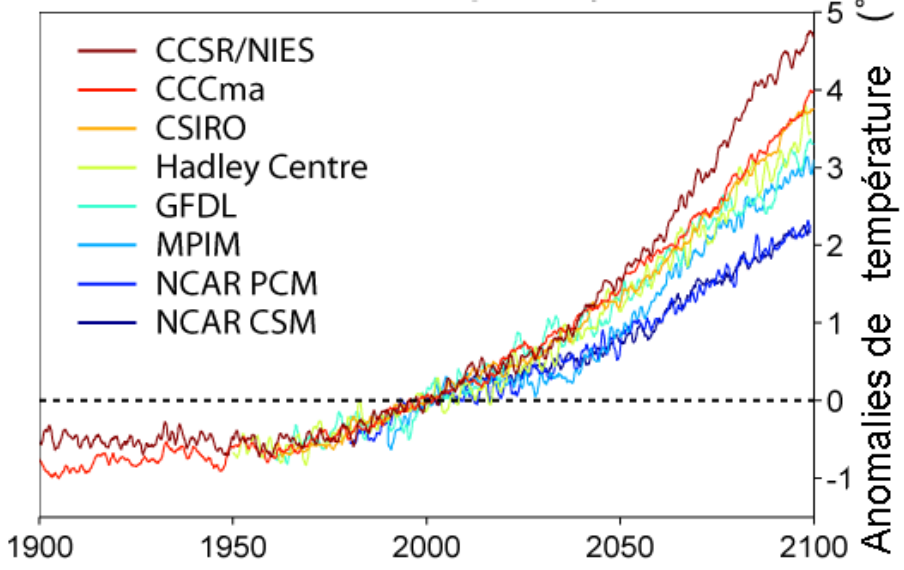
→ **pas de retour en arrière possible**



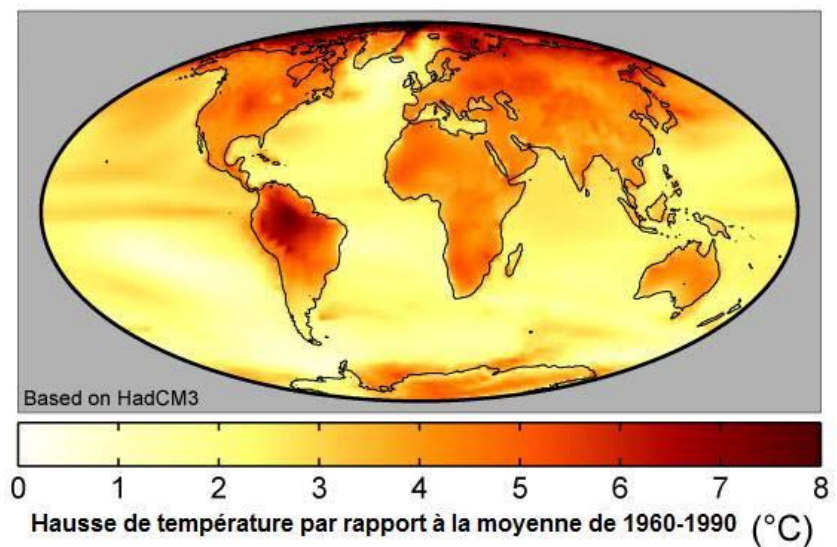
III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Prévisions des hausses de températures



Prévisions des hausses de températures pour 2070-2100



→ Hausse moyenne de 2 à 5 °C en 2100

→ Hausse localisée dans l'hémisphère nord : jusqu'à +8°C

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Montée des eaux

- augmentation du volume de l'eau due à son réchauffement (dilatation thermique)
- apport d'eau supplémentaire provenant de la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires.
- Entre 1993 et 2003 : 3,1 mm par an.
- En 2100 : 18 à 59 cm (selon le quatrième rapport du GIEC)



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Précipitations

- augmentation des précipitations aux latitudes élevées
- diminution dans les régions subtropicales



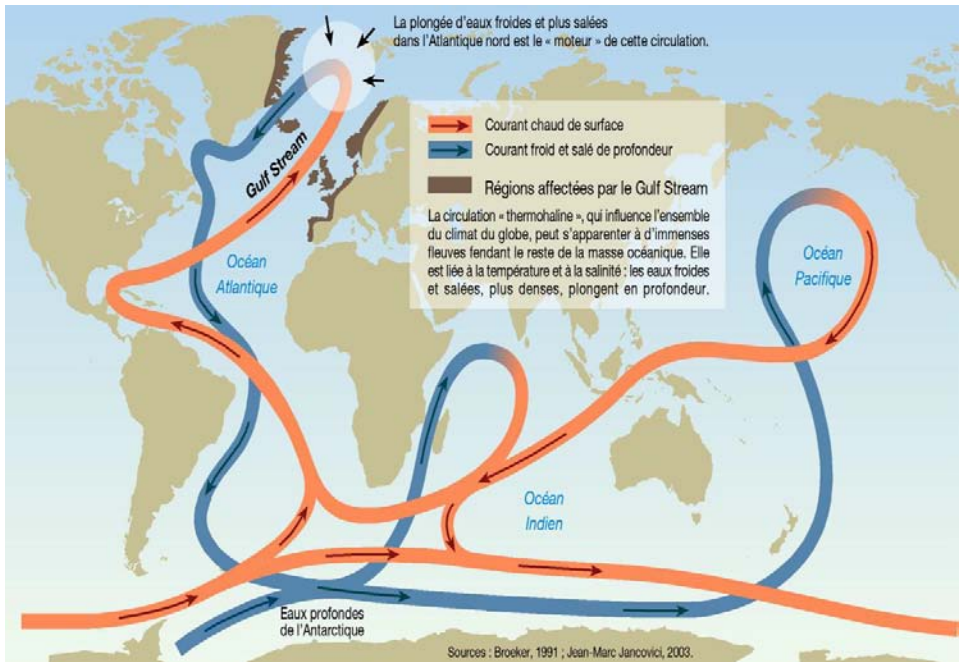
→ à l'horizon 2025, un tiers de la population mondiale pourrait se trouver en état de Stress Hydrique

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Circulation thermohaline

→ Responsable du renouvellement des eaux profondes océaniques
& de la relative douceur du climat européen.



- Apport massif d'eau douce aux pôles
- Diminution de la salinité marine
 - Diminution de la densité des eaux de surface
 - pas de plongée dans les abysses océaniques
 - Arrêt de la circulation thermohaline ?



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Glaces et couverture neigeuse

- diminution de la couverture neigeuse
- retrait des banquises & calottes glaciaires (hémisphère nord)
- disparition des glaciers : conséquences terribles quand à l'approvisionnement en eau douce de pays entiers

Biodiversité



→ 20 à 30 % des espèces évaluées à ce jour sont susceptibles d'être exposées à un risque accru d'extinction si l'augmentation du réchauffement mondial moyen dépasse 1,5 à 2,5 °C.

→ 40 à 70 % avec une augmentation d'environ 3,5 °C

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Stabilité des sols

eau plus chaude & plus acide, pluies hivernales plus intenses & chocs thermiques
→ effondrements de cavités souterraines (3 000 communes soumises à ce risque en France)



Un « Plan cavités » (sur les risques liés ou non au changement climatique) serait à l'étude en France selon l'INERIS.

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Économie

→ *Nicholas Stern*, économiste anglais, estime que le réchauffement climatique entraînerait un coût économique de 5 500 milliards € en tenant compte de l'ensemble des générations (présente et futures) ayant à en subir les conséquences.



→ L'assureur *Munich Re* estime que c'est l'Amérique du Nord qui a subi l'aggravation la plus forte de « *pertes financières dues à des événements liés à la météo* », avec plus de 30 000 morts et 1060 milliards de dollars induits par la gestion et réparation des catastrophes climatiques.

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Santé

Le 4^{ème} rapport du Giec met en avant certains effets sur la santé humaine, tels que « la mortalité associée à la chaleur en Europe, les vecteurs de maladies infectieuses dans diverses régions et les allergies aux pollens aux latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère nord » ou l'émergence ou réémergence de maladies infectieuses.



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences

Déstabilisation géopolitique mondiale

Exemple (J. Kerry) : le fleuve Indus prend sa source en Inde. La construction de barrages pour retenir l'eau priverait le Pakistan d'une partie de sa ressource.

→ Risque de conflit nucléaire

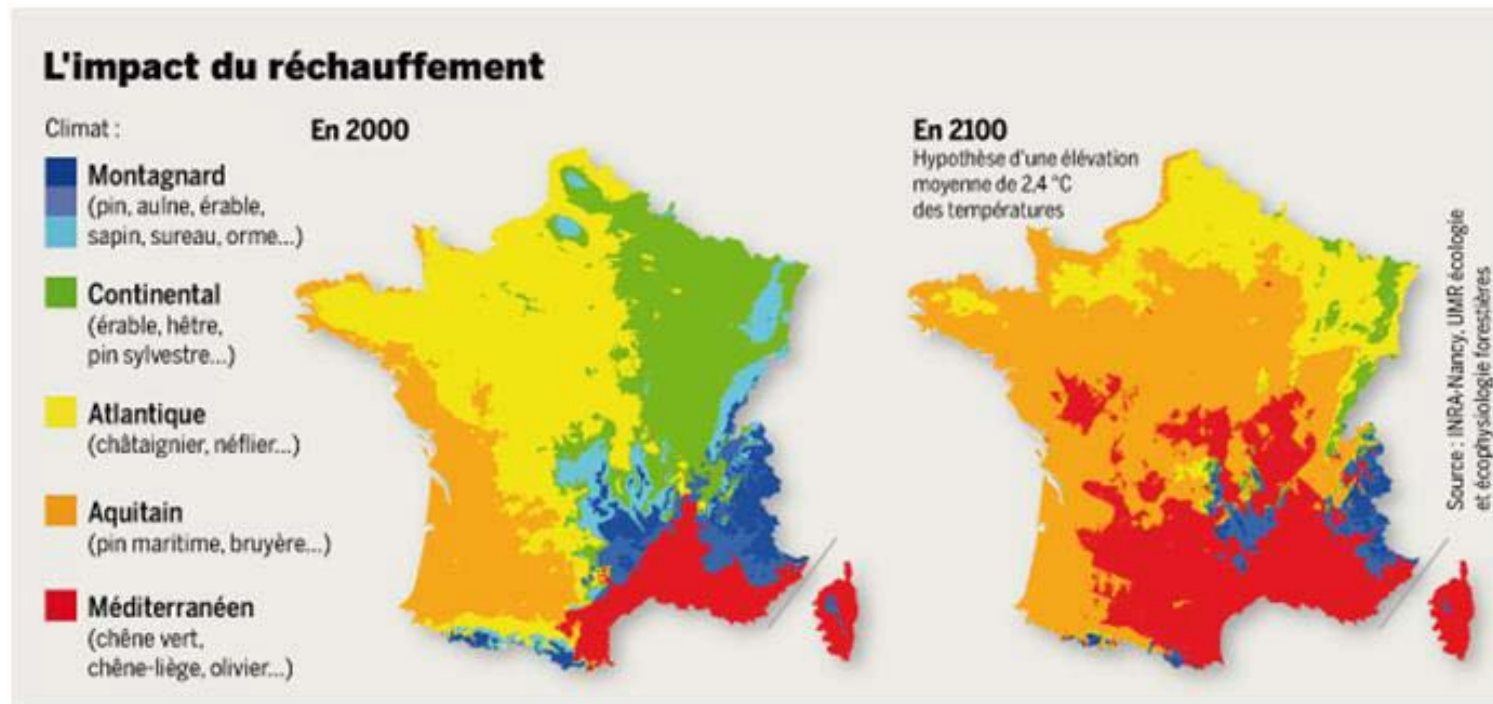


La CIA, dans son rapport 2010 sur la défense, identifie le changement climatique comme une des causes essentielles dans la possible multiplication des conflits.

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences positives

- + Croissance plus rapide des végétaux (plus de CO₂)
- + Ouverture de nouvelles routes de navigation aux pôles
- + Climat : plus agréable ne France (- de mortalité en hivers, - de frais de chauffage)



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

3. Le réchauffement climatique : les conséquences positives



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

4. Les tensions géopolitiques

Avant on faisait la guerre pour l'or, maintenant c'est pour l'énergie.

Les guerres d'Irak pour le pétrole

Publié le 20/08/2010

Mis à jour le 23/08/2010 à 19h19

0 réaction



27



197



Irak: c'était bien une guerre pour le pétrole

Si les Américains savaient combien leur armée dépense pour protéger les puits de pétrole, les GI's auraient quitté l'Irak il y a longtemps.



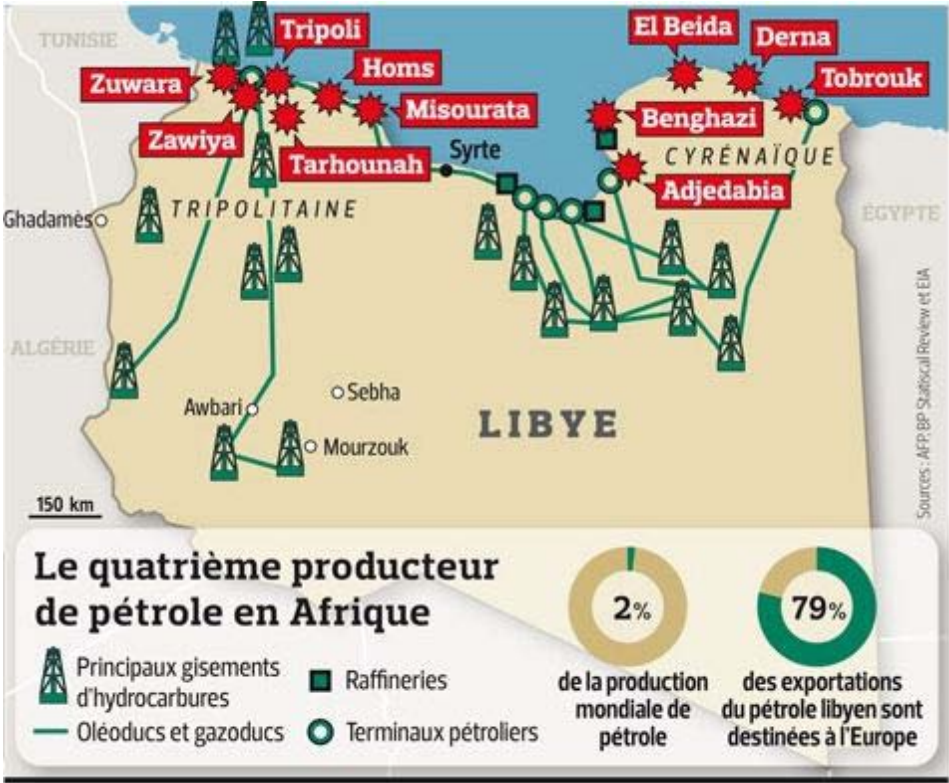
- Des soldats américains du 116ème régiment d'infanterie quittent l'Irak Thaier Al-Sudani / Reuters -

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

4. Les tensions géopolitiques

La guerre de Libye pour le pétrole et le gaz

Quinze jours après être intervenus pour permettre "au peuple libyen de choisir lui-même son destin" , un accord confidentiel aurait été passé entre le Conseil national de Transition et Paris, attribuant 35 % de réserves libyennes de pétrole à la France



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

4. Les tensions géopolitiques

Les guerres de Tchétchénie, Géorgie et de Syrie pour le contrôle du gaz



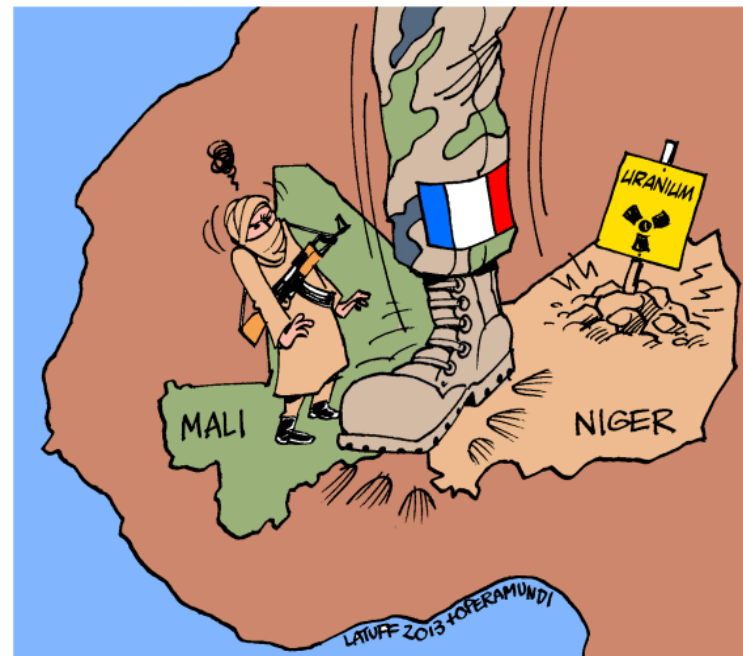
http://www.youtube.com/watch?v=QztgjFSPwfA&feature=player_embedded#t=161

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

4. Les tensions géopolitiques

La guerre du Mali pour le contrôle de l'uranium du Niger

Le Niger → 30 % de l'approvisionnement des centrales nucléaires françaises (3600t).
A l'horizon 2020 → 5 000 tonnes de minerais 50% de l'approvisionnement de la France.



III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

4. Les tensions géopolitiques

Les tensions EU-Chine

http://www.dailymotion.com/video/xfhjcd_chine-etats-unis-la-course-a-l-or-noir-1-3_news&start=3

http://www.dailymotion.com/video/xfhjmc_chine-etats-unis-la-course-a-l-or-noir-2-3_news&start=4

http://www.dailymotion.com/video/xfhjzh_chine-etats-unis-la-course-a-l-or-noir-3-3_news&start=0

Exercices : calculs d'ordres de grandeurs

I. Introduction : les sources d'énergie

II. Le point sur les besoins et la production en énergie

III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles

IV. Les Energies renouvelables

1. La biomasse
2. L'hydraulique
3. L'éolien
4. Le solaire

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

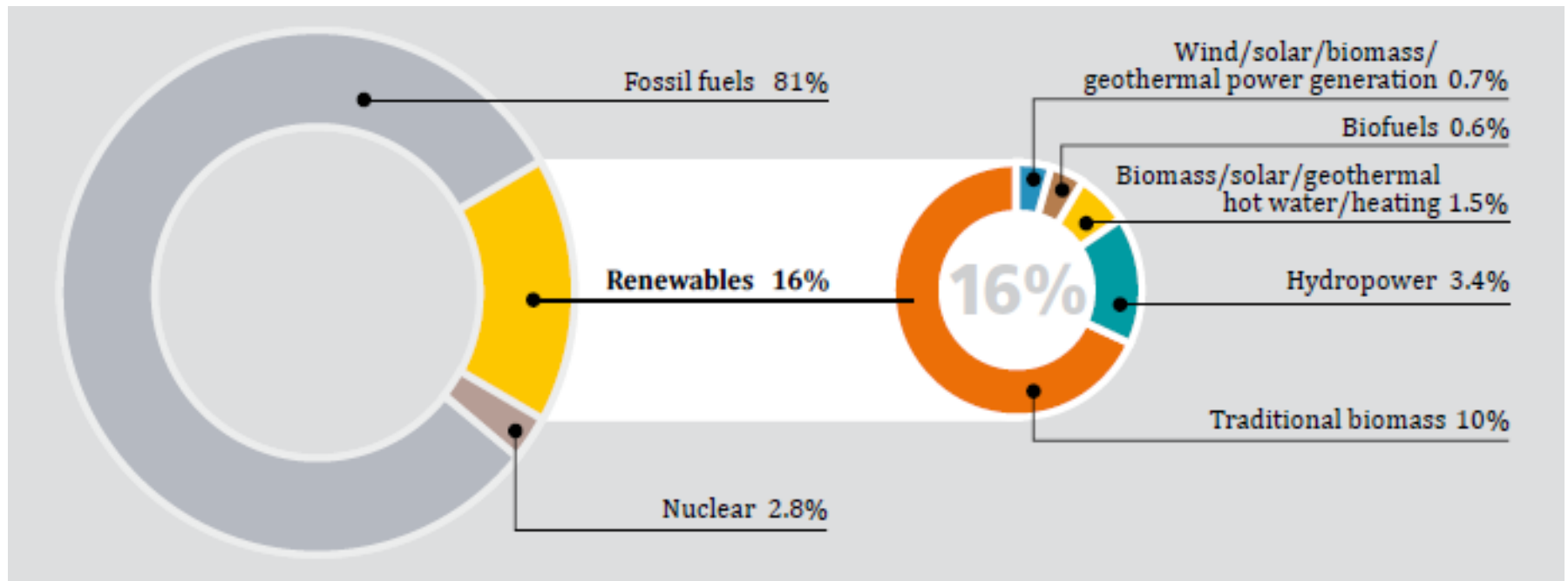
VI. Réduction de la consommation

VII. Les scénarios pour le futur

IV. Les énergies renouvelables

→ Solution possible pour limiter les conséquences écologiques, économiques et géopolitiques associées aux énergies fossiles.

→ Une solution complémentaire est la **réduction de la consommation énergétique**.



Répartition de la consommation d'énergie finale dans le monde (8700Mtep)

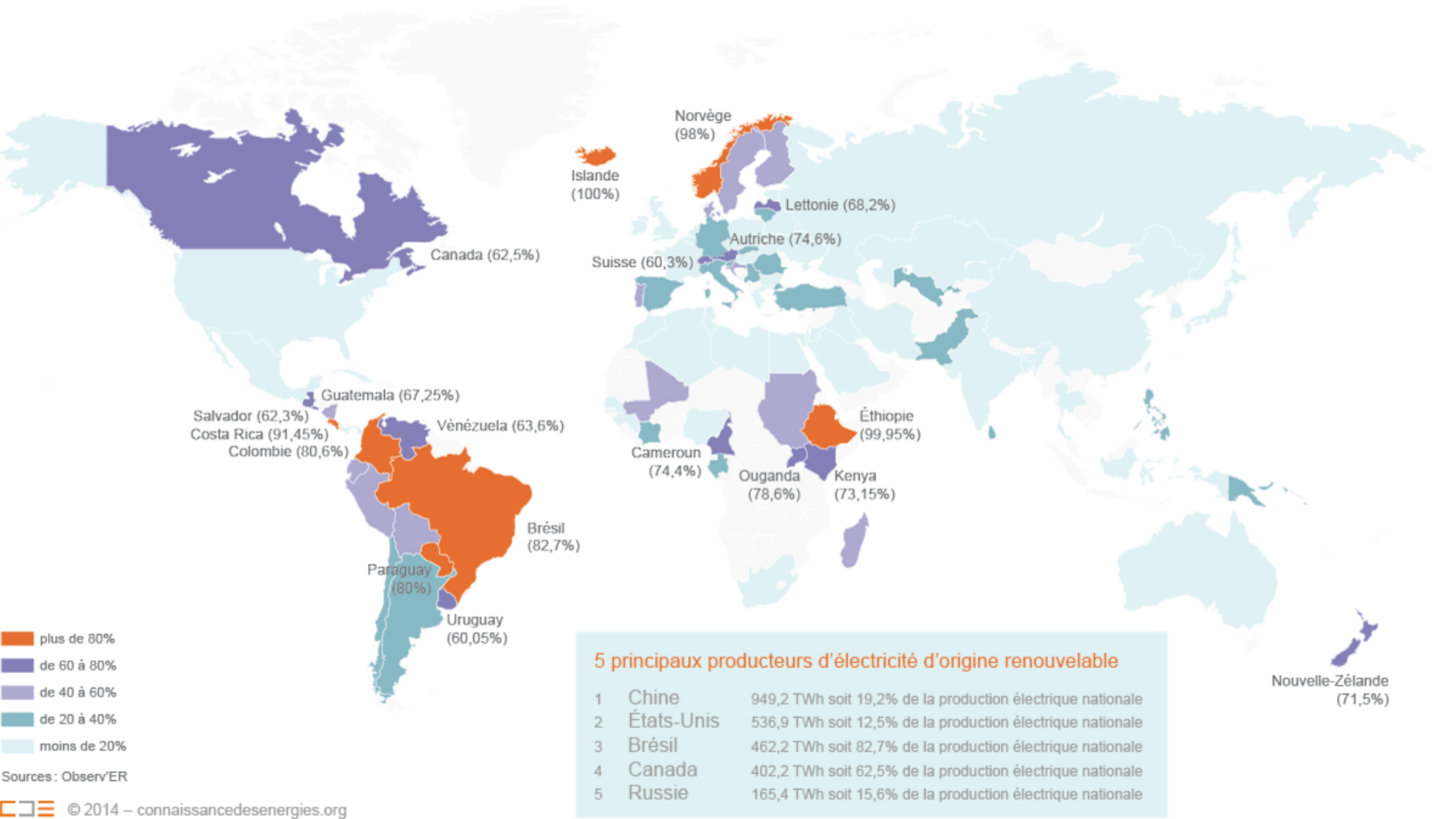
→ 16 % de la consommation d'énergie finale au niveau mondial (12% en France).

→ Objectif de 20% en 2020 pour la France

→ Essentiellement de la biomasse pour produire de la chaleur

IV. Les énergies renouvelables

Part de la production d'électricité d'origine renouvelable



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse

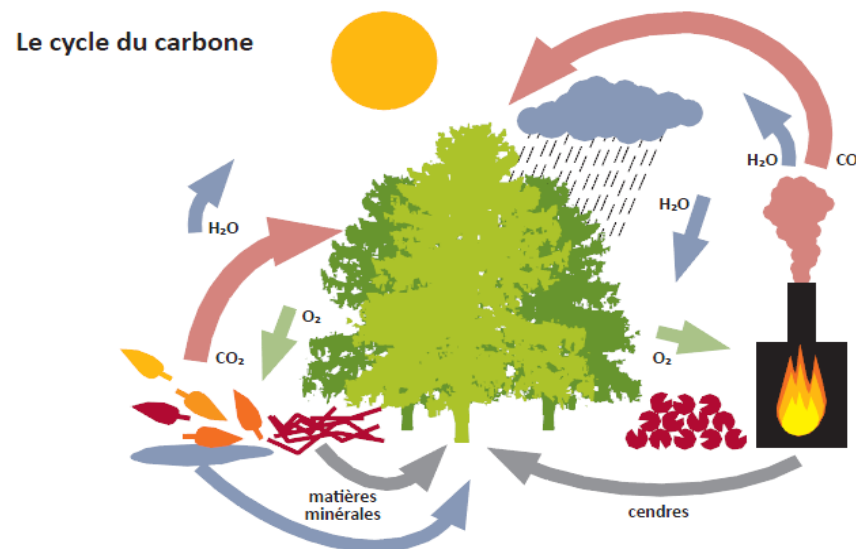
biomasse : ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par combustion, après méthanisation ou après de nouvelles transformations chimiques (agrocarburants) .

→ 1^{ère} énergie **renouvelable** en France : 12 Mtep en 2009 & développement rapide.

renouvelable si:

- pas de surexploitation
- pas de mise en péril de la fertilité du sol
- pas de compétition excessive pour l'usage des ressources (terres arables, eau, etc)
- pas d'impacts excessifs sur la biodiversité

→ forme de stockage de l'énergie solaire par l'intermédiaire du carbone



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse

- 1^{ère} énergie renouvelable utilisée dans le monde (chauffage, cuisson)
- intéresse à nouveau les pays riches confrontés au dérèglement climatique et à la perspective d'une crise des ressources en hydrocarbures fossiles

(Etats-Unis : premier producteur d'électricité à partir de la biomasse (30,7 % du total))



3 principaux constituants → procédés de valorisation spécifiques :

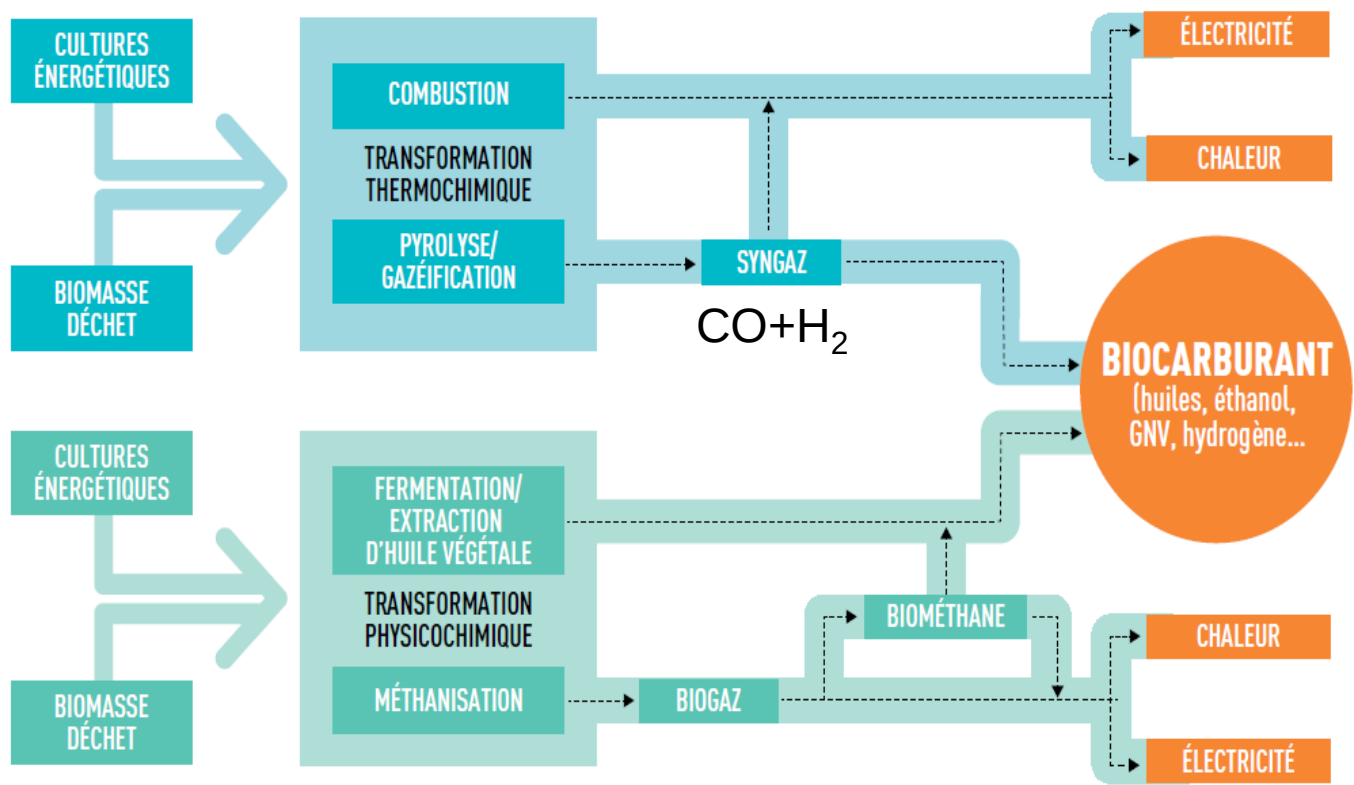
- a) La **biomasse lignocellulosique** : bois, résidus verts, paille, bagasse de canne à sucre, fourrage.
→ valorisation par des procédés par voie sèche (conversion thermochimique)
- b) La **biomasse à glucide**, riche en substance glucidique facilement hydrolysable : les céréales, les betteraves sucrières, la canne à sucre.
→ valorisation par fermentation / distillation (conversions biologiques).
- c) La **biomasse oléagineuse**, riche en lipides : colza, palmier à huile, etc.
→ peut être utilisée directement comme carburant

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation

- sous forme de chaleur par combustion
- sous forme d'électricité et de chaleur par cogénération
- sous forme de carburant ou de matière première pour l'industrie chimique.

LES DIFFERENTES VOIES DE VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie

- Le bois énergie est la **première énergie renouvelable** en France, avec environ **10,1 Mtep/an** en 2010, soit **6,4 %** de la consommation en **énergies finales** et 3,7 % de la consommation en énergies primaires.
- En comparaison, l'électricité hydraulique, éolien et photovoltaïque représentait **6,9 Mtep en 2010** (dont 5,4 pour l'hydraulique !).
- En Europe, la **biomasse solide** (bois, déchets de bois et autres matières végétales ou animales solides) est de loin la plus importante des sources d'énergies renouvelables avec **72,5 Mtep** en 2009.
- L'Allemagne est le premier producteur (11,2 Mtep) devant la France (9,8 Mtep) et la Suède (8,6 Mtep).
- La majeure partie de cette énergie est utilisée sous forme de chaleur mais la puissance totale des 800 centrales électriques à biomasse solide installées en Europe représente tout de même 7,1 GW.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie

Malgré son usage très répandu, le bois reste cependant une source d'énergie relativement mal utilisée :

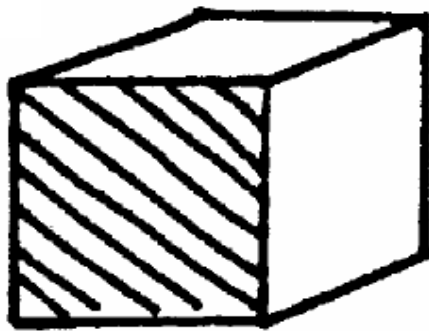
- Parce qu'il s'agit essentiellement d'une consommation d'agrément.
- Parce que la **combustion du bois** est un **phénomène complexe** qui nécessite un **matériel adapté**.
- Parce que le bois est un bien meilleur combustible lorsqu'il est **très sec**, alors qu'il est **difficile à sécher**.



IV. Les énergies renouvelables

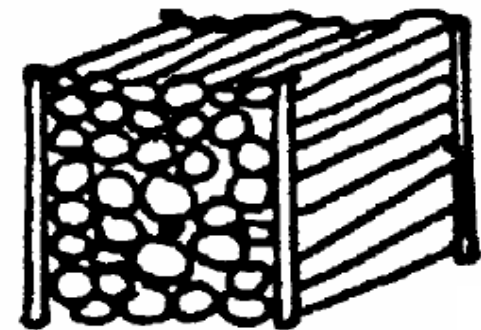
1. La biomasse : le bois énergie → **Le stère**

- Un stère représente un **volume apparent** d'un mètre cube, le bois étant conditionné en **bûches d'un mètre**.
- Le stère n'est plus une unité légale et le bois devrait maintenant être vendu **au poids** (à humidité contrôlée), **voire au kWh**.
- Néanmoins, elle reste largement utilisée, principalement pour la vente de **bûches** et parfois pour la vente de **plaquettes forestières** : on parle alors de Mètre cube Apparent Plaquettes (**MAP** → **1 stère** $\approx$ **1,5 MAP**).



Bois
plein

Bois
+
vides

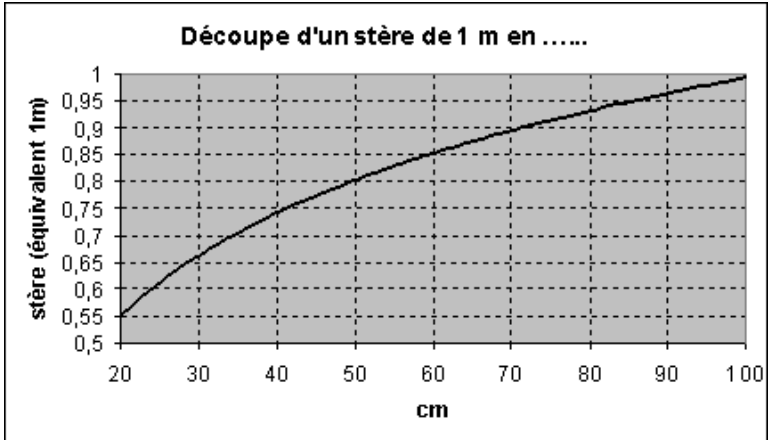


IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **Le stère**

→ Un **m³** de petites bûches représente plus de bois (en poids et en volume réel) qu'un **m³** de grandes bûches... Les **coefficients de conversion** sont normalisés.

Longueur des bûches (m)	Volume apparent (m ³)	Équivalent en stère
1	1	1
0.50	0.8	1
0.45	0.77	1
0.40	0.74	1
0.33	0.70	1
0.30	0.66	1
0.25	0.60	1
0.20	0.57	1



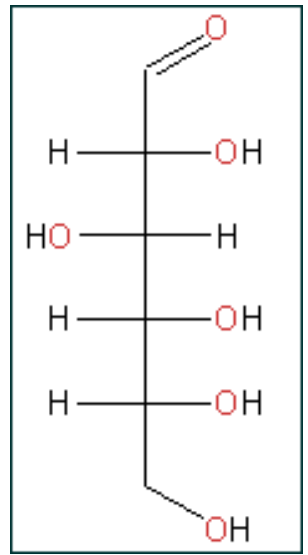
<http://www.nfboisdechauffage.org/certification/ademe.htm> et http://www.e-bois.fr/Le_volume.php.

- Pour les statistiques de l'Observatoire de l'Énergie, un stère représente **6,2 GJ** (indépendamment de l'**essence**), soit **0,15 tep**.
- Les volumes de production de la forêt française sont exprimés en **m³** de **bois massif**.

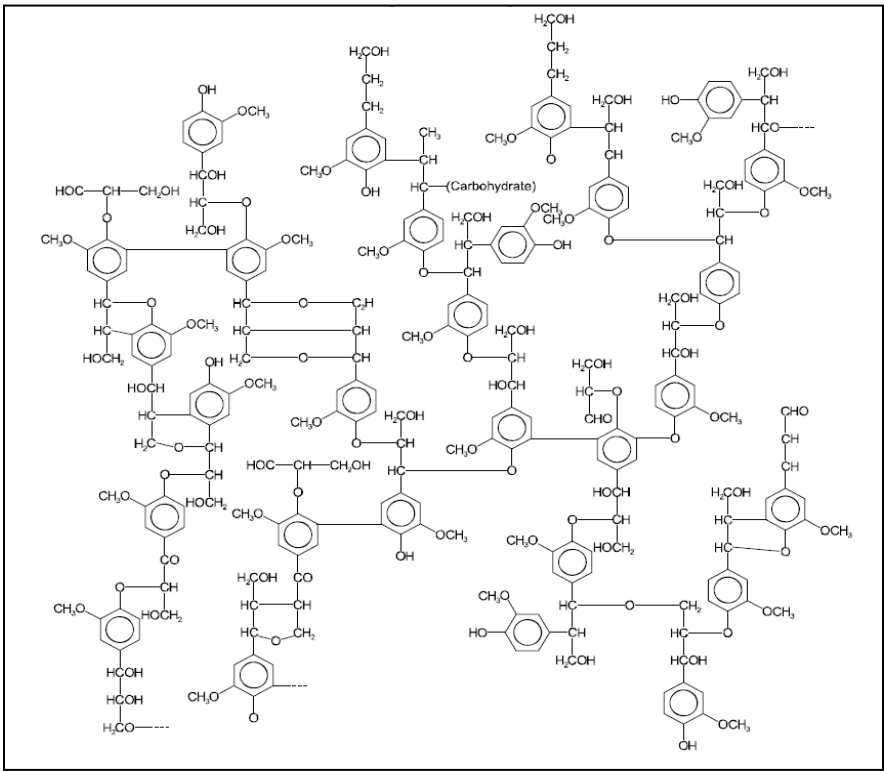
IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → Composition du bois

Le bois est constitué principalement de **matière organique** (cellulose, hemicellulose et lignine, en quantités variables) qui se trouvent dans les parois des cellules et d'une faible quantité (de 1 à 1,5 %) d'éléments minéraux.



Glucose : C₆H₁₂O₆. La cellulose et l'hemicellulose sont des polymères du glucose.



Structure d'une lignine.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **Composition du bois**

La **composition chimique élémentaire** du bois **varie très peu** selon les *essences* :

- 51 % de carbone.
 - 42 % d'oxygène.
 - 6 % d'hydrogène.
 - 1 % de cendre.
- (en masse)

ESPECES		COMPOSITION CHIMIQUE		
FEUILLUS	CARBONE	HYDROGENE	OXYGENE	CENDRE
	%	%	%	%
FRÊNE	49,7	6,9	43,0	0,3
HÊTRE	51,6	6,3	41,4	0,7
BOULEAU	49,8	6,5	43,4	0,3
ORME	50,4	6,6	42,3	0,7
ÉRABLE	50,6	6,0	41,7	1,4
CHÊNE	49,5	6,6	43,7	0,15
PEUPLIER	51,6	6,3	41,5	0,7
RÉSINEUX				
CÈDRE	48,8	6,4	44,4	0,4
SAPIN	52,3	6,3	40,5	0,8
PIN	52,6	6,1	41,2	0,1
PRUCHE	---	---	---	---
MOYENNE	50,7	6,4	42,3	0,5

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **Composition du bois**

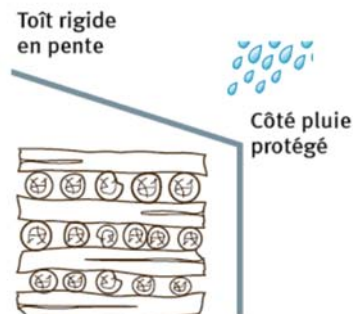
- ◆ Le **bois vivant** contient également **une grande quantité d'eau** qui peut atteindre de 50 % à presque 100 % pour un bois vert.
- ◆ Le **contenu en eau** d'un bois séché à l'air descend difficilement en dessous de 10 % : le temps de séchage du bois est de l'ordre de **2 ans**. Idéalement, le bois devrait sécher **sous abri** ou mieux, **sous vide**.
- ◆ Les chaudières industrielles sont réglées pour une plage d'humidité donnée.



Ventilation mauvaise du bois, voire nulle



Rangement « tout de long », bûches rangées côte à côte, ne permet pas une bonne ventilation du bois, tout au contraire



Bonne disposition des bûches, bien protégées et bien aérées



Séchoir à bûche

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **Le PCI du bois**

- ◆ Puisque la composition chimique élémentaire du bois varie très peu, son PCI varie très peu également suivant les essences.
- ◆ Le bois **anhydre** possède un PCI qui peut être estimé à **5000 kWh/tonne** (soit 18 MJ/kg) avec une précision meilleure que 10 % : cette incertitude est la même qu’avec les *hydrocarbures*.

Essence Feuillus	PCI en kWh/tonne
Chêne	5 040
Hêtre	5 140
Châtaignier	5 190
Charme	4 970
Frêne	5 090
Bouleau	5 020
Acacia	5 270
Aulne	4 910
Peuplier	4 890
Orme	5 170
Moyenne	5 070
Écart maximum	380 kWh/tonne, soit 8%

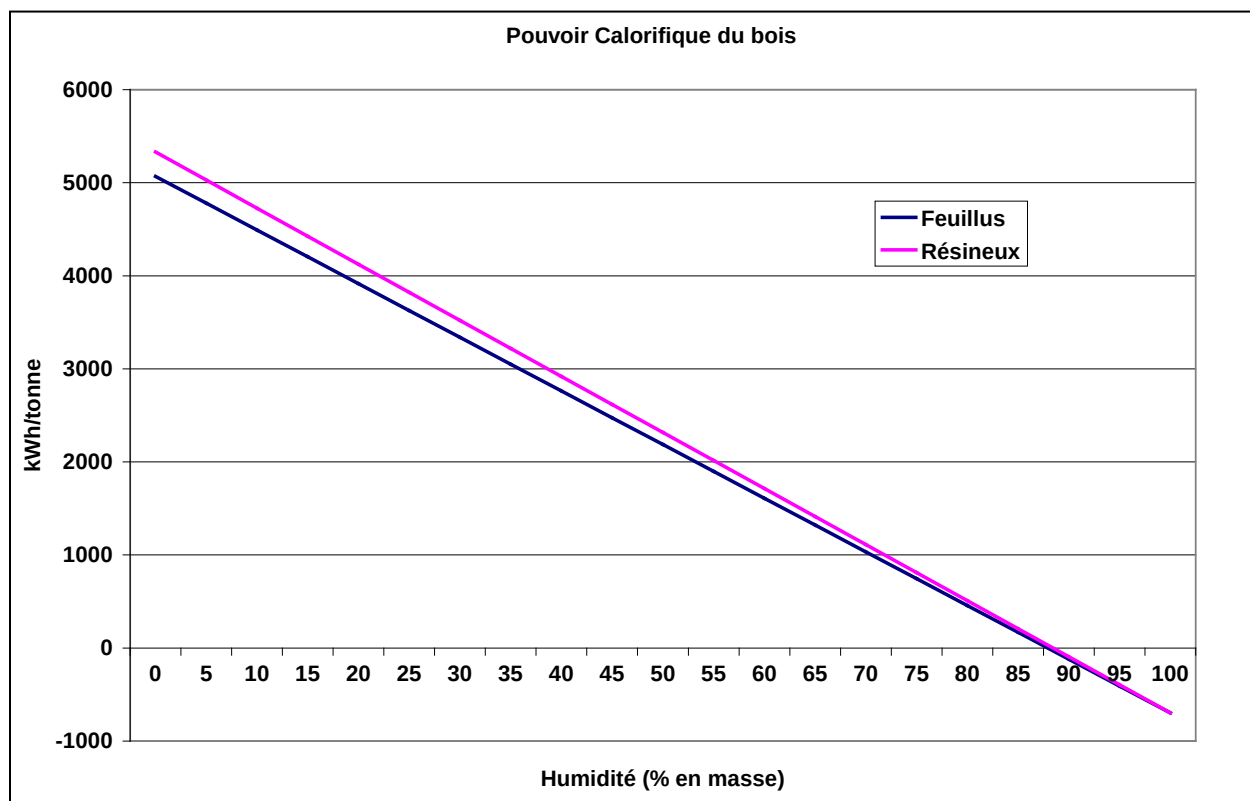
Essence Résineux	PCI en kWh/tonne
Pin maritime	5 350
Sapin	5 320
Épicéa	5 260
Pin sylvestre	5 350
Douglas	5 290
Mélèze	5 400
Moyenne	5 330
Écart maximum	60 kWh/tonne, soit 1%

ADEME - Critt Bois - Fibois - CTBA, 2001.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **Le PCI du bois**

- ♦ En pratique, le contenu en eau du bois se situe plutôt aux alentours de 20 % et la valeur à retenir en pratique est donc de **4000 à 4500 kWh/tonne**.
- ♦ Seuls les granulés (pellets) sont très secs → 5000 kWh/tonne.



D'après l'ADEME.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **Le PCI du bois**

La **masse volumique** est souvent donnée pour un bois à 15 % d'humidité. Elle peut varier de moins de 400 kg/m³ (Peuplier, Pin Weymouth, ...) à 1000 kg/m³ (If, ...) ou plus (Ébène, ... , certains bois ne **flottent pas**). Le poids d'un stère est donc **très variable suivant les essences**.

Poids de stères à 25% d'humidité	
Essences	Poids en kg
Chêne	380 à 480
Hêtre	350 à 450
Mélèze, Pins, Bouleau	300 à 400
Épicéa, Sapin, Peuplier	250 à 350

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **norme NF bois de chauffage**

La norme **NF bois de chauffage** distingue trois groupes d'essence, en fonction de la quantité de chaleur fournie par unité de volume :

- ◆ **Groupe 1** → Chêne / Charme / Orme / Hêtre / Frêne / Érable.
- ◆ **Groupe 2** → Châtaignier / Robinier faux Acacia / Merisier et fruitiers divers.
- ◆ **Groupe 3** → Résineux et autres feuillus tempérés (peuplier, bouleau, platane...).

La norme définit également deux **classes d'humidité H1** et **H2** :

- ◆ **H1** → Humidité inférieure à 20 % : bois sec prêt à l'emploi.
- ◆ **H2** → Humidité supérieure à 20 % : bois à stocker.

Essences	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Classe d'humidité H1	2000 kWh/stère	1700 kWh/stère	1600 kWh/stère
Classe d'humidité H2	1600 kWh/stère	1450 kWh/stère	1250 kWh/stère

D'après www.nfboisdechauffage.org

Service de l'observation et des statistiques : 6,2 GJ/stère ↔ 1700 kWh/stère.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la combustion**

Le bois ne brûle pas ! Seuls le charbon et les gaz brûlent.

Les différentes phases de combustion.

- **Évaporation de l'eau** : étape endothermique à $T \leq 100^{\circ}\text{C}$.
- **Gazéification du bois**, à $T \cong 250^{\circ}\text{C}$ et production de **charbon de bois** avec dégagement de **fumées** composées de vapeur d'eau, de gaz combustibles et de gouttelettes de goudron.
- **Auto inflammation des fumées**, à $T \cong 300^{\circ}\text{C}$.
- **Gazéification du carbone**, à $T \cong 500^{\circ}\text{C}$. Transformation du charbon en gaz riches en hydrogène et en monoxyde de carbone.
- **Oxydation du carbone et des gaz combustibles** à partir de $T \cong 600^{\circ}\text{C}$ qui produit du CO_2 , de l'eau et des oxydes d'azote. La température peut alors atteindre entre 700°C et 1500°C .

La majeure partie du pouvoir calorifique du bois provient des gaz mais il est nécessaire de **consommer de la chaleur pour les produire.**

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la combustion**

Les différentes phases de combustion.

- **Évaporation de l'eau** : étape endothermique à $T \cong 100^{\circ}\text{C}$.
- **Gazéification du bois**, à $T \cong 250^{\circ}\text{C}$ et production de **charbon de bois** avec dégagement de **fumées** composées de vapeur d'eau, de gaz combustibles et de gouttelettes de goudron.
- **Auto inflammation des fumées**, à $T \cong 300^{\circ}\text{C}$.
- **Gazéification du carbone**, à $T \cong 500^{\circ}\text{C}$. Transformation du charbon en gaz riches en hydrogène et en monoxyde de carbone.
- **Oxydation du carbone et des gaz combustibles** à partir de $T \cong 600^{\circ}\text{C}$ qui produit du CO_2 , de l'eau et des oxydes d'azote. La température peut alors atteindre entre 700°C et 1500°C .

Les deux premières étapes sont **endothermiques**.

- Le **charbon de bois** possède un **pouvoir calorifique plus élevé** que celui **du bois** : entre 22 et 26 MJ/kg (la conversion est plus ou moins complète).

La **première phase** peut être considérée comme un phénomène de **séchage**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la combustion**

Les différentes phases de combustion.

- **Évaporation de l'eau** : étape endothermique à $T \cong 100^{\circ}\text{C}$.
- **Gazéification du bois**, à $T \cong 250^{\circ}\text{C}$ et production de **charbon de bois** avec dégagement de **fumées** composées de vapeur d'eau, de gaz combustibles et de gouttelettes de goudron.
- **Auto inflammation des fumées**, à $T \cong 300^{\circ}\text{C}$.
- **Gazéification du carbone**, à $T \cong 500^{\circ}\text{C}$. Transformation du charbon en gaz riches en hydrogène et en monoxyde de carbone.
- **Oxydation du carbone et des gaz combustibles** à partir de $T \cong 600^{\circ}\text{C}$ qui produit du CO_2 , de l'eau et des oxydes d'azote. La température peut alors atteindre entre 700°C et 1500°C .

La combustion du bois comprend également des étapes de **pyrolyse** et de **gazéification**.

Les gaz ayant la plus grande **capacité calorifique** proviennent **du charbon de bois**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la combustion**

Les différentes phases de combustion.

→ **Évaporation de l'eau** : étape endothermique à $T \cong 100^{\circ}\text{C}$.

→ **Gazéification du bois**, à $T \cong 250^{\circ}\text{C}$ et production de **charbon de bois** avec dégagement de **fumées** composées de vapeur d'eau, de gaz combustibles et de gouttelettes de goudron.

→ **Auto inflammation des fumées**, à $T \cong 300^{\circ}\text{C}$.

→ **Gazéification du carbone**, à $T \cong 500^{\circ}\text{C}$. Transformation du charbon en gaz riches en hydrogène et en monoxyde de carbone.

→ **Oxydation du carbone et des gaz combustibles** à partir de $T \cong 600^{\circ}\text{C}$ qui produit du CO_2 , de l'eau et des oxydes d'azote. La température peut alors atteindre entre 700°C et 1500°C .

La combustion proprement dite se produit à partir **des fumées**, des **gaz** issus de la décomposition du charbon de bois et du **carbone solide**.

Cette phase de combustion fournit la chaleur nécessaire à la pyrolyse et la gazéification.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la combustion**

Pour résumer, la combustion du bois est un **processus complexe** associant :

- ◆ **Séchage.**
- ◆ **Pyrolyse/gazéification.**
- ◆ **Oxydation** (combustion).

En pratique, les différentes phases de la combustion du bois surviennent simultanément, et dans un foyer convenablement alimenté en air, on parvient à une combustion quasi-complète.

Pour cela, il faut réaliser une **double combustion** en utilisant deux flux d'air

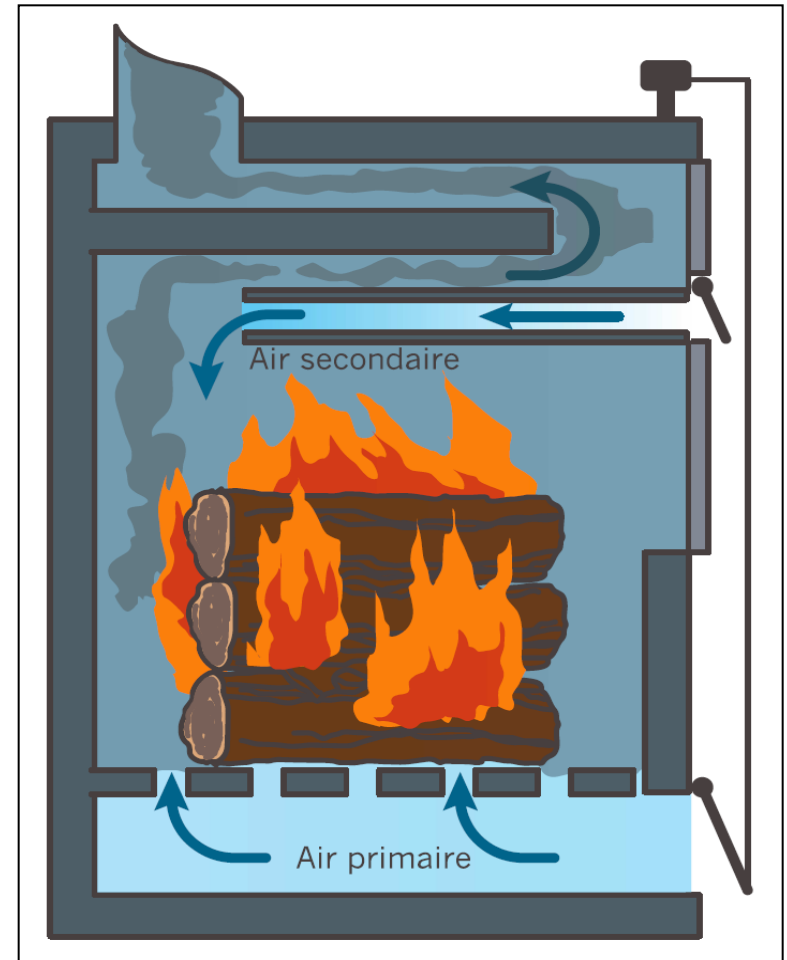
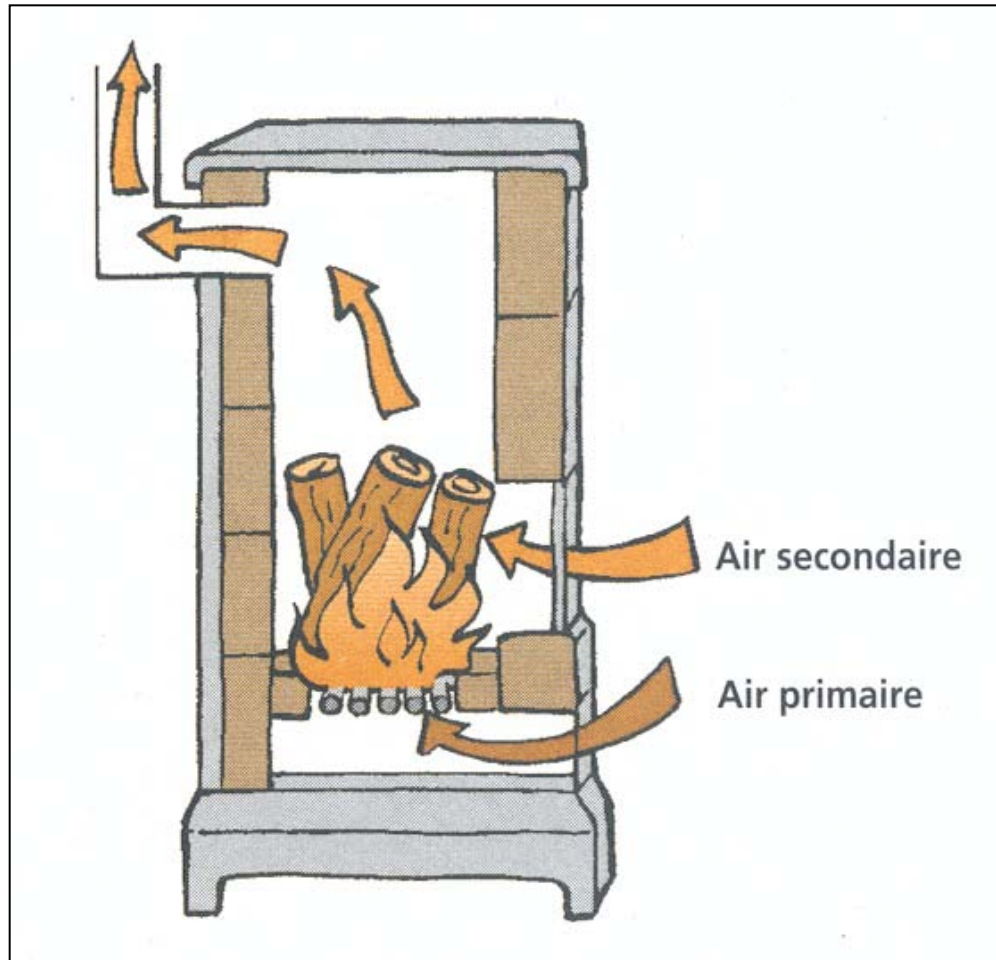
- ◆ **L'air primaire** est dirigé vers les braises pour entretenir la pyrolyse et la combustion des matières solides.
- ◆ **L'air secondaire** est dirigé vers les flammes, au-dessus du feu.

La chaleur est récupérée **au niveau des fumées** : ***pas au niveau du foyer.***

Il n'y a qu'**un** régime optimal de combustion.

IV. Les énergies renouvelables

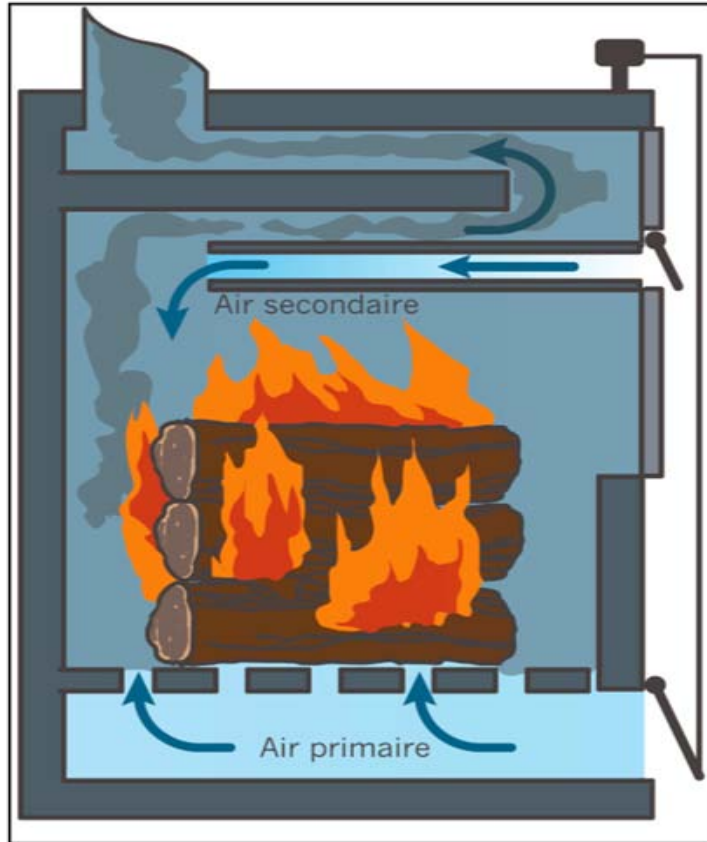
1. La biomasse : le bois énergie → la double combustion



http://codev.pays-des-paillons.fr/bois_chaudieres.php et ADEME.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion montante**



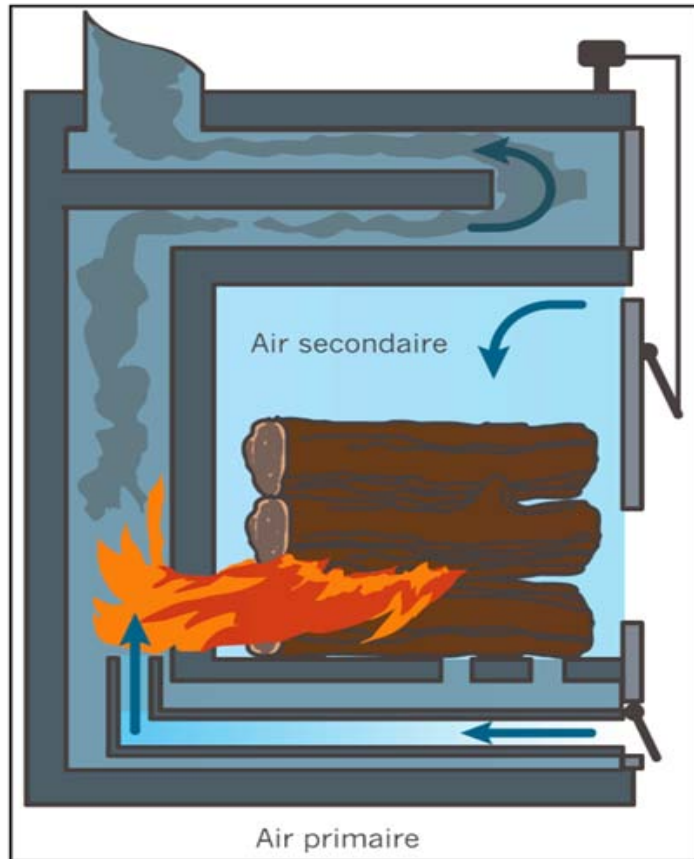
Toute la charge s'enflamme simultanément. La combustion est donc difficile à maîtriser et du coup incomplète

Rendement moyen d'après l'ADEME → de 55 % à 70 %.

Label Flamme Verte → 70 % minimum pour une chaudière manuelle

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion horizontale**



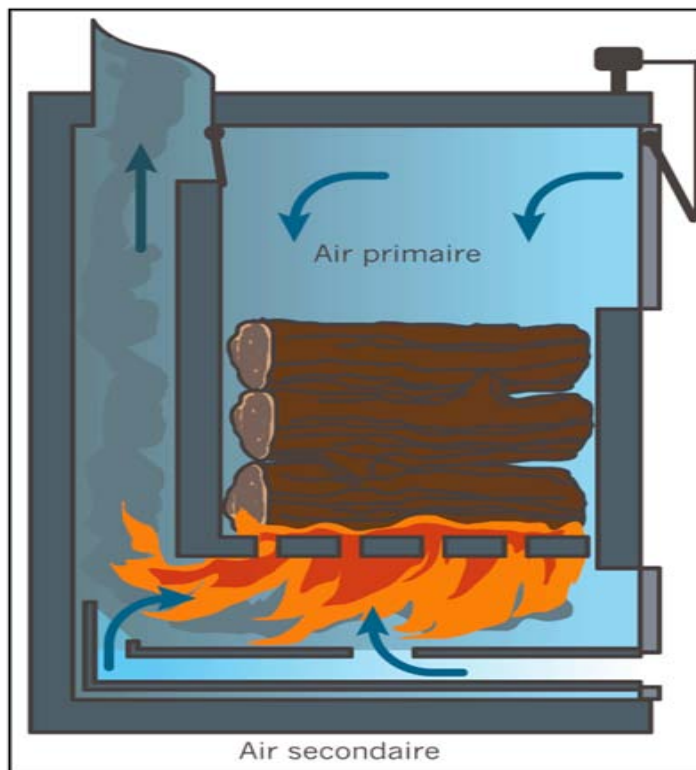
La combustion est stratifiée, l'air secondaire est préchauffé et les bûches situées dans la partie supérieure sont séchées avant la combustion. Le taux d'imbrulé est par conséquent faible.

Rendement moyen d'après l'ADEME → de 65 % à 80 %.

Label Flamme Verte → 70 % minimum pour une chaudière manuelle

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion inversée**



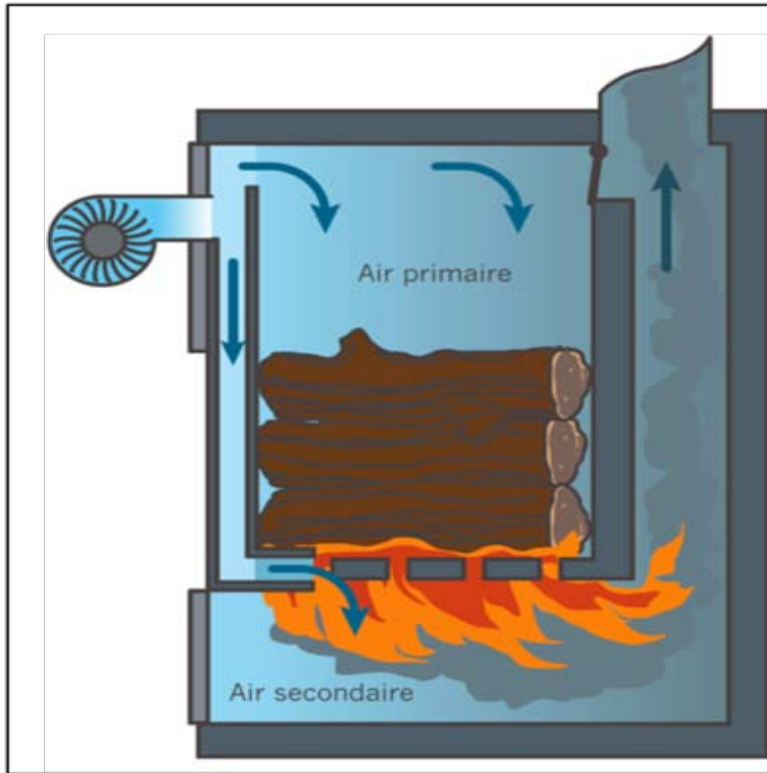
Cette variante de la chaudière à combustion horizontale peut conduire à des rendements supérieurs mais nécessite un tirage plus important et une gestion des cendres de façon à ce qu'elles ne bouchent pas les orifices de passage des gaz

Rendement moyen d'après l'ADEME → de 65 % à 80 %.

Label Flamme Verte → 70 % minimum pour une chaudière manuelle

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion forcée**



La ventilation mécanique permet de récupérer plus de chaleur sur les gaz. De plus le débit d'air peut être régulé plus finement.

Rendement moyen d'après l'ADEME → de 75 % à 85 %.

Label Flamme Verte → 70 % minimum pour une chaudière manuelle

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion forcée : exemple**

Chaudière à combustion forcée et tirage assisté par ventilateur de **HS France** vendue pour un rendement de 90 %, sur une gamme de puissance allant de 20 kW à 50 kW.



Une **sonde lambda** mesure la concentration en oxygène dans les fumées et permet une régulation précise de la répartition des débits d'air **primaire** et **secondaire**.

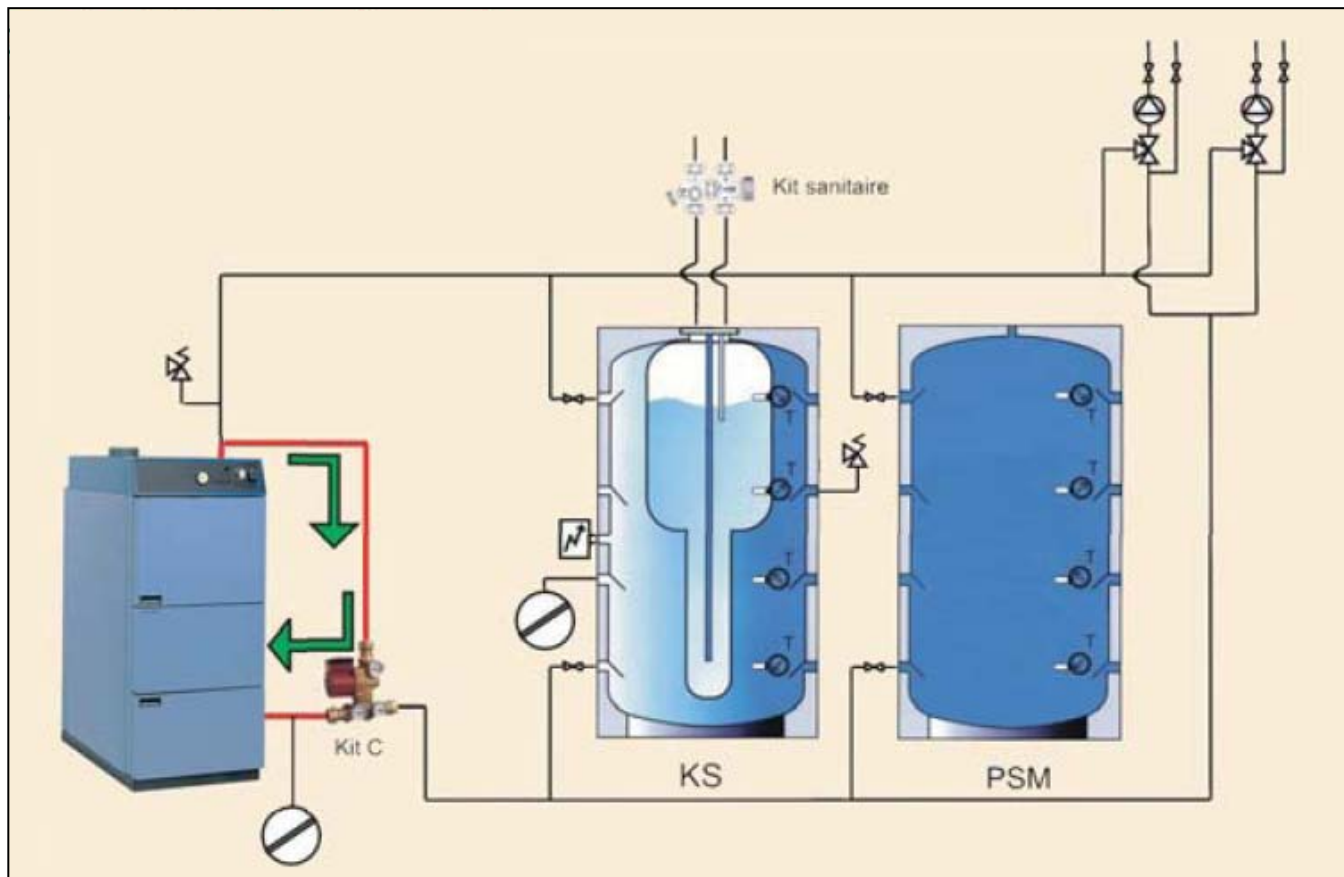
La puissance de chauffe est réglée par l'intermédiaire du débit d'air extrait.

Le bois peut être emmagasiné dans une **chambre de stockage** avant la combustion. Les installations utilisant des chaudières de ce type fonctionnent suivant **trois phases**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion forcée : exemple**

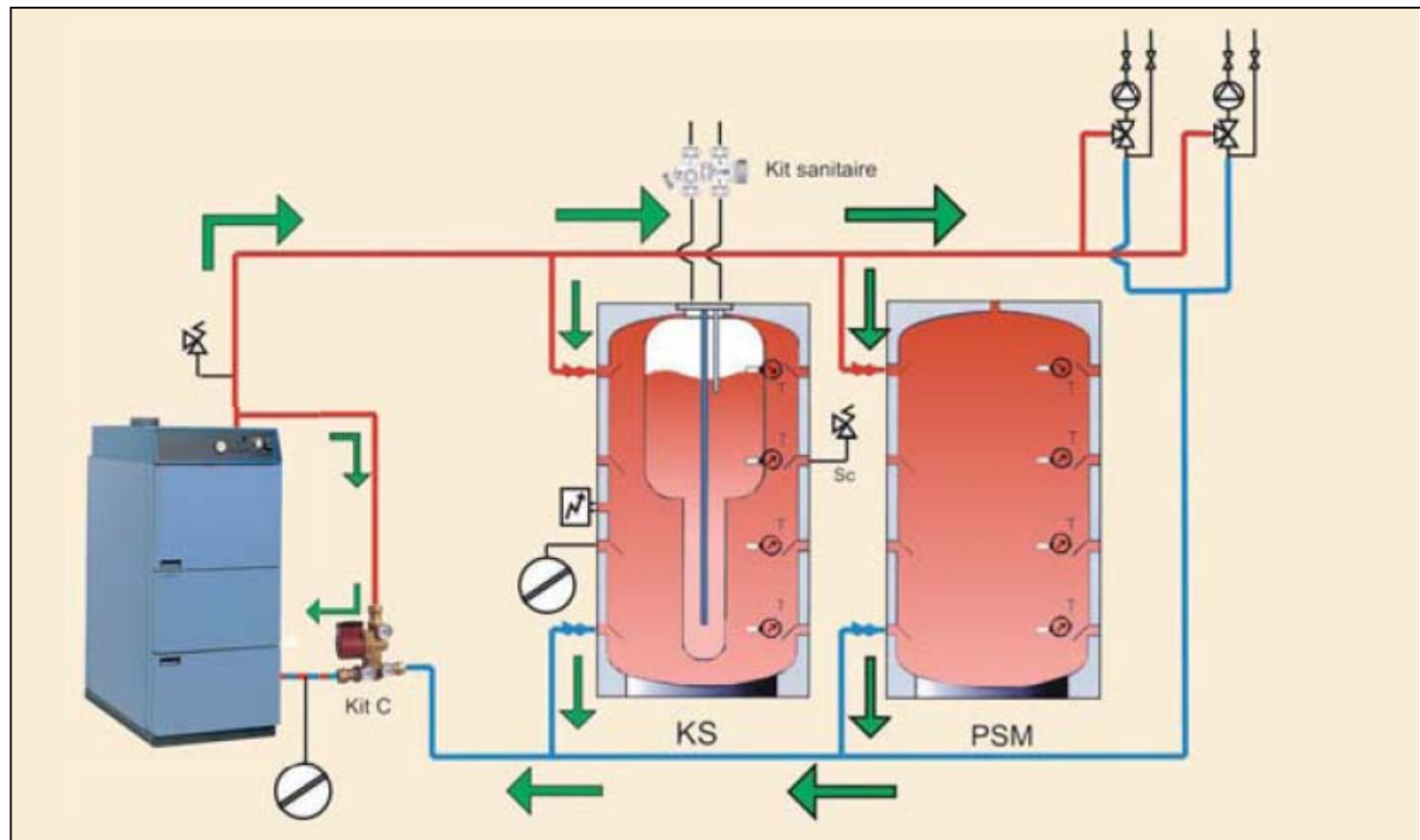
1. Phase de **montée en température** → la température de retour doit être supérieure à 60°C.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion forcée : exemple**

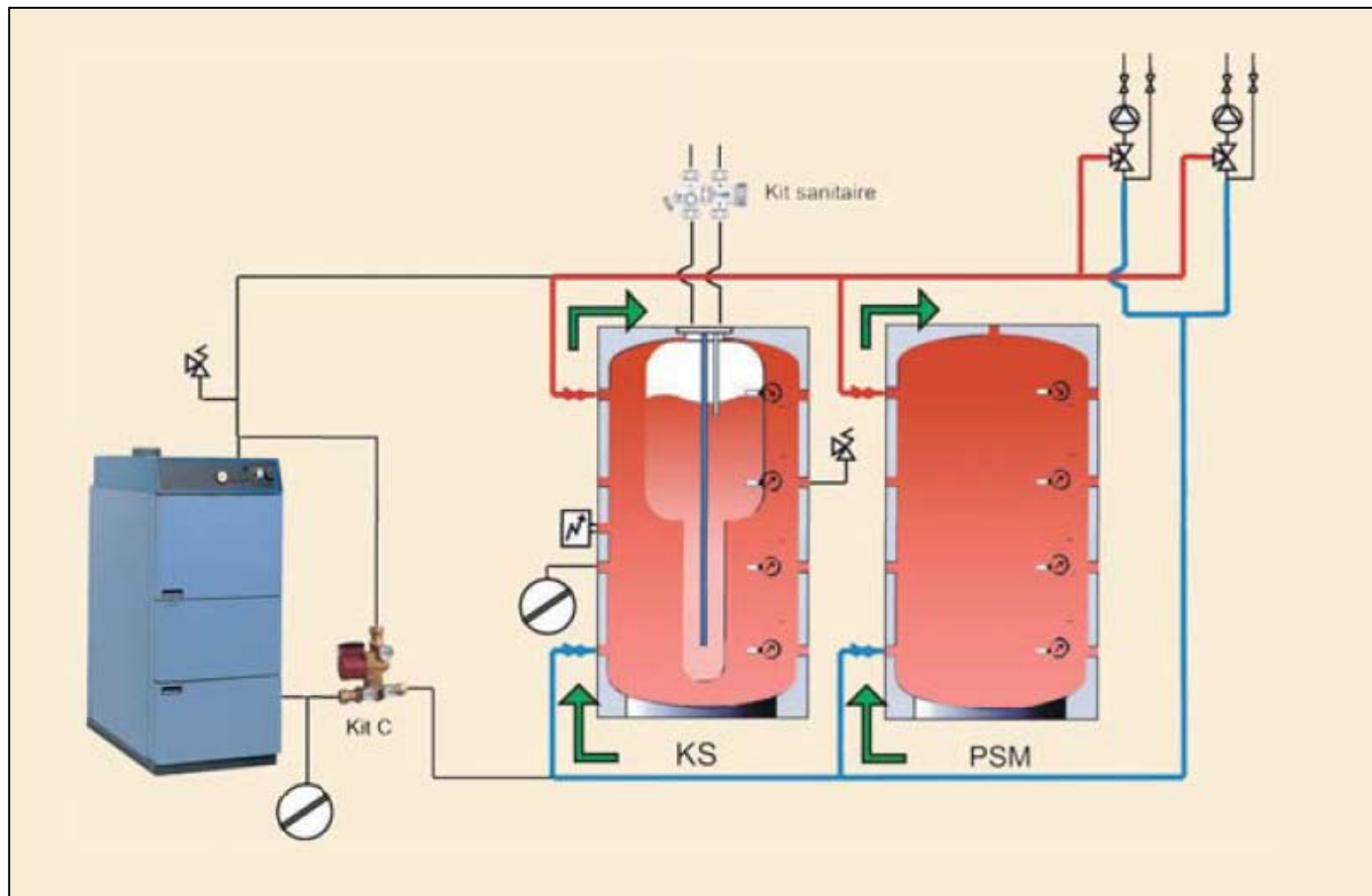
2. Phase de **distribution** et d'**accumulation** → on donne la priorité aux besoins de chauffage immédiat



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaudière à combustion forcée : exemple**

3. Phase de **déstockage** de la chaleur → la combustion dans la chaudière est terminée : les ballons tampons alimentent le circuit de chauffage



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la plaquette ou bois déchiqueté**

- ◆ La **plaquette forestière** est produite directement à partir du bois prélevé en forêt : elle est obtenue par broyage de bois, sous la forme de billons, grumes, arbres entiers, ou **rémanents** d'exploitation forestière (ce qui reste au sol).
- ◆ La **plaquette de scierie** est issue des industries de transformation du bois. Elle peut être produite par exemple à partir des chutes de bois résultant du sciage des grumes (**produits connexes du sciage : PCS**).
- ◆ Les plaquettes peuvent également être issues de la **récupération de déchets** de bois : les **déchets industriels banals (DIB)** ou **bois de rebut** (palettes).



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la plaquette forestière**

- ◆ La **plaquette forestière** est produite à l'aide de broyeurs forestiers (**à couteaux**). Les opérations de broyage sont réalisées directement sur l'aire de stockage et de conditionnement.
- ◆ Des **billons** ou **grumes** (les troncs nettoyés de leurs branches) sont déchiquetés dans un broyeur qui projette la plaquette soit dans un hangar de stockage, soit directement dans un camion pour la livraison.
- ◆ Les **arbres entiers** avec leurs **branches** peuvent également être utilisés mais il est nécessaire que le broyage se réalise directement en forêt (sur le lieu de la coupe). C'est plus cher, plus compliqué, mais intéressant pour l'utilisation directe des **rémanents**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → la plaquette forestière



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → la plaquette forestière



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la plaquette forestière**



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **les rémanents**

Les **rémanents** d'exploitation forestière correspondent à ce qui reste au sol après les activités de l'homme en forêt ou sur les arbres en linéaire.



<http://biodiversite.wallonie.be>.

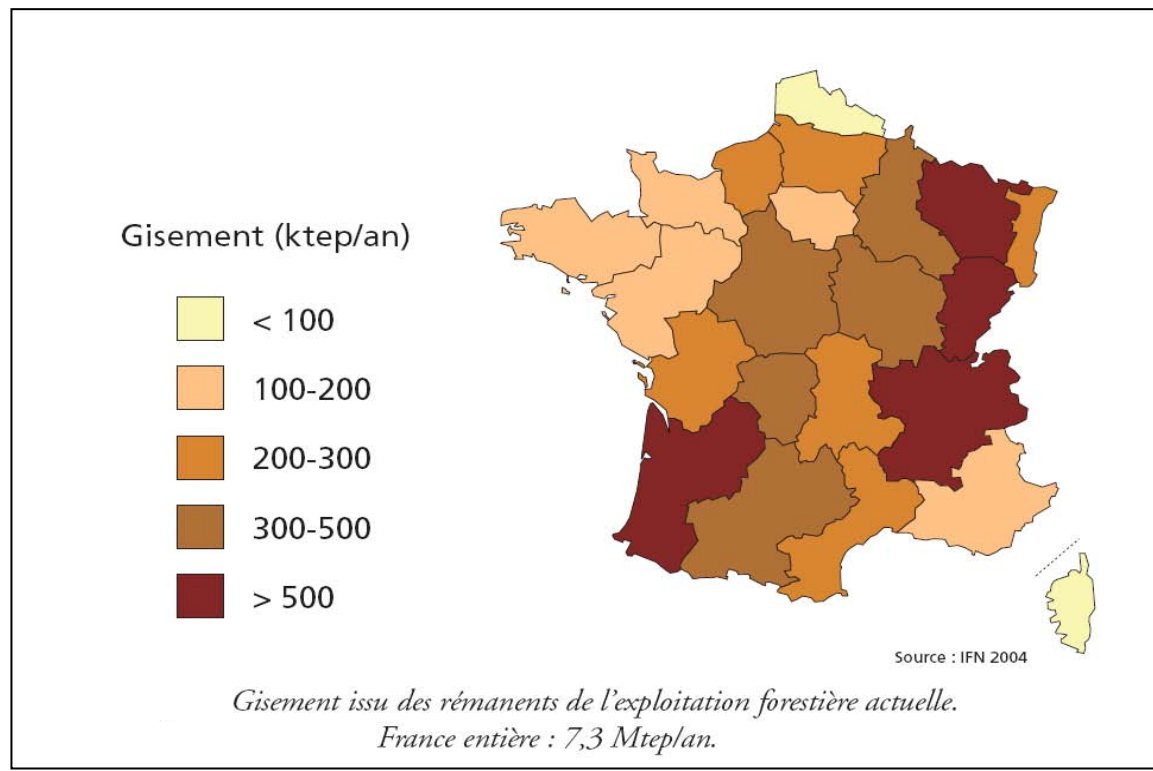


Wikipedia.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les rémanents

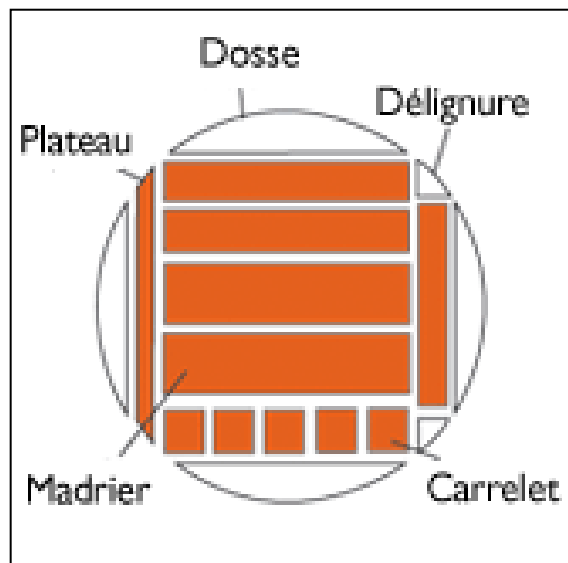
Le gisement énergétique constitué par les permanents pourrait être très important (**7,3 Mtep** représentant plus de 4 % de notre consommation en énergies finales) mais les **bonnes pratiques** concernant leur exploitation ne sont pas encore clairement définies.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la plaquette de scierie**

- ♦ La **plaquette de scierie** est issue des industries de transformation du bois, en particulier des **grumes** ou **billons**. Elle est produite à partir des diverses **chutes** de bois (**dosses** et **délignures**), directement sur la **chaîne de sciage**, ou bien par un **broyeur annexe**.
- ♦ Le rendement matière d'une scierie est de l'ordre de 60 % à 85 % → les **produits connexes du sciage (PCS)** sont donc très abondants.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **la plaquette de bois de rebut**

- ◆ Le bois de rebut doit être broyé dans une machine équipée d'outils de déferrailage. Ces broyeurs (**à marteaux**) ne permettent pas une maîtrise de la **granulométrie** qui reste grossière.
- ◆ L'utilisation des **plaquettes de bois de rebut** n'est possible qu'à condition que le bois utilisé ne soit **pas souillé** (pas de bois **peints, vernis**, ou d'**agglomérés**).
- ◆ Les chaudières automatiques au bois ne sont pourvues que d'épurateurs de poussières sur les conduits de fumées. Elles ne sont **pas conçues** pour nettoyer les fumées des rejets issus de la combustion de **plastiques, colles**, etc. Il est donc impératif de consommer uniquement du bois propre.
- ◆ Il ne suffit pas que le bois soit simplement propre visuellement pour que la combustion soit exempte de polluants (traitement des bois, etc...).

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **les plaquettes**



Camion benne
http://www.gfservices.fr/photo_plaquette.asp.

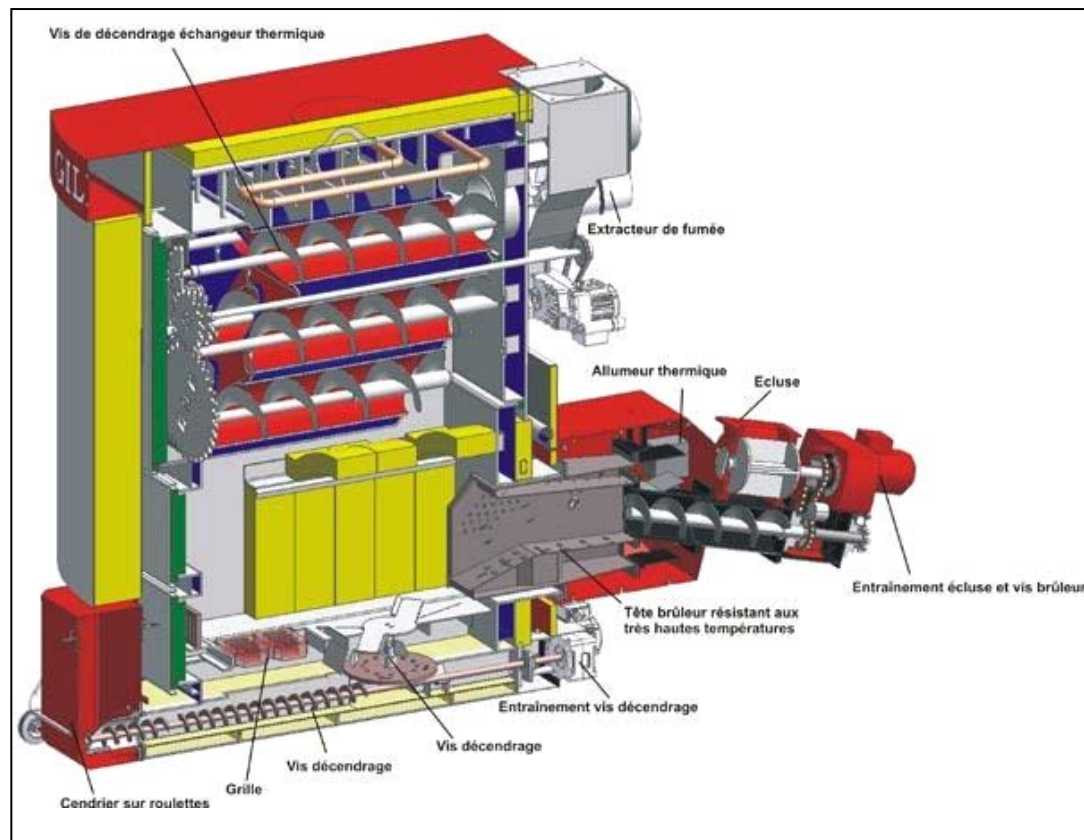


Camion souffleur
http://www.gfservices.fr/photo_plaquette.asp.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les chaudières à plaquettes

- ◆ Rendement moyen d'après l'ADEME → de 75 % à 85 %.
- ◆ Label Flamme Verte → 75 % minimum pour une chaudière automatique.



Les chaudières à plaquettes sont en général réservées à des **usages industriels** ou **collectifs**. Elles privilégient souvent la **robustesse** au rendement → elles sont adaptées à divers types de combustible, de qualité variable.

Les puissances varient de quelques **dizaines de kW** à quelques **centaines de kW**, voire **quelques MW**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaufferie collectives et industrielles**

Services Énergétiques et Environnementaux de Vandeuvre



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaufferie collectives et industrielles**

Services Énergétiques et Environnementaux de Vandoeuvre



<http://www.faiteslepleindavenir.com/wp-content/uploads/2010/11/Vandoeuvre.jpg>

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaufferie collectives et industrielles**

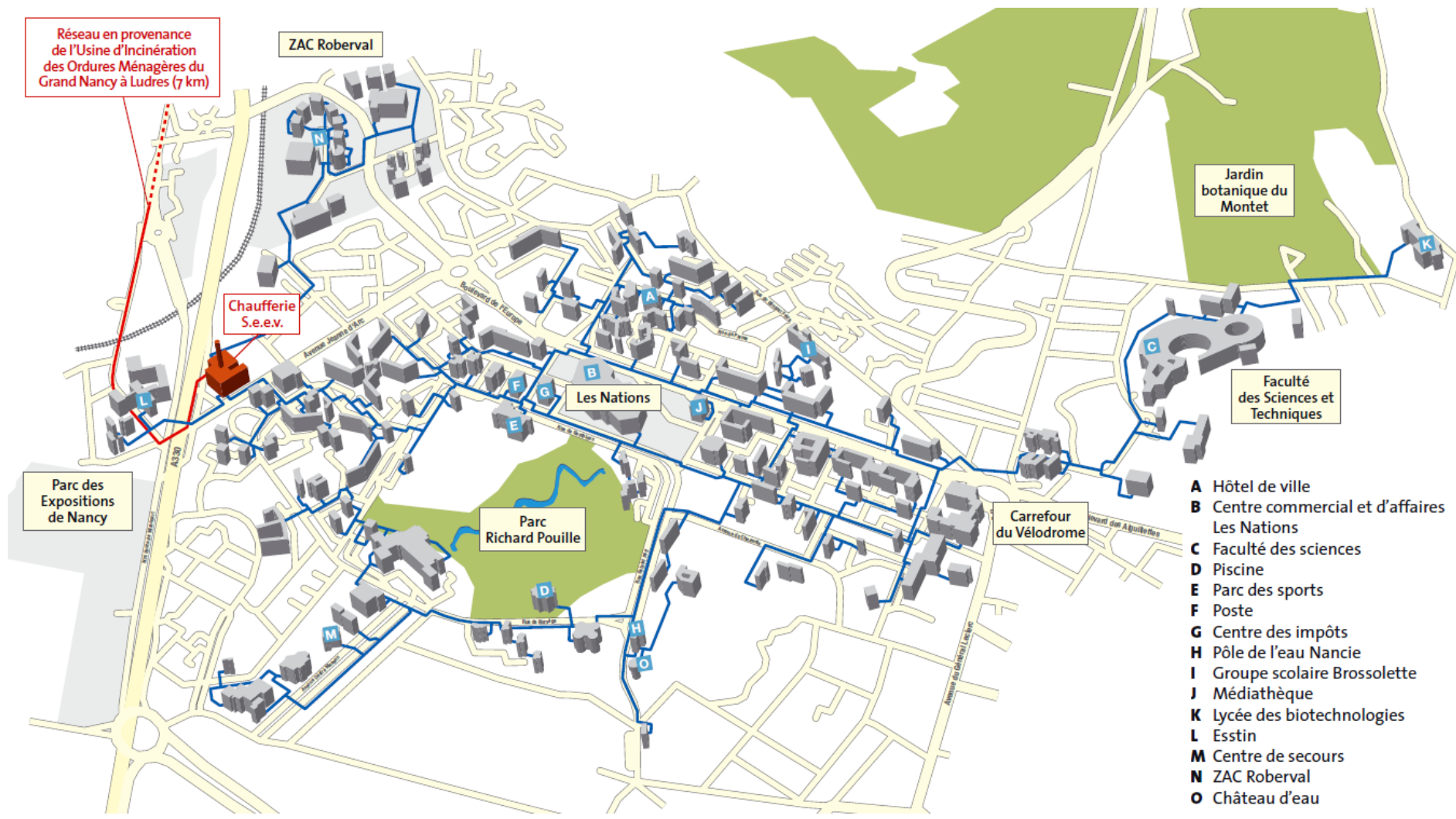
Services Énergétiques et Environnementaux de Vandoeuvre

- o Construite en 2008 pour un coût de 12 M€, la chaufferie vient en complément de l'usine d'incinération de Ludres pour alimenter le réseau de chauffage urbain de 15 km qui permet le chauffage 13000 équivalent-logements (8000 logements, des bâtiments publics, le Campus de la faculté des sciences, l' ESSTIN, etc.)
- o La chaufferie biomasse a une puissance 8 à 9 MW. Elle consomme 18000 tonnes de plaquettes forestières par an.
- o Pour l'appoint pendant les périodes de grand froid et en secours, la chaufferie dispose également de quatre chaudières mixtes (gaz/fioul) de 20 MW chacune.
- o Les plaquettes forestières sont produites par la plate-forme de Velaine en Haye. Cette plate-forme assure l'approvisionnement des trois chaufferies biomasse du Grand Nancy (plateau de Haye, Rives de Meurthe, Vandœuvre).
- o Un parc solaire photovoltaïque de 36 kW est installé sur la toiture de l'usine.
- o Ces infrastructures emploient environ 40 personnes.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaufferie collectives et industrielles**

Services Énergétiques et Environnementaux de Vandoeuvre



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **chaufferie collectives et industrielles**

Services Énergétiques et Environnementaux de Vandoeuvre



http://www.faiteslepleindavenir.com/wp-content/uploads/2010/11/Plateforme_Velaine_en_Haye.jpg

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **les granulés (ou pellets)**

- ◆ Les **granulés** sont composés de **sciure compactée** en éléments de petite taille : cylindres de 4 à 6 mm de diamètre pour une longueur de 10 à 20 mm.
- ◆ La sciure doit être préalablement **séchée**, souvent grâce à la chaleur résultant de la combustion d'autres chutes, comme les écorces.
- ◆ Le **compactage** a lieu dans une **presse**, sous des **pressions importantes** et sous l'effet du **pouvoir liant naturel** de la **lignine**. Certains procédés de fabrication utilisent d'autres liants naturels comme de l'**amidon** de maïs mais jamais de colle.
- ◆ Les granulés sont livrables **en vrac** (par camion benne ou camion souffleur), en sac de **500 kg** à **une tonne** environ («**big bag**») ou en **sachets** de **10** à **20 kg**.
- ◆ Ils ne peuvent être produits que sur des **sites spécialisés**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)



Camion benne

<http://www.dg-pro-services.com/questce.html>.



Camion souffleur

<http://www.wallach-pellets.fr/achat-pellets/vente-pellets-vrac.html>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **les granulés (ou pellets)**



Conditionnement en sacs de 15 kg

<http://combustibles-fuel-livraison-fuel-jeanmenil-vosges-lorraine.colne-pha.fr/pellet.htm>.

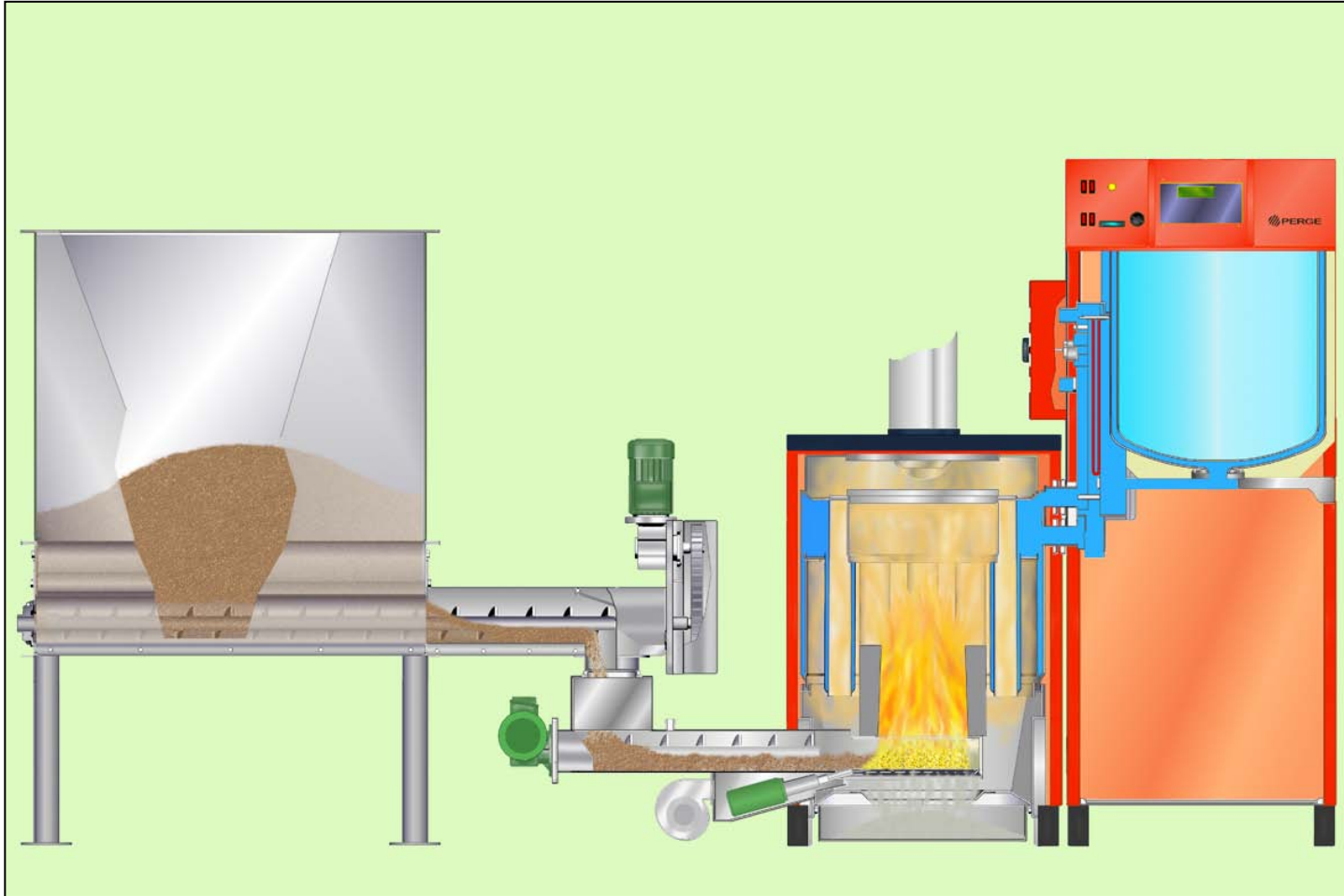


Big bag.

<http://www.econologie.com/forums/chaudiere-bois-nouveau-schema-installation-ecs-et-pcs-vt4589.html>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)



Système de stockage de granulés + chaudière automatique
<http://www.amavetchauffage.com/page%20solaire.html>.

IV. Les énergies renouvelables

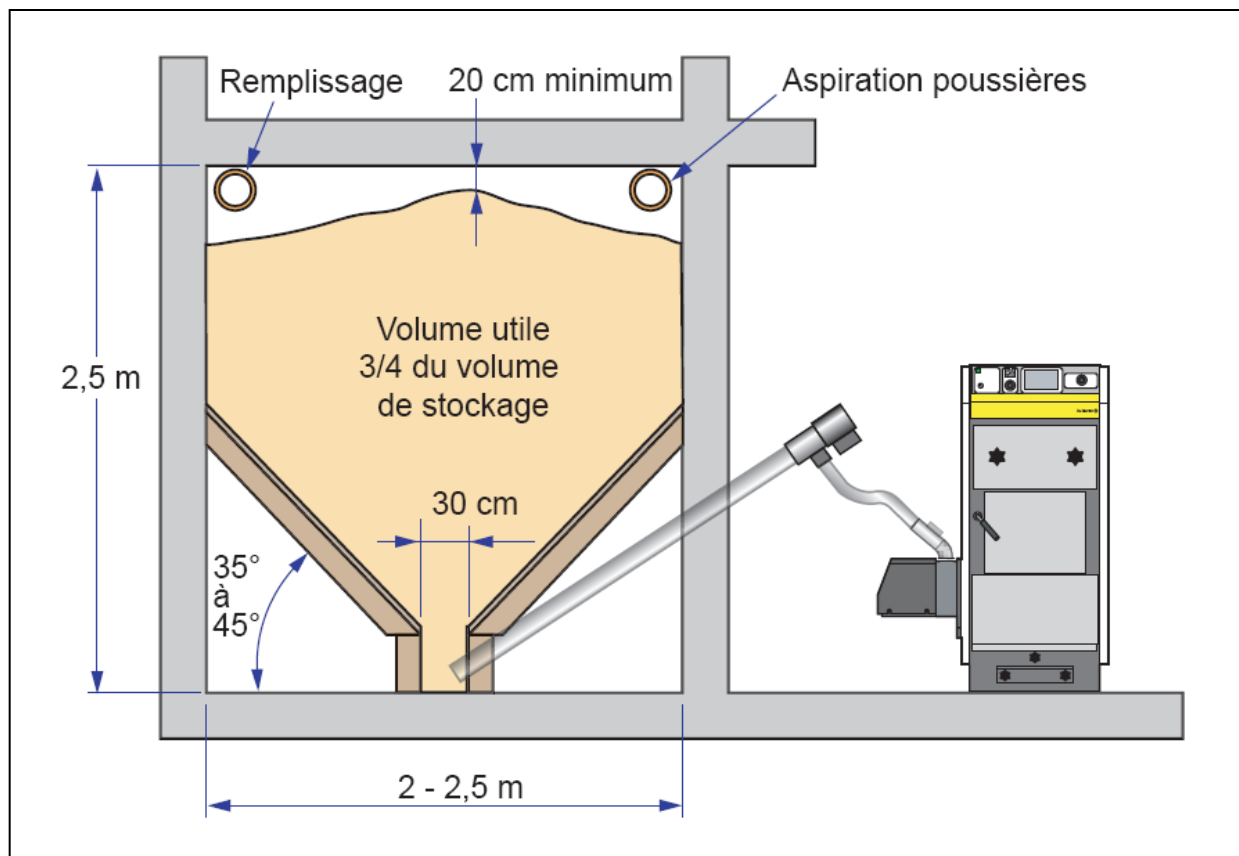
1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)



Réservoir pour granulés de **730 litres** (h×L ×l = 1422 mm×1000 mm×1000 mm) et de **5,7 m³**
<http://www.ekko-solutions.com/silo-pellets-granules-bois-stockage-17.html>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)



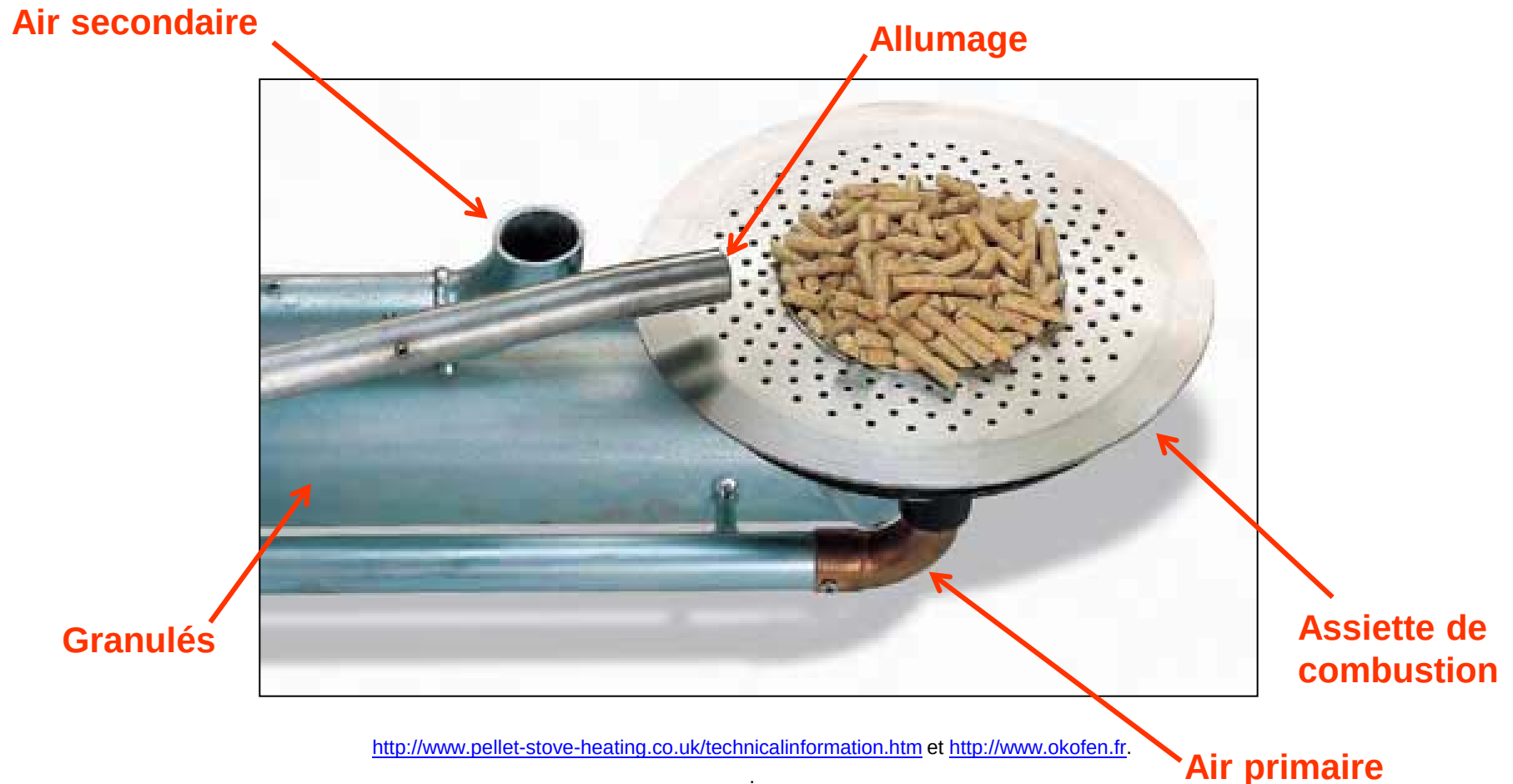
Les granulés sont utilisés en fonction de la demande thermique, comme un combustible fluide.

Il s'agit de chaudières à **combustion montante**, à tirage naturel ou forcé, avec **double combustion**. Le nettoyage est plus ou moins automatisé.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)

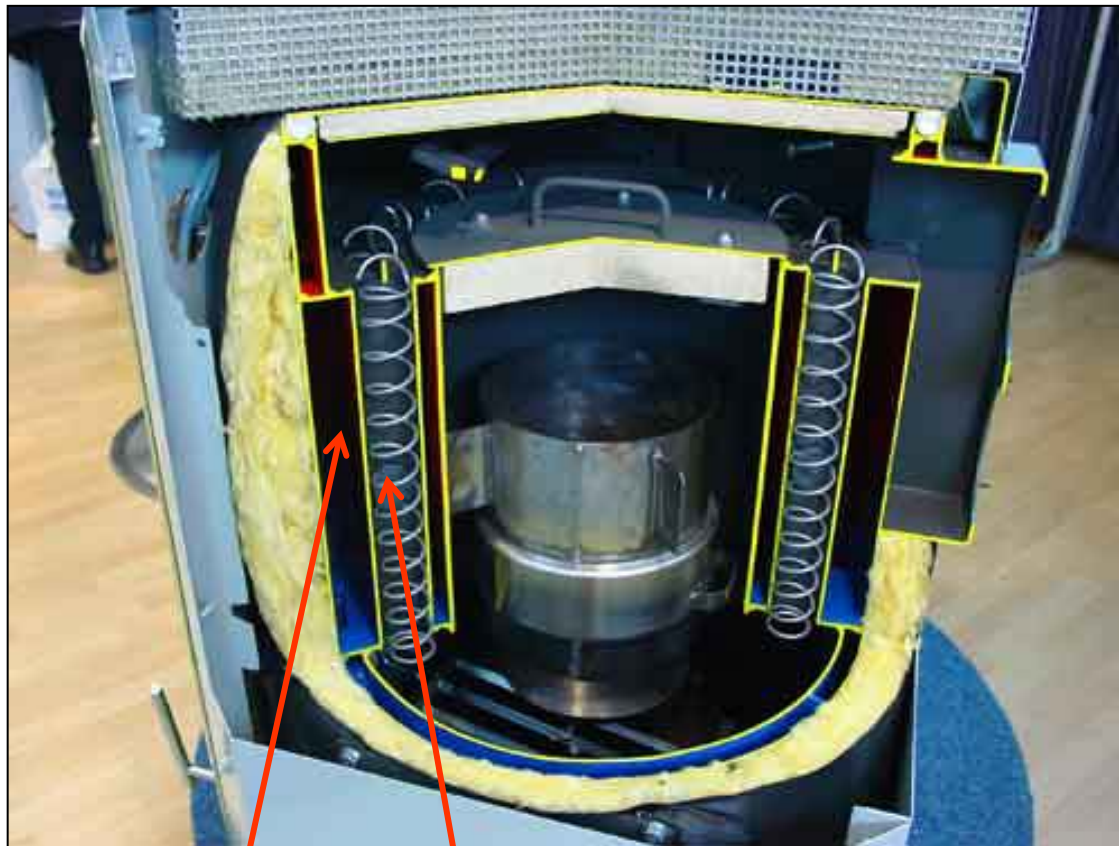
Foyer et brûleur avec double combustion → chaudières ÖkoFEN
Gamme de 8 kW (2 kW) à 224 kW (4×56 kW) - Rendement $\cong$ **92 %**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)

Foyer et brûleur avec double combustion → chaudières ÖkoFEN
Gamme de 8 kW (2 kW) à 224 kW (4×56 kW) - Rendement $\cong$ **92 %**.



Eau

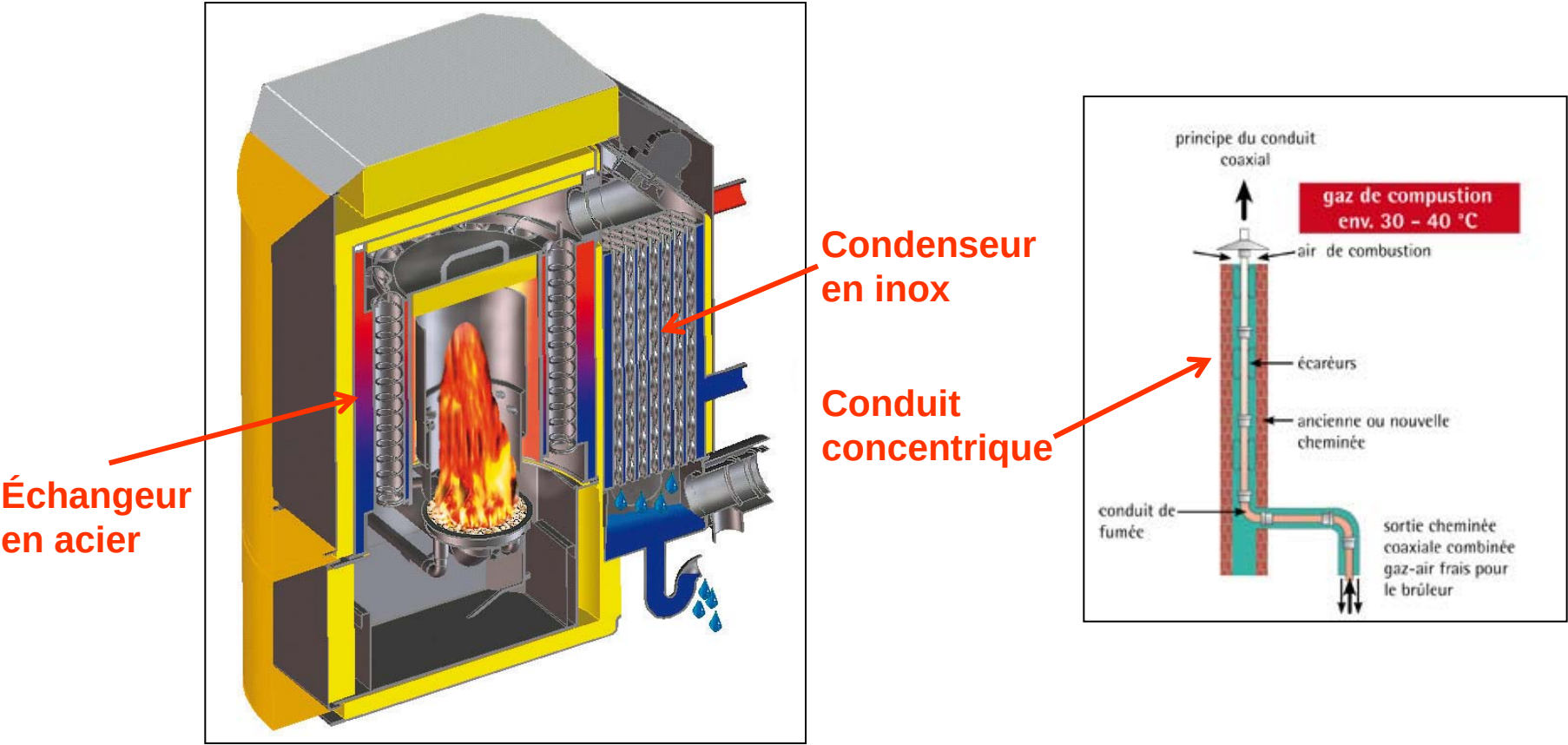
Fumées

<http://www.pellet-stove-heating.co.uk/technicalinformation.htm> et <http://www.okofen.fr>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → les granulés (ou pellets)

Chaudières ÖkoFEN à condensation → PC de 17,3 à 18,8 MJ/kg (+ 8,5 %)
Gamme de 12 kW à 32 kW - Rendement $\cong$ **100 %**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **les granulés (ou pellets)**

Avantages des granulés de bois :

- ◆ Il s'agit de **bois sec**, donc avec un pouvoir calorifique important (entre 4700 à 5200 kWh/t → 5000 kWh/t minimum suivant la norme DIN + délivrée en Allemagne -www.wallach-pellets.fr-).
- ◆ La **cinétique de combustion** permet une **régulation fine** des chaudière et donc d'atteindre des **rendements importants** → jusqu'à **90 %** d'après l'**ADEME**, au minimum de **75 %** à la **puissance nominale** d'après le **label *Flamme Verte***.
- ◆ Il correspond à la **forme la plus dense** -en volume- du **bois énergie**.

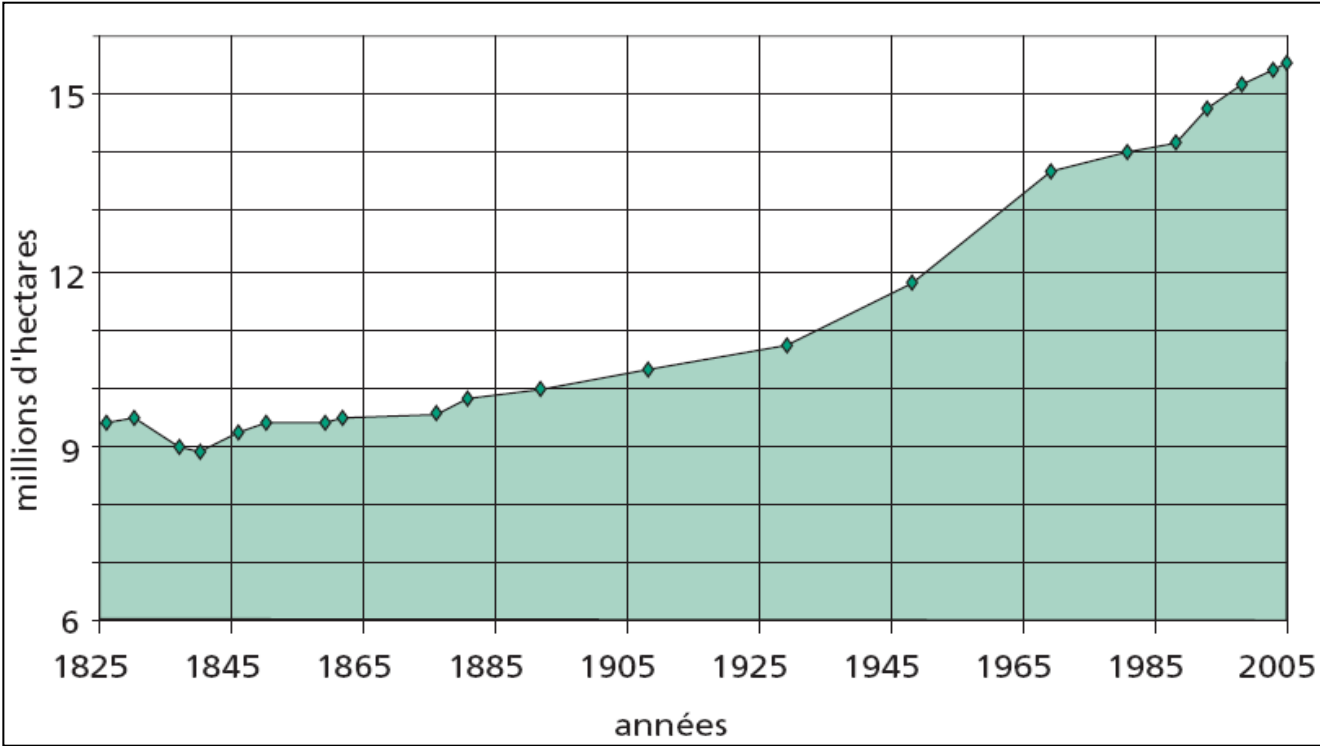
Inconvénients des granulés de bois :

- ◆ C'est un produit **plus technique** que le bois sous d'autres formes, donc souvent **plus cher**, dont la fabrication **consomme** de l'énergie.
- ◆ Le **volume de stockage** reste important par rapport au fioul domestique.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **potentiel des forêts en France**

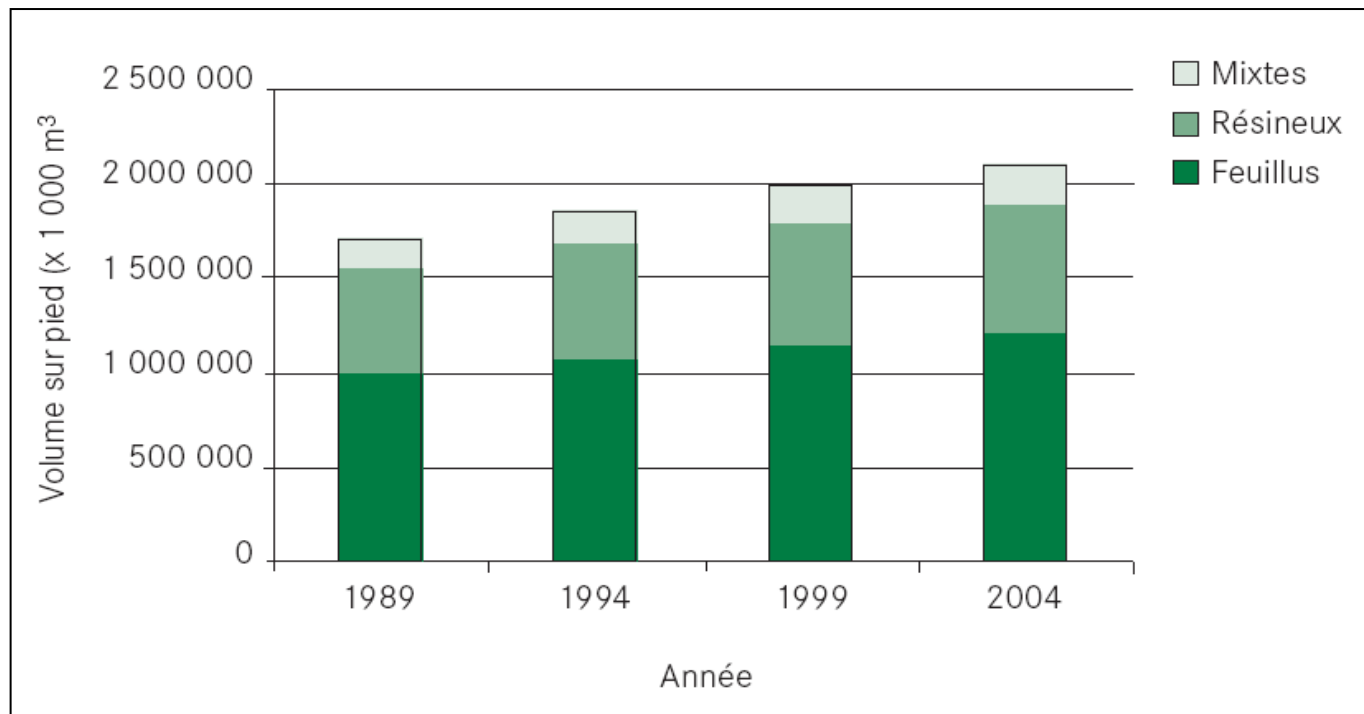
La forêt française s'accroît régulièrement en surface et en volume : elle occupe **16,1 Mha** en 2009 (rappel → SAU = 29 Mha), soit **29 %** du territoire national, ce qui représente un volume de 2,4 milliards de m³ de **bois sur pied**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **potentiel des forêts en France**

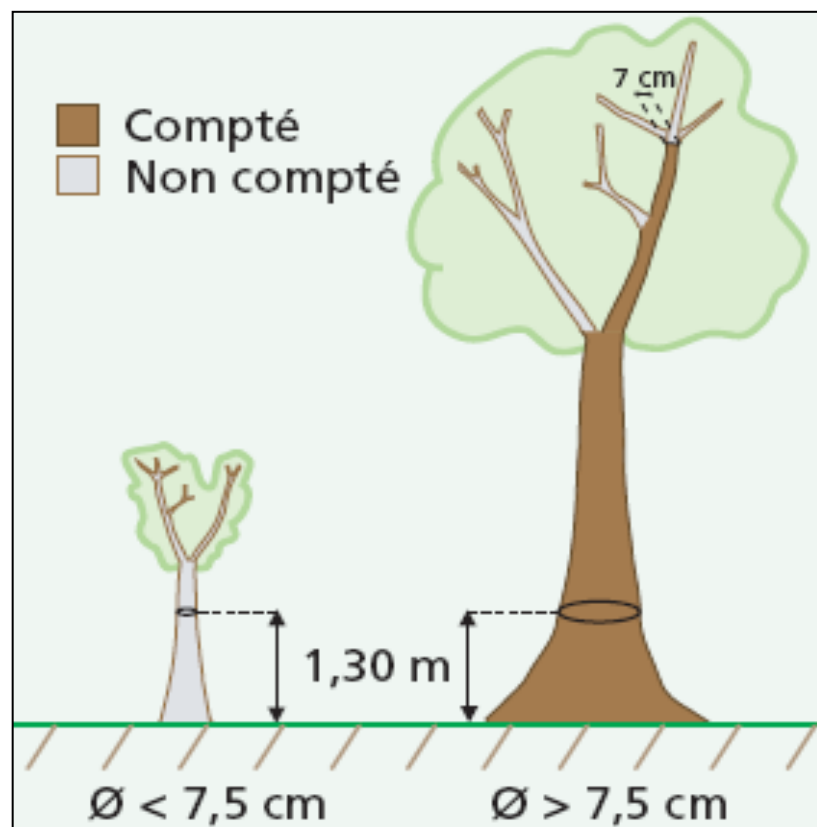
Ces 2,4 milliards de m³ de bois sur pied produisaient environ **90 Mm³/an** en 2002 dont environ 70 % sont prélevés (60 Mm³/an). Le reste participe à l'accroissement du capital forestier, qui augmente de plus de 1 % par an.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **potentiel des forêts en France**

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.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **potentiel des forêts en France**

Selon l'ADEME, les **9 Mtep** annuelles fournies par le bois proviennent de **35 Mm³/an**

→ un peu plus de la moitié du total de 60 Mm³/an prélevé

80 % de ces 9 Mtep sont consommés directement par les ménages pour le chauffage domestique.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **perspective : taillis à croissance rapide**

Les **Taillis à Croissance Rapide (TCR)** sont des cultures d'espèces **améliorées génétiquement** (sélection, hybridation) ; elles sont plantées à haute densité (**1500 à 3000 plants/ha** contre quelques centaines habituellement) et exploitées selon un **cycle court** (5 à 10 ans) avec **rejet de souche**.



Taillis à courte rotation (TCR) de saules (clones), irrigué par l'eau de la station d'épuration de Villeneuve d'Ascq (dans le nord de la France), pour épuration finale des nitrates et des phosphates. Ce taillis a servi à produire des plaquettes forestières alimentant une chaufferie-bois.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Taillis_à_courte_rotation.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **perspective : taillis à croissance rapide**

- ◆ Les espèces plantées peuvent être des saules, des peupliers, des eucalyptus, des châtaigniers, des aulnes → les **besoins en eau** sont donc importants.
- ◆ L'exploitation de ces parcelles est fortement mécanisée : on parle d'**agroforesterie**.
- ◆ Les rendements seraient de l'ordre de **8 à 15 tonnes** de matière sèche par hectare et par an.
- ◆ Les usages des TCR ne sont pas seulement énergétiques : **papeterie, épuration des sols, aménagement du territoire**.
- ◆ Des **Taillis à Très Courte Rotation (TTCR)** avec des densités de **10000 à 20000 plants/ha** et une récolte à l'âge de 2 ans ont été expérimentés (Suède).

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : le bois énergie → **avantages et inconvénients**

Avantages du bois énergie

- Connaissance ancestrale de la forêt et de sa gestion.
- Le bois énergie reste compatible avec d'autres usages.
- Culture sans engrais ni pesticides.
- Les forêts constituent des puits de carbone (d'autant plus lorsqu'elles sont bien exploitées) → 71 tC/ha stockées en permanence dans la biomasse forestière + puit annuel de 0,9 tC/ha/an.
- L'exploitation raisonnable des forêts favorise la biodiversité.

Inconvénients du bois énergie

- Des usages qui ne sont pas universels.
- Des contraintes liées au transport de produits massifs et volumineux.
- Une qualité de combustion à surveiller.
- Des risques (malgré tout) pour la biodiversité → sylviculture, TRC, TTRC.
- Incendies de forêt ?

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : autres ressources lignocellulosiques → **la paille**

- ◆ En France, on produit environ **25 millions de tonnes** de paille par an
- ◆ Tous les agriculteurs n'exploitent pas cette paille : environ **30 % est enfouie dans le sol** et d'après l'INRA, une grande partie pourrait être prélevée sans danger agronomique → environ **5 millions de tonnes**, soit **1,5 Mtep d'énergie primaire** ($\cong 0,5$ % de 270 Mtep).
- ◆ En France, la valorisation non alimentaire des pailles a régressé avec la disparition des usages papetiers :
 - D'une part, la paille est **concurrencée** par le **bois** qui a bénéficié des programmes de développement importants de l'ADEME.
 - D'autre part, les enjeux économiques de la valorisation non alimentaire des pailles ont été jugés **peu attractifs** par les agriculteurs et les structures **agro-industrielles** qui ont joué la carte du développement des **agrocarburants**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : autres ressources lignocellulosiques → **la paille**

- ◆ La **Chine** a construit en zones rurales **34 centrales** produisant de l'électricité à partir de paille, entrées en service à partir de 2006.
- ◆ La première d'entre elles, construite à **Suqian** a une capacité maximale de **24 MW** et pourra produire environ **130 millions de kWh** par an, pour une consommation annuelle comprise entre **150.000 à 200.000 tonnes de paille**.
- ◆ Le potentiel total des 34 centrales serait donc d'environ **6 millions de tonnes** de paille, soit entre **1,5 et 2 Mtep** en énergie primaire.
- ◆ On peut aussi considérer que ces 6 millions de tonnes de paille représentent une économie de **3 millions de tonnes de charbon**.
- ◆ Le recyclage de la paille générée par l'agriculture permet d'éviter sa combustion en plein air par les agriculteurs après la moisson: on estime que **200 millions de tonnes** sont brûlées chaque année, soit environ **60 Mtep en énergie primaire** → **20 Mtep** ($\cong 1,1$ % de **1720 Mtep**) exploitables avec un prélèvement de **30 %**.

Suqian Biomass Power Generation Ltd, au nord de la province de Jiangsu.
<http://www.ccchina.gov.cn/en/NewsInfo.asp?NewsId=9851>.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : autres ressources lignocellulosiques → **le miscanthus giganteus**

Le ***miscanthus giganteus*** ou herbe à éléphants, ou encore roseau de Chine, est une graminée vivace à rhizome.

C'est une espèce hybride (et stérile) qui résulte du croisement de ***miscanthus sinensis*** et ***miscanthus sacchariflorus***.



http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Miscanthus_sinensis_ja01.jpg.



<http://www.ext.nodak.edu/county/cass/horticulture/grass/grass/miscanthus.jpg>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : autres ressources lignocellulosiques → **le miscanthus giganteus**

Le ***miscanthus giganteus*** possède un métabolisme de photosynthèse très efficace et elle est souvent présentée comme une herbe extrêmement productive, y compris sans engrais et sans pesticides (on parle de 15 à 25 t/ha/an).

Sous des climats tempérés, le rendement serait plutôt de l'ordre de **12 t/ha/an**.



http://www.lille.inra.fr/science_pour_tous/dossiers_thematiques/miscanthus_un_encouragement_pour_les_bioenergies/dossiers_de_presse.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : autres ressources lignocellulosiques → **le miscanthus giganteus**

- ◆ Au Royaume-Uni, le groupe Biomass Industrial Crops Ltd (**Bical**) -fondée par des agriculteurs anglais en 1998- récolte environ **400000 t/an**.
- ◆ En France, l'**INRA** a conduit quelques tests en plein champ. **Bical** cherche à développer la culture du miscanthus, via une filiale française. Un partenariat avec **Lafarge** a permis de le tester comme combustible dans des **cimenteries**.
- ◆ **Lafarge** s'est également associé avec une société de biotechnologie (Performance Plants Inc. -**PPI**-) pour cultiver le miscanthus afin d'alimenter la cimenterie de **Bath** (Ontario, Canada) → **réduction des émissions de CO₂**.
- ◆ Le **pouvoir calorifique** du Miscanthus serait de l'ordre de **4700 kWh/tonne**. On le compare souvent à celui des plaquettes de bois (biocombustible alternatif) donné pour 3300 kWh/tonne (mais sans culture dédiée !).
- ◆ La **densité volumique** du miscanthus est très faible (elle serait de l'ordre de 150 kg/m³).
- ◆ Il existe par ailleurs **beaucoup d'usages non énergétiques** du miscanthus.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : autres ressources lignocellulosiques → **le miscanthus giganteus**

Synthèse

- ◆ C'est une plante dont la productivité est **reconnue** mais **pas une plante miracle**. Elle a ses avantages et ses inconvénients et soulève quelques questions.
- ◆ **Avantages** du *miscanthus giganteus* :
 - Culture pérenne, mais pas de production la première année.
 - Rendement à l'hectare important dès la deuxième année.
 - Capacité à pousser sur des sols pollués (à confirmer).
 - Peu de besoin en pesticides et en engrais (à confirmer).
- ◆ **Inconvénients** du *miscanthus giganteus* :
 - Désherbage obligatoire la première année (souvent par voie chimique).
 - Investissement important (plants coûteux, délicats à mettre en place).
- ◆ Plante exogène → **inconnues** :
 - Impact sur les sols ? (rotation des cultures.)
 - Impact sur la biodiversité ?
 - Besoins en eau ?

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets

Chaque français produit 360 kg d'ordures ménagères par an → 20 Mt/an

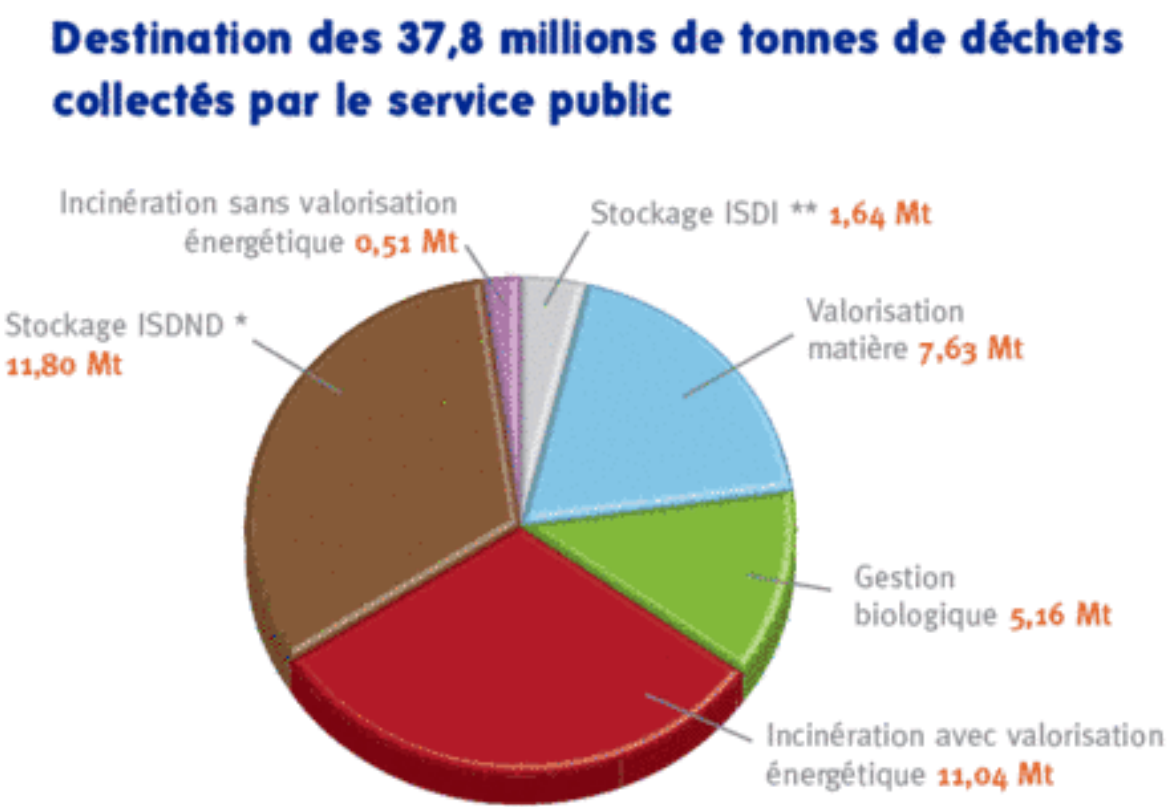
Ensemble des déchets ménagers → 31 Mt/an



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets

Valorisation énergétique des déchets en France → 2,2 Mtep (4^{ème} source d'énergies renouvelables en France).

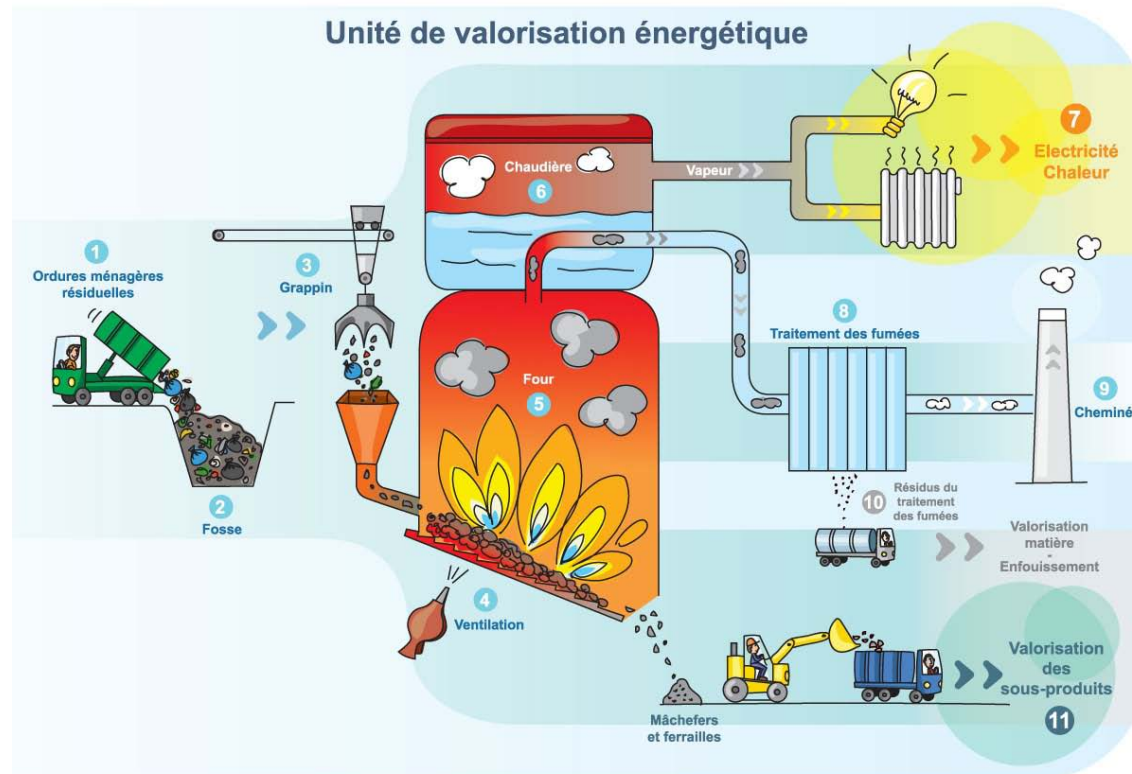


Source ADEME - Enquête collecte 2007

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **incinération**

L'incinération avec récupération d'énergie concerne 1/3 des OM collectées chaque années (soit **11 millions de tonnes**) et une partie des déchets industriels non dangereux valorisés énergétiquement (**12,4 millions de tonnes**).



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **incinération**

pas simple techniquement !

- ◆ Les incinérateurs sont des **installations industrielles complètes et complexes**, qui comprennent :
 - Le **stockage** des déchets entrants.
 - Un système d'**alimentation** du four.
 - Un système de **chauffage** du four.
 - La chambre de **combustion** des déchets.
 - Un système de **récupération** de la chaleur.
 - Éventuellement, une usine de **production d'électricité**.
 - Le **traitement** des **résidus solides** (les mâchefers).
 - Un système de **contrôle** et **traitement** des polluants.

- ◆ Les **gaz** issus de l'incinération doivent être chauffés jusqu'à **850°C** pendant au minimum **2 secondes** → **brûleurs auxiliaires** au gaz ou gazole pour le **démarrage** du four ou pour pallier les **baisses de température**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **incinération : les dioxines**

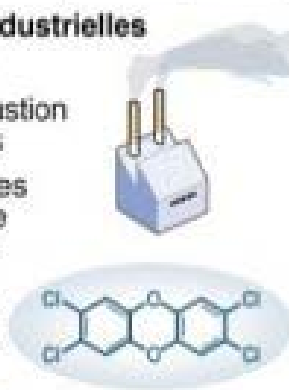
Dioxine

Un composé chimique toxique capable de provoquer le cancer

1 Origines industrielles
Un dérivé :

- de la combustion des déchets
- des industries sidérurgique et chimique

Les composés de dioxine peuvent être mortels même à dose minime



2 Absorbé par les plantes, pénètre le sol

3 Alimentation animale contaminée par des matières brutes polluées et par des résidus d'huiles de machines

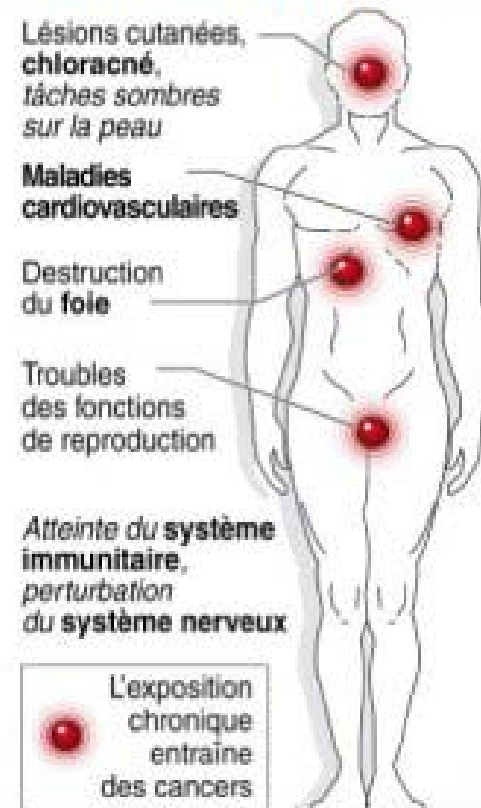
4 Les poulets ingèrent la dioxine enfouie dans le sol ou contenue dans leur nourriture

5 Passe chez l'homme par la consommation d'oeufs et de viande

Seuil limite pour les oeufs : 3 picogrammes* par gramme de graisse (normes UE)



Effets sur l'homme



- Lésions cutanées, **chloracné**, tâches sombres sur la peau
- Maladies cardiovasculaires
- Destruction du foie
- Troubles des fonctions de reproduction
- Atteinte du **système immunitaire**, perturbation du système nerveux

 L'exposition chronique entraîne des cancers

Source: UBA, WHO

* 1 picogramme = un millième de milliardième de gramme

AFP

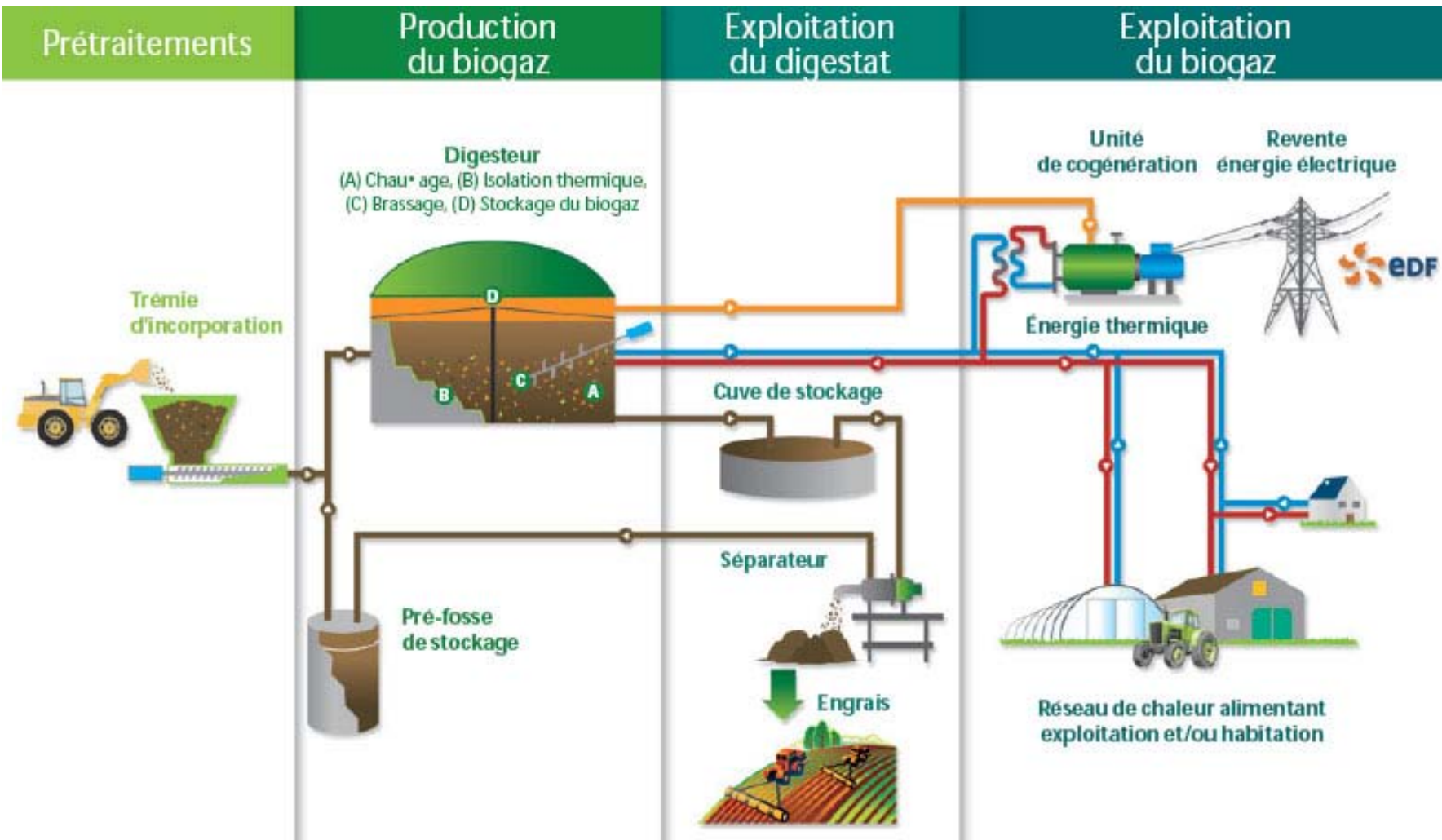
IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation**

- ◆ La méthanisation permet d'**éliminer la pollution organique** tout en consommant *peu* d'énergie et en générant une énergie renouvelable : le **biogaz** $\cong \text{CH}_4 + \text{CO}_2$.
- ◆ La méthanisation est une **digestion anaérobie** qui transforme de la matière organique en :
 - **Compost** (le résidu solide).
 - **CH₄** (de 50 % à 90 % du gaz produit).
 - **CO₂**, avec éventuellement des trace d'H₂S (moins de 0,1 %).
- ◆ La **méthanisation** résulte de l'activité d'un ensemble de bactéries formant un **écosystème microbien complexe** : le **consortium méthanogène**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation**



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation : les procédés**

Procédés de méthanisation → **le lagunage anaérobie**

- ◆ Le lagunage anaérobie consiste à introduire les effluents dans des bassins avec un dispositif de récupération de gaz. Il permet de traiter entre 0,1 et 2 kg/m³/jour, à la condition de temps de séjour très longs (TSH $\cong$ 10 à 60 jours).
- ◆ Il faut de la place... et de la chaleur !



Couverture du lagon de traitement des eaux usées de Mooroopna, en Australie.
<http://www.gwwater.vic.gov.au/archive/infrastructure/moorwmf.asp>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation** : les procédés

Procédés de méthanisation → le contact anaérobie

- ◆ Le contact anaérobie est un procédé utilisant un réacteur calorifugé et un décanteur. Il permet de traiter de 3 à 12 kg/m³/jour, avec des TSH de l'ordre de 10 jours.



<http://www.biogas.psu.edu/completemix.html>.



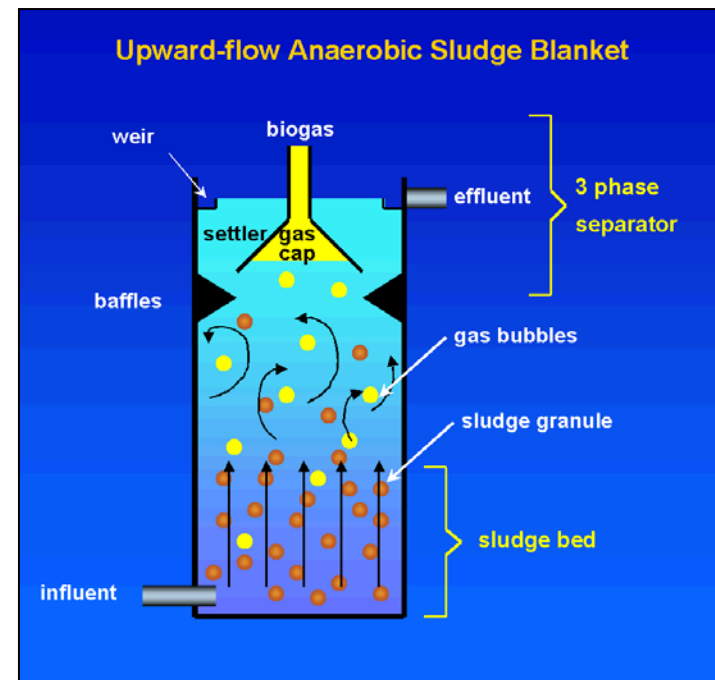
<http://www.eubia.org/108.0.html>.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation : les procédés**

Procédés de méthanisation → **l'UASB**

- ◆ L' «**Upflow Anaerobic Sludge Blanket** reactor» : le plus performant → capacités d'épuration de **20 à 30 kg/m³/jour**. Mise en suspension les particules solides, riches en micro-organisme, grâce à la circulation du milieu.



<http://www.danishcarbon.dk/OurProjects/cdmprojects/Thailand/RoiEtFlourCompany/>.

Installation de traitement des eaux usées d'une usine de tapioca en Thaïlande.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation : valorisation du biogaz**

◆ **Trois filières** de valorisation du biogaz :

→ La production d'électricité → en France en 2010 : 1 TWh, soit **0,1 Mtep**.

→ La production de chaleur → en France en 2010 : **0,5 Mtep**.

→ Le carburant pour des véhicules de transport en commun → **marginal**.

◆ En France, l'ADEME, Gaz De France et Air Liquide travaillent sur le développement de la filière biogaz.

◆ Les scénarios envisagés considèrent la **valorisation de déchets uniquement**.



À Lille 100 kt de déchets fournissent 4 Mm³ de biogaz-carburant par an, l'équivalent de 4 millions de litres de diesel, soit la consommation annuelle de 100 bus.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation : potentiel ?**

- ◆ Les deux pays les plus avancés dans l'exploitation du biogaz en Europe sont l'**Allemagne** et le **Royaume-Uni**.
- ◆ En Allemagne, il existait **3500 installations** en 2006, pour une puissance installée de **1100 MW**. Les prévisions pour **2020** sont de **9500 MW (→ 7,7 Mtep)**.
- ◆ En Allemagne, une grande partie de la production provient de cultures dédiées, qui doivent donc être considérée comme des **agrocarburants**.

	Allemagne	Royaume-Uni	France	Europe
Décharges	573 ktep	1515 ktep	148 ktep	3116
Stations d'épuration	370 ktep	181 ktep	75 ktep	949
Autre	980 ktep	-	4 ktep	1281
Total (<i>conventions EU</i>)	1,92 Mtep	1,70 Mtep	0,23 Mtep	5,35 Mtep
Dont électricité (2007)	7340 GWh	5000 GWh	501 GWh	17272 GWh
Dont chaleur	258 ktep	64 ktep	54 ktep	631 ktep
Total (<i>conventions F</i>)	0,89 Mtep	0,49 Mtep	0,10 Mtep	2,11 Mtep

Source : EurObserv'ER 2007.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : valorisation des déchets → **méthanisation : potentiel ?**

Par exemple, le site de Klarsee en Allemagne, cumule **40 installations standards de 500 kW** pour une puissance totale de **20 MWe**. Le site consomme **300 000 t/an** de **maïs**, **60 000 t/an** de **déjections animales**, et **20 000 t/an** de **céréales**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : contexte

Les agrocarburants sont devenu en 2008 la **3^{ème} énergie renouvelable** en France (**2.2 Mtep/an**
→ 1 % de la consommation en **énergies primaires**)



Production d'énergie primaire par filière renouvelable (en ktep)						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Bois-énergie	8362	8267	8726	8997	10229	8873
Hydraulique	4873	5025	5515	4940	5406	3924
Agrocarburants	700	1122	1946	2256	2256	2055
Pompes à chaleur	286	531	996	1292	1427	1298
Déchets urbains renouvelables	1130	1167	1093	1169	1222	1252
Eolien	188	349	490	681	858	1052
Biogaz	241	253	426	538	334	350
Résidus agricoles et des IAA	140	338	362	371	343	350
Solaire photovoltaïque	1	2	4	15	53	173
Géothermie	114	109	88	89	92	94
Solaire thermique	28	35	44	51	57	64
Total	16063	17198	19690	20399	22277	19485

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : 1^{ère}, 2^{ième} et 3^{ième} générations

♦ 1^{ère} génération → agrocarburants à base d'**huiles** ou de **sucres**

- La filière huile exploite le colza, certains espèces de palmier (huile de palme), le tournesol, le soja et le jatropha curcas (culture à but uniquement énergétique).
- La filière alcool utilise la fermentation de sucres de betterave, de blé, de canne à sucre, de maïs ou de déchets végétaux.

♦ La 2^{ième} génération exploiterait le **bois** et d'autres ressources **ligno-cellulosiques**.

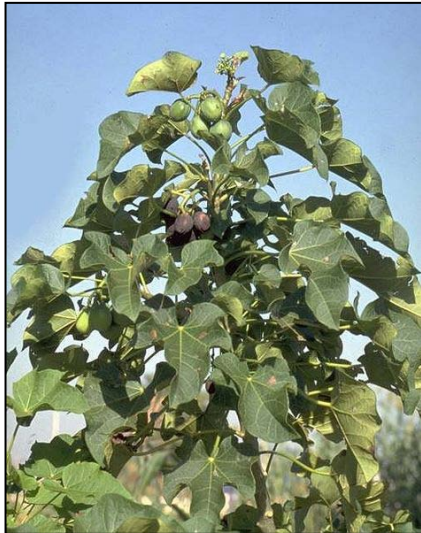
- La gazéification du bois produit un gaz combustible (le « gaz de ville » → **CO** et **H₂**) qui est utilisé dans des centrales thermiques ou transformé en carburant.
- Les procédés dits de **seconde génération** associant hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses (→ sucres simples) puis fermentation permettent de produire de l'**éthanol** (la lignine n'est pas décomposée mais elle peut être brûlée ensuite).

♦ La 3^{ième} génération utiliserait les micro-algues qui produisent des huiles ou du sucre

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : **exemples**

En décembre 2008, un Boeing 747 de Air New Zealand a effectué avec succès un vol test en utilisant, pour l'un de ses moteurs, un carburant constitué de 50 % d'huile de jatropha. Plusieurs autres essais ont été réalisés par d'autres compagnies avec des mélanges similaires.



Jatropha Curcas (Wikipedia)

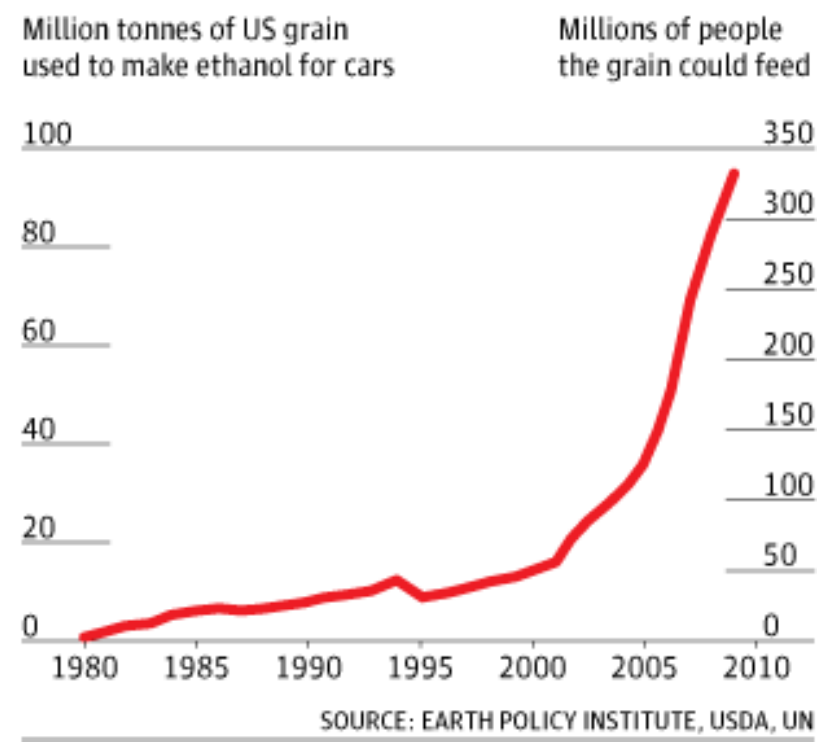


<http://club.doctissimo.fr/solal/bresil-pernambuco-37/photo/canne-sucre-1218.html>

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : concurrence avec les cultures vivrières

- ◆ Au Etats-Unis, 100 Mt/an de céréales (principalement du maïs) soit le quart de la production, sont destinées à être transformées en éthanol incorporé à l'essence. Le taux d'incorporation est actuellement de 9% (5% dans l'UE).
- ◆ Ces 100 Mt/an permettraient de nourrir 350 Mha/an



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : concurrence avec les cultures vivrières

- ◆ En 2009, dans le monde :
 - 12% de la production totale de maïs,
 - 21% de la production de canne à sucre,
 - 29% de la production d'huile de colza,
 - 11% de la production d'huile de soja,
- ◆ ... ont fini dans des moteurs !

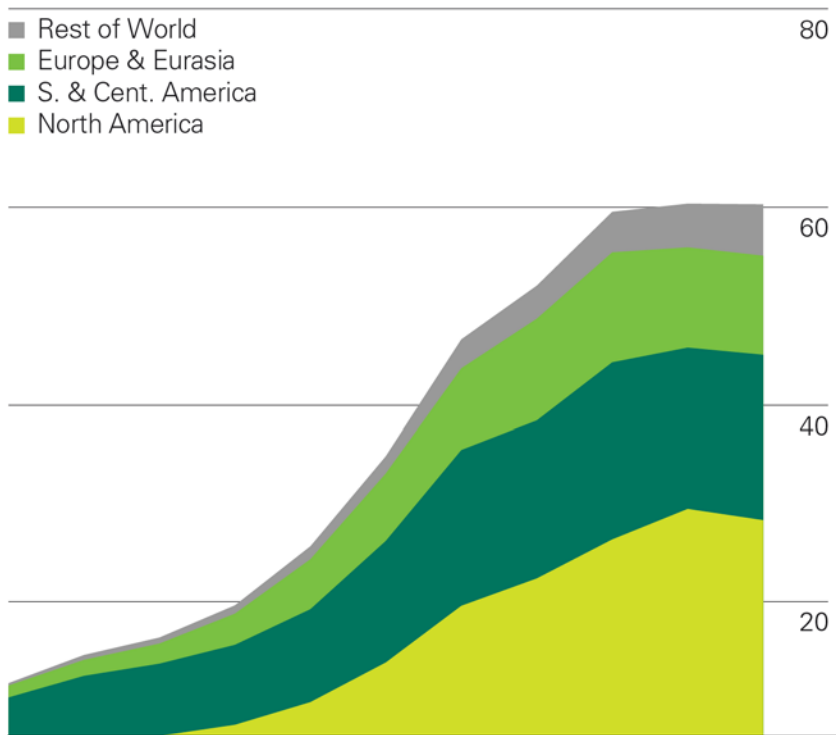


Récoltes 2009	Production mondiale	Transformation en agrocarburants	
	En millions de tonnes		En %
Cultures dédiées à l'éthanol			
Maïs	817,111	101,924	12,5
Blé	681,916	3,752	0,6
Canne à sucre	1 682,577	357,061	21,2
Betterave à sucre	229,490	8,930	3,9
Cultures dédiées à l'agrodiesel			
Huile de soja	36,125	4,080	11,3
Huile de colza	21,223	6,113	28,8
Huile de palme	41,340	1,689	4,1

Jean-Christophe Bureau/Hugo Valin

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la production plafonne



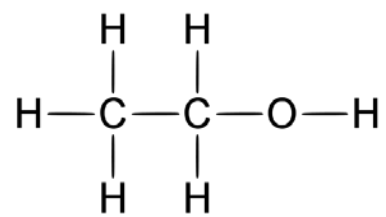
Production mondiale d'agrocarburants en mtep entre 2002 et 2012



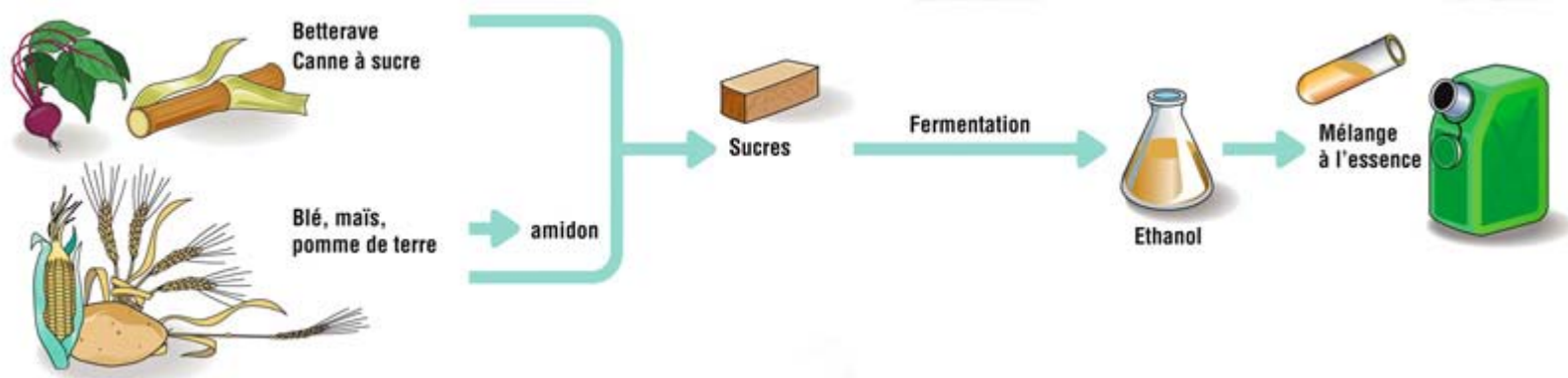
BP Statistical Review of World Energy, 2013

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la filière alcool



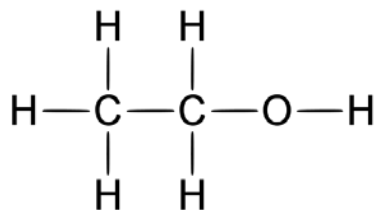
- ◆ Fermentation de sucres de betterave, de blé, de canne à sucre, de maïs..
- ◆ Exploitation à terme du bois à travers un procédé associant hydrolyse et fermentation.
- ◆ Actuellement, la réglementation française autorise l'incorporation d'éthanol dans l'essence à hauteur de 10 % en volume ↔ 7 % en fraction du PCI. (Ou 85 % si E85.)
- ◆ Plusieurs contrainte importantes :
 - Augmentation de la volatilité de l'essence.
 - L'éthanol est légèrement plus corrosif que l'essence : les joints et les durites doivent être compatibles.
 - Son PCI est nettement inférieur à celui de l'essence (6kWh/L contre 9kWh/L)..



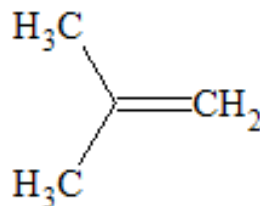
IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la filière alcool

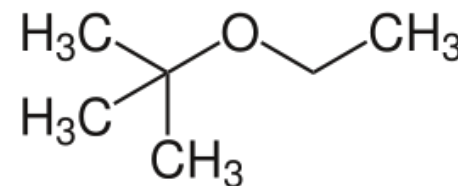
- ◆ Pour ces raisons, on incorpore assez souvent de l'ETBE à la place de l'éthanol.
- ◆ L'ETBE (éthyl tertio butyl éther) est obtenu par réaction catalytique de l'éthanol sur de l'isobutène issu des raffineries → Il faut environ 50 g d'éthanol pour obtenir 100 g d'ETBE.
- ◆ Actuellement, la réglementation française autorise l'incorporation d'ETBE dans l'essence à hauteur de 15 % en volume ↔ 5,75 % en fraction **-renouvelable-** du PCI.
- ◆ Bien que plus volatil que l'éthanol, l'ETBE ne modifie pas la volatilité de l'essence et ne présente pas de risque de démixtion.



Ethanol



Isobutène



ETBE

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la filière huile

- ◆ Les agrocarburants issus d'oléagineux → moteurs diesels & aviation.
- ◆ Il existe 2 filières :
 - La **filière courte** : utiliser directement les huiles végétales comme carburants.
 - La **filière EMHV** où les huiles végétales (principalement le colza pour la France) sont transformées ester méthylique.
- ◆ 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**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la filière huile : huile végétale → la filière courte

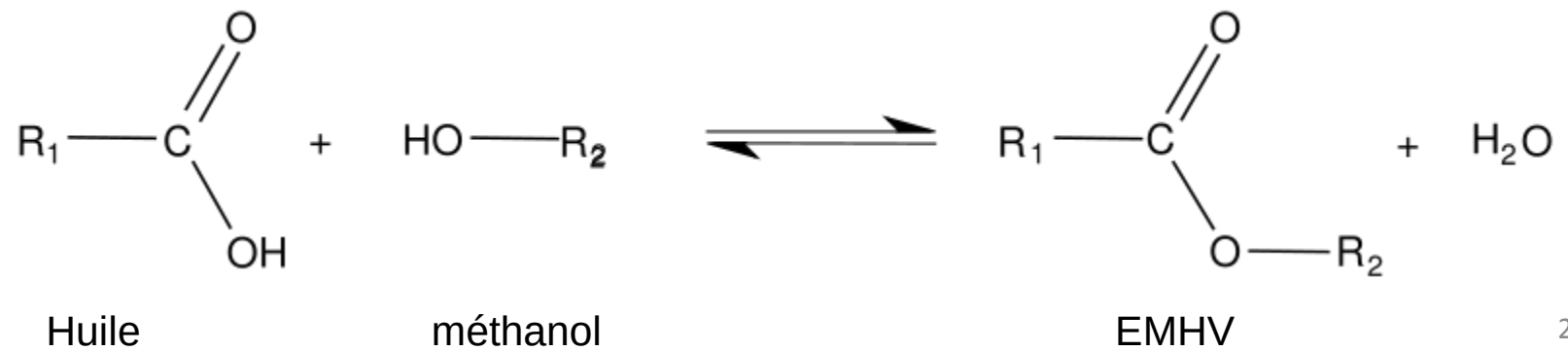
- ◆ Les huiles végétales pures sont utilisées soit directement dans les exploitations agricoles, soit dans un contexte de valorisation des ressources locales.
- ◆ Un hectare de colza (30 quintaux) produit environ 800 l d'HV par an (soit environ **0,4 tep**) et 2,2 tonnes de tourteaux qui sont utilisés pour l'alimentation animale. Un hectare de tournesol fournit le même rendement.
- ◆ Communauté de commune de Villeneuve sur le Lot → huile de tournesol pour l'alimentation des camions de ramassage des ordures ménagères (70 l/100 km).



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la filière huile : huile végétale → la filière EMHV

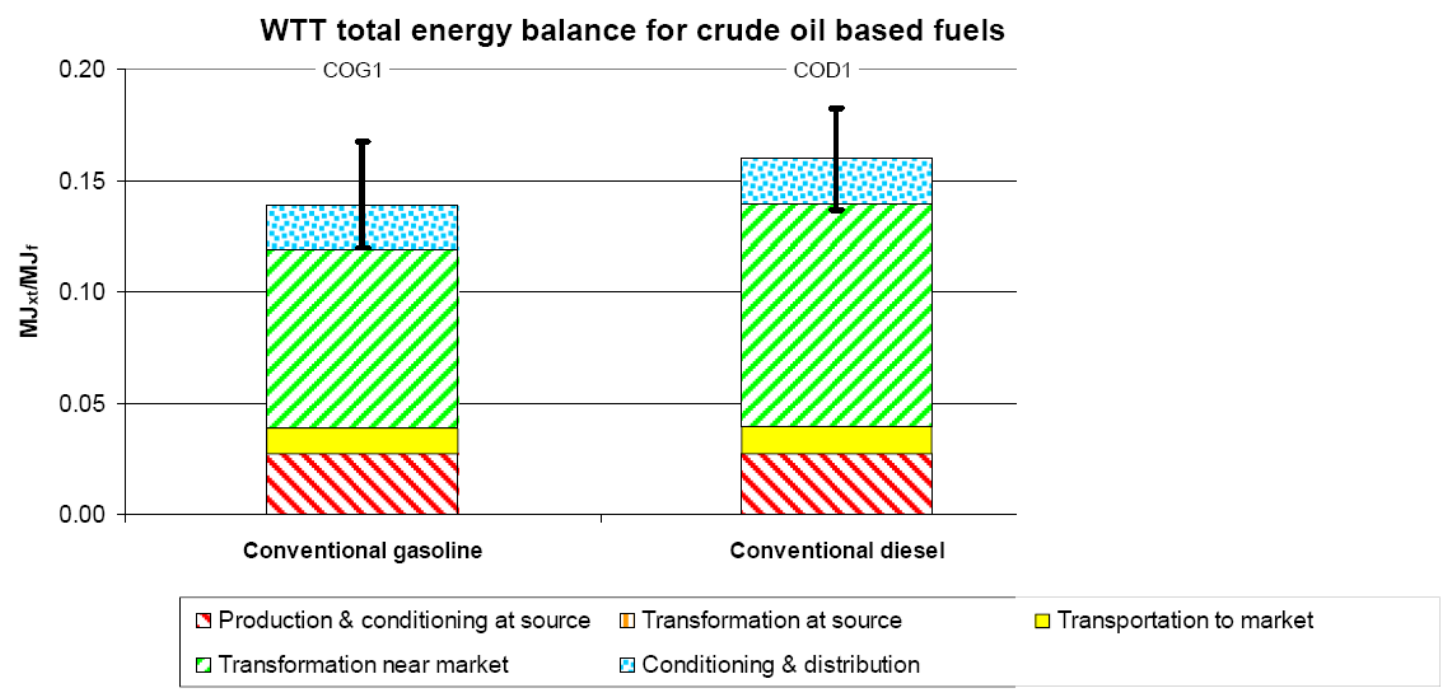
- ◆ Les huiles végétales sont composées majoritairement d'**acides gras** qui sont des **acides carboxyliques**, que l'on stabilise en les transformant en esters.
- ◆ Les Esters Méthyliques d'Huiles Végétales (EMHV) sont obtenus par une opération d'estérification ou de transestérification avec du **méthanol**.
- ◆ L'EMHV est purifié de manière à répondre à une **norme** permettant de l'**incorporer** à un gazole classique, dont les **propriétés sont proches**.
- ◆ Une tonne d'huile avec 0,1 tonne de méthanol produit une tonne d'EMHV et 0,1 tonne de glycérine, coproduit largement utilisé dans les industries chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires, et qui **participe à la rentabilité de la filière**.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : efficacité énergétique des différentes filières ?

Il faut noter que la production de *carburant classique* possède un coût énergétique non nul en terme de production de gaz à effet de serre et de consommation d'énergie. Ce coût n'est pas forcément évalué dans sa totalité (*prospection, forage*, extraction, transport du brut, *raffinage*, transport du carburant, *guerres et conflits...*)



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : **efficacité énergétique des filières alcool**

- ◆ Incorporer de l'ETBE augmente considérablement le coût énergétique de production et les émissions équivalentes de CO₂, du fait de l'utilisation d'*isobutène*.
- ◆ En terme de consommation d'énergie non-renouvelable, l'étendue des variations est **considérable** → de 1 pour l'éthanol issu de canne à sucre à 5,5 pour l'ETBE de betterave.

par MJ de biocarburant, incorporé dans un E10	Incorporation directe		Incorporation d'ETBE	
	Energie primaire non- renouvelable (MJf/MJ)	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq/MJ)	Energie primaire non- renouvelable (MJf/MJ)	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq/MJ)
Essence EURO 4	1,22E+00	1,02E-01	1,22E+00	1,02E-01
Ethanol de Betterave	5,92E-01	2,76E-02	9,80E-01	5,00E-02
Ethanol de Blé	6,20E-01	4,35E-02	1,01E+00	6,61E-02
Ethanol de maïs	5,75E-01	3,70E-02	9,63E-01	5,95E-02
Ethanol de Canne à sucre	1,83E-01	2,26E-02	5,64E-01	4,48E-02

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : efficacité énergétique des filières huiles

Pour les filières huiles, on retrouve une forte dispersion de la consommation énergétique, qui reste cependant inférieure à celle observée avec les filières alcool → de 1 pour les huiles végétales pures à 2 pour l'ester d'huile de colza.

par MJ de biocarburant	Energie primaire non- renouvelable (MJf/MJ)	Emissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq/MJ)
Diesel EURO 4	1,25E+00	9,60E-02
EMHV de colza	4,55E-01	3,85E-02
EMHV de tournesol	4,13E-01	2,63E-02
EMHV de soja	3,48E-01	2,02E-02
EMHV de Palme	1,92E-01	2,09E-02
Huiles alimentaires usagées → EHMAU	2,40E-01	8,40E-03
Graisses animales → EMGA	2,38E-01	8,11E-03
HVP	2,31E-01	3,46E-02

Consommation en énergie non renouvelable et émissions équivalentes de CO₂ liées à la production d'agrocarburants à base d'oléagineux, d'après l'ADEME.

IV. Les énergies renouvelables

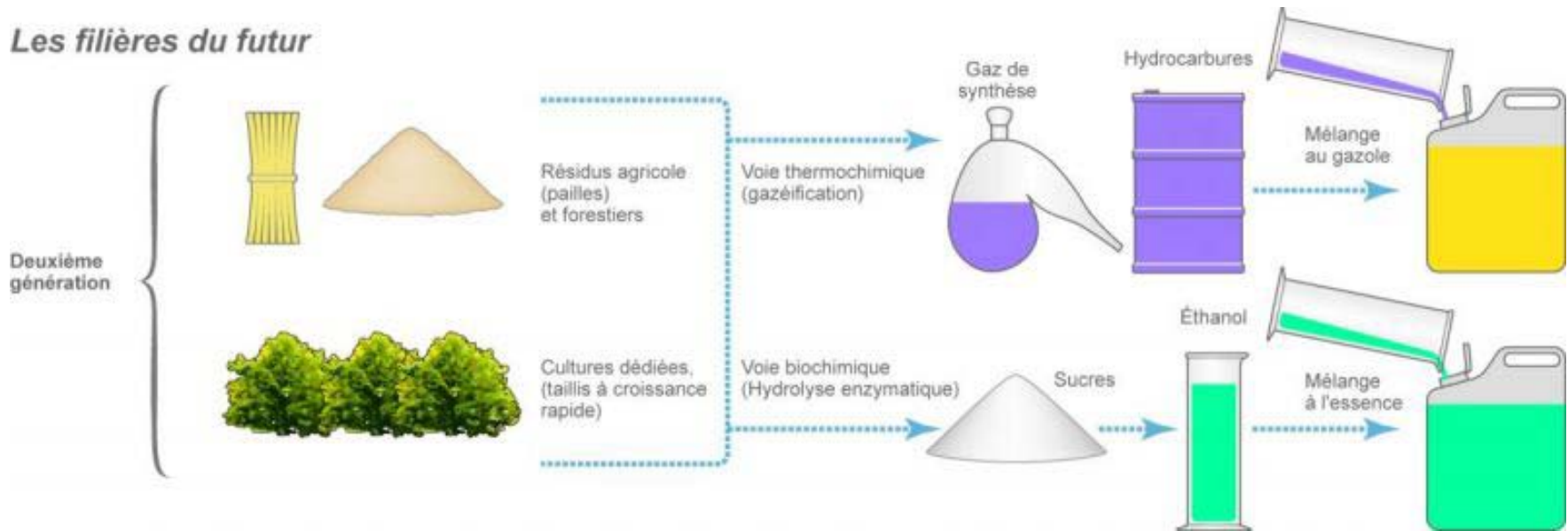
1. La biomasse : agrocarburants : **conclusion pour la première génération**

- ◆ Un agrocarburant ne peut pas être produit sans une **quantité significative d'énergie**, non-renouvelable (par défaut), qui peut varier considérablement suivant les filières
- ◆ En **Europe**, on peut retenir les ordres de grandeur suivant
 - Pour les filières alcool à base de betterave, l'économie en énergie primaire non-renouvelable est de 20 % à 50 %.
 - Pour les filières huiles, l'économie réalisée est de 80 % pour les huiles végétales pures, et de 65 % pour les EM d'huile de Colza.
- ◆ A grande échelle, il est certain que les ressources mondiales, européennes ou nationales ne permettent pas de fournir ne serait-ce qu'un dixième des agrocarburants nécessaires au remplacement des énergies fossiles. (*On estime que la production agricole mondiale devra être multipliée par 1,7-2 pour nourrir une planète comptant 9 milliards d'habitants en 2050*)
- ◆ Paradoxalement, la production d'agrocarburant peut rester **intéressante localement** en **soutien d'une filière agricole** mais **pas au niveau industriel**.

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la seconde génération

- ◆ Les **agrocarburants de deuxième génération** sont produits à partir de **cellulose, d'hémicellulose ou de lignine**.
- ◆ Le potentiel énergétique pour la France serait de l'ordre de **10 Mtep**, ce qui correspond à 50% de la production actuelle d'ENR.
- ◆ Le Problème des quantités à produire subsiste → plus de 80 Mb/jour soit près de **4 milliards de tep** sur les 13 milliards de tep que consomme la planète chaque année.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : la troisième génération → l'Ulve

- ◆ L'Ulve (*ulva lactuca* = laitue de mer) et les espèces apparentées font partie de la famille des « algues vertes ». Ce sont des plantes **nitrophiles**, dont le PCI de matière sèche est de l'ordre de celui du bois : 19 MJ/kg.
- ◆ Des expériences (notamment en Israël et au Danemark) laissent espérer des rendements largement supérieurs à ce que l'on peut obtenir sur terre : de l'ordre de 80 tonnes/ha de matière sèche, soit près de 40 tep/ha.
- ◆ En revanche, il faut des infrastructures dédiées permettant d'assurer un apport en CO₂ et en nitrates.



IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : **troisième génération** → **les micro-algues**

- ◆ La culture de micro-algues pourrait être une alternative à celle des algues vertes.
- ◆ La propriété la plus intéressante des micro-algues est sans doute de produire des graisses (des triglycérides) qui peuvent être transformés relativement facilement en acides gras par transestérification. Les micro-algues stockent jusqu'à 50 % de leur masse (sèche) sous forme d'huile.
- ◆ Les rendements annoncés sont considérables, mais ils restent de l'ordre de grandeur de ceux obtenus avec l'Ulve (40 t/ha/an).
- ◆ La culture des micro-algues peut nécessiter des apports de CO₂ et de nitrates.

Micro-algue	Pourcentage d'huile par matière sèche
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75 %
<i>Chlorella sp.</i>	28-32 %
<i>Dunaliella primolecta</i>	23 %
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33 %
<i>Nitzschia sp.</i>	45-47 %
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30 %
<i>Tetraselmis sueica</i>	15-23 %

Comparaison des teneurs naturelles en huile chez différentes espèces de micro-algues.

<http://www.spectrosciences.com/spip.php?article26>

IV. Les énergies renouvelables

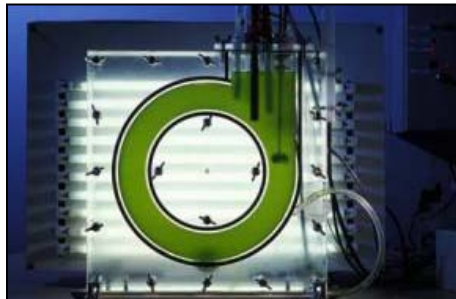
1. La biomasse : agrocarburants : **troisième génération** → les micro-algues

- ◆ Il existe deux méthodes principales de culture des micro-algues :
 - Les photobioréacteurs qui présentent l'avantage d'une faible emprise au sol.
 - Des bassins à ciel ouvert de profondeur $\cong 30$ cm pour optimiser l'éclairement.
- ◆ Dans les deux cas, la récolte peut être réalisée en continu, ou presque.



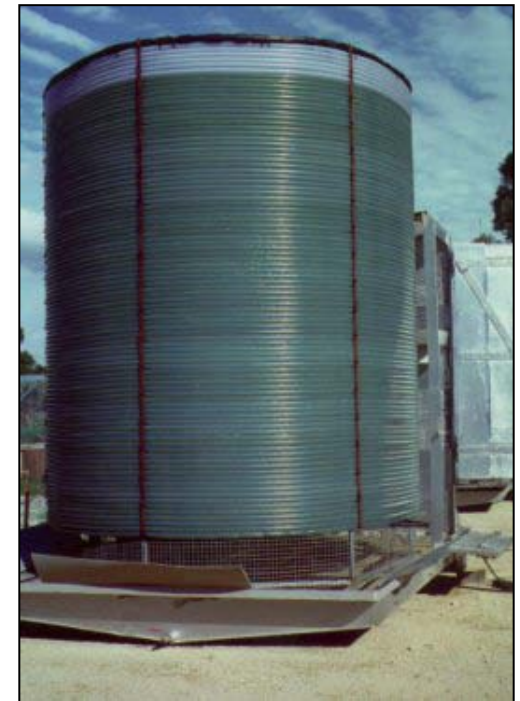
Bassins de type « raceway » utilisés pour la culture -à but alimentaire- de la spiruline.

<http://www.earthrise.com/farm.html>



Photobioréacteur expérimental.

<http://www.gepea.fr/>



Photobioréacteur préindustriel.

<http://www.spectrosciences.com/>

IV. Les énergies renouvelables

1. La biomasse : agrocarburants : troisième génération → conclusion

- ◆ Les carburants d'origine aquacole présentent un **potentiel nettement plus important** que ceux la première génération :
 - Des **rendements** à l'hectare bien **supérieurs**.
 - Pas de concurrence (a priori) avec les cultures actuelles.
 - La possibilité de **valoriser** le CO₂ et les eaux polluées (des stations d'épuration par exemple).
 - Comme avec tout agrocarburant → le développement de **filières locales**.
- ◆ En revanche, il convient de rester prudent sur d'autres points :
 - Le **rendement réel** rapporté au coût de production, la complexité du procédé.
 - La **production au m²** comparée à d'autres énergies renouvelables.
 - La nature des **rejets** et celles des **apports** nécessaires en nutriments.
 - Les besoins en **lumière** et en **eau**.
 - Les **surfaces** effectivement mobilisables.

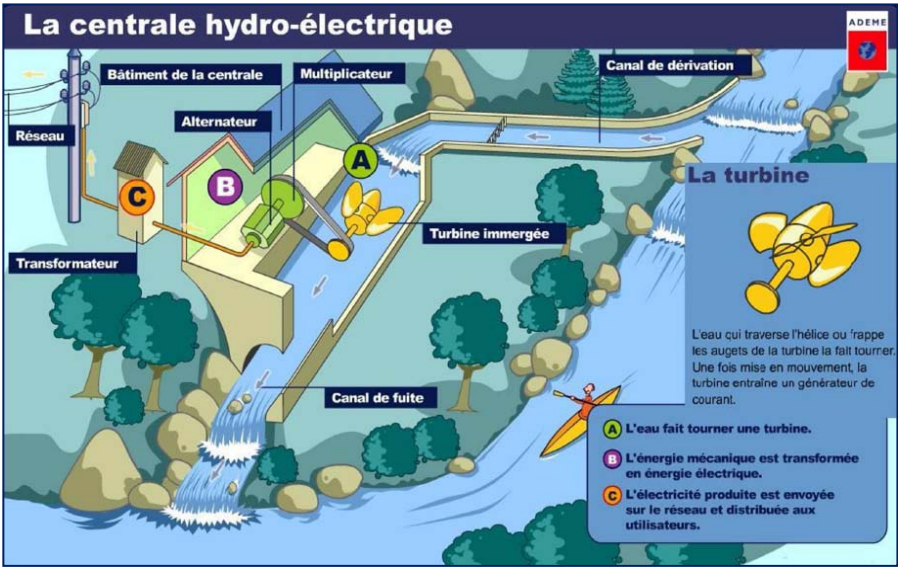
IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique L'énergie **hydraulique** est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau :
→ utilisée directement (moulin à eau)
→ convertie en énergie électrique (centrale hydroélectrique)

On distingue, les centrales hydrauliques de plus de 10 MW qui sont de gros ouvrages dont on peut contrôler en partie la production (total de 18GW en France) des petites installations hydraulique qui représentent quant à elles un total de 7,4 GW en France.



<http://www.hautes-alpes.net/nautisme-voile/lac-serre-poncon.html>



<http://www.ufe-electricite.fr> et ADEME

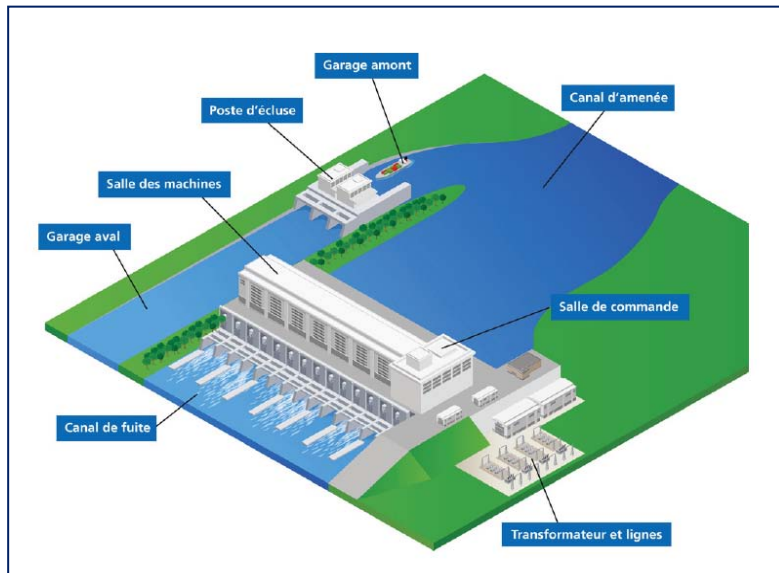
En France, le petit hydraulique représente la majeure partie du potentiel de développement, estimé actuellement à 10 ou 11 TWh/an grâce à la valorisation de seuils existants (10 %), ou après construction de nouveaux ouvrages

IV. Les énergies renouvelables

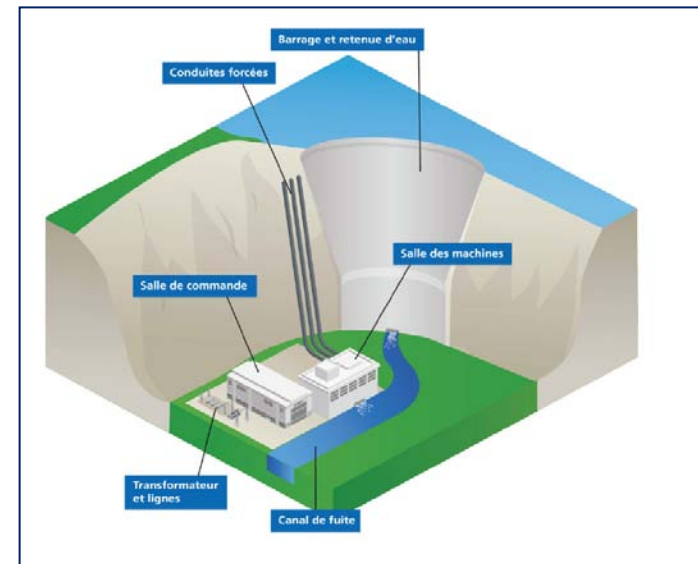
2. L'hydraulique

On distingue essentiellement 4 types de centrales:

- a) les centrales au fil de l'eau → temps de remplissage de quelques heures
- b) l'hydraulique en éclusée → de 2 à 400 heures
- c) l'hydraulique de lac → plus de 400 heures
- d) les STEP (Stations de Transfert d'Energie par Pompage), en pompage pur ou en pompage mixte. Les STEP seront traitées dans le chapitre suivant à propos du stockage de l'énergie.



Centrale au fil de l'eau

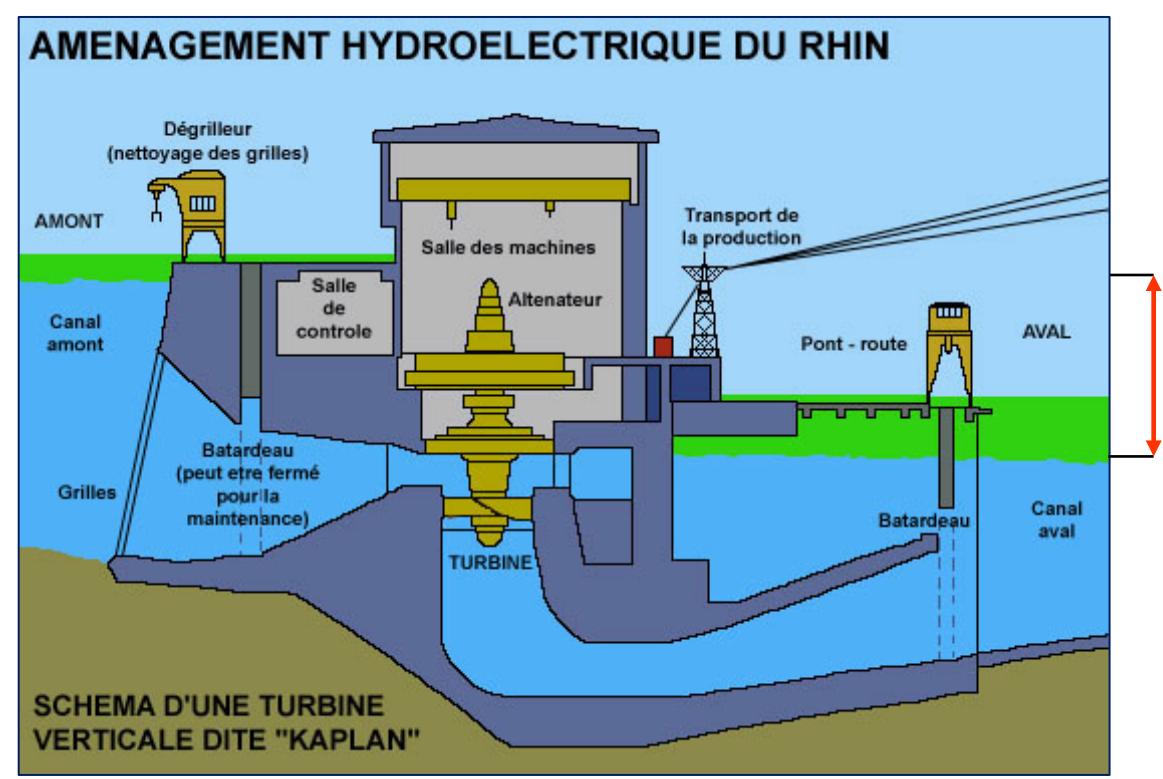


Centrale de lac

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales au fil de l'eau

Il s'agit d'une production **fatale** (inéluclablement présente), que l'on ne peut stopper qu'en dérivant le débit du cours d'eau. En France, les plus grandes installations sont sur le Rhin ou sur le grand canal d'Alsace : Fessenheim (180 MW), Marckholsheim (160 MW), Ottmarsheim (156 MW)...



La puissance moyenne de Fessenheim est de l'ordre de 117 MW (1030 GWh/an – 65%)

Hauteur de chute : 16 m à Fessenheim



Turbine Kaplan

4 groupes Kaplan à axe vertical

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales en éclusée

Ces centrales hydroélectriques ont une réserve d'eau qui correspond à une période d'accumulation assez courte (moins de 400 heures de débit). Aux heures les moins chargée de la journée ou de la semaine, on reconstitue le stock pour apporter un concours précieux aux heures pleines. Il s'agit d'une production **fatale** mais que l'on peut stopper pendant quelques heures. En France, l'installation la plus importante est le Barrage de Génissiat sur le Rhône. La puissance installée est de 420 MW, avec 6 groupes Francis de 70 MW.

barrage de Génissiat



Turbine Francis



retenue

La hauteur du barrage : 104 m.

La hauteur de chute : 67 m au maximum.

Le volume de la retenue : 56 Mm³.

Production : 1700 GWh/an → Puissance moyenne de 194 MW (46%)

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac

C'est la nature de l'ouvrage de retenue qui permet de classer les installations:

- barrages voûtes, qui prennent appui sur les parois de la vallée
- barrages poids, dont la masse retient l'eau,
- ou toute situation intermédiaire : barrage à contrefort, à double voûte...



<http://lenergeek.com/2012/03/07/tignes-le-plus-haut-barrage-francais/>

Barrage de Tignes ou du Chevril

180 m de hauteur – 44 m d'épaisseur à sa base

93 MW – 233 m de hauteur de chute moyenne

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac – barrage de Tigne

La montagne descend en moyenne de cinq centimètres par an et les canalisations descendent avec elle. Ces glissements de terrain exercent une forte pression sur l'arrivée des conduites. Jusqu'à présent, EDF était donc obligée, chaque année, de couper la partie basse des tuyaux. Ses ingénieurs ont trouvé cette année **une solution plus durable**, et qui évite d'interrompre chaque année l'exploitation de la centrale : les conduites sont fixées par **des joints coulissants qui fonctionnent un peu comme un trombone** et suivent ainsi les mouvements de la montagne.



IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac



http://hydroweb5.free.fr/hydroweb.php?page=deb_barrage.php

Barrage de la Grande Dixence (Suisse)

plus haut barrage poids du monde avec 285 m de hauteur
et une épaisseur de 193 m à sa base

4 usines hydroélectriques pour un total de 2000 MW

Dont l'une avec une hauteur de chute de 1880 m (record du Monde !)

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac



http://hydroweb5.free.fr/hydroweb.php?page=deb_barrage.php

Barrage à voûte épaisse de Monteynard sur le Drac
intermédiaire entre le barrage poids et le barrage voûte

135 m de hauteur – 394 MW

Hauteur de chute moyenne : 120 m

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac



http://hydroweb5.free.fr/hydroweb.php?page=deb_barrage.php



<http://www.virusphoto.com/54932-barrage-dhongrin-suisse.html>

Barrage à double voûte de Hongrin (Suisse) - 240 MW

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac



Barrage de Roselend
Contreforts + voûte
800 m de long
150 m de hauteur
1210 m de hauteur de chute
→ La Bathie – 550 MW

http://hydroweb5.free.fr/hydroweb.php?page=deb_barrage.php

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les centrales de lac

Lorsque la hauteur de chute est supérieure à 200m, on utilise généralement une turbine Pelton

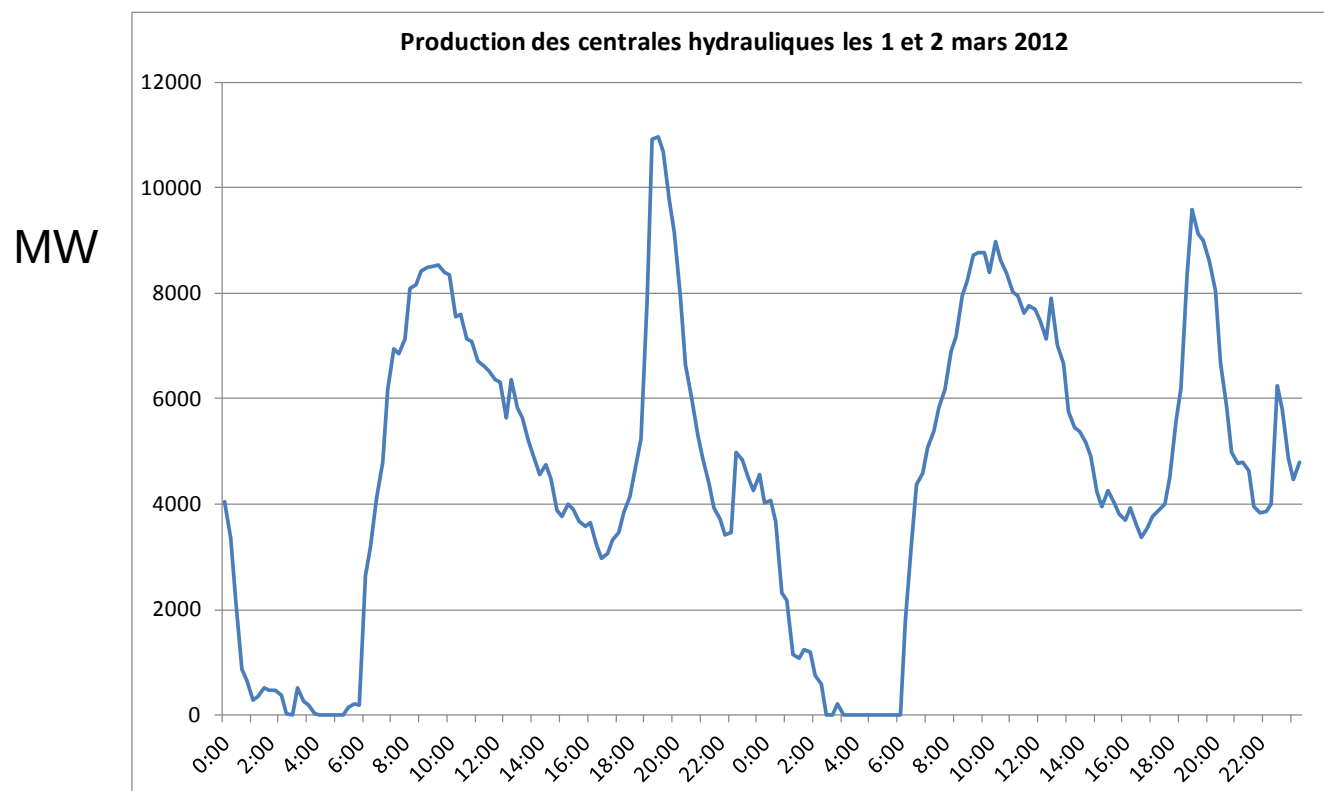


Turbine Pelton alimenté par 5 jets

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : en France – les chiffres clés

- La centrale la plus puissante est celle de Grand'Maison : 1820 MW
- La hauteur de chute la plus grande est celle de La Bathie : 1210 m
- La plus grande retenue est celle de Serre-Ponçon (380 MW) : 1270 Mm³ – 28,2 km²
- L'énergie produite annuellement est de 67,7 TWh en 2010, 50,7 TWh en 2011
- La puissance maximale disponible du fait des centrales hydrauliques est d'environ 15 GW.



La puissance électrique produite varie de 0 à 15 GW de façon à s'adapter à la demande

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : **dans le monde – les chiffres clés**

- La puissance totale installée est de 720 GW soit 20% de la puissance totale (3500 GW)
- La production mondiale est de 3670 TWh soit 16% de la production totale (22500 TWh)
- Les cinq principaux producteurs en 2012 sont :
 - ♦ La Chine : 861 TWh/4938 TWh, soit 17% de sa production totale.
 - ♦ Le Brésil : 418 TWh/554 TWh, soit 75% de sa production totale.
 - ♦ Le Canada : 380 TWh/610 TWh, soit 62% de sa production totale.
 - ♦ Les USA : 279 TWh/4256 TWh, soit 6 % de leur production totale.
 - ♦ La Russie : 167 TWh/1066 TWh, soit 16% de sa production totale.

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les ouvrages les plus importants

Trois Gorges (Chine) : 18,2 GW - 113 m - 85 TWh/an - 1000 km² - 39 Gm³

barrage poids, long de 2 335 mètres et haut d'environ 140 mètres.



sur le Yangsté, là où le débit est de $14\,300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

→ 1.8 Million d'habitants déplacés (19 villes, 4500 villages)

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les ouvrages les plus importants

Itaipu (Brésil – Paraguay) : 14 GW - 118 m – 90 à 100 TWh/an - 1300 km² - 29 Gm³



Itaipu sur le rio Parana

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : les ouvrages les plus importants

Guri (Venezuela) : 10 GW - 162 m - 47 TWh/an - 4250 km² - 135 Gm³



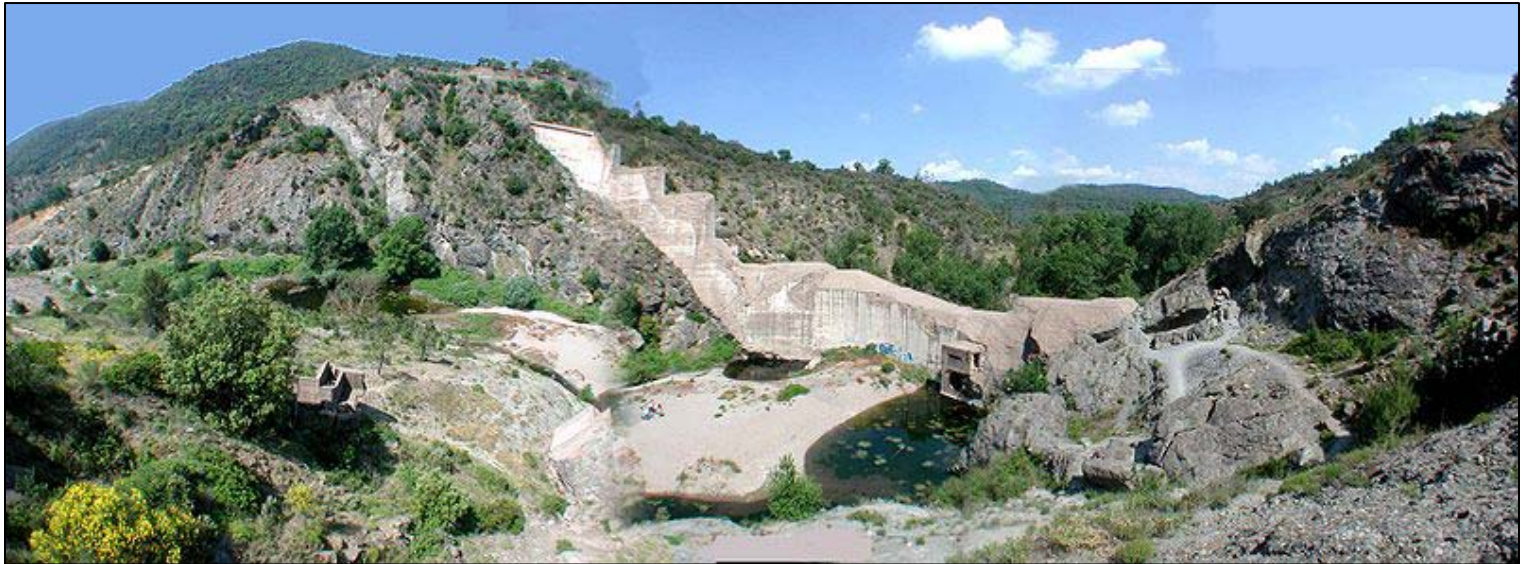
Guri long de 1300 m

La superficie de la retenue d'eau est du même ordre de grandeur que celle de la Meurthe et Moselle (5 246 km²)

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : catastrophe de Malpasset

Le barrage de Malpasset était un barrage voûte situé au-dessus de Fréjus, dans le Var, d'une hauteur de 60 m, pour un volume de retenue de 48 Mm³ sur 2 km². L'ouvrage a cédé le 2 décembre 1959, cinq ans après sa construction. Une vague de quarante mètres de haut s'est propagée dans la vallée du Reyran à 70 km/h pour atteindre le quartier du Malpasset à Fréjus environ 20 minutes plus tard. On comptera **423** morts et disparus. *Il s'agit de la catastrophe industrielle la plus importante en France.* C'est la roche sur laquelle la voûte s'appuyait qui a cédée. L'ouvrage n'était pas suffisamment surveillé.

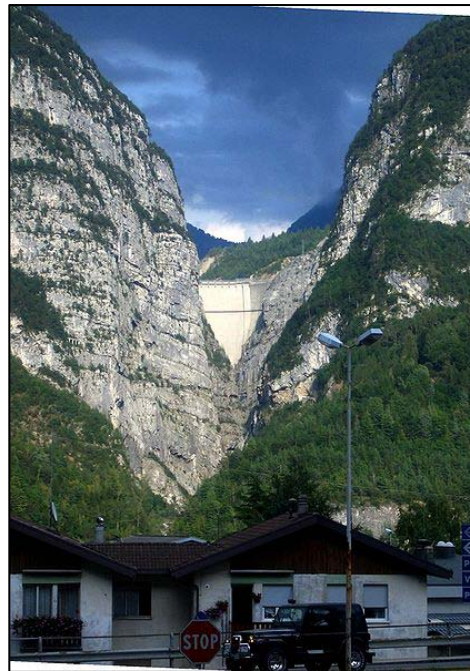


Restes de barrage du Malpasset

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : catastrophe de Vajont-Longarone

Le Barrage de Vajont, a été construit entre 1956 à 1959 au dessus de Longarone, au Nord-Est de l'Italie. D'une hauteur de 263 m (record de l'époque), il retenait 150 Mm³ d'eau. L'ouvrage n'a pas cédé mais le 9 octobre 1963, un glissement de terrain déverse 260 Mm³ de terre et de roches dans la retenue. Deux vagues se propagent en aval et en amont du lac. En aval, l'eau déborde du barrage et s'écoule dans la vallée très étroite. Elle détruit Longarone, Pirago, Rivalta, Villanova et Faè, et de nombreux petits villages aux alentours : on estime à environ **1900** le nombre de victimes. Le barrage n'a pas été endommagé.



[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:La diga del Vajont vista da Longarone 18-8-2005.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:La_diga_del_Vajont_vista_da_Longarone_18-8-2005.jpg)

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : projets

De nombreux projets sont en cours de réalisation, surtout en Chine

◆	Nom	◆	Pays	◆	Cours d'eau	◆	Mise en service	◆	Capacité (MW)	◆
-	Barrage de Xiluodu		 Chine		Yangzi Jiang		2013		13 860	
-	Barrage de Jirau		 Brésil		Rio Madeira		2013		3 750	
-	Barrage de Jinping II		 Chine		Yalong		2014		4 800	
-	Barrage de Tocoma		 Venezuela		Caroni		2014		2 160	
-	Barrage du bas Subansiri		 Inde		Subansiri		2014		2 000	
-	Barrage de Belo Monte		 Brésil		Rio Xingu		2015		11 200	
-	Barrage de Wudongde		 Chine		Rivière Jinsha		2015		8 700	
-	Barrage de Xiangjiaba		 Chine		Rivière Jinsha		2015		6 400	
-	Barrage de Nuozhadu		 Chine		Mékong		2015		5 850	
-	Barrage de Rogoun		 Tadjikistan		Vakhch		2015		3 600	
-	Barrage de Guanyinyan		 Chine		Rivière Jinsha		2015		3 000	
-	Barrage de Lianghekou		 Chine		Yalong		2015		3 000	
-	Barrage de Dagangshan		 Chine		Dadu		2015		2 600	
-	Barrage de Ludila		 Chine		Rivière Jinsha		2015		2 160	
-	Barrage de Changheba		 Chine		Dadu		2016		2 600	
-	Barrage de Myitstone		 Birmanie		Irrawaddy		2017		3 600	
-	Centrale de pompage-turbinage du Dniestr		 Ukraine		Dniestr		2017		2 268	
-	Barrage de la Renaissance		 Éthiopie		Dadu		2018		6 000	
-	Barrage de Shuangjiangkou		 Chine		Dadu		2018		2 000	
-	Barrage de Baihetan		 Chine		Rivière Jinsha		2019		13 050	
-	Barrage de Diamer		 Pakistan		Indus		2020		4 500	

Dans un avenir plus lointain, des centrales seront construite en Afrique subsaharienne qui dispose de 10% du potentiel mondial. Le **potentiel hydroélectrique total de la planète** serait d'environ 15 000 TWh, soit 3 fois plus que le niveau d'exploitation actuel

IV. Les énergies renouvelables

2. L'hydraulique : **tentative de synthèse**

Avantages

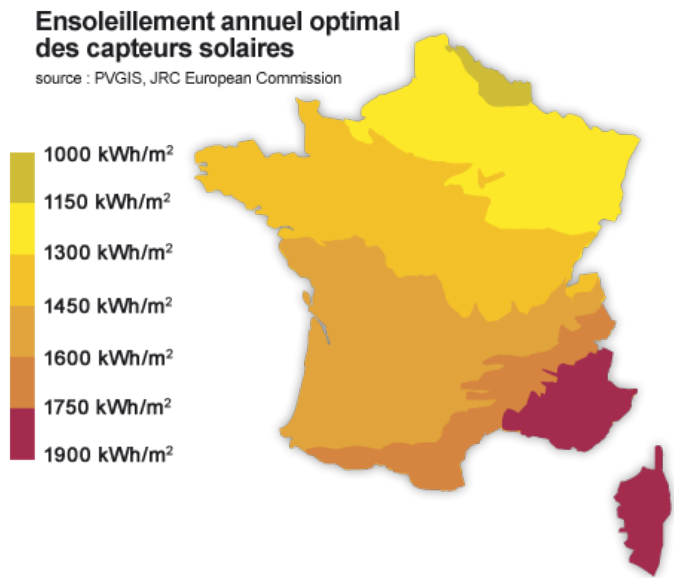
- Un savoir-faire et une expérience qui limitent les risques
- Peu d'impact sur l'environnement dans la plupart des cas
- Souplesse de fonctionnement pratiquement sans égal
- Une durée de vie pratiquement illimitée
- Le meilleur moyen de stocker l'énergie
- Synergie avec la gestion des ressources en eau

Inconvénients

- Des risques réels : surveillance indispensable des ouvrages
- Des impacts sur l'environnement qui peuvent être très importants : alluvions, faune... et mal maîtrisé dans le cas des ouvrages importants
- L'emprise au sol des retenues
- Des investissements colossaux
- Possibles conflits d'intérêts avec les besoins en eau

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire



La France reçoit chaque année 1300 kWh/m² (0,1 tep/m² - 60 000 Mtep en tout)
Consommation moyenne des français : 4,5 tep/an (énergie primaire)
→ Surface de captage nécessaire par personne : 45 m²

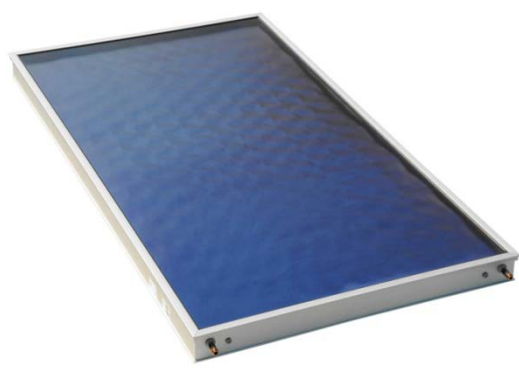
Energie solaire passive : on exploite le rayonnement solaire sans équipement particulier pour le chauffage des bâtiments basse consommation, des serres, etc,

Energie solaire active : on utilise un équipement dédié au captage et à la transformation, en chaleur ou en électricité.

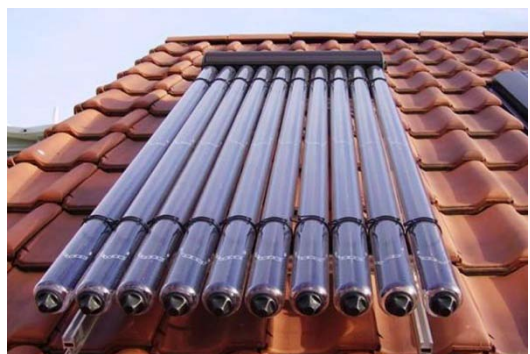
L'énergie solaire comprend trois filières : les filières **photovoltaïque** et **thermodynamique** pour produire de l'électricité et la filière **thermique** pour produire de la chaleur.

IV. Les énergies renouvelables

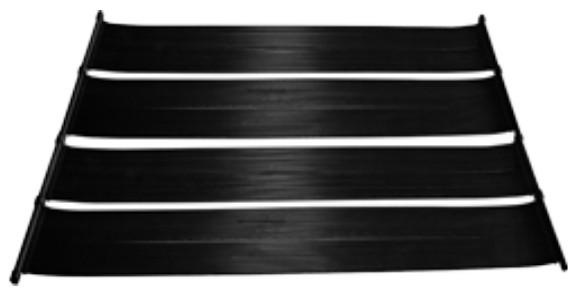
3. Le solaire : le solaire thermique



Capteur plan vitré



Capteur sous vide



Capteur non vitré

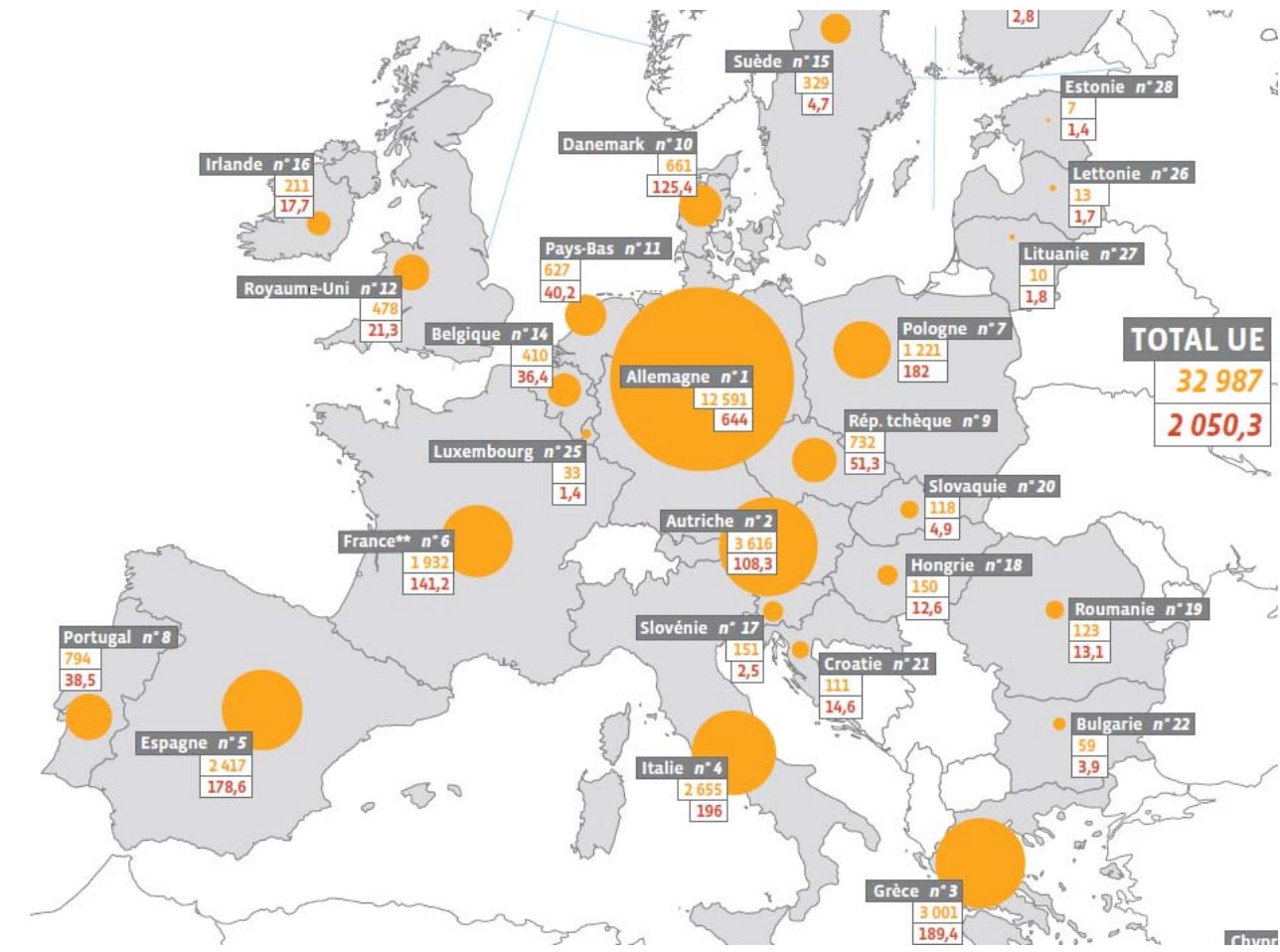
Surfaces solaires thermiques installées en 2014* par type de capteurs (en m²)
et puissances correspondantes (en MWth)

Pays	Capteurs vitrés			Total (m²)	Puissance équivalente (MWth)
	Capteurs plans vitrés	Capteurs sous vide	Capteurs non vitrés		
Allemagne	814 600	85 400	20 000	920 000	644,0
Italie	260 000	20 000		280 000	196,0
Grèce	270 000	600		270 600	189,4
Pologne	208 000	52 000		260 000	182,0
Espagne	235 355	15 900	3 839	255 094	178,6
France**	195 739		6 000	201 739	141,2

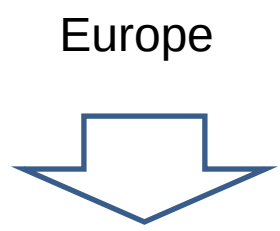
IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique

La France est le 6ème pays de l'Union Européenne en termes d'équipements installés, derrière l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie, l'Espagne et la Grèce.



TOTAL UE
32 987
2 050,3



Solaire thermique
2.2 Mtep / an

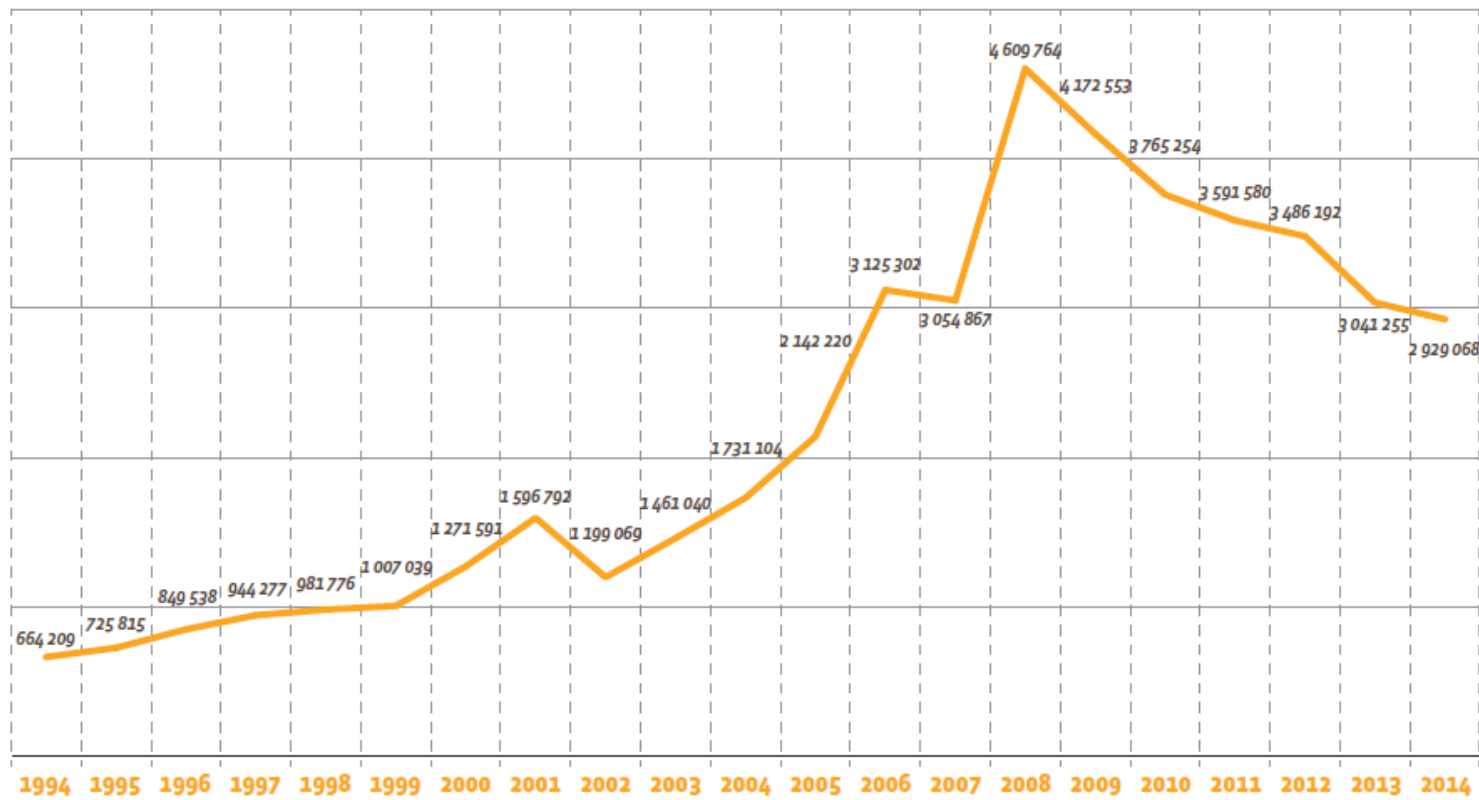
(84 Mtep pour la biomasse solide)

Légende
32 987 Parc solaire thermique installé à la fin de l'année 2014* (en MWth).
2 050,3 Puissance solaire thermique installée durant l'année 2014* (en MWth).
* Estimation. ** DOM inclus.
Source: Eurobserv'ER 2015.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique

Évolution des surfaces solaires thermiques annuelles installées dans l'Union européenne depuis 1994 (en m²)

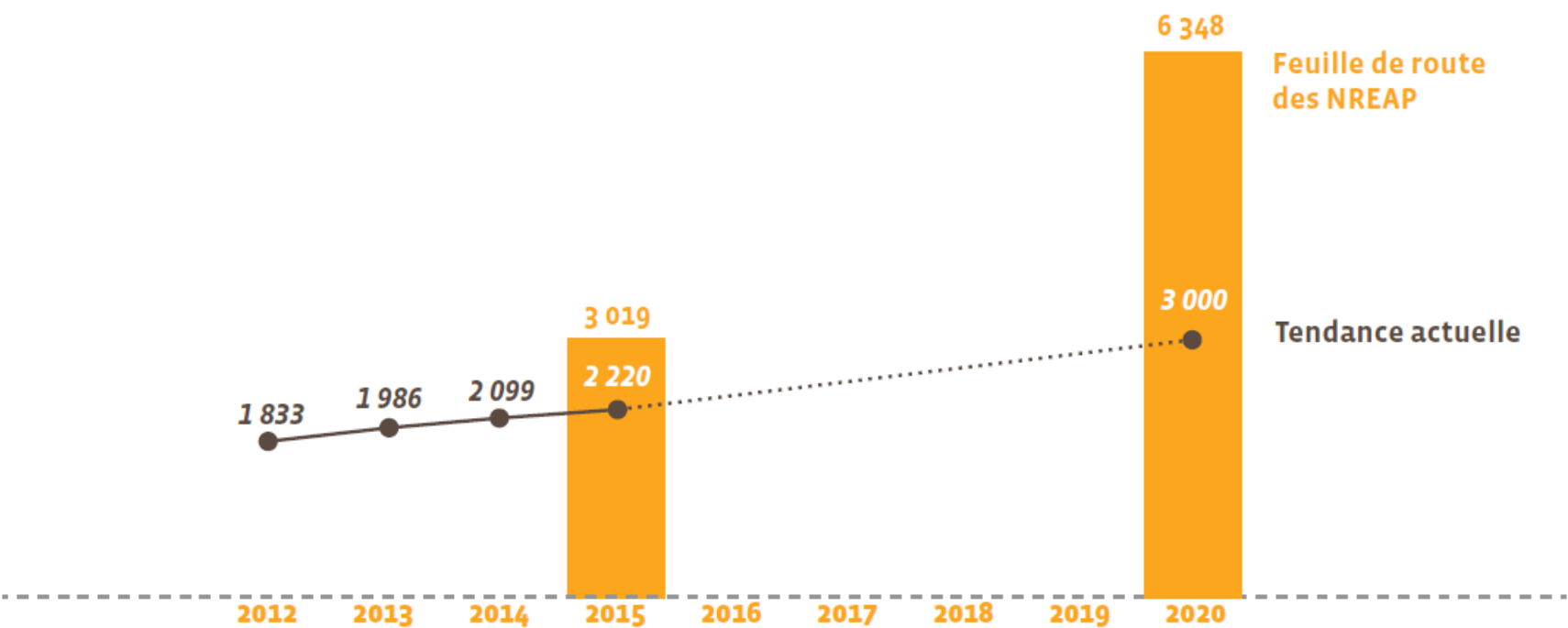


Pays membres inclus à la date de leur adhésion. * Estimation. Source : EurObserv'ER 2015

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique

Tendance actuelle par rapport à la feuille de route des Plans d'action nationaux énergies renouvelables (en ktep)

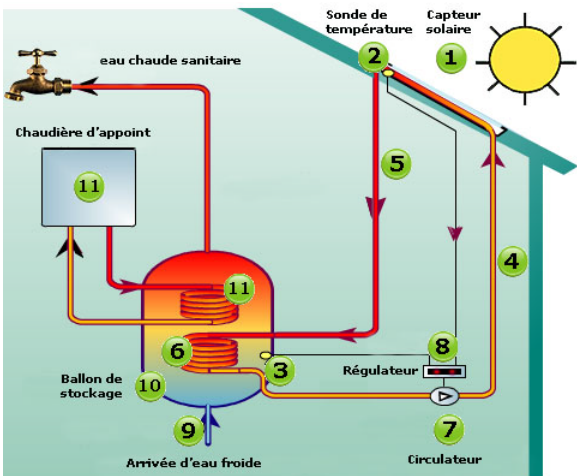


Source : EurObserv'ER 2015

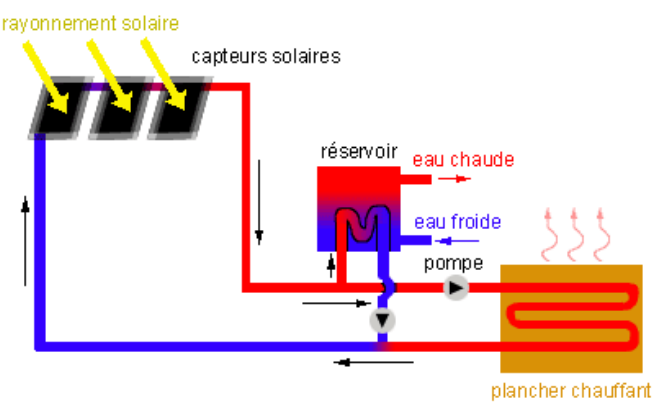
IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique

1. Le chauffe-eau solaire individuel

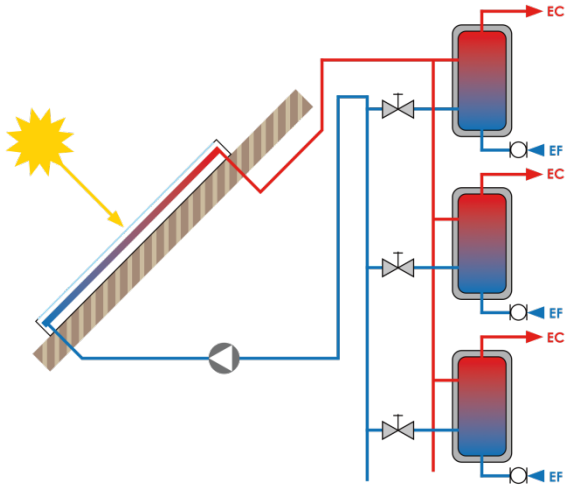


3. chauffage solaire

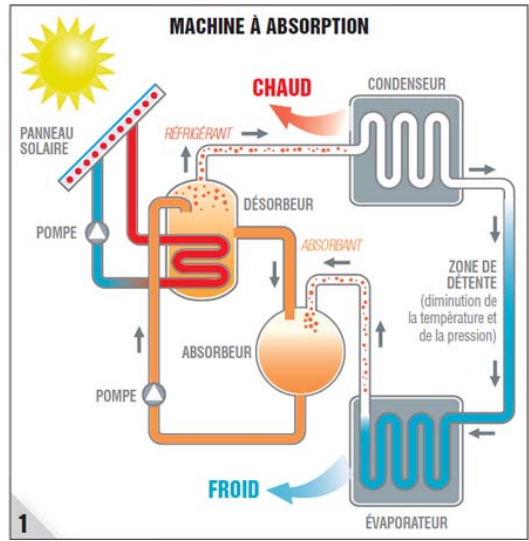


4 applications représentent près de 95 % du marché

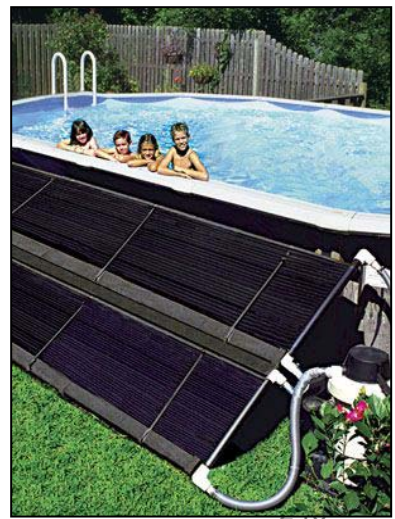
2. Production d'eau chaude collective



4. rafraîchissement solaire



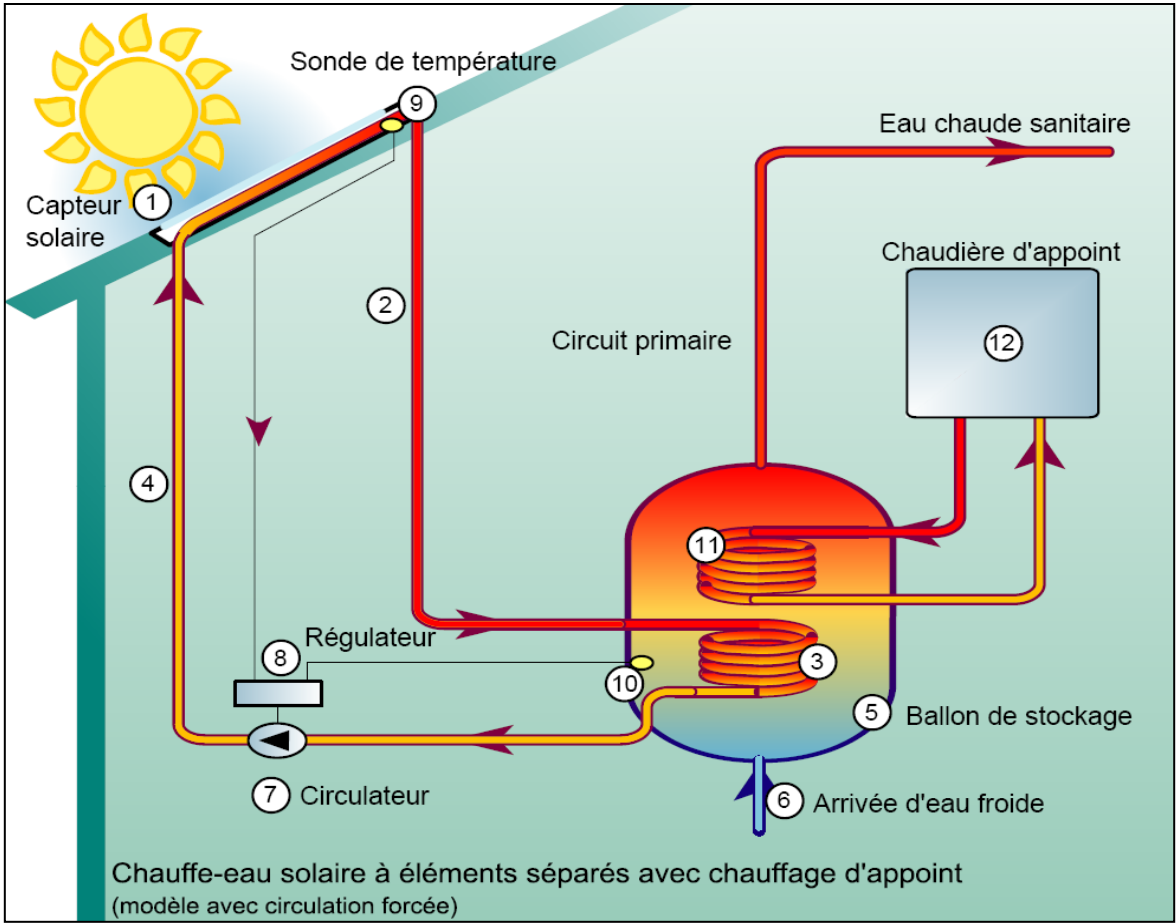
5% : chauffage piscine



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le chauffe-eau solaire individuel

Le chauffe-eau solaire individuel est l'application la plus répandue du chauffage solaire.



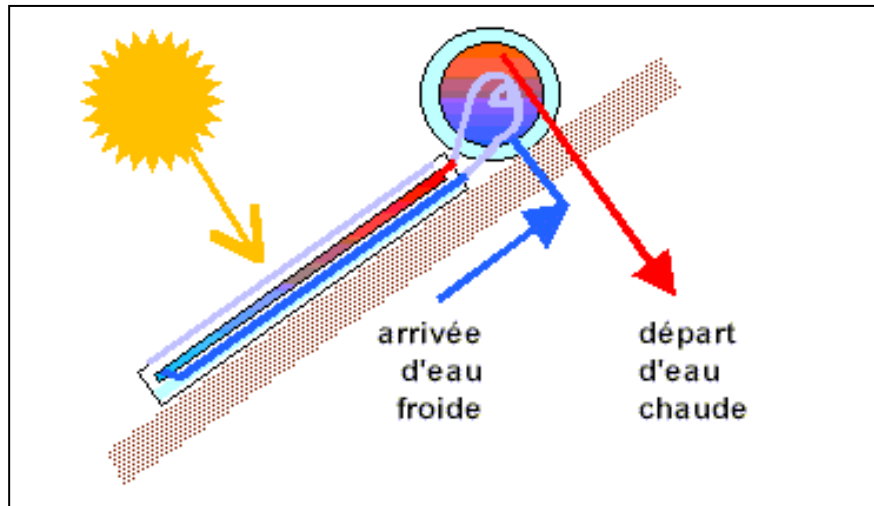
<http://www.ademe.fr/particuliers/fiches/cesi/rub2.htm>.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermique** → **le chauffe-eau solaire individuel**

Il existe différents systèmes chacun adapté à un type d'utilisation ou à un type de climat.

Les systèmes « monobloc »



<http://www.outilssolaires.com/premier/index-premier.htm>.



<http://www.leguידeduchauffage.com/photogallery/chauffe-eau-solaire/chauffe-eau-solaire-monobloc.jpg>.

Les capteurs et le ballon sont situés au même endroit. Le système comporte tout de même un circuit primaire qui fonctionne en thermosiphon.

-Avantages : coût et simplicité.

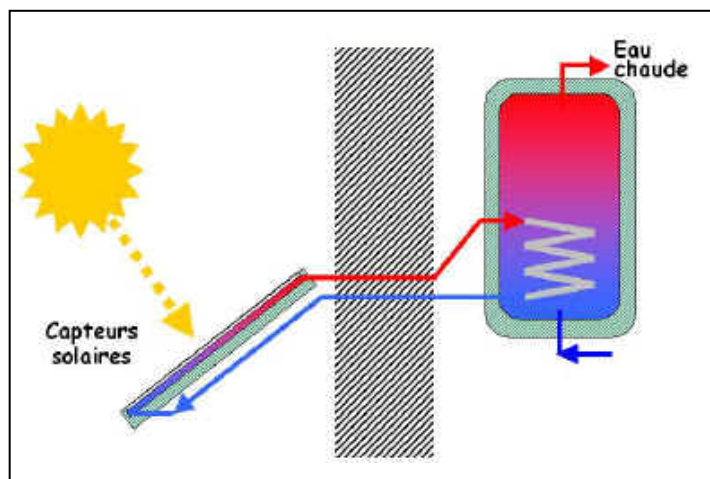
-Inconvénients : intégration architecturale et pertes thermiques au niveau du ballon

→ Configuration la plus utilisée dans le monde mais ne convient qu'aux régions chaudes.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → le chauffe-eau solaire individuel

Les éléments séparés et thermosiphon »



<http://www.outilssolaires.com/premier/index-premier.htm>.

L'eau du circuit primaire circule des capteurs au ballon uniquement grâce à la différence de densité (de température), sans pompe ou autre dispositif. Le ballon doit être placé plus haut que les capteurs et le circuit hydraulique doit être aussi court que possible afin de faciliter la thermo-circulation.

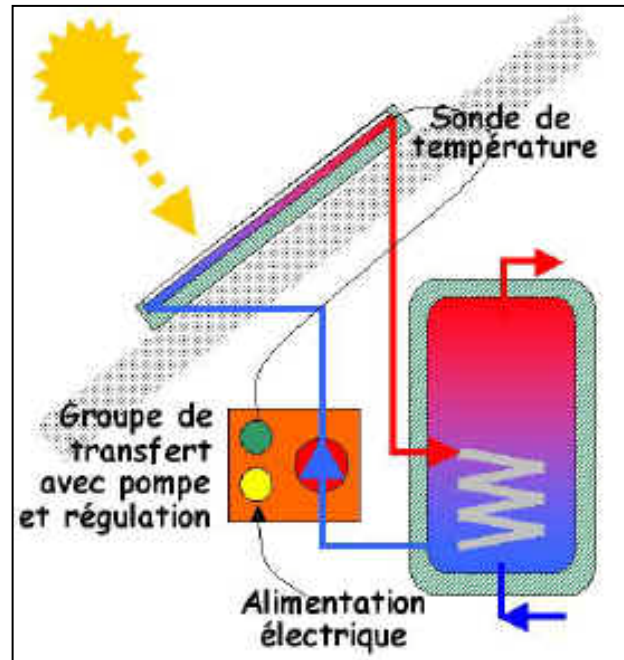
-Avantages : coût et simplicité.

-Inconvénients : intégration architecturale, fonctionnement si les capteurs présentent des pertes de charge trop importantes, rendement limité.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → le chauffe-eau solaire individuel

Les éléments séparés avec pompe



<http://www.outilssolaires.com/premier/index-premier.htm>.

L'eau du circuit primaire circule des capteurs au ballon grâce à une pompe, pilotée en fonction des températures respectives de l'eau du ballon de l'eau du circuit primaire.

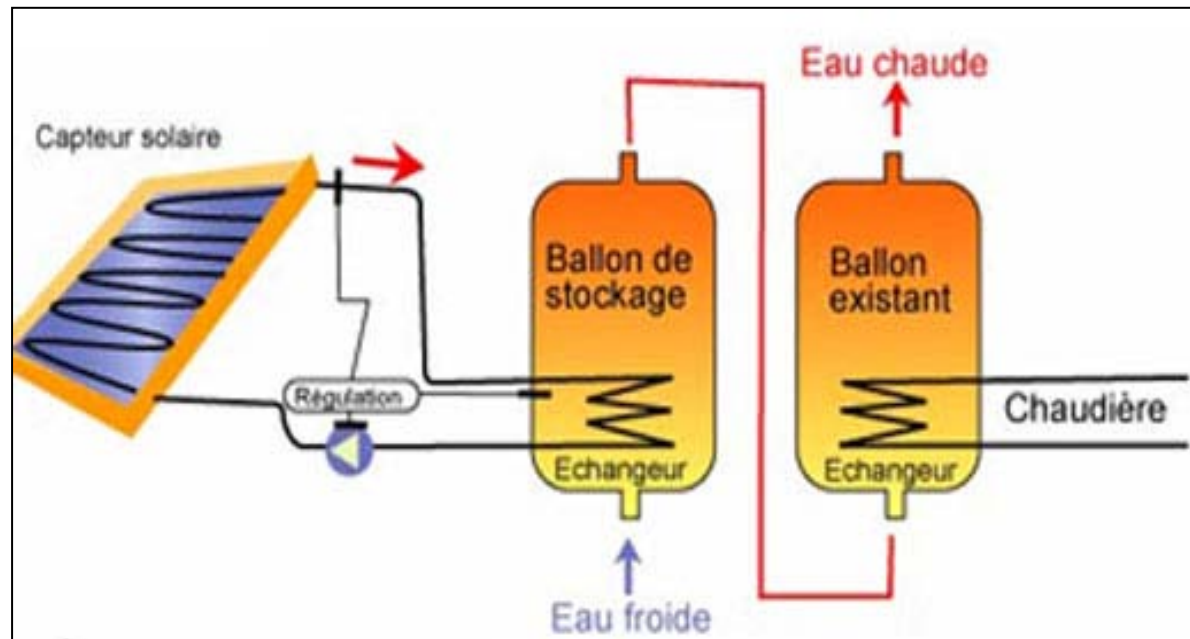
-Avantages : système adapté à toutes les configurations, rendement optimisé, possibilités d'appoint plus étendues.

-Inconvénients : coût plus élevé, complexité, consommation d'électricité.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → les appoints

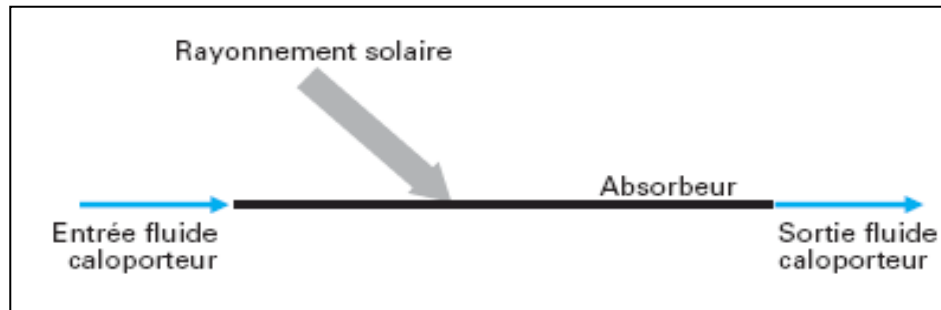
En climat tempéré, il est rare que la production d'eau chaude puisse être assurée toute l'année par la seule énergie solaire. L'appoint peut être séparé ou intégré dans le ballon du chauffe-eau solaire. Les appoints séparés sont utilisés lorsqu'on équipe une installation existante et que le chauffe-eau initial est en bon état (énergie d'appoint quelconque). On installe alors les deux appareils en série, le chauffe-eau solaire étant disposé en amont.



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → les capteurs

Principe général : le rôle d'un capteur thermique consiste à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur et de la transmettre à un fluide caloporteur.



Absorbeur traversé par un fluide caloporteur dans un capteur plan non vitré.

© Techniques de l'Ingénieur.

Il existe trois grandes familles de capteurs thermiques :

- ◆ Les capteurs non vitrés, surtout utilisés pour le chauffage des piscines.
- ◆ Les capteurs vitrés classiques, pour le chauffage et l'ECS.
- ◆ les capteurs vitrés sous vide, pour le chauffage et l'ECS.

L'absorbeur est l'élément principal d'un capteur solaire. C'est lui qui assure la transformation de l'énergie électromagnétique en absorbant la quasi-totalité du rayonnement, sans le transmettre (il est opaque) et sans le réfléchir (il est noir).

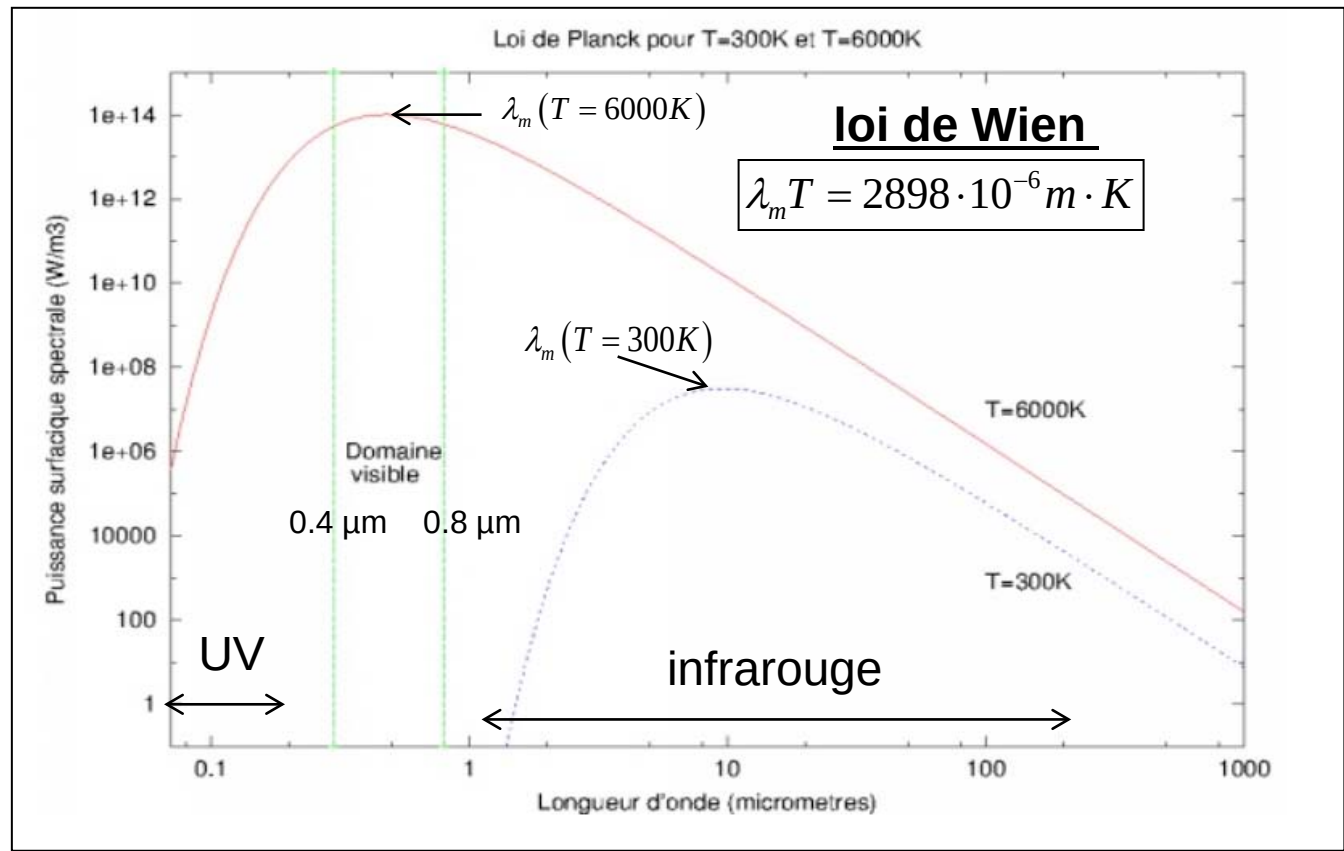
IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile dont la température (équivalente) de surface est de l'ordre 5800 K. On peut supposer en première approximation que le soleil se comporte comme un corps noir dont le spectre d'émission correspond à la loi de Plank :

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

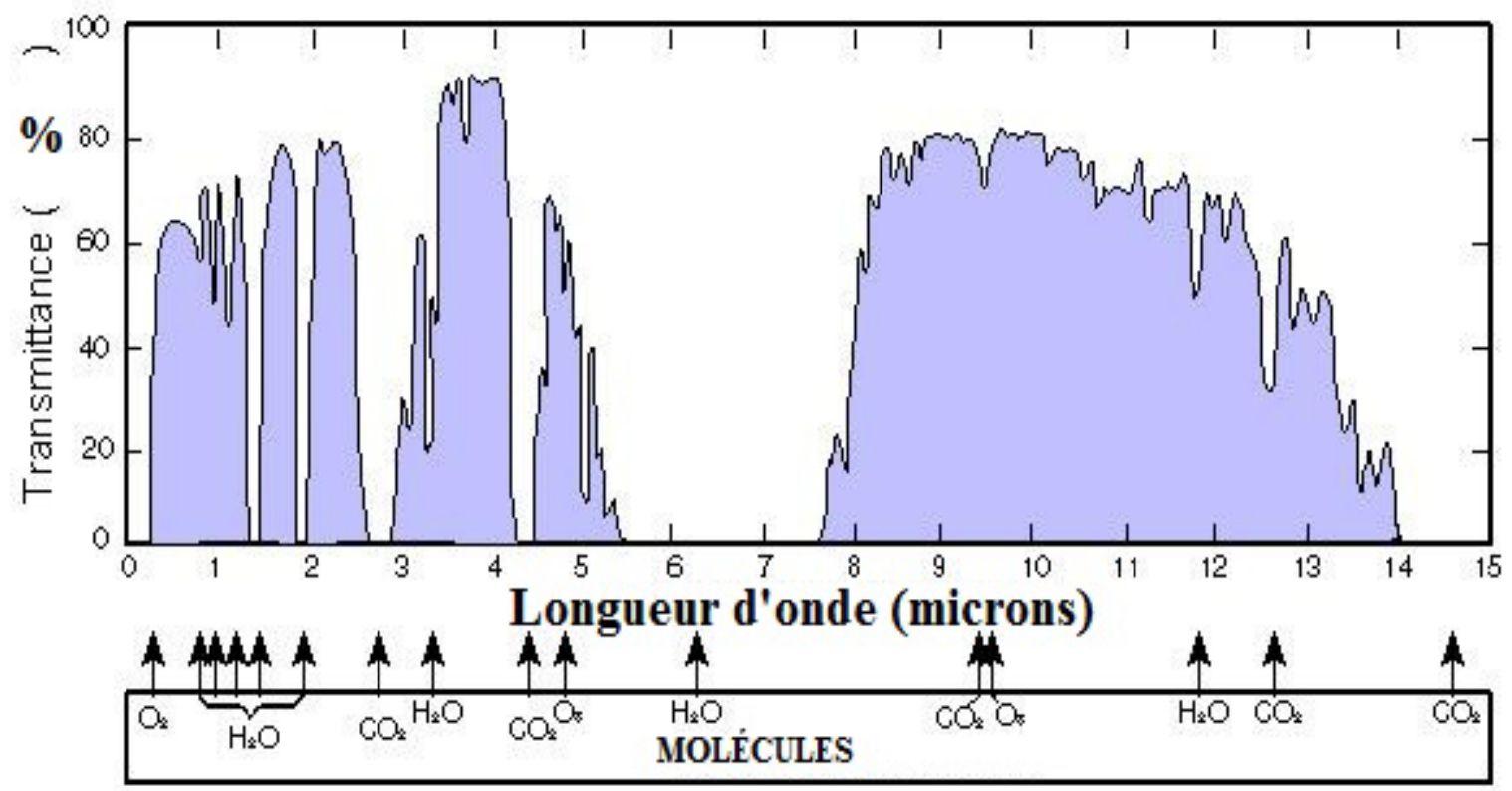
avec $h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s}$, $c = 299,8.10^6 \text{ m.s}^{-1}$, et $k = 1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le rayonnement solaire

Le flux effectivement reçu par un capteur solaire, même convenablement incliné par rapport à l'horizontale est très inférieur à la constante solaire (**1367 W/m²**) notamment parce que l'atmosphère n'est pas parfaitement transparente.

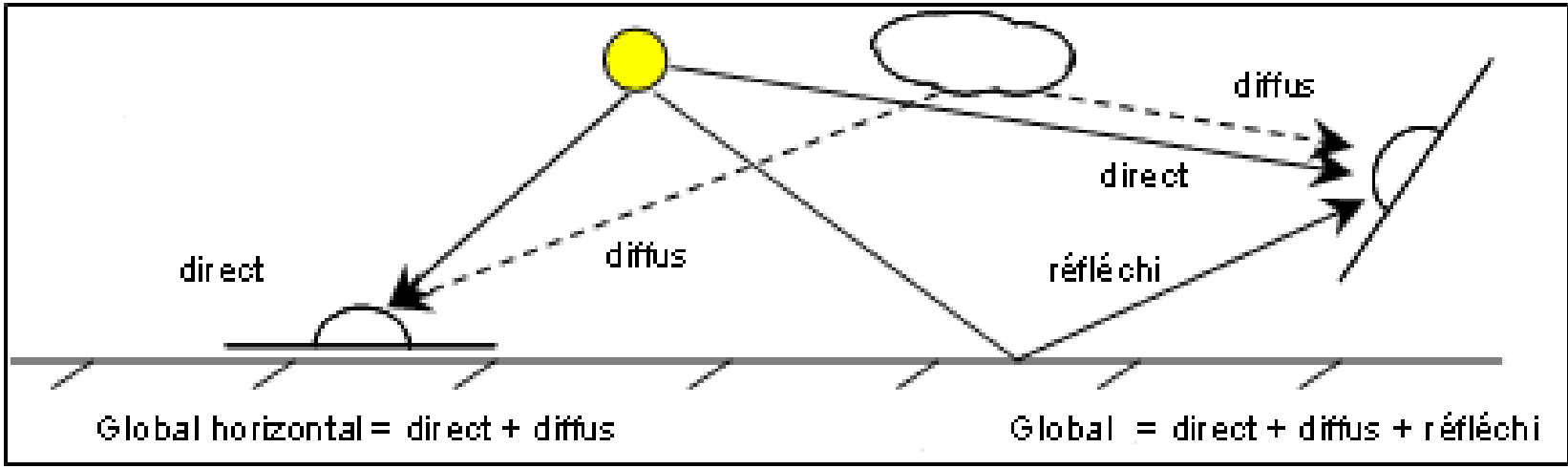


Transmission de l'atmosphère jusqu'à 15 µm, ainsi que les principales molécules responsables de l'absorption de la lumière

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le rayonnement solaire

Pour une latitude de $45^{\circ}N$, l'ordre de grandeur à retenir est de $800-1000\text{ W/m}^2$. Les capteurs solaires exploitent deux (voire trois) composantes du rayonnement solaire : l'irradiation directe ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), qui est transmise par l'atmosphère, et l'irradiation diffuse qui est émise par l'atmosphère (plus éventuellement le rayonnement réfléchi par les surfaces avoisinant le capteur).

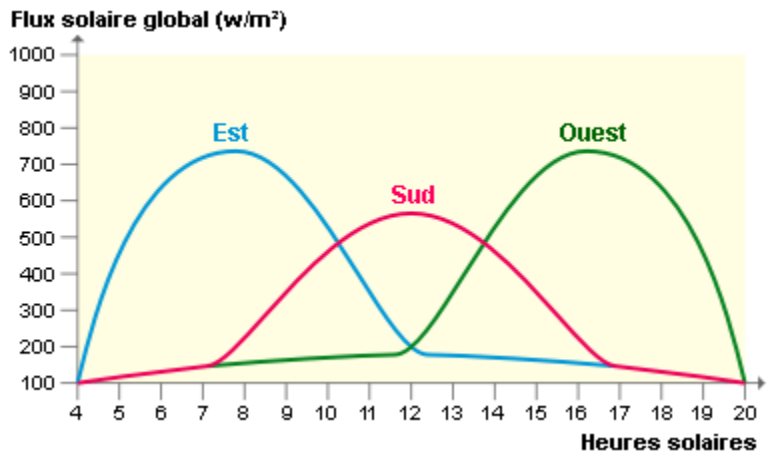
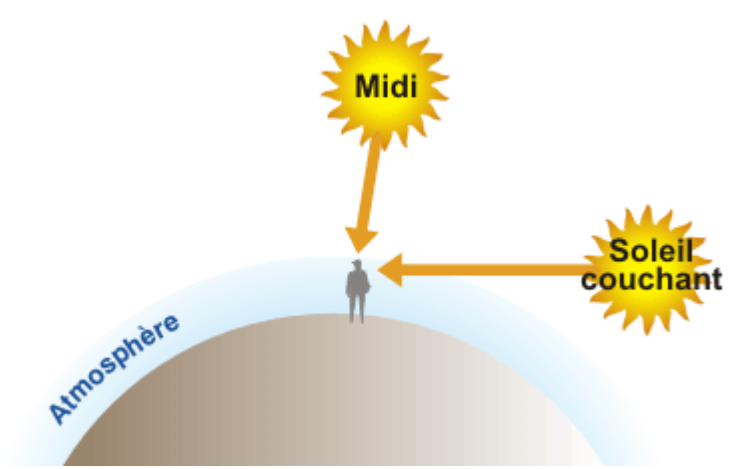


Irradiations (rayonnements) globale, directe, diffuse et réfléchi.
<http://www.ines-solaire.com/solth/page4.html>.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le rayonnement solaire

Pour compliquer encore un peu la situation, le flux reçu dépend de l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale (de l'angle du soleil par rapport à l'horizon) et de l'exposition du capteur (la meilleure exposition étant le plein sud). L'irradiation hémisphérique (kWh/m²/j) correspond par définition à l'irradiation globale reçue par une surface horizontale. L'irradiation globale verticale (kWh/m²/j) peut être utilisée pour le calcul des apports passifs sur des parois verticales. L'inclinaison optimale dépend de la période de l'année si bien qu'en pratique, l'inclinaison optimale dépend de la période d'exploitation du capteur.



puissance calorifique transmise au travers d'un double vitrage clair en position verticale en juin

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le rayonnement solaire

Il existe trois façons de choisir l'inclinaison d'un capteur solaire :

- ◆ Maximiser le flux annuel → **30°** pour un capteur plein Sud à Nancy.
- ◆ Maximiser le flux pendant le mois de décembre → **60°** à Nancy.
- ◆ Conserver l'inclinaison du support (un toit le plus souvent).

Les données correspondent à un capteur orienté plein Sud à Nancy (kWh/m² cumulés)

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Directe (IBP)	18	32	50	66	74	80	89	77	70	42	19	14	630
Diffuse (IDP)	18	27	46	63	78	82	81	70	51	35	20	14	585
Réfléchie (IRP)	0	1	1	2	2	2	2	2	1	1	0	0	15
Globale (IGP)	36	60	97	130	155	164	172	149	123	78	39	28	1229

Inclinaison du capteur : 30°. Irradiation annuelle maximale.

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Directe (IBP)	24	39	54	60	59	59	68	66	70	49	24	18	590
Diffuse (IDP)	14	22	37	50	63	66	65	56	41	28	16	12	470
Réfléchie (IRP)	1	2	4	6	8	8	9	7	5	3	1	1	57
Globale (IGP)	39	63	95	116	130	133	142	130	117	80	41	31	1117

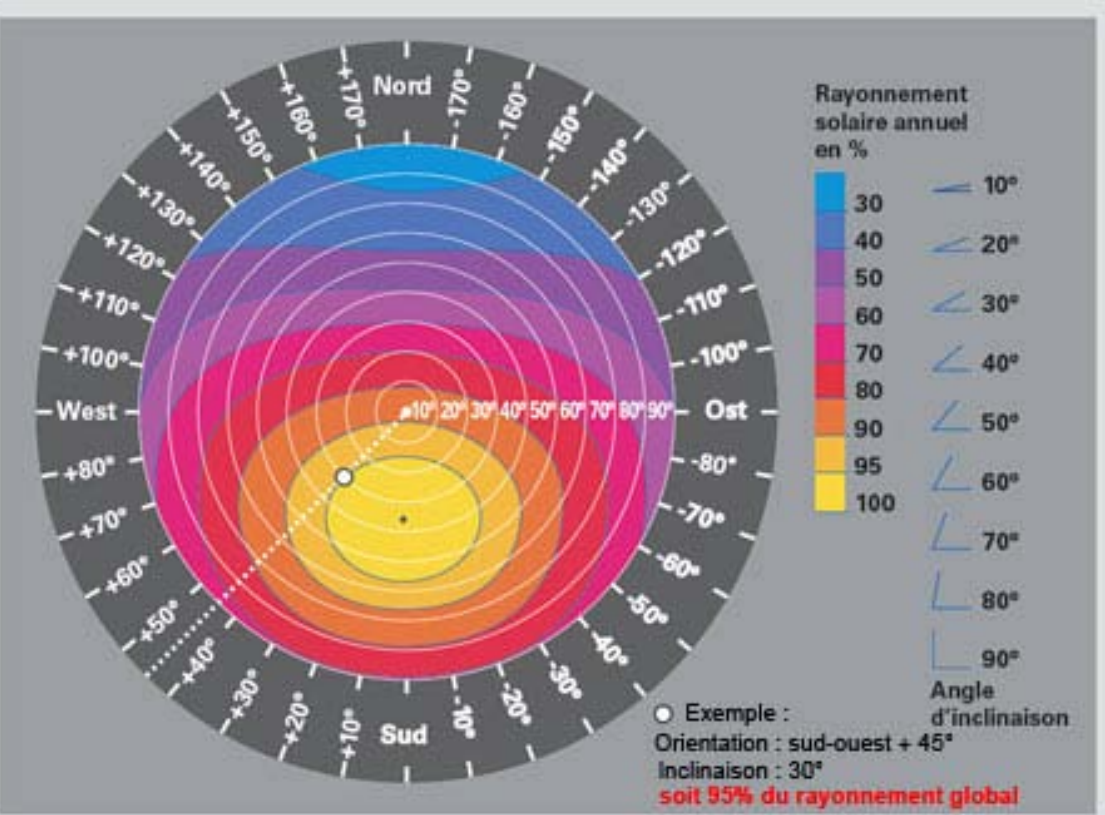
Inclinaison du capteur : 60°. Irradiation optimale en décembre.

http://ines.solaire.free.fr/gisesol_1.php.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le rayonnement solaire

L'exposition optimale est le plein Sud, mais il n'est quelque fois pas possible de la respecter. Le calcul de l'irradiation est alors obtenu par en appliquant une correction



Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur la quantité de l'énergie captée

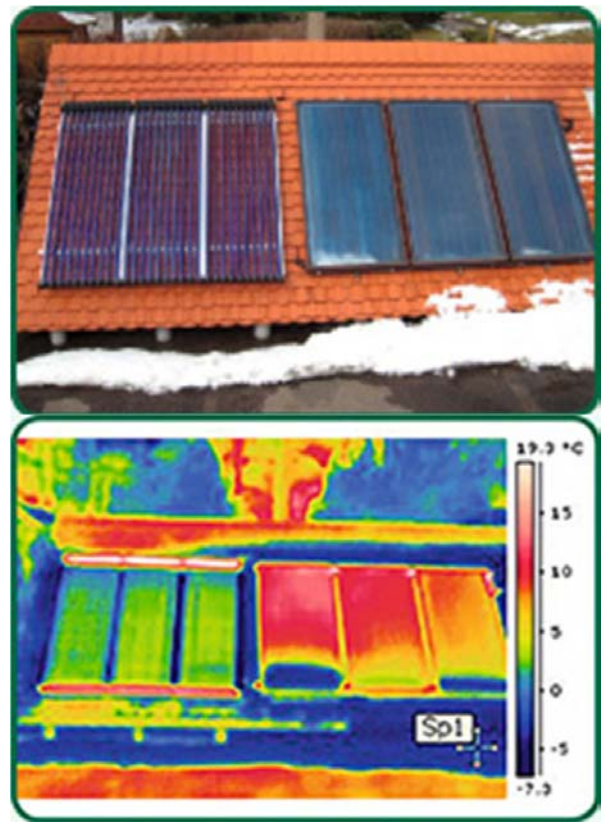
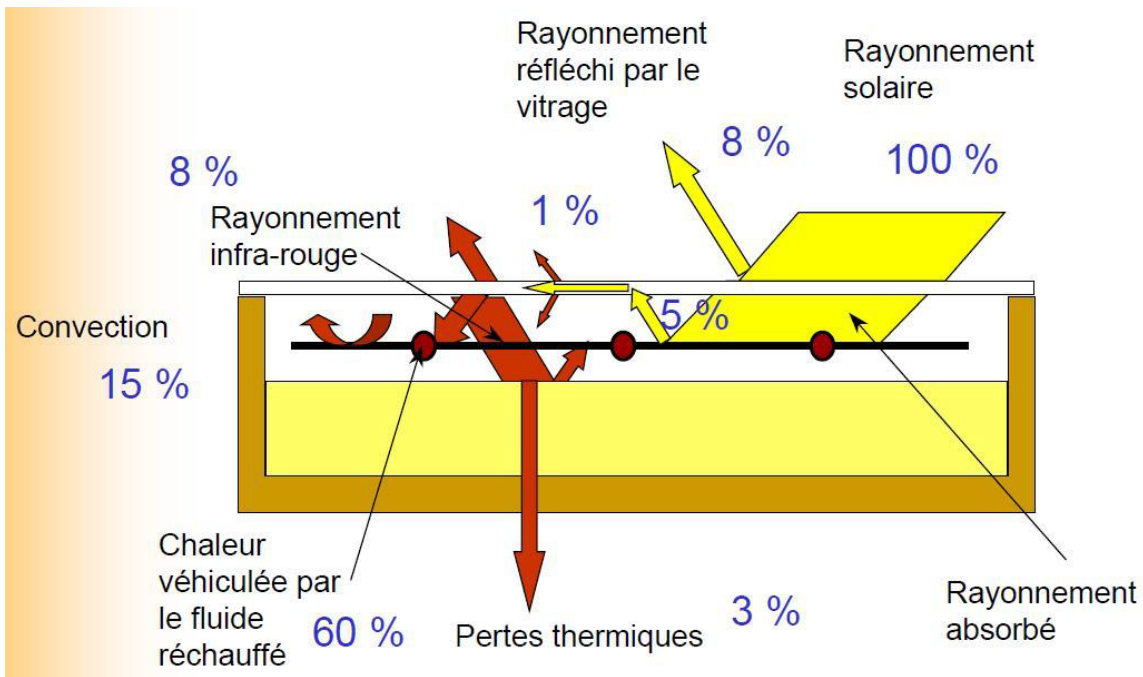
FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNEES					
INCLINAISON \ ORIENTATION		 0° 	 30° 	 60° 	 90° 
Est		0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est		0,93	0,96	0,88	0,66
Sud		0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest		0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest		0,93	0,90	0,78	0,55

: position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Hespul
NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production annuelle.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → bilan thermique d'un capteur



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermique** → les capteurs → capteurs sans vitrage

Les capteurs sans vitrage sont les plus rustiques et les plus économiques. Ils se justifient principalement pour le chauffage de piscine, en été, lorsque la température extérieure et le rayonnement sont élevés. On peut les envisager pour tout type d'installation où la température du fluide caloporteur reste faible (pompe à chaleur solaire par exemple). La baisse de rendement (par rapport à un capteur vitré classique) peut être compensée par une augmentation de la surface installée



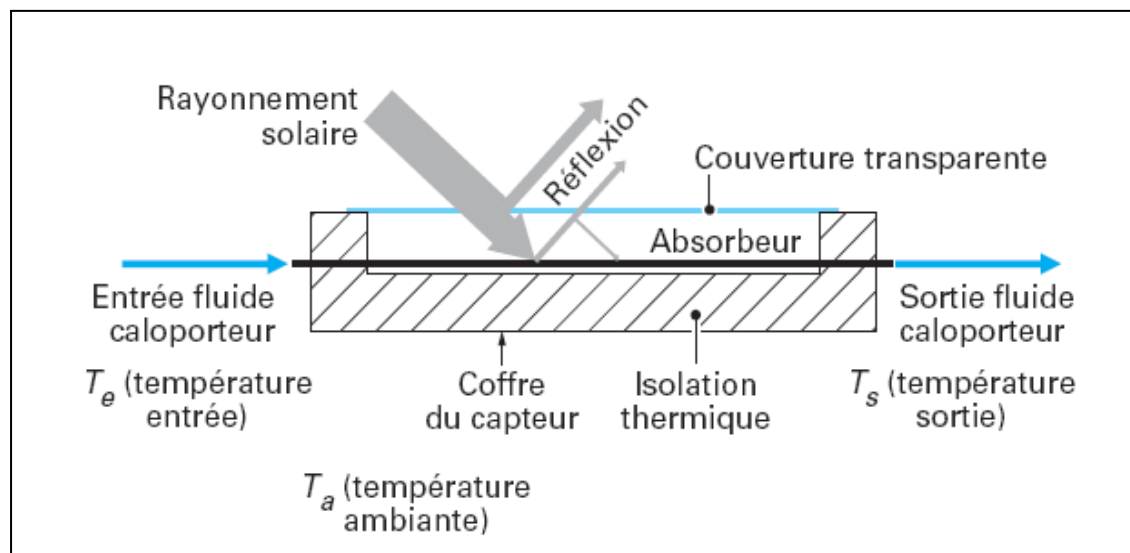
Production d'ECS à l'aide de capteurs non vitrés.
© Techniques de l'Ingénieur.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → les capteurs vitrés

Les capteurs vitrés sont les plus utilisés car ils correspondent au domaine d'application le plus courant : la production d'eau chaude sanitaire. La température de consigne est en général inférieure à 70°C, dans le cas contraire, on peut utiliser un double vitrage pour atteindre jusqu'à 100°C. Les principaux éléments d'un capteur vitré sont :

- ◆ La **couverture** (semi) transparente.
- ◆ L'**isolation** thermique.
- ◆ L'**absorbeur**.
- ◆ Le **coffre**.

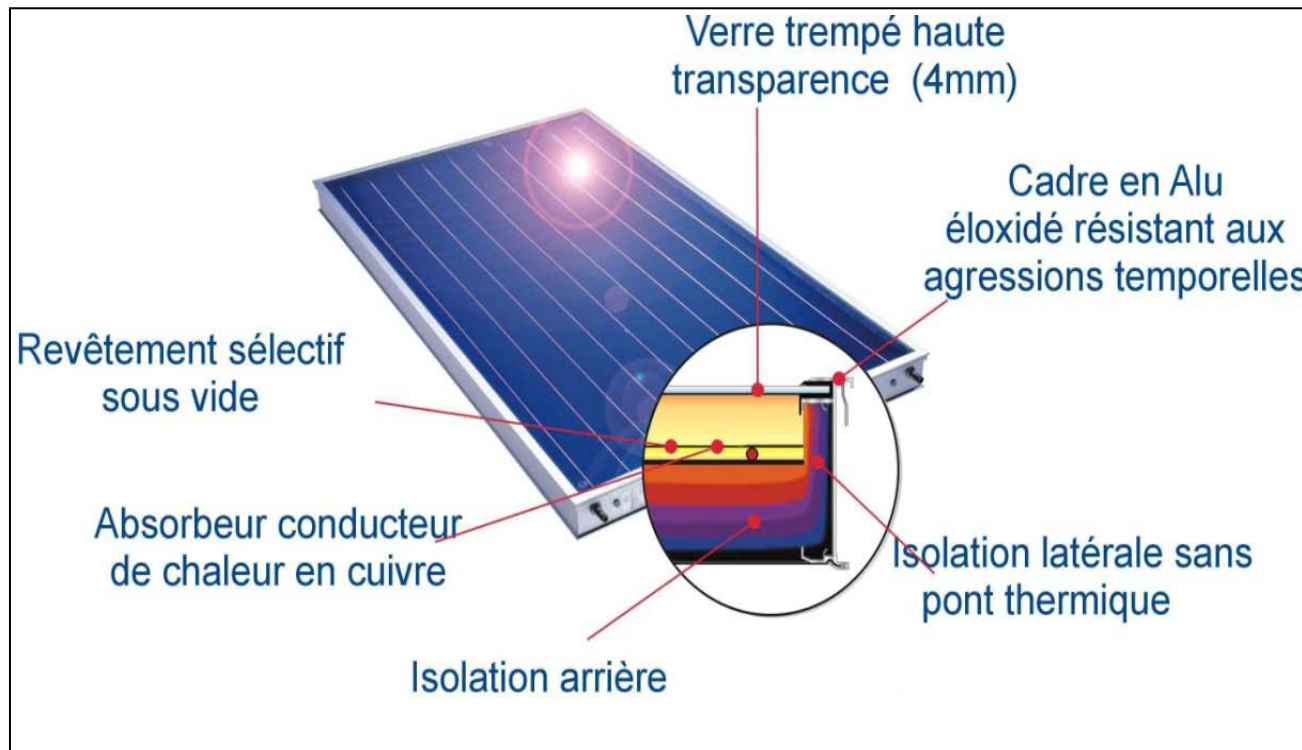


© Techniques de l'Ingénieur.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → les capteurs vitrés

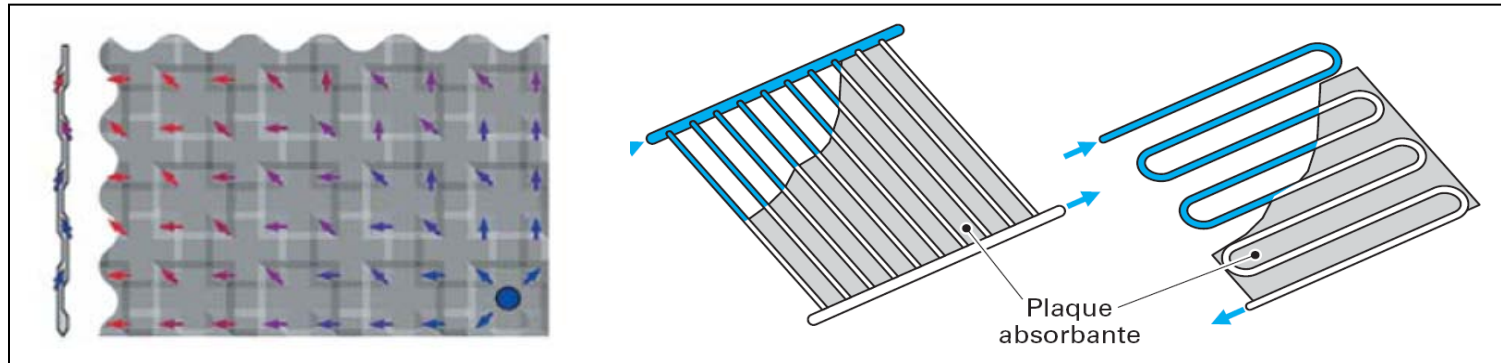
L'isolation thermique doit être placée sur les faces arrière et latérales. Certains matériaux isolants participent à la tenue mécanique de l'ensemble du capteur. L'isolant d'un capteur solaire peut être soumis à de très fortes contraintes thermiques lorsque le caloporteur ne circule pas → 150°C. On cherche à éviter le contact direct entre l'isolant et l'absorbeur et on utilise des mousses phénoliques ou des laines minérales, doublées éventuellement par un isolant plus classique (couche de mousse de polyuréthane par exemple).



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → les capteurs → capteurs vitrés

L'**absorbeur** est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur. Le matériau le plus utilisé est le cuivre mais il peut également être réalisé en acier inoxydable. L'absorbeur est souvent recouvert d'un revêtement (dépôts de chrome ou de titane) dit **sélectif**, c'est à dire avec un bon coefficient d'absorption (dans le domaine spectral de l'éclairement) mais avec un faible coefficient d'émission ε (dans le domaine transmis par la vitre). S'il est simplement peint, on parle de capteur non-sélectif.

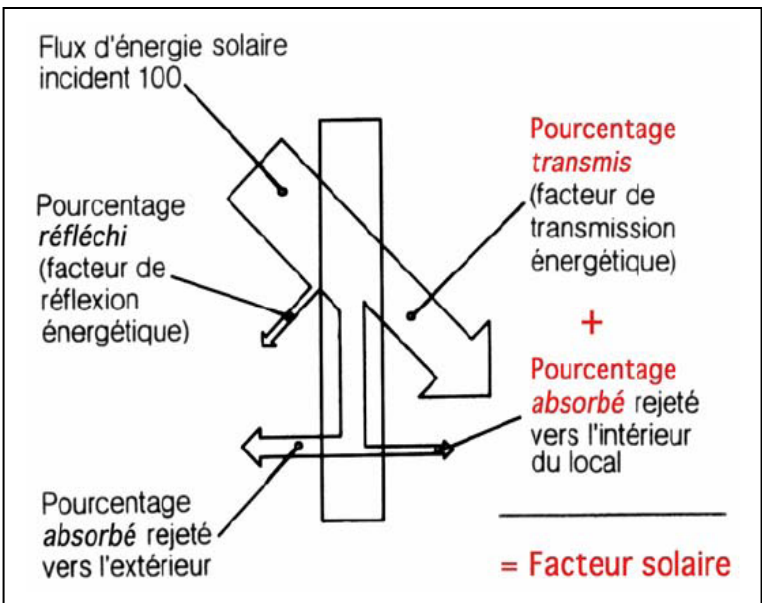


Divers types de circuits d'eau dans les absorbeurs.
© Techniques de l'Ingénieur.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ les capteurs vitrés

La couverture (semi) transparente doit assurer la double fonction de laisser passer le maximum de rayonnement solaire et de limiter le refroidissement de l'absorbeur en réduisant la convection et en bloquant le rayonnement infrarouge émis. Le matériau le plus utilisé est le verre trempé. Les matériaux de synthèse (*polycarbonate*) ont été abandonnés pour des raisons de tenue au vieillissement. Les vitrages à basse teneur en oxyde de fer présentent des caractéristiques optiques légèrement supérieures aux vitrages standards. Le facteur solaire *g* (ou transmission énergétique totale) représente la somme de la *transmission* du rayonnement solaire incident et de l'*émission* du *vitrage*.



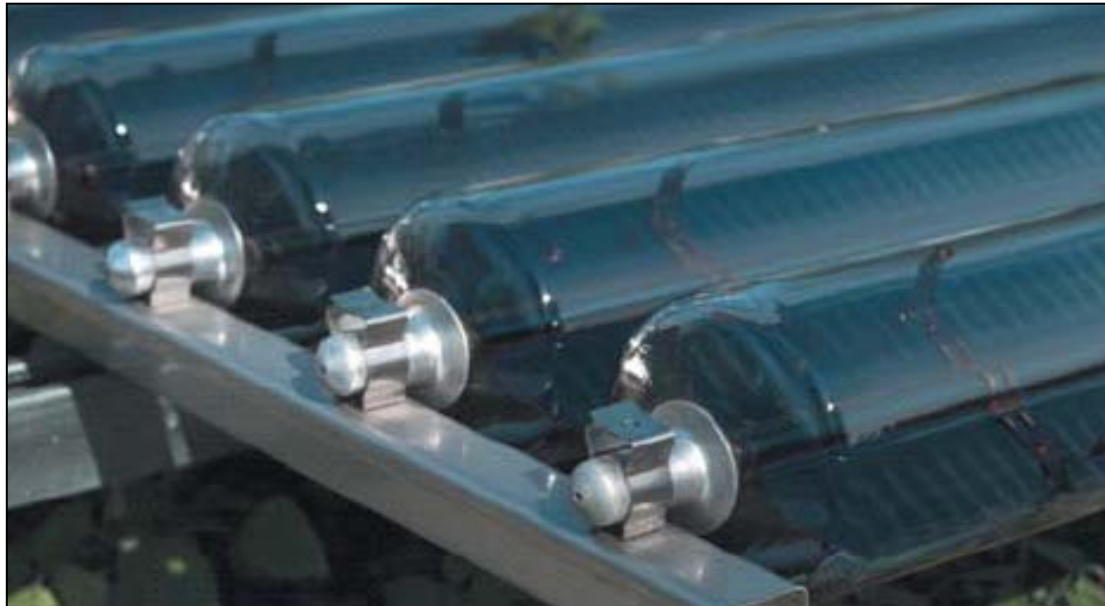
	Transmission énergétique	Réflexion énergétique	Absorption énergétique	Facteur solaire
Verre clair	83 %	8 %	9 %	85 %
Verre à basse teneur en oxyde de fer	90 %	8 %	2 %	90 %

Propriétés optiques moyennes pour des verres de 4 mm couramment utilisés

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermique**→ **les capteurs sous vide**

Les capteurs sous vide permettent de limiter les pertes par convection en bloquant les flux convectifs entre l'absorbeur et la vitre. La présence du vide entre l'absorbeur et la vitre impose (souvent) une conception tubulaire, plus complexe que celle des capteurs classiques. Au départ, ils ont été utilisés principalement lorsque la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant est importante (montagne).

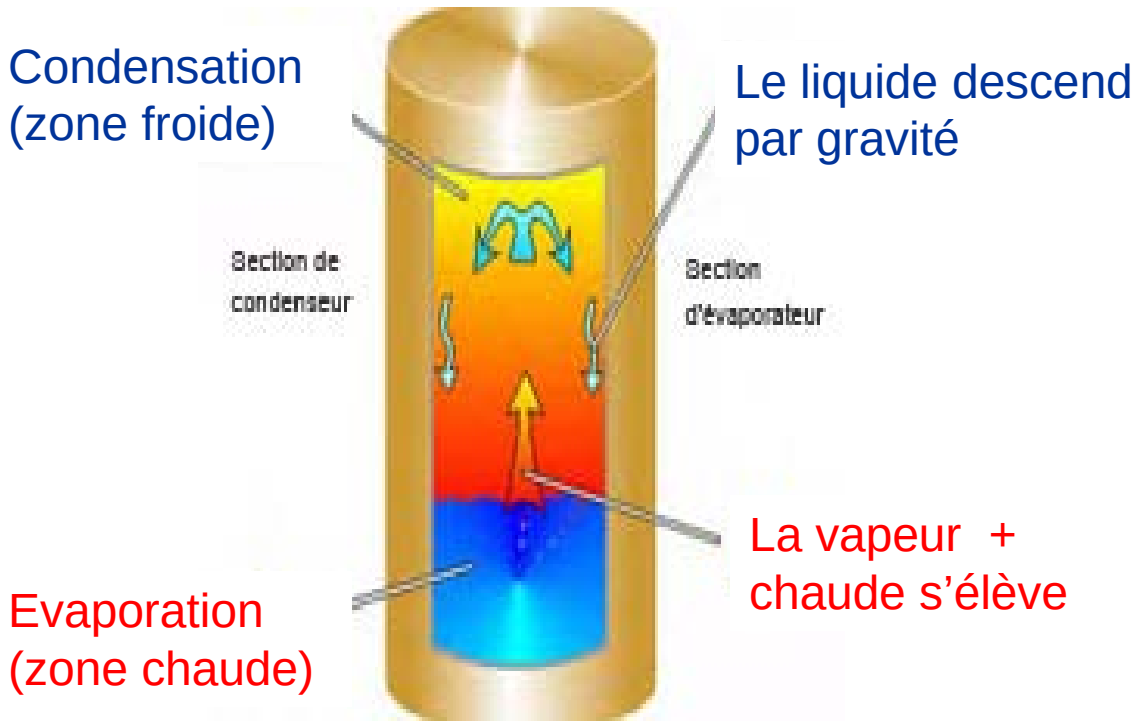
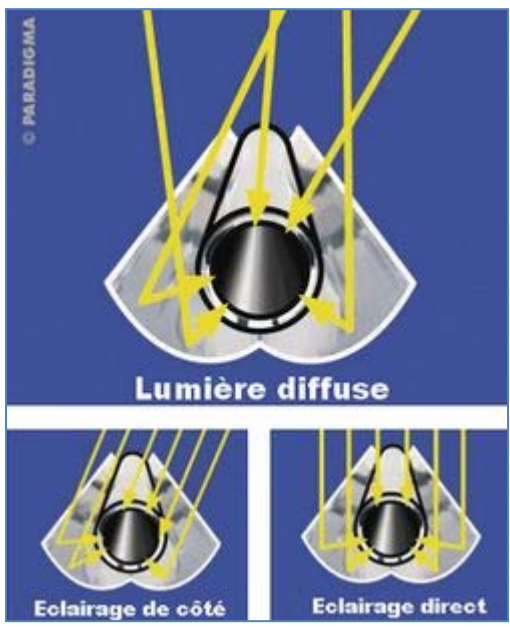


© Techniques de l'Ingénieur.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ les capteurs sous vide

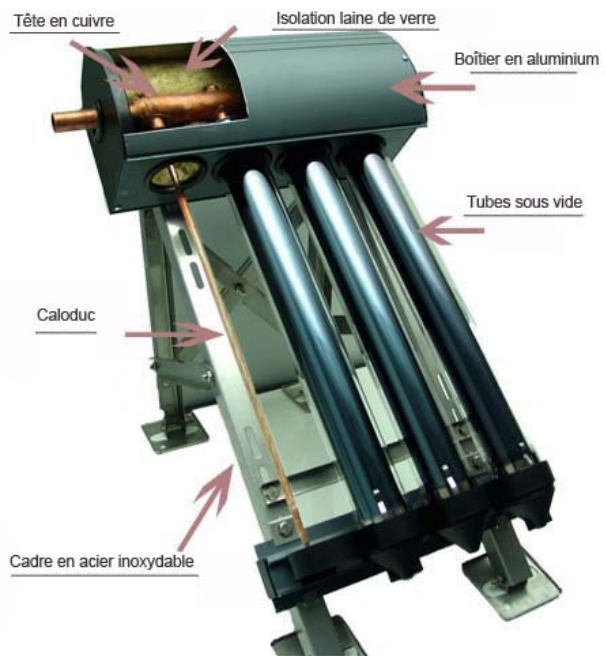
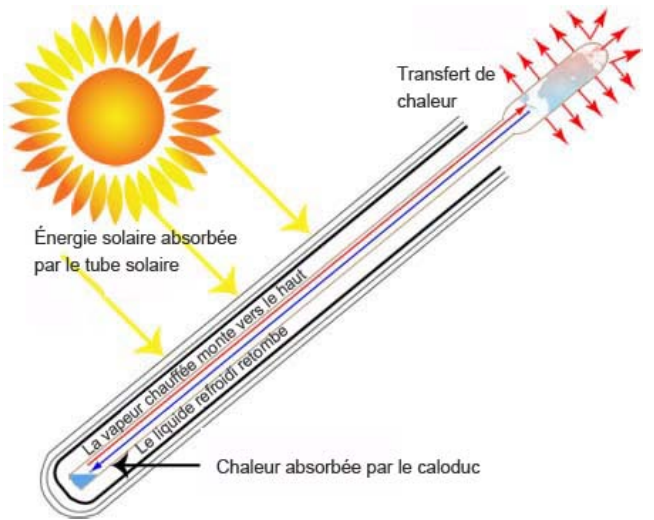
En pratique, ils possèdent plusieurs autres avantages importants comme l'utilisation de réflecteurs pour compenser une mauvaise incidence et la protection contre la surchauffe dans le cas des capteurs à caloducs.



Principe de fonctionnement d'un caloduc gravitaire

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → les capteurs sous vide



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique → rendement d'un capteur

Le rendement η d'un capteur est défini par le rapport :

$$\eta = \frac{\text{Puissance calorifique transmise}}{\text{Puissance radiative reçue (W)}}$$

En pratique, η décroît linéairement avec la quantité :

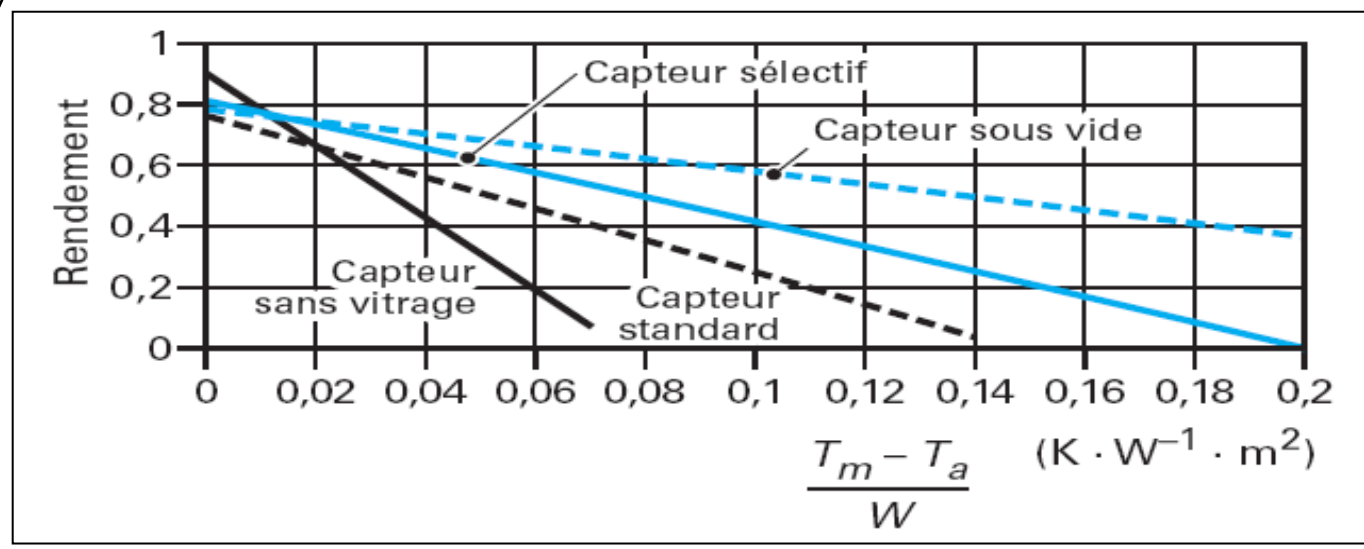
$$\frac{T_m - T_a}{W}$$

température moyenne du capteur *température ambiante*
puissance radiative reçue

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

Ordonnée à l'origine : facteur optique

Pente : conductance thermique



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ rendement d'un capteur

MARQUES de CAPTEURS "plan"	Avis Technique	Coef. B	Coef. K W/m2. °C
BUDERUS - Logasol SKS	14-00/577	0,79	4,89
CLIPSOL - TGD Y1200	AT 14 + 5/03-839	0,73	4,26
DE DIETRICH - Sol 1	4-00/576	0,68	3,82
GASOKOL - Enersol GKAN et GKAQ	14/02-716	0,77	3,86
GIORDANO - C8 HI	14/07-1155	0,76	3,71
PHÖNIX - Infinity 21	14+5/02-756	0,72	3,54
SOLAHART - Solahart Ko	14/01-672	0,79	4,76
SONNENKRAFT - SK500 (Solar Connexion)	14-00/575	0,76	3,78
SUNMASTER - SK20 LM (New Point Products)	14/01 - 650	0,77	4,17
TISUN - FM-S	SolarKeymark : 09-08/D	0,79	3,75
VISSMANN - Vitosol 100 S1,7	14/00-584	0,76	4,34
WAGNER - EURO C20 AR	14/03-844	0,85	3,34
WEISHAUP - WTS-F	14+5/03-793	0,77	2,75
ZENIT - Thermic	14+5/01-609	0,77	3,62
MARQUES de CAPTEURS "sous vide"	Avis Technique	Coef. B	Coef. K W/m2. °C
SUNGEOMET DS22 58-1800	14/05-965	0,74	2,57
TECNISUN SAS SUN 110	14/07-1135	0,64	1,83
THERMOMAX 30	14/03-841	0,76	0,55
VISSMANN - Vitosol 200 SD2 30	14/03-846*V1	0,79	1,51

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ productivité annuelle d'une installation

Une installation d'ECS est caractérisée par sa productivité annuelle, en $kWh/m^2/an$.

→ Le calcul intègre les pertes qui se produisent au niveau du ballon de stockage.

→ Pour une installation moyenne : entre 350 et $500 kWh/m^2/an$ (capteurs plein sud).

La consommation en ECS d'une personne est de l'ordre de $850 kWh/an$.

→ Il faudrait donc installer entre 2 et $3 m^2$ par personne pour couvrir la totalité des besoins mais on installe rarement plus de 1 à $2 m^2$. La productivité de l'installation pourra diminuer si la surface des capteurs augmente trop.

→ En pratique, lorsque des calculs plus détaillés sont nécessaires, il existe des applications gratuites disponibles en ligne comme la *méthode Solo* sur le site de Tecsol (www.tecsol.fr).

Type de logement			T1	T2	T3	T4	T5
Occupation (personnes).....	1	2	2	2	3	3 et 4	5
Consommation (L/jour).....	30	50	60	80	120	150	200

Consommation d'ECS pour des logements neufs. © Techniques de l'Ingénieur.

Maisons de retraite (L/lit)	Hôpitaux (L/lit)	Piscines (L/baigneur)	Gymnase (L/personne)
60	80	8	12

Consommation d'ECS dans diverses installations santé/sports. © Techniques de l'Ingénieur.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermique** → installation des capteurs

- Prendre en compte le vent pour le calcul des pertes thermiques
- Éviter les ombrages et la neige (inclinaison suffisante)
- Calculer les charges imposée au bâtiment



Terrasse ou toiture terrasse



Toiture inclinée



Capteur intégré

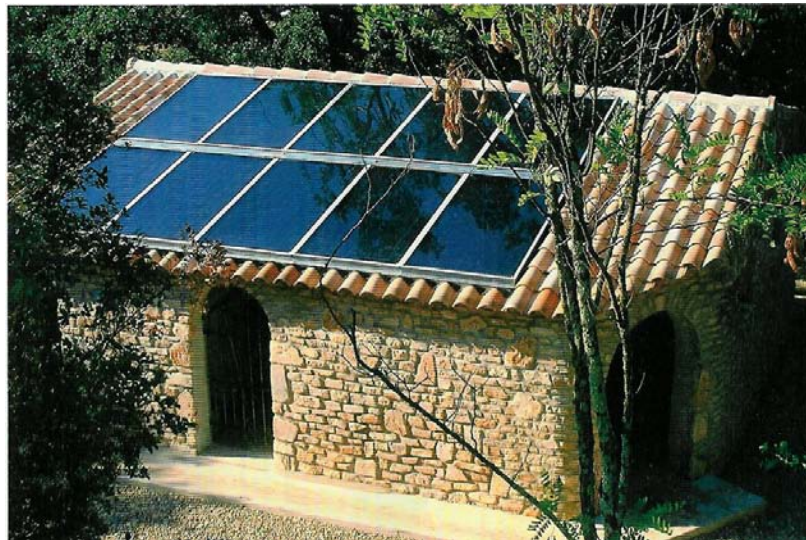
Les assurances habitation couvrent les dégâts relatifs à la grêle uniquement lorsque les capteurs sont intégrés

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermique**→ **Chauffage solaire ou systèmes solaires combinés (SSC)**

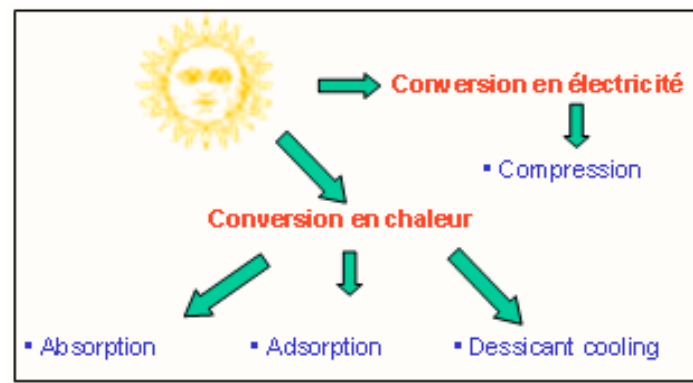
Ces installations sont encore rares et correspondent à des règles de dimensionnement qui sont très différentes de celles d'ECS. **Température de retour élevée** (20-25°C pour un plancher chauffant) et **température de départ faible** (25-30°C pour un plancher chauffant).

Les besoins concernent la **saison hivernale**. **Décalage de phase** entre les périodes d'ensoleillement et de chauffage. Par conséquent, le couplage avec les installations d'ECS solaires n'est pas simple et il existe des quantités de configurations possibles. En règle générale, plus la température de chauffage est faible (planchers chauffants, radiateurs de grandes surfaces dans un habitat bien isolé), plus l'installation est viable. Dans tous les cas, il est utopique de chercher à couvrir 100 % des besoins. Les installations de chauffage solaire sont (peut-être) amenées à se développer avec les progrès de l'isolation des bâtiments.



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermique→ le froid solaire



<http://www.ines-solaire.com/solth/page104.html>.

Dans les machines à absorption, on remplace la compression mécanique par une compression thermique. La réfrigération thermique est beaucoup utilisée dans les pays où l'électricité est chère (Japon). Peu en France, donc...



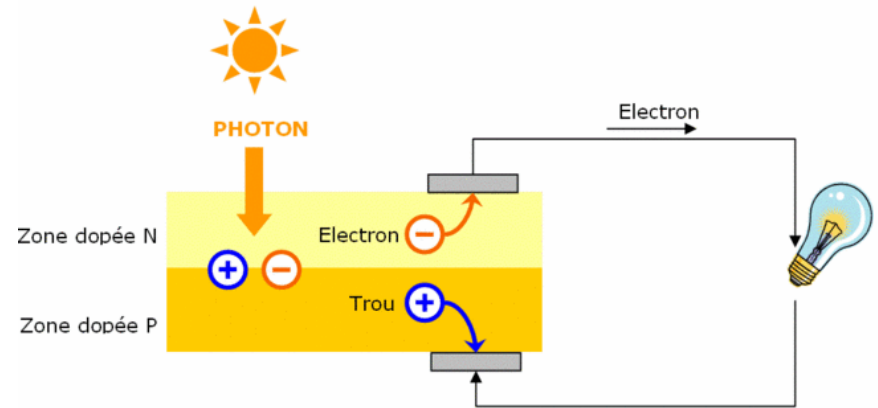
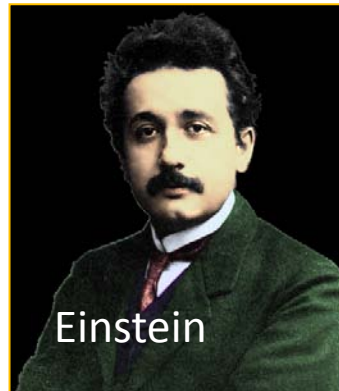
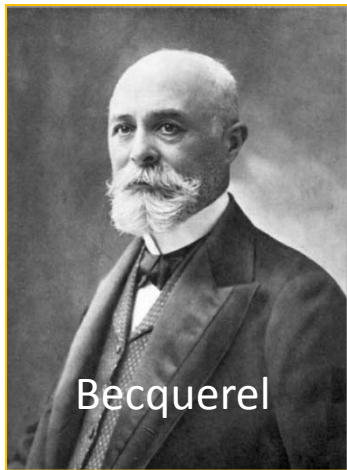
La machine à absorption et le ballon tampon dans le local technique au GICB à Banyuls

installation de 52 kW froid à Collioure-Banyuls

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → principe

L'effet photovoltaïque a été découvert par Becquerel en 1839 et expliqué par Einstein en 1912



Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile.

→ Conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique

http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=3p3v_Z9iG1U

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → technologies

Il existe de nombreux semi-conducteurs capables d'exploiter l'effet photovoltaïque. Ils diffèrent essentiellement par leur prix, leur rendement, leur sensibilité spectrale. Beaucoup de technologies sont encore en phase de recherche. Les premières photopiles mises au point furent au sélénium avec un rendement de 0,2%. Puis on a découvert les avantages du silicium et les rendements ont fortement progressés.



Silicium monocristallin

- Cher à fabriquer et coûteux en énergie
- Bon rendement à fort et moyen éclairement (à partir de 100W/m^2). Rendement typique : 12 à 16%.
- Plus sensible dans l'infrarouge.
- Couleur : bleu marine uniforme.
- Rendement record : 32%.



Silicium polycristallin ou multicristallin

- Moins cher, un peu moins performant
- Eclairements modérés (à partir de 200W/m^2). Rendement typique : 11 à 14%.
- Bon compromis entre prix et performance. Rendement record : 19%.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → technologies



Silicium amorphe (aSi)

- Peu cher
- Les rendements typiques assez faibles (5 à 7%)
- Plus sensible dans le visible et efficace même sous faible ensoleillement ($<200\text{W/m}^2$) ou si la cellule est partiellement ombragée.
- Applications de petite puissance et grandes surfaces. Couleur : noir uniforme/brun foncé.
- Rendement record : 13%.
- Dépôt en couche mince ($1\mu\text{m}$) & capteur souple

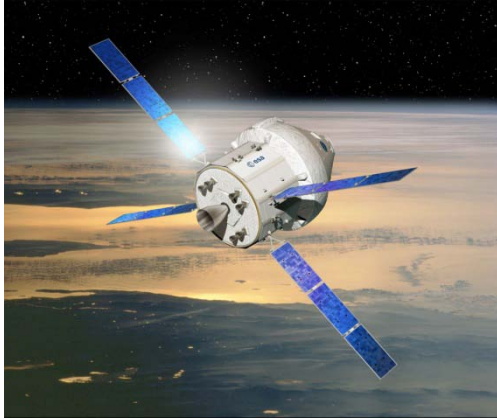


CuInSe_2 (CIS) (diséléniure de cuivre et d'indium + sulfure de cadmium)

- Technologie en couches minces utilisant peu de matière première.
- Moindre coût par rapport aux cellules au silicium cristallin, tout en ayant des rendements supérieurs aux cellules "amorphe". Rendement record : 18%

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → technologies



GaAs (arséniure de gallium)

- Très cher
- Principalement utilisé dans les applications spatiales et les concentrateurs.
- Très haut rendement : de 20 à 25%.
- Pas d'utilisation dans les bâtiments

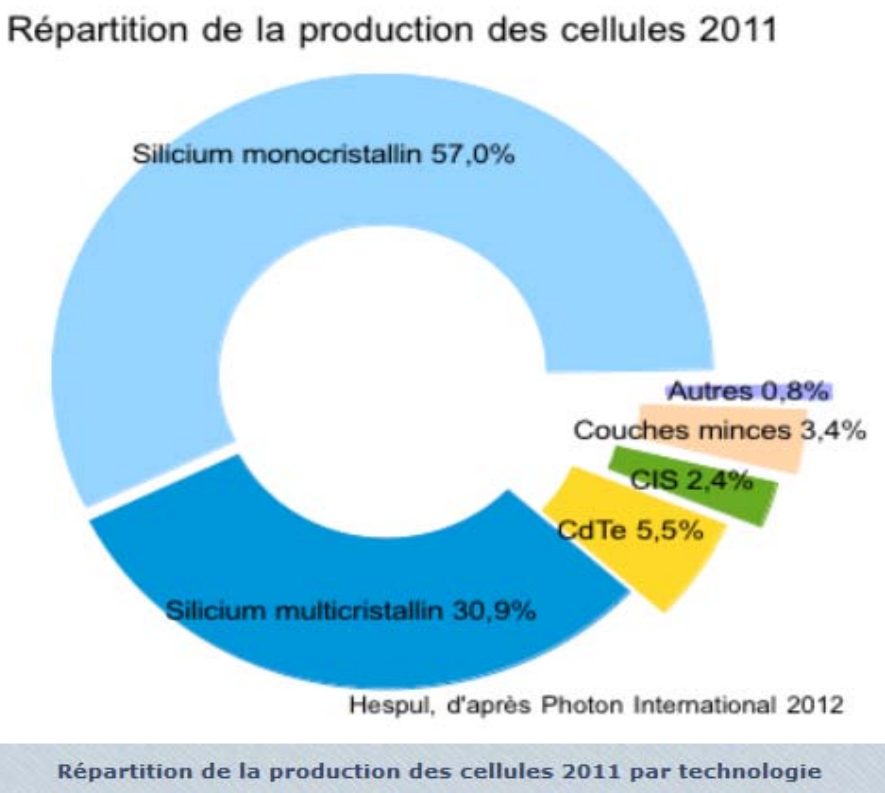


- Inspirées de la photosynthèse
- Cellules nano-cristallines à colorant
- Meilleurs rendements avec ce type de technologie se situent autour de 12%.
- Film poreux de nanoparticules de dioxyde de titane sur lequel sont chimisorbés des colorants,

TiO₂ ou cellules de Graetz

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → technologies

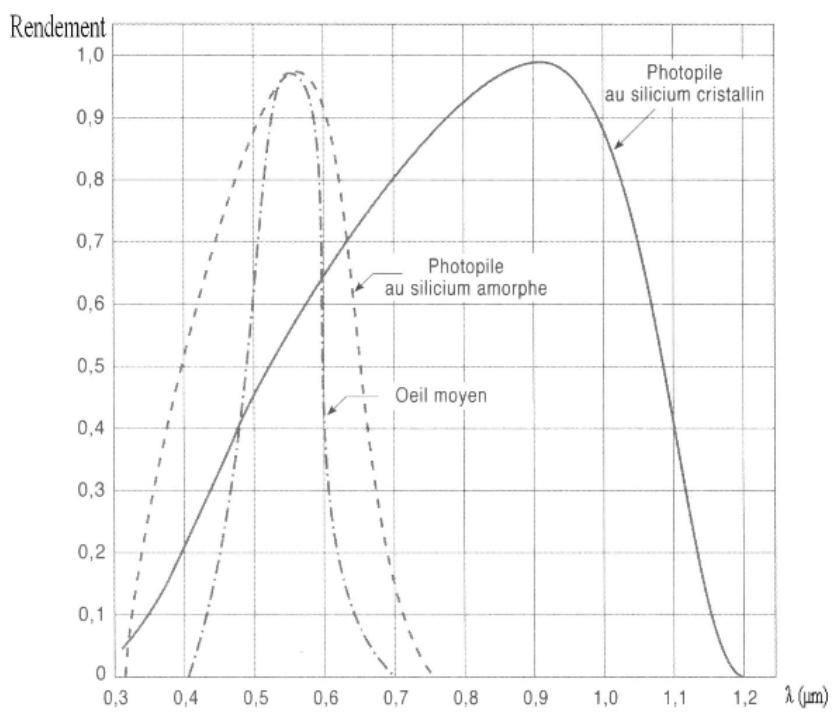


Le marché actuel est largement dominé par le Silicium monocristallin mais les progrès de R&D sont assez rapides dans ce domaine.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → la sensibilité spectrale

La **sensibilité** de la cellule ne couvre pas la totalité du spectre du rayonnement solaire. Il faut que l'onde électromagnétique ait une fréquence minimale et donc une énergie suffisante pour que les électrons puissent quitter la bande de valence. On remarque que les photopiles n'ont pas la même sensibilité spectrale que l'œil humain moyen. Certaines sont plus sensibles aux rayons infrarouges ($\lambda > 800\text{nm}$), d'autres, au rayonnement visible ($400\text{nm} < \lambda < 800\text{nm}$)

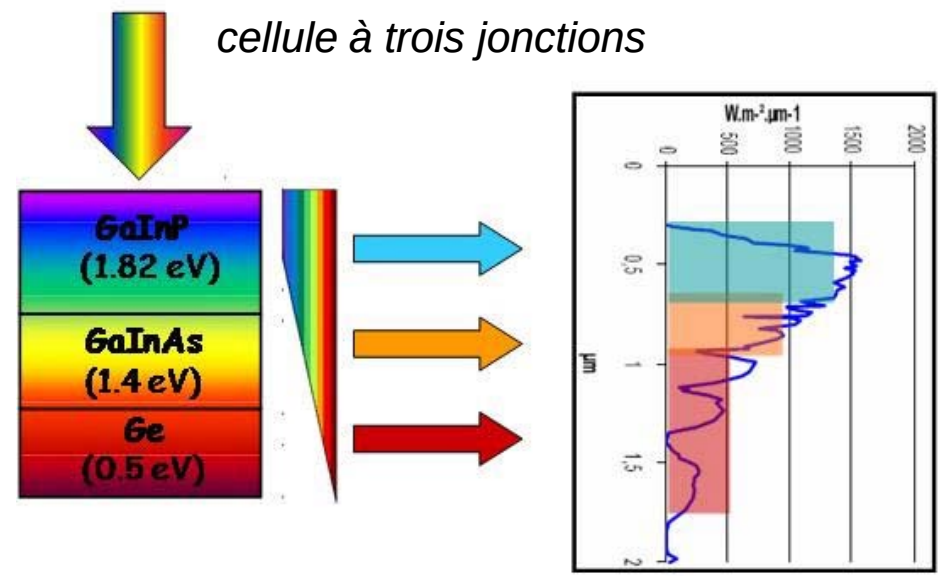


Sensibilité spectrale de différentes cellules photosensibles
Source : ETSF

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → la sensibilité spectrale

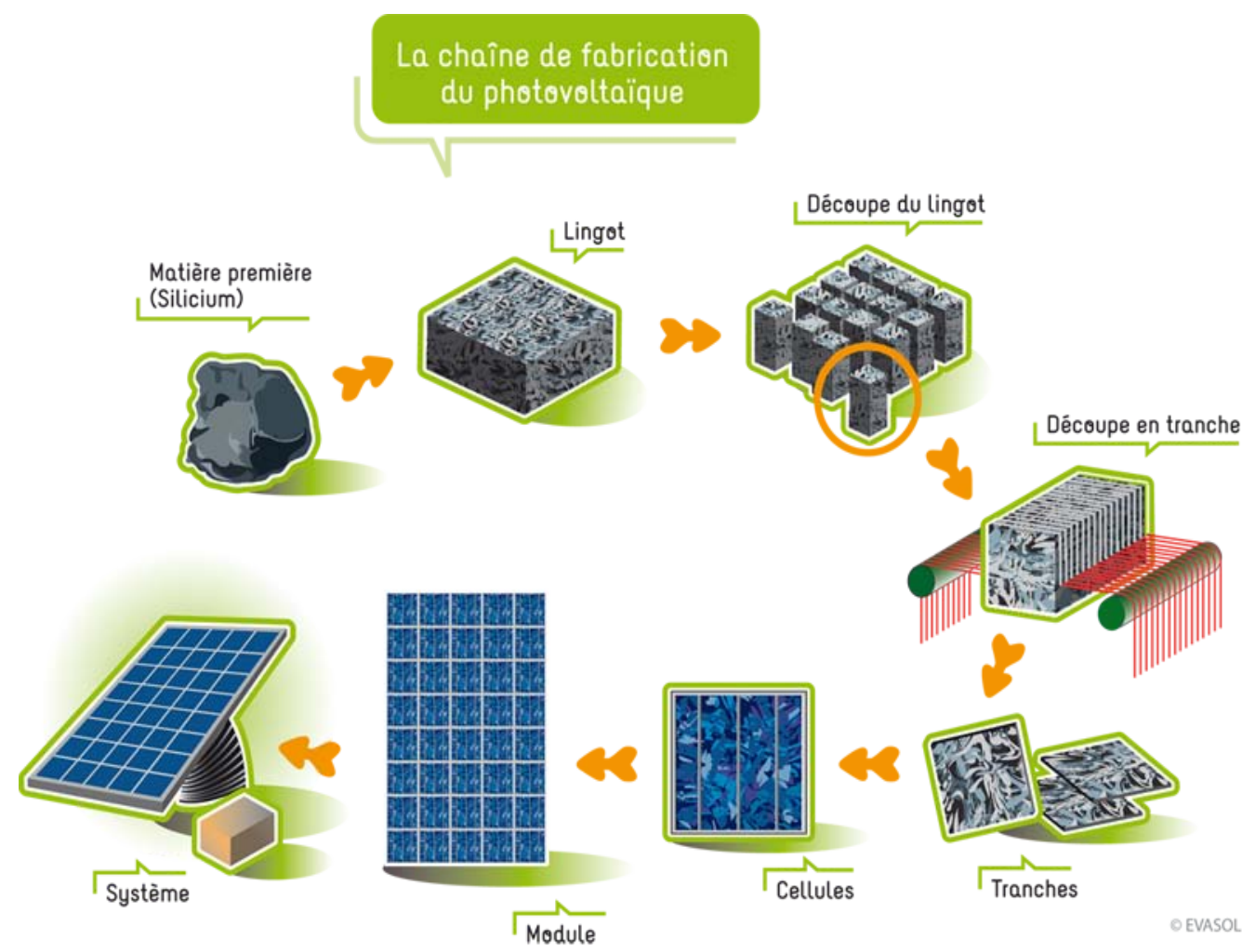
Au départ développées pour des applications spatiales, les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces déposées par épitaxie. Une cellule triple jonction, par exemple, est constituée des semi-conducteurs GaInAs, Ge et GaInP. Ces trois types de semi-conducteurs possèdent des sensibilités spectrales complémentaires. Les dispositifs à multijonctions GaAs sont les cellules les plus efficaces. Le coût de ces cellules est de l'ordre de 40 \$/cm².



Actuellement, le record de rendement de conversion est détenu par le CEA-Leti de Grenoble le Centre Helmholtz de Berlin et l'institut Fraunhofer avec **44.7 %**. Le rendement maximal théorique est de 87%. On peut imaginer dans le futur disposer de cellules dont le rendement serait supérieur à 50%.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → fabrication

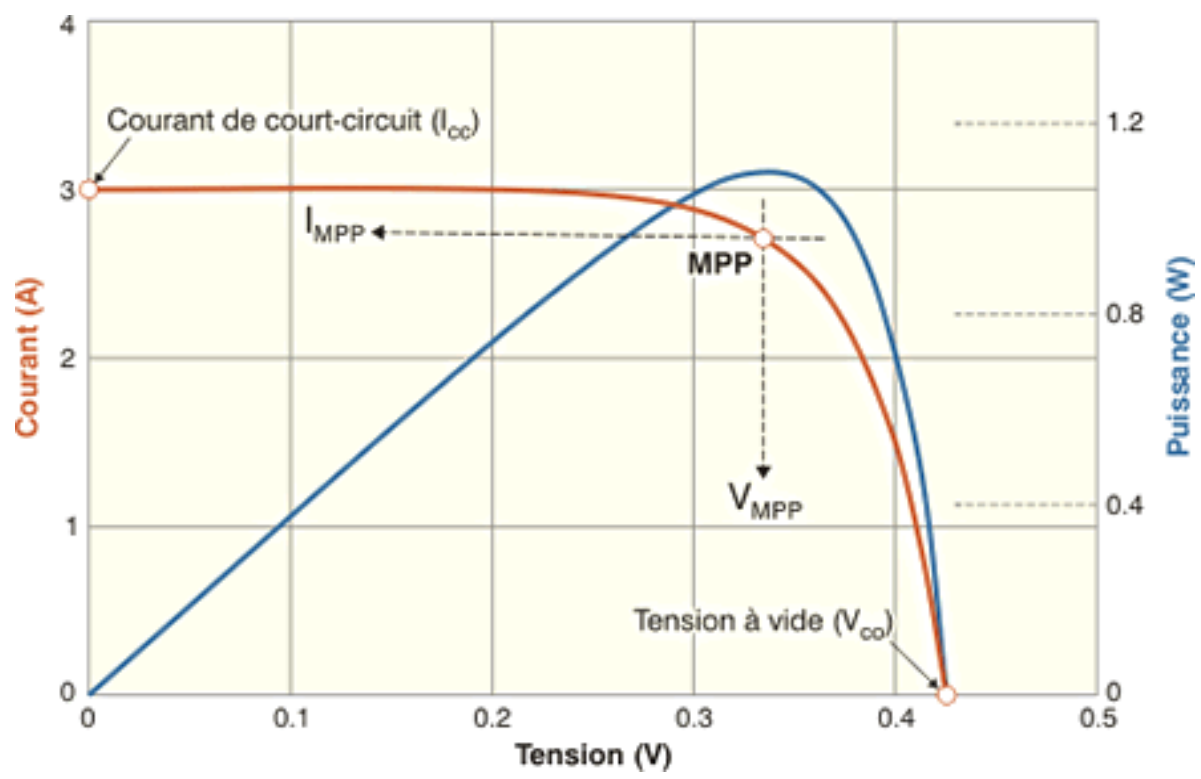


IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → caractéristique électrique d'une cellule

Sous un éclairement donné, une cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : V_{co} .
- Son courant court-circuit: I_{cc} .
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : *maximal power point*)

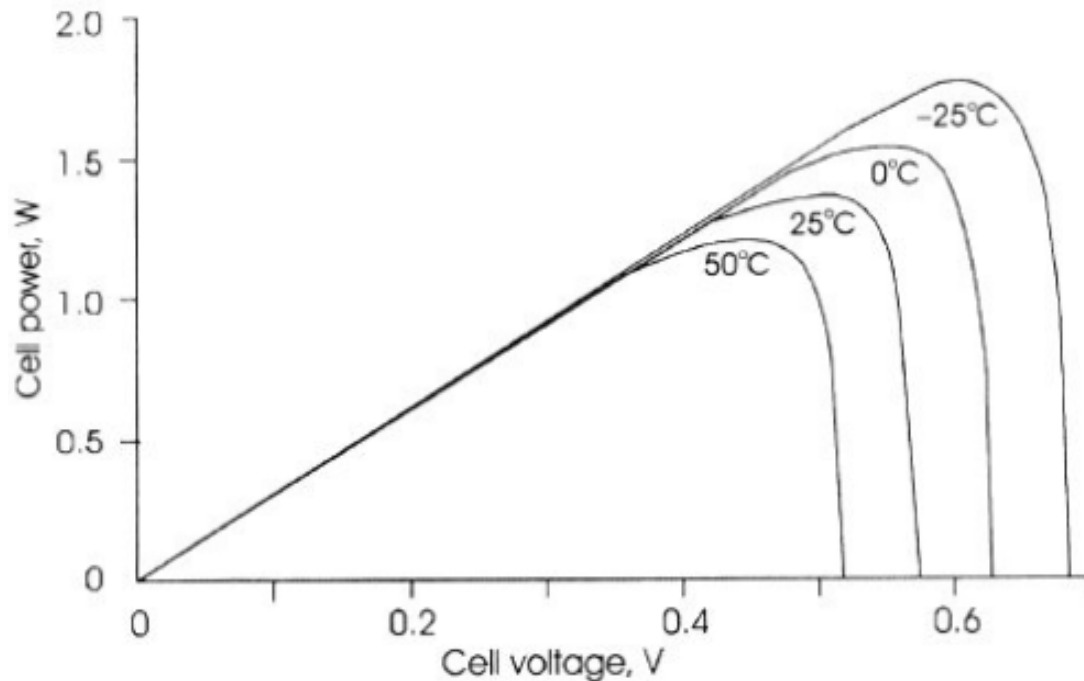


IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Influence de la température

Les cellules sont assez sensibles aux variations de température.

- La tension diminue de l'ordre de $-2\text{mV}.\text{°C}^{-1}$
- Le courant augmente faiblement : environ $+0,03\%.\text{°C}^{-1}$
- La puissance diminue : environ $-0,4\%.\text{°C}^{-1}$

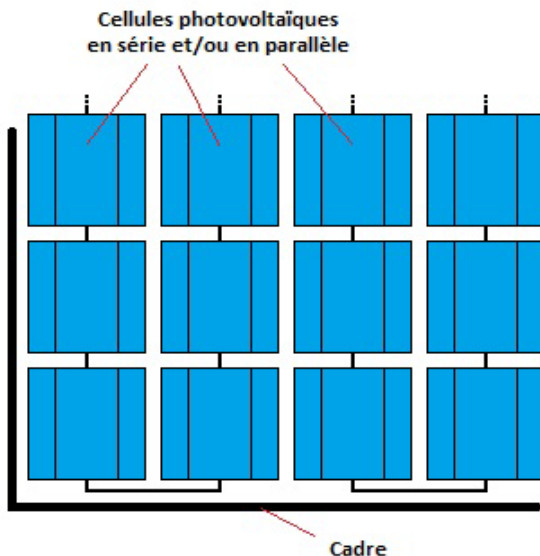
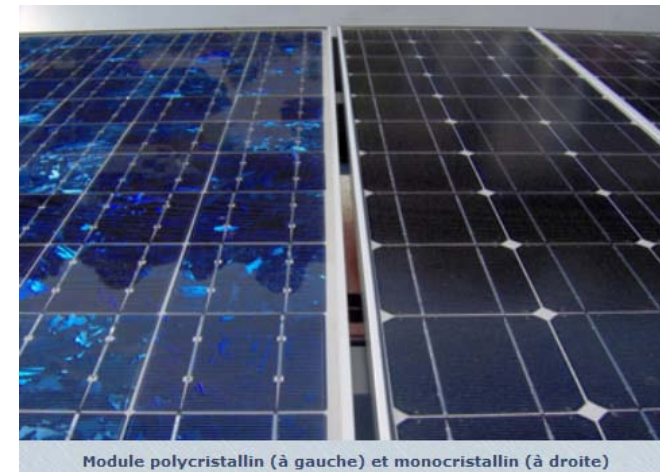
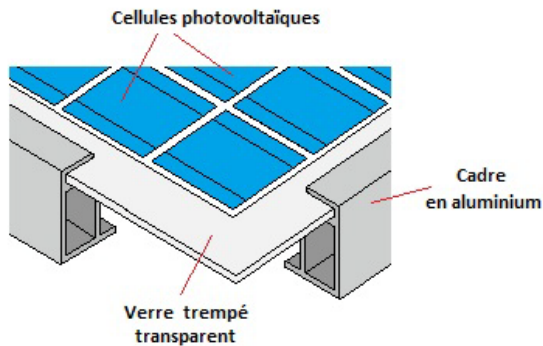


→ Important de permettre le refroidissement des panneaux par les deux cotés et donc de laisser l'air circuler sur la face arrière.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le module PV

Le module est constitué de cellules photovoltaïques connectées en série ou/et en parallèle et encapsulée entre une paroi de verre trempé et de la résine. Un cadre en aluminium vient rigidifier le tout et permet la fixation du module.



→ Puissance crête du module = somme des puissances crête des cellules.

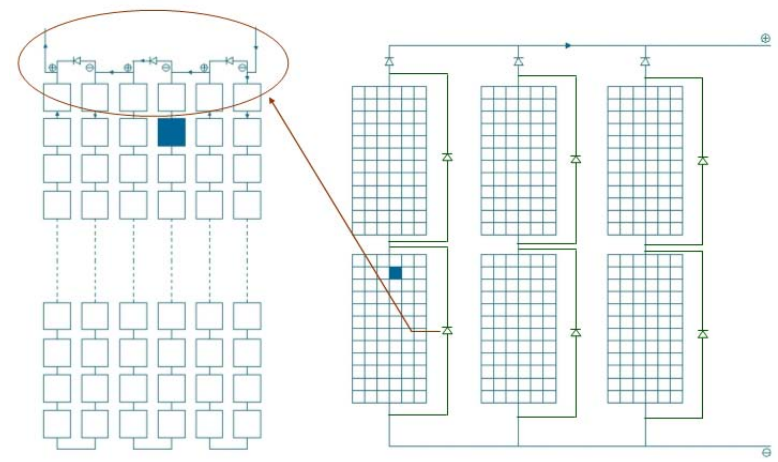
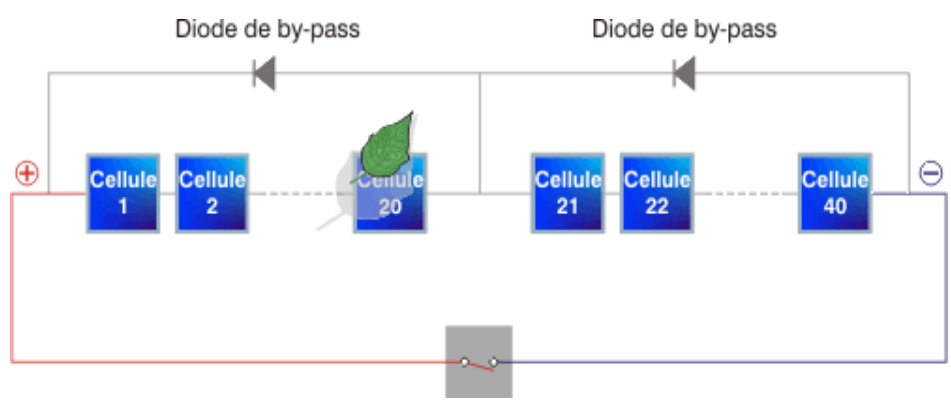
→ Tension en circuit ouvert du module = somme des tensions en circuit ouvert des cellules connectées en série.

→ Courant de court circuit du module = somme des courants de court-circuit des cellules connectées en parallèles.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le module PV

Lorsque des cellules (ou des panneaux) sont connectés en série, il est nécessaire de câbler des diodes en parallèle de ces cellules (ou panneau) pour éviter dans le cas d'un ombrage localisé par exemple, qu'une cellule (un panneau) ne fonctionne en récepteur, ce qui aurait pour effet de faire chauffer les jonctions et de dégrader les cellules.



IV. Les énergies renouvelables

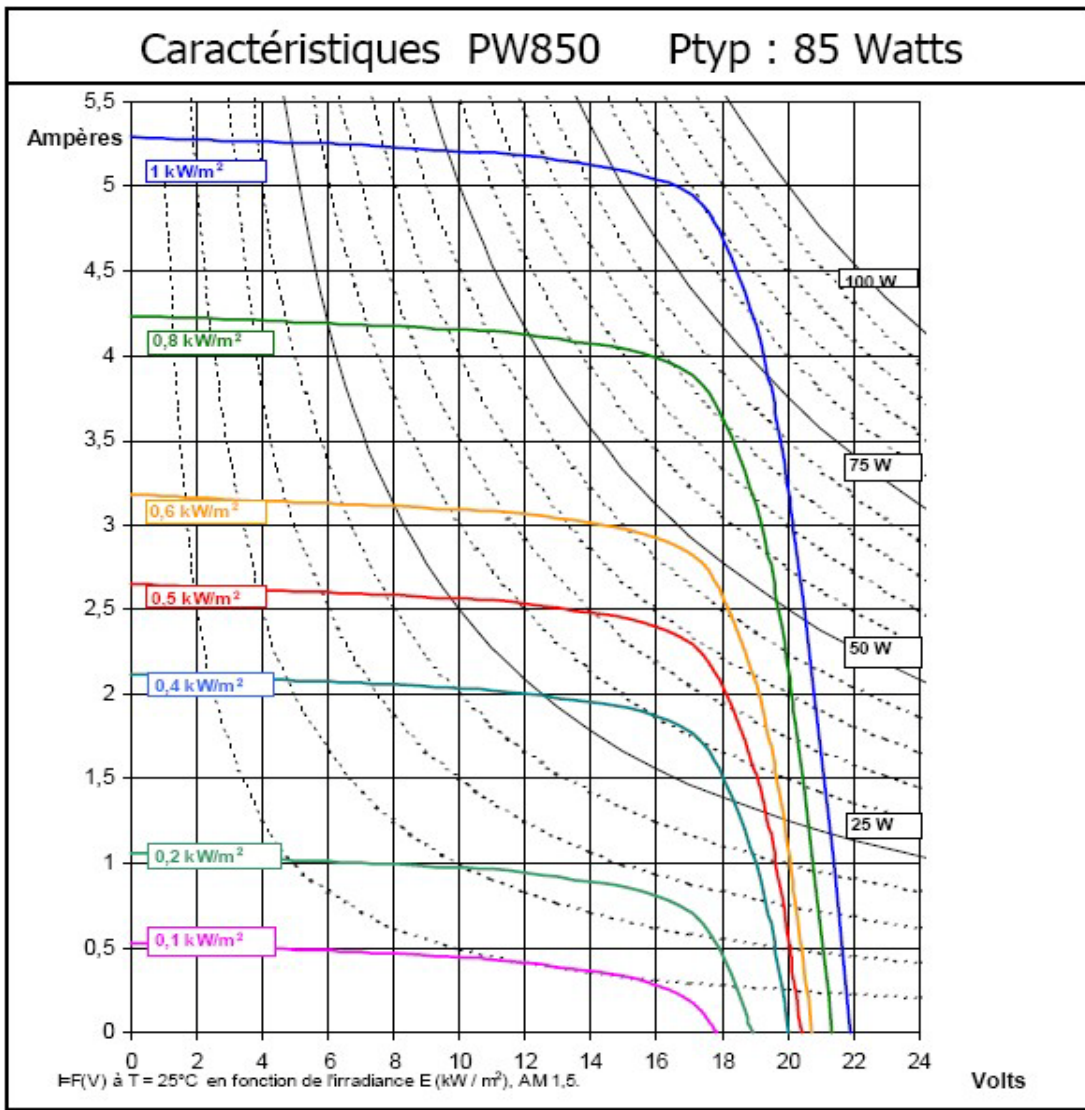
3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le module PV



Risque d'incendie en cas de dysfonctionnement

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le module PV

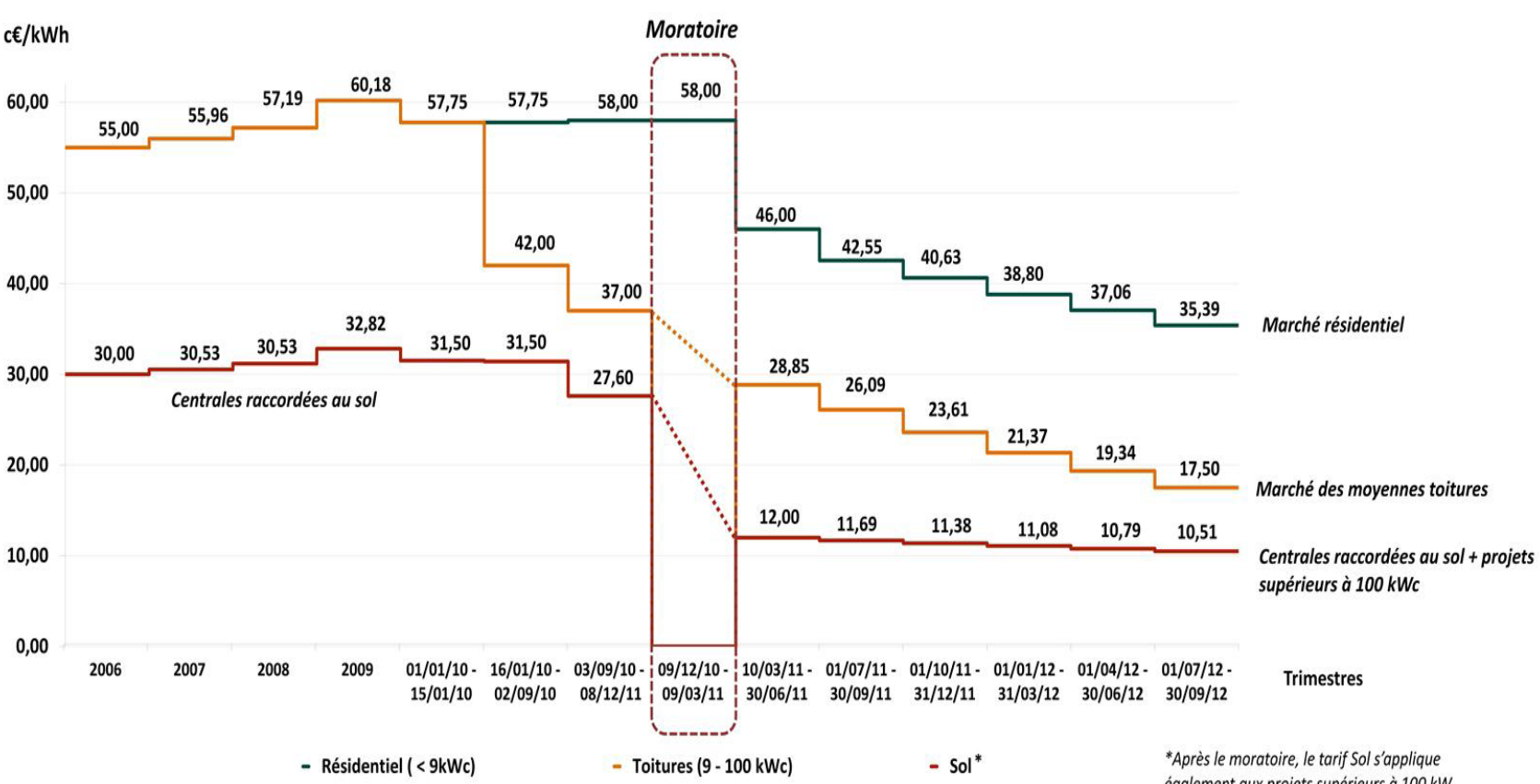


Exemple de caractéristique d'un module

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le système de production

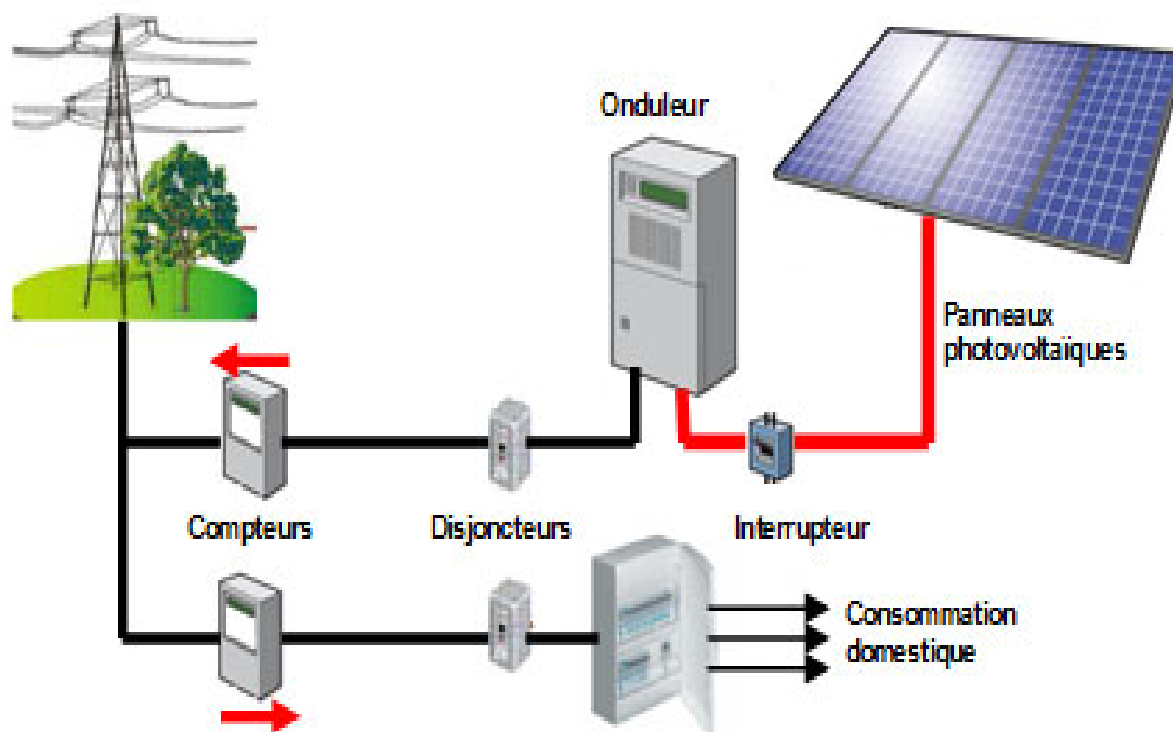
Comme EDF a le monopole de la production d'électricité, l'entreprise est dans l'obligation de racheter l'énergie produite par les particuliers. Le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque dépend de la puissance installée, mais est avantageux de façon à encourager le développement de la filière.



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le système de production

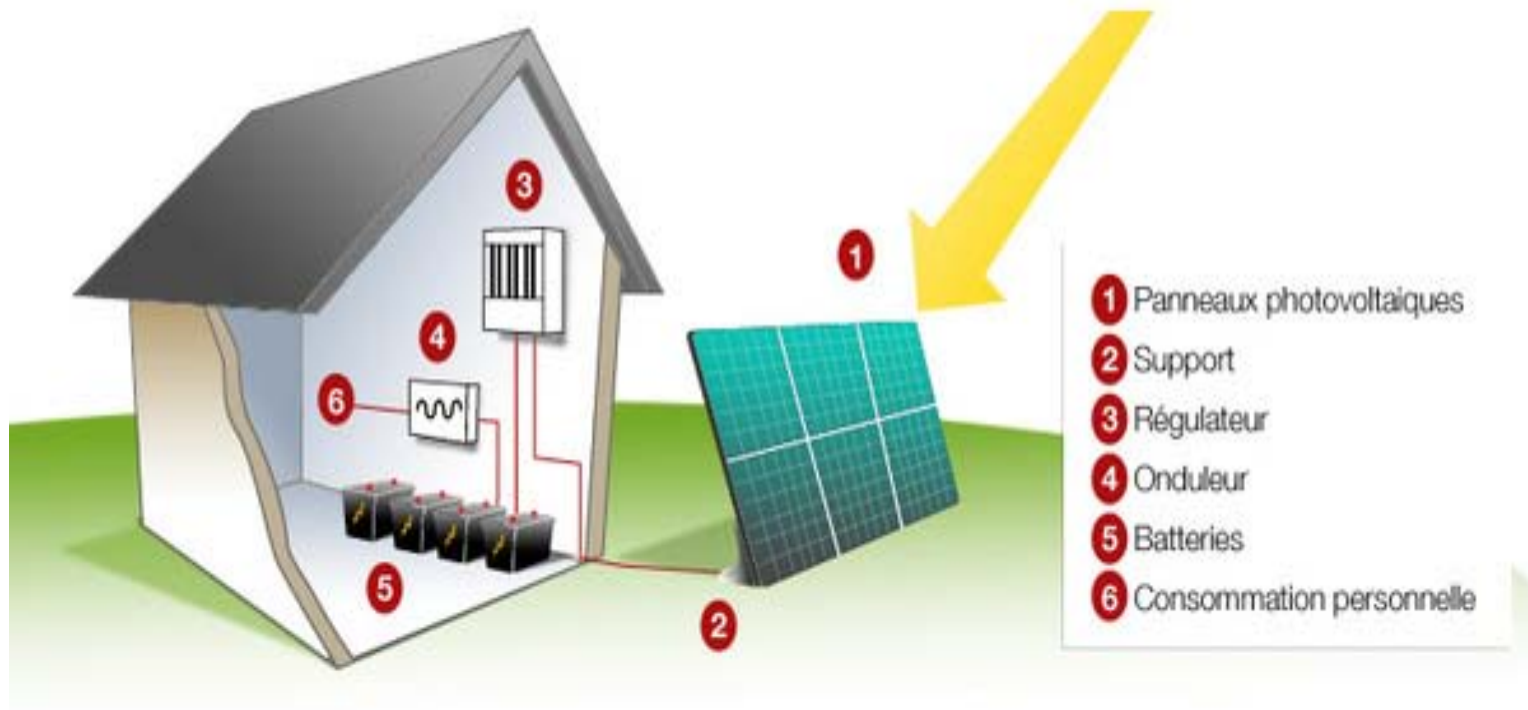
Il est donc plus avantageux de revendre l'énergie produite à EDF que de la consommer. Ainsi l'architecture des systèmes raccordables au réseau est la suivante :



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → Le système de production

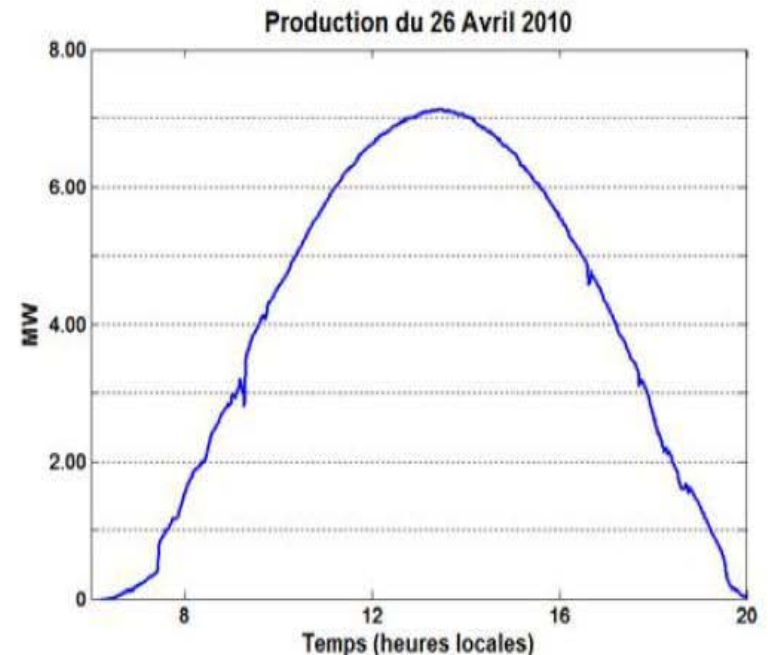
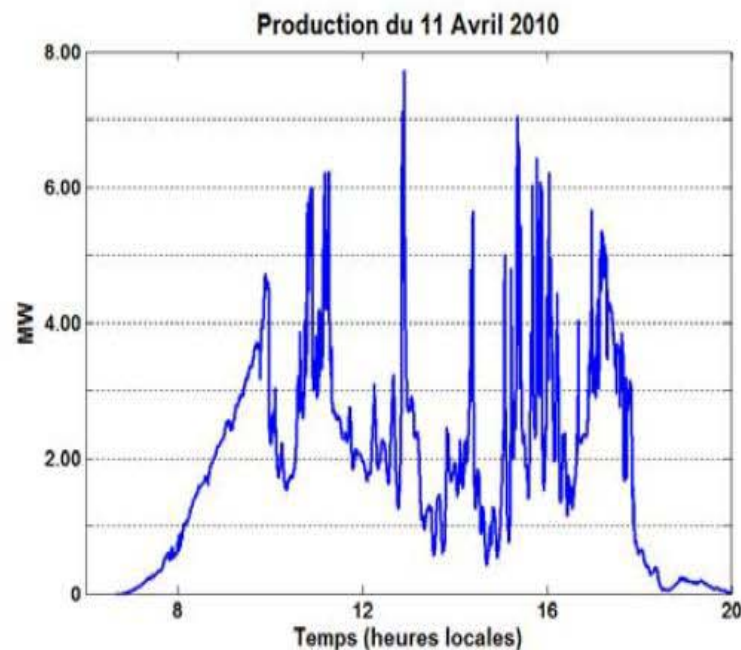
Dans le cas des sites isolés, pour assurer la continuité de la consommation, il est nécessaire de stocker l'énergie électrique, ce qui augmente fortement le coût du système



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production en France

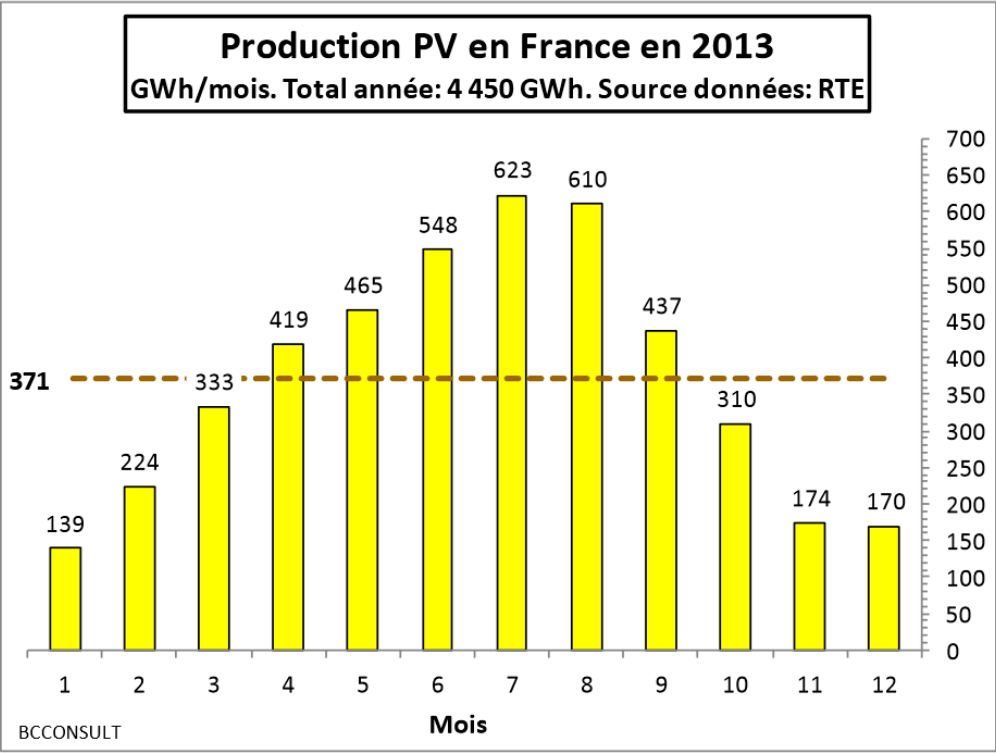
L'énergie solaire est intermittente à l'échelle de la journée du fait de la position du soleil ou de la météo et à l'échelle de l'année



Production par la centrale Myrte en Corse, à deux dates différentes du mois d'avril 2010.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production en France

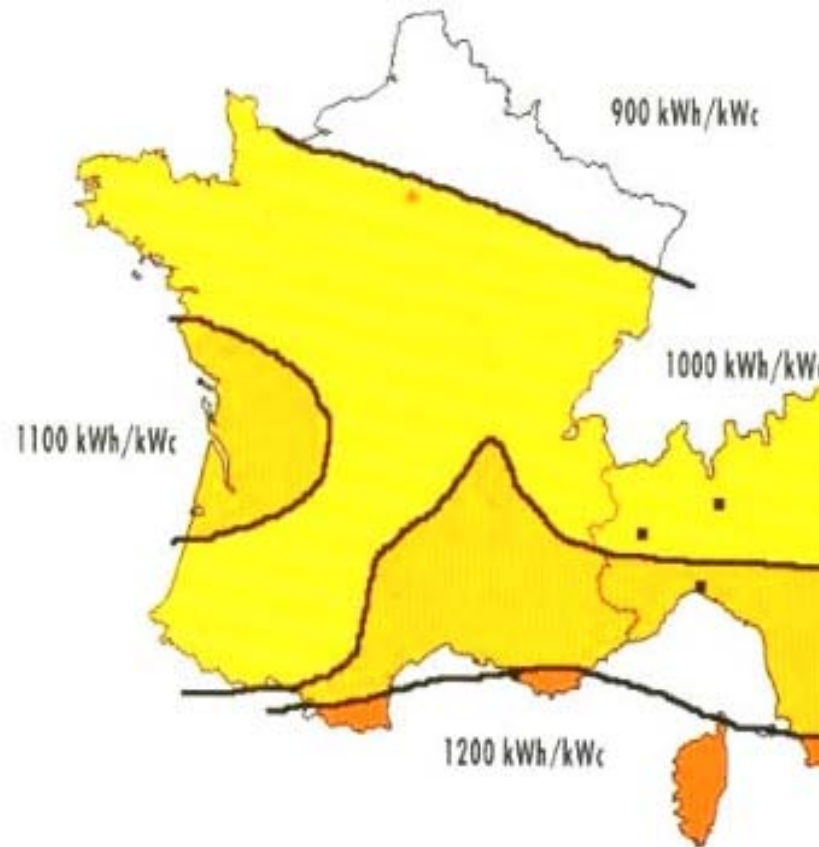


*Production photovoltaïque totale en France en 2013 : la puissance du parc PV installé en France continentale et Corse est passée de 3 405 MW en fin décembre 2012 à une estimation d'environ **4 276 MW** en fin décembre 2013, soit une estimation de croissance annuelle d'environ 870 MW ou + 25 % sur un an.*

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production en France

La production dépend bien entendu de la région considérée

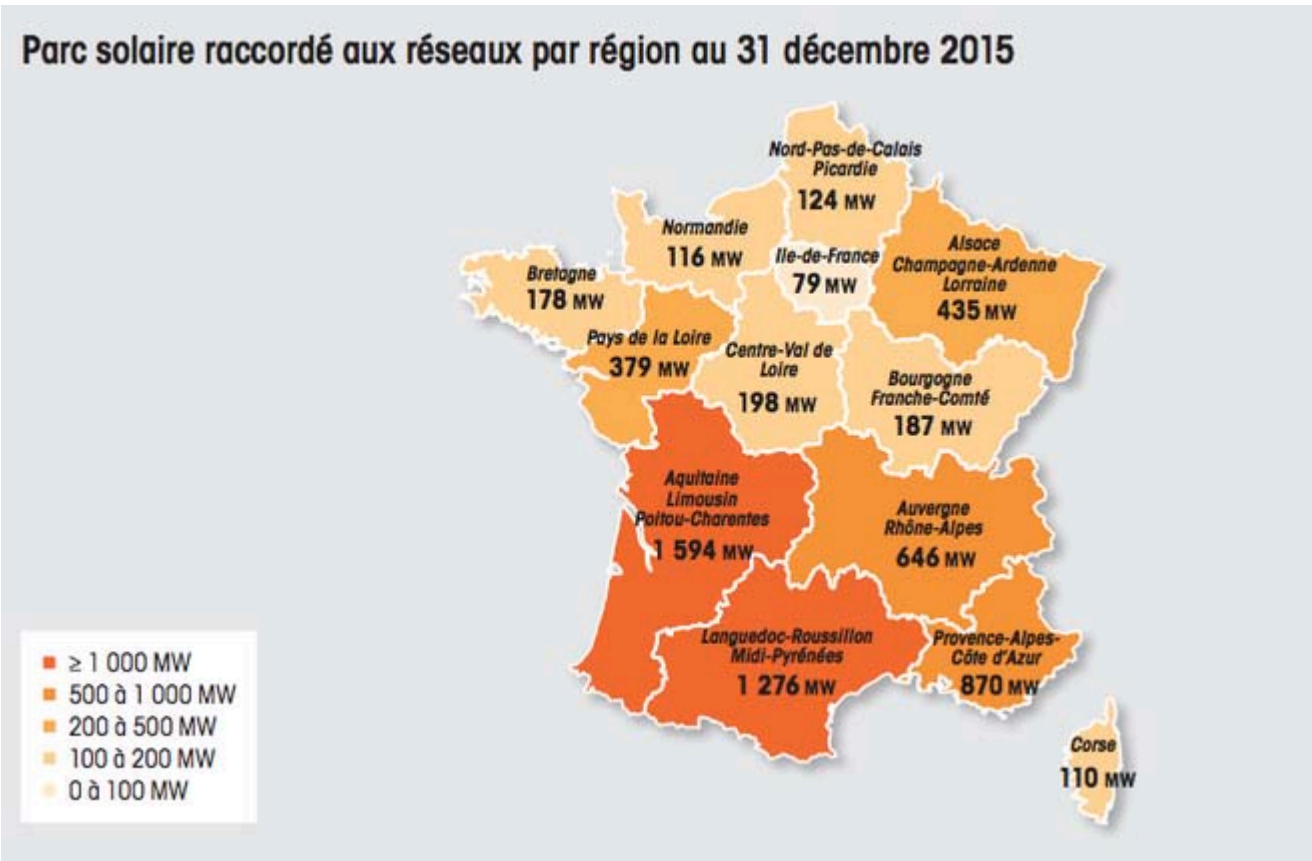


Estimation de la production annuelle de 1kWc en France métropolitaine

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production en France

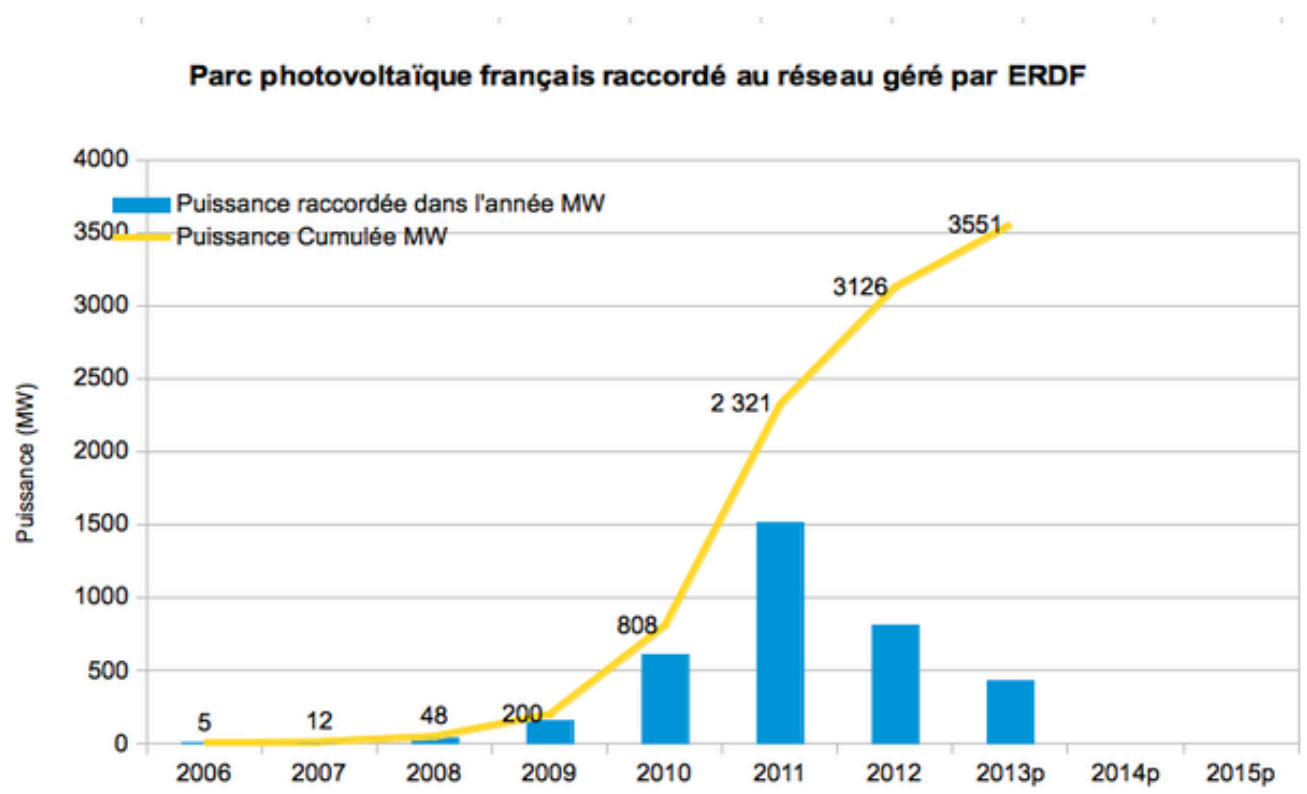
On trouve ainsi une puissance installée plus importante au sud du pays. Paradoxalement, dans l'est, nous sommes bien pourvus ... proximité de l'Allemagne ?



IV. Les énergies renouvelables

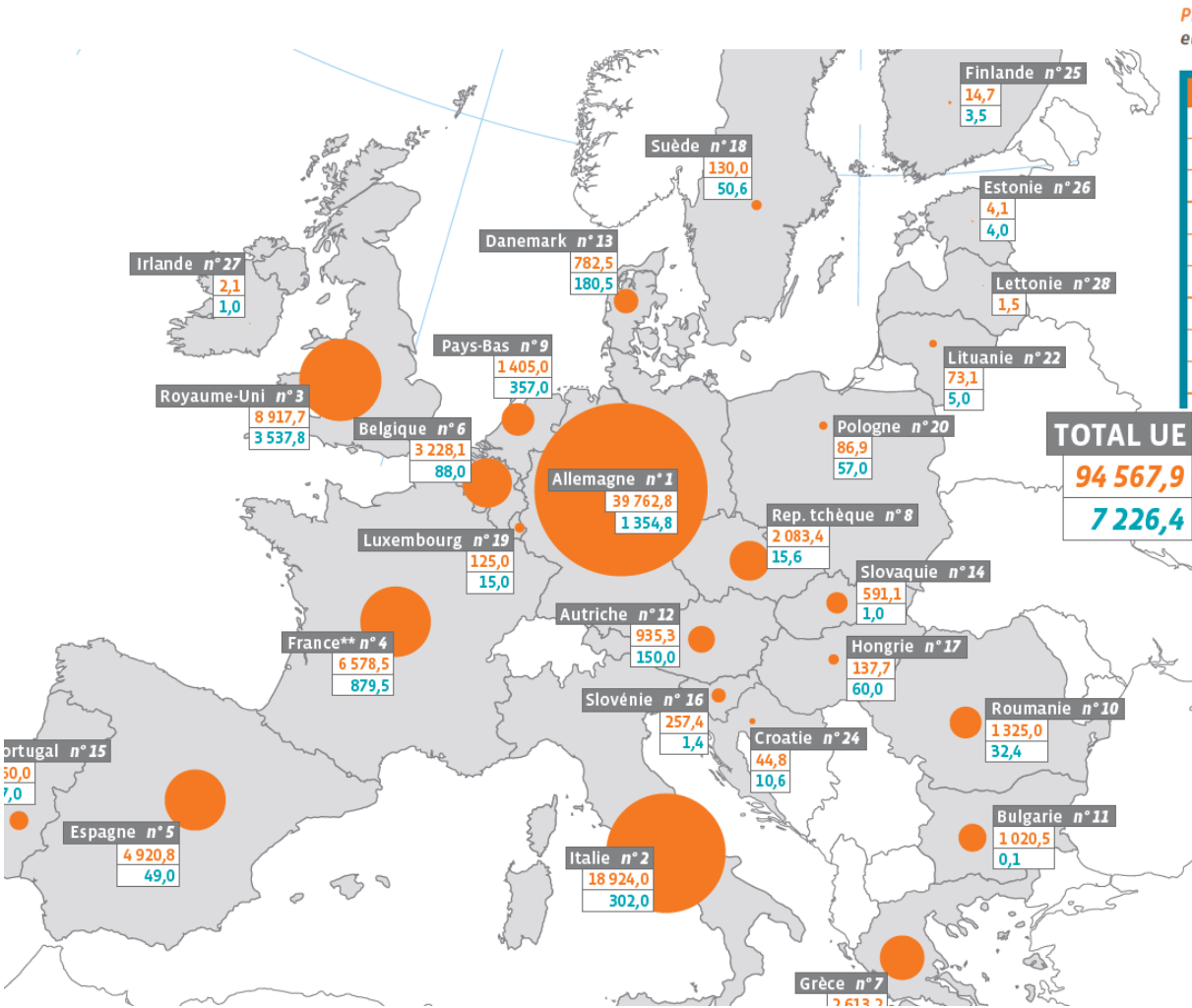
3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production en France

Cependant la croissance du parc PV est en recul du fait du moratoire de 2011 (baisse du prix de rachat).



IV. Les énergies renouvelables

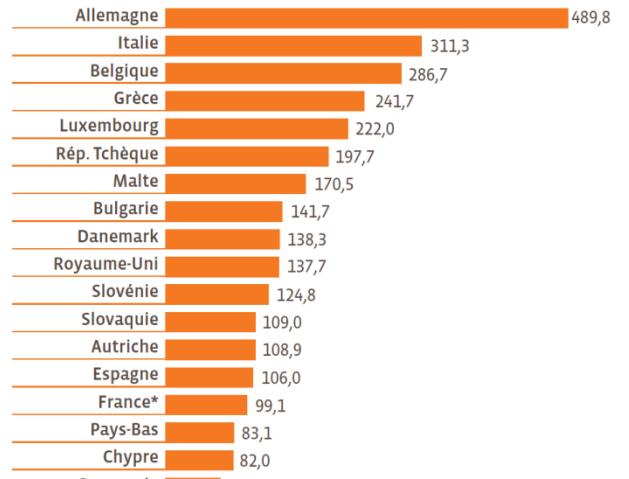
3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production en europe



Production d'électricité d'origine photovoltaïque dans les pays de l'Union européenne en 2014 et 2015* (en TWh)

	2014	2015*
Allemagne	36,056	38,432
Italie	22,306	22,847
Espagne	8,218	8,264
Royaume-Uni	4,050	7,556
France**	5,905	6,700
Grèce	3,792	3,818
Belgique	2,883	2,865
République Tchèque	2,123	2,261
Roumanie	1,295	1,328

Puissance photovoltaïque par habitant des différents pays de l'Union européenne en 2015 (Wc/hab)



Légende

94 567,9

Puissance photovoltaïque cumulée dans les pays de l'Union européenne fin 2015* (en MWh)

7 226,4

Puissance photovoltaïque connectée dans les pays de l'Union européenne durant l'année 2015* (en MWh)

IV. Les énergies renouvelables

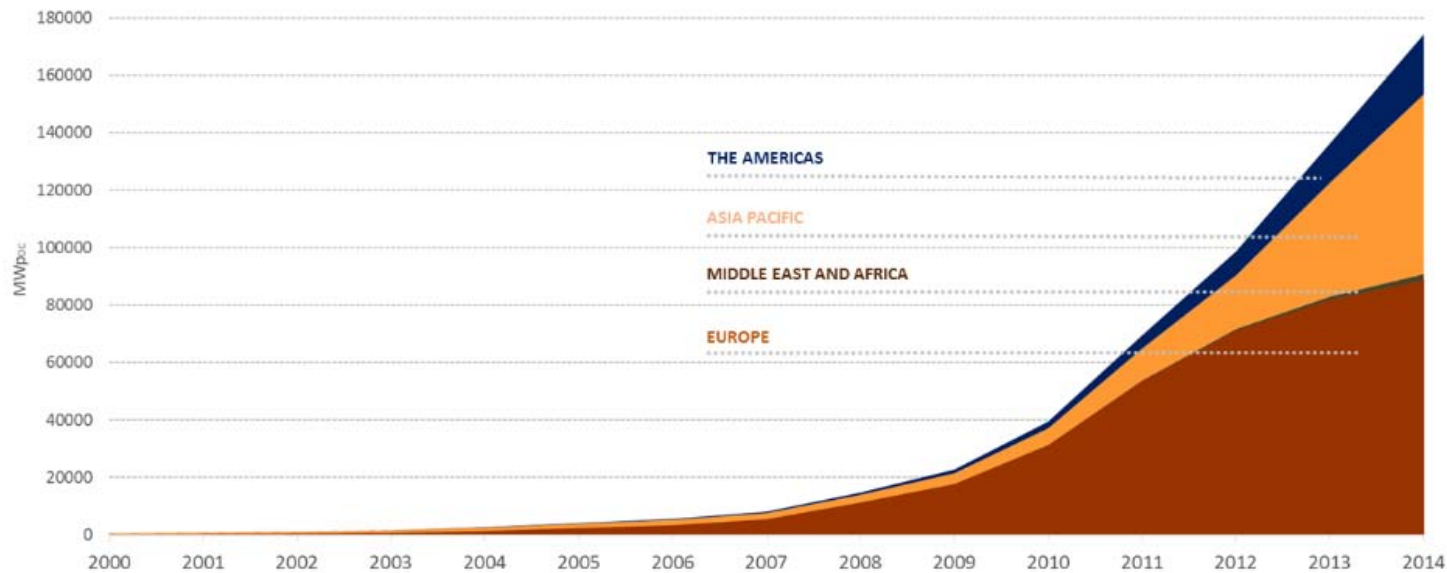
3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production dans le monde

TABLE 1: TOP 10 COUNTRIES FOR INSTALLATIONS AND TOTAL INSTALLED CAPACITY IN 2014

TOP 10 COUNTRIES IN 2014 FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY				TOP 10 COUNTRIES IN 2014 FOR CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY			
1 st		China	10,6 GW		Germany	38,2 GW	
2 nd		Japan	9,7 GW		China	28,1 GW	
3 rd		USA	6,2 GW		Japan	23,3 GW	
4 th		UK	2,3 GW		Italy	18,5 GW	
5 th		Germany	1,9 GW		USA	18,3 GW	
6 th		France	0,9 GW		France	5,7 GW	
7 th		Australia	0,9 GW		Spain	5,4 GW	
8 th		Korea	0,9 GW		UK	5,1 GW	
9 th		South Africa	0,8 GW		Australia	4,1 GW	
10 th		India	0,6 GW		Belgium	3,1 GW	

NUMBERS HAVE BEEN ROUNDED

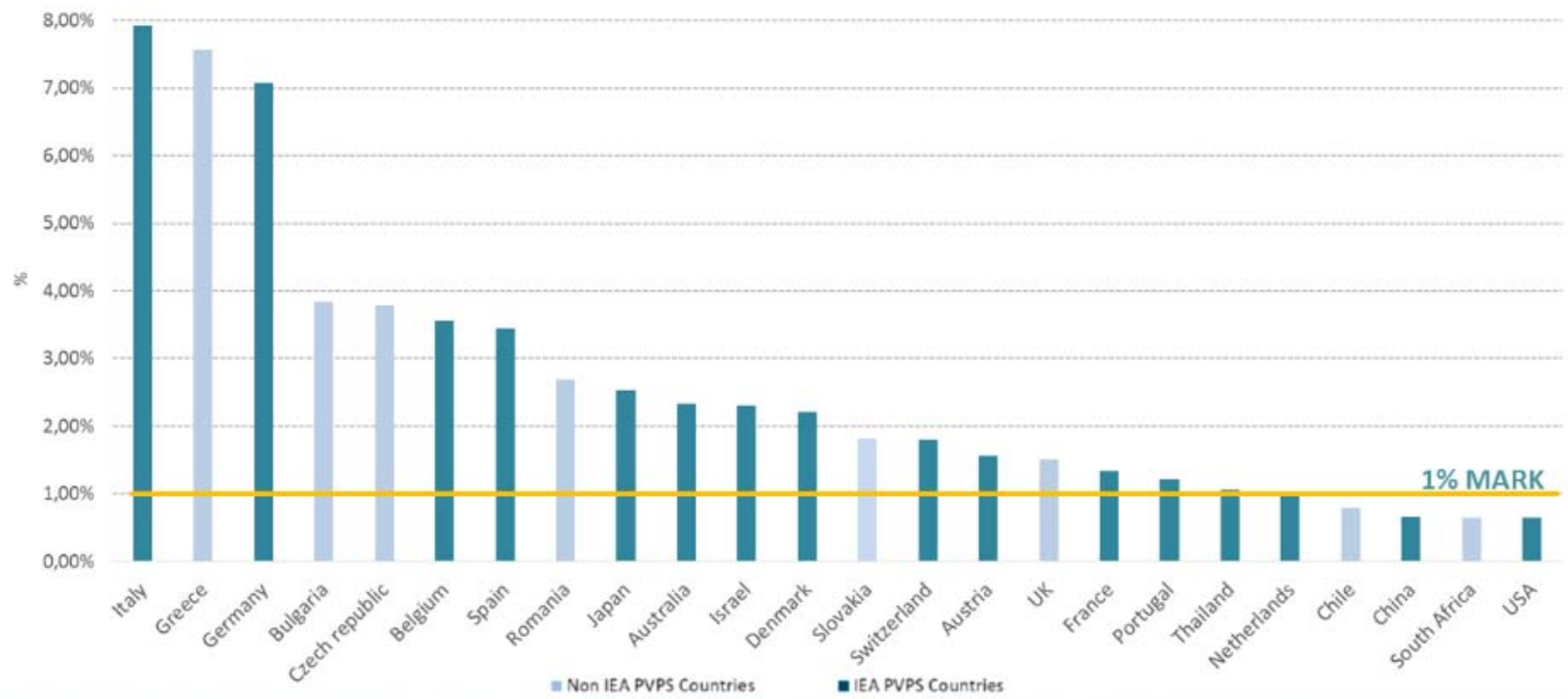
Source: IEA PVPS



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → La production dans le monde

FIGURE 4: 2014 THEORETICAL PV PRODUCTION

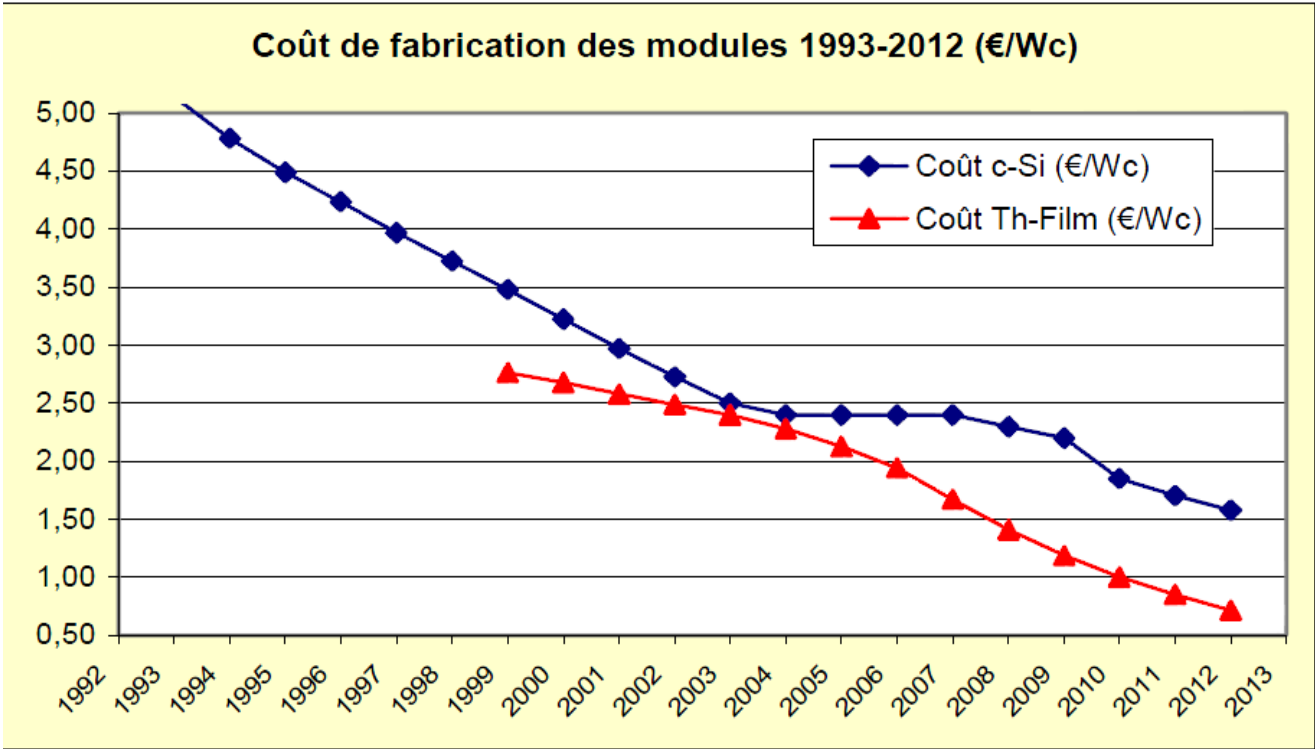


Source: IEA PVPS

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → coût de fabrication

Le cout de fabrication des modules et des systèmes continue de baisser du fait des volumes importants. Cependant, la technologie à base de silicium atteint ses limites et seule une rupture technologique permettrait de faire baisser encore les couts (technologie organique, à couche mince ?)



IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire photovoltaïque → coût de fabrication

On peut trouver des modules dont le prix de vente est inférieur au prix de fabrication parceque les chinois pratique le dumping économique pour gagner le monopole.

Autres objets en rapport avec « module photovoltaïque chine »



Panneau Solaire Photovoltaïque
130W Module De Cellule Solaire
Lieu : Allemagne

136,99 EUR
Achat immédiat
+19,99 EUR de
frais de
livraison

Le Conseil européen a soutenu les propositions de la commission européenne qui visent à imposer définitivement des mesures anti-dumping et anti-subsventions sur les importations de panneaux solaires en provenance de Chine.

Fabricants de modules – prévisions vs production en 2012, et production 2011

Fabricant	Pays de fabrication	Type de Cellule	2011 Production (MWc)	2012 (MWc)	
				Prevision *	Production
Yingli	Chine	Mono Multi	1604	2450	2297
First Solar	Malaisie USA	CM CdTe	1981	2520	1875
Suntech Power	Chine autres	Mono Multi CM	2220	2746	1750
JA Solar	Chine	Mono Multi	1690	3000	1700
Trina Solar	Chine	Mono	1550	2400	1590
Canadian Solar	Canada Chine	Mono Multi	1010	2000	1543
Sunpower	USA, Philip.	Mono Multi	922	1200	936

Mono : mono-cristalline
Multi : multi-cristalline
CM : couche mince
(*) : prévisions annoncés en 2011 sur la production 2012
Source : EurObserv'ER

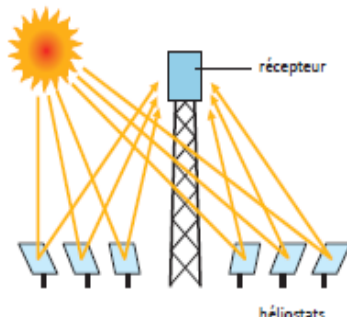
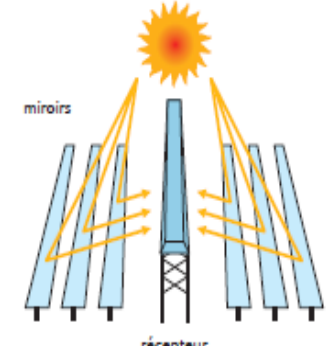
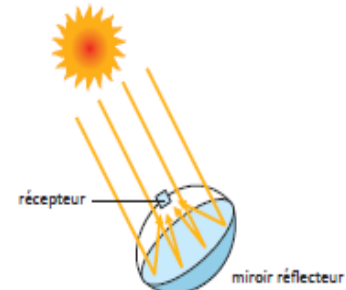
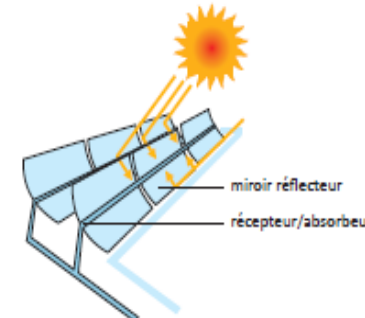
→ Taxe de 47,6% si le prix de vente est inférieur à 56ct€/Wc.

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermodynamique à concentration

Une centrale solaire thermodynamique à concentration (en anglais CSP pour *Concentrating Solar Power Plant*) est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général de produire de l'électricité

On distingue les centrales des types suivants :

	Concentration ponctuelle	Concentration linéaire
Fixes	Centrales à tour 	Collecteurs Fresnel linéaires 
Mobiles	Collecteurs paraboliques 	Collecteurs cylindro-paraboliques 

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermodynamique à concentration → à tour

Les miroirs concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur situé en haut d'une tour où un liquide caloporteur est porté à haute température. Ce liquide caloporteur envoyé dans une chaudière transforme de l'eau en vapeur. La vapeur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.



Solar Power Facility at sunrise, with tower. Heliostats installation is nearly completed.

Located in the Mojave Desert 40 miles south of Las Vegas, the Ivanpah Solar Electric Generating System project, currently under construction, will generate 392 megawatts gross, enough to power approximately 173,500 homes. The project will deploy 173,500 heliostat mirrors spread over 3,500 acres, focusing solar energy on boilers located atop three 492-foot-tall towers, generating steam to turn a conventional turbine. The project is owned by NRG Solar, Google and Bechtel and is currently the largest solar thermal plant under construction in the world. The project is being constructed by Bechtel. (Mingasson/Getty Images for Bechtel).

Ivanpah (californie) : plus grande centrale à tour du monde – 392MW – 173 000 heliostats de 14m² – 2.2 G\$ → **5500 \$/kW**. Irradiance : 7.4 kWh/m²jour. Rendement du captage thermique : 55%. Rendement de la turbine à vapeur : 27% → **1TWh/an**

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermodynamique à concentration** → **collecteur parabolique**

Un miroir parabolique concentre les rayons solaires pour chauffer soit un fluide caloporteur, soit directement la partie chaude d'un moteur type « Stirling ». La technologie CSP-Stirling est connue pour avoir la plus grande efficacité de toutes les technologies solaires soit 30% par rapport au 15% l'énergie solaire photovoltaïque



centrale solaire parabolique type DISH-STIRLING

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermodynamique à concentration** → **concentrateur cylindro-parabolique**



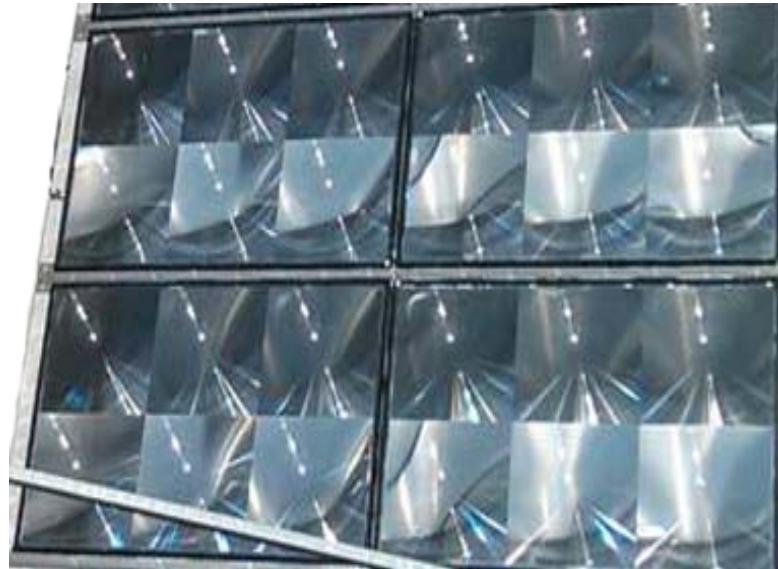
http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=dy6K4FZuNPA

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : **le solaire thermodynamique à concentration** → miroir de Fresnel



lentille de Fresnel

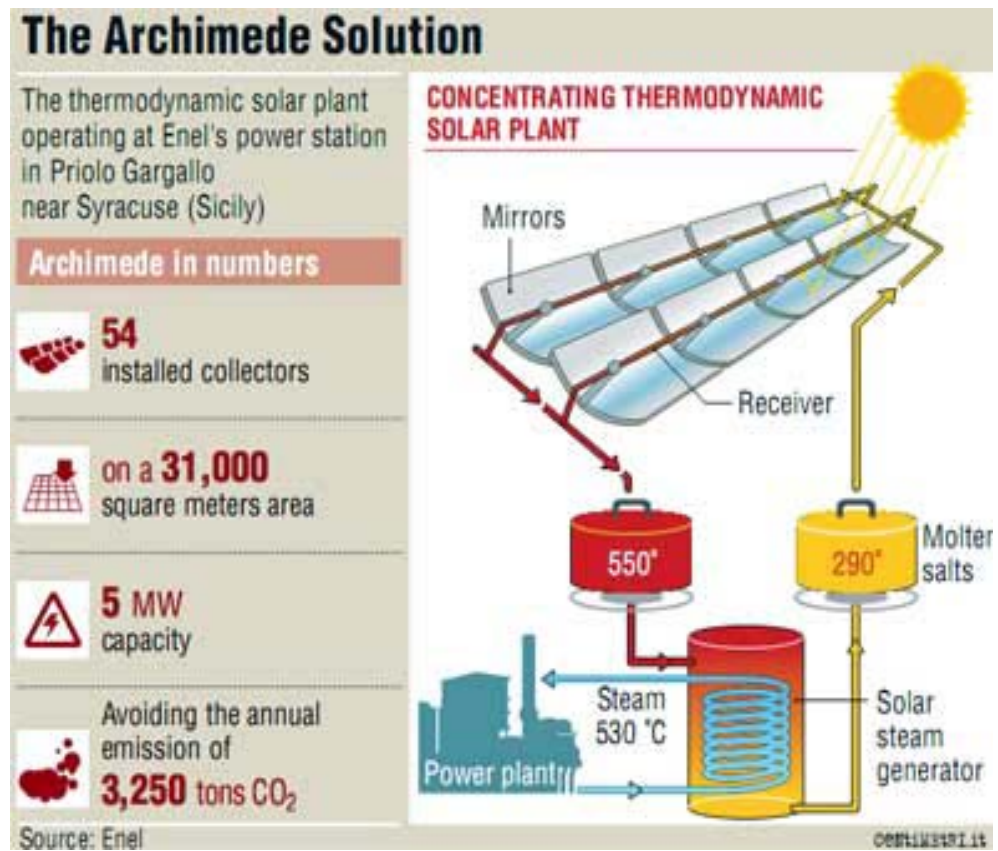


capteur heliotrop (photovoltaïque à concentration)

IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermodynamique à concentration → stockage

Un atout majeur de certaines technologies solaires thermodynamiques est leur capacité de stockage qui permet aux centrales de fonctionner en continu. Lorsque l'ensoleillement est supérieur aux capacités de la turbine, la chaleur en surplus est dirigée vers un stockage thermique, qui se remplit au cours de la journée. La chaleur emmagasinée permet de continuer à produire en cas de passage nuageux ainsi qu'à la tombée de la nuit. Plusieurs procédés de stockage peuvent être utilisés: sel fondu, béton, matériaux à changement de phase, etc.

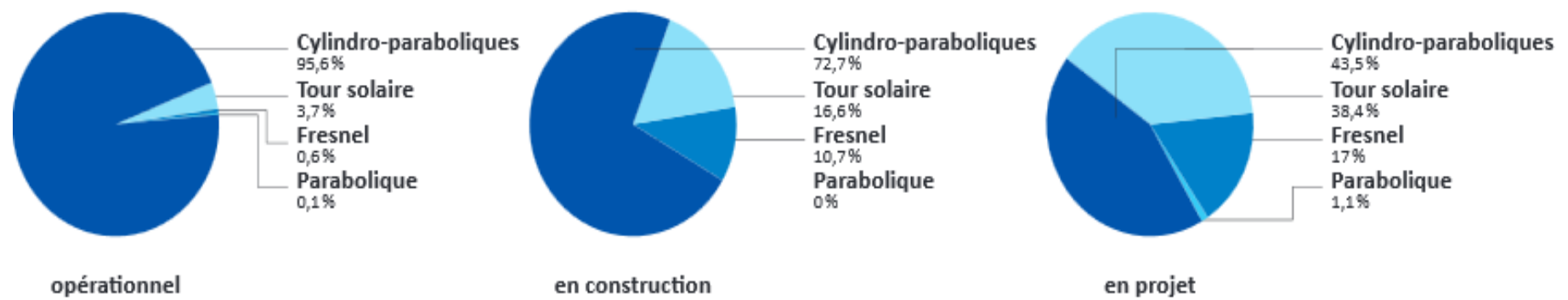


IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermodynamique à concentration → état des lieux

En septembre 2011, on recensait une capacité mondiale de solaire thermodynamique d'environ 1475 MW. L'Espagne et les États-Unis concentrent la quasi-totalité des centrales thermodynamiques en activité. Ils sont les seuls à commercialiser actuellement de l'électricité provenant du solaire à concentration. Plus de 3000 MW sont également en construction et près de 13700 MW ont été annoncés en projets à travers le monde.

Répartition des capacités opérationnelles / en construction / en projet par technologie en septembre 2011
sources : AIE, SER

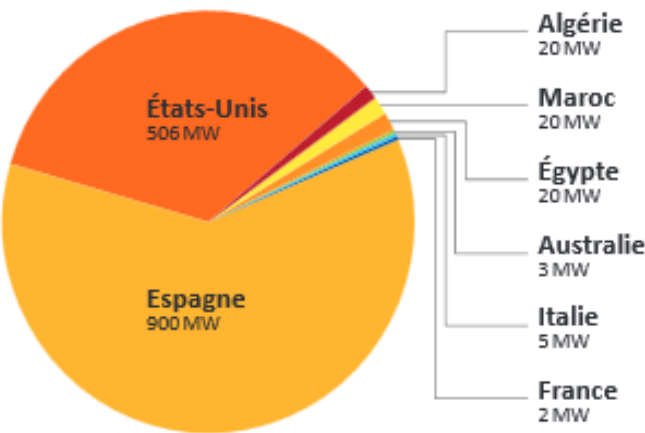


IV. Les énergies renouvelables

3. Le solaire : le solaire thermodynamique à concentration → état des lieux

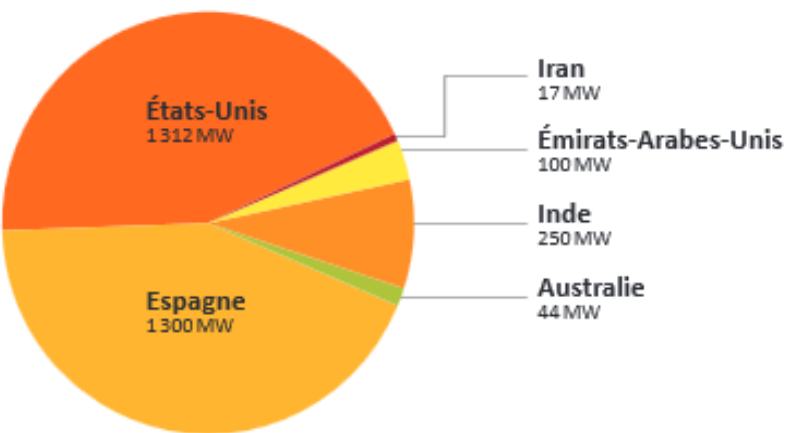
Capacité solaire thermodynamique installée en septembre 2011

sources : AIE, SER, Protermosolar



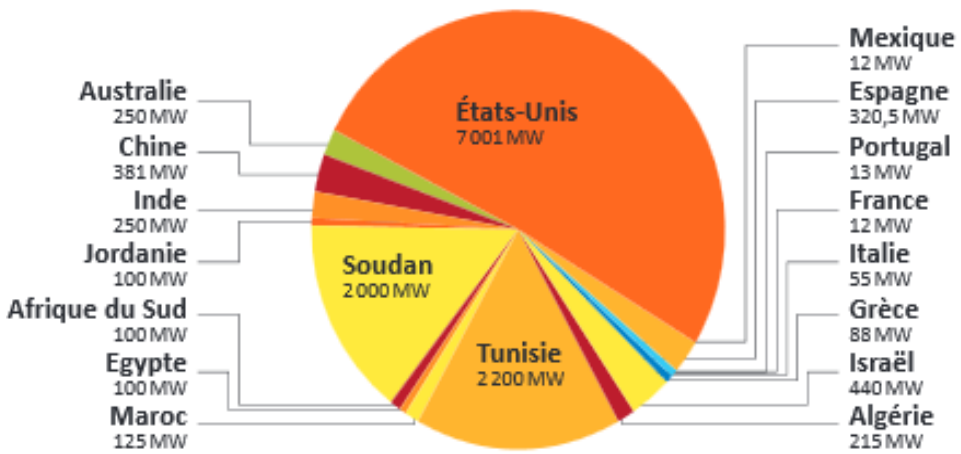
Capacité solaire thermodynamique en cours de construction au 1^{er} janvier 2011

sources : AIE, SER



Capacité solaire thermodynamique en projet en septembre 2011

sources : AIE, SER



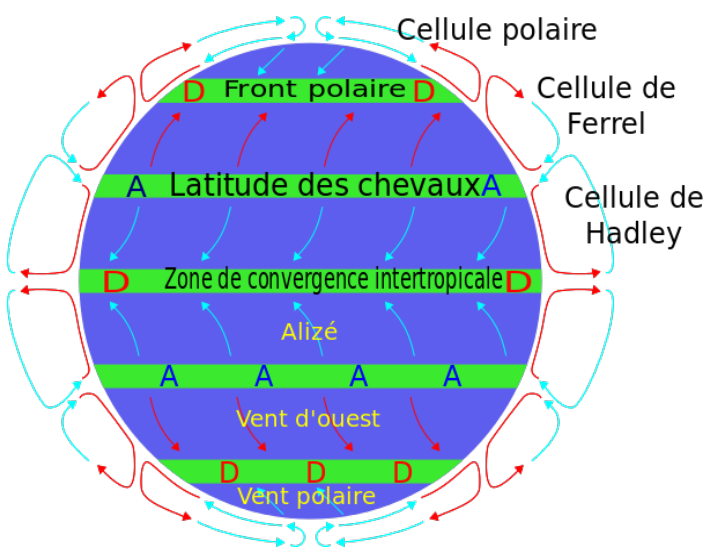
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : origine du vent

Entre 1 et 2 % de l'énergie du rayonnement solaire est convertie en énergie cinétique (vent).

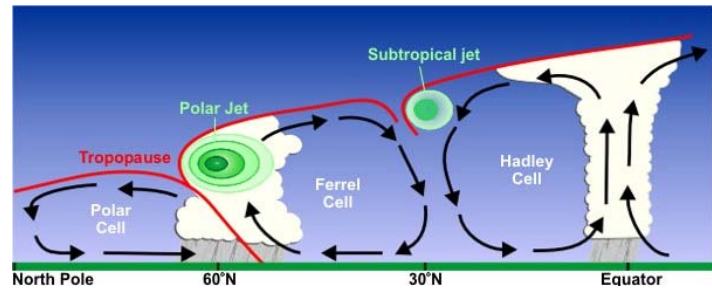
Causes principales des grands flux de circulation atmosphérique :

- différence de température entre l'équateur et les pôles
- rotation de la Terre qui dévie le flot d'air qui s'établit entre ces régions.



3 zones de circulation des vents :

- La cellule de **Hadley** (équateur ↔ 30 degrés Nord et Sud) → vents réguliers soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud : les alizés.
- La cellule de **Ferrel** (latitudes moyennes) → systèmes dépressionnaires transitoires ou les vents sont surtout d'ouest.
- La cellule **polaire** (nord et sud du 60^e parallèle) → circulation de surface généralement d'Est.
- Entre ces trois zones, on retrouve le jet stream → des corridors de vents circulant autour de la planète à une altitude variant entre 10 et 15 km. Vitesse moyenne : 90km/h – vitesse Max : 360 km/h



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : origine du vent

En plus de ces grands flux de circulation atmosphérique, il existe des vents locaux créés par la topologie locale

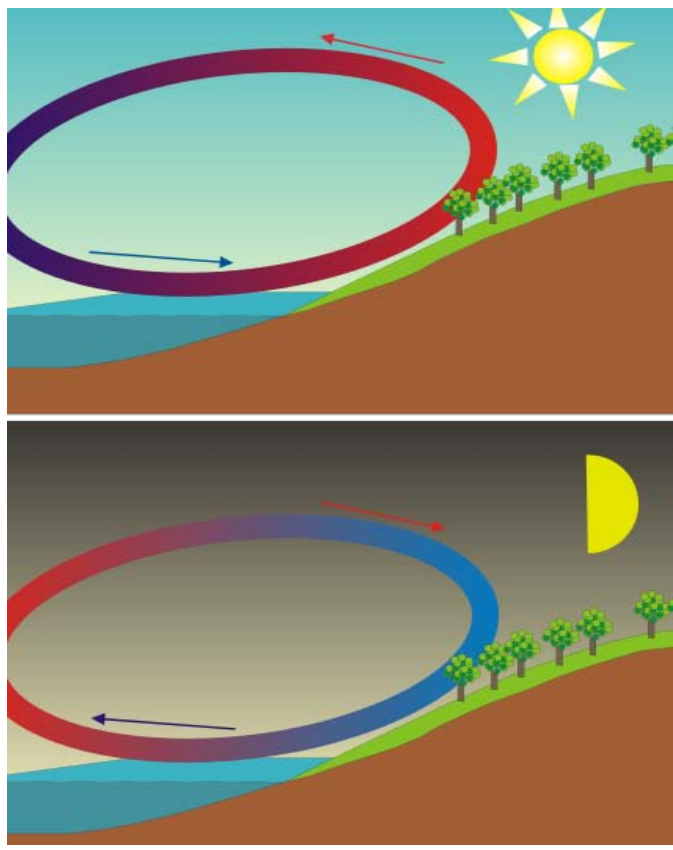


Vents locaux à travers le Monde. Ces vents sont généralement créés par des échauffements de terrain ou des effets montagneux

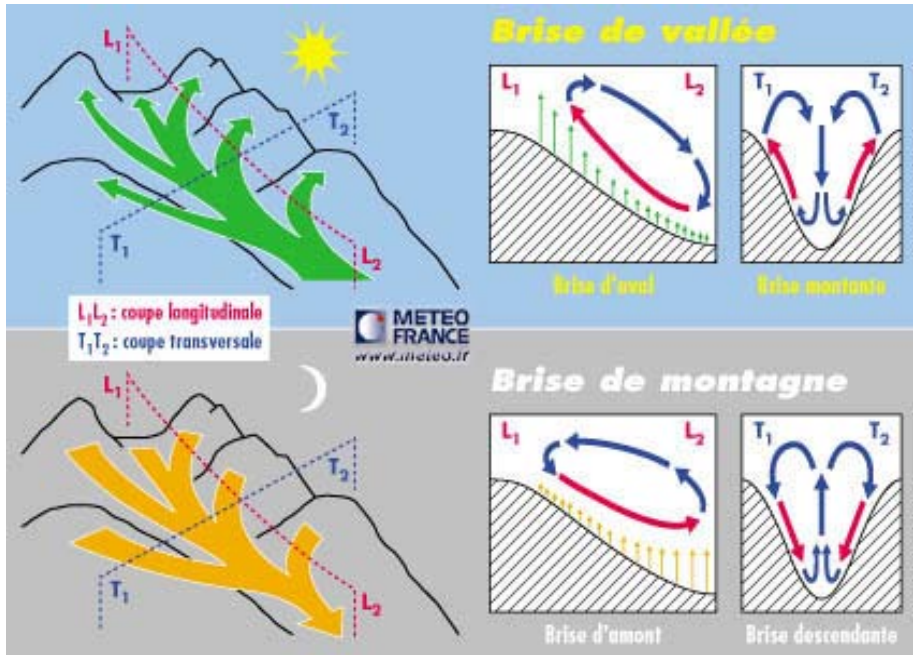
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : origine du vent

... ou l'alternance jour-nuit ainsi que la météo (orages, cyclones...)



Brise de mer en journée et de terre la nuit



Brise de vallée en journée et de montagne la nuit

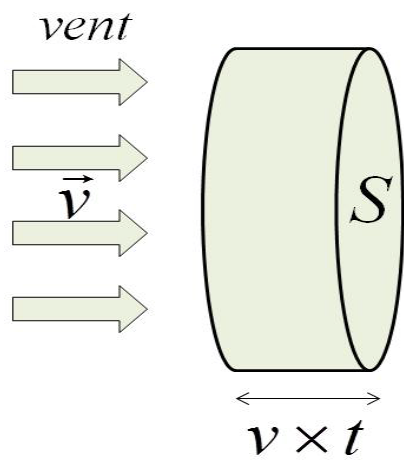
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance du vent

- L'énergie **cinétique** (en J) d'une masse d'air m_{air} s'écrit : $E_c=1/2 m_{air} v^2$
- L'énergie **cinétique volumique** (en J/m³) s'écrit : $e_c=1/2 \rho_{air} v^2$ (ρ_{air} :masse volumique)

Considérons une surface **S** traversée par un vent de vitesse **v** pendant le temps **t**.
L'énergie du vent qui a traversé la surface **S** est le volume d'air qui a traversé multipliée par l'énergie cinétique volumique. Le volume d'air qui a traversé la surface est **S×v×t**.

$$E_c=1/2 \rho_{air} \times v^2 \times S \times v \times t$$



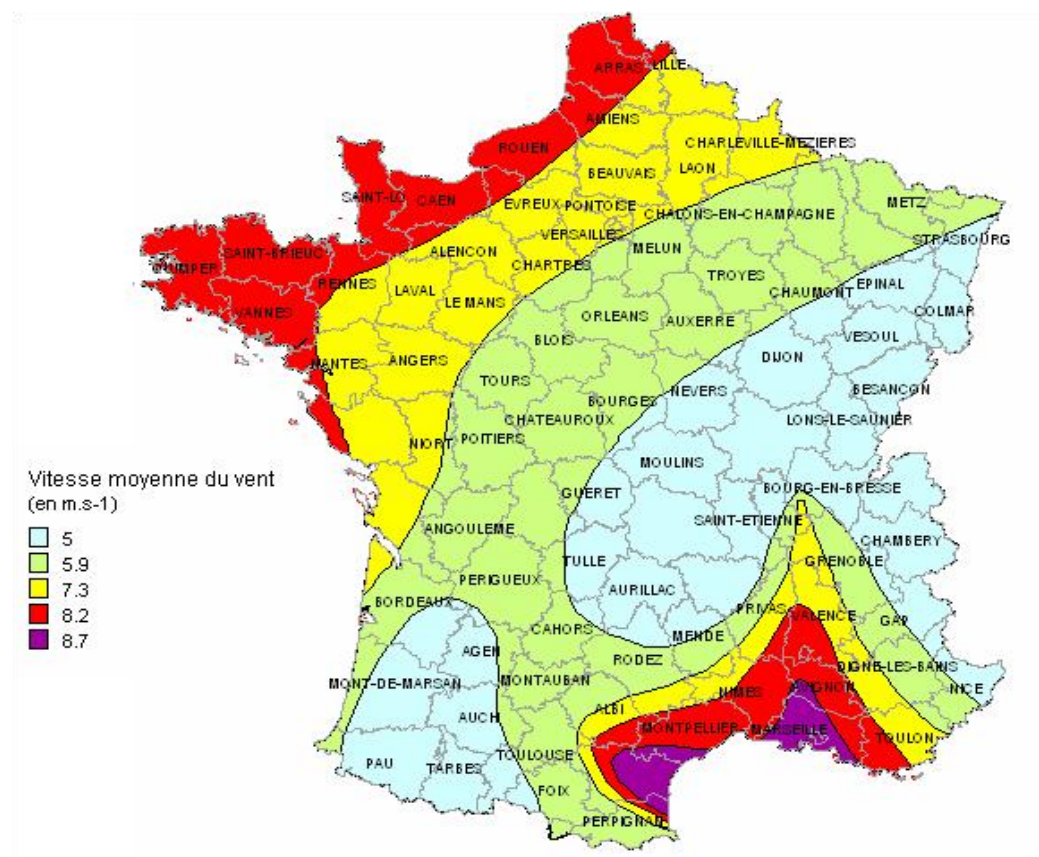
La puissance du vent vaut donc :

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} S v^3$$

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance du vent

La vitesse moyenne du vent dépend de la localisation géographique et de l'altitude.



Vitesse moyenne du vent à 10m d'altitude

Cette carte donne la tendance des vents mais ne permet pas de l'évaluer précisément à l'échelle locale (étude de 6 mois à 1 an nécessaire).

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance du vent

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

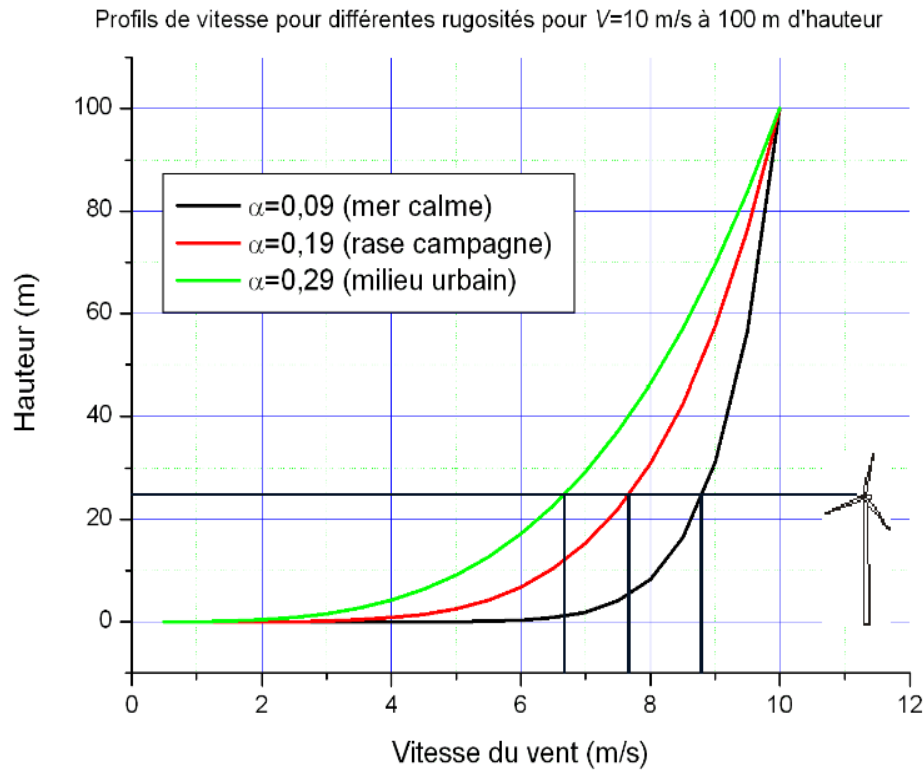
$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

- 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

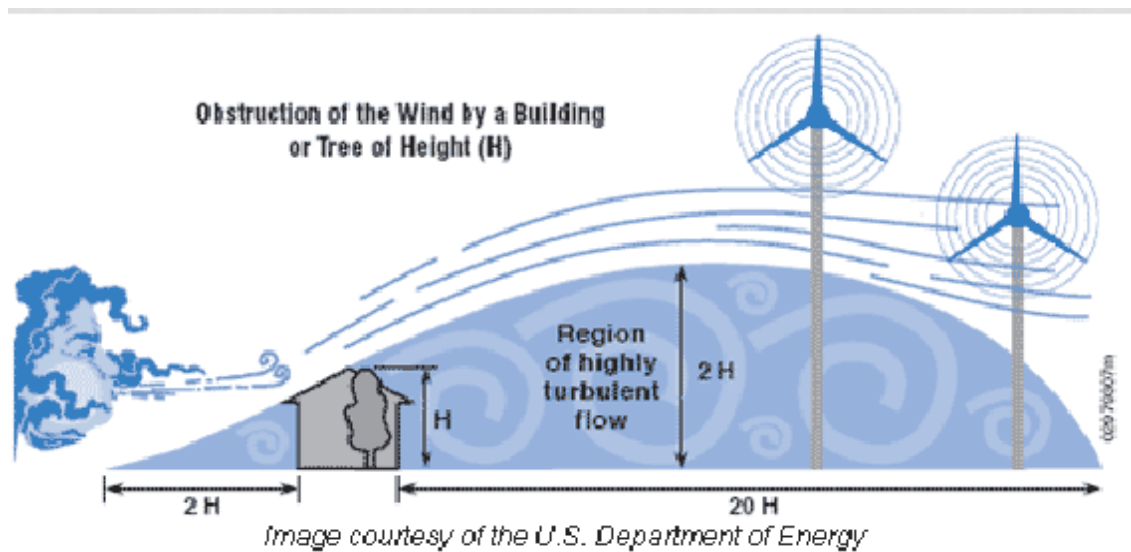
Valeurs du coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent en fonction de la topographie (source : wind power)



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance du vent

Les obstacles perturbent l'écoulement de l'air sur une hauteur pouvant dépasser deux fois la hauteur de l'obstacle.



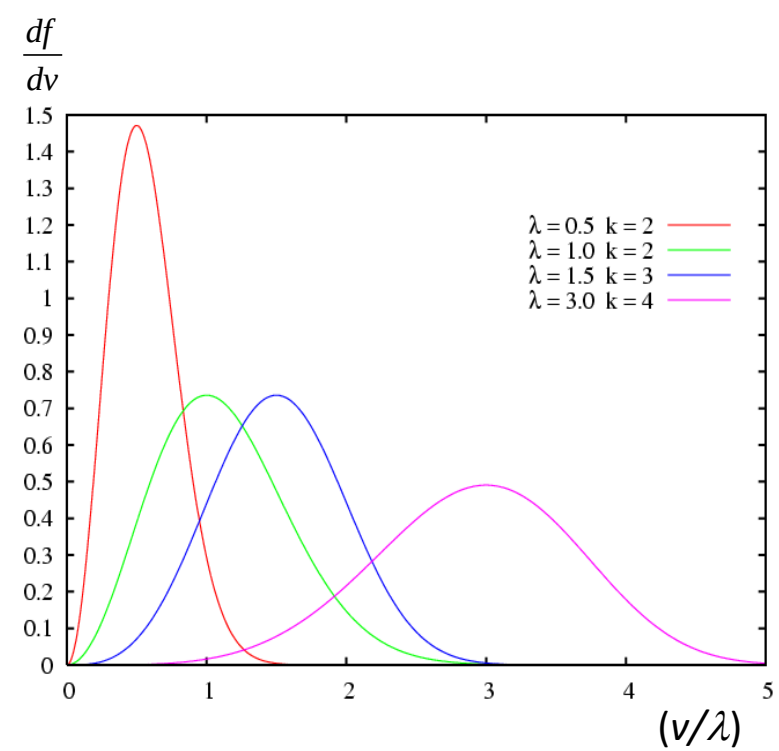
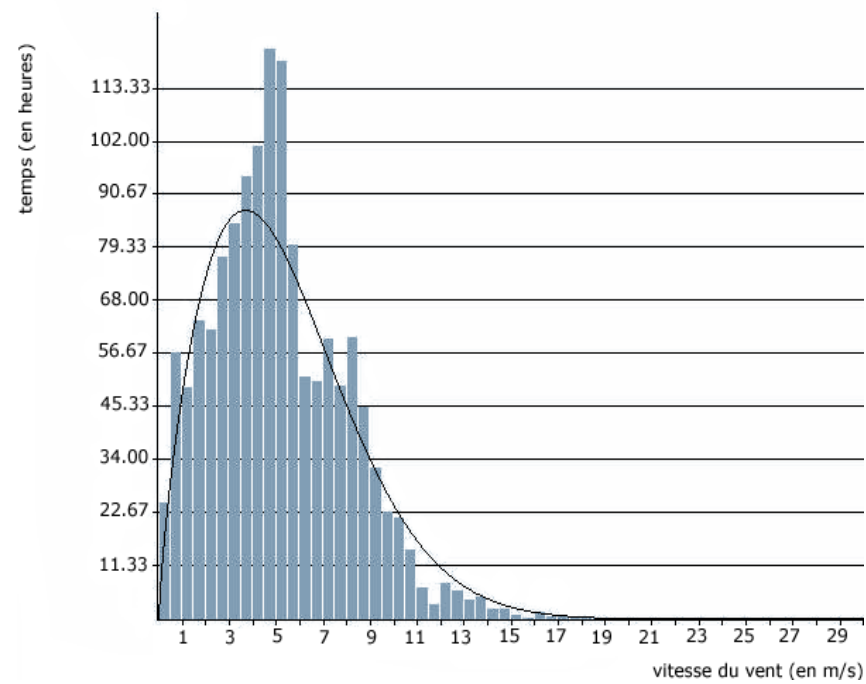
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance du vent

La distribution temporelle des vents correspond généralement à une distribution de probabilité de Weibull (2 paramètres).

$$\frac{df}{dv} = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k\right] \quad \text{(Probabilité d'obtenir la vitesse } v \text{)}$$

- λ est le facteur d'échelle (égal en première approximation à la vitesse moyenne)
- k est le facteur de forme généralement $k=2$
- v est la vitesse du vent



Distribution de Weibull

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance du vent

Pour caractériser un vent on peut également utiliser l'échelle de Beaufort :

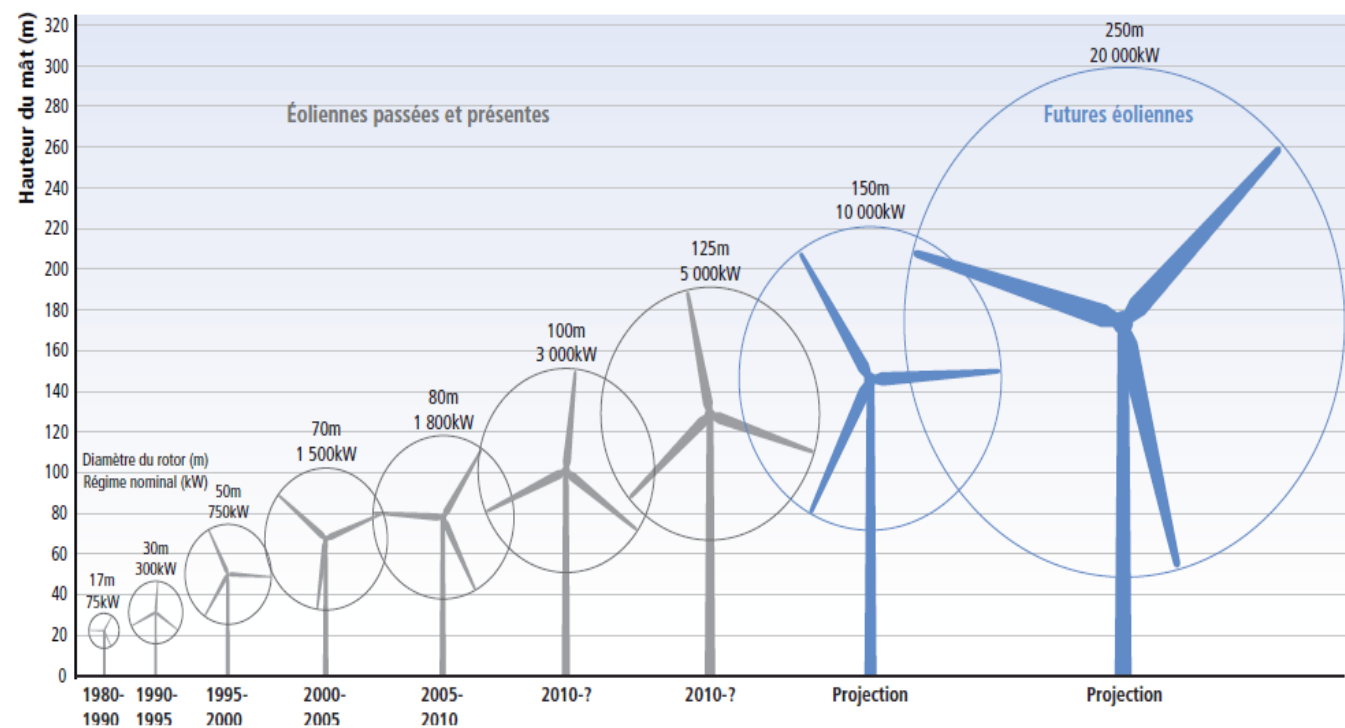
Vitesse à 10 m d'hauteur			Echelle de Beaufort	Nature du vent
m/s	km/h	nœud		
0 à 0,4	0 à 1,4	0 à 0,9	0	calme
0,4 à 1,8	1,4 à 6,5	0,9 à 3,5	1	
1,8 à 3,6	6,5 à 13	3,5 à 7	2	léger
3,6 à 5,8	13 à 21	7 à 11	3	
5,8 à 8,5	21 à 31	11 à 17	4	modéré
8,5 à 11	31 à 40	17 à 22	5	frais
11 à 14	40 à 50	22 à 28	6	fort
14 à 17	50 à 61	28 à 34	7	
17 à 21	61 à 76	34 à 41	8	tempête
21 à 25	76 à 90	41 à 48	9	
25 à 29	90 à 104	48 à 56	10	tourmente
29 à 34	104 à 122	56 à 65	11	
> 34	> 122	> 65	12	ouragan

Le record sur terre est de 484 km/h (tornade de l'Oklahoma du 3 mai 1999)

IV. Les énergies renouvelables

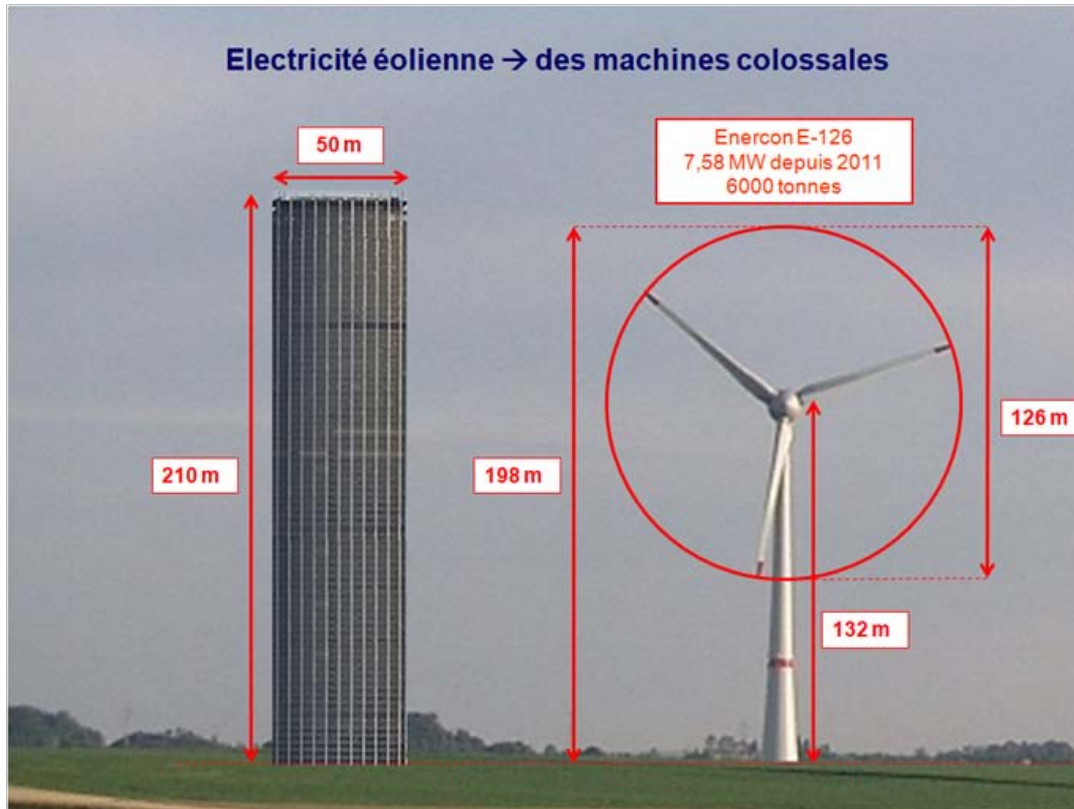
4. L'éolien : le grand éolien

La taille des éoliennes augmente pour atteindre actuellement 10 MW (en cours de développement) et un diamètre de 150 m. On parle de **grand éolien** lorsque la puissance nominale de fonctionnement de l'aérogénérateur est supérieure à **350 kW**



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : le grand éolien



La plus grande éolienne en production est aujourd'hui l'éolienne ENERCON E-126 d'une puissance de 7.5 MW. Elle produit environ 14 GWh/an d'énergie électrique à terre.

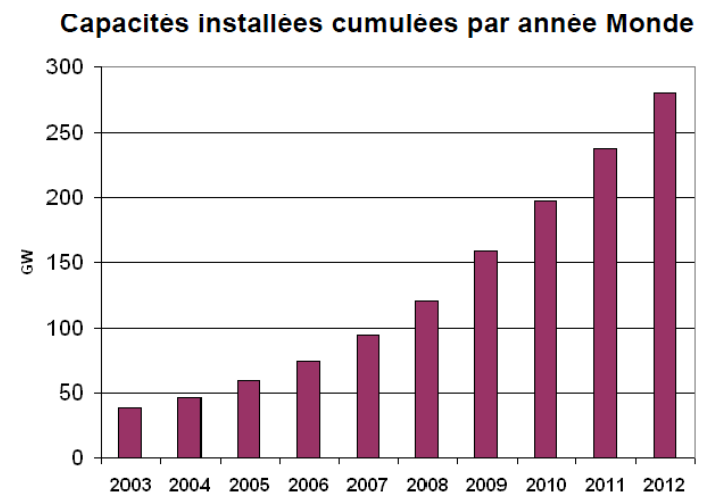
Eolienne ENERCON E-126



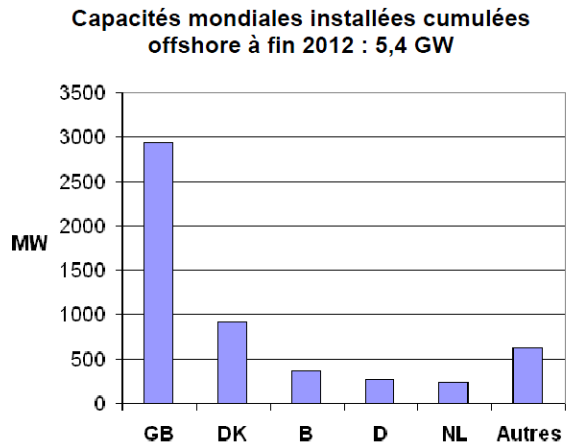
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : état des lieux

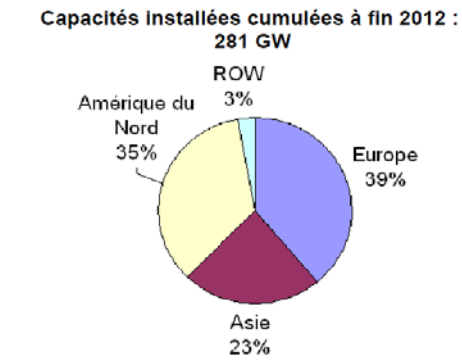
La capacité du parc mondial est fin 2012 de **281 GW** et la croissance de l'ordre de **8%** par an. En Europe, la croissance est plus forte, de l'ordre de 24%/an notamment grâce à la Grande Bretagne qui investit beaucoup dans l'éolien offshore.



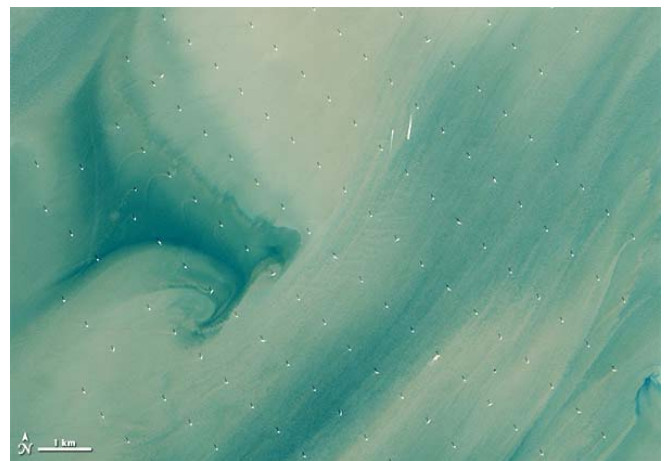
Source : EurObserv'er 2013



Source : GWEC Février 2013



Source : EurObserv'er 2013

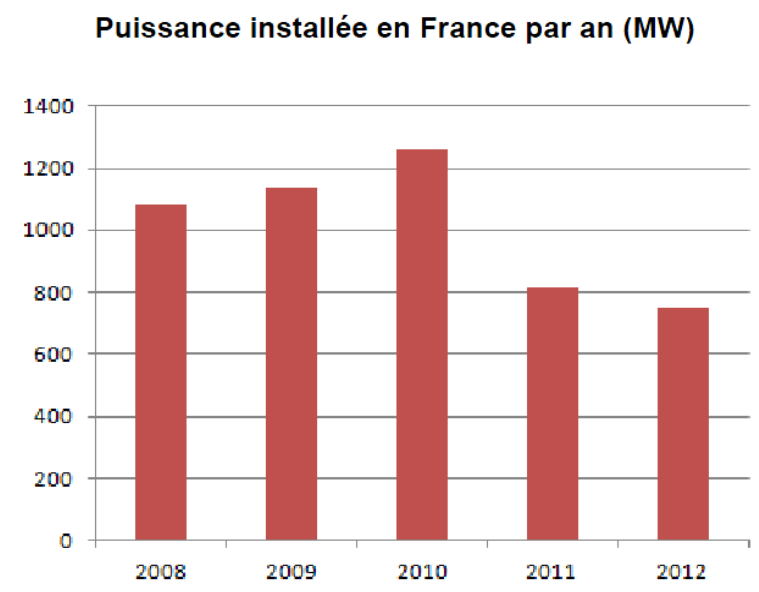
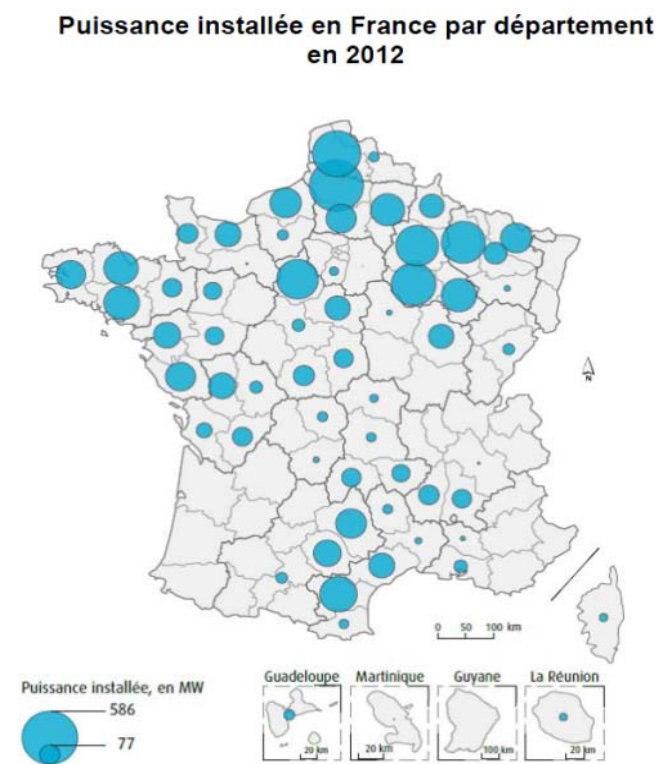


Le London Array, plus grand parc éolien en mer du monde (175 éoliennes - 630MW)

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : état des lieux

En France, le parc éolien s'élève à 7,6 GW à la fin 2012, en hausse de 11 % par rapport à fin 2011. La disparité régionale persiste, avec plus de la moitié des installations concentrées sur seulement 5 régions. La production éolienne atteint 14,3 TWh sur l'ensemble de l'année 2012. Par contre, après des années de croissance constante on observe à partir de 2011 une diminution de la puissance installée chaque année



Source : SoeS juin 2013

Le potentiel éolien de la France serait de 20GW terrestres (pour une production de 50TWh/an) et de 40GW offshore posé (pour une production de 150 TWh/an). S'il était mobilisé, il permettrait de produire 30% de notre énergie électrique en 2040. Le potentiel est beaucoup plus important si on considère les éoliennes flottantes pouvant être installées sur des fonds à plus de 50m.

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : l'avancée de l'éolien flottant

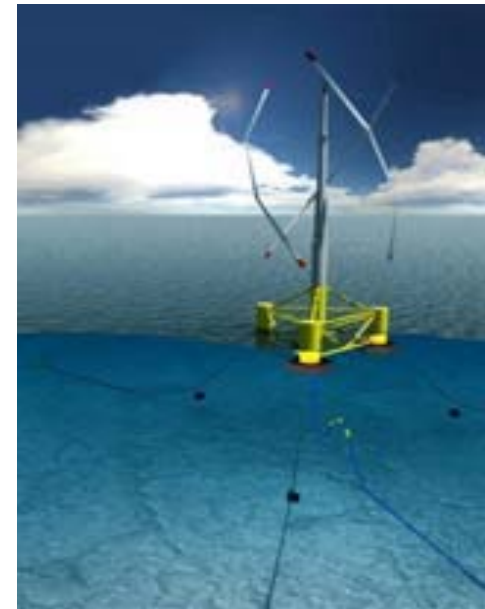
L'éolien flottant permet de s'affranchir des contraintes liées à la profondeur et à certains conflits d'usage, tout en profitant de forts vents marins. Environ 60 % de la ressource vent européenne peut être exploitée par des éoliennes flottantes pour des profondeurs comprises entre 50 m et 150 m. Des initiatives pour développer ces technologies sont en cours dans plusieurs pays comme le Japon (avec un projet de parc face à Fukushima), les Etats Unis, la Norvège, le Portugal et l'Espagne.



Winfloat, prototype de 2MW au Portugal



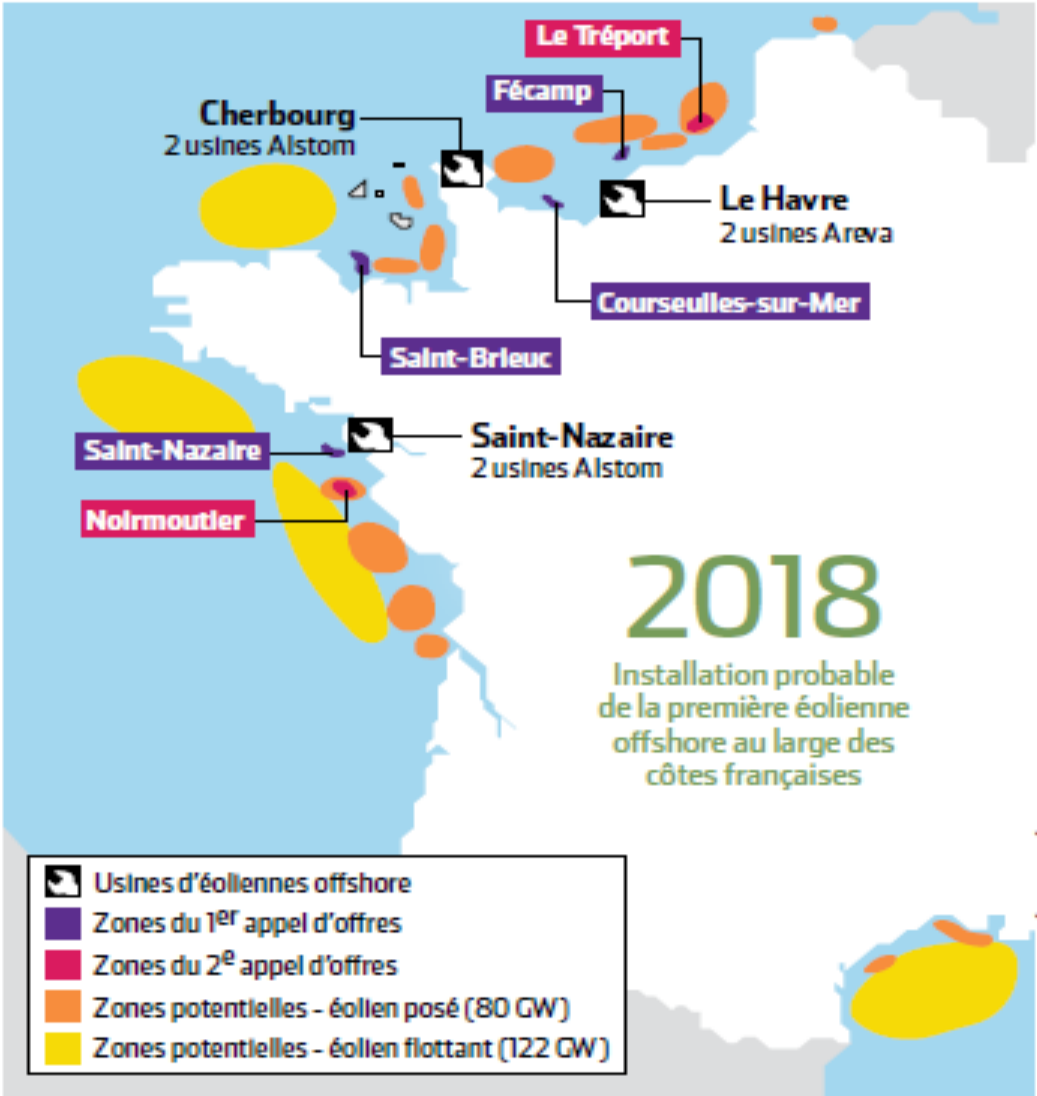
Hywind en Norvège



Nenuphar en France

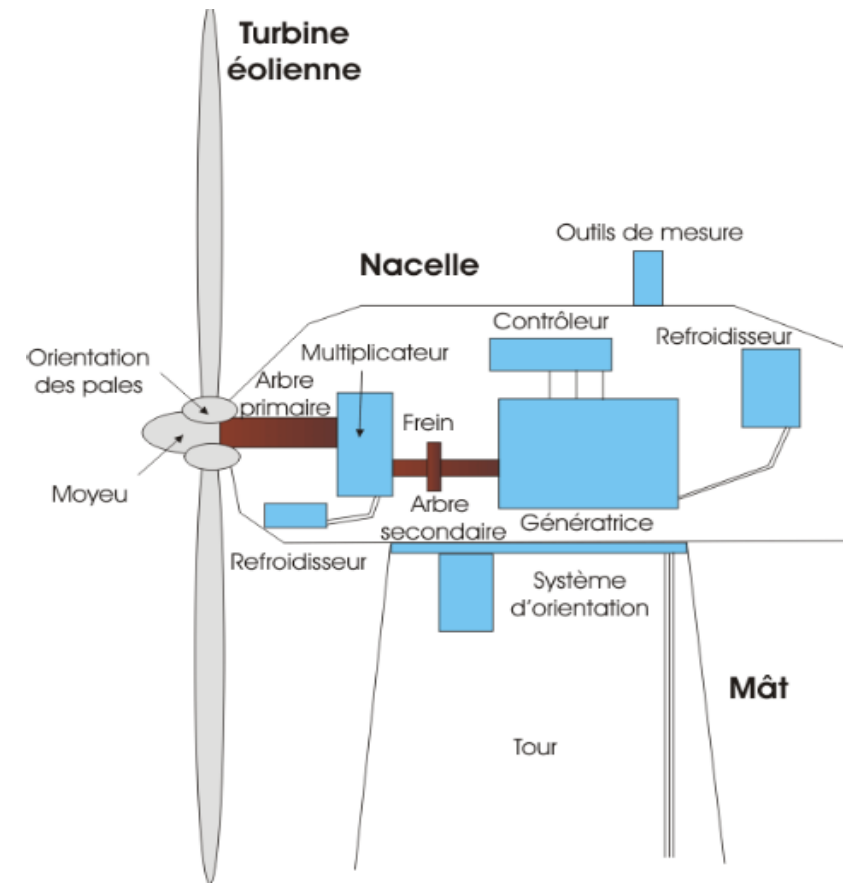
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : potentiel offshore en France



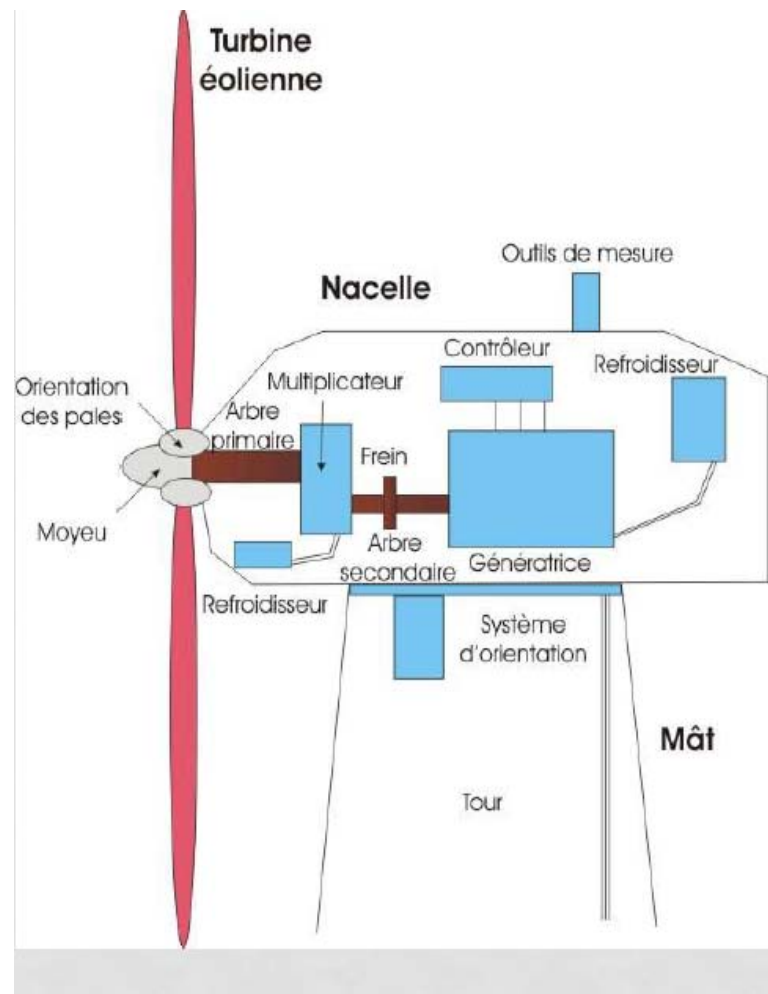
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Pales : fibre de verre et matériaux composites

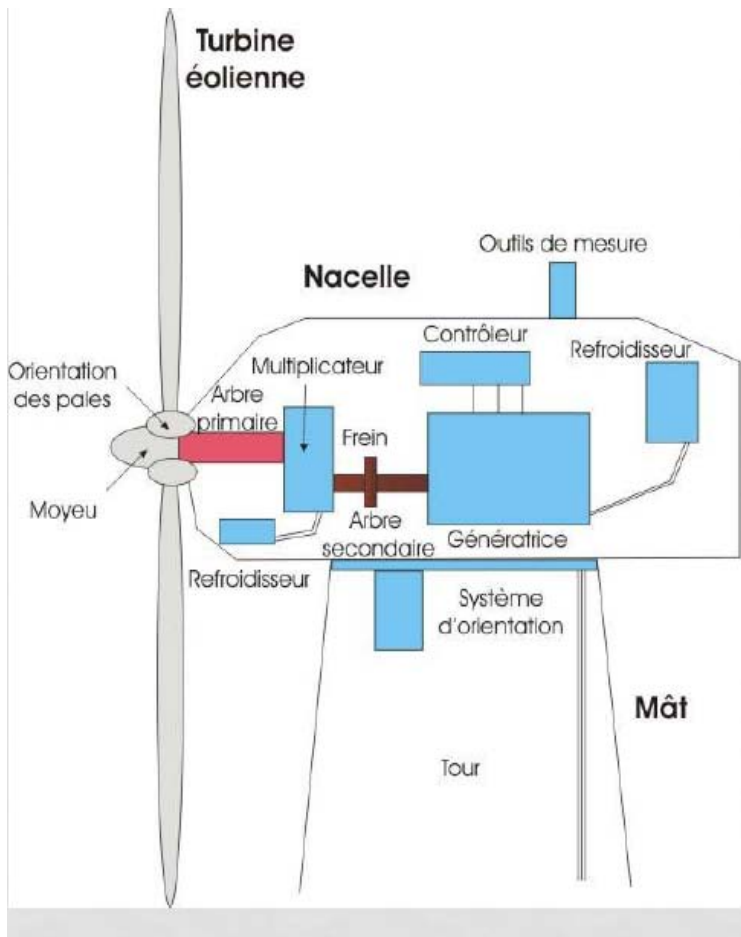
Le système tripale :
limite les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale



Transport d'une pale par convoi exceptionnel

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Arbre primaire (arbre lent) :

Arbre du rotor de la turbine éolienne.
Vitesse de rotation : 20-40 tr/min

Relié à l'arbre secondaire par
l'intermédiaire du multiplicateur.

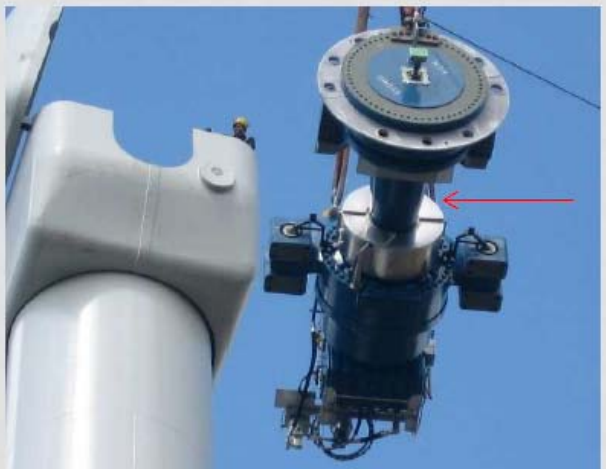
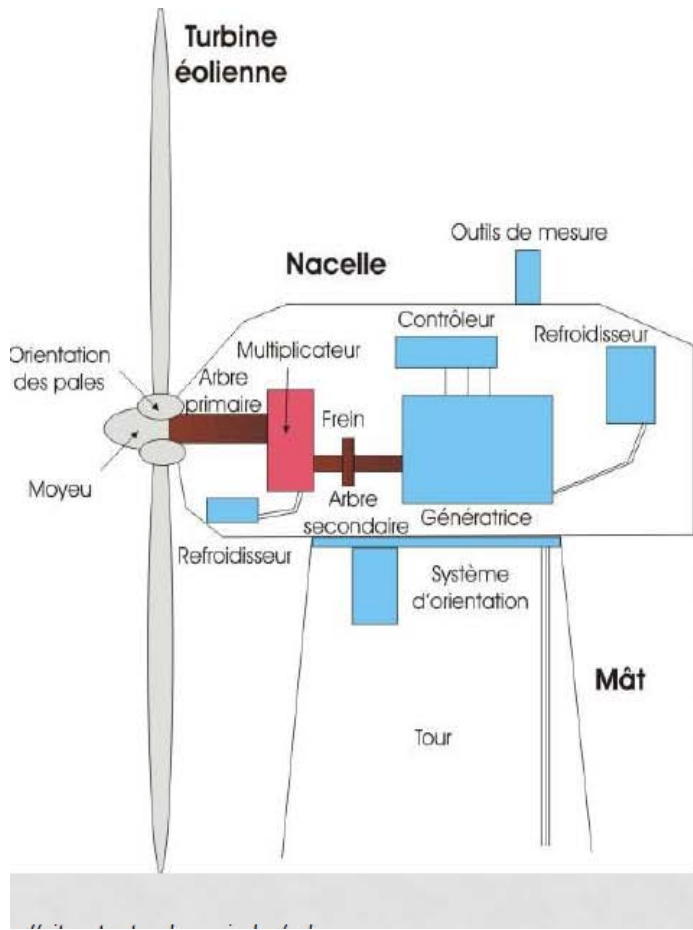


Photo : wiki-eolienne

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Le multiplicateur (boite de vitesse):

Il permet de faire passer la fréquence rotation de 20-40 tr/min à 1500 tr/min à l'aide d'engrenages.

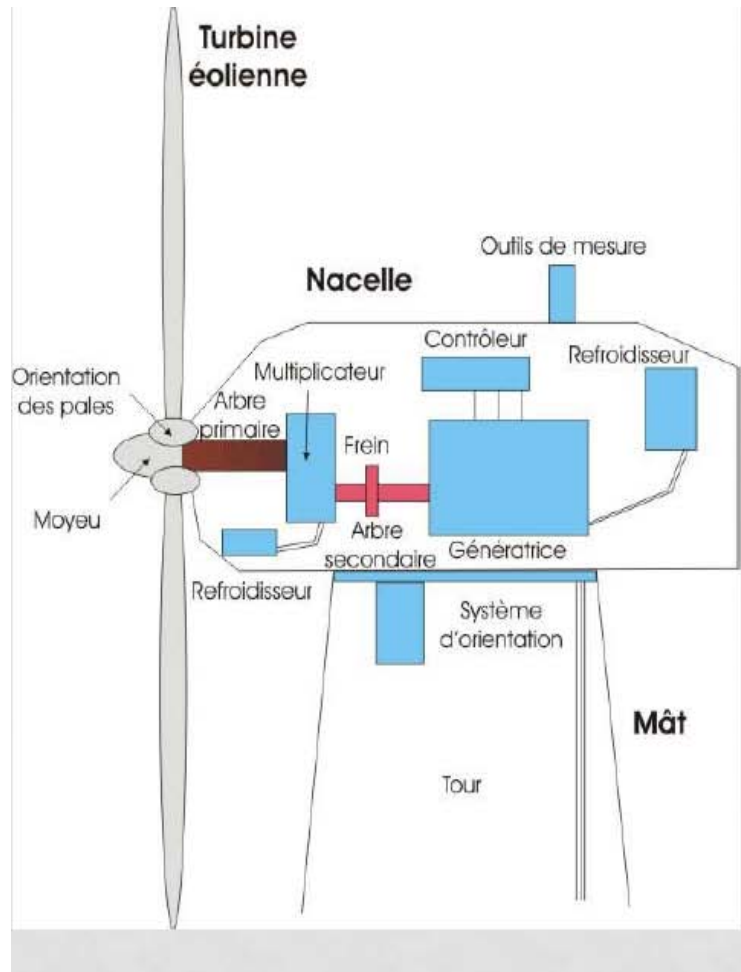


Photo : <http://eolienne.f4jr.org/multiplicateur>



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



L'arbre rapide :

Relie le multiplicateur à la génératrice

Equipé d'un frein à disque (arrête la rotation en cas de grand vent)

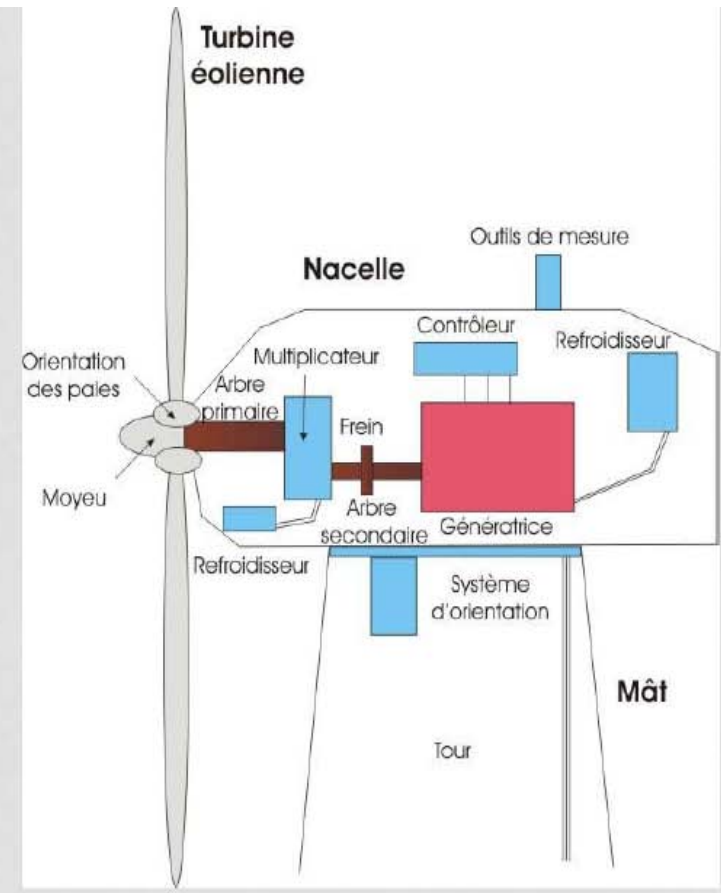


Vérification du frein à disque de l'arbre rapide

Photo : wiki-eolienne

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



La génératrice : jusque 7,5 MW de puissance
Transforme l'énergie mécanique en énergie électrique

Machine asynchrone (multiplicateur)
Machine synchrone (génératrice annulaire sans multiplicateur : Enercon)



Montage d'une génératrice

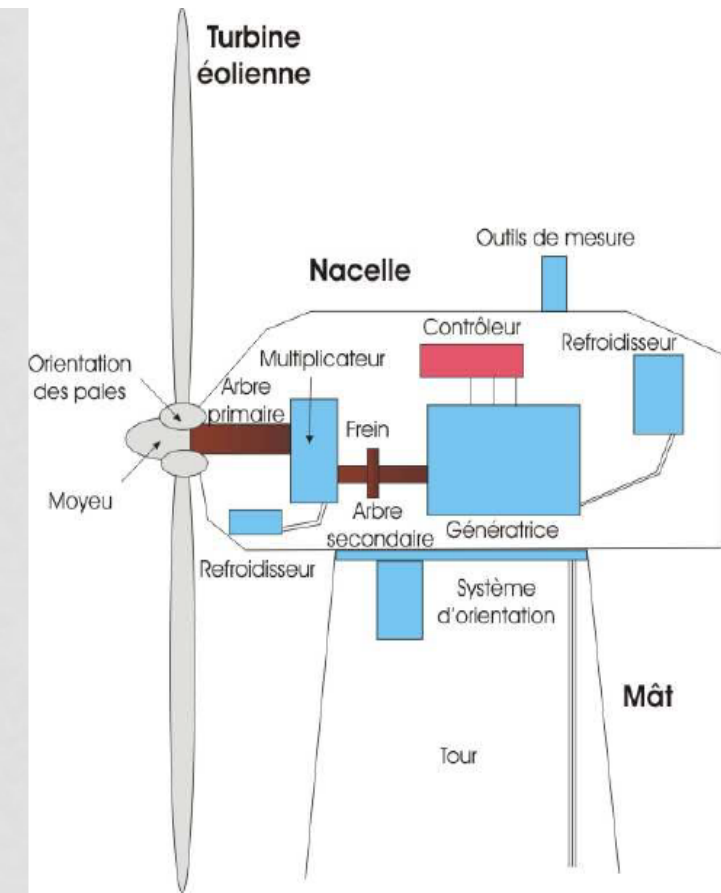


Générateur annulaire (Enercon)

Sources : <http://sites-test.uclouvain.be/e-lee>, www.enercon.de

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Sources : <http://sites-test.uclouvain.be/e-lee>, www.enercon.de

Le contrôleur électronique : cerveau de l'éolienne

Contrôle le fonctionnement général de l'éolienne (100 à 500 paramètres) : démarrage, freinage, orientation des pales et de la nacelle, refroidissement du générateur ...

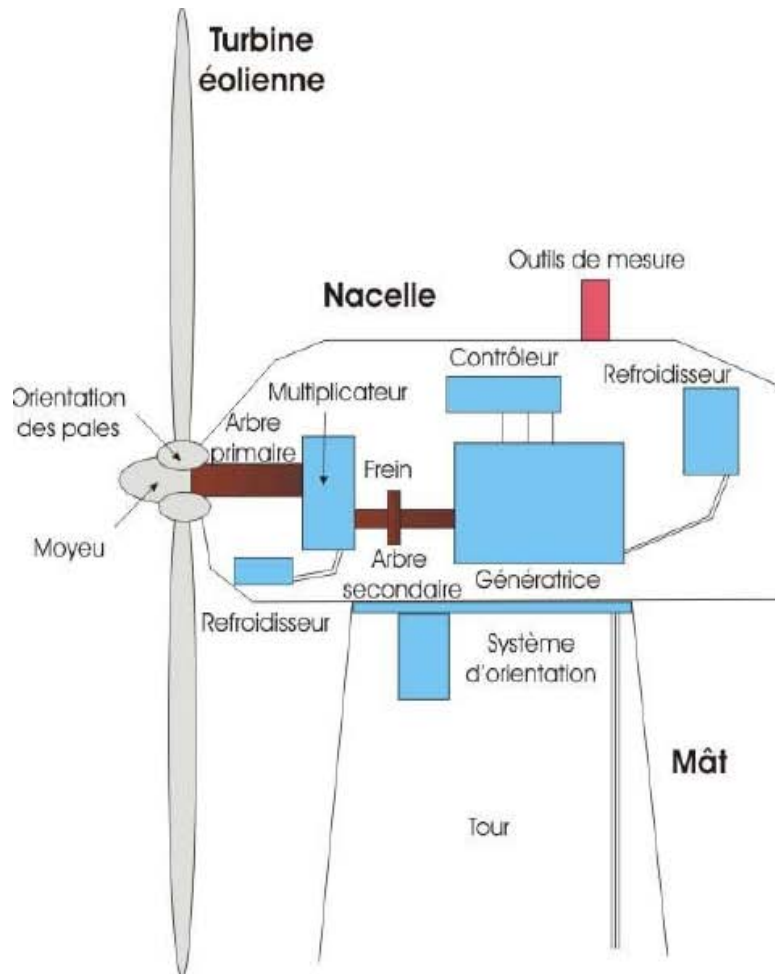
En lien permanent avec le système de mesure (anémomètre, girouette)



Contrôleur Enercon en pied de mât

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Les outils de mesure :

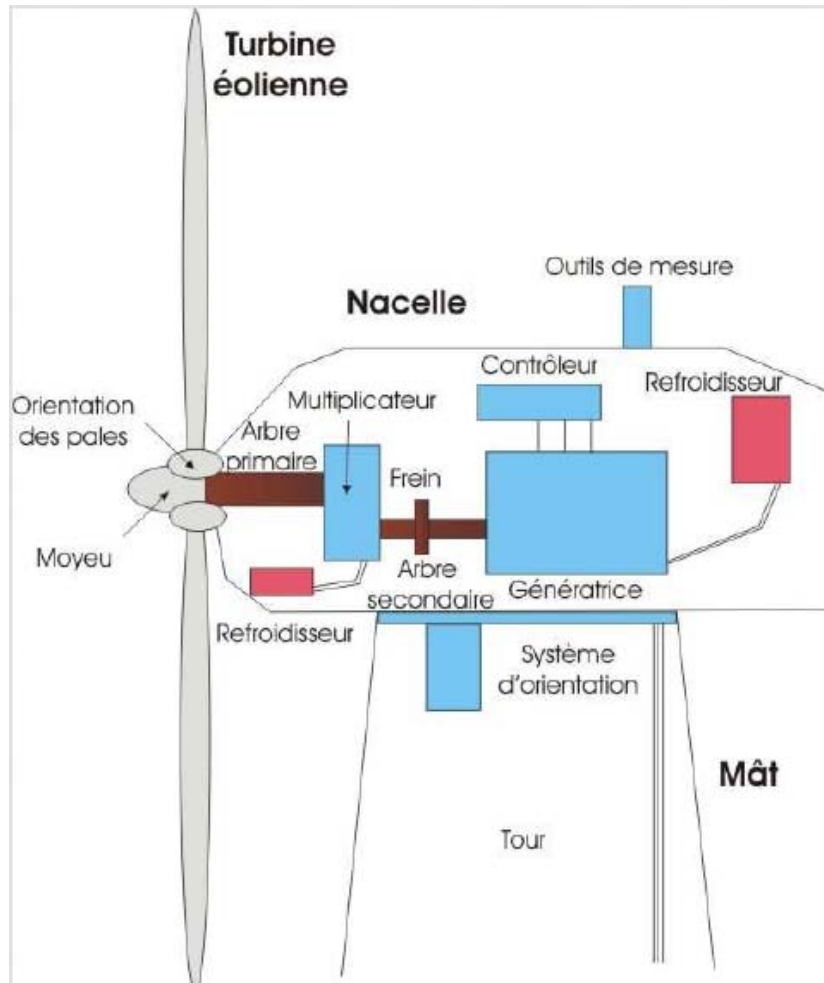
- Anémomètre (vitesse du vent)
- Girouette (direction du vent)

En lien permanent avec le système de contrôle commande



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne

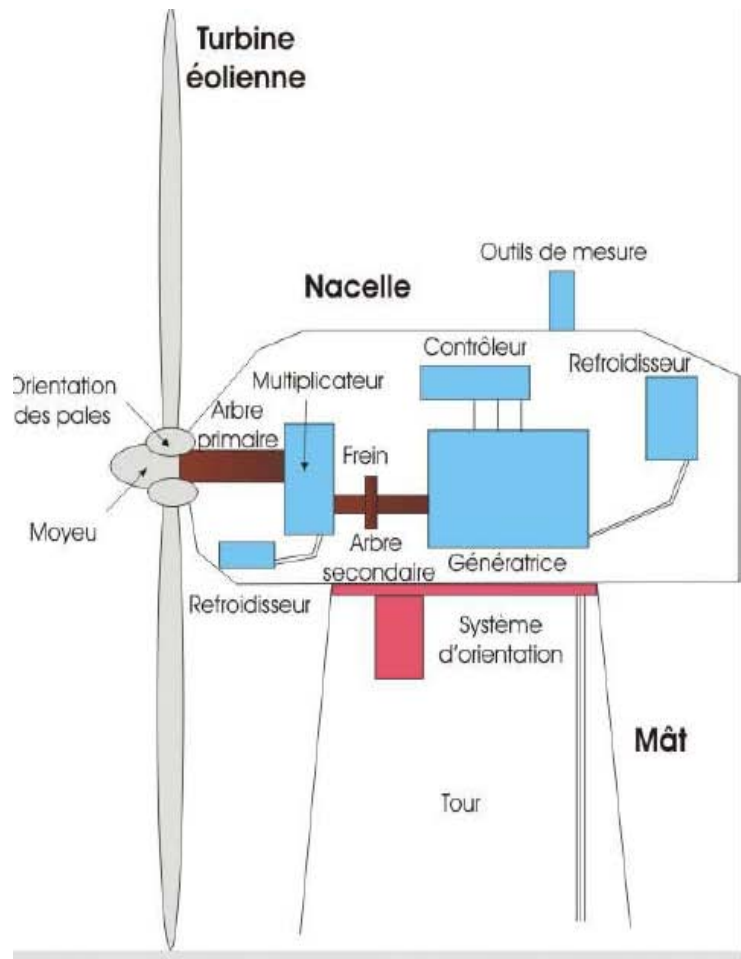


Refroidissement :

- Génératrice
- Multiplicateur
- Ventilateurs
- Radiateurs à eau et à huile

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Le système d'orientation :

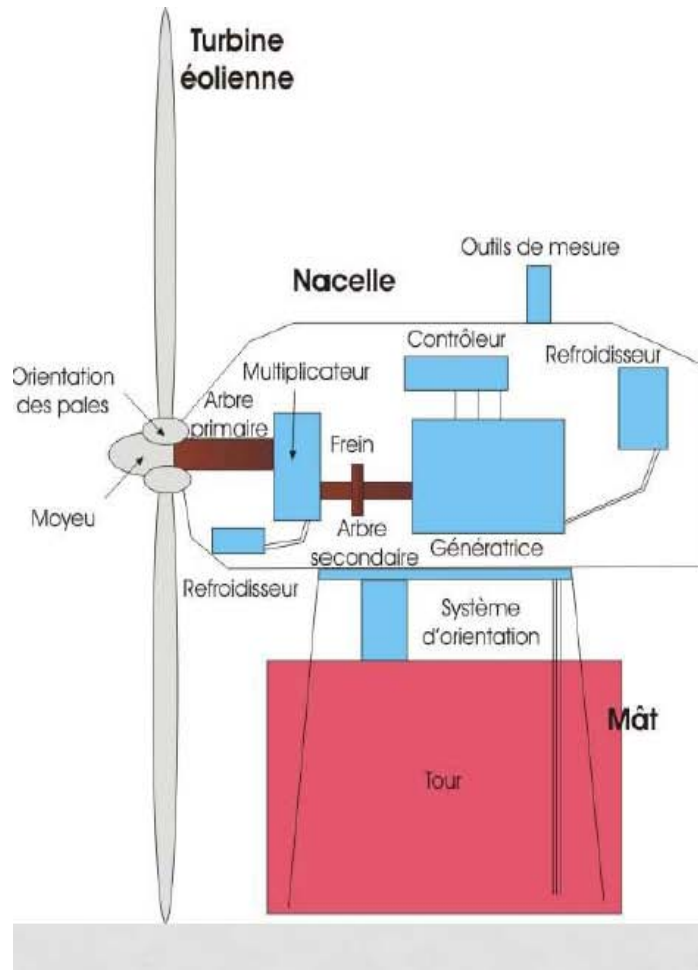
Des moteurs électriques font pivoter la nacelle (roue dentée ou crémaillère)

Le rotor est placé face au vent



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne



Le mât (ou tour) : 40 à 100 m

Tubulaire en acier.

Permet l'accès à la nacelle (échelle ou ascenseur)

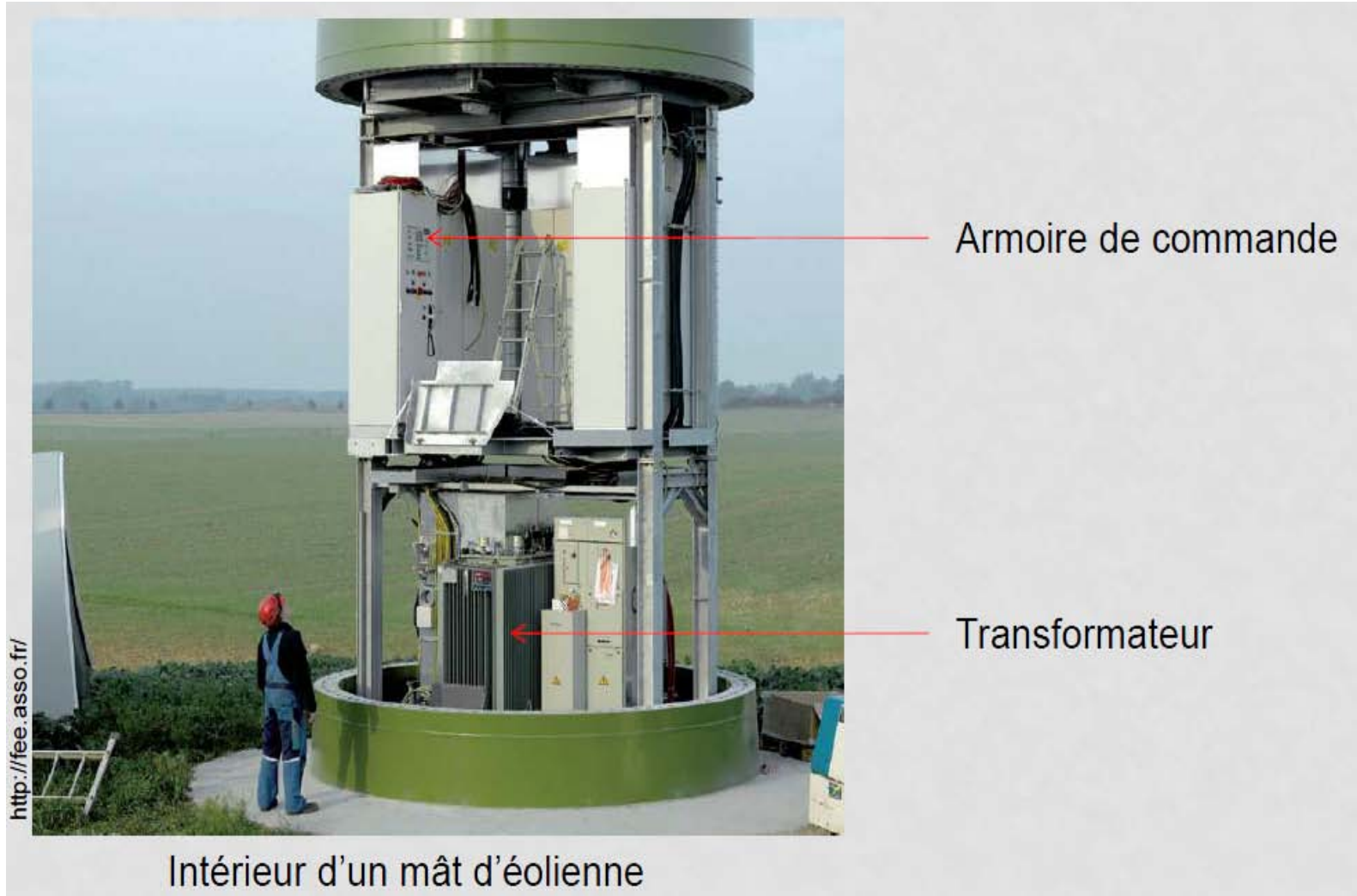


Ascenseur d'éolienne Vestas



IV. Les énergies renouvelables

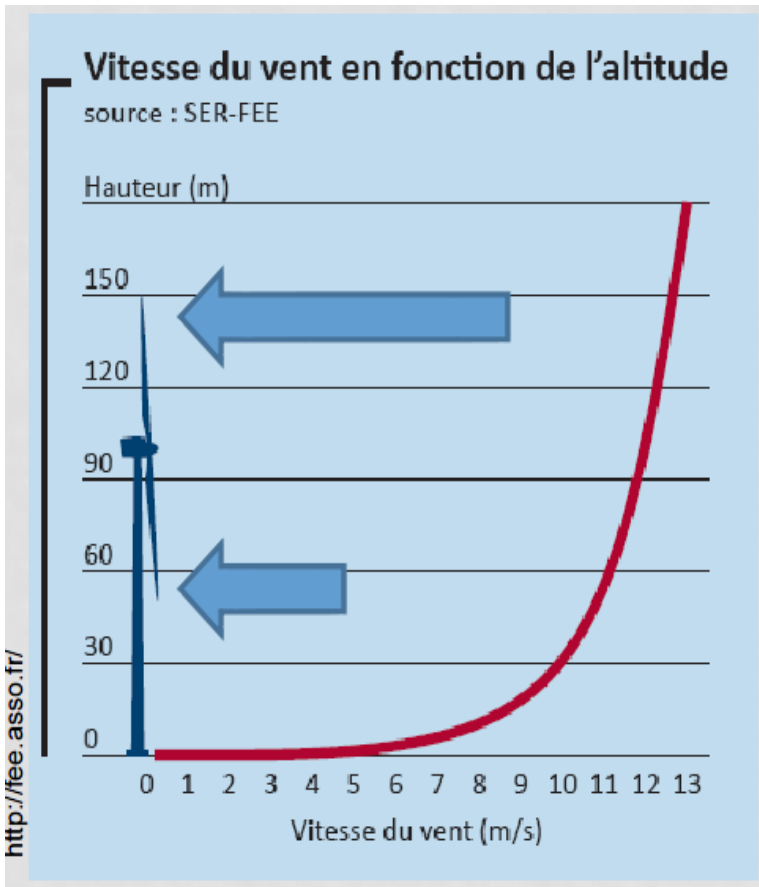
4. L'éolien : structure d'une éolienne



IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : structure d'une éolienne

Pourquoi 3 pâles ?



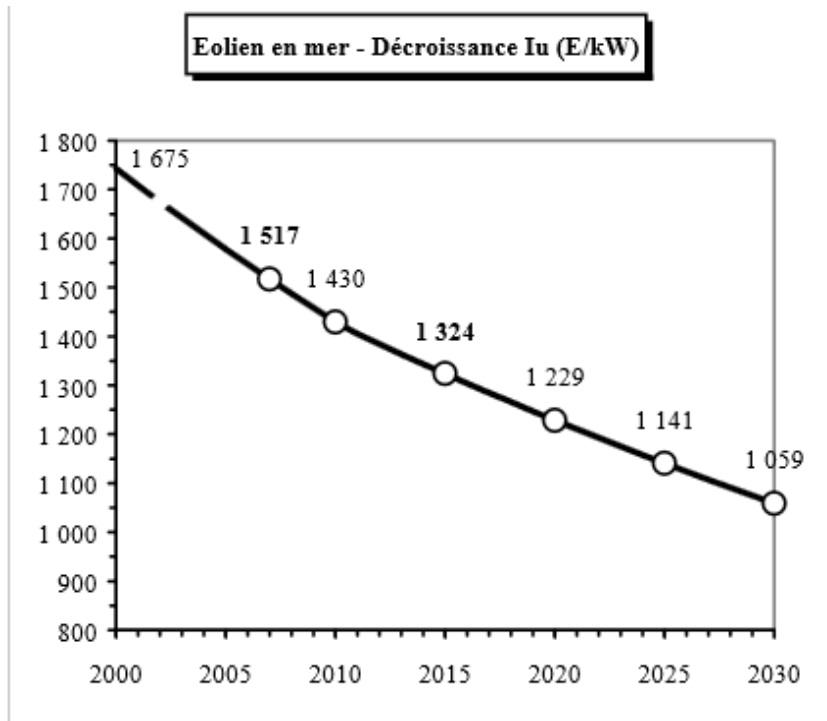
Contraintes plus élevées en haut qu'en bas du rotor.

Meilleure répartition des contraintes avec trois pâles que les mono ou bipales

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : coût du grand éolien

Il faut compter un investissement de 1000 €/kW sur terre et de 1400 €/kW offshore plus un coût d'exploitation, d'entretien et de maintenance représentant **1.5-2 % par an** du coût d'investissement total. Le tarif d'achat est fixé à 8,4 c€ /kWh pendant 10 ans, puis entre 2,8 et 8,2 c€ /kWh pendant 5 ans selon les sites.



hypothèses de décroissance des coûts d'investissement de l'éolien en mer

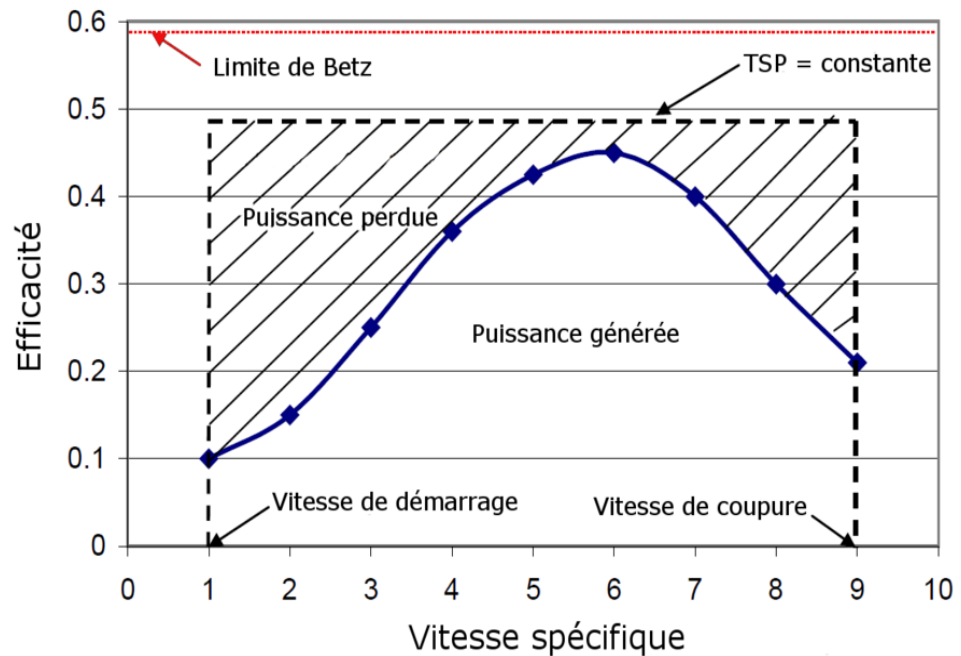
IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent

Il n'est pas possible de récupérer toute l'énergie cinétique de l'air puisque une fois passé entre les pâles, l'air doit partir pour laisser sa place à de l'air neuf. La **limite de Betz** est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27(≈0.6) de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. En pratique, on défini le **coefficient de performance** C_p tel que :

$$P_{produite} = \frac{1}{2} \rho_{air} S v^3 C_p$$

Les éoliennes actuelles possèdent un coefficient de performance de l'ordre de 0.4-0.5 (dépendant de la vitesse du vent) alors que la limite de Betz est de 0.6. On peut lier le coefficient de performance d'une turbine à la vitesse spécifique qui est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles et du vent :

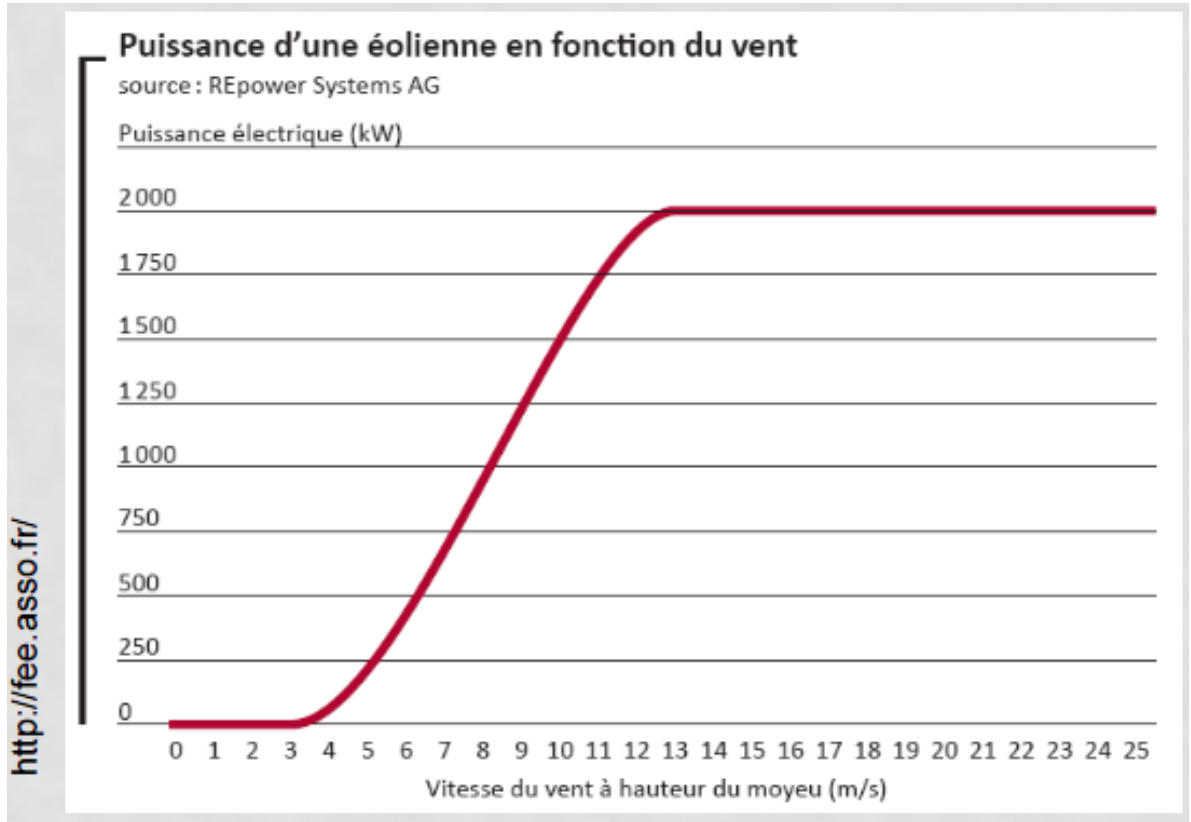


$$V_{spécifique} = \frac{V_{bout\ des\ pâles} \ (m / s)}{v_{vent} \ (m / s)}$$

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent

L'allure de la puissance produite en fonction de la vitesse du vent est la suivante :

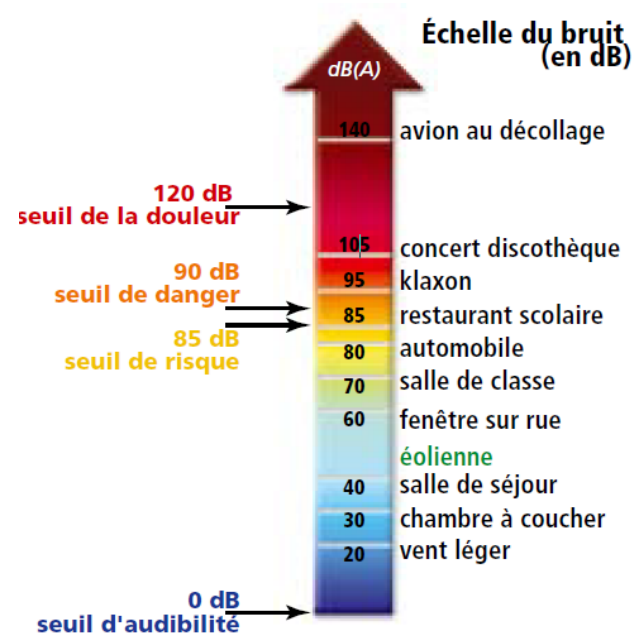


Pour cette turbine, la vitesse de démarrage est de 4 m/s et la puissance nominale est atteinte pour une vitesse de vent de 12m/s (45km/h). Chaque turbine peut supporter une vitesse maximale au-delà de laquelle elle est contrainte de s'arrêter.

IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : les nuisances

- Nuisance visuelle : Il serait difficile de ne pas les regarder... Ce genre de nuisance décline une zone de 5 km de rayon en zone inadéquate pour des logements résidentiels avec jardin, des appartements avec vue ou des lieux de tourisme vert.
- Nuisance sonore : des progrès ont été fait mais une éolienne de grande dimension produit un bruit de fond qu'il est difficile d'accepter pour les riverains.



Eolienne en feu en Ardèche (10/2009)

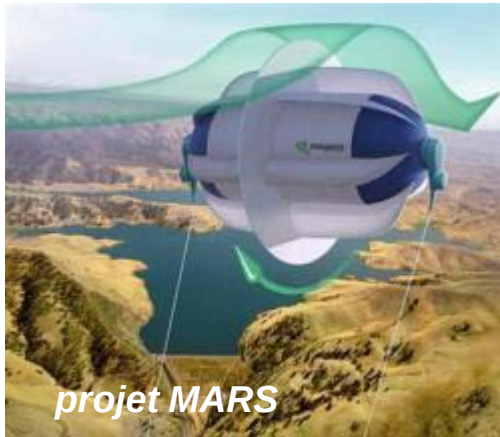


IV. Les énergies renouvelables

4. L'éolien : les projets d'éoliennes volantes

Technologie actuelle : problème de l'**intermittence** et du **cout d'investissement** initial.

A 8 000 mètres d'altitude, là où commence la stratosphère, le vent file à 100 km/h minimum, et est très régulier.



http://www.youtube.com/watch?v=Zl_tqnsN_Tc&feature=player_embedded

Exercices : calculs d'ordres de grandeurs

- I. Introduction : les sources d'énergie
- II. Le point sur les besoins et la production en énergie
- III. Les conséquences de la consommation des énergies fossiles
- IV. Les Energies renouvelables
- V. Le stockage de l'énergie : gestion de l'intermittence**
 - 1. Stockage sous forme d'énergie potentiel
 - 2. Stockage sous forme d'énergie chimique
 - 3. Stockage sous forme d'énergie cinétique
- VI. Réduction de la consommation
- VII. Les scénarios pour le futur

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

Le réseau électrique doit être stable :
 $49.5\text{ Hz} < F < 50.5\text{ Hz}$

Demande trop forte → les alternateurs ralentissent ($F < 50\text{Hz}$)

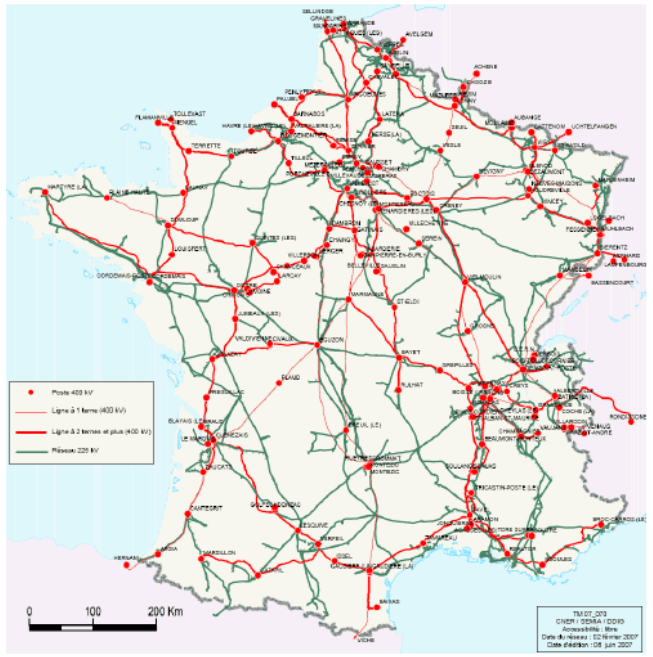
Demande trop faible → les alternateurs accélèrent ($F > 50\text{Hz}$)

→ Régulation obtenue grâce à des moyens de production flexibles assez rapides à démarrer et à arrêter.

- En Allemagne : centrales au gaz ou au charbon.
- En France : centrales hydraulique & gaz & fioul

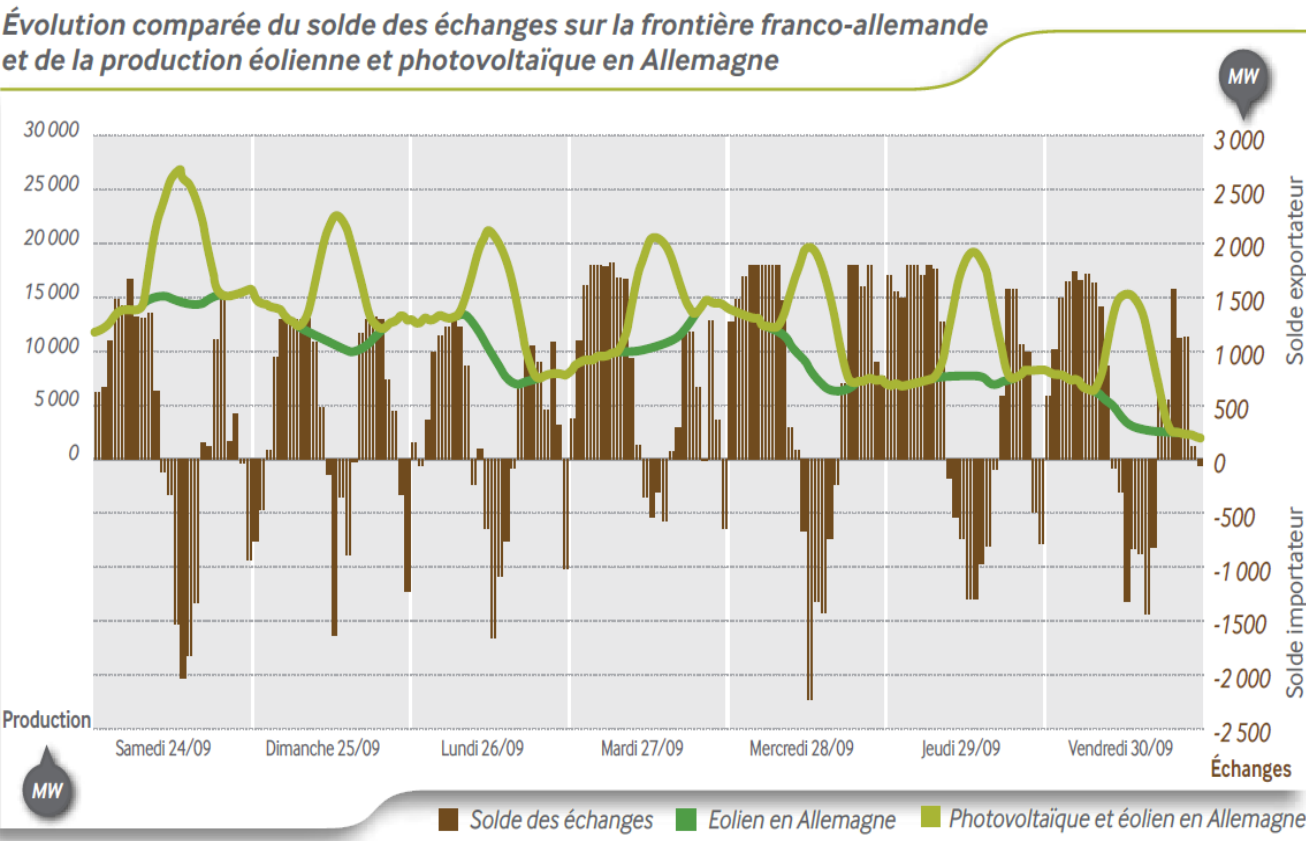
EDF considère que les énergies intermittentes ne peuvent dépasser 30% de la puissance installée sur un réseau.

Le stockage de l'énergie électrique est donc une condition nécessaire au développement des énergies renouvelables.



1,3 Mkm de lignes à basse et moyenne tensions (240V à 20kV)
100 000 km de lignes à haute et très haute tensions (63 à 400 kV)

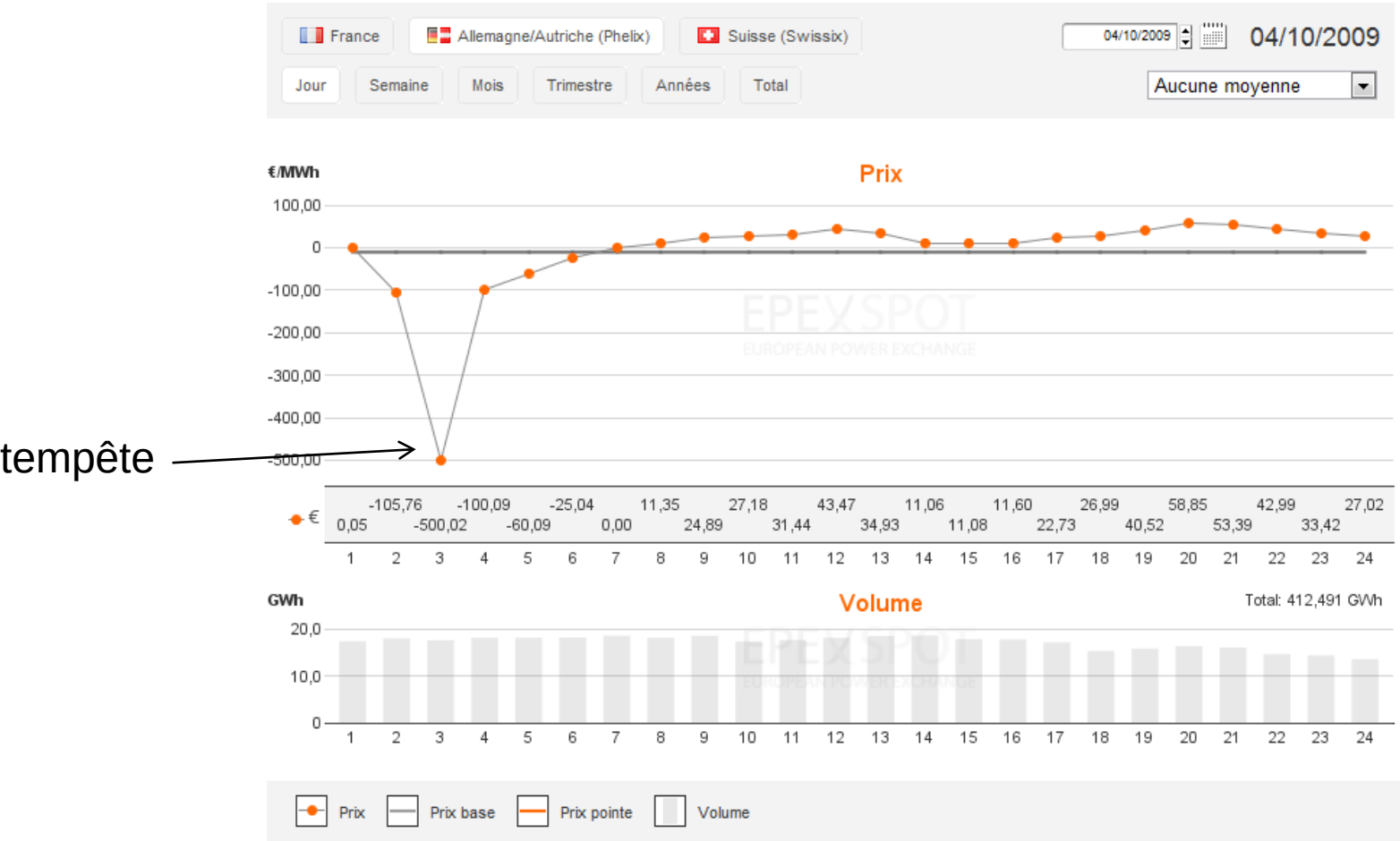
V. Le stockage de l'énergie : gestion de l'intermittence



La France (et les pays frontaliers) participe(nt) à l'équilibrage du réseau Allemand qui comporte une puissance importante d'énergie variables

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

Marché EPEX de l'électricité 4 octobre 2009



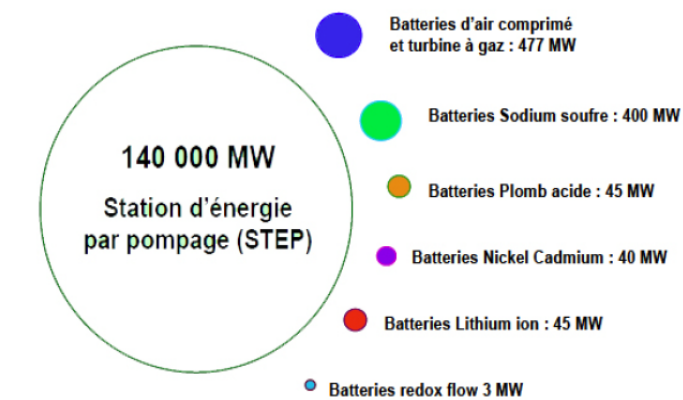
→ Prix de l'électricité négatif !

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

Solutions de stockage de l'électricité :

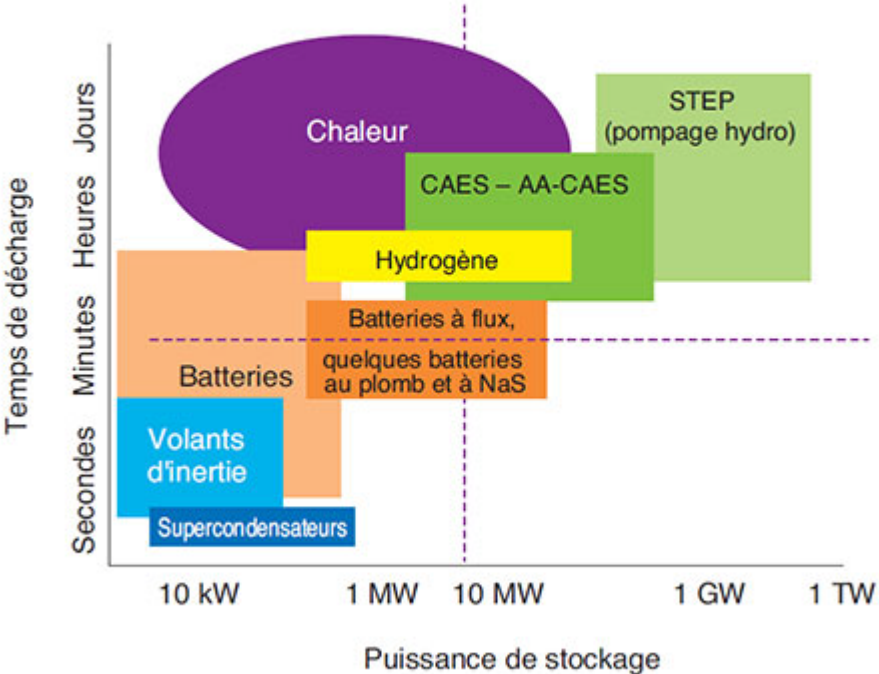
- Énergie potentielle (pompage d'eau, air comprimé)
- Énergie chimique (batteries, hydrogène, méthane)
- Énergie cinétique (volants d'inertie)
- Energie thermique (sels fondus)

Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



Source : Fraunhofer Institute, EPRI, EDF R & D

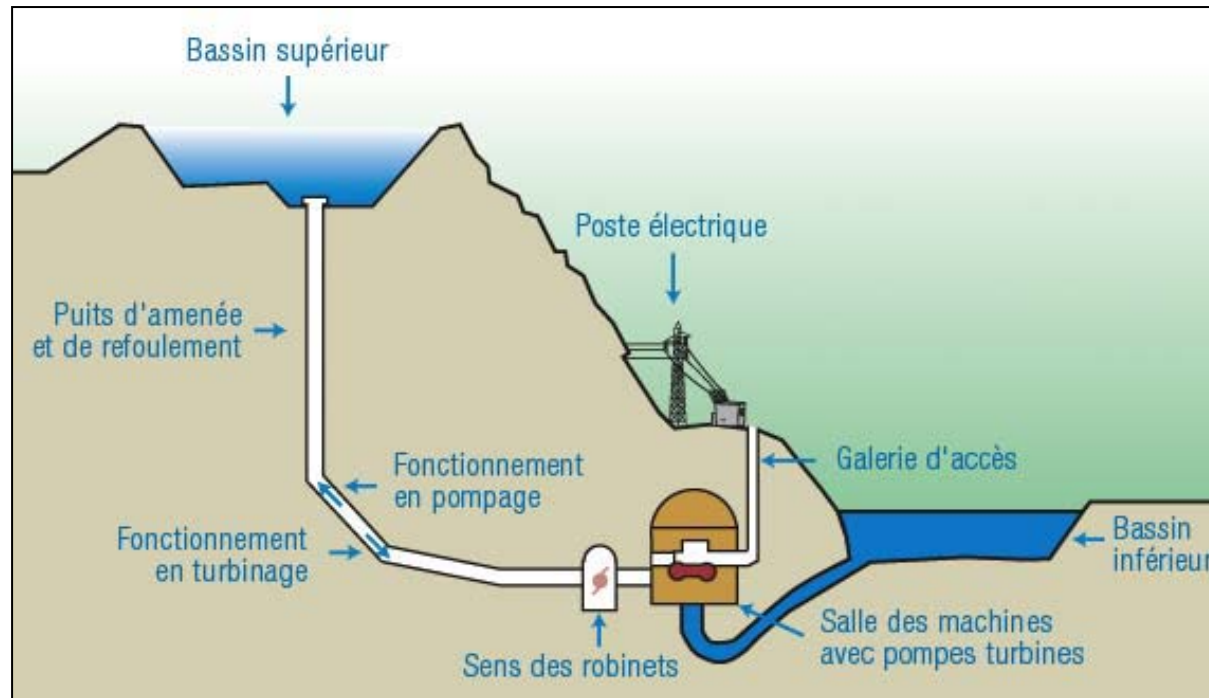
Capacité mondiale installée pour le stockage d'électricité



Source : IFPEN d'après diverses sources

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentielle : les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)



Efficacité du cycle complet (pompage-turbinage) : 75-80%.

Disponibilité de l'énergie très intéressante

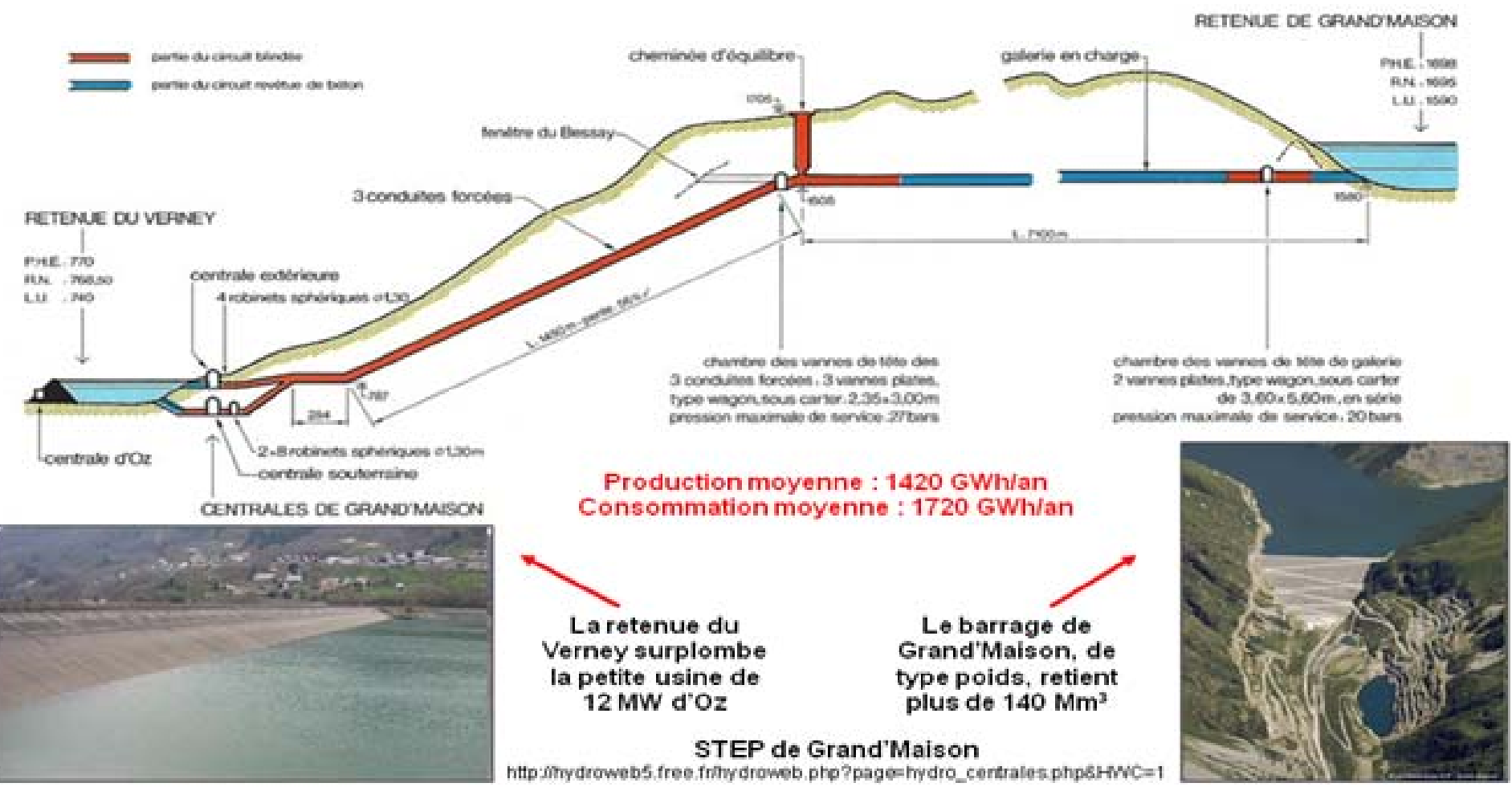
Difficulté majeure : présence de deux réservoirs proches → investissements lourds.

Dans le monde : puissance totale : **100 à 150 GW** → **4 à 6%** de la *puissance électrique moyenne*

En France : **3 GW** → **6%** de la *puissance électrique moyenne*

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentielle : les STEP → exemple en France



Puissance totale de turbinage : 1700 MW
Puissance de pompage : 1200 MW
4 groupes Pelton de 155 MW (non réversibles) et 8 groupes Francis de 130/160 MW (réversibles)

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentielle : les STEP → exemple en europe



Dynorwig au Pays de Galles (RU) - Wikipedia

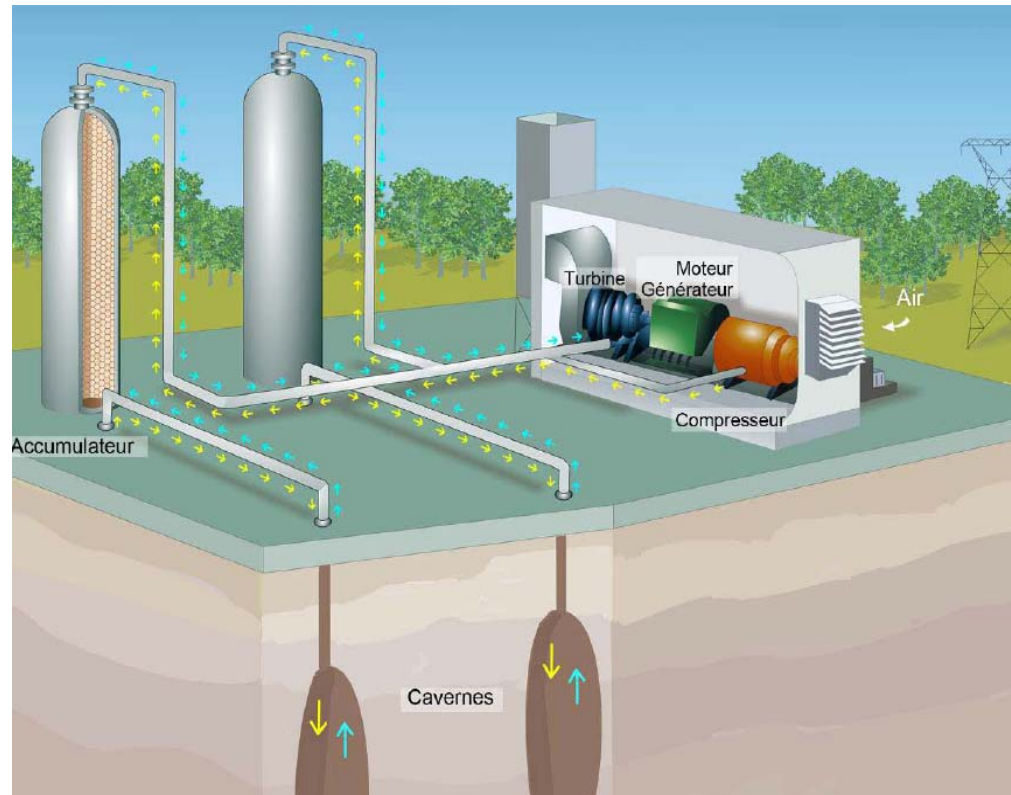
Puissance totale : 1700 MW (6 groupes Francis de 288 MW)

Temps de démarrage et de synchronisation : 75 secondes !

La centrale de Dinorwig a été conçue pour redémarrer le réseau national du Royaume-Uni en cas de panne totale et elle dispose donc de groupes diesels et de capacités supplémentaires sous forme de batteries.

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentiel le: les CAES (*Compressed Air Energy Storage*)

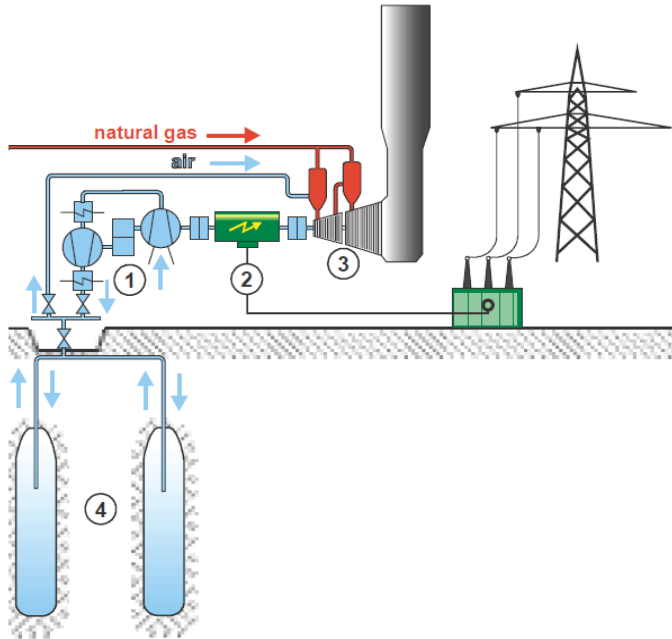


Problème : sans précaution particulière, le rendement n'est pas très bon à cause de l'échauffement de l'air pendant la compression : il serait de 40%.

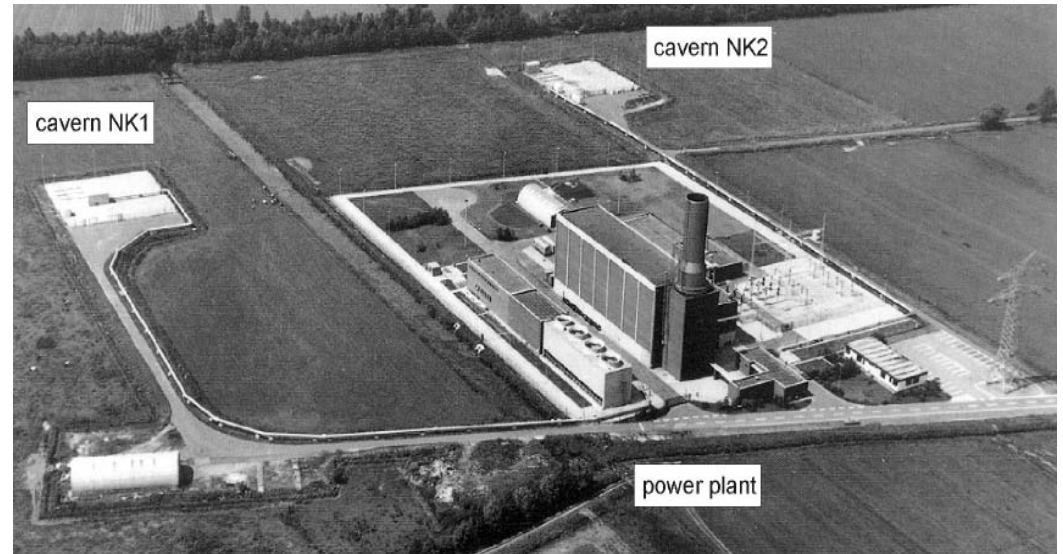
Solutions possibles : stocker la chaleur de compression et la redonner à l'air pendant la détente, ou bien hybrider.

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentielle : les CAES → *exemple*



Huntorf, Allemagne



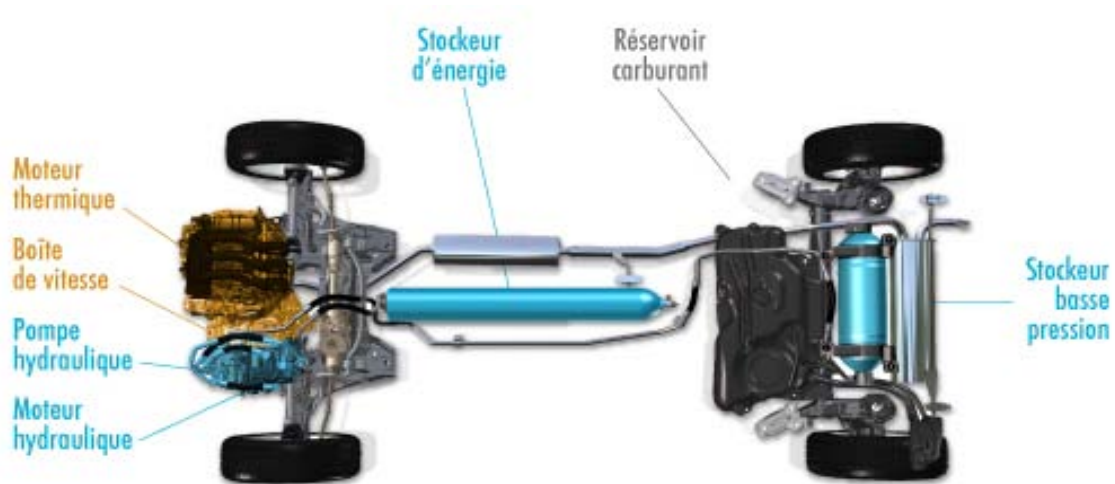
Le (dé)stockage d'air comprimé est associé à une turbine à gaz, le but étant d'économiser le travail de compression et d'améliorer le rendement de la turbine. Cela permet de multiplier par 3 la puissance produite. La pression dans les cavernes varie normalement entre 40 et 70 bar, pour un volume total d'environ 310000 m³. Il y a deux cavernes. L'air est stocké entre -650 m et -850 m de profondeur. En compression, la puissance est de 60 MW, contre 290 MW en détente + gaz. Le site fonctionne depuis 35 ans .

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

1. Stockage sous forme d'énergie potentiel : pour les transports



Tramway à air comprimé utilisé à Nantes entre 1878 et 1917



Concept hybrid air de PSA (2013)



Projet de voiture à air comprimé

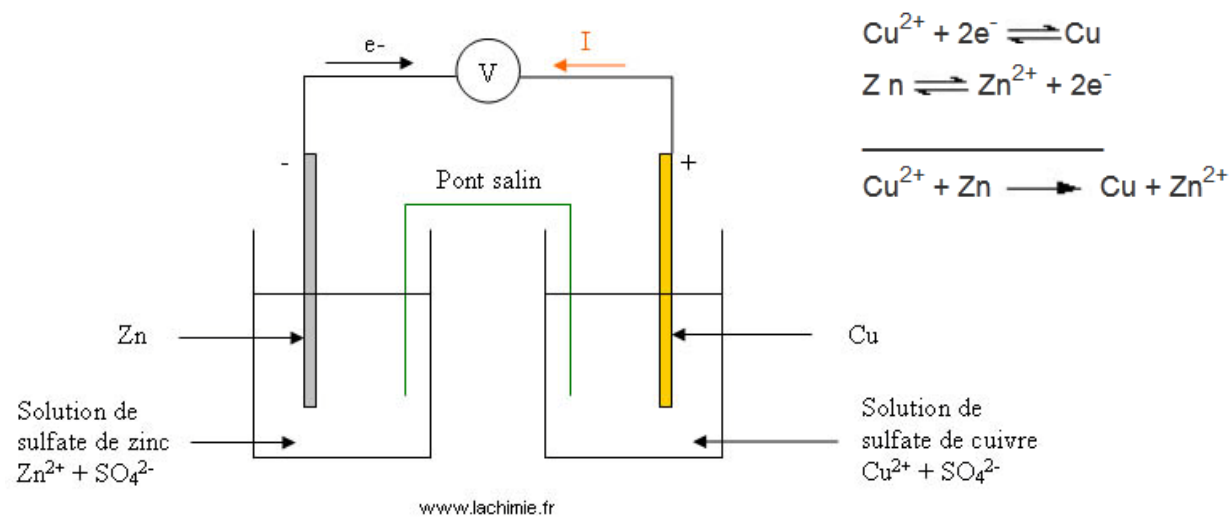
La généralisation de ce type de stockage individuel permettrait de stocker au final une grande quantité d'énergie → réseaux intelligents (smart grid)

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries



La pile Daniell (E = 1.1 V)



→ Rendement de stockage : 50-80% (dépend de la technologie et des conditions d'utilisation)

→ Densité énergétique : 30 Wh/kg pour les batteries au plomb, et 200 Wh/kg pour les batteries au lithium. (PCI (essence) : 12 000 Wh/kg, soit 600 × + !)

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries

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

Les batteries sont limitées par les questions de stabilité et de toxicité des matériaux.

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries → exemple



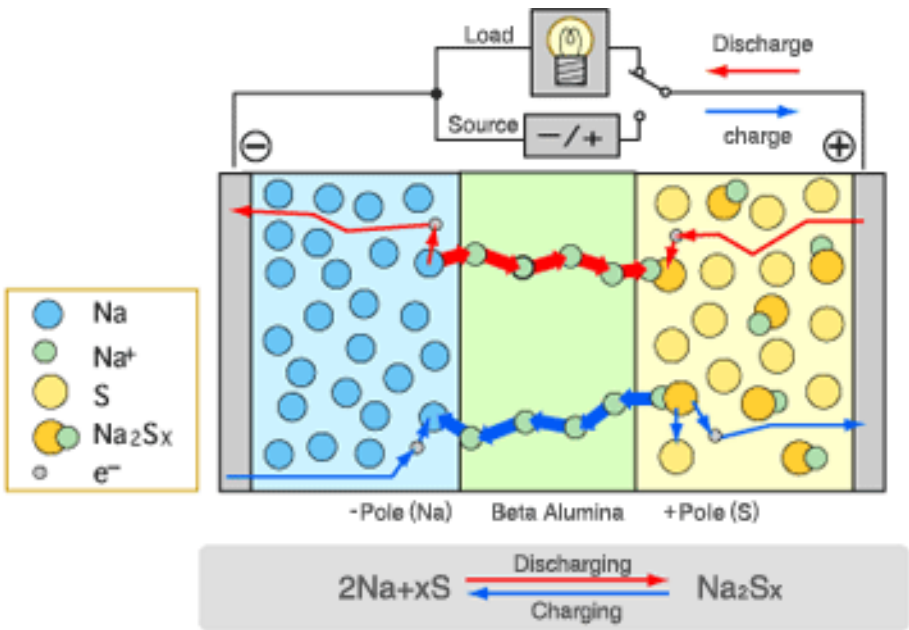
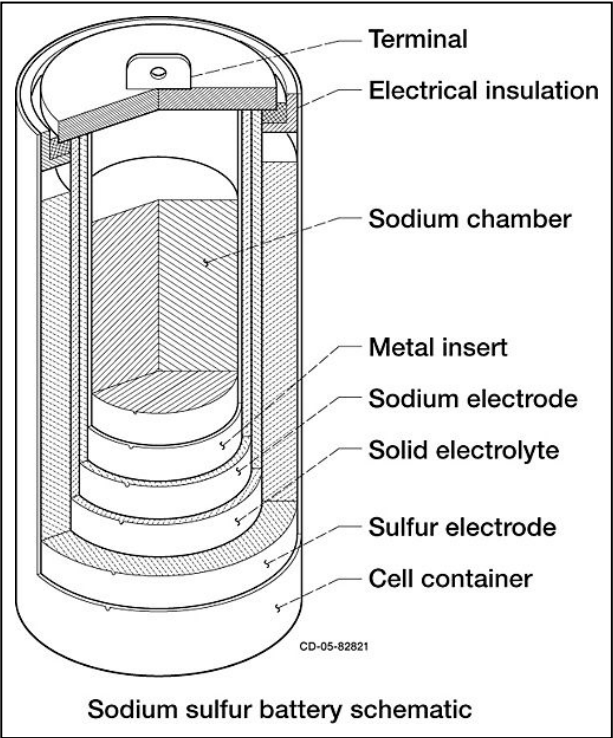
A Fairbanks en Alaska, un système capable de fournir 46 MW pendant 3 minutes et 27 MW pendant 15 minutes est utilisé depuis 2003 pour stabiliser la fréquence du courant sur le réseau. Il est constitué de 13760 batteries nickel-cadmium (Saft) fournissant une tension de 5000 V avec une capacité de 3680 Ah. Le coût total du système serait de 30 M\$.

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries → stockage à grande échelle

Batteries classiques : cher, maintenance importante, durée de vie limitée.

Applications à grande échelle : batteries spécifiques : sodium-soufre ou batteries à flux continu.



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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries → stockage à grande échelle

Avantage principal des batteries sodium-soufre : durée de vie, densité énergétique correcte (100 Wh/kg) et bonne efficacité de charge/recharge (environ 85%).

Inconvénients : température de fonctionnement de 300°C à 350°C, sulfate de sodium corrosif. Le sodium est liquide au dessus de 100°C, le soufre au dessus de 120°C. Les batteries sodium-soufre ont été envisagées pour la traction automobile puis ont été abandonnées au profit des batteries au lithium.

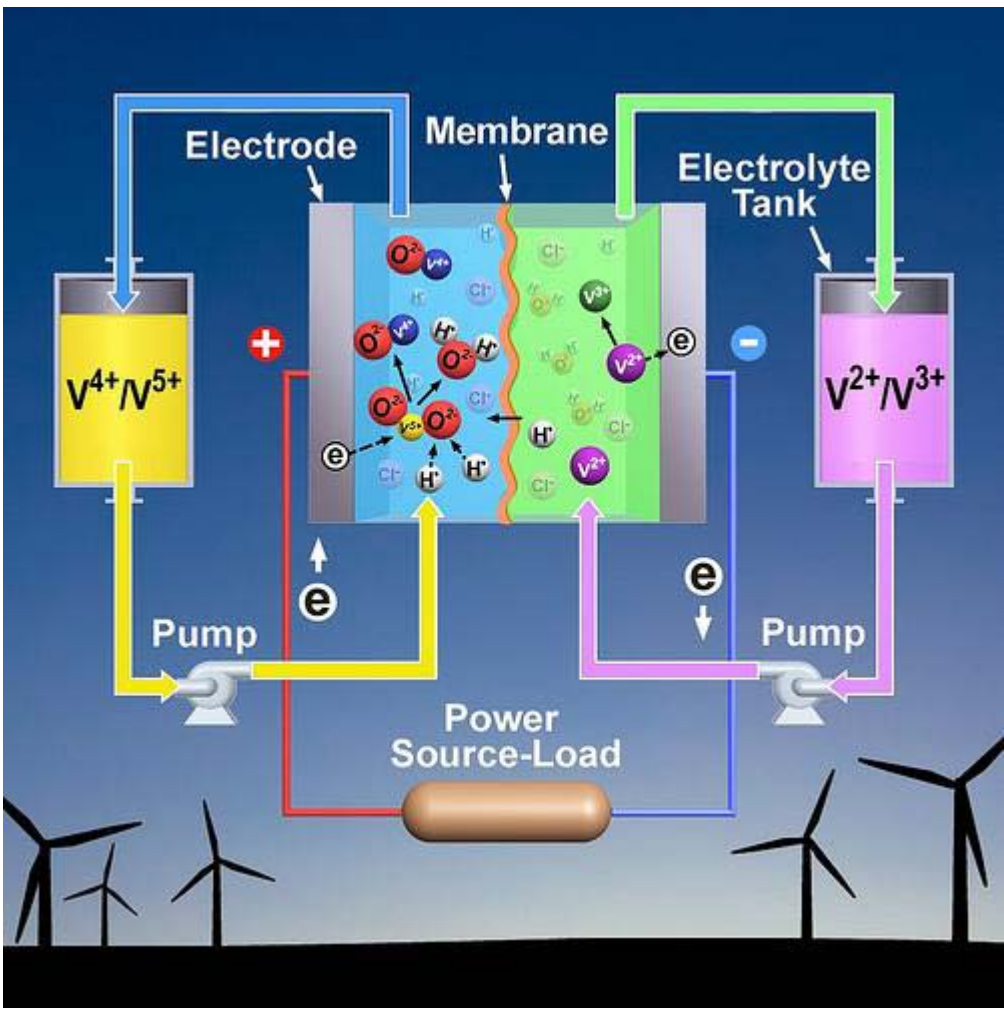
Batterie sodium-soufre de 1MW – 7 MWh à la Réunion



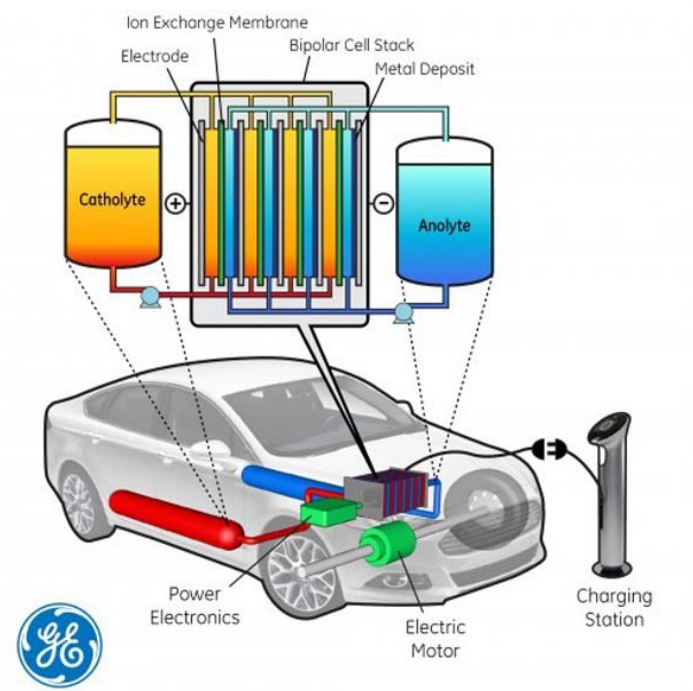
20 modules de 3,6 tonnes chacun. Coût de 3,5 à 4 M€. 1 MW pendant 7 heures. Temps d'activation : 3 secondes. (Energie hydraulique : 3 minutes (80 MW)- turbines de secours au gasoil : 10 minutes)

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries → batterie à flux continu



Early Model of Water-Based Flow Battery Designed For Use in Electric Vehicles



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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : les batteries → batterie à flux continu

Le rendement d'un cycle de charge/décharge (*round-trip efficiency*) d'une batterie vanadium à flux continu (*Vanadium Redox Battery - VRB*) serait de l'ordre de 70 %. Il existe plusieurs installations de puissance et capacité variables dans le monde utilisant des VRB. La plus connue est utilisée sur un site éolien (*wind farm*) à King Island en Australie (1MWh).

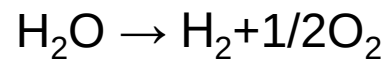
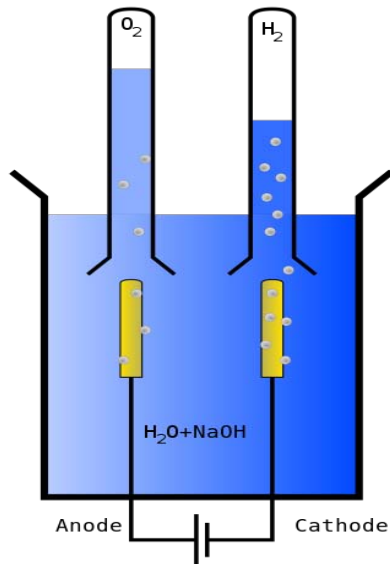


www.vrbpower.com

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : l'hydrogène

La conversion « énergie électrique » → « énergie chimique » : électrolyseur

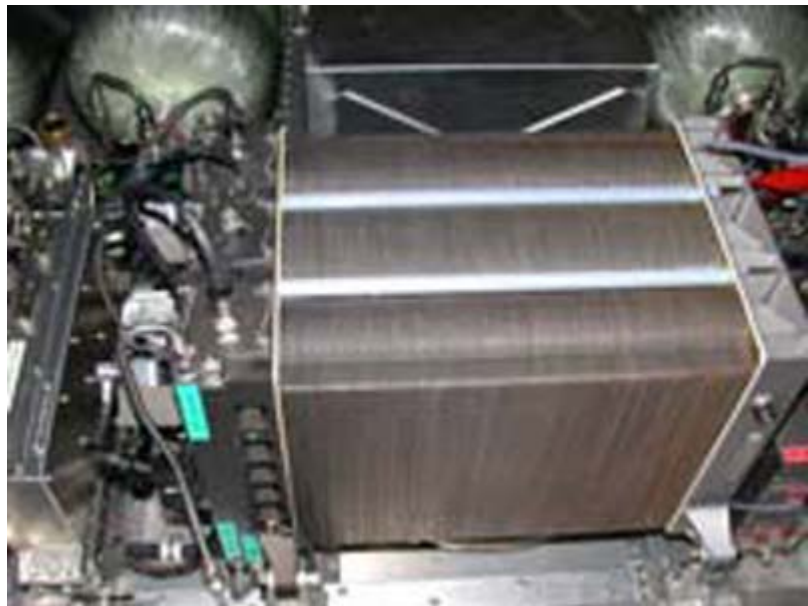
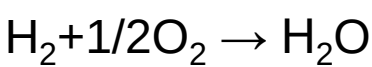
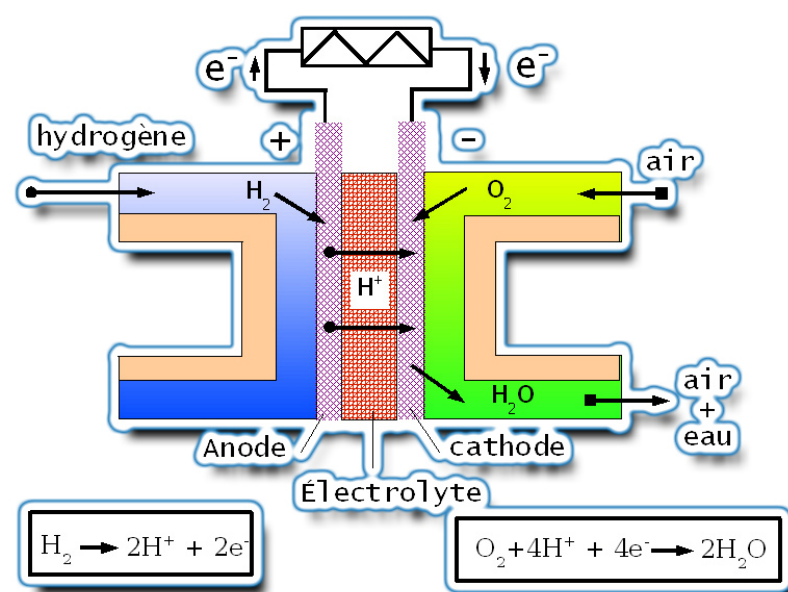


électrolyseur

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : l'hydrogène

La conversion « énergie chimique » → « énergie électrique » : pile à combustible



Pile à combustible

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : l'hydrogène : un vecteur énergétique

- stocker les énergies renouvelables intermittentes.
- seule alternative aux carburants d'origine fossile et aux agrocarburants pour les véhicules lourds et à grande autonomie.
- utilisation beaucoup plus rationnelle des centrales nucléaires de génération IV grâce à la cogénération (cycles thermochimiques) et à l'électrolyse haute température.

Cas 1 : véhicule urbain		
Puissance	50 kW	50 kW
Autonomie	100 km	500 km
Consommation	6 l/100 km	6 l/100 km
Masse des batteries	120 kg	600 kg
Masse de la pile et du réservoir	115 kg	170 kg
Ratio masse batteries/pile	1,05	3,5

	Cas 2 : berline	Cas 3 : poids-lourd
Puissance	100 kW	300 kW
Autonomie	1000 km	1000 km
Consommation	7 l/100 km	30 l/100 km
Masse des batteries	1400 kg	6000 kg
Masse de la pile et du réservoir	370 kg	1300 kg
Ratio masse batteries/pile	3,8	4,5



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

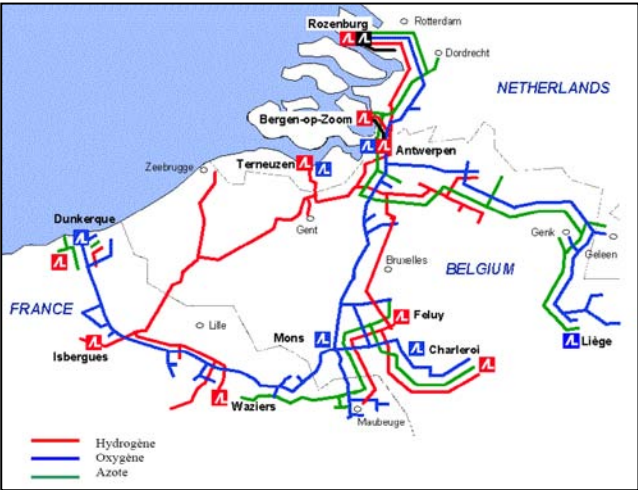
2. Stockage sous forme d'énergie chimique : l'hydrogène : un vecteur énergétique

On produit actuellement dans le monde environ $630 \cdot 10^9$ Nm³ d'hydrogène, ce qui représente tout de même 164 Mtep, dont 83 Mtep sont utilisés pour le raffinage.

Secteur industriel	Consommation (milliards de Nm ³ /an)	Consommation (millions de tonnes / an)	%
Production d'ammoniac	212	19	34
Autres produits chimiques	98	8,8	15 (dont 1% pour l'espace)
Raffinage	320	28,8	51
Total	630	56,7	100

96 % de cet hydrogène est produit par vaporeformage : 48 % à partir de gaz naturel, 30 % à partir de pétrole et 18 % à partir de charbon

L'Union Européenne possède un réseau de distribution d'hydrogène d'environ **1500 km**



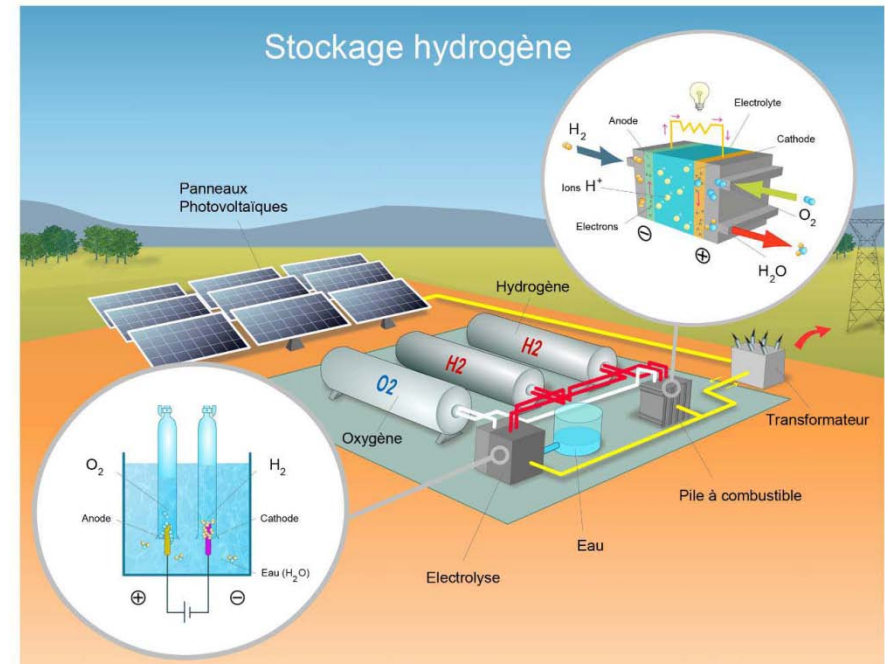
V. Le stockage de l'énergie : gestion de l'intermittence

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : l'hydrogène : exemple de MYRTE

La plate-forme MYRTE en Corse (Mission hYdrogène Renouvelable pour l'inTégration au réseau Electrique) :

→ PV de 560 KWc sur (3700 m²).

→ Electrolyseur de 200Kw & pile à combustible de 100kW



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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : Le « power to gas »

→ Produire de l'hydrogène à partir d'un surplus d'électricité par électrolyse de l'eau pour l'injecter sur le réseau de gaz naturel. Il est possible d'introduire jusqu'à 20% (en volume) d'hydrogène dans le gaz naturel sans problèmes particulier pour les utilisateurs. Le mélange gaz naturel-hydrogène est appelé *Hythane*. Une des premières installations a été mise en service en août 2013 par EON, à Falkenhagen dans l'Est de l'Allemagne. 2 MW → 360 m³_{H₂}/h.

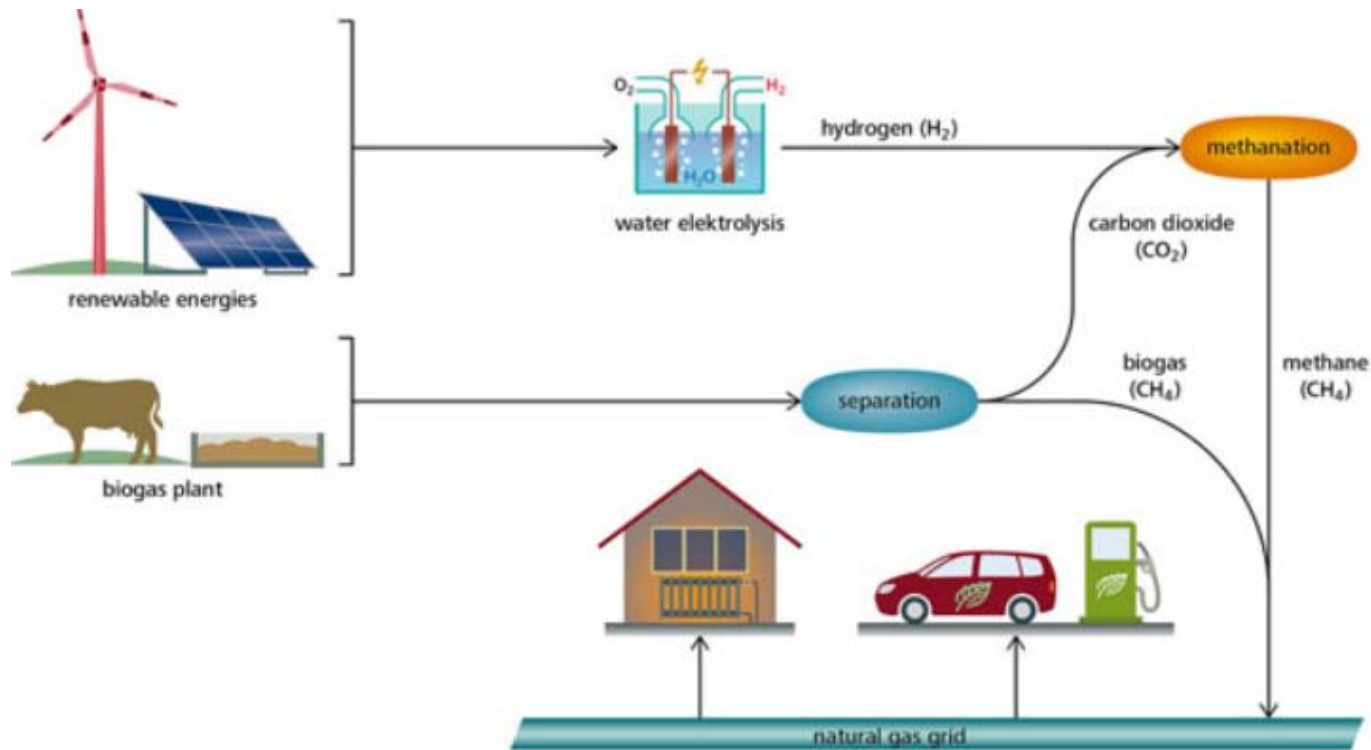


<http://www.eon.com/en/media/news/press-releases/2013/8/28/eon-inaugurates-power-to-gas-unit-in-falkenhagen-in-eastern-germany.html>

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : Le « power to gas »

Il est également possible à partir de l'hydrogène et d'une source de CO_2 de fabriquer du méthane dont le pouvoir calorifique volumique est plus important que celui de l'hydrogène. Le stockage du méthane est moins coûteux que le stockage de l'hydrogène.



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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : Le « power to gas »

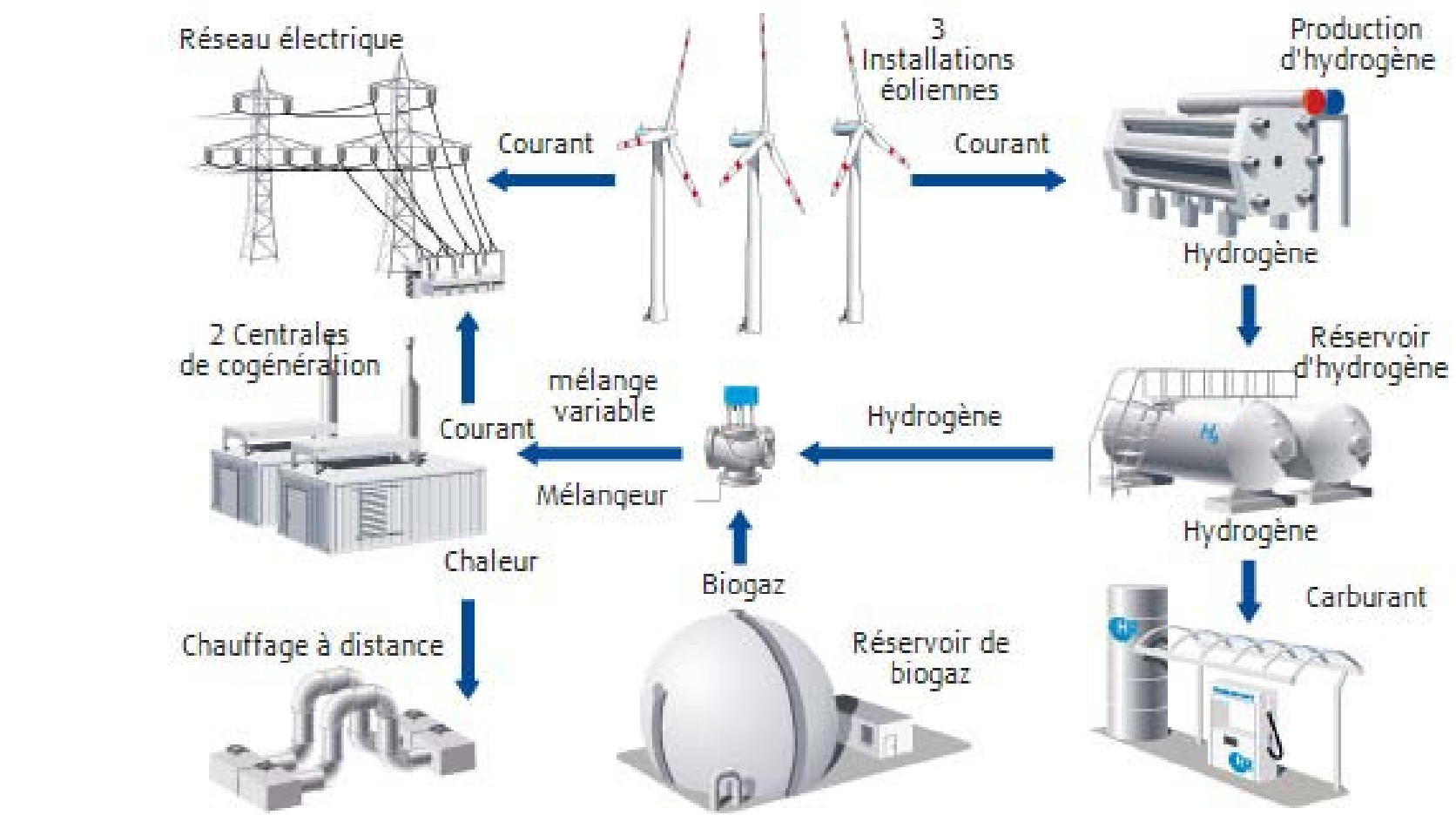
Les rendements de stockage-destockage dans le cas d'un retour à l'électricité par l'intermédiaire d'une pile à combustible sont assez faibles, mais convenables lorsque l'hydrogène est utilisé pour sa chaleur de combustion.

Rendement selon l'utilisation du courant électrique³.

Transformation	Rendement	Remarque
Courant électrique > Gaz		
Hydrogène	54–72 %	comprimé à 200 bar
Méthane (SNG ^{Note 2})	49–64 %	
Hydrogène	57–73 %	comprimé à 80 bar (réseau de gaz)
Méthane (SNG)	50–64 %	
Hydrogène	64–77 %	sans compression
Méthane (SNG)	51–65 %	
Courant électrique > Gaz > Courant électrique		
Hydrogène	34–44 %	comprimé à 80 bars
Méthane (SNG)	30–38 %	transformé à 60 % en courant
Courant électrique > Gaz > Courant électrique & Chaleur(cogénération)		
Hydrogène	48–62 %	comprimé à 80 bar et
Méthane (SNG)	43–54 %	Courant électrique/Chaleur à hauteur de 40/45 %

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : exemple de système énergétique



Grafik: Römer

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

2. Stockage sous forme d'énergie chimique : Le transport d'énergie

Le transport d'énergie sous forme de gaz permet de déplacer de colossales puissances. Les grandes canalisations de gaz peuvent transporter des puissances de 70 GW thermiques, contre 3,5 GW pour les lignes à haute tension de 380 kV.



3,5 GW électrique



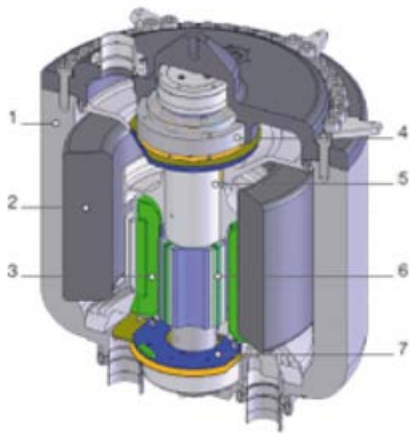
70 GW thermique

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

3. Stockage sous forme d'énergie cinétique : les volants d'inertie

Il est aussi possible de stocker l'énergie mécanique sous forme cinétique dans des volants d'inertie (Flywheel) entraînés par des moteurs électriques réversibles.

- roue en matériaux composites : 20-50 ktr/min
- paliers magnétiques & enceintes sous vide
- densité énergétique d'environ 130 Wh/kg
- rendement d'un cycle complet serait de l'ordre de 90 %
- Application : groupe de secours, pic de puissance, stabilisation du reseau...



1. Boîtier
2. Volant d'inertie en fibre de carbone composite
3. Stator magnétique
4. Palier magnétique supérieur
5. Système de création du vide
6. Rotor
7. Palier magnétique inférieur

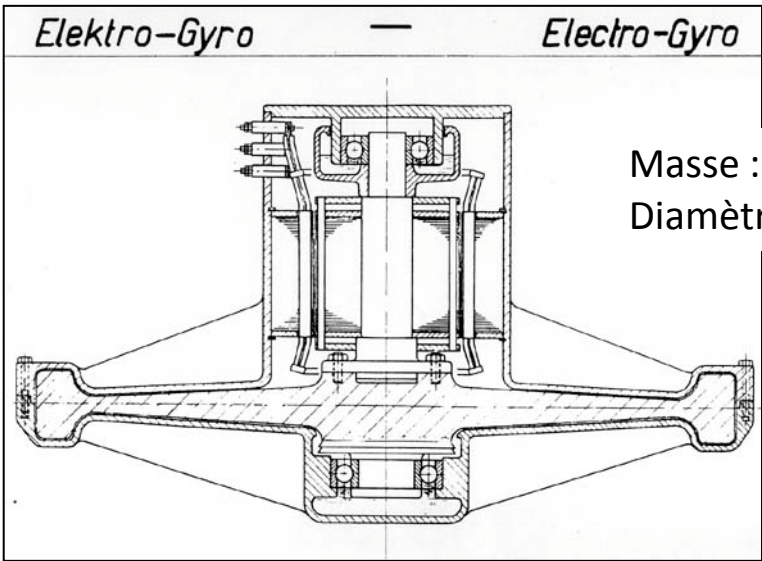


V. Le stockage de l'énergie : gestion de l'intermittence

3. Stockage sous forme d'énergie cinétique : les volants d'inertie : exemples



Gyrobus, à Yverdon, en Suisse, dans les années 50, disposant d'un volant d'inertie tournant à 3000 tr/min et couplé à un moteur électrique alimenté seulement pendant les arrêts (pendant 30 à 180 secondes). En récupérant l'énergie de freinage, ils pouvaient rouler jusqu'à 6 km en atteignant 50 km/h environ.



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

3. Stockage sous forme d'énergie cinétique : les volants d'inertie : exemples

Porsche 911 GT3 R hybrid - 644 ch (473 kW) - Traction intégrale.

Le volant d'inertie est entraîné pendant les phases de freinage, il ne pèse que 53 kg (carter + électronique compris), contre 200 kg pour une batterie Li-ion capable de fournir la même puissance. Le volant fonctionne en générateur pendant les phases d'accélération pendant 6 à 8 secondes. Les deux moteurs/générateurs du train avant fournissent chacun 60 kW (82 ch). La voiture a participé aux 24h du Nürburgring les 15-16 mai 2010 – abandon après 22h de course alors qu'elle était en tête. Première victoire le 28 mai 2011 en championnat VLN.



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

4. Stockage sous forme d'énergie thermique

En construction

VI. Réduction de la consommation

En construction

VII. Les scénarios pour le futur

En construction