



Energie.
Place de l'électricité,
quelles solutions pour un
développement soutenable

Séminaire SATIE
Cachan 5 mai 2011

Bernard MULTON
ENS de Cachan
SATIE - CNRS
Site de Bretagne

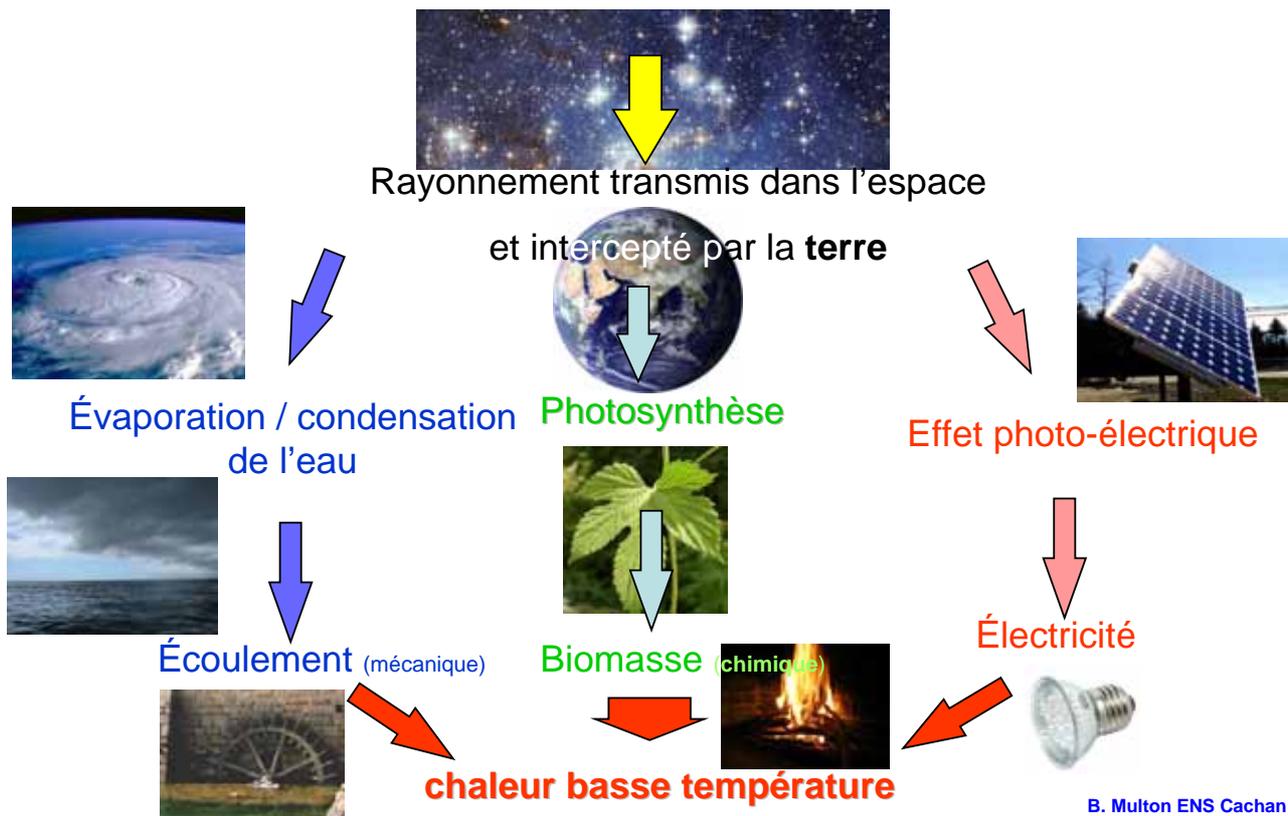


L'énergie,
un concept physique unifié,
pour décrire les transformations...

indispensable à la vie
et aux activités humaines

« Cycles de vie » de l'énergie : exemples

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles



Unités physiques de l'énergie et équivalences

L'unité du Système International : le **joule (J)**

Pour des raisons pratiques, nous utiliserons :

- le **térawattheure : TWh**
- la **tonne équivalent pétrole : tep** (Mtep, Gtep)

1 TWh = 1 milliard kWh

(1 TWh = 10^{12} Wh = 10^9 kWh)

1 kWh = 3,6 MJ

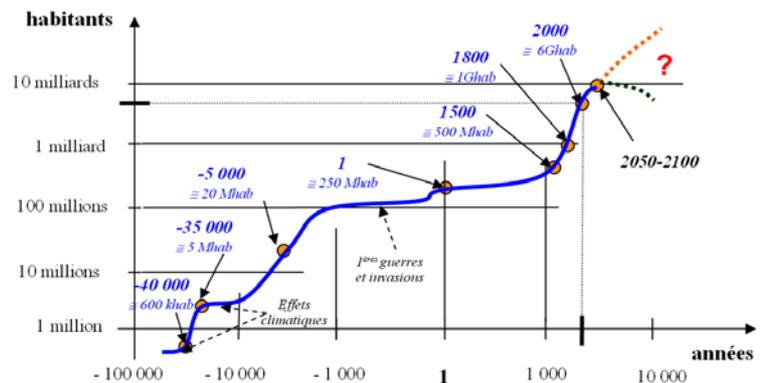
1 tep \cong 11 600 kWh - 1 Mtep \cong 11,6 TWh

Développement de l'humanité et ressources énergétiques

R. GIMENO, F. MITRANO, C. PORÉE, janvier 1999
Projection J. Bertin

Source : PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement)

Evolution la population humaine sur la terre:



Consommation énergétique des activités humaines :

Besoins métaboliques (nourriture) :
2,5 kWh/jour/personne

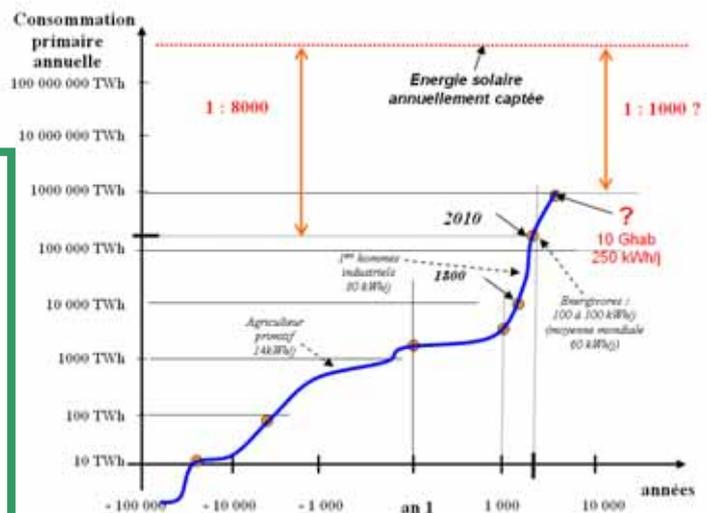
Autres activités énergétiques :
(énergie commerciale, hors biens importés)

Moyenne monde : 60 kWh/j

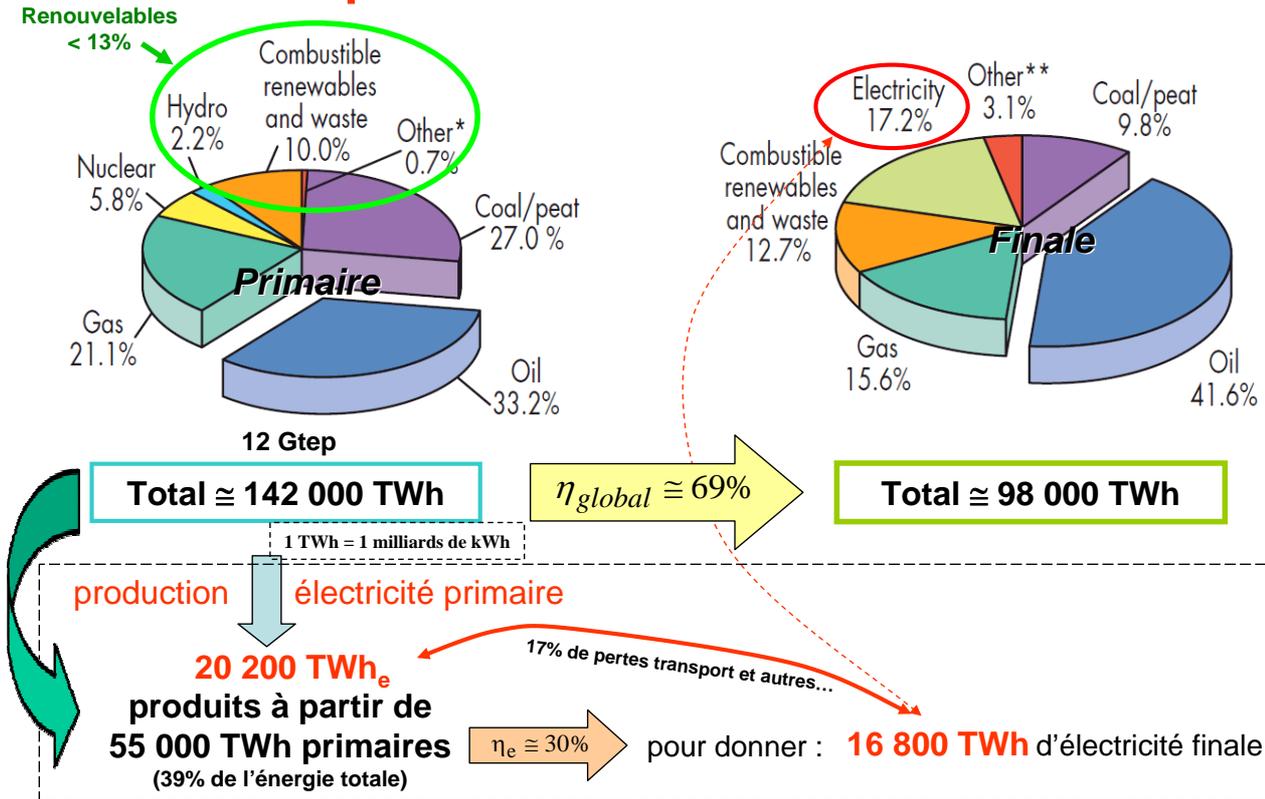
Africain : 14 kWh/j

US américain : 270 kWh/j

Français : 140 kWh/j



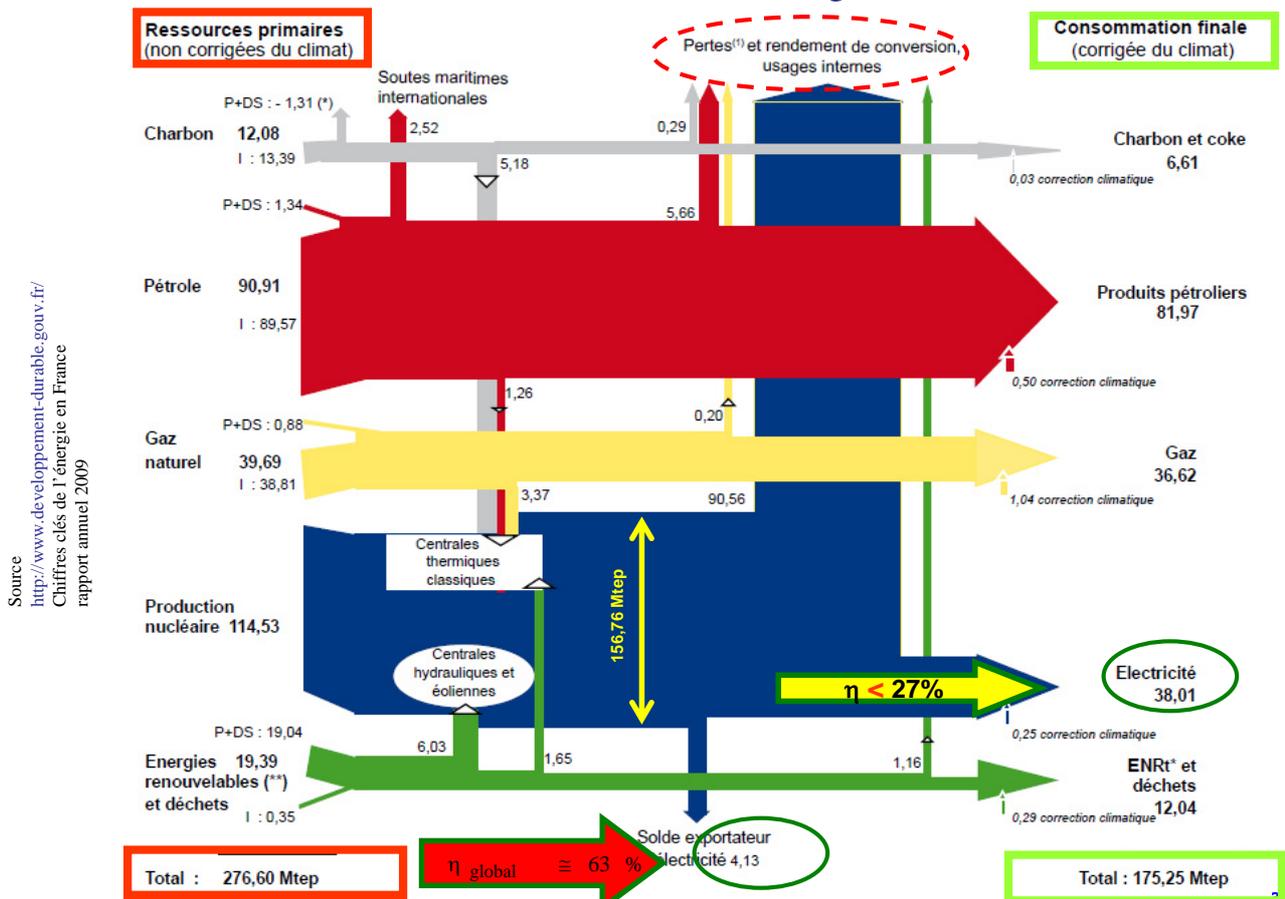
De l'énergie « primaire » à l'énergie « finale » place de l'électricité 2008



Source AIE (Key World Energy Stat. 2010)

B. Multon ENS Cachan

Consommation française (2008)



Ressources « épuisables » (non renouvelables)

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbon, pétrole, gaz naturel) :

entre 2000 et 5000 Gtep

(400 à 600 pétrole – 250 gaz – 3500 charbon)

URANIUM FISSILE : **environ 150 Gtep** (avec réacteurs actuels)

Pétrole, gaz, charbon, uranium... épuisés avant 2100 ?

Durant le 20^{ème} siècle,

prise de conscience planétaire :

- ressources limitées, notamment celles en énergie
- sévères perturbations environnementales

RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL :

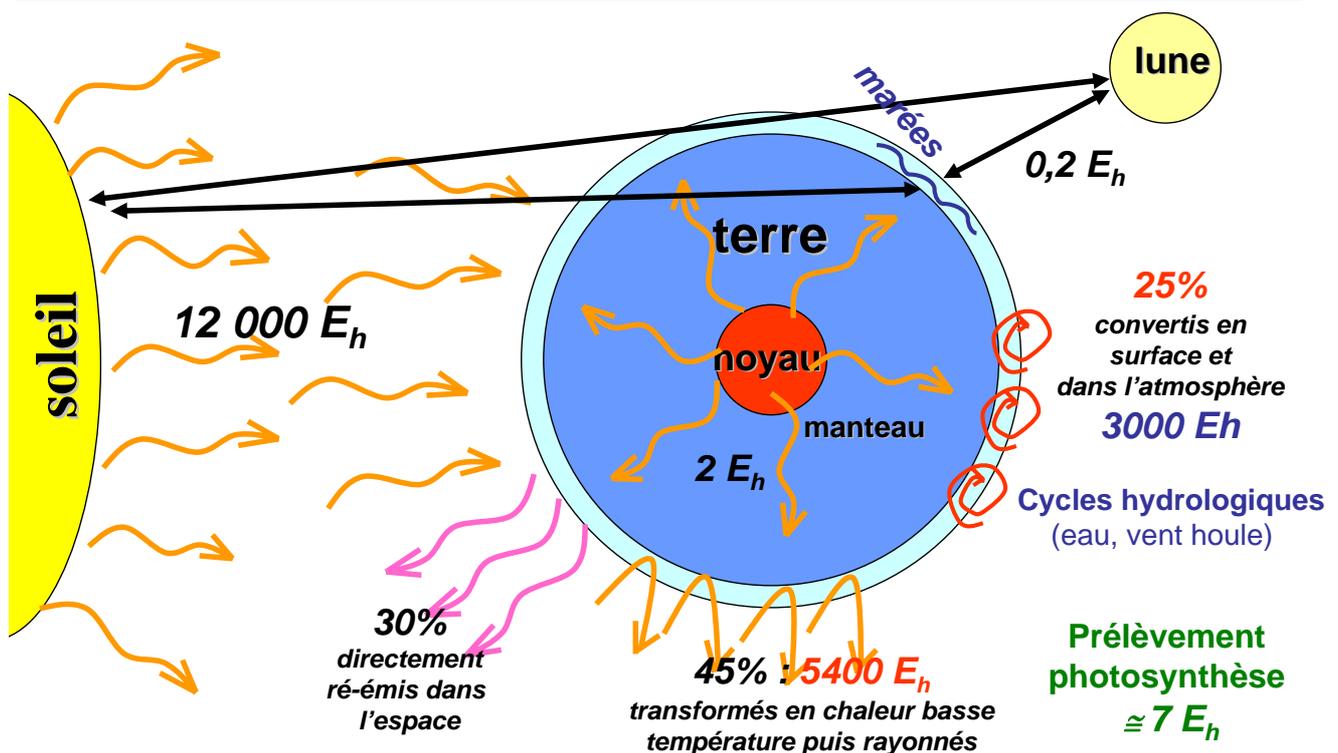
100 000 Gtep... par an !

B. Multon ENS Cachan



Ressources renouvelables (chiffres annuels)

Valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité $E_h \approx 12$ Gtep



B. Multon ENS Cachan

Diversité des besoins énergétiques

France 2008

(2/3 résid. 1/3 tertiaire)

44% Résidentiel, tertiaire

22% Industrie

31% Transports

Etc...

Monde 2004

34%

28%

27%

Des spécificités fortes, notamment en termes de potentiel d'économie (chez les plus riches)

Nombreuses possibilités de transformation

des **ressources renouvelables** en :

- carburants
- chaleur
- **électricité**

Sans révolution technologique majeure :

la plupart des solutions existent

B. Multon ENS Cachan

Le potentiel global **Ressources Renouvelables** « interceptable » à la surface du globe représente **plus de 8000 fois la consommation humaine !**

Avec un rendement global (arbitraire) de 10% de transformation de l'énergie solaire en carburant, électricité..., une fraction de la superficie d'un des grands déserts permettrait de **satisfaire les besoins énergétiques futurs de toute l'humanité** (10 milliards d'habitants avec la consommation moyenne d'un citoyen français)

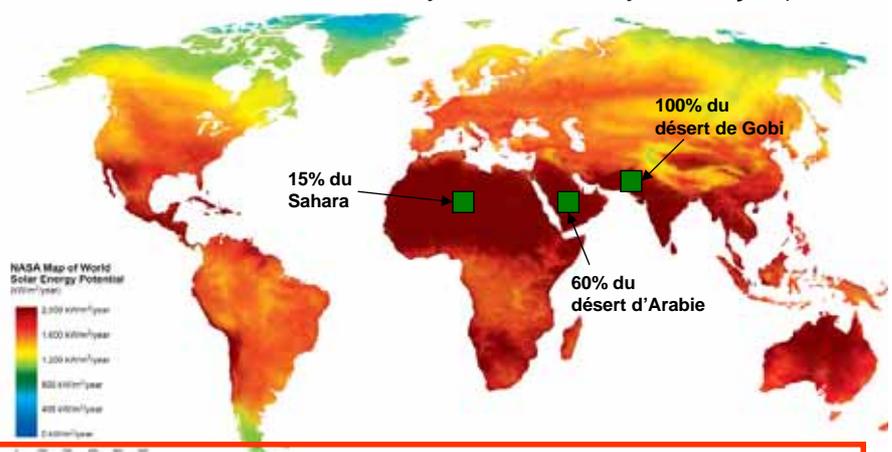
$$2200 \text{ kW/m}^2 \times 10\% = 220 \text{ kWh/m}^2$$

300 000 TWh/an

(3 fois plus qu'aujourd'hui)

➔ **1,4 millions km²**
(1200 km x 1200 km)

Remarque : il serait absurde des points de vue géopolitique et environnementaux de tout concentrer en un seul lieu...



Des ressources immenses, inépuisables à notre échelle, mais peu concentrées et souvent intermittentes

B. Multon ENS Cachan

A l'échelle d'un territoire comme la France

Pour considérer une zone énergivore et ne pas rester sur des raisonnements à la seule échelle planétaire

En métropole : un rayonnement solaire annuel entre 900 à 1700 kWh/m²

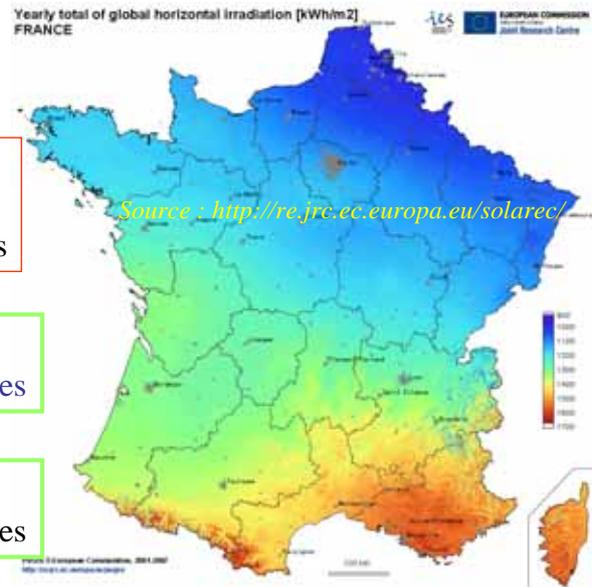
Superficie (hors mers) : 540 000 km²
=> plus de 540 000 TWh rayonnés annuellement
170 fois la consommation primaire d'énergie

Toitures seules : environ 1200 km² soit, sur la base de 1000 kWh/m² : 1200 TWh solaires (primaires) annuels accessibles

- Besoins (actuels) eau chaude sanitaire : 80 TWh
Avec η annuel de 50% : 13% des toitures nécessaires

- Electricité spécifique : 90 TWh_e
Avec η annuel de 10% : 75% des toitures nécessaires

1 TWh \approx 0,1 Mtep



B. Multon ENS Cachan

Potentiel des ressources renouvelables exploitables

Cas de la France (suite)

Biomasse



- 30 Mha cultivés, pour produire, en agrocarburants 1^{ère} génération, les 50 Mtep actuellement « brûlés » dans les transports ?!
(1 à 4 tep/ha selon plantes, en 2009 : agrocarburants = 2,5 Mtep)
- 14 Mha de forêts pour 10 Mtep solides
(Conso chauffage bâtiments : 26 Mtep)



Hydraulique



Environ 80 TWh_e annuels
(Conso actuelle Industrie : 130 TWh
dont 24 TWh combustible nucléaire
Éclairage public : 6 TWh)



Eolien



Potentiel très élevé surtout en offshore : > 400 TWh_e
9,6 TWh produits en 2010



Houle



Estimations récentes 40 TWh_e (mais technologie pas mure)

Courants de marée



5 à 14 TWh_e

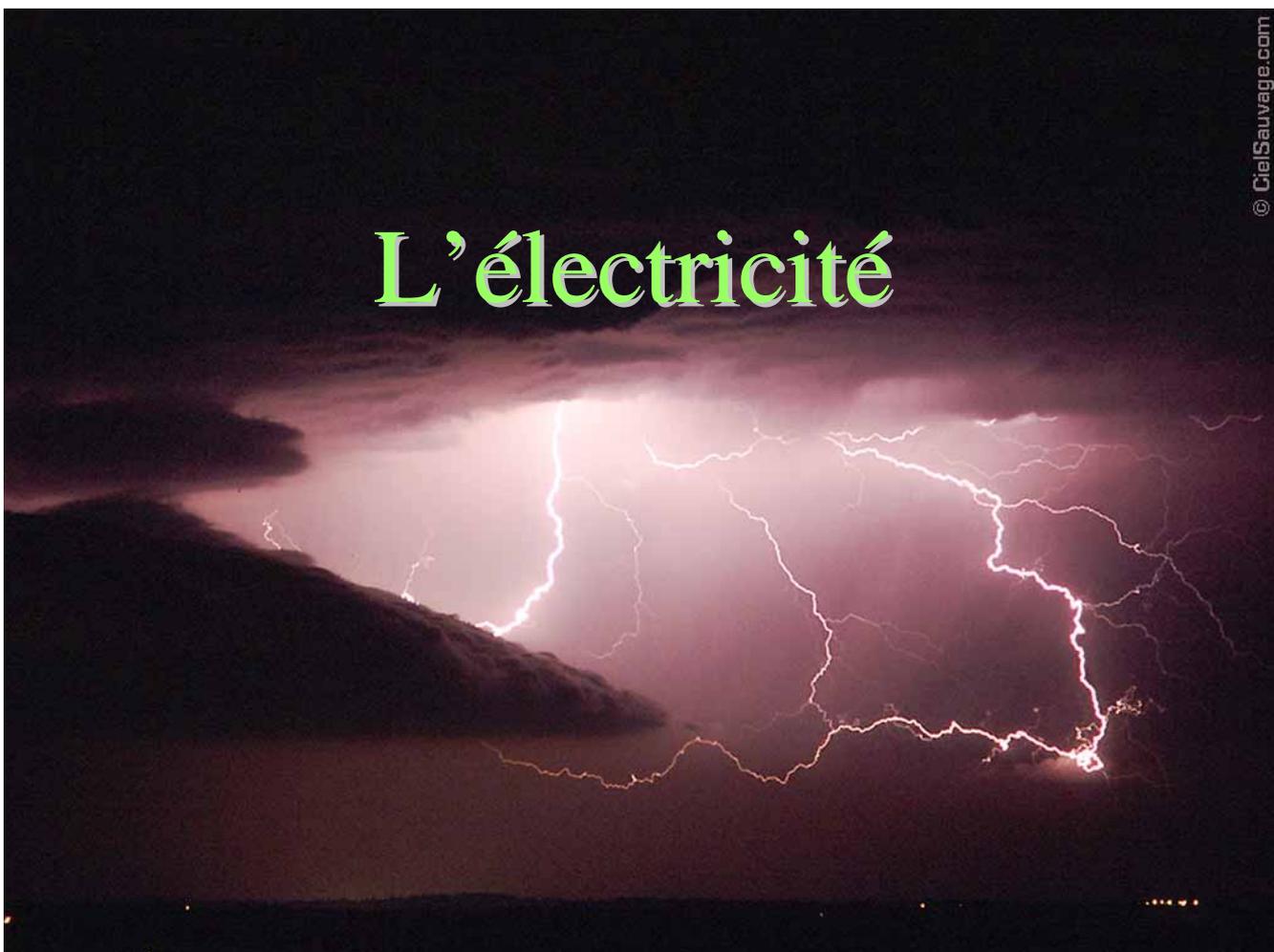
Géothermie



Chaleur « basse température » : déjà 2 10⁹ kWh_{th}

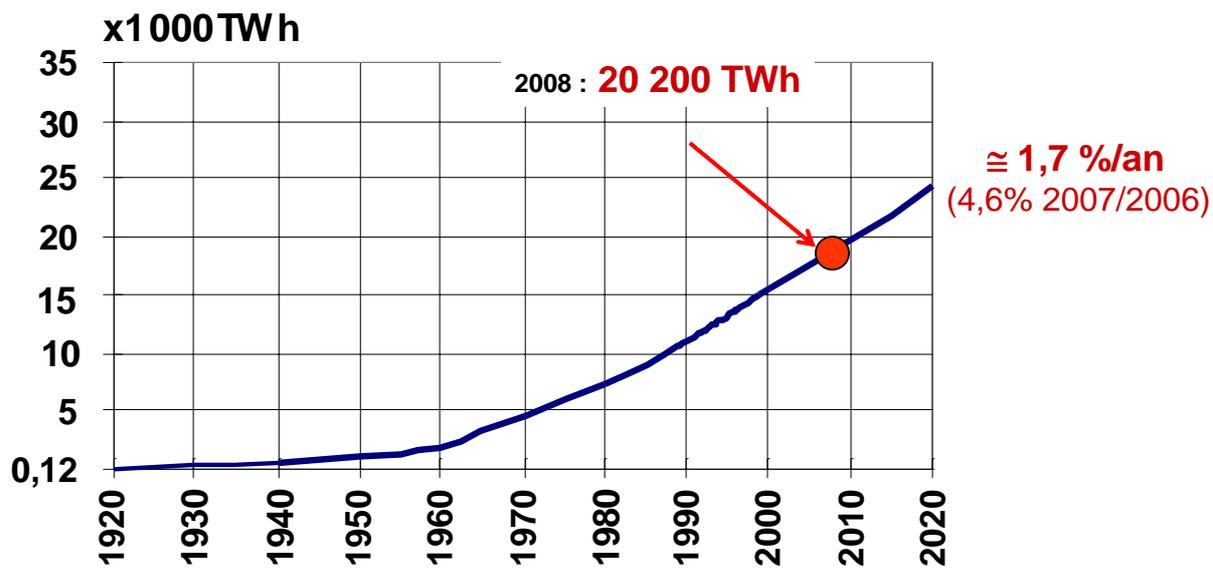
B. Multon ENS Cachan

L'électricité



L'énergie électrique : croissance de la production

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



Capacité de production mondiale : > **4100 GW** (Fin 2008, Chine 792 GW + 80 GW/an)
(France : 115 GW)

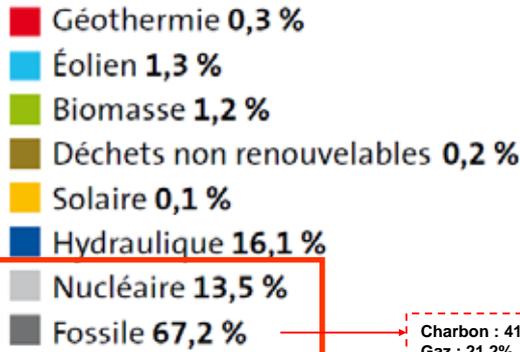
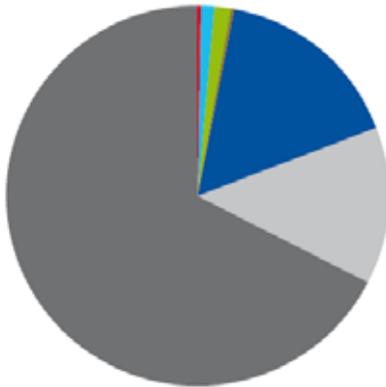
+ 4800 GW pour 2030 (source : AIE 2009)
dont 1300 GW en Chine

Production mondiale d'énergie électrique par source (2009)

19 958 TWh

(-1,1% / 2008

+ 1,7% 2008/2007 et 4,6% 2007/2006)



Charbon : 41%
Gaz : 21,2%
Pétrole : 5,4%

Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2010

81 % de l'électricité mondiale est d'origine non renouvelable

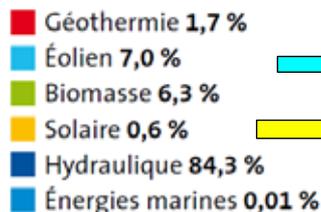
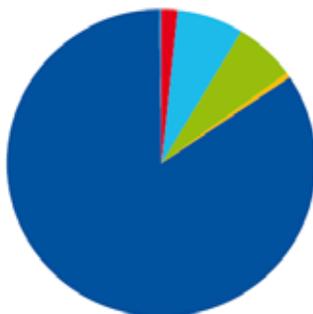
B. Multon ENS Cachan

Production mondiale d'énergie électrique renouvelable (2009)

3 810 TWh

(+1% / 2008

+ 4,4% 2008/2007 et + 3,6% / 2007/2006)

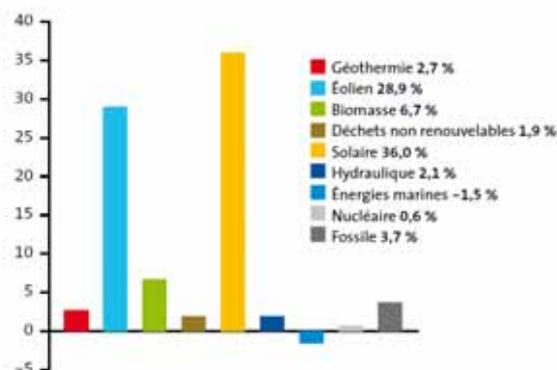


Avec + 20%/an pendant 10 ans (+30% 1999/2009),
puis + 10%/an pendant 10 ans :
la production éolienne atteindrait 4300 TWh en 2030

Avec + 30%/an pendant 10 ans (+36% 1999/2009),
puis + 20%/an pendant 10 ans :
la production solaire atteindrait 1800 TWh en 2030

Scénario AIE 2010
Production solaire 2050 : 9000 TWh

Taux de croissance annuel moyen 1999-2009



Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2010

B. Multon ENS Cachan

Production d'électricité d'origine renouvelable : quelques exemples

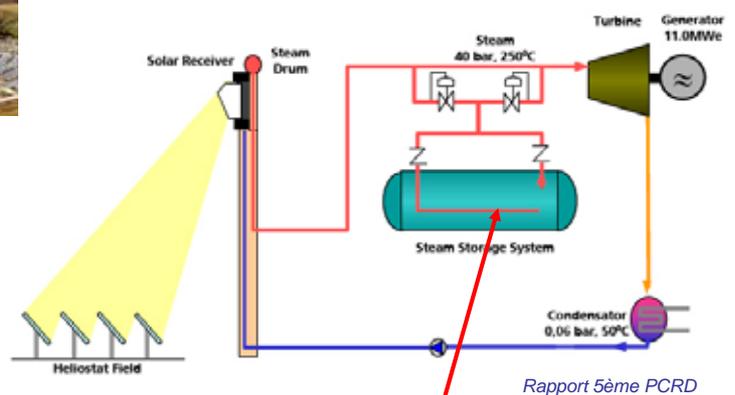
Génération thermodynamique solaire à concentration

Centrales à tour : champ d'héliostats + turbine à vapeur

Thémis (1982 Pyrénées, France)
1,8 MW_e miroirs 11 800 m²



PS10 (2007 Espagne, près de Séville) 35 M€
11 MWe (624 miroirs de 120 m²) 23 GWh/an



Possibilité d'un **stockage de chaleur**
en amont de la production électrique

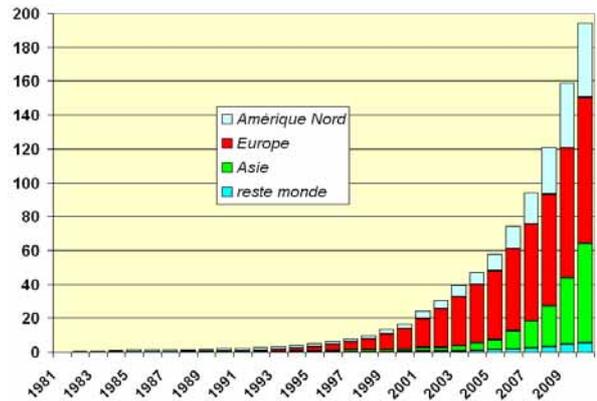
Dans PS10 : stockage 20 MWh



Aérogénération

Environ 194 GW installés fin 2010
(dont 3,2 GW en offshore)

Environ 2% de la production mondiale
En France : presque 2% en 2010

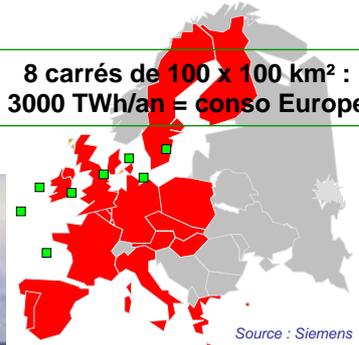


Puissance – Energie :

1 GW terrestre produit annuellement environ 2 TWh (2000 h)
1 GW offshore => 3 à 4 TWh (3 à 4000 h)

Très fort potentiel encore peu exploité en offshore,
le Danemark précurseur :

8 carrés de 100 x 100 km² :
3000 TWh/an = conso Europe



B. Multon ENS Cachan

Récupération de l'énergie des courants de marées

Seaflow project Marine Current Turbines Ltd (UK)



Source : SEAGEN <http://www.seageneration.co.uk/>

Turbines jumelles sur profils et piles de diamètre 3 à 4 m
Puissance = 2 * 600 kW (total 1,2 MW)
Diamètre = 16 m, Rotation = 10 à 20 tours/min
1^{ère} installation mai 2008 :
Narrows Strangford (Irlande)

Bretagne :

Sabella



Sabella 03 : test 2008-2009

Paimpol-Bréhat (EDF)



Phase 1 : 4 machines OpenHydro OCT-16
(4 x 850 kW à 2,9 m/s, 2,5 GWh/an)
Mise en service prévue 2012

B. Multon ENS Cachan

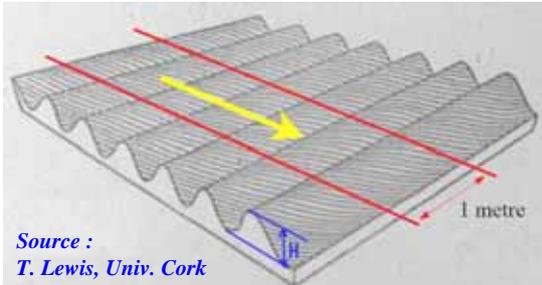
Houlogénération



La houle : du « vent concentré »

Exploitation encore marginale, travaux en cours

Puissance incidente en watts
par mètre de front de vague :



Source :
T. Lewis, Univ. Cork

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2}{64 \cdot \pi} \cdot H_s^2 \cdot T_e$$

(en houle aléatoire,
 H_s et T_e
caractéristiques
du spectre)

Exemple :

$$H_s = 2 \text{ m} \quad T_e = 9 \text{ s}$$

$$P_w = 15 \text{ kW/m (aléatoire)}$$

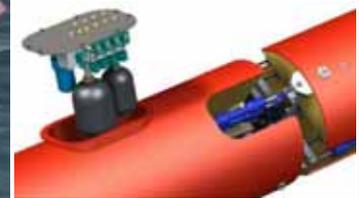
Exemple : système Pelamis

4 boudins diamètre 3,5 m,

longueur totale 150 m

750 kW – 2,7 GWh (avec houle de 55 kW/m)

(équivalent 3600 heures annuelles)



Source : www.oceanpd.com

B. Multon ENS Cachan

Production d'électricité 100% renouvelable ?

Un potentiel très largement suffisant d'énergie primaire est accessible et convertible en électricité avec de moindres perturbations environnementales

À tel point que l'électricité pourrait satisfaire de nouveaux usages :
transports individuel...

Déjà suffisamment de technologies de conversion existantes, avec
des écobilans largement positifs,
et à des niveaux de maturité et de coût acceptables
(éolien, photovoltaïque, solaire thermodynamique...)

L'idée fait son chemin : Allemagne pour 2050, en France (Négawatt)
(mais aussi Europe + Afrique du Nord)

Un problème important subsiste :
la variabilité de la production associée aux ressources
les plus largement disponibles (solaire et vent).

B. Multon ENS Cachan

Alors, comment résoudre ce problème ?

En accroissant les capacités de **stockage** d'électricité

En faisant évoluer la **structure des réseaux** et leurs protections...

En généralisant le **pilotage des charges** « non prioritaires »,
notamment grâce à des **tarifications** beaucoup plus fines

En exploitant pleinement les **prévisions météorologiques**

En utilisant des **combustibles renouvelables**
pour disposer de capacités de production « en stock »

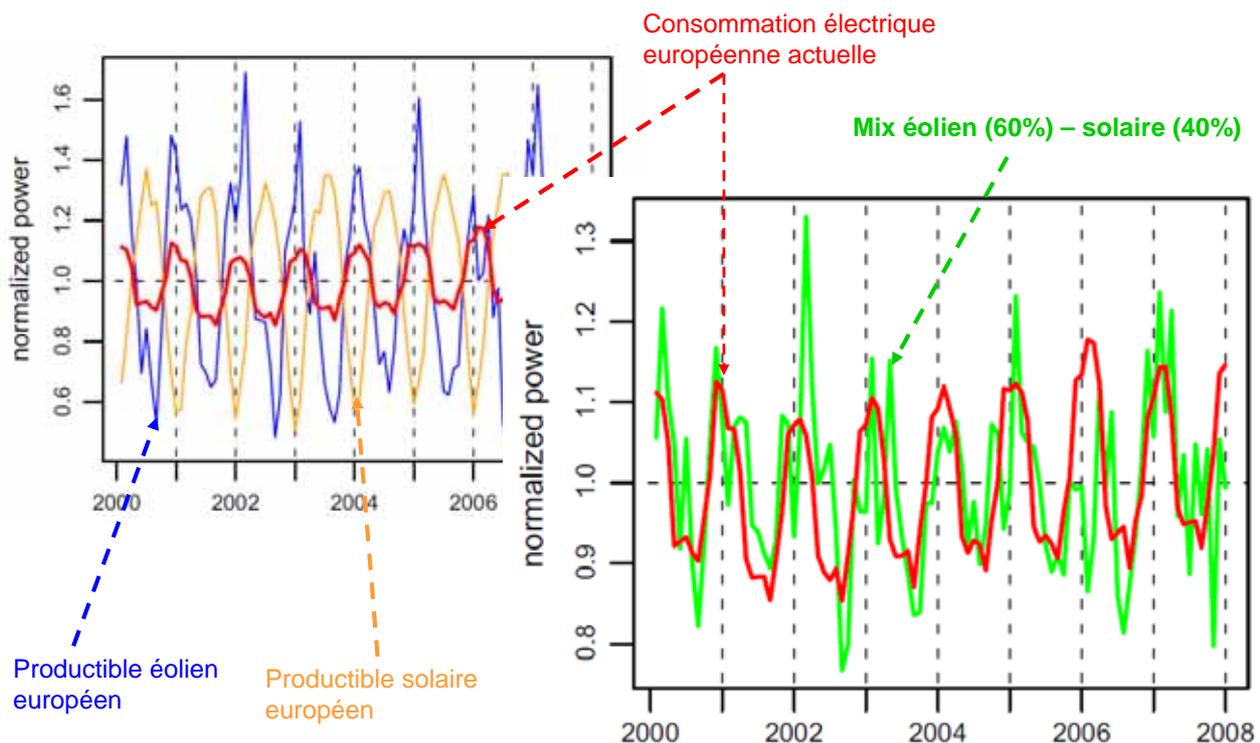
En améliorant la **complémentarité** des ressources...

C'est le réseau (plus ?) intelligent (smart grid)

Il pourrait être également moins vulnérable grâce à la
possibilité d'îloter des micro-réseaux capables d'autonomie

B. Multon ENS Cachan

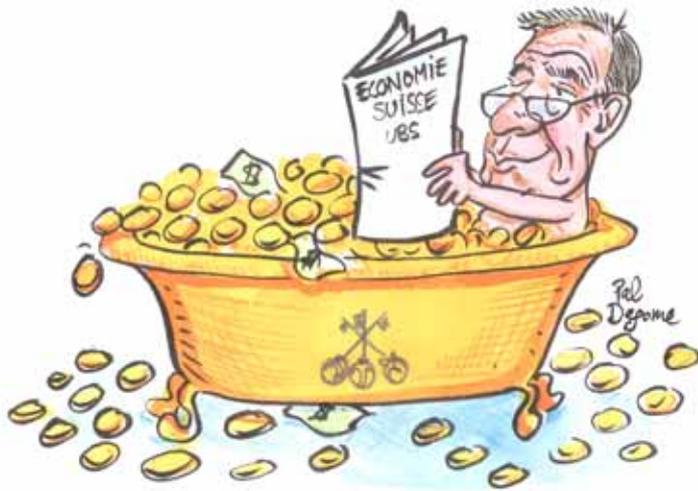
Complémentarité des ressources à l'échelle de l'Europe



Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe », Renew. Energy, Elsevier 2010.

B. Multon ENS Cachan

À quels coûts ?



Et avec quelles matières premières ?

B. Multon ENS Cachan

Monde : investissements économiques et en matières premières, quelques chiffres

Eolien et matières premières

260 tonnes d'acier (et 850 m³ de béton) par éolienne de 2 MW
Pour atteindre 10 000 TWh en 40 ans : 5000 GW éoliens et 2,5 M éoliennes de 2 MW
=> **650 M tonnes d'acier** (puis renouvellement sur 20 ans : 30 Mtonnes/an)

Production mondiale d'acier en 2006 : 1,8 Gtonnes (650 Mt sur 40 ans : 16 Mtonnes/an < 1 %)
Réserves mondiales : 73 Gtonnes => 5000 GW éoliens ⇔ 0,9%

Eolien et investissements

10 000 TWh : 5000 GW à 1 €/W => **5000 G€**
sur 40 ans (2050)

PIB mondial annuel : environ 60 000 G\$
sur 40 ans : 0,2% du PIB par an

Solaire et investissements

3000 TWh : 2000 TW à 3 €/W => **6000 G€**
sur 40 ans : 0,22% du PIB par an

Dépenses militaires :
> 1500 G\$/an (2,4% PIB)
(30 000 G\$ sur 20 ans)

B. Multon ENS Cachan

France

Exemple de scénario simpliste

450 TWh (puissance crête actuelle 95 GW) 100% renouvelables en 2050

Déjà 70 à 80 TWh hydrauliques (23,5 GW)

Restent 380 TWh :

- 70% éolienne 266 TWh (120 GW x 1,5 €/W = 180 G€)
- 20 % solaire 76 TWh (76 GW x 4 €/W = 300 G€)
- 10% biogaz et biomasse 38 TWh (6 GW x 1,5 €/W = 9 G€)
- stockage : 10 TWh – 50 GW ? (80 G€??)

Total : 570 G€
(en 40 ans : 0,8% PIB)

Hors taux d'intérêts et frais de maintenance (faibles) :
sur 20 ans : 6,3 c€/kWh

+ modification des usages + économies d'énergie :
coût global pour la collectivité plus faible
(sur les produits neufs : très facile d'amortir... mais plus cher à la rénovation)

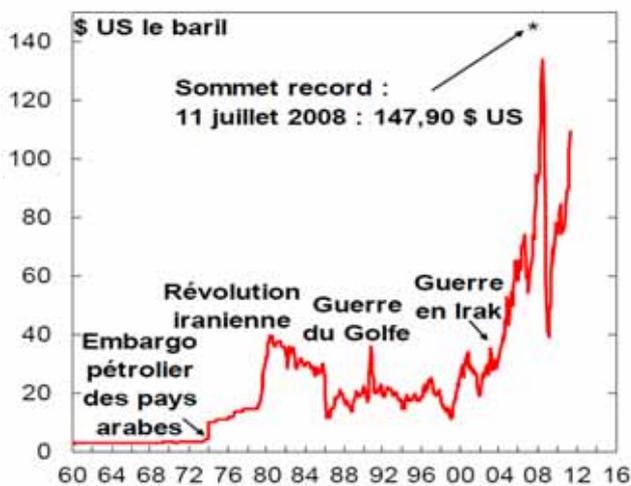
+ emplois locaux (installation, maintenance... fabrication ??)

+ responsabilisation des consommateurs...

B. Multon ENS Cachan

Mais n'oublions pas les grandes tendances d'évolution des matières premières énergétiques non renouvelables...

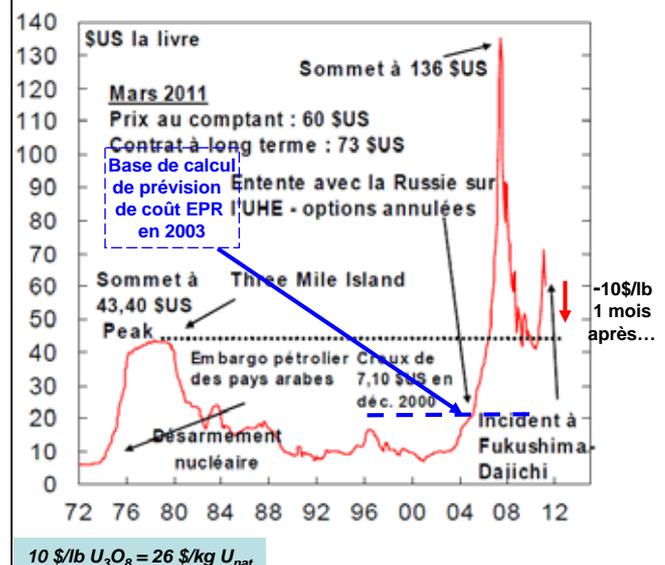
Le baril de pétrole brut : la référence



Et en Europe, le prix du gaz naturel est indexé sur celui du pétrole...

source : banque Scotia

Le cours de l'uranium : également instable



10 \$/lb U_3O_8 = 26 \$/kg U_{nat}

B. Multon ENS Cachan

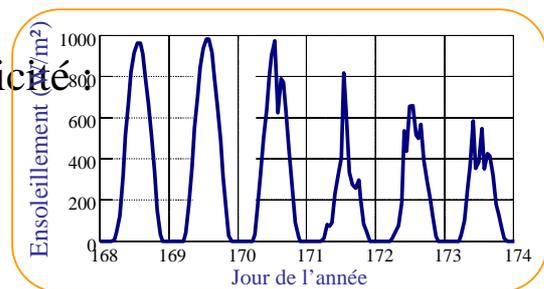
Travaux de recherche de l'équipe

SETE
Systèmes d'Énergie pour
les Transports et l'Environnement

Quelques contributions
au déploiement d'une
production électrique
100% renouvelable

Traitement de l'intermittence dans la production d'électricité d'origine renouvelable et fluctuante

L'intermittence de la production d'électricité est
un **problème majeur** pour
pouvoir exploiter massivement
les ressources renouvelables :
vent, soleil, houle...



Travaux sur le stockage (vision « système »)



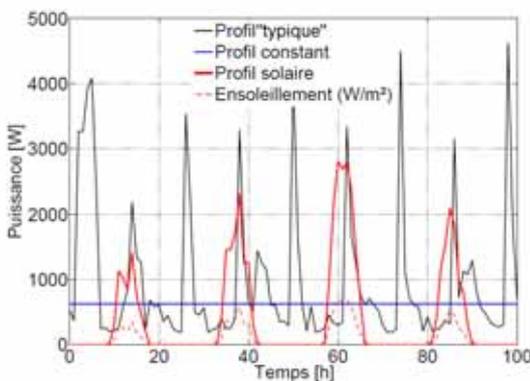
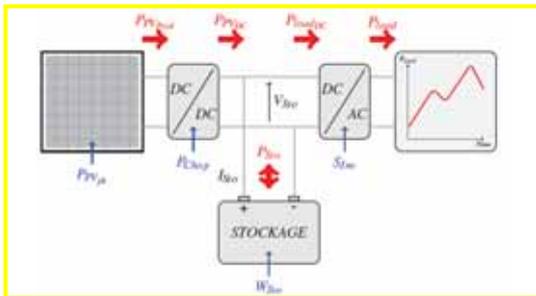
Travaux sur la gestion optimale de l'énergie sur cycle de vie

Modélisations, optimisations, conception, expérimentation...



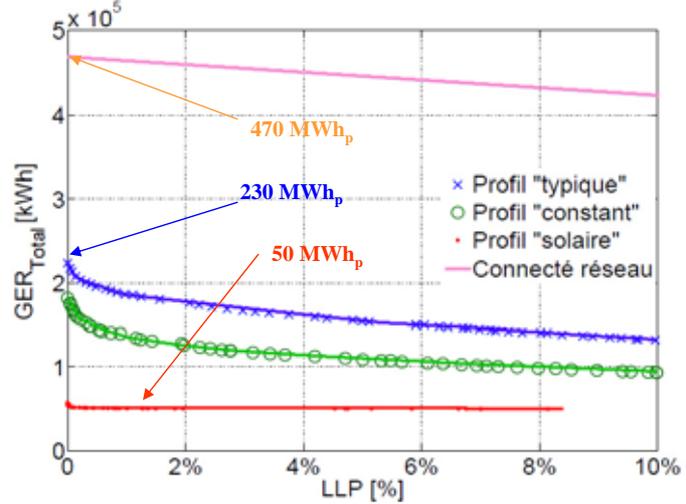
Optimisation de la gestion d'énergie pour minimiser le coût énergétique global sur cycle de vie

Application à un système autonome photovoltaïque :



Etude de l'impact du profil temporel de consommation sur le coût énergétique sur cycle de vie :

(pour une consommation de 164 MWh_c sur 30 ans)



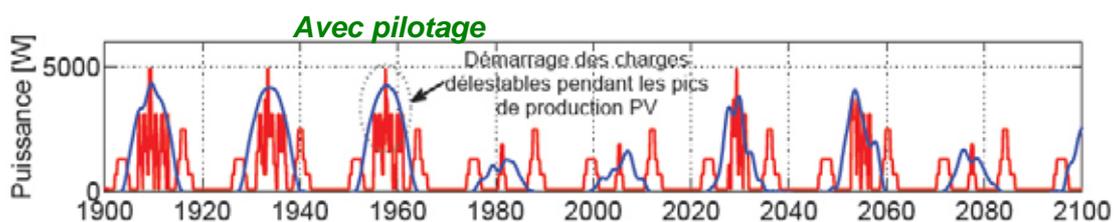
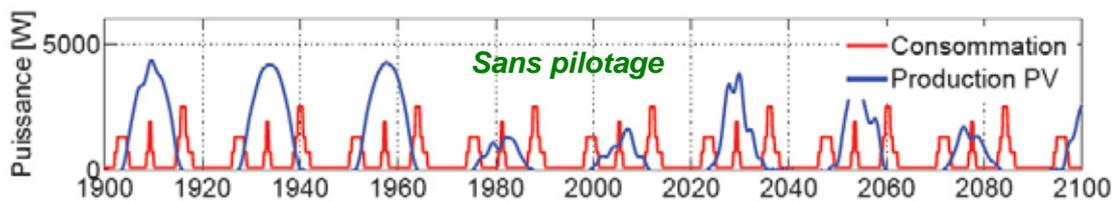
Thèse Yaël THIAUX (2010) - SATIE

B. Multon ENS Cachan

Optimisation de la gestion d'énergie pour minimiser le coût énergétique global sur cycle de vie

Système de pilotage des charges « non prioritaires »

Améliore la corrélation du profil de consommation au profil de productible solaire



+ évaluation du potentiel de la technologie lithium-ion

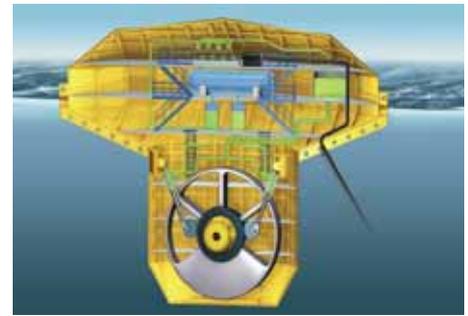
➔ Amélioration sensible sur l'ensemble du cycle de vie, par rapport à la techno Plomb-acide

Thèse Yaël THIAUX (2010) - SATIE

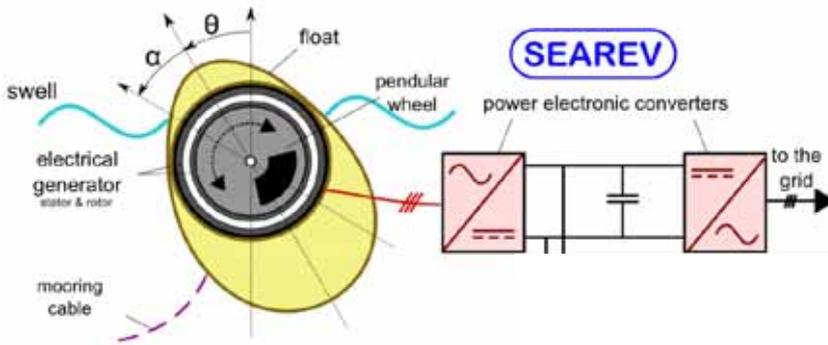
B. Multon ENS Cachan

Houlogénérateur SEAREV

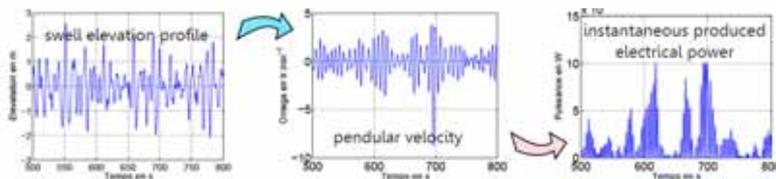
Collaboration Ecole Centrale de Nantes – ENS de Cachan



1000 tonnes déplacées
Volant pendulaire de 400 tonnes

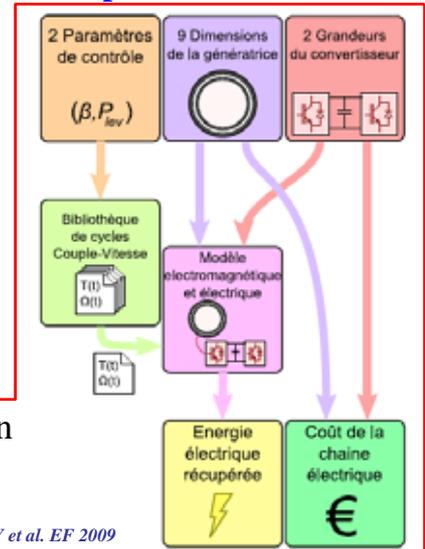


J. AUBRY et al. ICOE 2010



Un système complexe dont il faut optimiser de façon imbriquée, le dimensionnement et le contrôle :

J. AUBRY et al. EF 2009



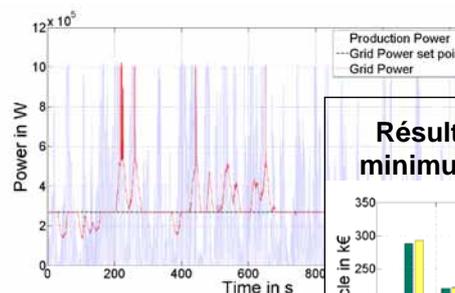
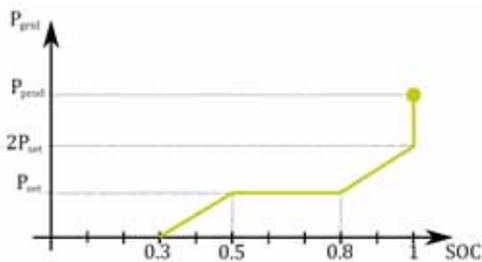
Thèses Marie RUELLAN (2007) et Judicaël AUBRY (en cours)- SATIE

B. Multon ENS Cachan

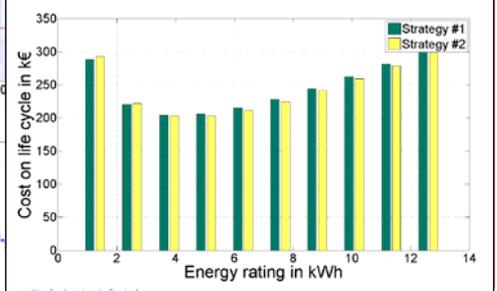
SEAREV : une production très pulsante à lisser

Objectif : minimisation du coût sur cycle de vie de la chaîne complète de génération d'énergie intégrant une fonction de stockage (supercondensateurs)

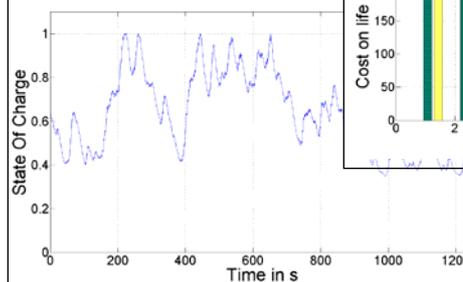
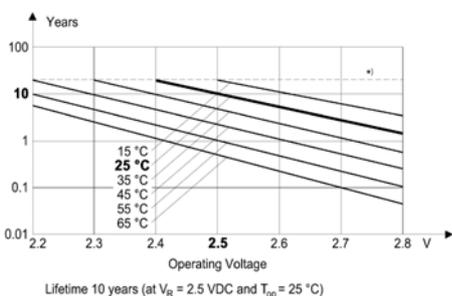
Exemple de stratégie de la gestion d'énergie du stockage :



Résultat de dimensionnement : minimum de coût sur cycle de vie



Modèle de durée de vie des SC



J. AUBRY et al. ICOE 2010

B. Multon ENS Cachan

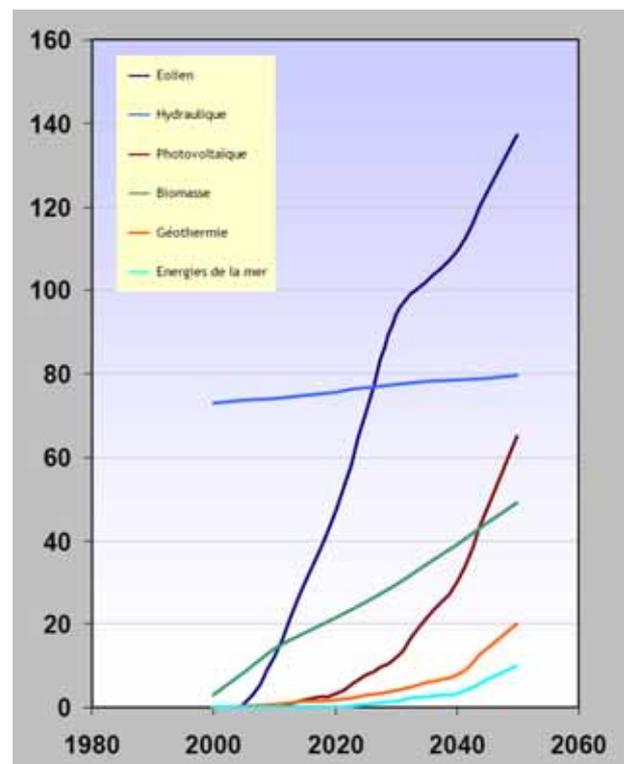
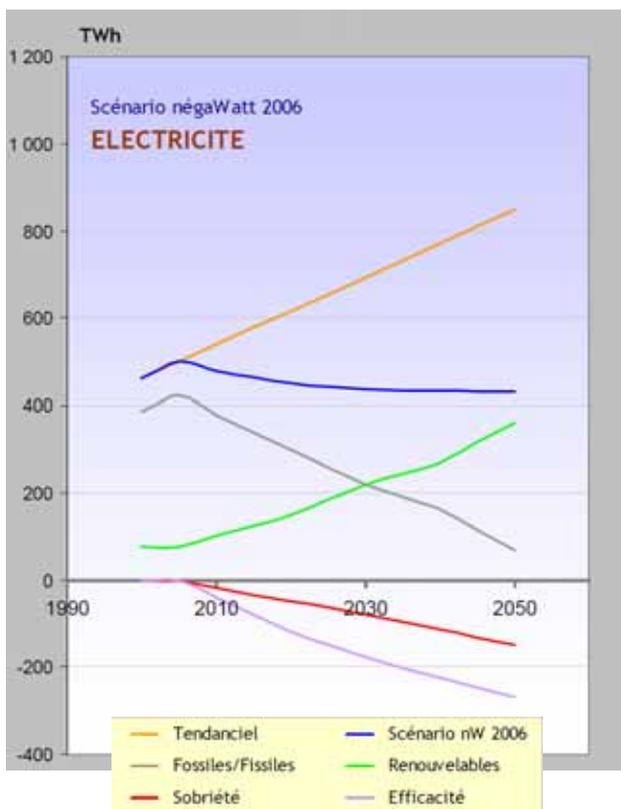
Conclusion...



Journées club EEA « Energie et développement durable » mars 2007



Pour la France : Scénario électrique Négawatt (2006)



Source : Association NEGAWATT www.negawatt.org

Nouveau scénario 2011 en préparation

**Enfin, on ne manque ni d'énergie, ni de solutions,
mais il faut rapidement nous libérer de nos addictions
aux ressources faciles et polluantes**

Pour éviter ça :



Ou ça :

ENFOUISSEMENT DES DÉCHETS NUCLÉAIRES :
CETTE FOIS TOUT LE MONDE EST CONCERNÉ ...
MÊME LES AUTRUCHES !



L'équation du développement durable :

**sobriété + renouvelable + recyclage
= civilisation durable**

B. Multon ENS Cachan

*« Les énergies renouvelables sont inépuisables.
Elles ne détruisent pas l'environnement.*



*Elles sont disponibles partout.
Leur utilisation facilite la solidarité avec les générations futures.
Elles assurent l'avenir de l'humanité.»*

Hermann SCHEER, le 9 décembre 1999
(1944 - 2010)