



**Energie:
électricité renouvelable
et éco-efficacité
pour relever nos défis**

Collège des hautes études en développement durable
Ker Lann 12 avril 2011

Bernard MULTON
ENS de Cachan
SATIE - CNRS
Site de Bretagne

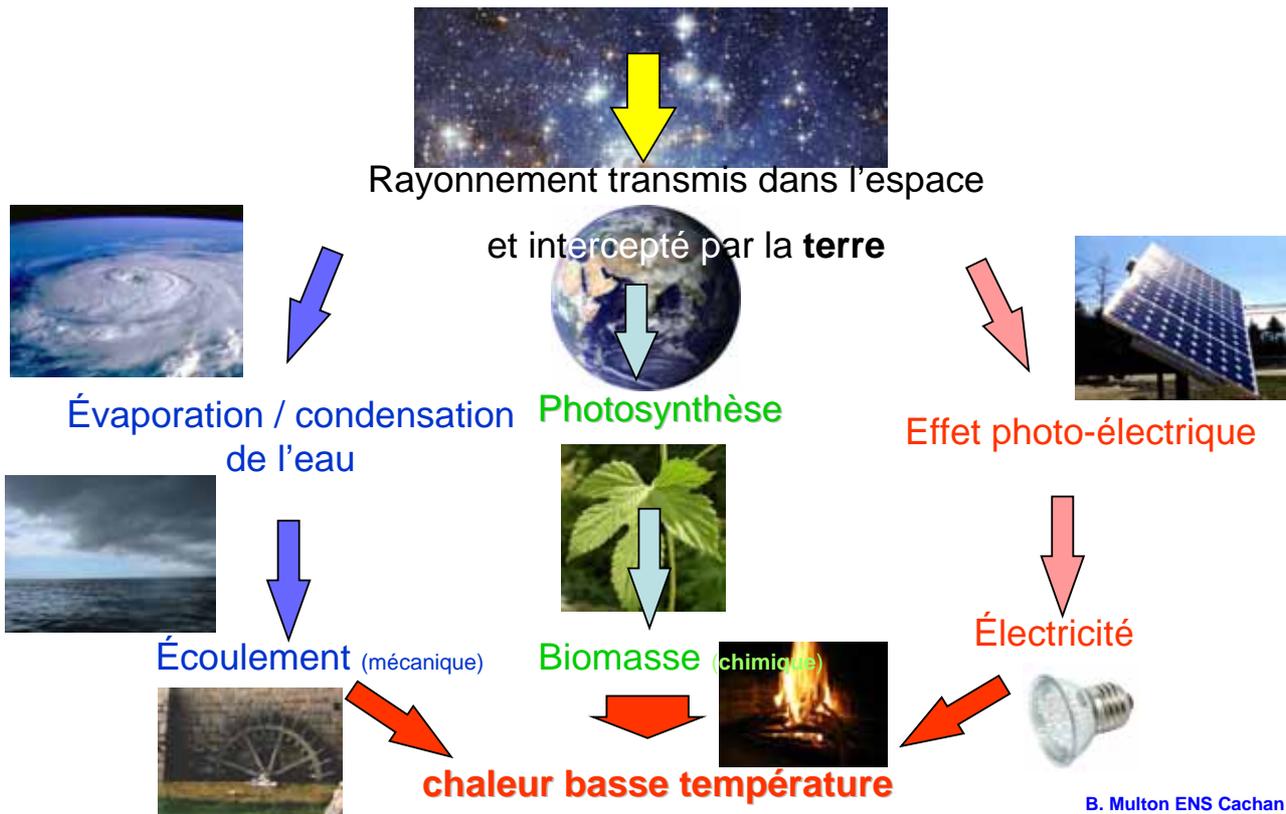


L'énergie,
un concept physique unifié,
pour décrire des phénomènes variés...

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

Qu'est ce que la puissance ?

La **puissance**, c'est le débit d'énergie :

$$P = \frac{E}{t}$$

P en **watts (w)** et **E** en **joules (J)**
t en **secondes (s)**

Exemple :

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

Pour faire ce travail en **3 heures**, il faut une puissance de **3,1 kW**

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



Pour effectuer une transformation énergétique plus vite,
il faut plus de puissance.

B. Multon ENS Cachan

SATIE

Systèmes et Applications des Technologies
de l'Information et de l'Energie UMR - 8029



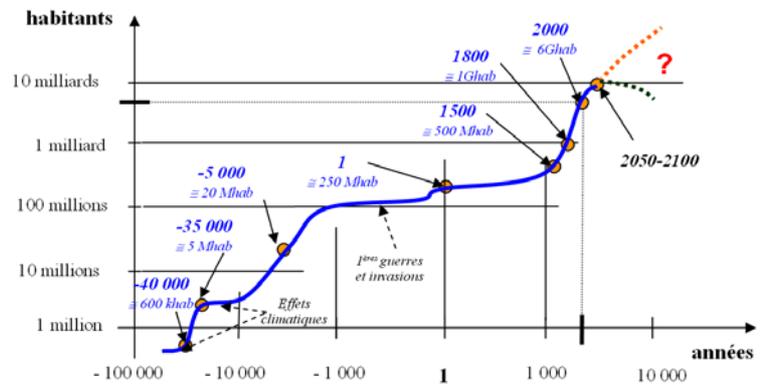
ENS
CACHAN
BRETAGNE

Développement de l'humanité
et ressources énergétiques

R. GIMENO, F. MITRANG, C. PORÉE, JANVIER 1999
Pigeotini J. Berlin

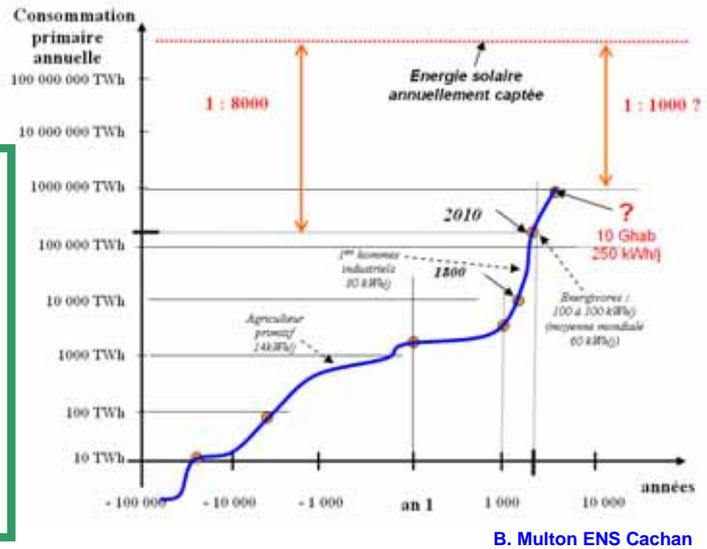
Source :
PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement)

Evolution la population humaine sur la terre:

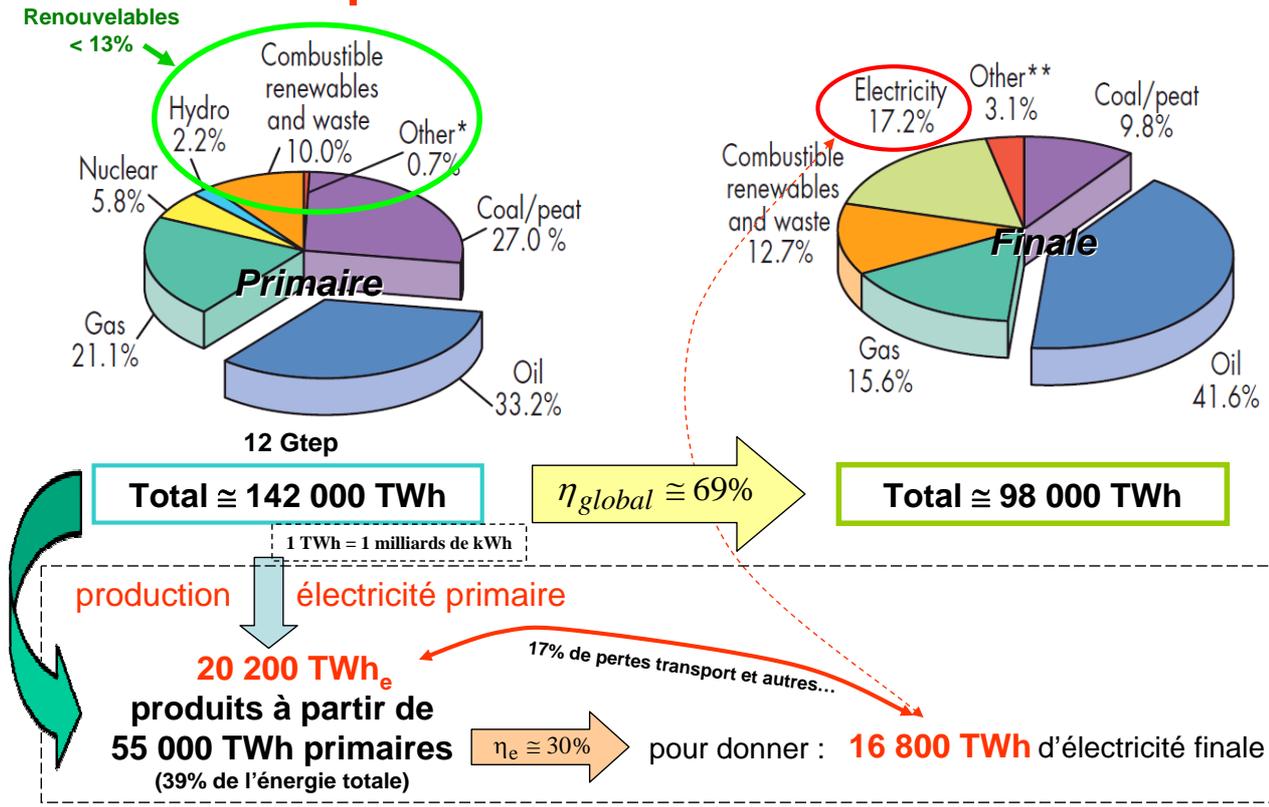


Consommation énergétique des activités humaines :

- 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)

Ressources « épuisables » (non renouvelables)

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbon, pétrole, gaz naturel) :

entre 2000 et 5000 Gtep

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

URANIUM FISSIONNE : **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

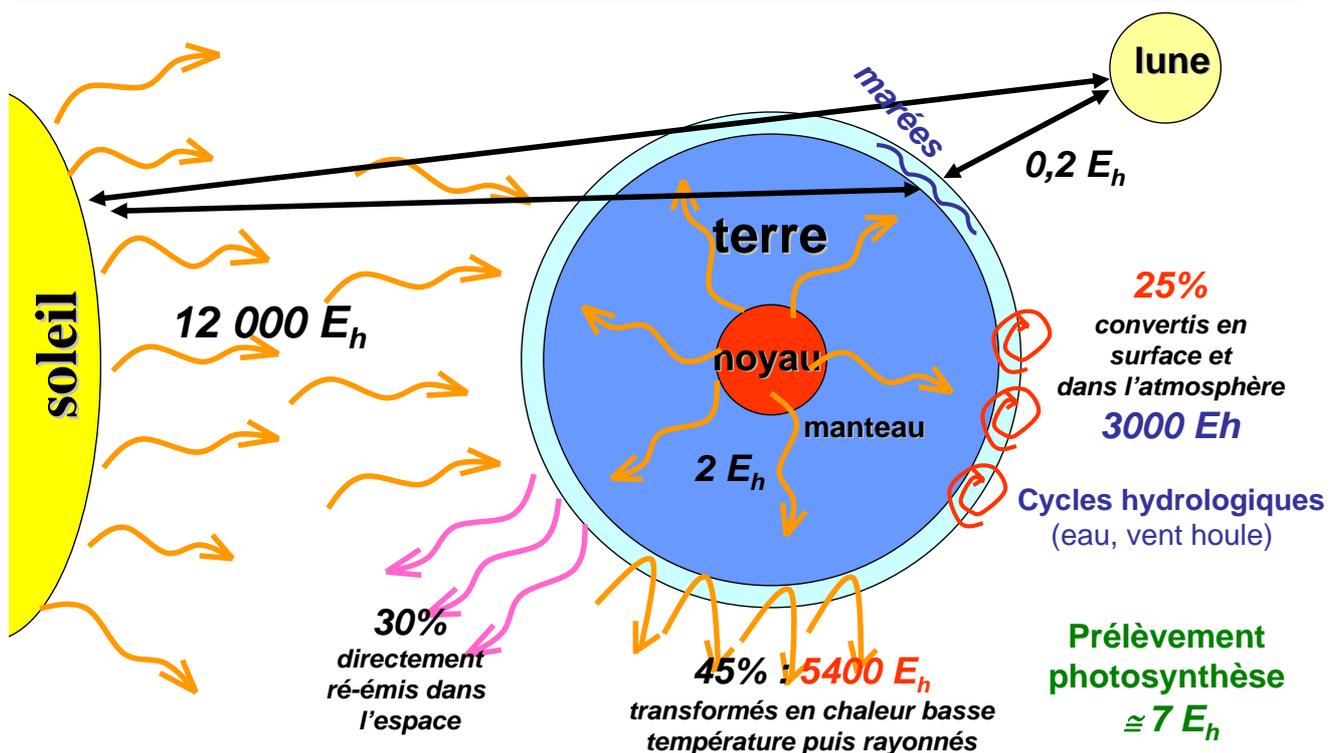
RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL :

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 !**

Quelques ordres de grandeurs :

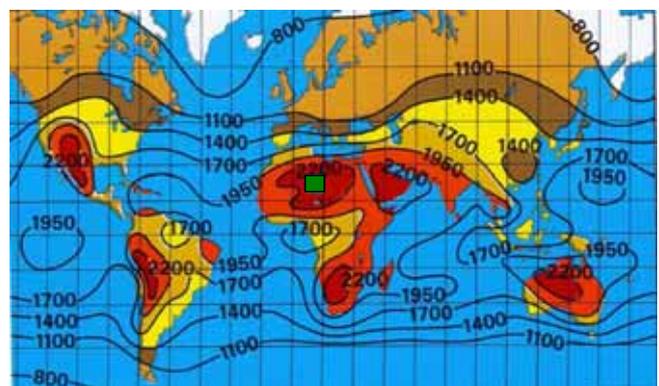
- Avec 10% de rendement, cette superficie permettrait de satisfaire les besoins actuels de l'humanité

en énergie primaire :

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

$$140 \cdot 10^{12} \text{ kWh/an} \Rightarrow \cong 600 \text{ 000 km}^2)$$

- Energie éolienne exploitable = plusieurs fois la consommation électrique mondiale



Source : Ph. Malbranche CEA-INES (2006)

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

B. Multon ENS Cachan

A l'échelle d'un territoire : la Bretagne



Rayonnement solaire annuel aux environs de 1000 kWh/m²

Superficie (hors mers) : 27 000 km²
=> environ 27 000 TWh rayonnés annuellement
220 fois la consommation primaire d'énergie

600 km² bâtis : 600 TWh solaires reçus
Et 2800 km² artificialisés : 2800 TWh solaires

2 exemples :

Eau chaude sanitaire : 4 TWh

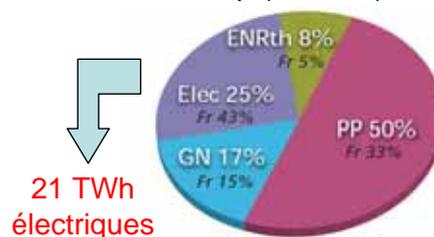
8 km² (1,3% des surfaces bâties) avec 50% de rendement

Electricité :

210 km² avec 10% de rendement : 21 TWh

Mais vouloir tout produire avec le soleil
n'est pas (aujourd'hui) l'optimum en termes de coût, de sécurité, etc...

Conso (finale) 2008 :
7 Mtep (81 TWh)



21 TWh
électriques

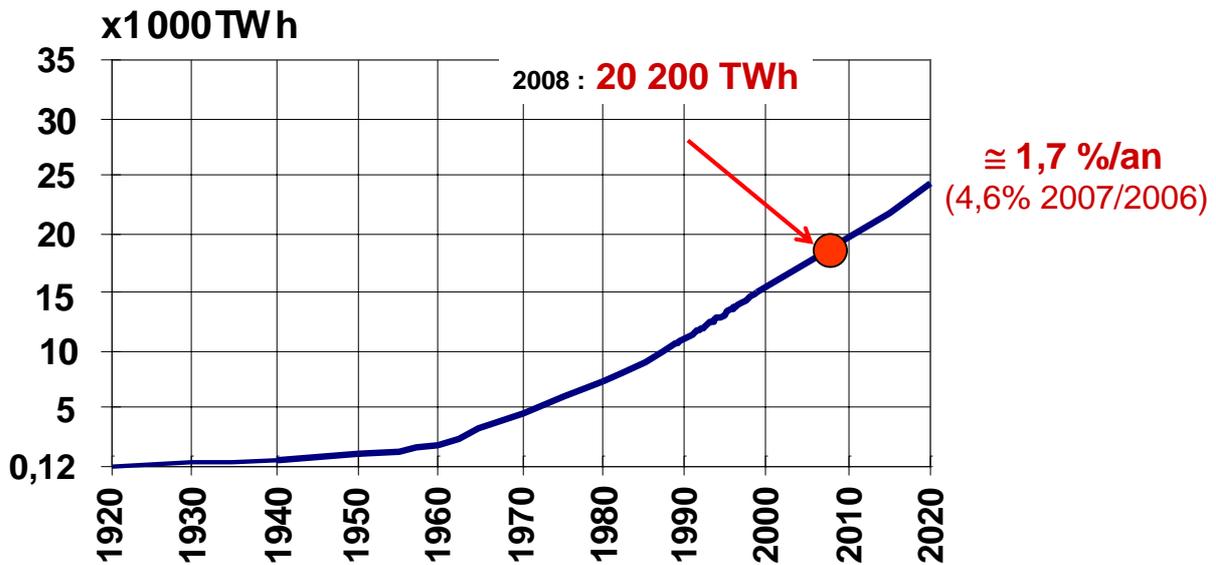
Consommation primaire :
environ 120 TWh

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)



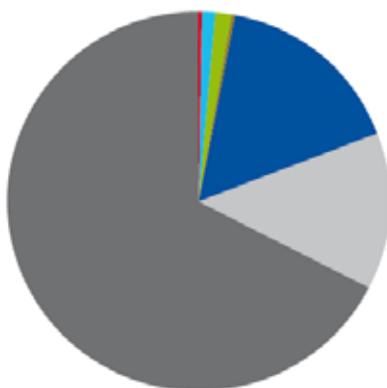
Capacité de production mondiale : > **4100 GW** (Fin 2008, Chine 792 GW + 80 GW/an)
(France : 115 GW)

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

B. Multon ENS Cachan

Production mondiale d'énergie électrique par source (2009)

19 958 TWh (-1,1% / 2008
+ 1,7% 2008/2007 et 4,6% 2007/2006)



- Géothermie 0,3 %
- Éolien 1,3 %
- Biomasse 1,2 %
- Déchets non renouvelables 0,2 %
- Solaire 0,1 %
- Hydraulique 16,1 %
- Nucléaire 13,5 %
- Fossile 67,2 %

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

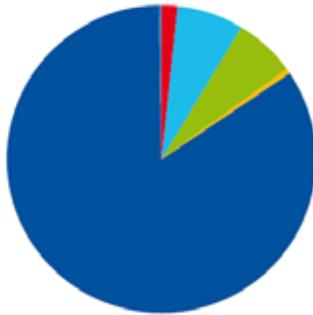
Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2010

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

B. Multon ENS Cachan

Production mondiale d'énergie électrique renouvelable (2008)

3 810 TWh (+1% / 2008
+ 4,4% 2008/2007 et + 3,6% / 2007/2006)



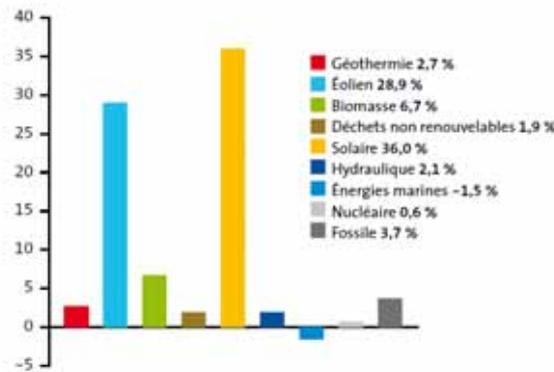
- Géothermie 1,7 %
- Éolien 7,0 %
- Biomasse 6,3 %
- Solaire 0,6 %
- Hydraulique 84,3 %
- Énergies marines 0,01 %

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



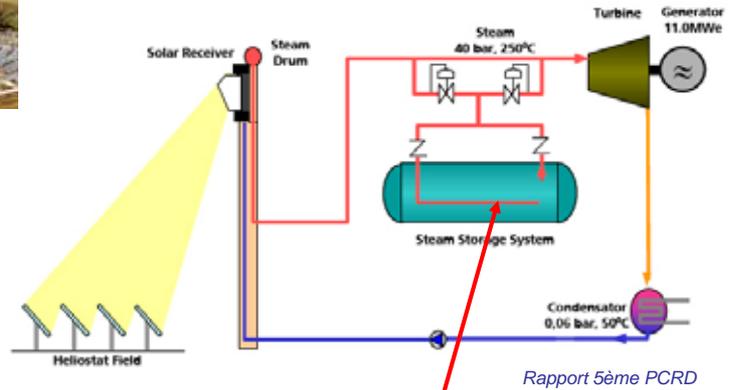
Génération thermodynamique solaire à concentration

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



Rapport 5ème PCRD

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

Dans PS10 : stockage 20 MWh

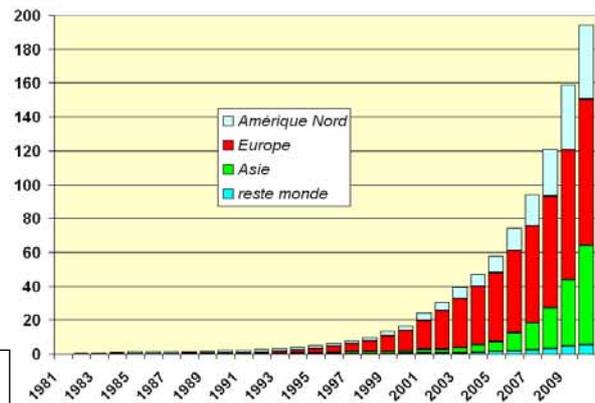


Source : www.solarpaces.org/

B. Multon ENS Cachan

Aérogénération

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

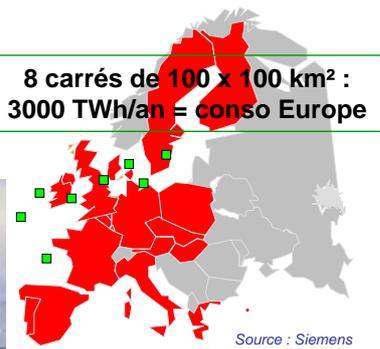


Puissance – Energie :

1 GW terrestre produit annuellement environ 2 TWh
1 GW offshore => 3 à 4 TWh

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

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



Source : Siemens

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

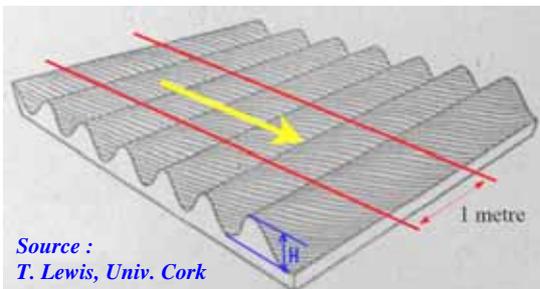
La houle : du « vent concentré »

Exploitation encore marginale, travaux en cours



source : Laurence MAO ©

Puissance incidente en watts
 par mètre de front de vague :



Source :
 T. Lewis, Univ. Cork

$$P_w \cong \frac{\rho \cdot g^2}{64 \cdot \pi} \cdot H^2 \cdot T_e \quad (\text{houle aléatoire})$$

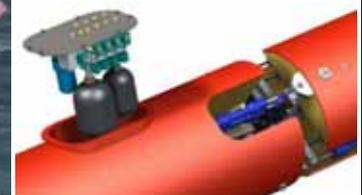
Exemple :

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

$$P_w = 15 \text{ kW/m (aléatoire)}$$

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 ??

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 »

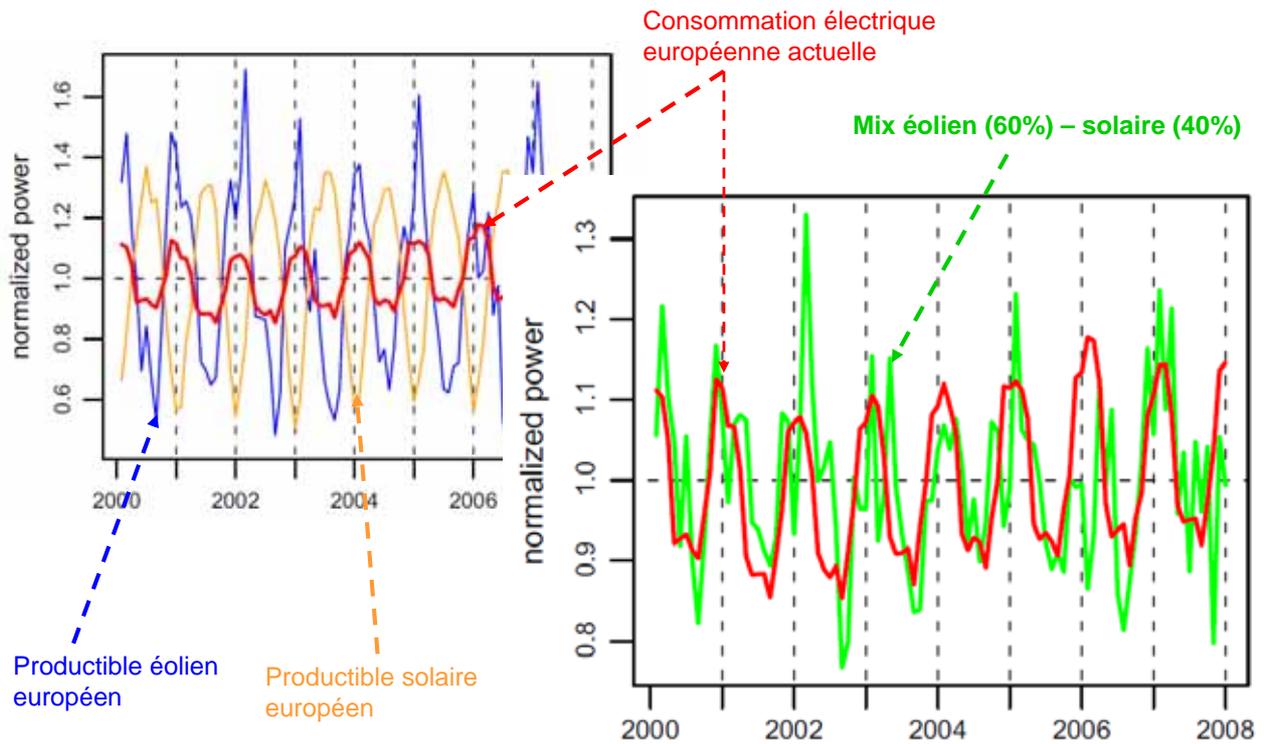
En améliorant la **complémentarité** des ressources...

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

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

B. Multon ENS Cachan

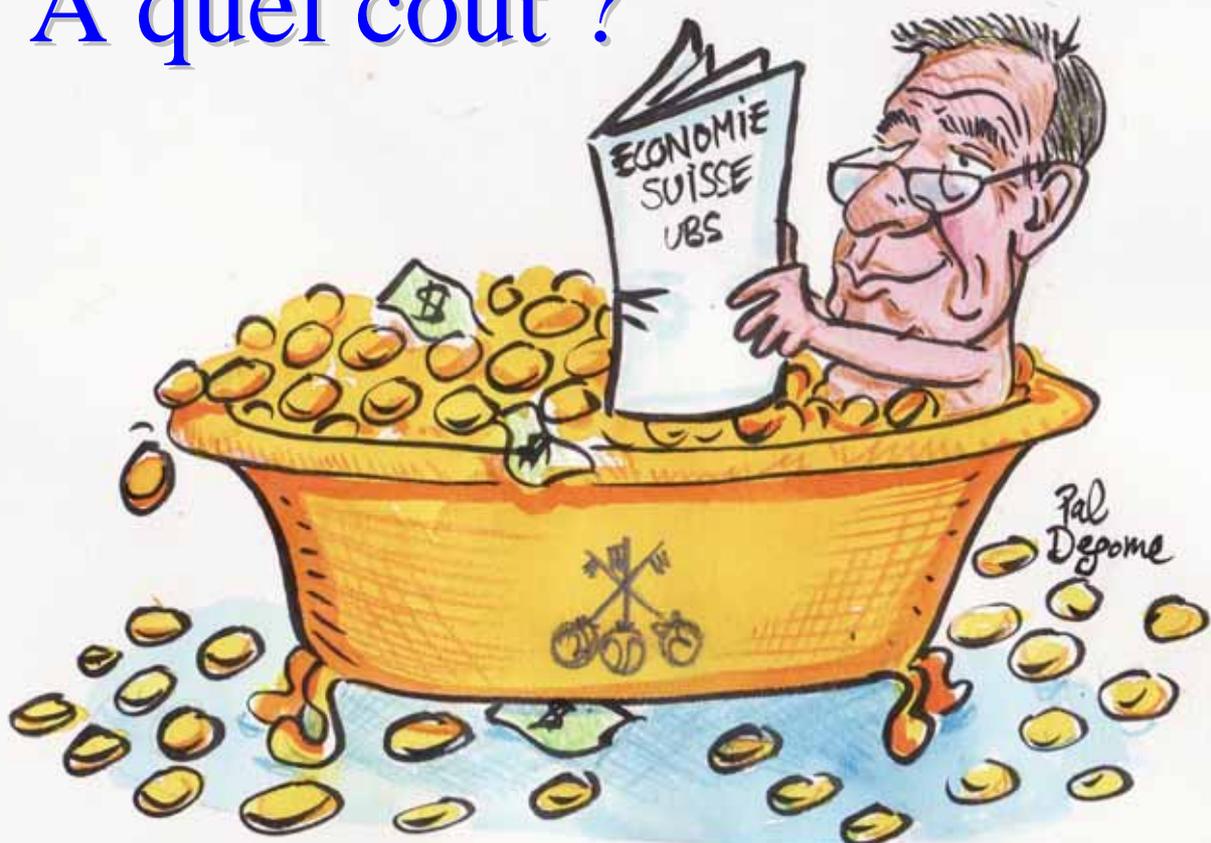
Complémentarité des ressources à l'échelle de l'Europe



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 quel coût ?



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 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€??)

Hors taux d'intérêts et frais de maintenance (faibles) :

sur 20 ans : 6,3 c€/kWh

Total : 570 G€
(en 40 ans : 0,8% PIB)

+ 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)

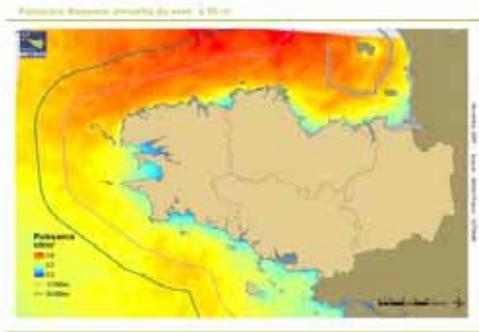
+ emplois locaux (installation, maintenance... fabrication ??)

+ responsabilisation des consommateurs...

B. Multon ENS Cachan

Bretagne

Ressources éoliennes offshore



Production **électrique** 2010 :

éolienne	1 TWh
marémotrice	0,5 TWh
incinération	0,08 TWh
hydraulique	0,06 TWh
solaire	0,025 TWh
méthanisation	0,003 TWh
TOTAL	1,7 TWh

(8,1% de la conso 21 TWh)

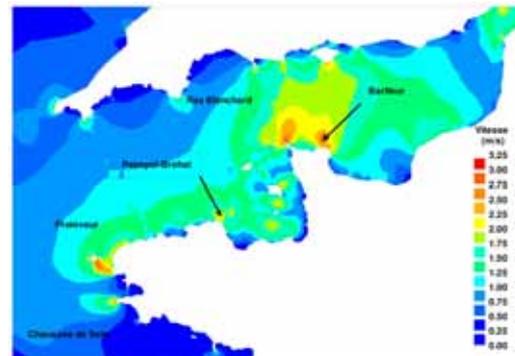
En 2020 ?	En 2030 ?
7 TWh	14 TWh
0,53 TWh	0,6 TWh
0,08 TWh	0,08 TWh
0,07 TWh	0,07 TWh
0,4 TWh	1 TWh
0,8 TWh	2 TWh
8,9 TWh	17,7 TWh
(42%)	(84%)

Stockage d'énergie



Guerlédan :
700 MW – 2,6 GWh
(potentiel)

Ressources courants de marée



B. Multon ENS Cachan

Eco-concevoir, Consommer moins...



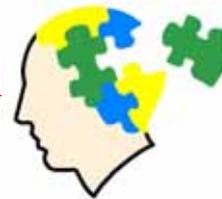
B. Multon ENS Cachan

Eco-conception des produits

Minimisation de coût(s) sur l'ensemble de leur cycle de vie

Coûts économiques et/ou environnementaux

- Intelligence dans les solutions technologiques
- Intelligence dans les comportements
- Eco-dimensionnement des produits :
juste consommation de matières premières
- Recyclage des matières



Un exemple emblématique : le téléphone mobile

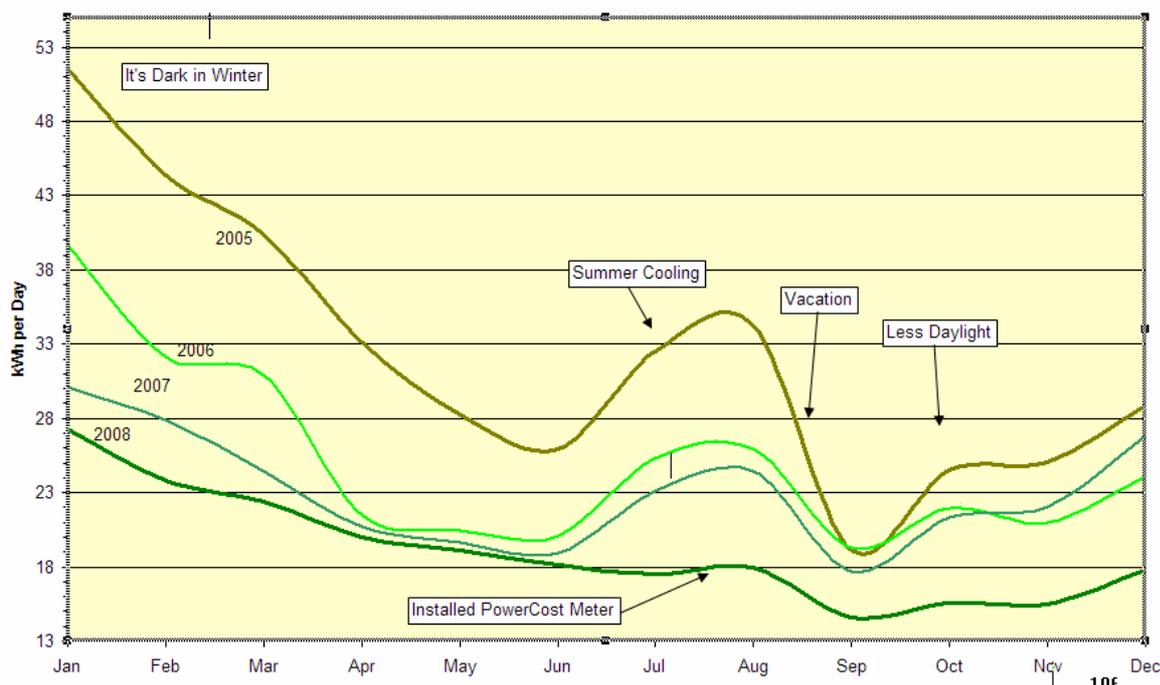


- énergie grise : 200 à 1500 kWh !
(pour 100 à 150 grammes, soit 2000 à 15 000 kWh/kg
une automobile = 15 kWh/kg)
- durée de vie < 2 ans

B. Multon ENS Cachan

Comportements : sobriété

Exemple d'effet de l'apprentissage sur l'évolution des comportements (famille US)



Source : <http://blog.wattzon.com/2009/05/26/electricity-data-the-devil-is-in-the-details/>

B. Multon ENS Cachan

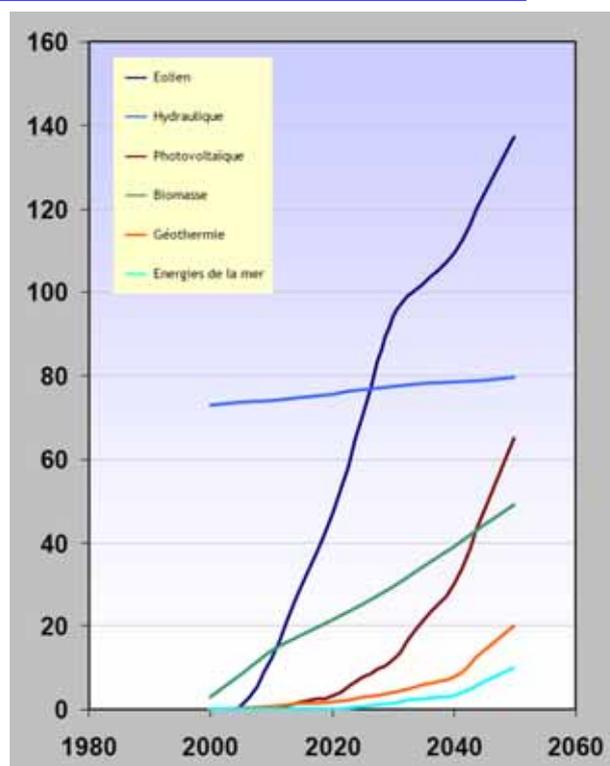
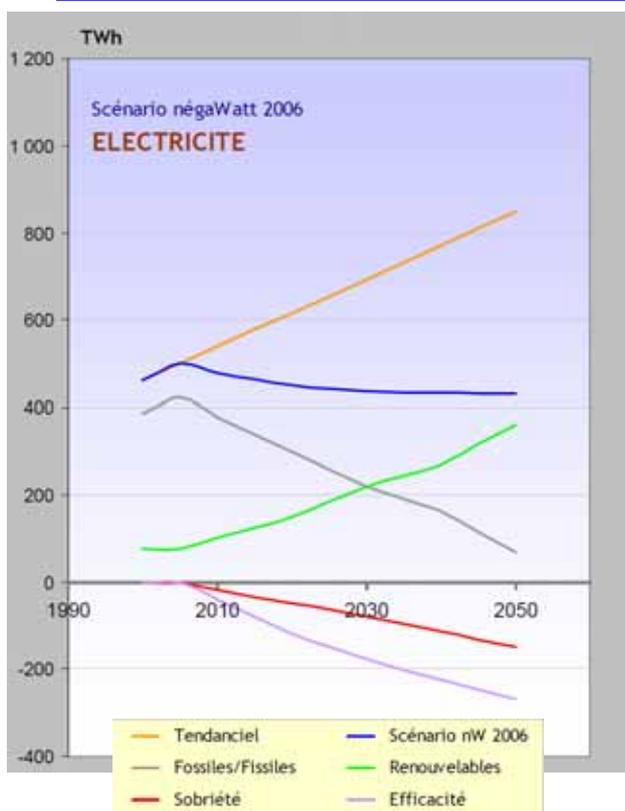
Conclusion...



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

**Slogan 1973 : « En France, on n'a pas de pétrole
mais on a des idées ! »**

**Et en 2011 ? « Sur la terre, on ne manque pas d'énergie
mais il faut prendre rapidement des mesures énergiques »**



ou

?!



L'équation du développement durable en matière d'énergie :

**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

(décédé le 14 octobre 2010)



Le cas concret d'un pays énergivore : la France

Pour ne pas rester sur des raisonnements à la seule échelle planétaire

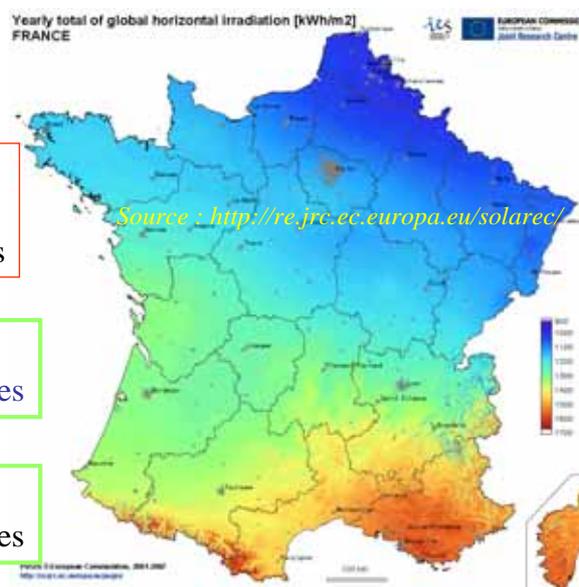
En métropole : un rayonnement solaire annuel entre 900 à 1700 kWh/m²

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

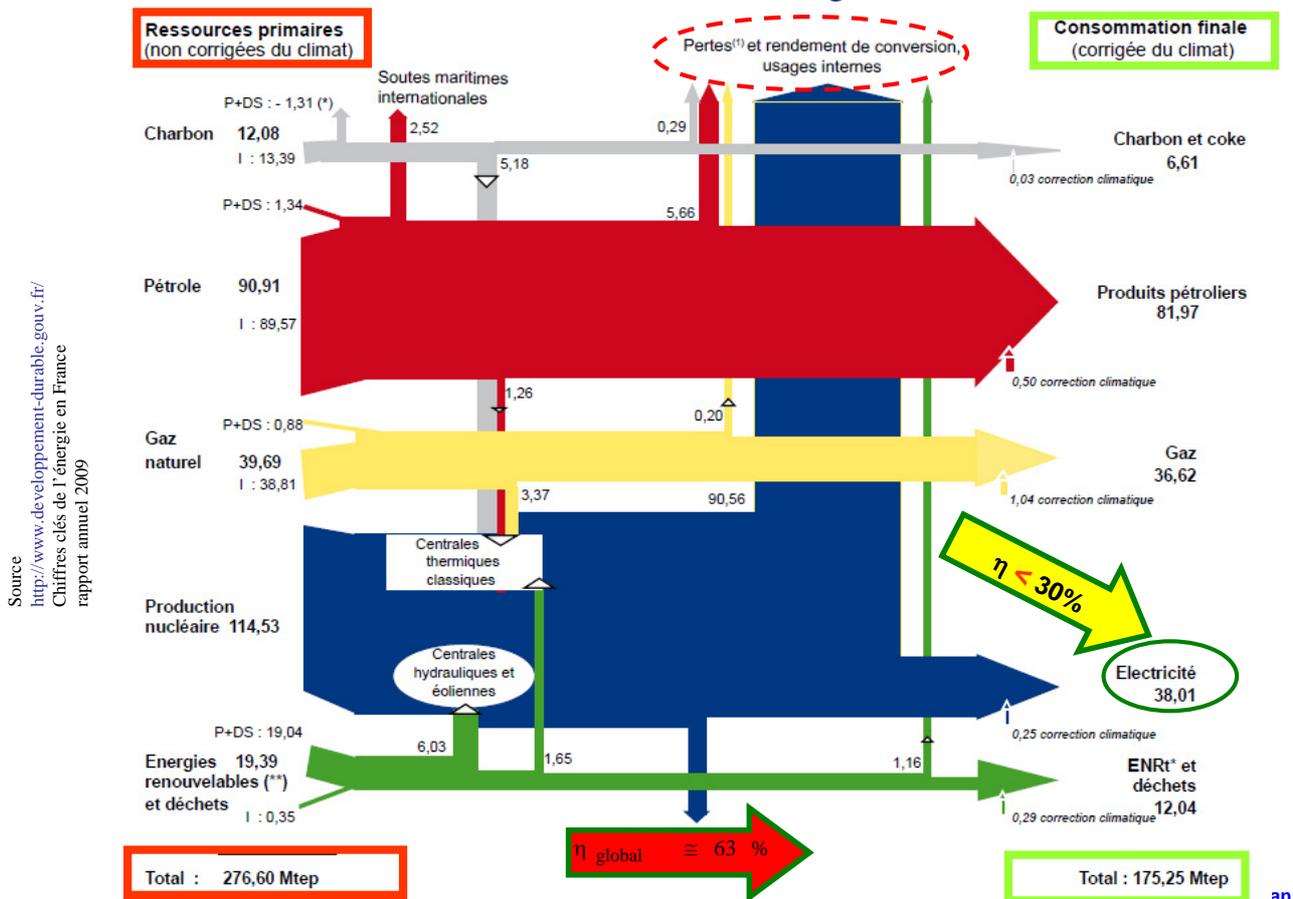
Potentiel des ressources renouvelables exploitables

Cas de la France (suite)

<p>Biomasse →</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 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) 	
<p>Hydraulique →</p>	<p>Environ 80 TWh_e annuels (Conso actuelle <u>Industrie</u> : 130 TWh dont 24 TWh combustible nucléaire <u>Éclairage public</u> : 6 TWh)</p>	
<p>Eolien →</p>	<p>Potentiel très élevé surtout en offshore : > 400 TWh_e 9,6 TWh produits en 2010</p>	
<p>Houle →</p>	<p>Estimations récentes 40 TWh_e (mais technologie pas mûre)</p>	
<p>Courants de marée →</p>	<p>5 à 14 TWh_e</p>	
<p>Géothermie →</p>	<p>Chaleur « basse température » : déjà 2 10⁹ kWh_{th}</p>	

B. Multon ENS Cachan

Consommation française (2008)





B. Multon ENS Cachan

Matières premières : différence entre réserves et ressources

Ressources :

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

Réserves de base : réserves techniquement récupérables sur la base des ressources connues

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

Réserves < Ressources

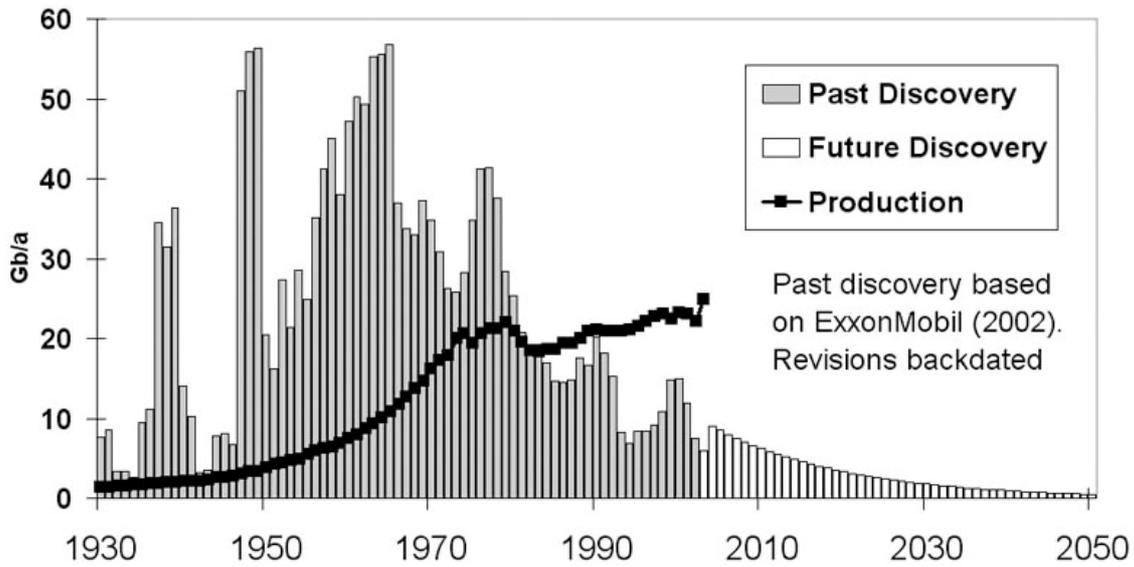
Exemples ressources/réserves/production annuelle
matières premières non énergétiques :

	Ressources présumées	Réserves Base	Réserves	Rapport Réserves/ Production (années)	Production Mondiale (≅ 2006)	
					primaire	Secondaire (recycl.)
Acier	230 G	160 G	73 G	40	1,8 G	
Alu	13 à 18 G	8 G	5,7 G	170	34 M	7,6 M (2004)
Cu	3 à 3,7 G	940 M	470 M	31	15 M	
Pb	1,5 G	140 M	67 M	16	4 M	4 M
Li (Metal)	14 M	11 M	4,1 M	215	18,8 k	

données USGS
en tonnes
(USGS = US Geological Survey)

B. Multon ENS Cachan

Au sujet des « éternels » 40 ans de réserves de pétrole



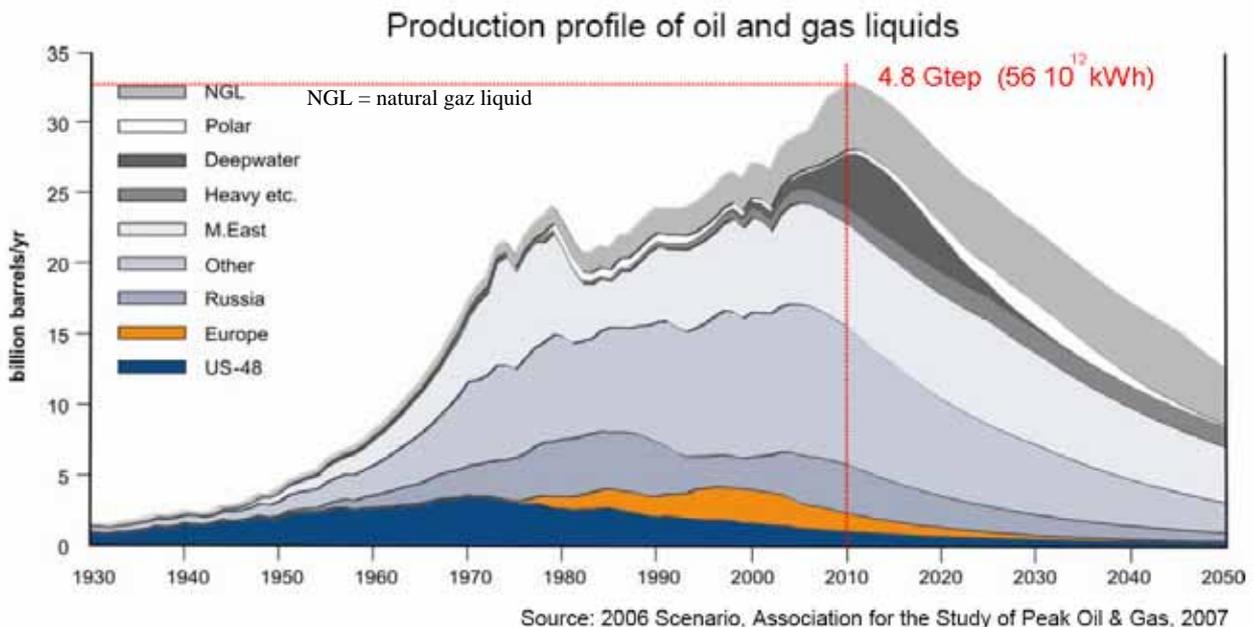
Source : Exxon Mobil 2002

Citation de Jean LAHERRERE (septembre 2006) :

Depuis 1980 on decouvre beaucoup moins de petrole que l'on n'en produit (actuellement 3 fois moins)

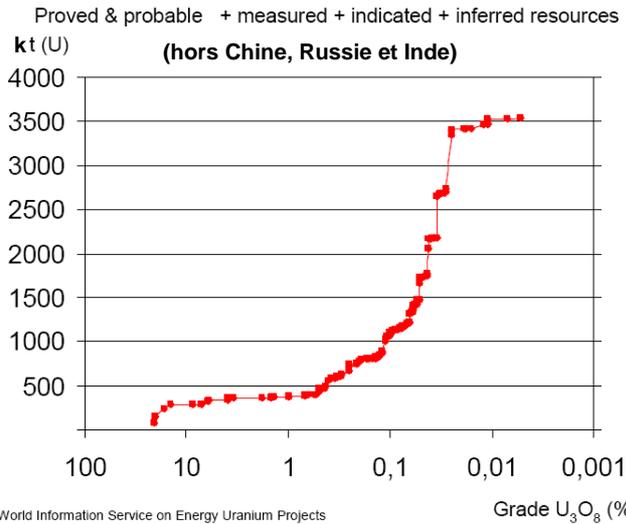
B. Multon ENS Cachan

Epuisement des ressources non renouvelables exemple : le « pic de Hubbert » ou « peak oil »



B. Multon ENS Cachan

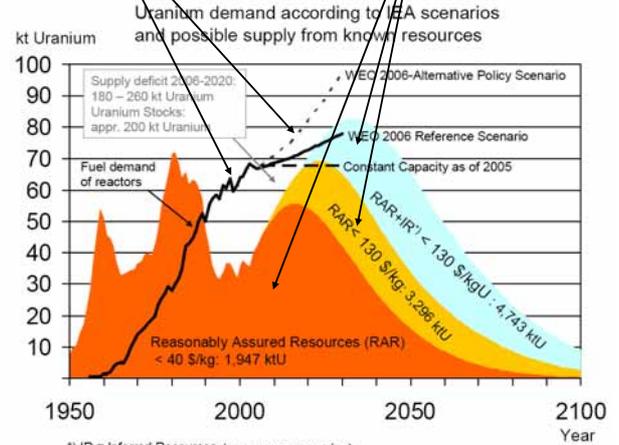
Les ressources en uranium sont également limitées



Source: World Information Service on Energy Uranium Projects
Analysis: LBST 2006

Source : Energy Watch Group, dec. 2006

Scénarios de demande Possibilités de production



*) IR = Inferred Resources (ressources supposées)

Uranium Resources (Source: NEA 2006)

Resource category	Cost range	Resource [kt]		Data reliability
			cumulative	
Reasonably Assured Resources (RAR)	< 40 \$/kgU	1,947	1,947	high
	40 - 80 \$/kgU	696	2,643	
	80 - 130 \$/kgU	654	3,297	
Inferred Resources (IR)	< 40 \$/kgU	799	4,096	low
	40 - 80 \$/kgU	362	4,458	
	80 - 130 \$/kgU	285	4,743	
Undiscovered Resources	Prognosticated	< 80 \$/kgU	1,700	low
		80 - 130 \$/kgU	819	
	Speculative	< 130 \$/kgU	4,557	
		unassigned	2,979	

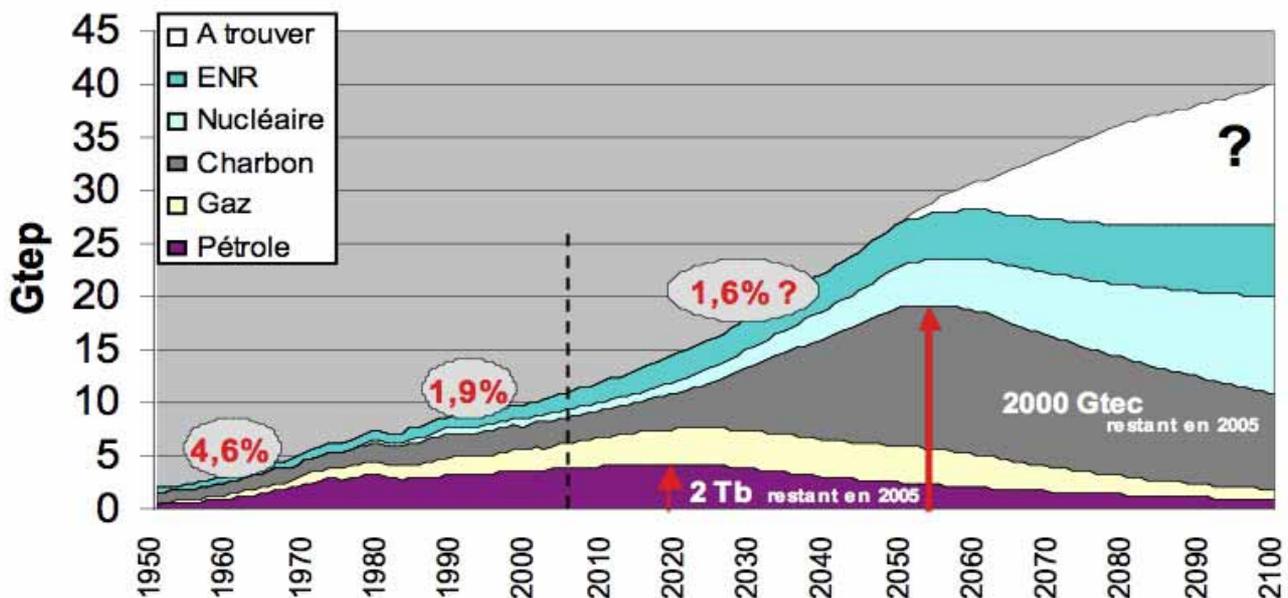
Multon ENS Cachan

Réserves raisonnablement assurées + spéculatives (inferred) :
4,7 Mtonnes à moins de 130\$/kg = 60 ans au rythme actuel
(3 ans pour satisfaire l'ensemble des besoins actuels)

Réserves spéculatives ultimes estimées : 14,7 Mtonnes

Scénario sur la base des ressources fossiles maximales...

(280 Gtep (2 Tb) de pétrole, 2000 Gtec charbon, nucléaire avec RNR...)



Source : Y. BAMBERGER et B. ROGEAUX (EDF R&D), Revue de l'Énergie 2007

**Impossible de soutenir la croissance au-delà de 2050
et des émissions de CO2 inacceptables**

B. Multon ENS Cachan



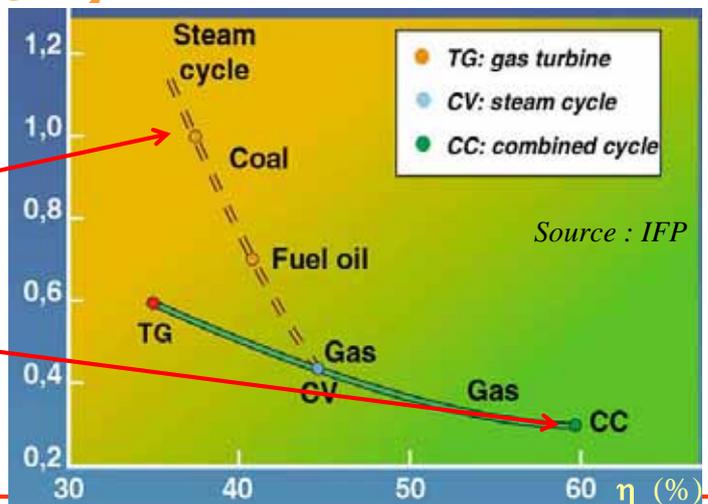
Rejets de gaz à effet de serre par kWh électrique

La combustion de 1 kg de carbone « produit » 3,6 kg de CO₂

Pour produire 1 kWh électrique
(par exemple : 20 litres d'eau chaude de +40°C)

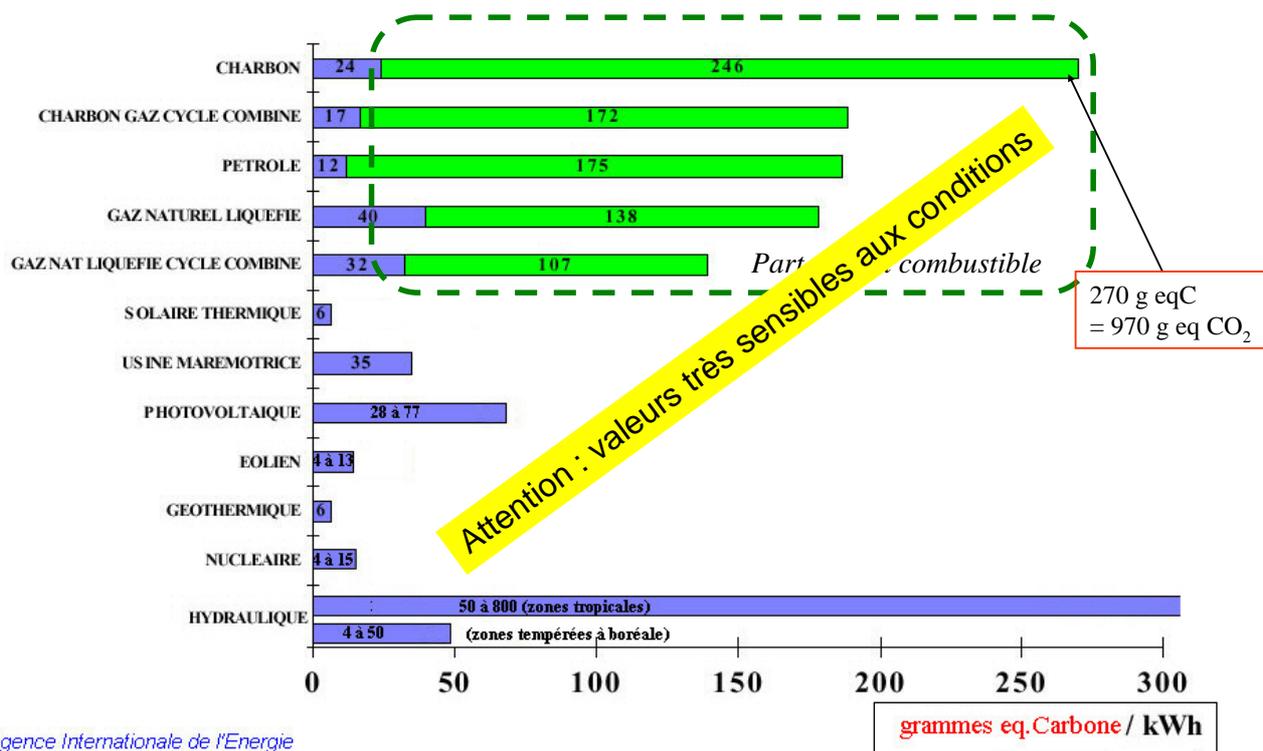
- charbon vapeur : 1 kg de CO₂
- gaz cycle combiné : 0,36 kg de CO₂

kg CO₂ /kWh



La production d'électricité consomme près de 40% de l'énergie primaire mondiale et rejette environ 25% du CO₂ d'origine anthropique

Rejets de carbone dus à la production d'électricité investissement énergétique compris + combustible éventuel

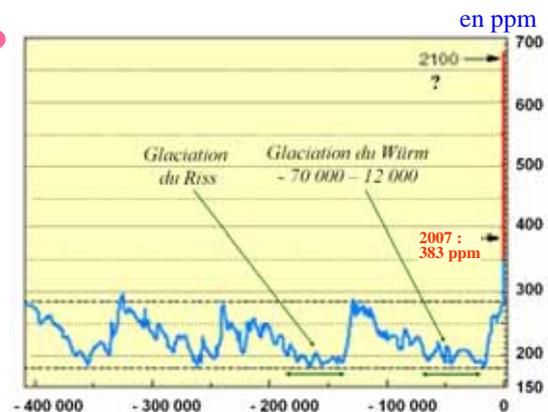


Agence Internationale de l'Energie
+ corrections récentes

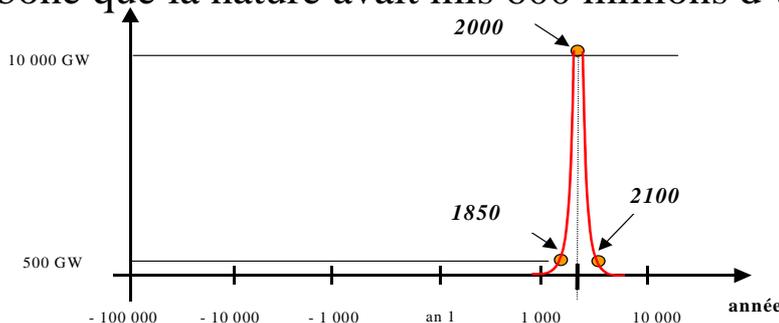
B. Multon ENS Cachan

CO2 : le passé.... et le futur ?

Dans le passé la concentration de CO2 a déjà varié, mais aujourd'hui, elle dépasse l'amplitude des cycles des 400 000 dernières années...



En à peine plus de 200 ans, nous aurons rejeté dans l'atmosphère le carbone que la nature avait mis 600 millions d'années à piéger...



Comment la nature va-t-elle réguler une aussi violente perturbation ??

B. Multon ENS Cachan

L'électricité dans les transports routiers

L'électricité comme « carburant » embarqué (véhicules tout électriques) :
dans ce cas, quel est le bilan ??

- Comment est produite l'électricité ?

- Quel coût environnemental du stockage ?

Accu Lithium (techno NCA-G) : **500 kWh par kWh** de capacité de stockage
Pour un véhicule avec 30 kWh embarqués :
Investissement supplémentaire de 15 000 kWh
(doublement pour l'ensemble du véhicule)
150 kg CO₂ par kWh

- Les matières premières sont-elles disponibles ?

Réserves/ressources mondiales de lithium : 4/14 Mt *

Besoin en lithium (techno NCA-G) : 0.25 kg/kWh => 500 / 1800 M Veh Elec
(recyclable à 98%) [fourchette de 0,11 à 0,42 kg/kWh selon techno] [672 M automobiles en 2009, 1500 M en 2018 ?]

* Le lithium ne représente que 2% du prix total d'un accumulateur au lithium actuel
=> ressources fondées sur un coût d'extraction plus élevé X 1000

B. Multon ENS Cachan

Rejets de CO₂

1 kWh électrique en France : 85 g/kWh
en Europe : 400 g/kWh en moyenne...
au monde : 720 g/kWh

Un (petit) véhicule électrique consomme environ **0,2 kWh/km** (avec auxiliaires)
=> **17 -> 80 -> 140 gCO₂/km**

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

Valeurs à ré-évaluer compte tenu du rendement de charge
et... de l'investissement énergétique (ACV)
+ 40 gCO₂/km

(2000 cycles à 80% DOD et 80% de rendement de charge)

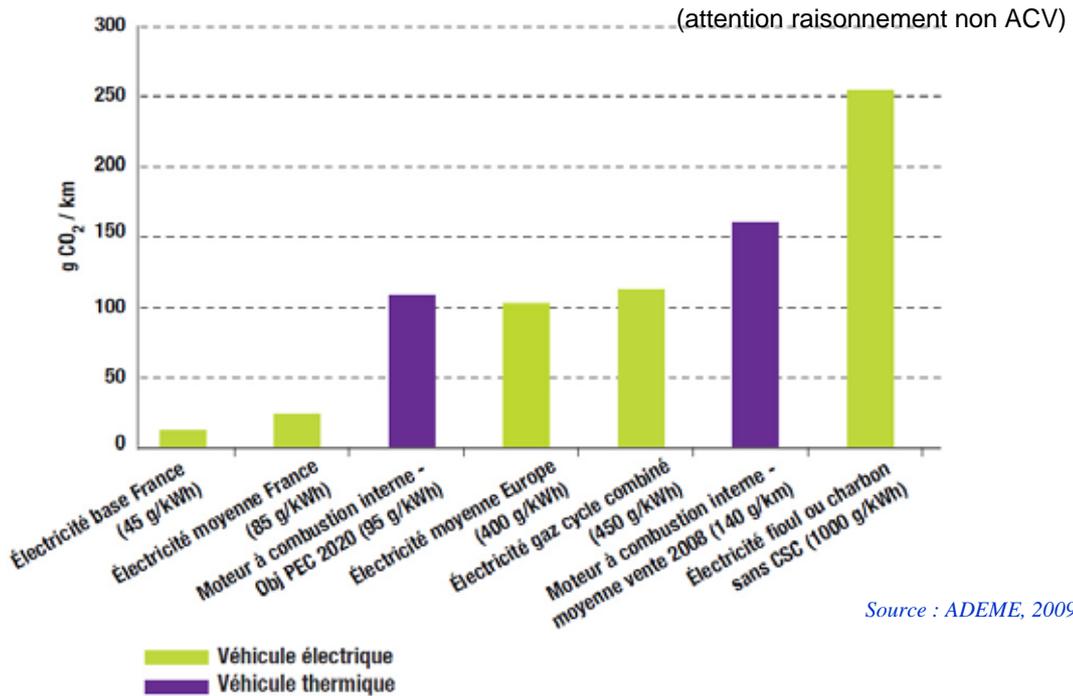


Renault Kangoo bebop ZE

Nécessité d'une électricité « propre »
sinon intérêt plus faible

B. Multon ENS Cachan

Véhicules électriques en Europe, émissions de GES du puits à la roue :



1 M véhicules électriques rechargés lentement (3 kW) nécessitent 3 GW

B. Multon ENS Cachan

Compléments économie



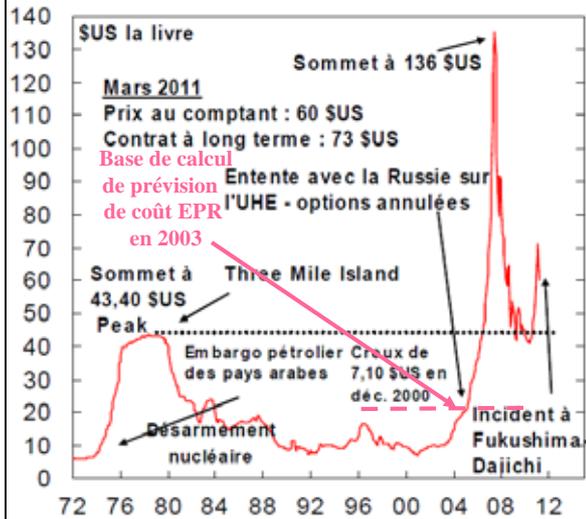
Les cours des matières premières énergétiques fluctuent et affectent économie et stabilité politique...

Le baril de pétrole brut : la référence



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

Le cours de l'uranium : également instable

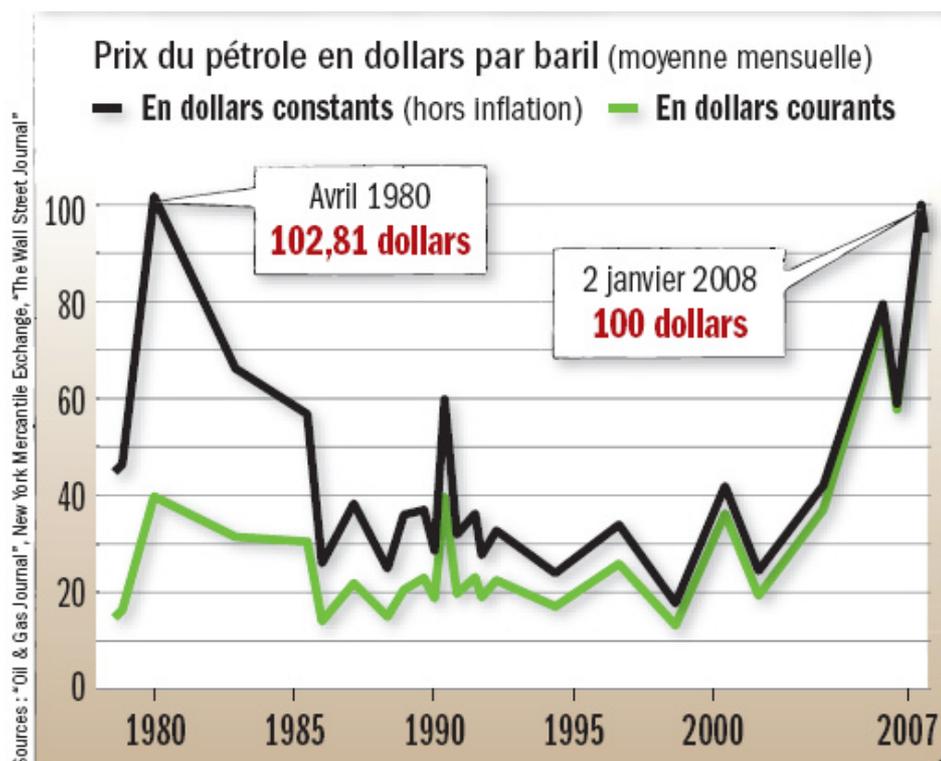


10 \$/lb = 26 \$/kg

source : banque Scotia

B. Multon ENS Cachan

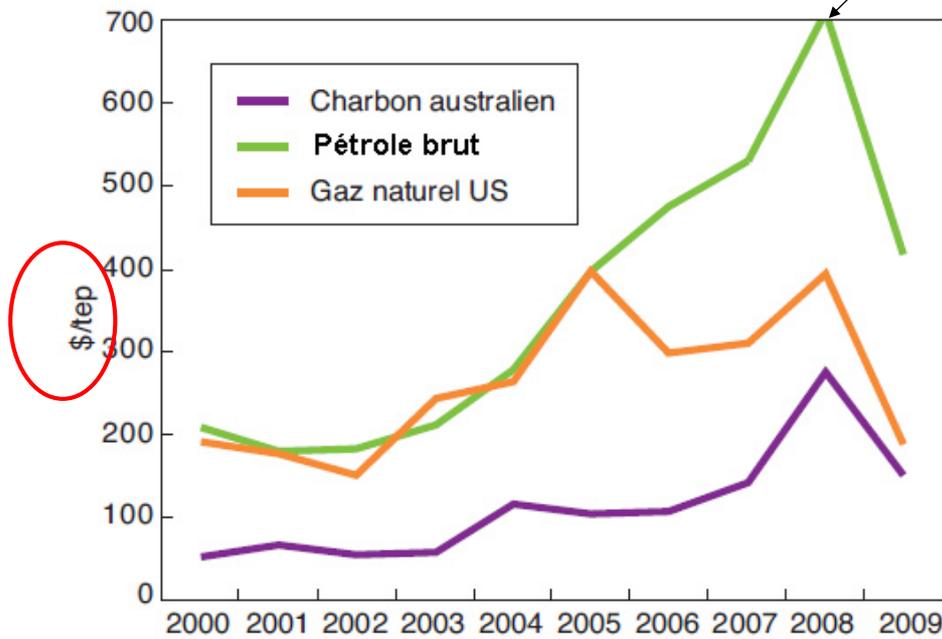
En monnaie constante (correction de l'inflation), le pétrole n'est pas si cher...



B. Multon ENS Cachan

Prix charbon, gaz et pétrole en \$/tep

Un pétrole à 100 \$/baril conduit à 680 \$/tep
(1 tep équivaut à 6,8 barils)



Source : IFF, base Platt's

B. Multon ENS Cachan

Production photovoltaïque

Générateurs photovoltaïques Monde

Plus de **24 GWc** cumulés fin 2009

(+ 9 GW en 2009)

(total **Europe** \cong **15 GW**)

pour une production de plus de 20 TWh

Prévision mondiale **2030 : 1000 GW**

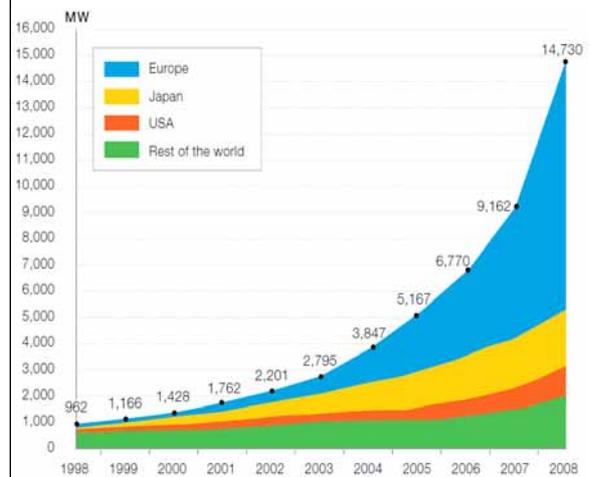
(plus de 1000 TWh)

(*Eolien 2030 : 2700 GW – 6620 TWh*)

Production + installation :

environ **20 + 30 emplois/MW**

(en 2030 : 10 + 25, soit 1,5 Memplois permanents)



Source : EPIA (European Photovoltaic Industry Association)

production de capteurs PV

Taux de croissance :

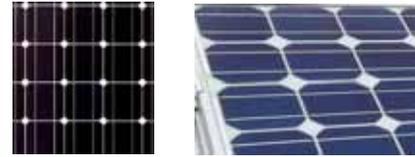
\cong 30 à 40%/an

Europe 2030 : 250 à 700 MW installés

En 2009 : 3 GW supplémentaires en Allemagne
La Chine devient le 1er fabricant mondial...

B. Multon ENS Cachan

Technologies commerciales en 2006 (+ mises à jour 2009)

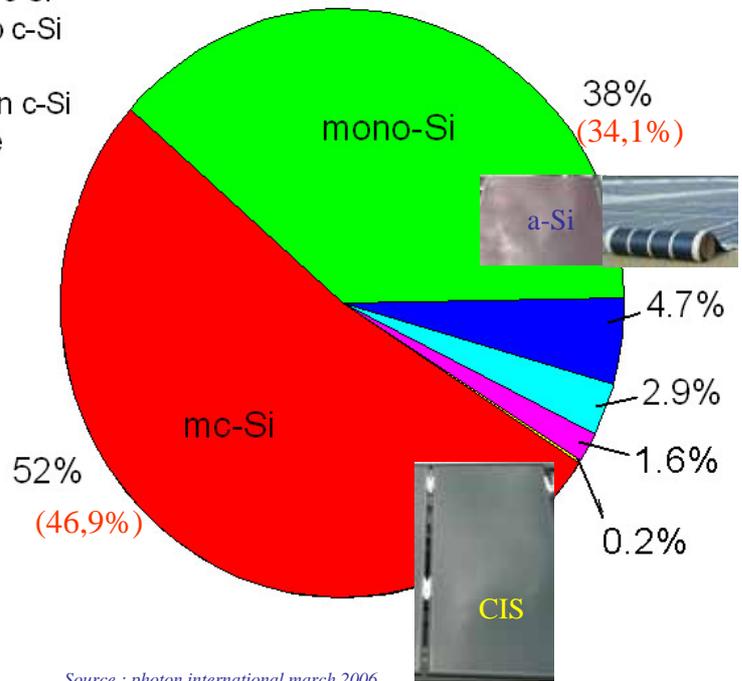


Exemples de cellules en Si **monocristallin**

- Silicium Cristallin: 90% **(80,1%)**
- multi c-Si
 - mono c-Si
- Couches minces : 10% **(19,9%)**
- silicium amorphe
 - silicium en ruban
 - CdTe tellurure de cadmium
 - CIS cuivre indium selenium
 - CIGS (diséléniure de cuivre-iridium-gallium)

Les couches minces progressent vite

- 10% du marché en 2006 (\cong 250 MW)
- 20% en 2009 (\cong 1,6 GW)

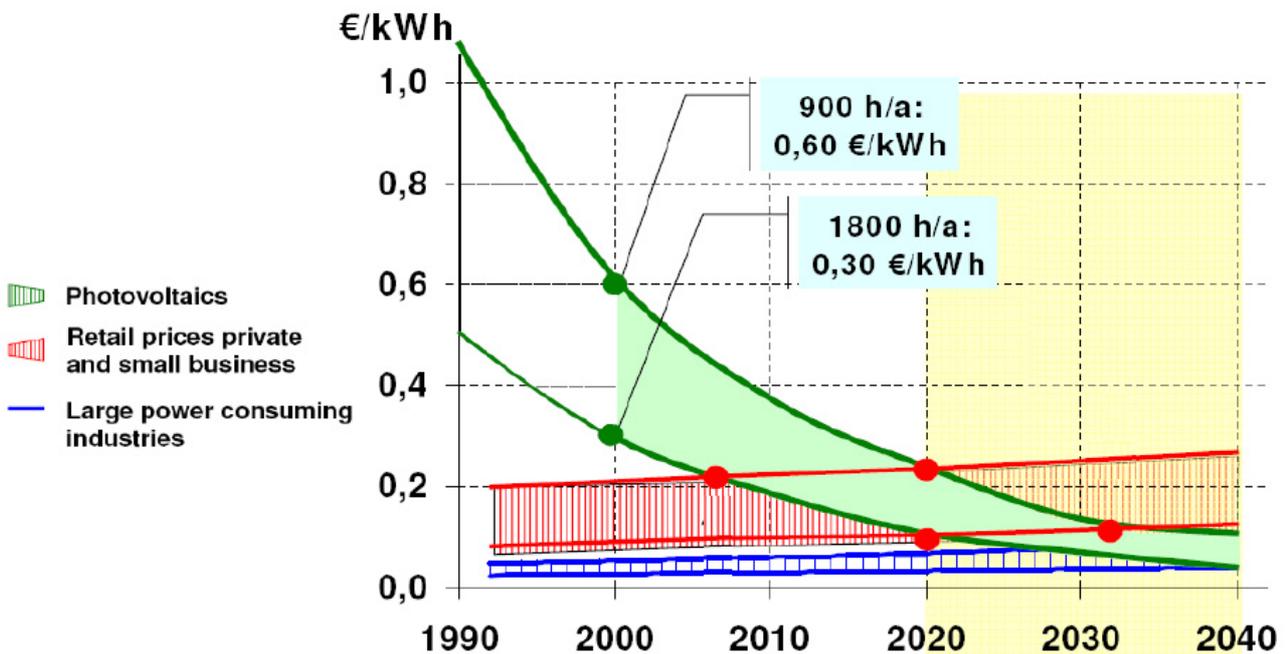


Exemples de cellules en Si **polycristallin**

Source : photon international march 2006

B. Multon ENS Cachan

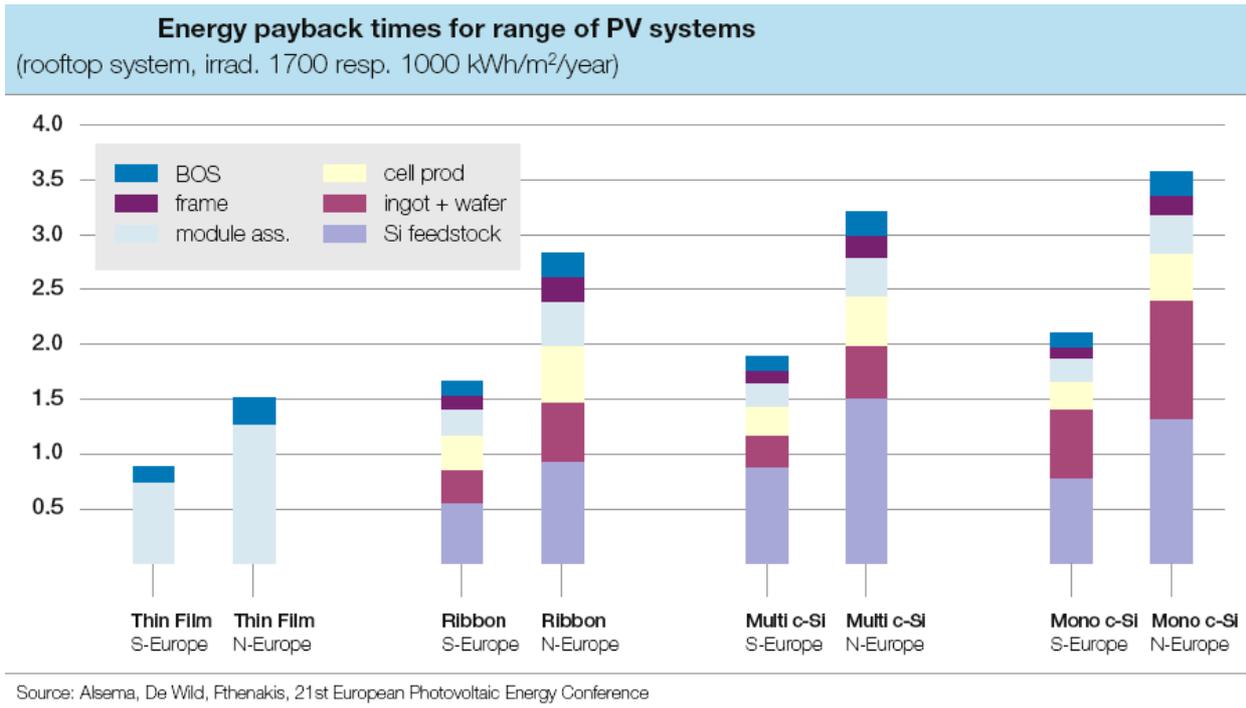
Le seuil de compétitivité approche et dépend du lieu (niveau d'insolation)



Source : W. Hoffmann, EPIA, Valencia 2008

B. Multon ENS Cachan

Temps de retour sur investissement énergétique : de 10 mois à 3 ans ½ selon techno et localisation

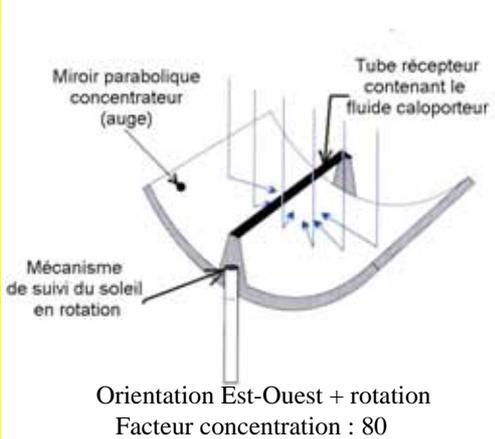


Source : ALSEMA, EPEC, 2006

Energie de production : 6 à 20 MJ/W_p (hors frame)

B. Multon ENS Cachan

Usines à auge (miroirs cylindro-paraboliques)

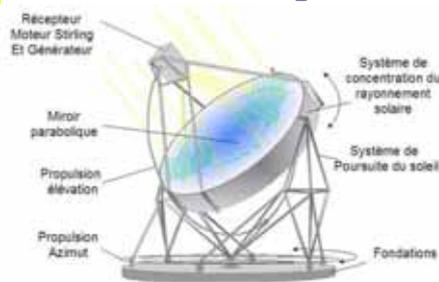


Source : Monash Univers. (Australie)

Kramer Junction Power (Californie, désert du Mojave)
(9 usines pour 354 MW cumulés)

ANDASOL 1 (Espagne, 2008) : 50 MW + stockage 6 h

Concentrateur parabolique + Moteur Stirling



Source : PROMES CNRS

Exemple Labo PROMES (Odeillo France) :
Générateur Stirling 10 kW_e
avec capteur parabolique de 8,5 m de diamètre
facteur concentration : 2500
50 m² = 50 kW avec 1 kW/m² crête soit un rendement global de 18%

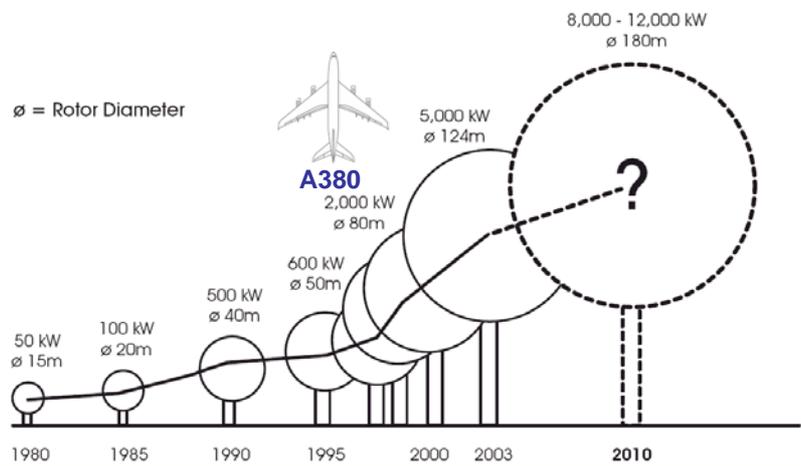


B. Multon ENS Cachan

Tendances

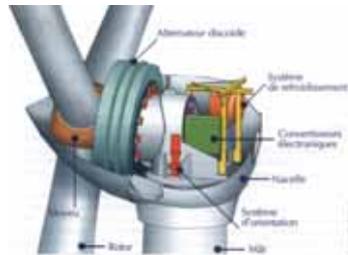
Accroissement de taille
et de puissance

Source :
European Wind Energy Report Europe 2005



Tendances :

- vitesse variable électronique
- entraînements directs
- génératrices à aimants



Source : Jeumont Industrie

Technologies offshore flottantes



Source : SWAY www.sway.no

B. Multon ENS Cachan

Moyens de stockage à grande échelle

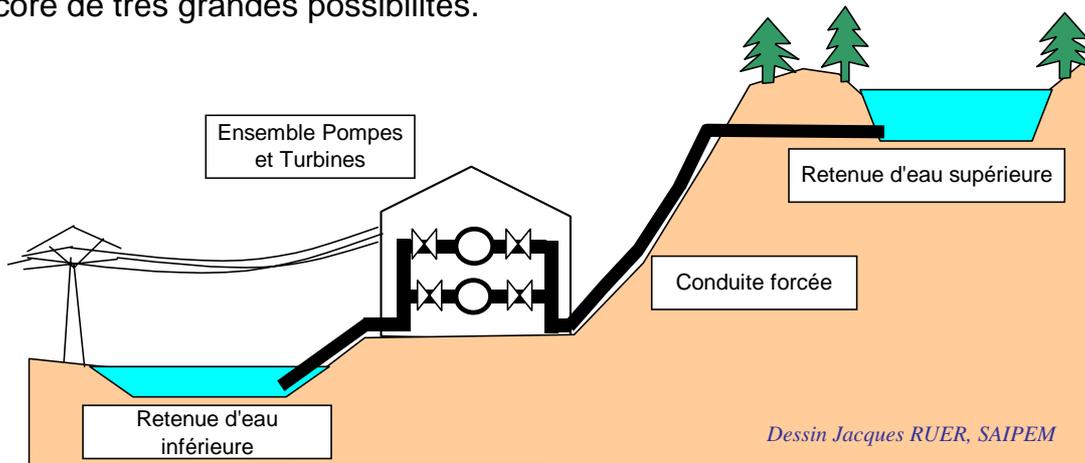
Plutôt destinés à un fonctionnement au niveau
du réseau
ou des systèmes de production intermittente
de « grande puissance » :
éoliens, photovoltaïques, houlomoteurs...

Source : Denis Delbecq

B. Multon ENS Cachan

Stokage hydraulique gravitaire

Le moyen de stockage massif le plus largement employé dans le monde, encore de très grandes possibilités.



Rendement : 70 à 80 %
 Démarrage : 10 à 15 min
 Capacité : 1 à qq 100 GWh
 Puissance : 100 à 1000 MW



Exemple : Grand-Maison
 935 m de dénivelée, 170 Mm³
400 GWh

1400 MW en pompage
 1800 MW en turbinage

B. Multon ENS Cachan

Stockage adiabatique par air comprimé en caverne

Inclut une récupération de la chaleur lors de la compression

Projet ADELE (RWE) : 1 000 MWh – 200 MW
 (2013) Rendement \cong 70%

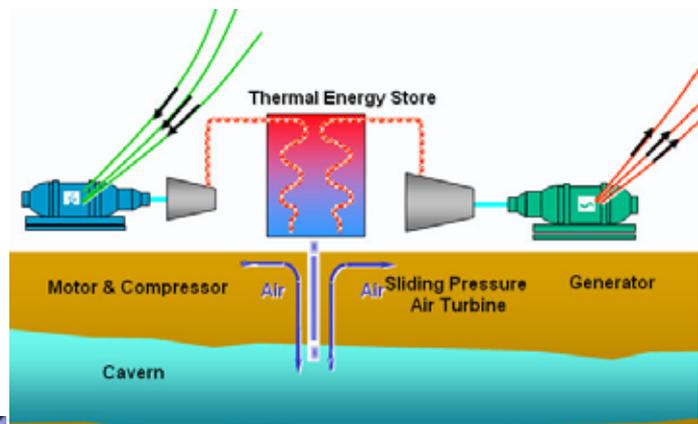


Source : RWE

Vers cavernes
 (air comprimé)



Source : German Aerospace Center

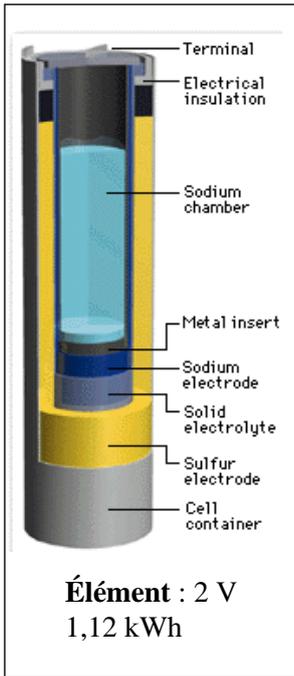


Source : Alstom Power

Réservoirs de chaleur > 600°C

B. Multon ENS Cachan

Batteries Sodium Soufre (NaS) de grande capacité, un produit industriel mature et performant

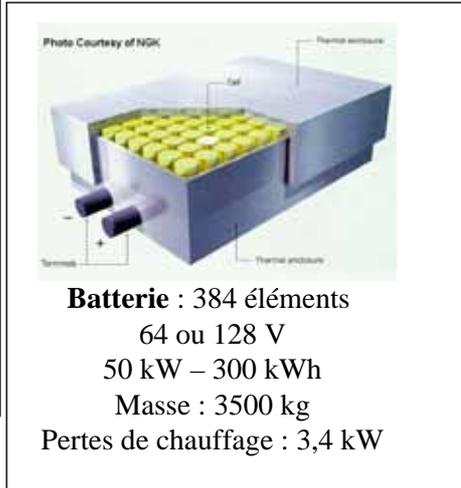


300°C

Rendement charge/décharge : 75 %

Vie : 15 ans

4500 cycles à 80% DOD



Charleston American Electric Power (AEP), <http://www.technologyreview.com/>

Module 2 MW – 12 MWh

(40 batteries)

172 tonnes

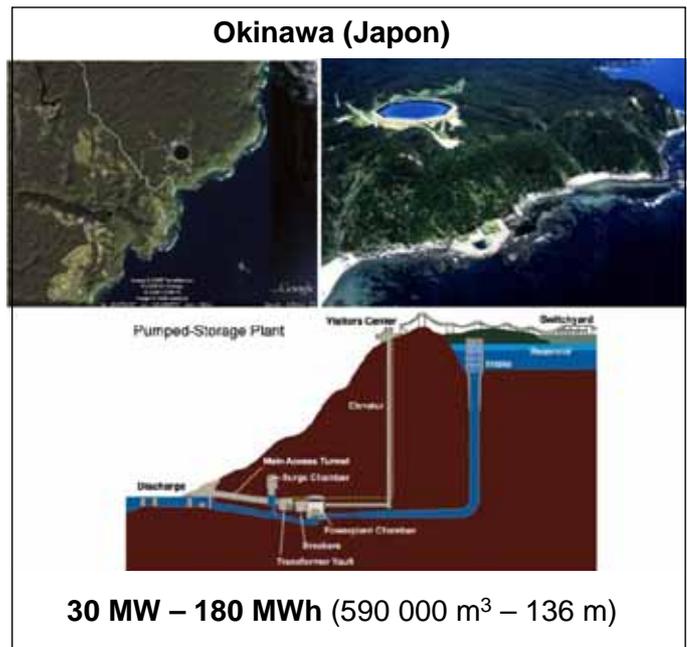
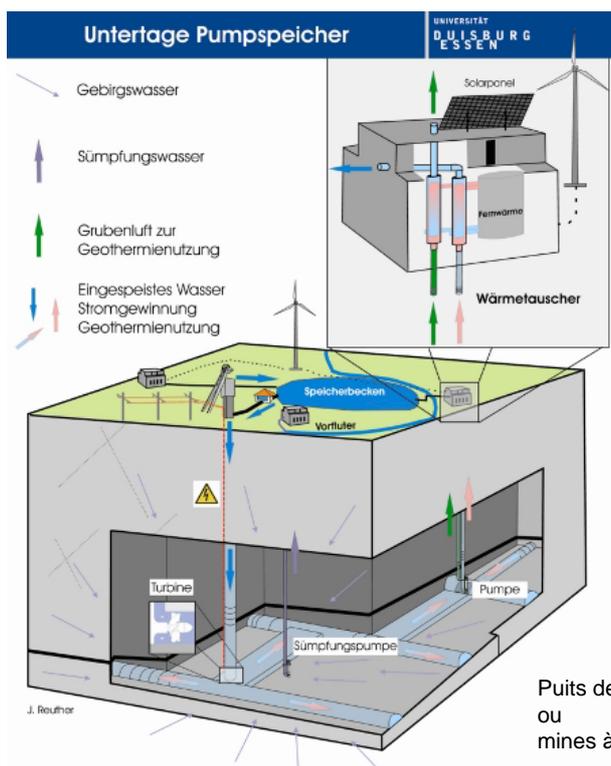
L : 10 m - P : 3,6 m

H : 4.7 m

Source: NGK

B. Multon ENS Cachan

Pompage-turbinage : nouvelles possibilités : souterraines, bord de mer...

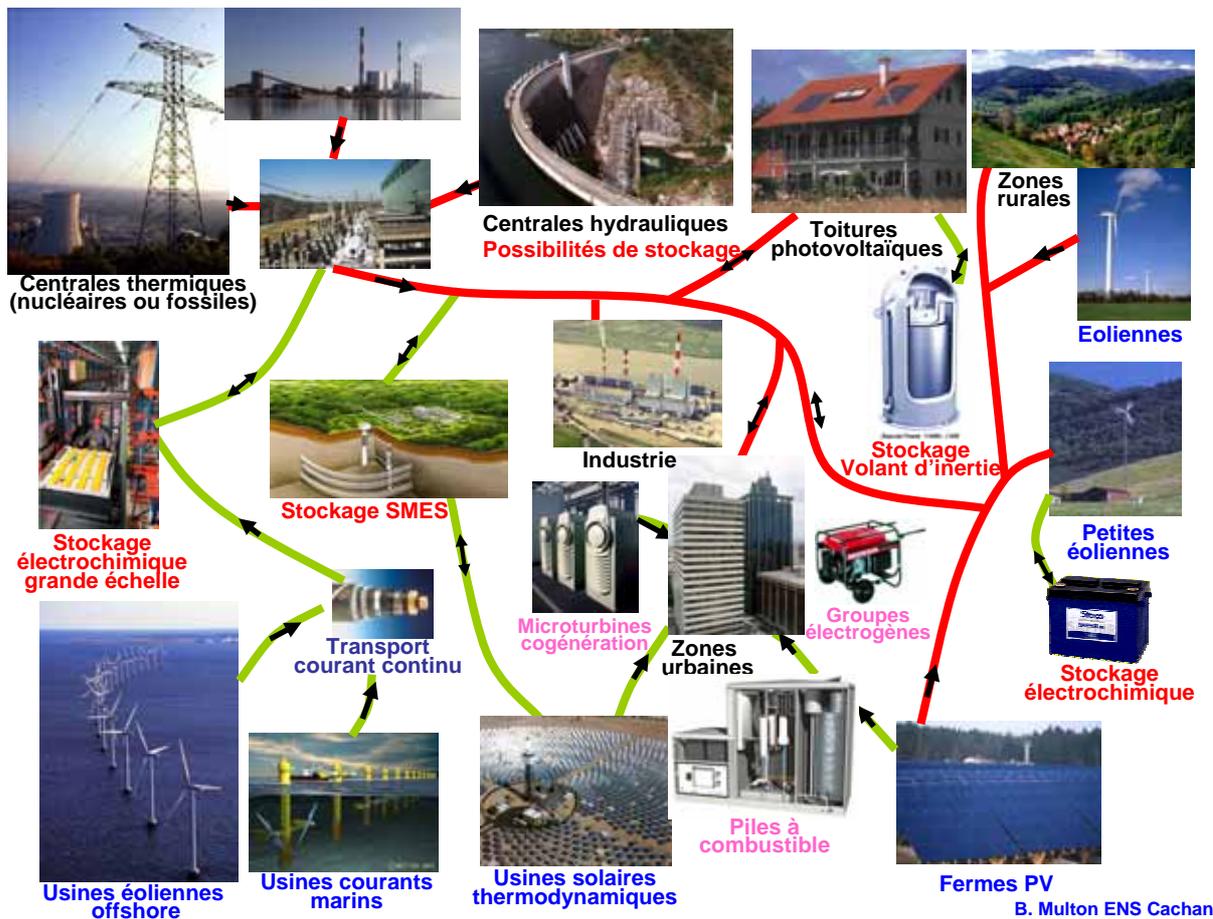


Puits de mines houille (1000 m)
ou
mines à ciel ouvert lignite (400 m)

Source : Universités Duisbourg-Essen et Ruhr à Bochum

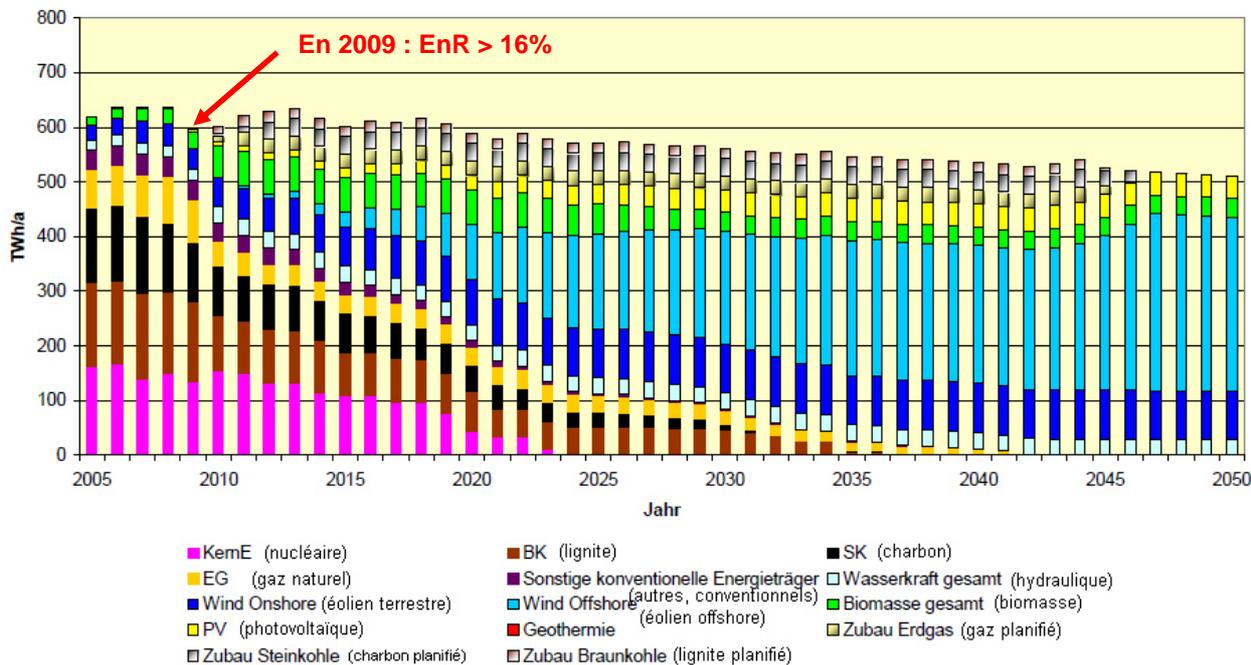
B. Multon ENS Cachan

Mutation du réseau : diversité des sources, exploitation du stockage



Scénario allemand (2010) vers une électricité 100% renouvelable en 2050

Entwicklung der Bruttostromerzeugung 2005 bis 2050
konventionelle Erzeugung und regenerative Energiequellen (für 509 TWh/a in 2050)



Source : 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar – May 2010
(100% d'électricité renouvelable d'ici 2050: respect du climat, sûreté, économie)

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

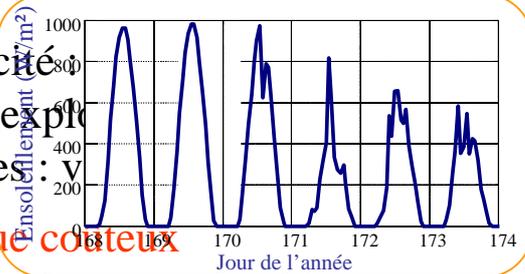
Traitement de l'intermittence dans la production d'électricité d'origine renouvelable et fluctuante

L'intermittence de la production d'électricité est
un **problème majeur** pour pouvoir exploiter
les ressources renouvelables :

parce que : **stockage de l'énergie électrique coûteux**

structure de tout le système électrique fondée

sur le **courant alternatif** et les **réseaux**



➡ Travaux sur le stockage (vision « système »)

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

Modélisations, optimisations, conception, expérimentation...

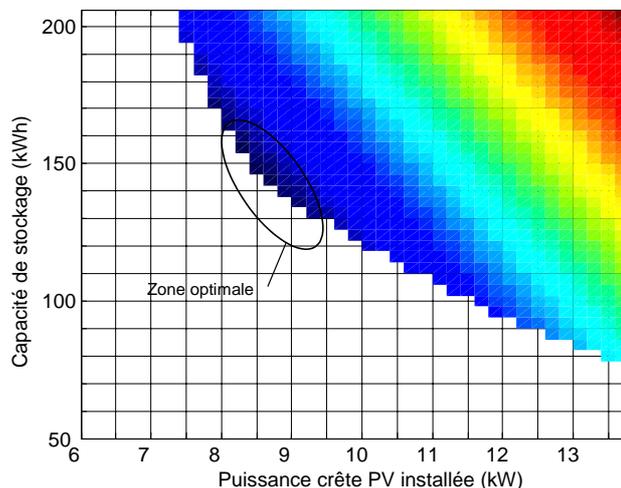
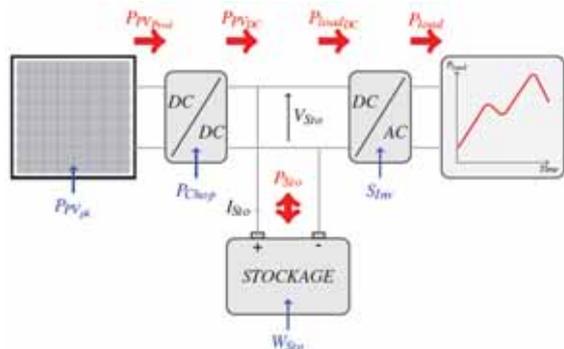


Cas d'école : système autonome PV + accumulateur

Minimisation de coût(s) sur l'ensemble de leur cycle de vie

Pour satisfaire un besoin électrique

- sur une durée d'usage de 15 ans (exemple)
- en incluant le remplacement éventuel de l'accumulateur (usure)

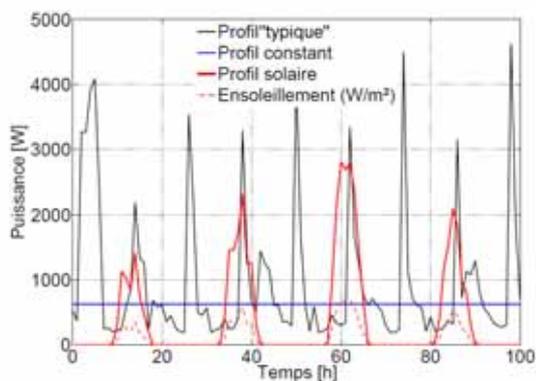
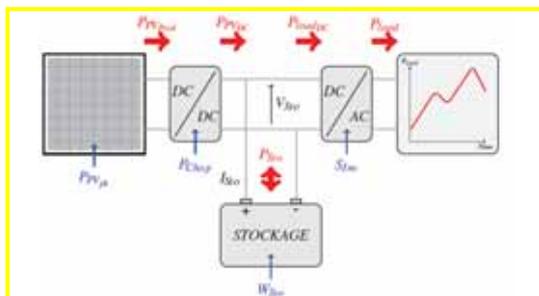


Sources : thèses ENS Cachan Olivier Gergaud (2002) et Yaël Thiaux (2010)

B. Multon ENS Cachan

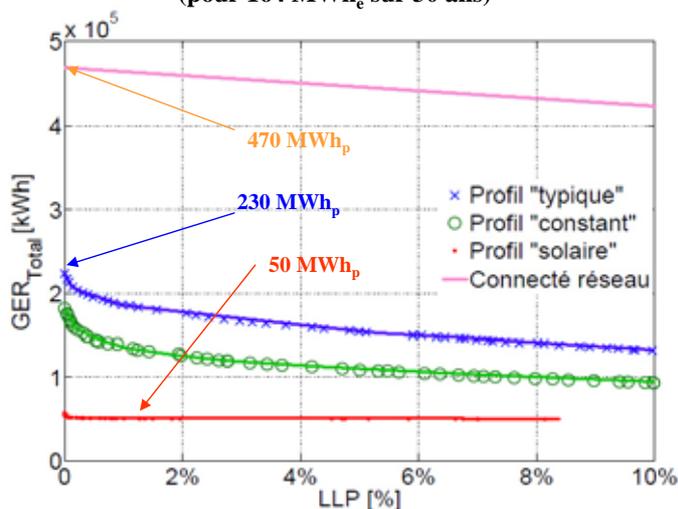
Optimisation de la gestion d'énergie pour minimiser le coût énergétique global sur cycle de vie

Application à un système autonome photovoltaïque :



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

(pour 164 MWh_e sur 30 ans)



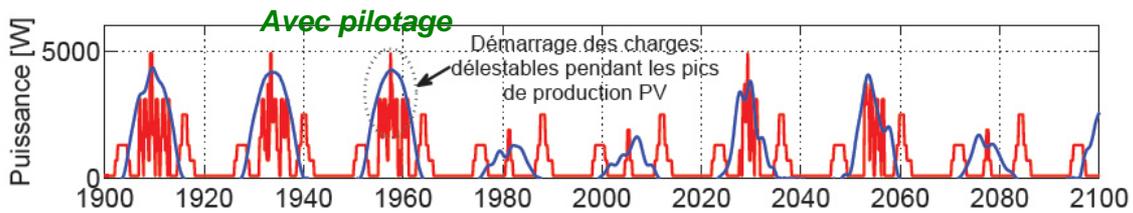
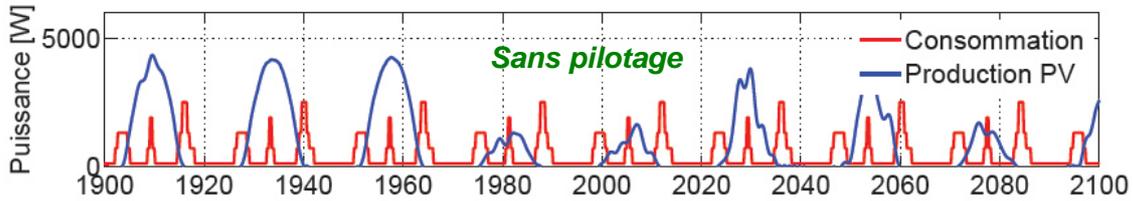
Thèse Yaël THIAUX (2010) - SATIE

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

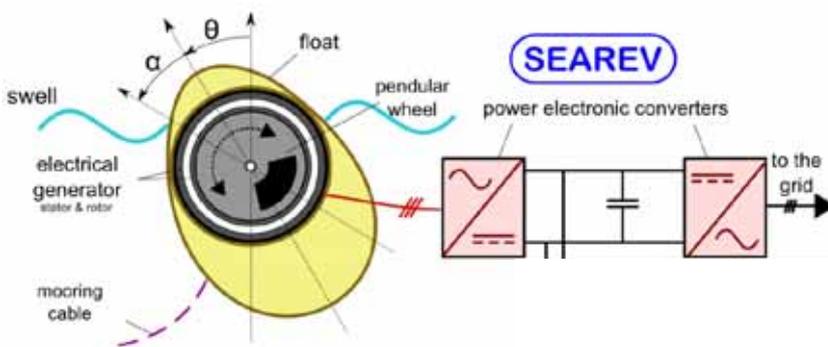
➔ Amélioration sensible sur l'ensemble du cycle de vie, par rapport à la techno Plomb-acide

Thèse Yaël THIAUX (2010) - SATIE

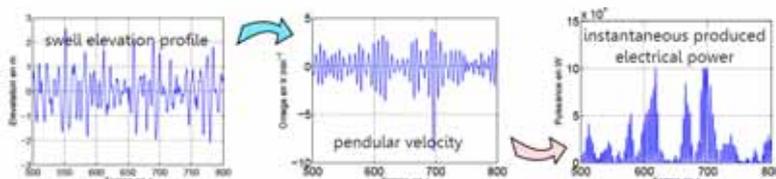
B. Multon ENS Cachan

Houlogénérateur SEAREV

Collaboration Ecole Centrale de Nantes – ENS de Cachan

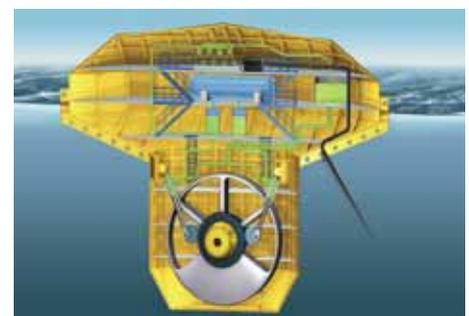


J. AUBRY et al. ICOE 2010

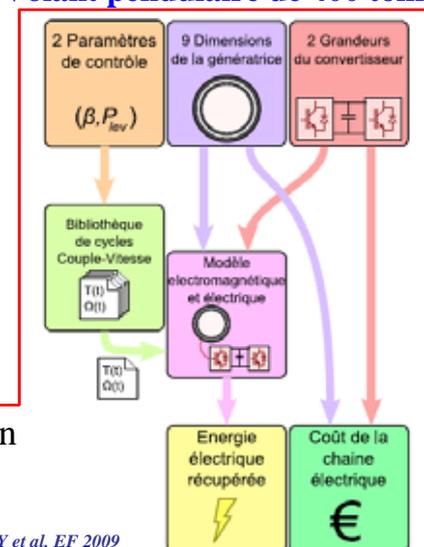


Un système complexe dont il faut optimiser de façon imbriquée, le dimensionnement et le contrôle :

J. AUBRY et al. EF 2009



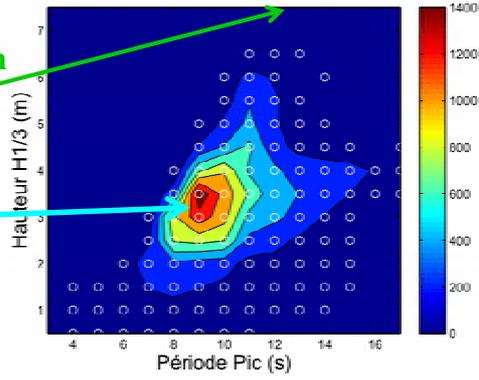
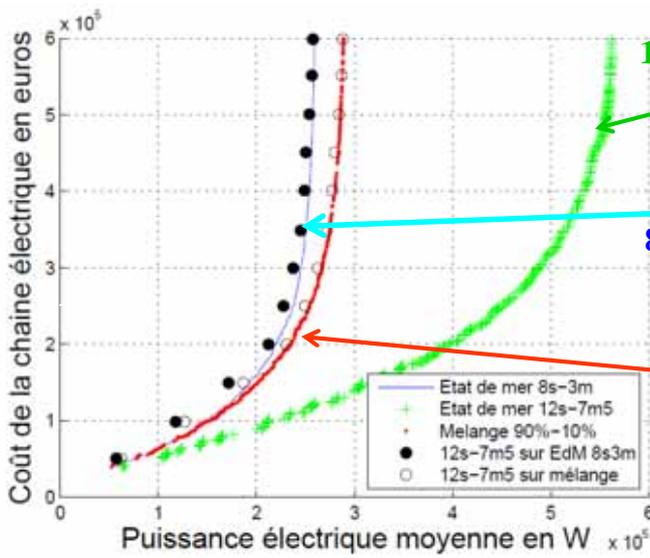
1000 tonnes déplacées
Volant pendulaire de 400 tonnes



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

B. Multon ENS Cachan

SEAREV : Minimisation du coût de la chaîne de conversion électrique...



mélange d'états de mer sur 1 an



Exemple de chaîne optimisée :

Paramètres		Optimisation couplée
Energie électrique récupérée	kWh	68
Coût de la chaîne électrique	k€	155
Coût de la génératrice (parties actives)	k€	66
Coût du convertisseur	k€	89
Puissance apparente du convertisseur	kVA	780
Puissance mécanique d'écrêtage	kW	700
Coefficient d'amortissement visqueux	MN.m.s ⁻¹	2.5
Energie mécanique du cycle	kWh	74
Nombre de paires de pôles	-	220
Masse des parties actives	kg	14000
Masse des aimants	kg	234
Diamètre externe	m	10
Longueur externe	m	0.43

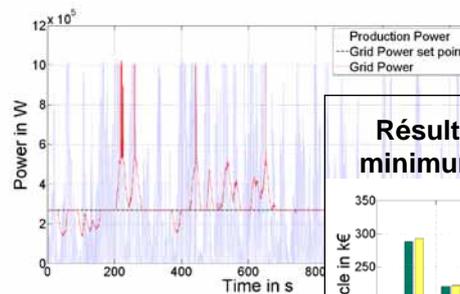
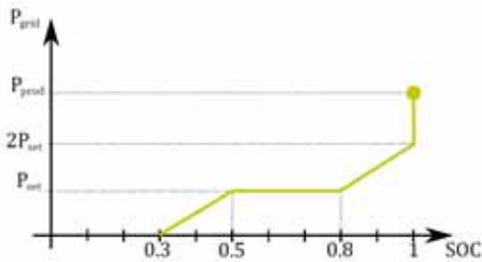
Thèses Marie RUELLAN (2007) et Judicaël AUBRY (en cours)- SATIE

B. Multon ENS Cachan

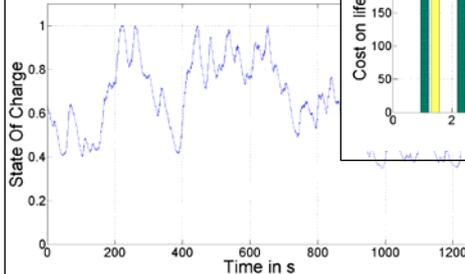
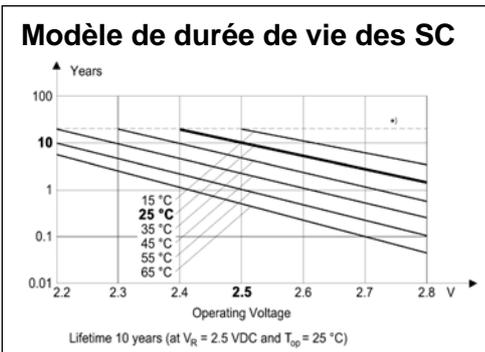
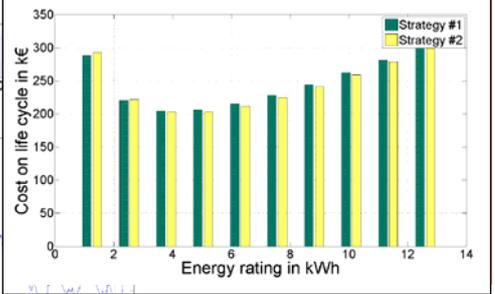
SEAREV : une production très pulsante à lisser

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



J. AUBRY et al. ICOE 2010

B. Multon ENS Cachan