



Énergie, électricité et soutenabilité

Bernard MULTON
Ecole normale supérieure de Rennes
Laboratoire SATIE – CNRS
Bernard.multon@ens-rennes.fr



**Place de l'électricité
dans le mix
énergétique mondial**

Unités physiques de l'énergie et équivalences

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

Ou encore :

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

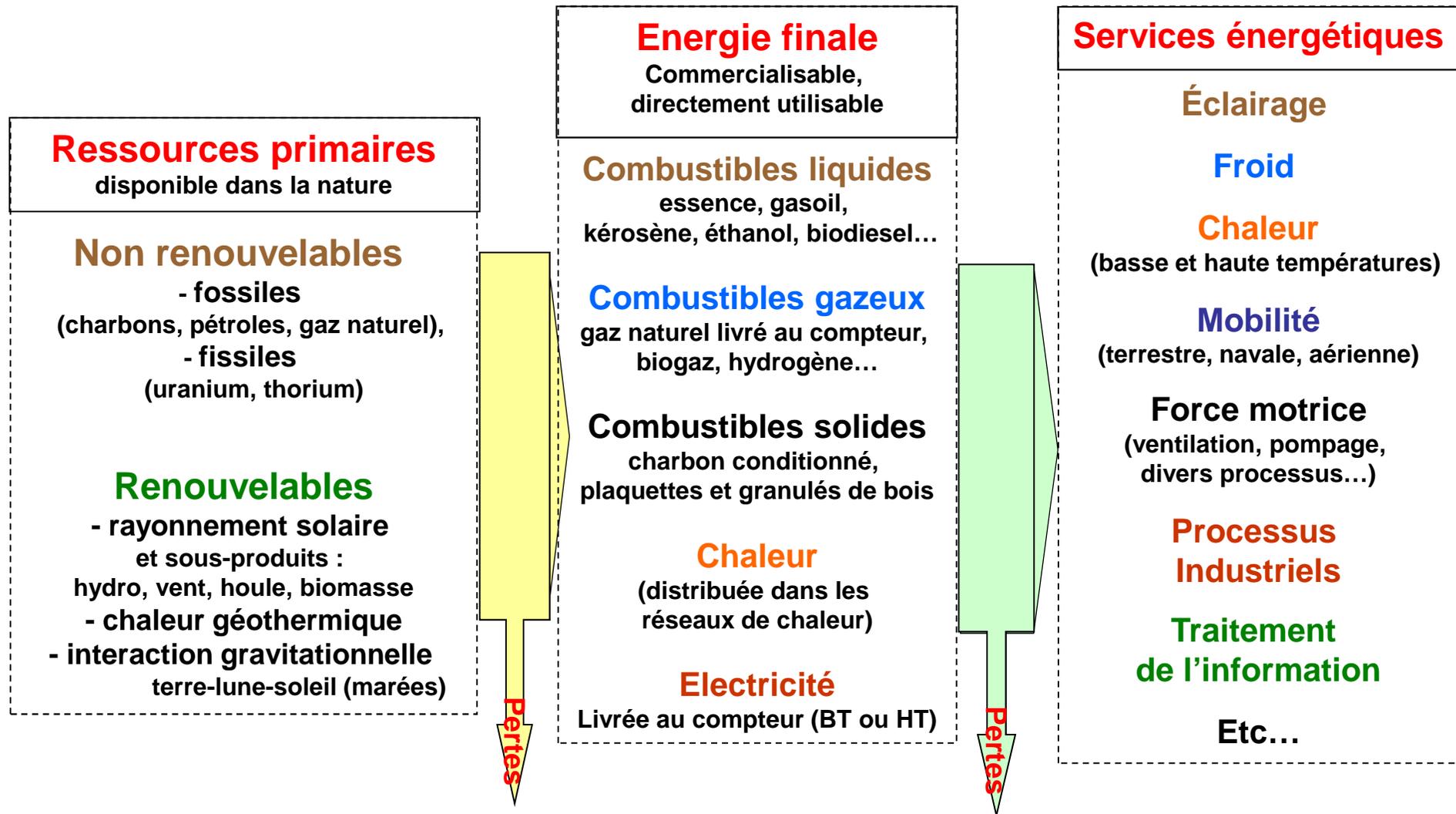
$$1 \text{ TWh} = 1 \text{ milliard kWh}$$

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

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ tep} \cong 11\,600 \text{ kWh} - 1 \text{ Mtep} \cong 11,6 \text{ TWh}$$

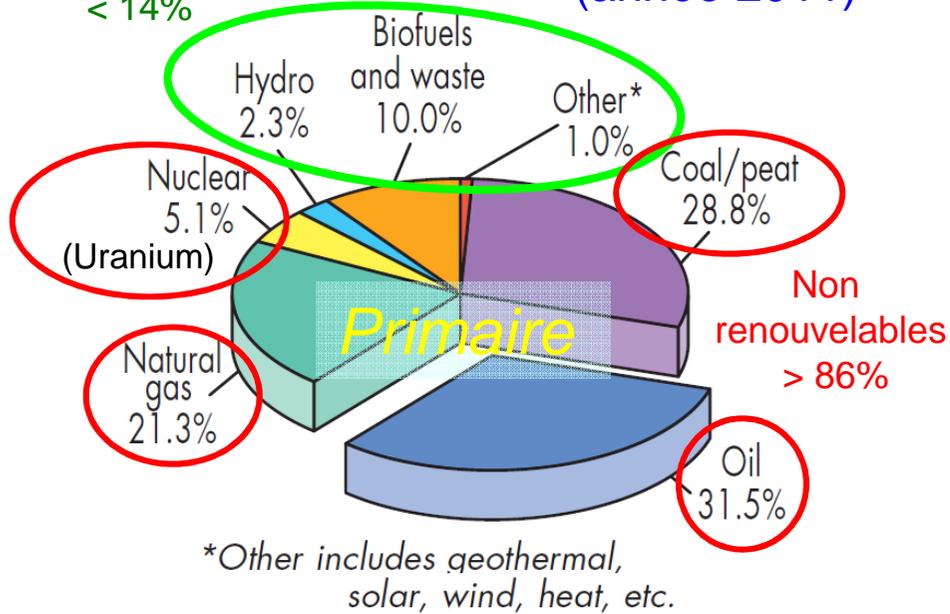
Des ressources primaires aux services énergétiques



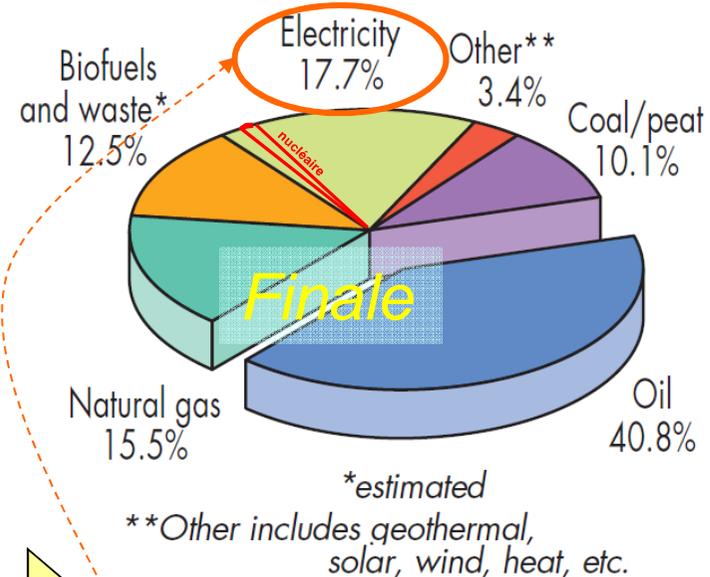
Bilan énergétique mondial : décryptage et place de l'électricité

Renouvelables
< 14%

(année 2011)



La « vraie » part du nucléaire en 2011 :
- 5,1 % de l'énergie primaire
- 11,7 % de l'électricité étant nucléaire =>
2 % de l'énergie finale (11,7% de 17,7%)



Total \cong 13,1 Gtep
(152 000 TWh)

$\eta_{\text{global}} \cong 68\%$

Total \cong 8,92 Gtep
(103 500 TWh)

> 50 000 TWh (> 33%) prélevés
pour produire:
22 100 TWh
d'électricité primaire
(en sortie des centrales)

pour commercialiser :

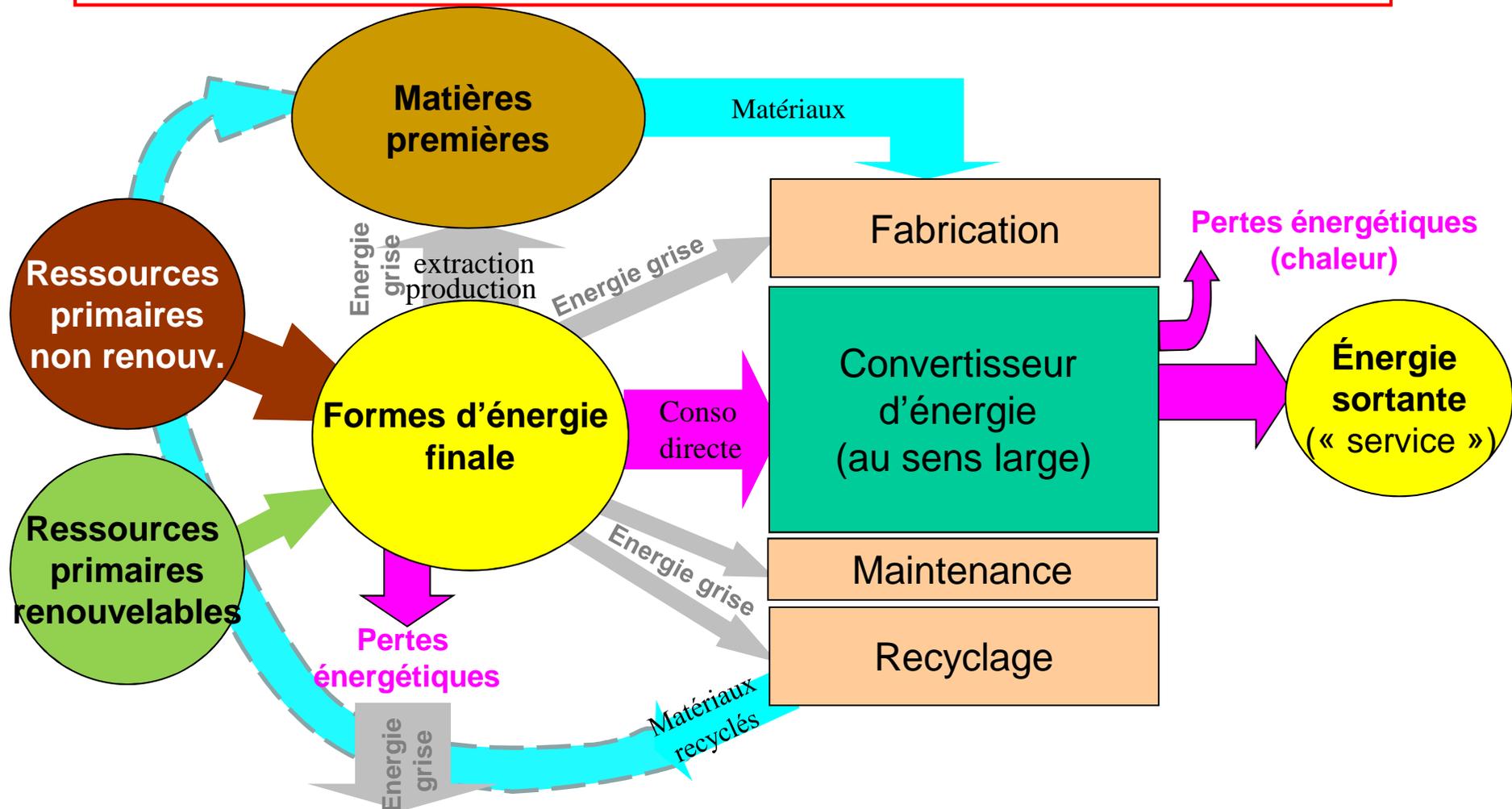
18 300 TWh d'électricité finale
(livrée aux compteurs)

Source des données AIE (Key World Energy Stat. 2013)



**Indispensables
raisonnements
sur cycle de vie**

Dépense énergétique sur tout le cycle de vie pour rendre un service

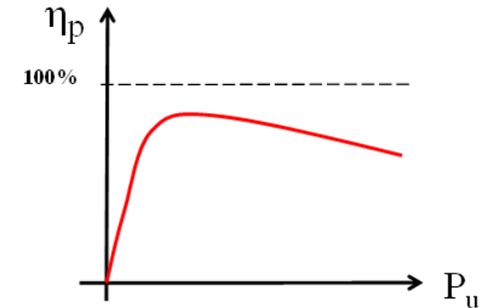


En termes de DD, ce qui compte c'est l'énergie primaire non renouvelable consommée sur la vie du convertisseur pour réaliser le service attendu

Extension des notions de rendement énergétique à tout le cycle de vie

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

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



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

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

Rendement soutenable sur cycle de vie :
(notion nouvelle

$$\eta_{\text{lca}} = \frac{E_{u_life}}{E_{u_life} + (E_{\text{losses_life}} + E_{\text{embodied}})_{\text{NR}}}$$

incluant **l'énergie grise** d'origine non renouvelable)

NR = non renouvelable)

En termes de soutenabilité, ce qui compte le plus c'est la **quantité totale d'énergie primaire non renouvelable** consommée sur la vie du convertisseur

Application du rendement sur cycle de vie aux systèmes de production d'électricité

Nucléaire : réacteur de 1 GW sur une durée de vie de 40 ans

Productivité : **280 TWh_e** (7 TWh_e/an)

Consommation d'uranium naturel : 7800 tonnes (195 tonnes/an)

Extraction minière de l'uranium : **0,58 TWh_p**

Transformation en combustible fissile (avec les meilleures techno) : **5,1 TWh_p**

Construction et démantèlement : **9,3 TWh_p**

Stockage déchets : **0,43 TWh_p**

Énergie grise : **15,4 TWh_p**

Rendement de conversion chaleur fission – électricité : **33% => 560 TWh_p pertes**

Rendement sur cycle de vie :

$$\eta_{lca} = \frac{280}{280 + (560 + 15,4)} = 32,7\%$$

+ des déchets à longue durée de vie
+ beaucoup d'acier non recyclable...

Source : *Energy Analysis of Power Systems, dec. 2013, World Nuclear Association*
<http://world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Energy-Analysis-of-Power-Systems/>

Application du rendement sur cycle de vie aux systèmes de production d'électricité

Phovoltaïque : cas des installations en toiture

(pas d'occupation de superficies supplémentaires)

Pour produire **7 TWh_e par an** avec un rayonnement de **1000 kWh/m²/an**



Avec une technologie au silicium polycristallin (rendement de 14%),
il faut : **50 TWh_{solaires}**, soit **50 km²** (en France, 8500 km² de superficie bâtie)

Fabrication des modules : 1000 kWh_p/m² soit **50 TWh_p**



Montage en toiture + onduleur : 120 kWh_p/m² soit **6 TWh_p**



Énergie grise : **56 TWh_p**

Rendement de conversion rayonnement solaire (renouv.) – électricité : **14%**

Rendement sur cycle de vie
pour 20 ans de production :

$$\eta_{lca} = \frac{7 \times 20}{7 \times 20 + (56)} = 71,4\%$$

et 83,3% (280 TWh)
sur un site avec
2000 kWh/m²/an

**+ matériaux recyclables
et beaucoup moins de déchets toxiques**

A wide waterfall cascading over rocks into a pool of water, surrounded by lush green trees and vegetation. The scene is bright and clear.

Ressources énergétiques primaires

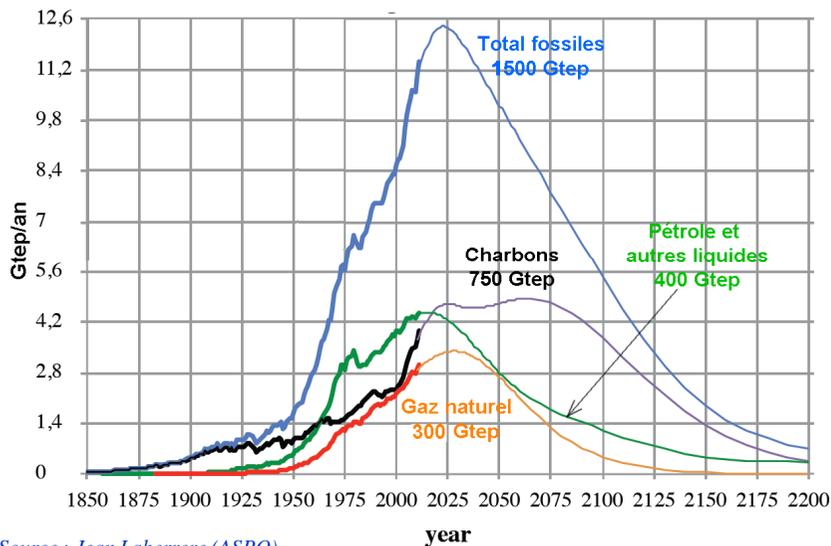


Ressources et réserves non renouvelables (en stock)

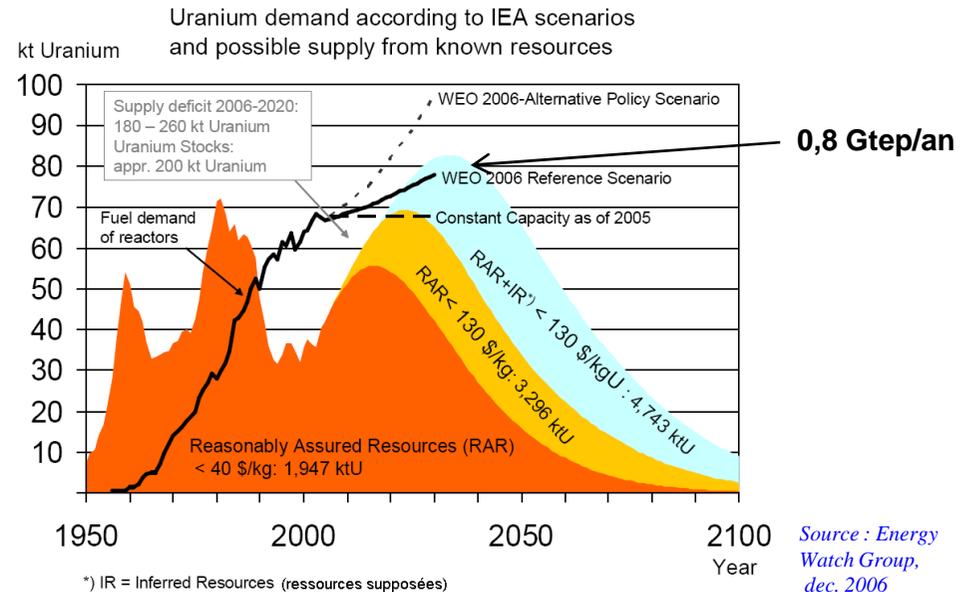
Combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) :
 entre **2000 et 5000 Gtep** (400 à 600 pétrole – 250 gaz – 3500 charbon)
 (Réserves « prouvées » < 900 Gtep)

Uranium fissile : **environ 150 Gtep** (avec réacteurs actuels)
 (Réserves « estimées » < 60 Gtep)

Si les réserves ont pu croître dans le passé, les ressources sont limitées...
 et les coûts environnementaux vont en croissant



Source : Jean Laherrere (ASPO)
 Master OSE oct. 2012

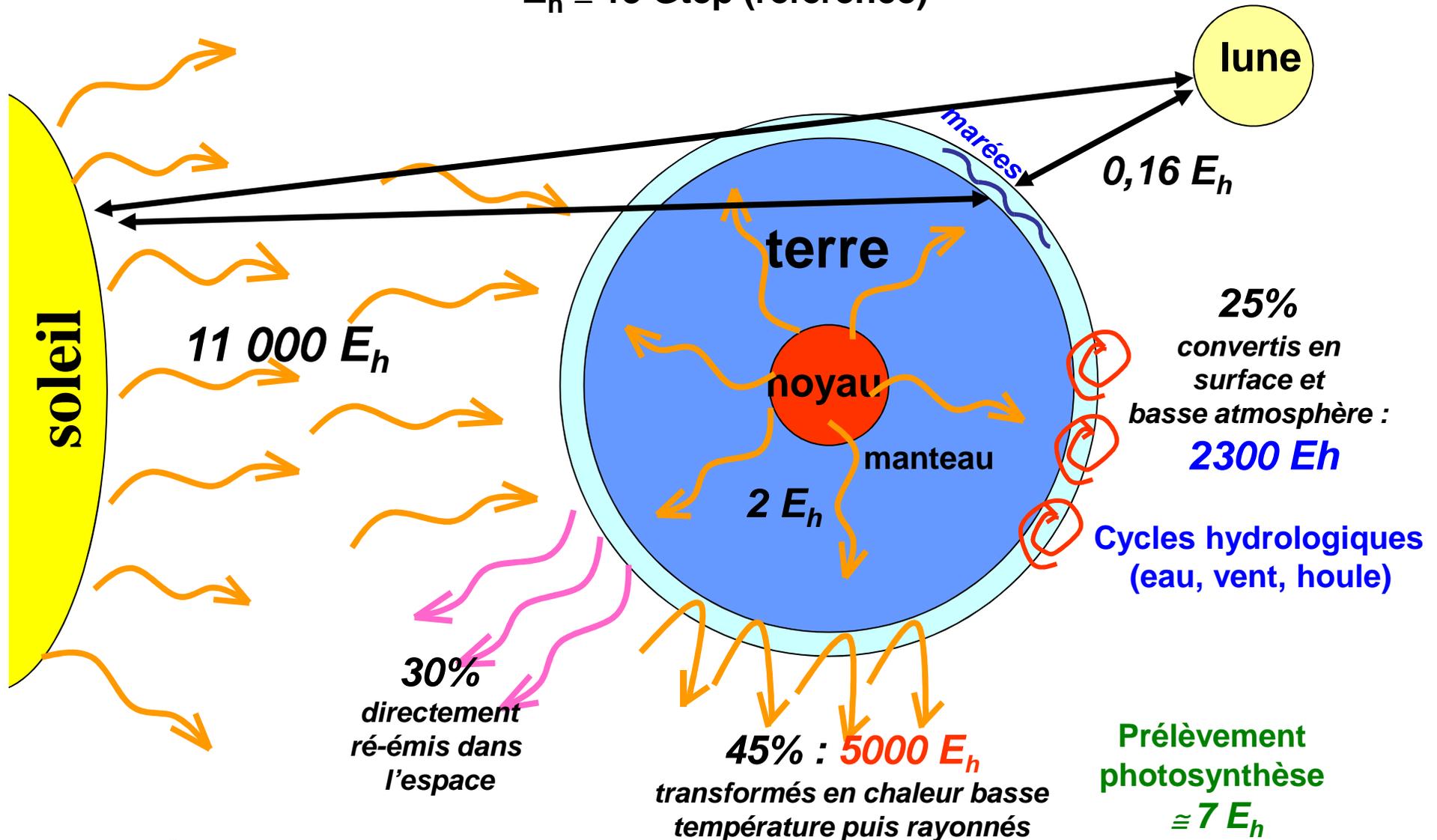


Source : Energy
 Watch Group,
 dec. 2006

Rayonnement solaire au sol : 100 000 Gtep... par an !

Ressources renouvelables (flux annuels)

Valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité
 $E_h \cong 13 \text{ Gtep}$ (référence)



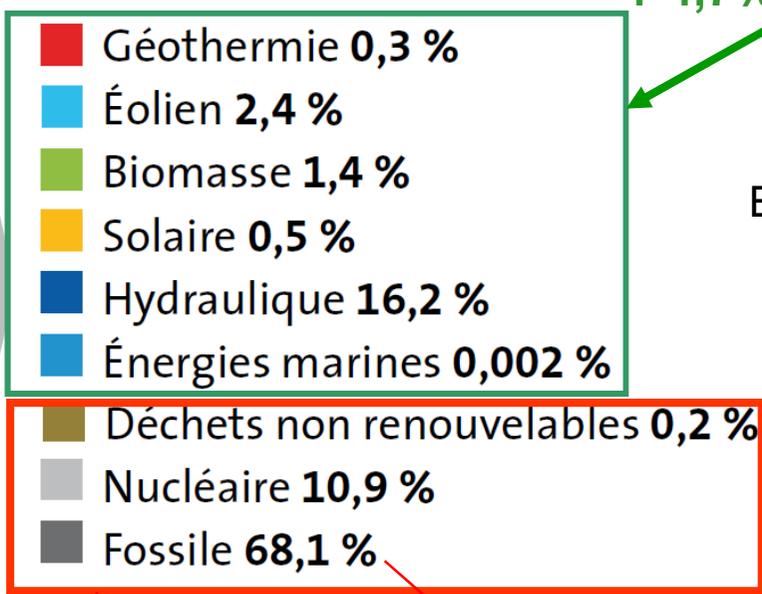
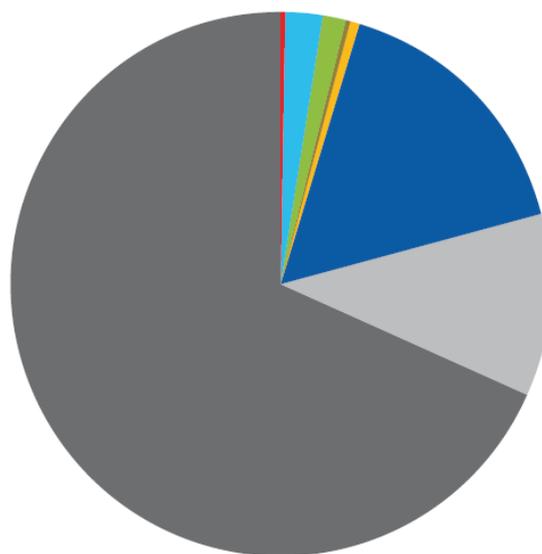
Source image : auteur

L'électricité



Origine de la production mondiale d'électricité en 2012

22 600 TWh

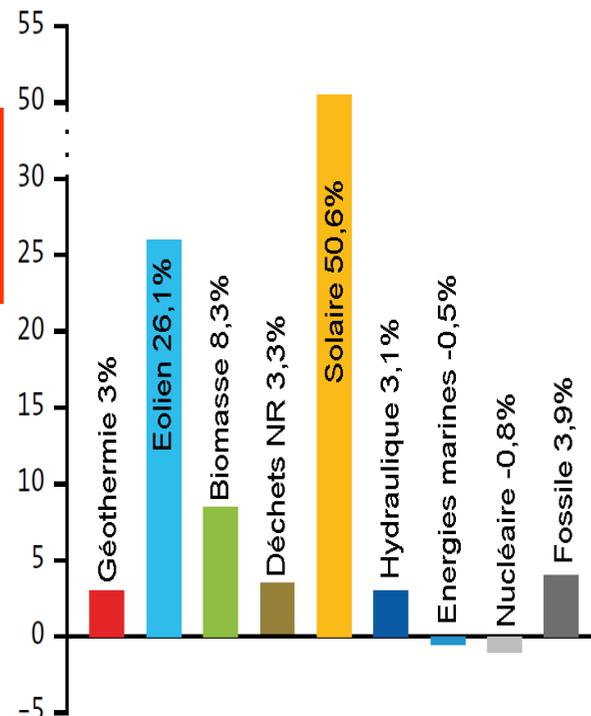


20,8 % d'origine renouvelable :
+ 4,7% par an sur 10 ans

Électricité d'origine non renouvelable :
+ 3,1% par an sur 10 ans

Total élec. : +3,4% / an (moyenne 2002-2012)
(pour +2,5% /an conso mondiale totale d'énergie finale)

Evolution moyenne en % par an sur 10 ans (2002-2012)

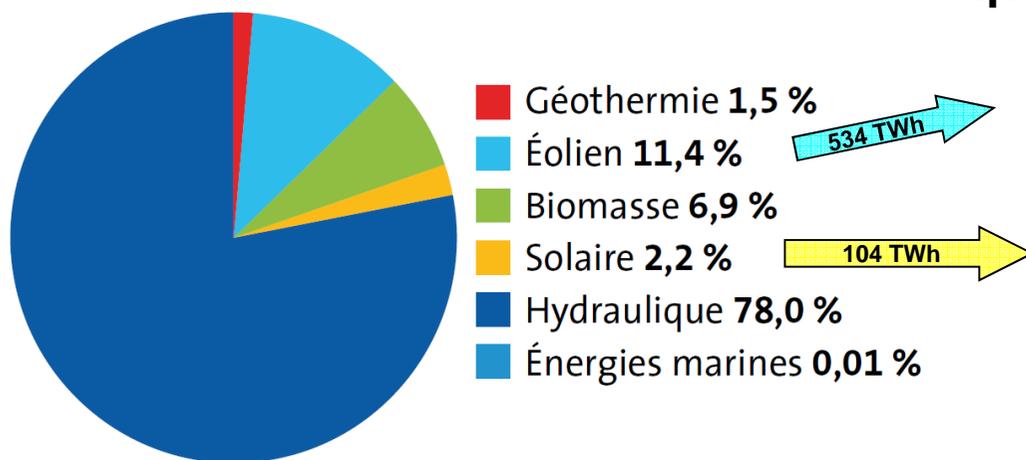


Charbon : > 40%
Gaz : > 22%
Pétrole ≅ 5%

Source : La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde Observ'ER 2013

Origine de la production mondiale électrique issue de ressources renouvelables en 2012

Renouvelables 20,8% \cong 4700 TWh



534 TWh

534 TWh

104 TWh

104 TWh

104 TWh

104 TWh

Une extrapolation de la progression qui montre les effets de l'effort mondial :

Avec + 20% par an pendant 8 ans (+26% sur 2002/2012), puis + 10% par an pendant 10 ans :
la production éolienne atteindrait : 6000 TWh en 2030

Avec + 35% par an pendant 8 ans (+50% sur 2002/2012), puis + 20% par an pendant 10 ans :
la production solaire atteindrait 7000 TWh en 2030

En 2030 :
4000 TWh hydrauliques
+ 6000 TWh éoliens + 7000 TWh solaires
+ 400 TWh biomasse + 200 TWh géothermiques
TOTAL : 17 600 TWh soit 59%
sur un total de 30 000 TWh

?

En 2050 :
100% renouvelable techniquement réalisable

Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable
dans le monde
Observ'ER 2013

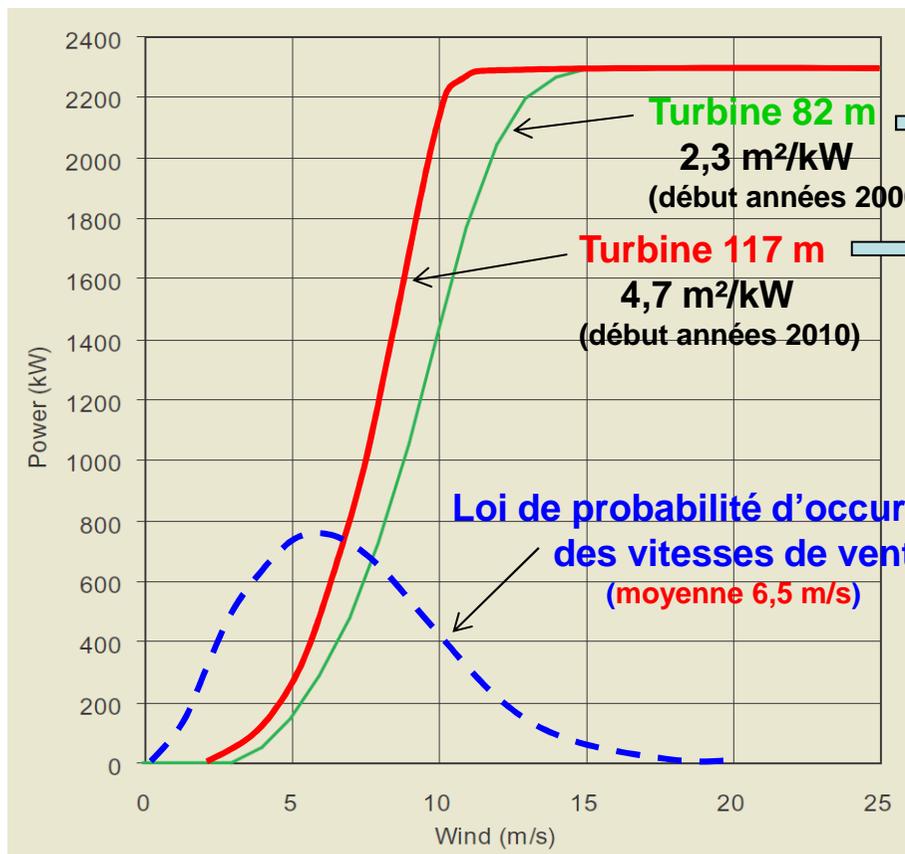
**Produire économiquement
et garantir
une électricité**

d'origine renouvelable



Production éolienne : la révolution silencieuse⁽¹⁾

Des turbines de plus grand diamètre avec la même puissance : exemple 2,3 MW



productivité annuelle
2200 h_{epp} (équivalent pleine puissance) par an

productivité annuelle
3300 h_{epp} par an



Pour un surcoût modeste :

- des machines beaucoup plus productives
- avec moins de variabilité
- des coûts de production en forte baisse

Et un potentiel terrestre considérablement ré-évalué à la hausse...
(en Allemagne : plus de 2000 TWh_e)

⁽¹⁾Source : B. CHABOT, "2014: The Year When the Silent Onshore Wind Power Revolution Became Universal and Visible to All?" Jan. 2014, <http://cf01.erneuerbareenergien.schluetersche.de/files/smfiledata/3/3/6/8/9/9/50will2014bevisiblewindrevolution.pdf>

Production photovoltaïque : l'arrivée de la parité réseau

Toits solaires et fermes au sol : un développement extrêmement rapide

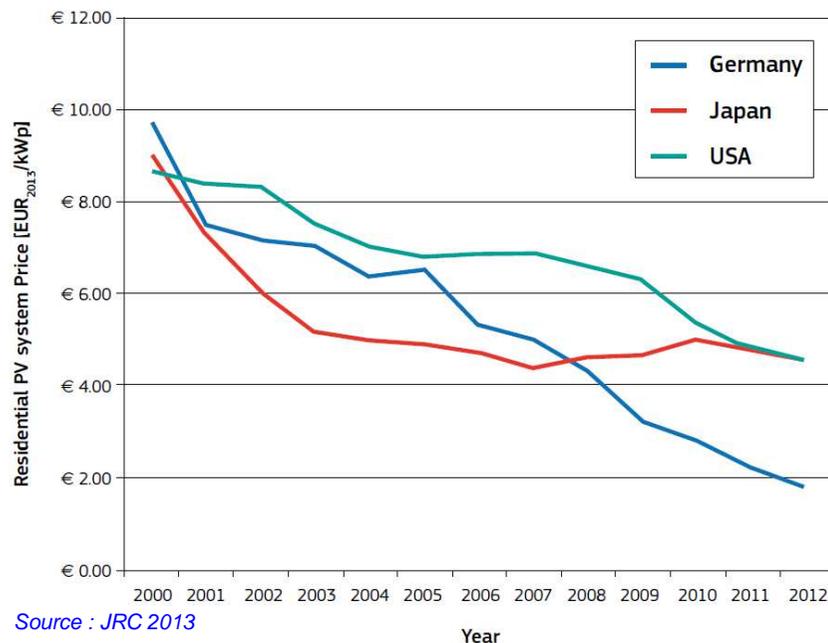


Source images : SOLHAB



Source : EDF Energies Nouvelles

Baisse des prix (installations en toiture)



Source : JRC 2013

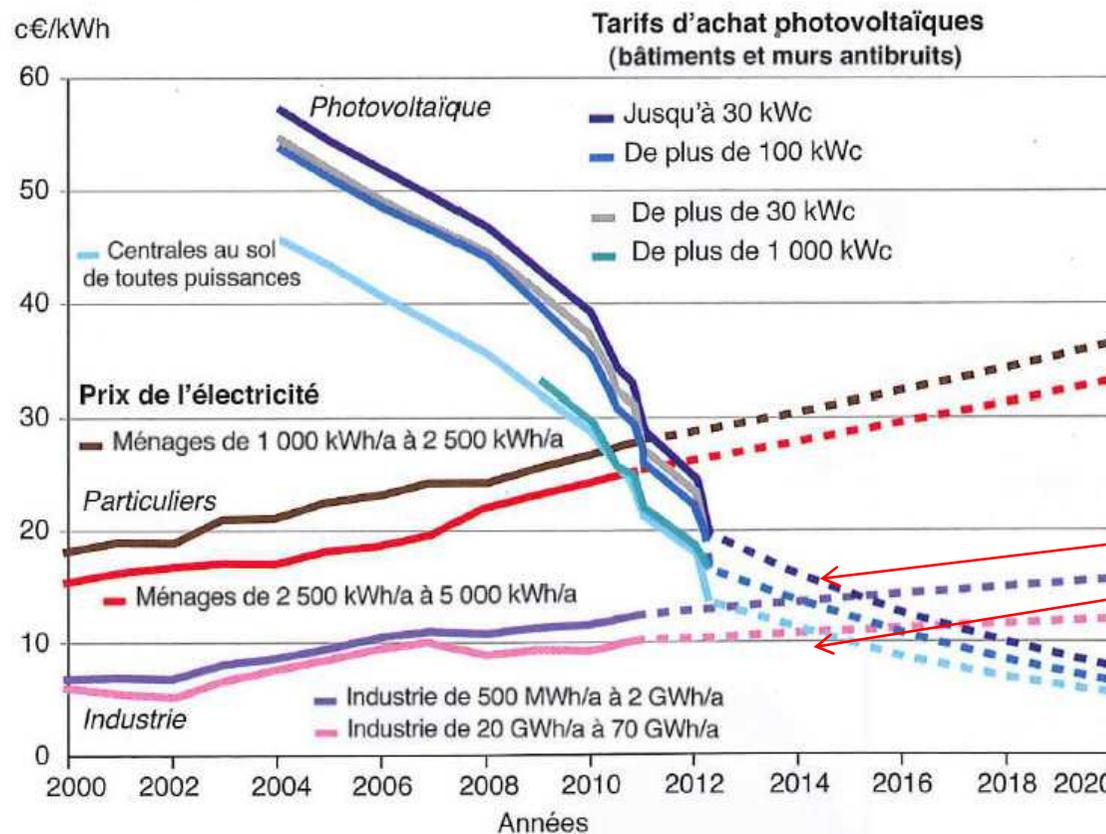
Prix actuels constatés en France :
< 2 €/W en toiture faible puissance
< 1,5 €/W au sol

Et donc des prix de revient plus compétitifs :
< 0,08 €/kWh dans les grandes fermes
< 0,12 €/kWh pour les toitures

D'où des tarifs d'achat de l'énergie PV
en chute libre !

Production photovoltaïque (suite)

Le **changement de paradigme allemand**, « grâce » à une électricité chère, tarifs de rachat de l'énergie PV inférieurs au prix de l'électricité sur le réseau :



SOURCE : BMU, EEG 2012 UN BMWI ENERGIEDATEN – © BRUNO BURGER/FRAUNHOFER ISE

Tarifs d'avril à juin 2014 :
 (non indexés sur l'inflation, sur 20 ans)
 < 10 kW: 13,28 c€/kWh
 1 à 10 MW : 9,19 c€/kWh

Depuis 2011, il est économiquement plus intéressant d'autoconsommer son électricité PV que de la vendre au réseau.

Génération thermodynamique solaire à concentration

Exemple de technologie mature : les centrales à tour

(champ d'héliostats, capteur à tour et turbine à vapeur)

Espagne Gemasolar : 17 MW_e - 110 GWh/an



Source : Torresol Energy



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

Deux réservoirs pour 15 heures de production sans soleil
=> productivité annuelle de **6500 heures par an**

Possibilité de centrales solaires flexibles : optimisation du dimensionnement

Et encore d'autres solutions pour produire de l'électricité à partir des renouvelables

Méthaniseur + cogénérateurs



Hydroliennes



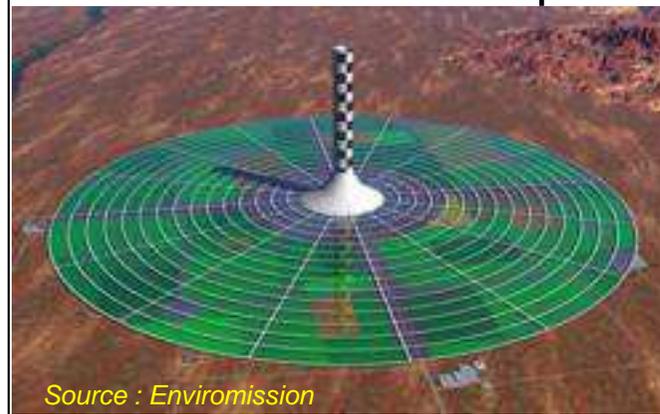
Houlogénérateurs



Solaire thermodynamique à concentration (autres...)



Solaire aérothermique



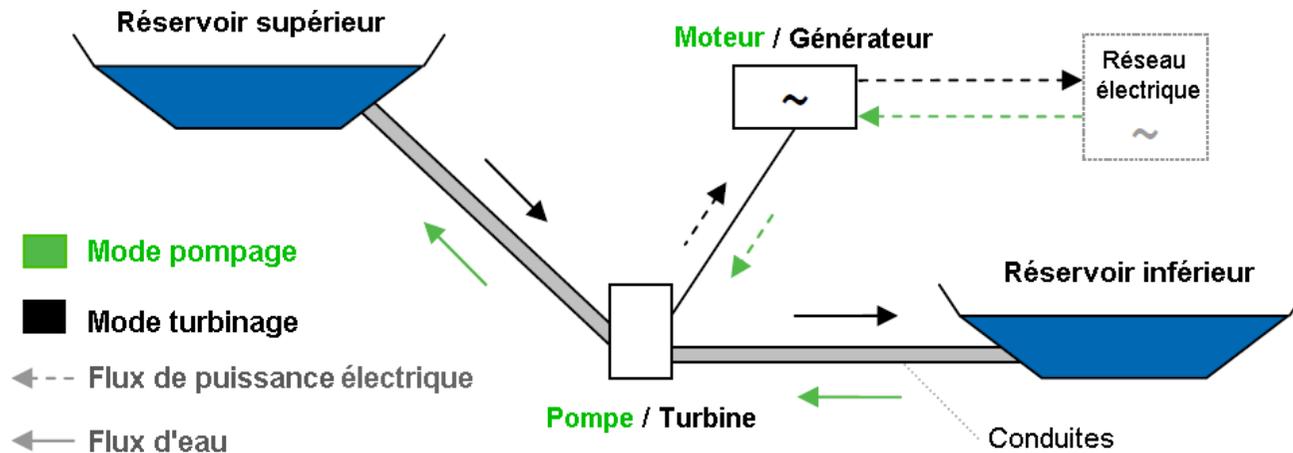
Eolien en mer



Et d'autres pour la stocker, si nécessaire...

Une solution de flexibilité importante : le stockage

Stockage hydraulique gravitaire (STEP) : solution la plus répandue pour le stockage de masse, la moins chère et à la plus longue durée de vie...



Goldistahl (Allemagne) :
1 GW – 8,5 GWh

Puissances : jusqu'à plusieurs GW

Capacités : puissance x quelques heures à quelques jours

Rendement : jusqu'à 85 % sur un cycle complet de stockage-déstockage

Encore de nombreuses possibilités d'aménagement de barrages existants.

Par exemple en Europe (UE) : potentiel de 80 TWh techniques (près de 20 TWh "faciles")

(en France : capacité X 20 = 4 TWh très accessibles)

Source : Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage, JRC Scientific and Policy reports, 2013

Alors, une 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, comme dans les transports...



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

L'idée fait son chemin : Portugal (2017), Ecosse (2020), Autriche,
Danemark, Allemagne... en France (négaWatt)

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

Pour résoudre ce problème : mettre plus d'intelligence et exploiter tous les moyens de flexibilité

En exploitant pleinement les **barrages hydroélectriques**

En accroissant les capacités de **stockage** (réversible) d'électricité, notamment en aménageant des barrages en STEP

En généralisant le **pilotage des charges** « non prioritaires » et/ou flexibles (eau chaude, batteries VE...)

En optimisant la **complémentarité** des ressources variables...

En exploitant pleinement les **prévisions météorologiques**

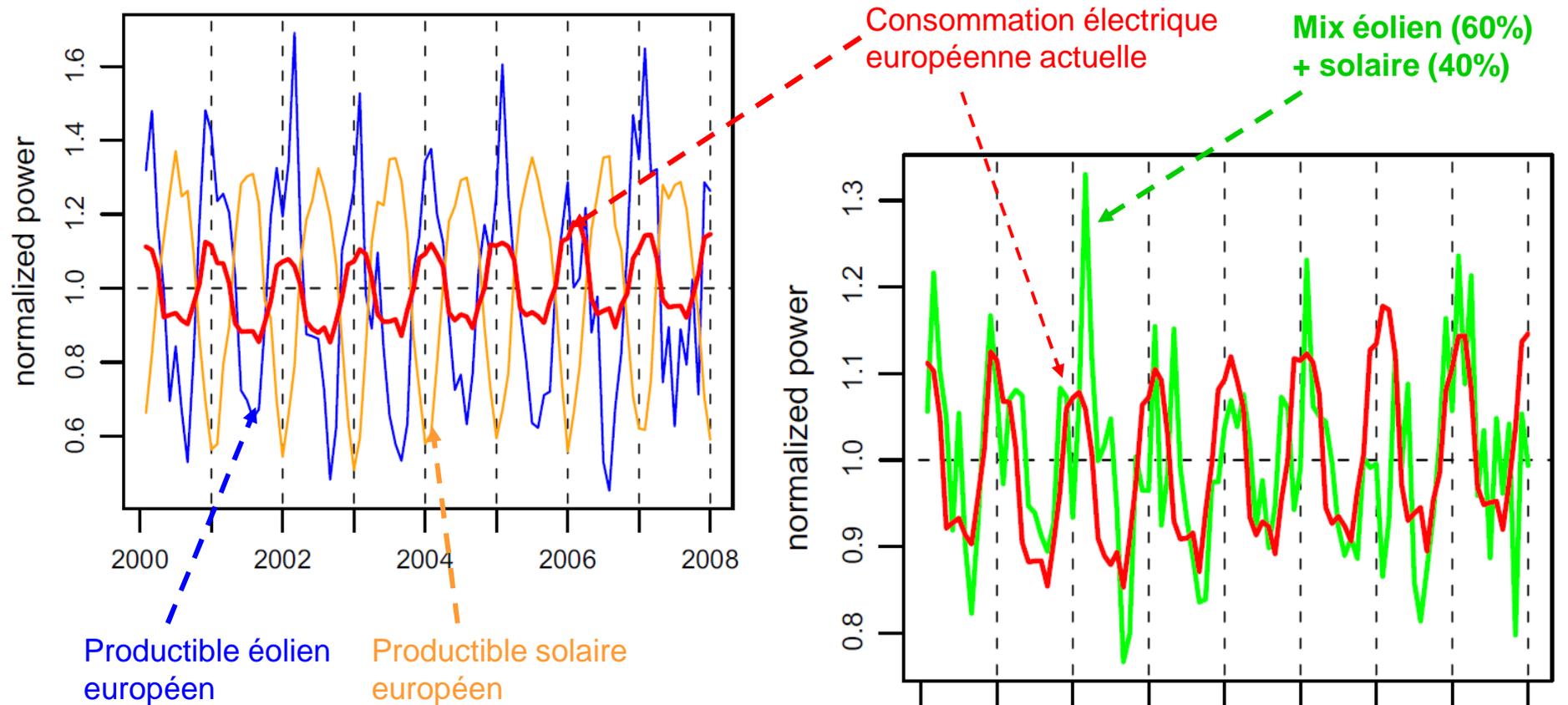
En utilisant des **combustibles renouvelables** pour disposer de capacités de production « en stock » (en plus des barrages)

En produisant des **combustibles** (méthane de synthèse, hydrogène)

C'est la symbiose permise par les « smart grids »

Nombreux travaux en cours pour étudier la faisabilité d'un mix électrique 100% renouvelable

Exemple : complémentarité solaire et éolienne à l'échelle de l'Europe



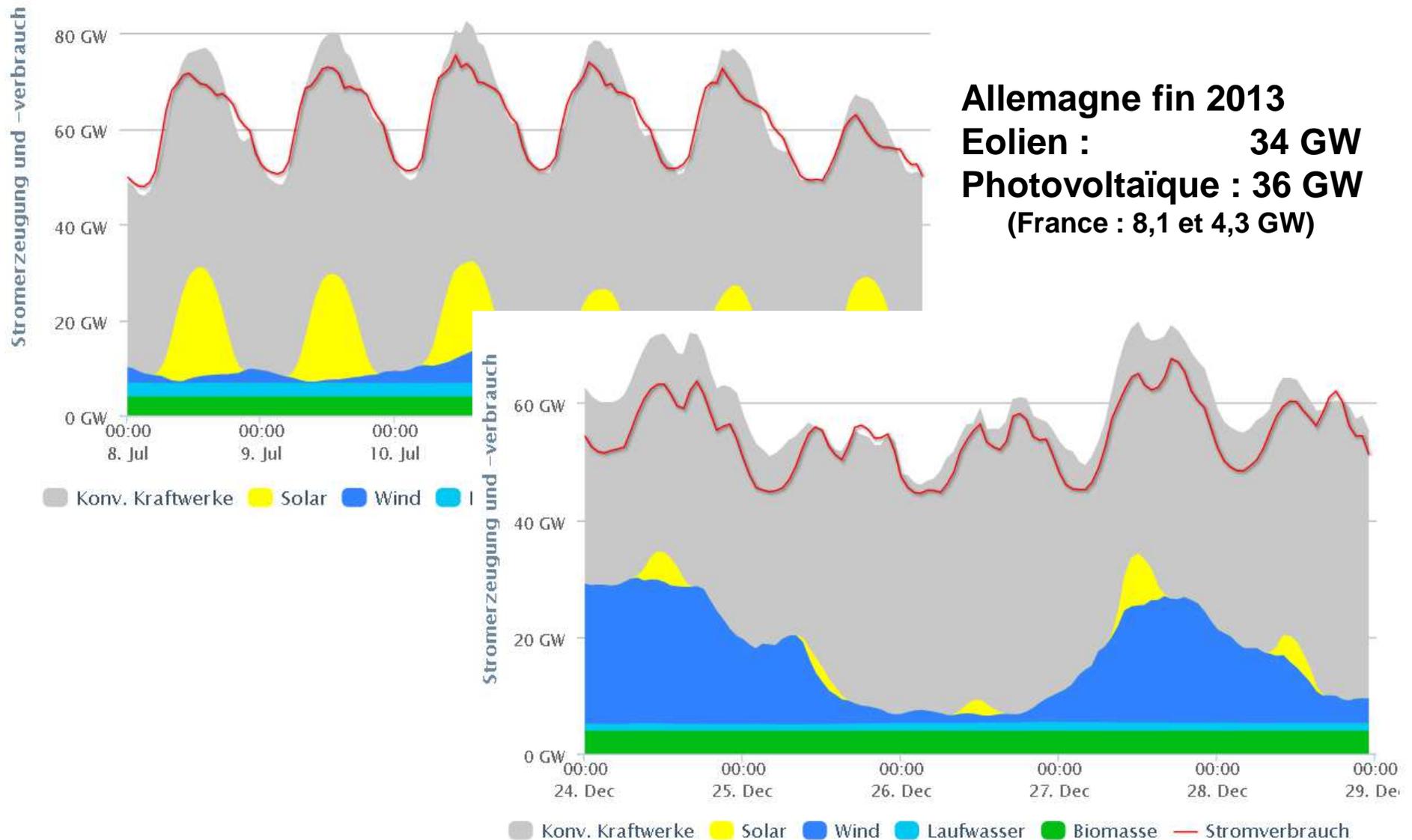
Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future highly renewable Europe », Renew. Energy, Elsevier 2010.

Voir également une simulation à l'échelle de toute l'Allemagne avec ses interconnexions :

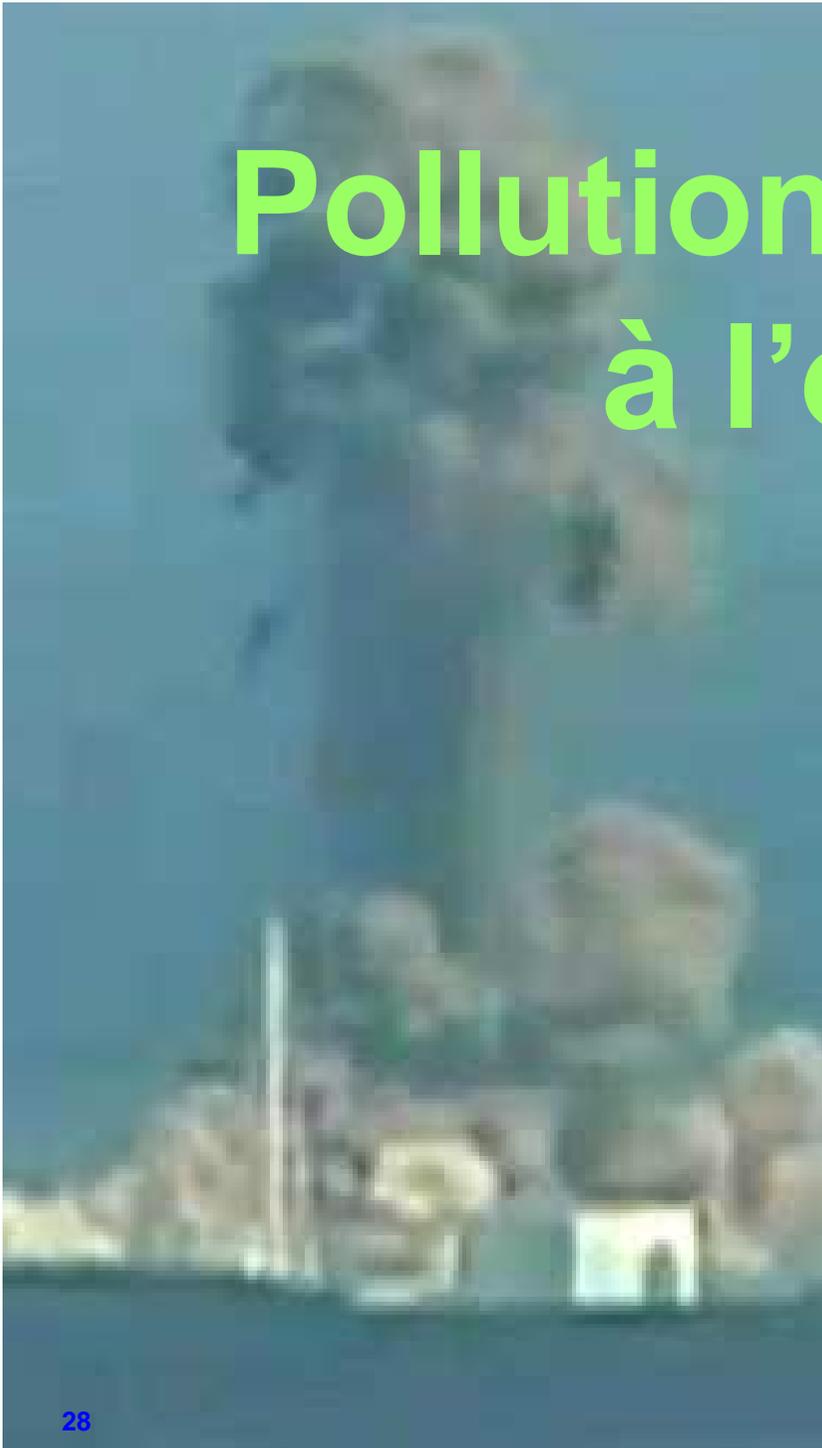
<http://www.kombikraftwerk.de/>

Production électrique instantanée en Allemagne

Exemples de profils (production et consommation) en été et en hiver 2013



Pollutions associées à l'énergie



Rejets issus de l'exploitation des ressources renouvelables

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

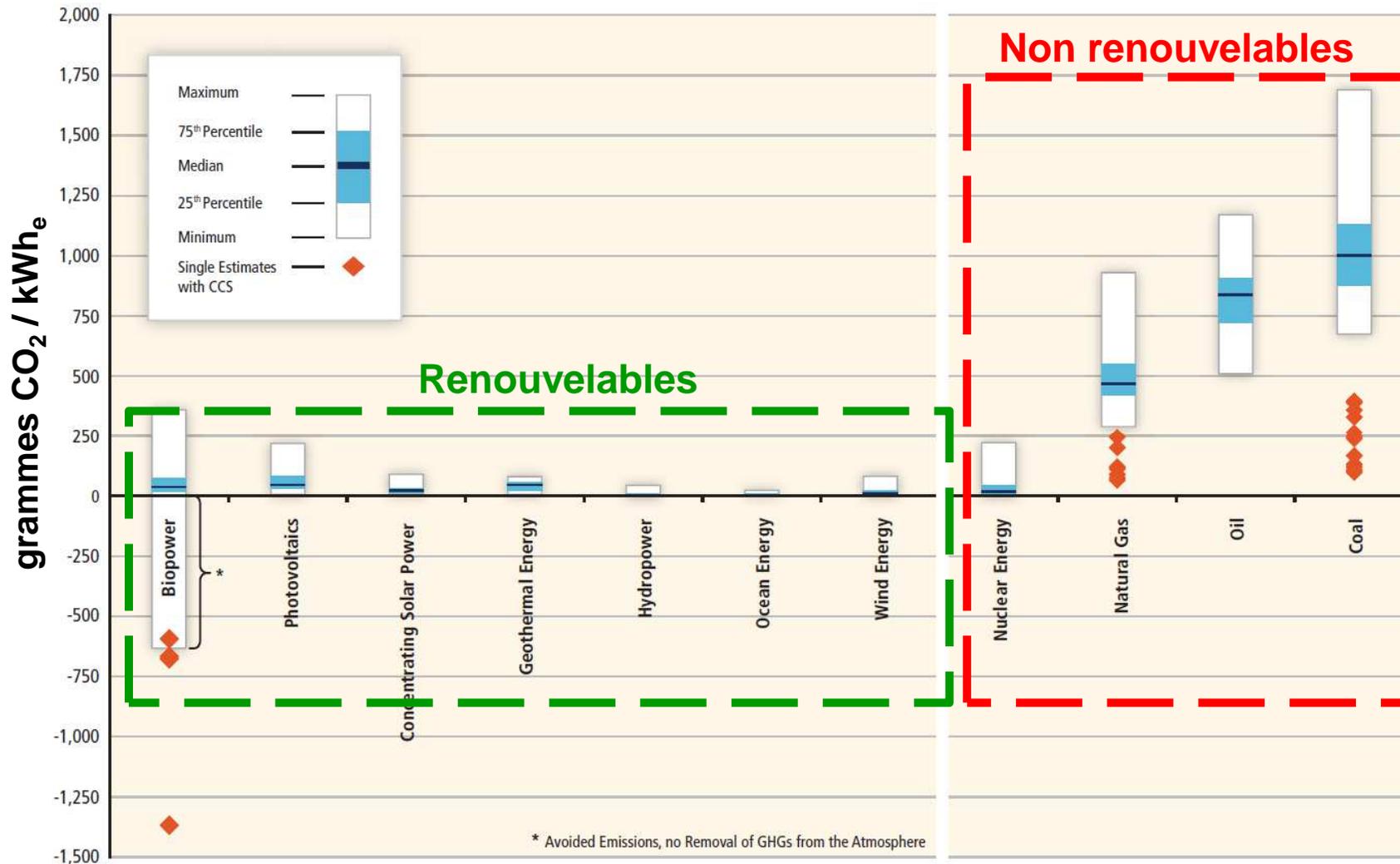
Même fabriqué en Chine (forte proportion de charbon), un **système photovoltaïque** émettra, sur sa vie, moins de gaz à effet de serre ou de radiations ionisantes que toute autre solution conventionnelle

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

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

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

Bilan des émissions de GES sur cycle de vie des diverses voies de production d'électricité



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

Conclusion...



Soutenabilité de la production d'électricité

Une conversion à partir de **ressources primaires qui ne s'épuisent pas**,
et de matières premières abondantes et recyclables.

Fossiles, fissiles (y compris les réacteurs à neutrons rapides),
et même la fusion (deutérium-tritium) ne respectent pas ces critères....

Une conversion **qui minimise les impacts environnementaux**,
surtout les « **plus irréversibles** »

Les émissions massives de gaz à effet de serre
qui affectent violemment le climat



Les émissions radioactives qui endommagent gravement
le génome des systèmes vivants



Conclusion en termes de soutenabilité

Les **ressources primaires renouvelables** sont suffisamment **abondantes** pour satisfaire les besoins de toute l'humanité

Elles sont **équitablement réparties** dans les zones habitées

La plupart des **solutions technologiques de conversion** existent, avec les **impacts environnementaux les plus faibles**

Les **coûts des systèmes de conversion** deviennent **compétitifs**, mais nécessitent de supporter des amortissements longs

Il « reste » à maintenir l'effort et à le propager à l'échelle mondiale... souvent contre les vents contraires !

Enfin, l'optimum global consiste, en plus de faire appel aux renouvelables, à consommer mieux et moins.

FIN



QUESTIONS ?

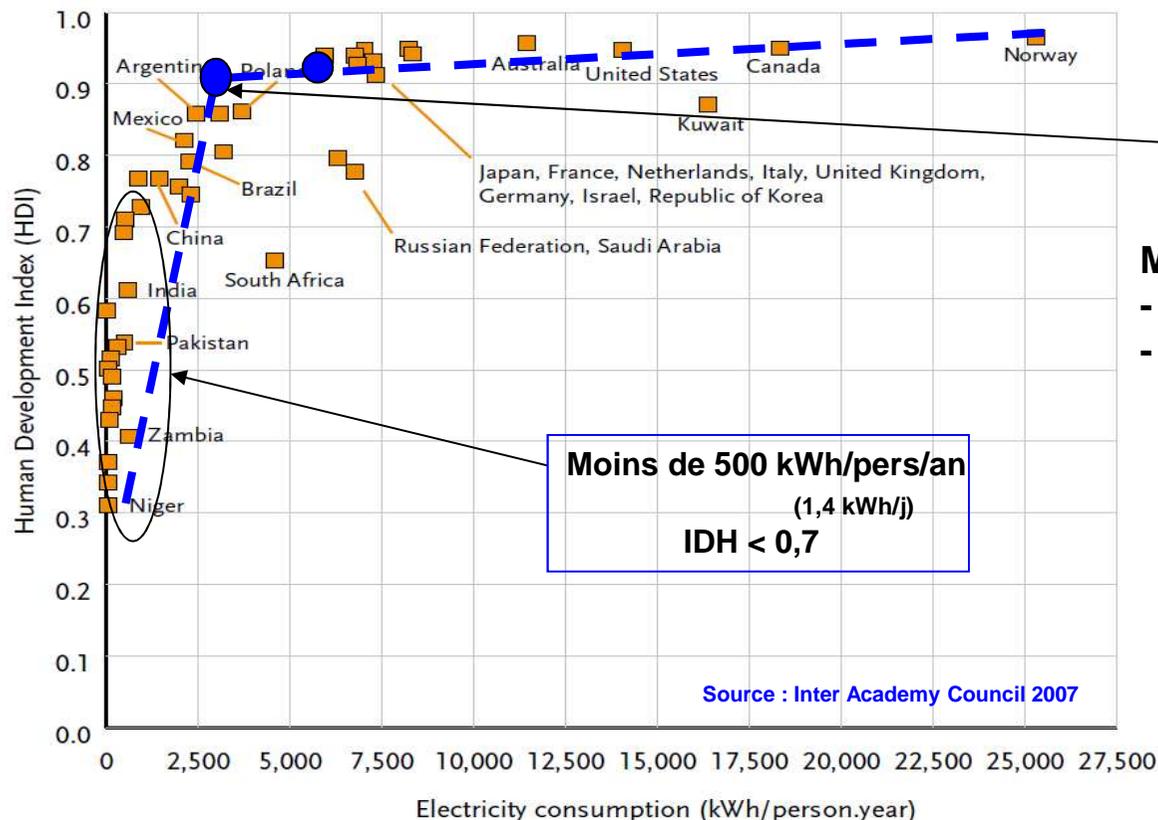


L'électricité apparaît comme un vecteur fondamental de développement humain

Une forme d'énergie au potentiel majeur pour un développement humain durable :

- conversion de toutes les ressources, surtout renouvelables
- accès à de nombreux services indispensables, améliore l'IDH :

(IDH : indice quantitatif
espérance vie, éducation, PIB/hab)



« seuil » \cong 3000 kWh_e/pers/an
pour un IDH > 0,9

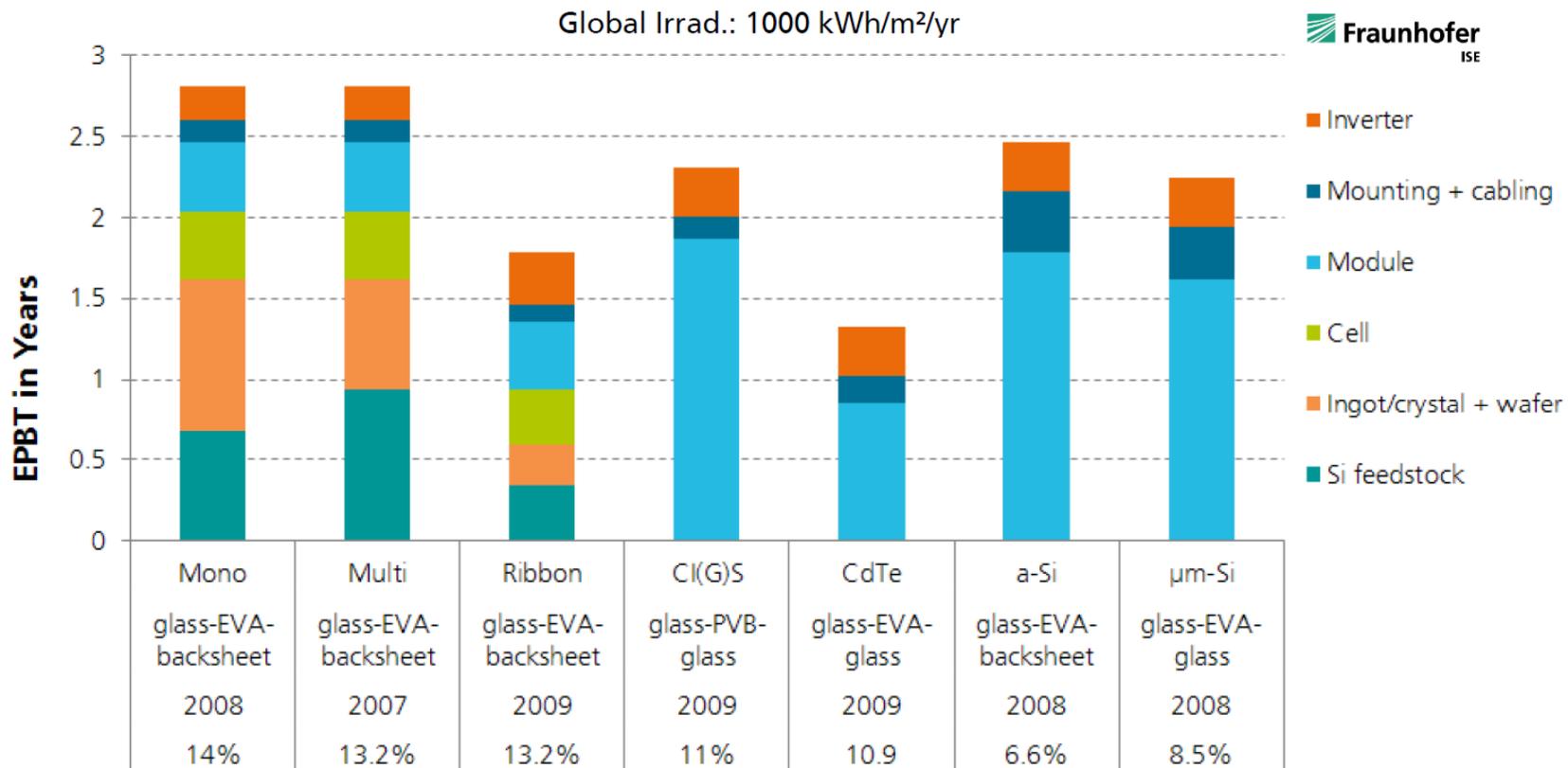
Mais :

- où est la réelle causalité ?
- une consommation d'électricité élevée n'améliore pas nécessairement l'IDH...

Il est possible qu'environ
4000 kWh_e/pers/an (11 kWh_e/j)
suffisent ?
(français : 9000 kWh_e/an)
⇒ 40 000 TWh_e/an
pour 10 milliards d'habitants

Le temps de retour sur investissement énergétique...

Cas des installations photovoltaïques en toiture :
 < 3 ans à 1000 kWh/m²/an quelle que soit la technologie



Data: ISE 2011 (for mono, multi); de Wild-Scholten (ECN), Sustainability Dec. 2009. Graph: PSE AG 2013

Source : Fraunhofer ISE nov. 2013

EPBT = Energy payback time

En amélioration continue : EPBT divisé par 2 en 10 ans (2000 à 2010)

Production éolienne

Temps de retour sur investissement énergétique

Exemple : Gamesa G8X (2 MW – 80 m)

Énergie grise : 1,6 GWh_p (tout compris)

Durée de vie : **20 ans**

Sur un site normalement venté : **2000 h/an** (production : 4 GWh_e/an)

=> retour sur investissement énergétique en électricité : **5 mois**
en énergie primaire : 1,7 mois

site terrestre bien venté : **2700 h/an** (5,4 GWh_e/an)

=> retour sur investissement énergétique en électricité : **4 mois**
en énergie primaire : 1,3 mois

**Des valeurs sans doute encore bien meilleures
avec les nouvelles machines à grande turbine**



Source image : Gamesa

Matières premières besoins mondiaux, quelques chiffres

Cas de l'éolien

200 tonnes d'acier par éolienne de 2 MW

Pour atteindre 15 000 TWh (50% de la production électrique en 2030) :
7000 GW éoliens, sur la base de 3,5 M éoliennes de 2 MW

=> **700 M tonnes d'acier**

(puis renouvellement sur 20 ans : **35 Mtonnes/an**)

Production mondiale d'acier en 2011 :

1,5 Gtonnes (à 40% d'origine recyclée)

35 Mtonnes/an \cong 2,3% de la production mondiale,
(automobiles \cong 100 Mtonnes/an)

Réserves mondiales : 73 Gtonnes

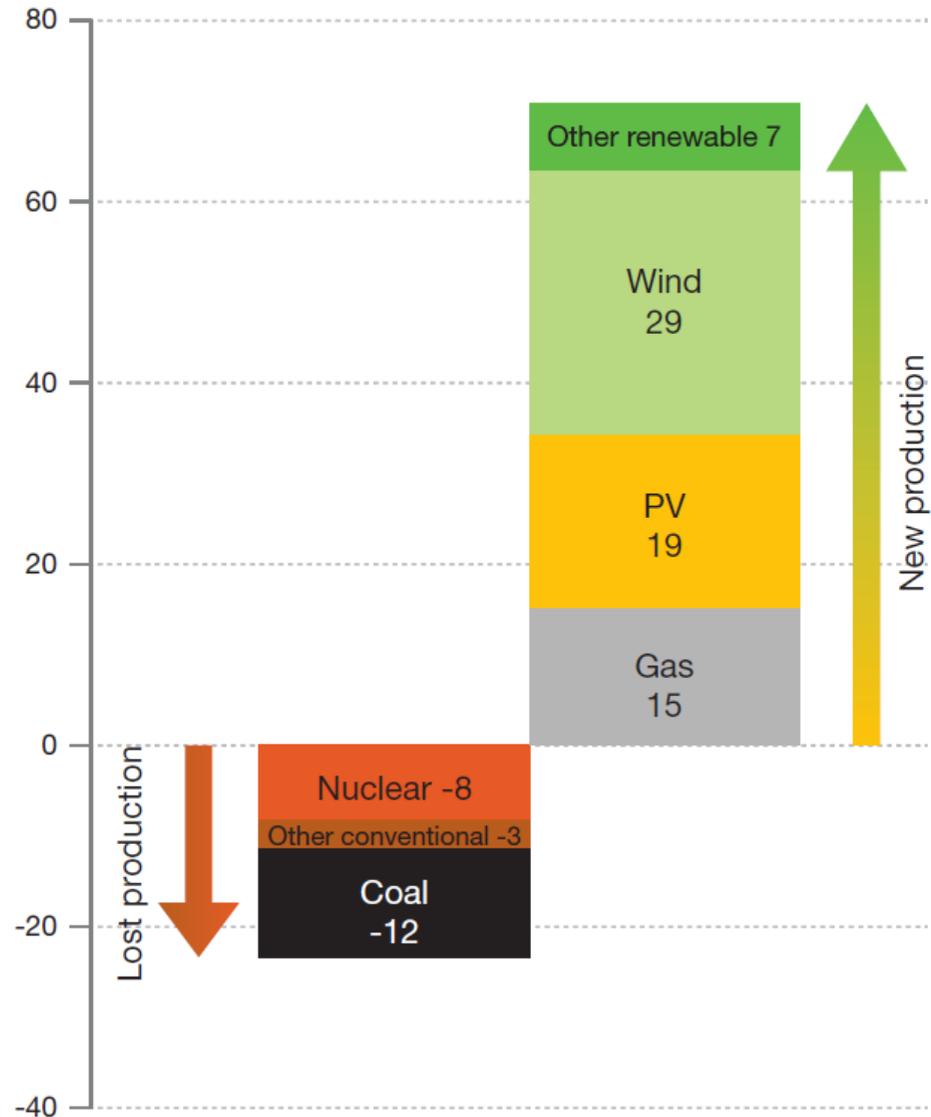
=> 7000 GW éoliens \Leftrightarrow **1%** des réserves

A lire : M. Jacobson, M. Delucchi

Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials, Energy Policy 39 (2011) 1154–1169

Ce qui s'est passé en Europe en 2012

Theoretical balance of new electricity production in the EU 27 in 2012 (TWh)



Source : EPIA, may 2013