

Énergie, électricité et soutenabilité

Bernard MULTON
Ecole normale supérieure de Rennes
Département Mécatronique
Laboratoire SATIE – CNRS

bernard.multon@ens-rennes.fr

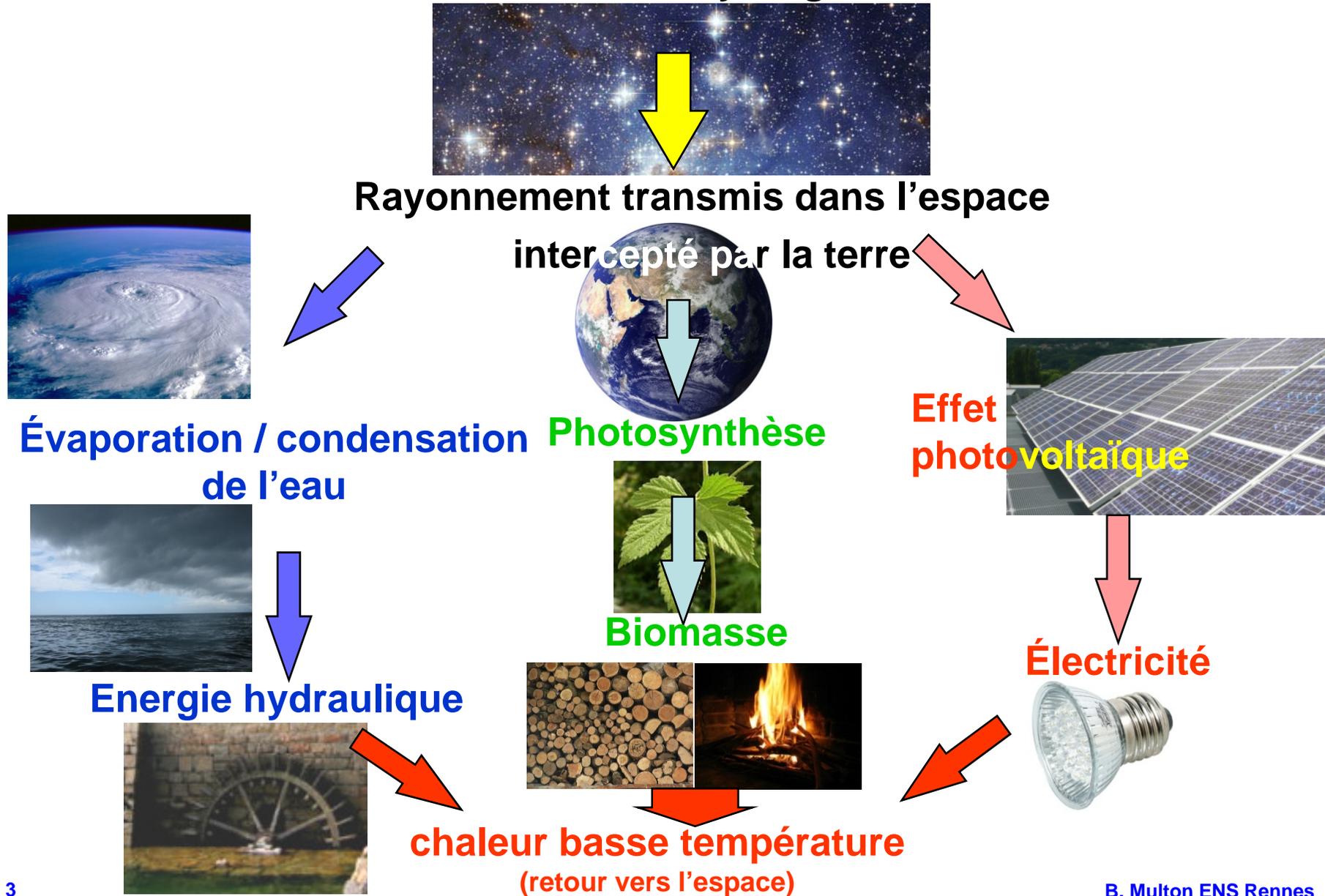
L'énergie ?

**Un concept physique unifié
pour décrire les transformations
du monde**

**Elle nourrit la matière vivante,
et constitue la base du métabolisme
des sociétés humaines**

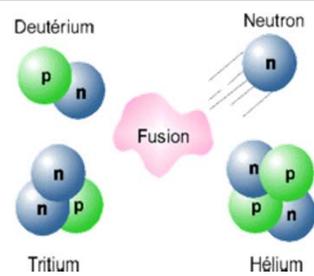
Les cheminements de l'énergie, exemples

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles



Principales manifestations de l'énergie

Désintégration de
noyaux atomiques
fission, fusion...



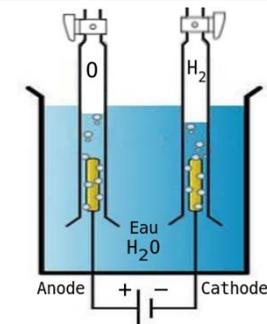
Chaleur
(agitation
moléculaire)



Rayonnements
électromagnétiques



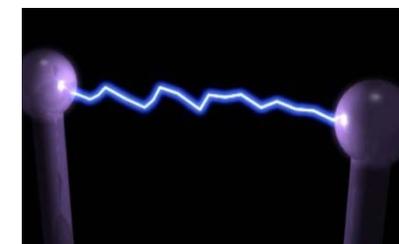
Réaction chimiques
(à l'échelle des
liaisons moléculaires)



Travail mécanique



Électricité



L'énergie est caractérisée par ses possibilités de transformation plus ou moins bien réversibles entre ses différentes formes

Unités physiques de l'énergie et équivalences

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

Autres unités :

- **kilowattheure** : kWh et **térawattheure** : TWh

- **tonne équivalent pétrole** : tep (Mtep mégatep, Gtep gigatep)

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

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

$$1 \text{ tep} \cong 11\,600 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ Gtep} \cong 11\,600 \text{ TWh}$$

Quelques ordres de grandeur de transformation

- 1 coup de marteau : quelques 10 joules
- 1 tasse de café : quelques 10 kilojoules
- une douche à l'eau chaude : 1 kWh
- fabrication d'un smartphone : 300 kWh
- 20 000 km avec une petite voiture : 1 tep ou 12 000 kWh
- production annuelle d'électricité d'une éolienne terrestre : 5 millions de kWh
- prélèvement mondial annuel de ressources énergétiques : 13 Gtep (milliards de tep)

Bien différencier puissance et énergie

L'**énergie**, c'est la **quantité** nécessaire
pour assurer une **transformation**, un service.
Exemples pour 3,6 MJ ou 1 kWh

Énergie calorifique : échauffer 22 litres d'eau de 40°C :
 $E = 22 \text{ L} \times 1 \text{ kg/L} \times 4180 \text{ J/}^\circ\text{C/kg} \times 40^\circ\text{C} \cong 3,6 \text{ MJ}$

Énergie mécanique : déplacer un objet
avec un effort de 360 N sur une distance de 10 km :
 $E = F \times d = 360 \text{ N} \times 10\,000 \text{ m} = 3,6 \text{ MJ}$

Énergie chimique : combustion de 0,1 litre d'essence
(pouvoir calorifique : 36 MJ/litre) :
 $E = 0,1 \times 36 \cdot 10^6 = 3,6 \text{ MJ}$

Bien différencier puissance et énergie

La **puissance P** (en watts)

c'est le **débit de la conversion** d'énergie E : $P = \frac{dE}{dt}$

P en watts (W)

et

E en joules (J)

t en secondes (s)

La puissance est donc une

caractéristique du convertisseur d'énergie :

Un **brûleur** de 20 kW peut transformer un **combustible** en **chaleur**
deux fois plus vite qu'un brûleur de 10 kW

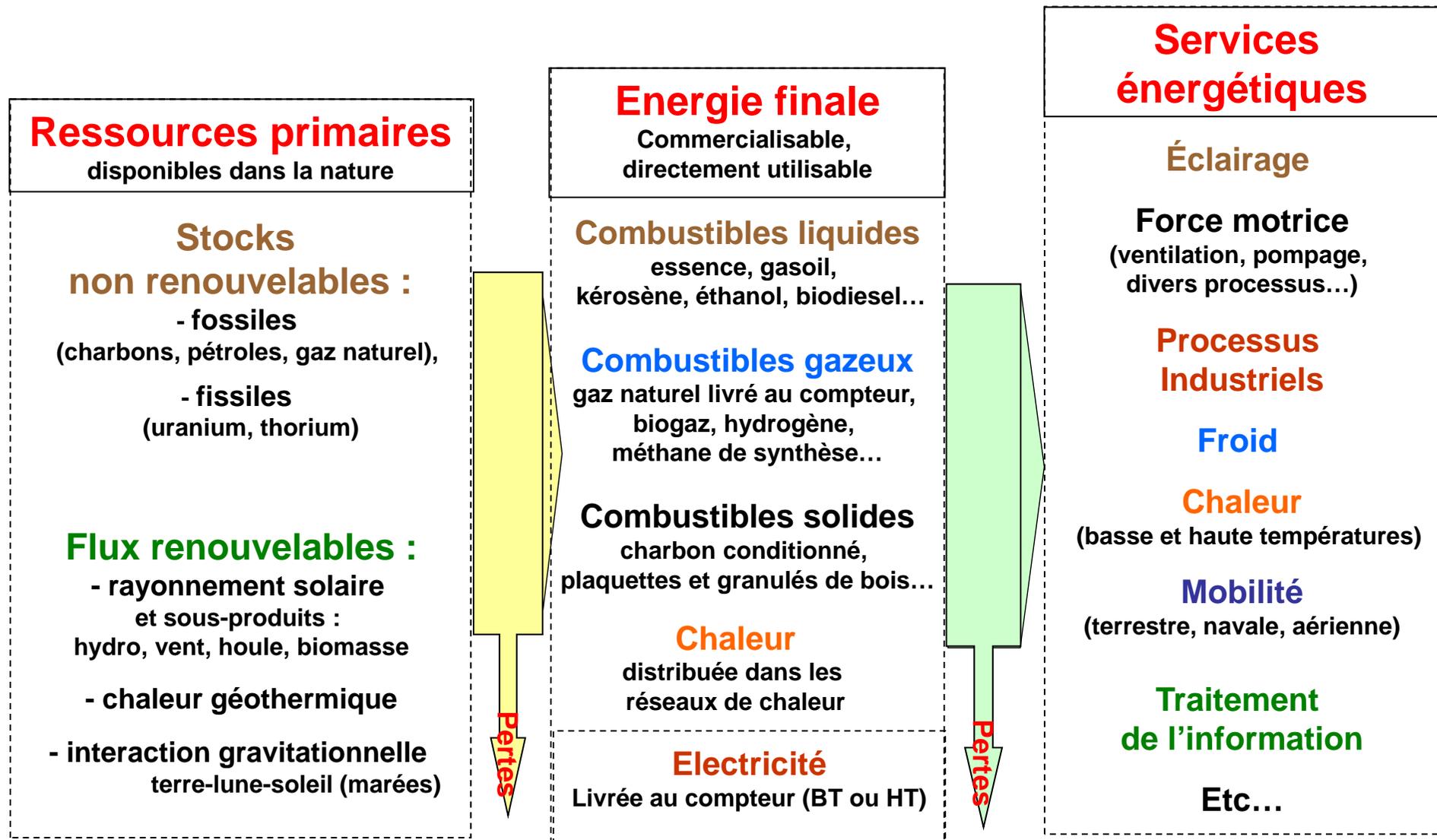
Un **moteur électrique** de 20 kW peut transformer de l'**électricité** en
travail mécanique deux fois plus vite qu'un moteur de 10 kW...

Vouloir réaliser plus vite des services énergétiques
conduit à des convertisseurs plus gros, plus chers
et nécessitant plus de matières premières !



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

Des ressources primaires aux services énergétiques

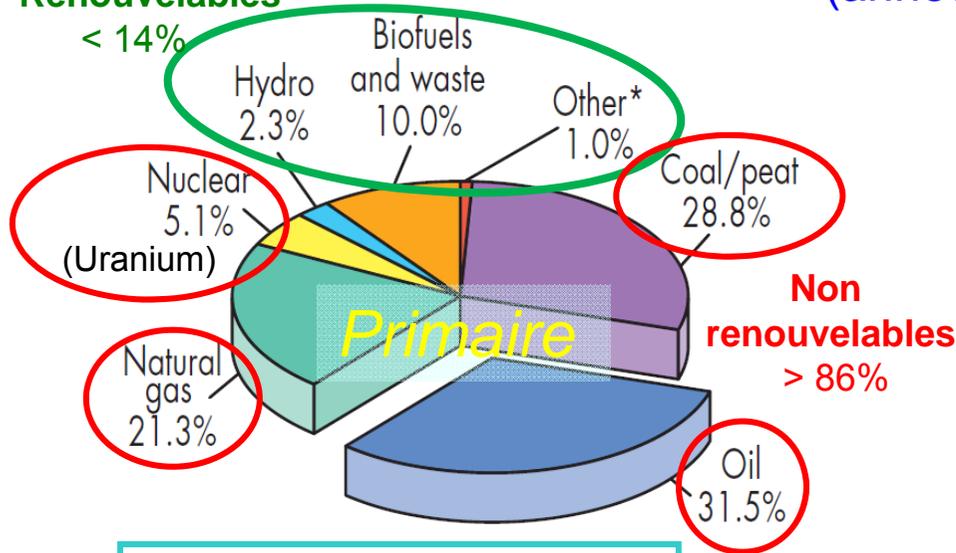


Bilan énergétique mondial : décryptage et place de l'électricité

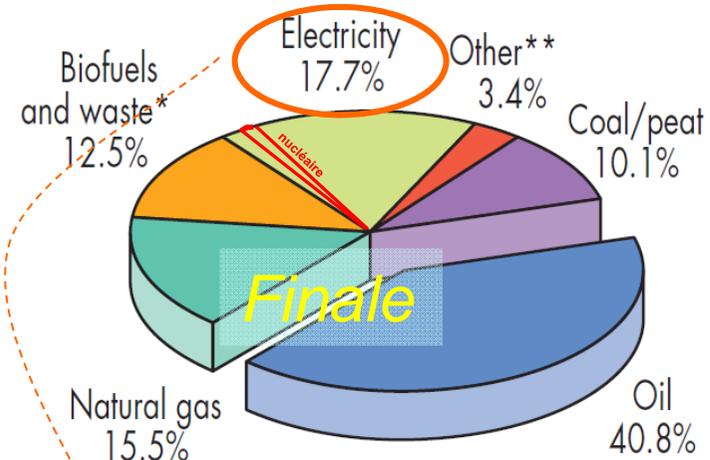
(année 2011)

Renouvelables

< 14%



Total \approx 13,1 Gtep
(152 000 TWh_p)



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

+2,5%/an
(moyenne 2001-2011)

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

pour commercialiser :

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

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

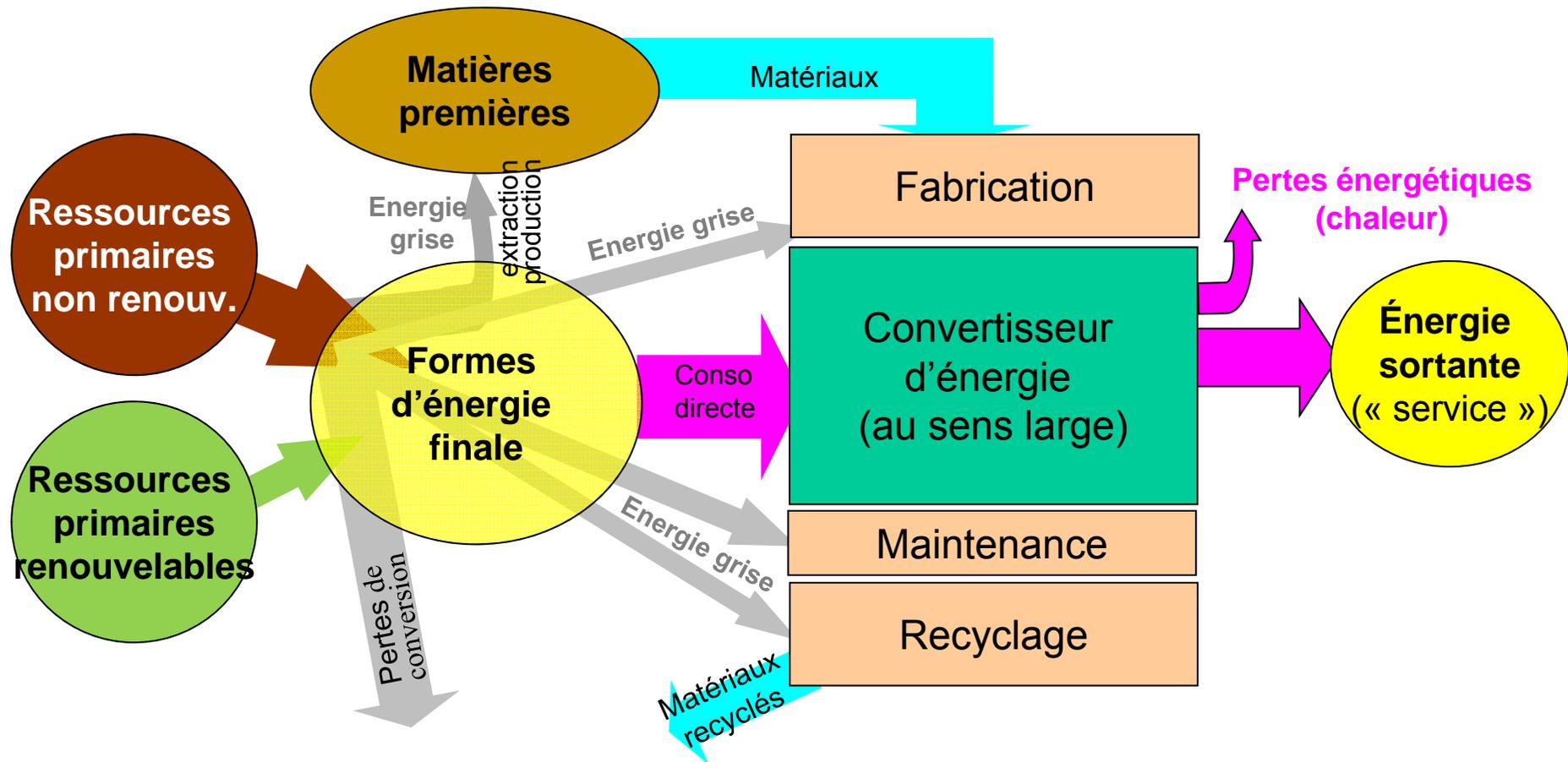
« Vraie » part du nucléaire : 5,1 % de l'énergie primaire

2 % de l'énergie finale car 11,7% de l'électricité est d'origine nucléaire (11,7% * 17,7%=2%)



Rendement énergétique
Extension
à tout le cycle de vie

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



L'énergie grise est égale à la somme de toute **l'énergie primaire non renouvelable** dépensée sur la vie du convertisseur, autre que sa consommation directe pour assurer le service

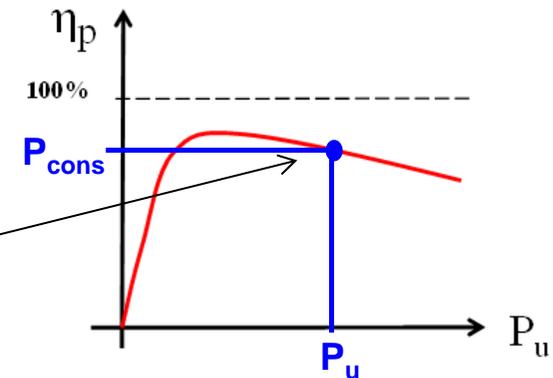
Du rendement instantané au rendement énergétique (sur cycle)

Rendement instantané ou en puissance :

Sur un point de fonctionnement particulier

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_{\text{cons}}} = \frac{P_u}{P_u + p_{\text{loss}}}$$

Puissance perdue ou dissipée

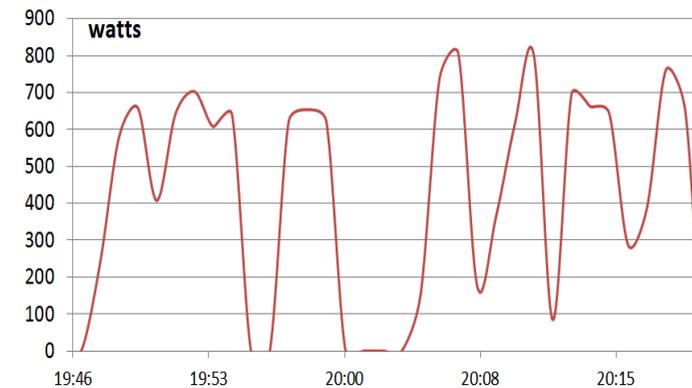


Rendement énergétique ou sur cycle :

Cycle = ensemble de points de fonctionnement rencontrés
durant la réalisation d'un service

$$\eta_E = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{\text{cons}} \cdot dt} = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} \frac{P_u}{\eta_p(P_u)} \cdot dt} = \frac{E_u}{E_{\text{cons}}} = \frac{E_u}{E_u + E_{\text{loss}}}$$

Énergie perdue ou dissipée
sur tout le cycle



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

Rendement sur cycle de vie soutenable :

Permet de prendre en compte toute l'énergie non renouvelable consommée sur tout le cycle de vie du convertisseur

$$\eta_{\text{LCA_sust}} = \frac{E_{u_life}}{E_{pNR_life} + E_{embod}}$$

Part non renouvelable de l'énergie primaire consommée pour fournir l'énergie utile

Energie grise (embodied energy)

Car, en termes de soutenabilité, ce qui importe, 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 :

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

pertes NR

Énergie grise NR

+ des déchets à longue durée de vie

+ beaucoup de matière 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

Photovoltaïque : cas des installations en toiture



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

avec une technologie au silicium polycristallin (avec un rendement de 14%),
50 TWh_{solaires} sont nécessaires, soit **50 km²**
(en France, il y a 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 – électricité : **14%**

Rendement sur cycle de vie
pour 20 ans de production :
(même résultat sur 40 ans)

$$\eta_{LCA_sust} = \frac{7 \times 20}{7 \times 20 + (0 + 56)} = 71,4\%$$

pertes NR

Énergie grise NR

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

Demande mondiale et ressources primaires



Ressources et réserves non renouvelables (en stock)

Combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) :

Ressources : entre 2000 et 5000 Gtep

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

Réserves « prouvées » \cong 900 Gtep



"Strip coal mining".
Licensed Creative Commons

Uranium fissile :

Ressources : environ 150 Gtep

(avec réacteurs actuels)

Réserves « estimées » \cong 60 Gtep

convertibles (rendement de 33%) en 20 Gtep électriques



Mine d'Arlet Niger, source : Areva

Les réserves ne peuvent dépasser les ressources.

Les limites seront atteintes durant le 21^{ème} siècle.

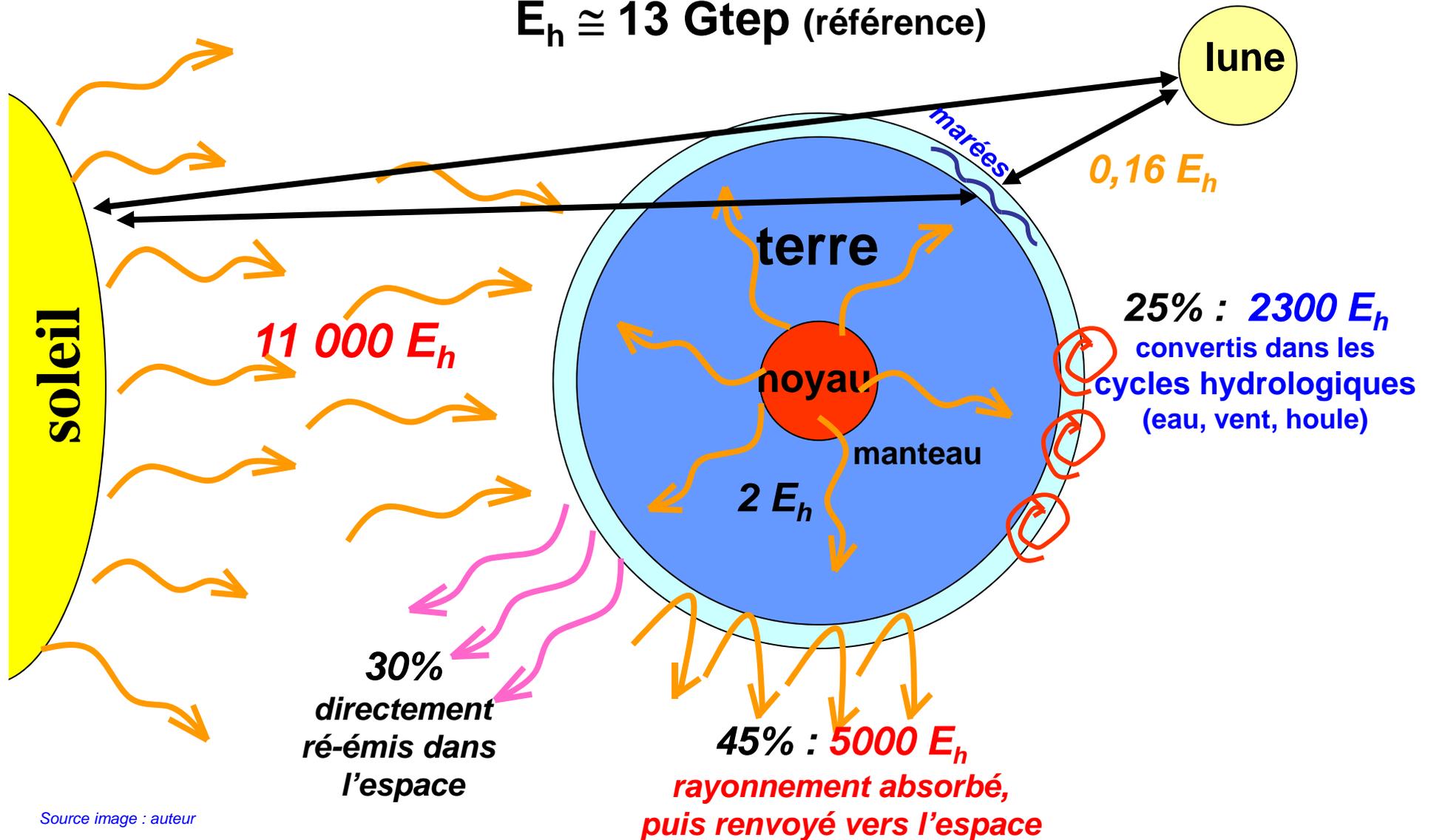
Et les dégâts environnementaux par Mtep vont croissants...

**Energie solaire et ses dérivés reçus au sol : 100 000 Gtep...
par an !**

Ressources renouvelables (flux annuels)

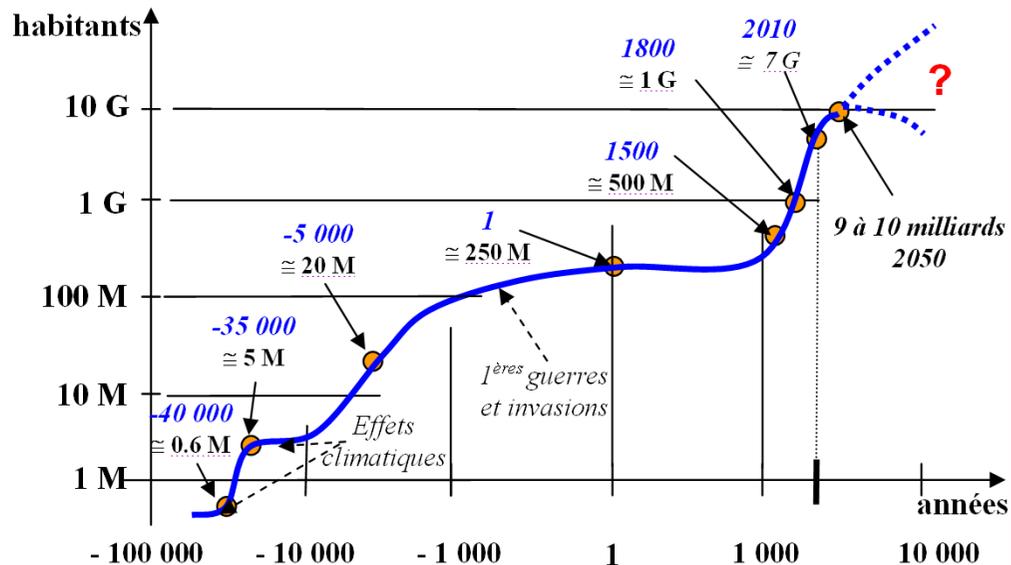
Valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité

$E_h \cong 13 \text{ Gtep}$ (référence)



Source image : auteur

Evolution la population humaine sur la terre :



Source images : auteur

Consommation énergétique des activités humaines :

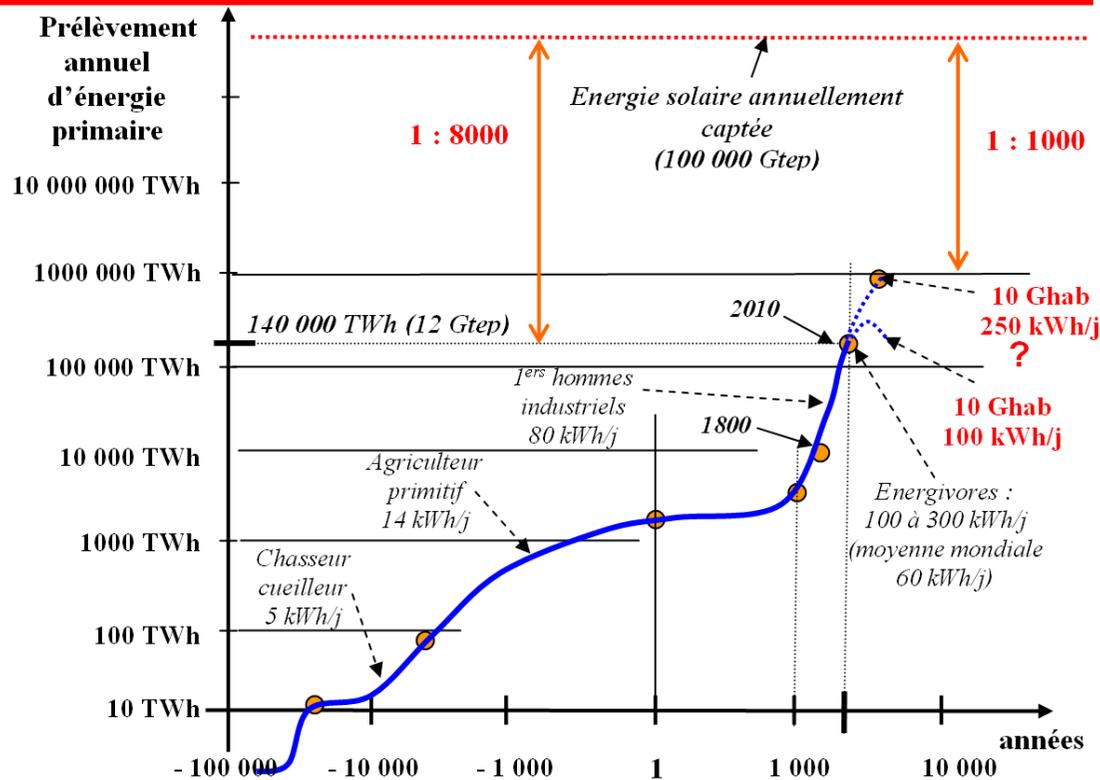
Energie primaire par habitant :

Moyenne mondiale : 60 kWh_p/jour

US américain : 270 kWh_p/jour

Français : 140 kWh_p/jour

Africain subsaharien : 14 kWh_p/jour



B. Multon ENS Rennes

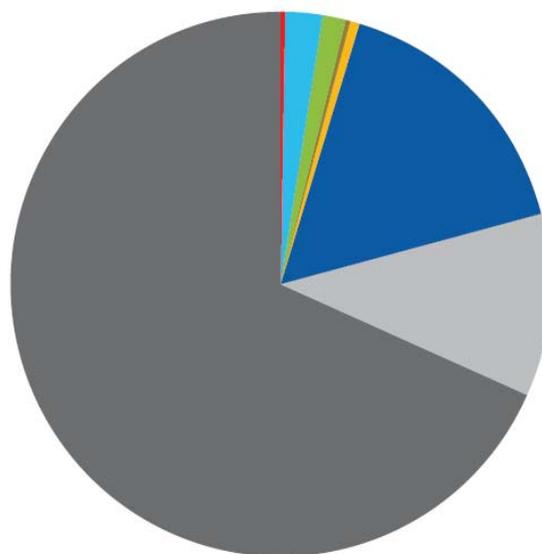
A dramatic, high-contrast photograph of a stormy sky. Dark, heavy clouds are illuminated from within by bright, jagged lightning bolts that strike downwards. The overall color palette is dominated by deep blues, purples, and greys, with the intense white and yellow of the lightning providing a stark contrast.

L'électricité : production actuelle et future

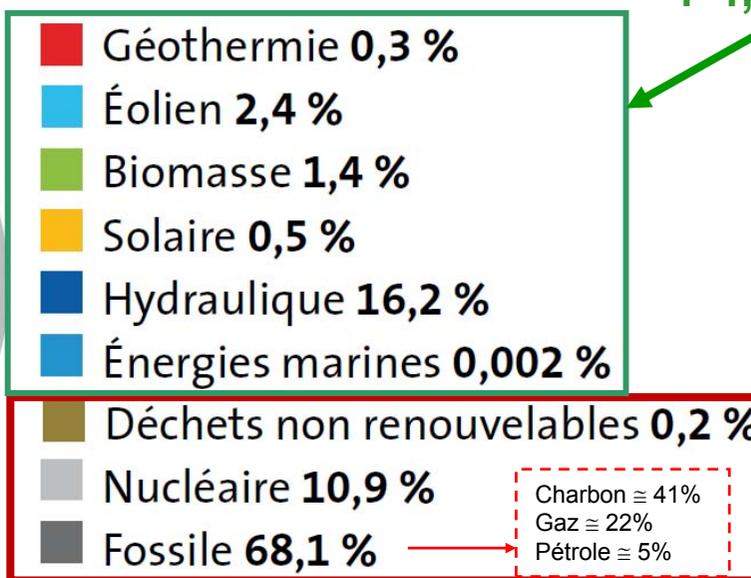
Vers une électricité 100% renouvelable

Origine de la production mondiale d'électricité en 2012

22 600 TWh



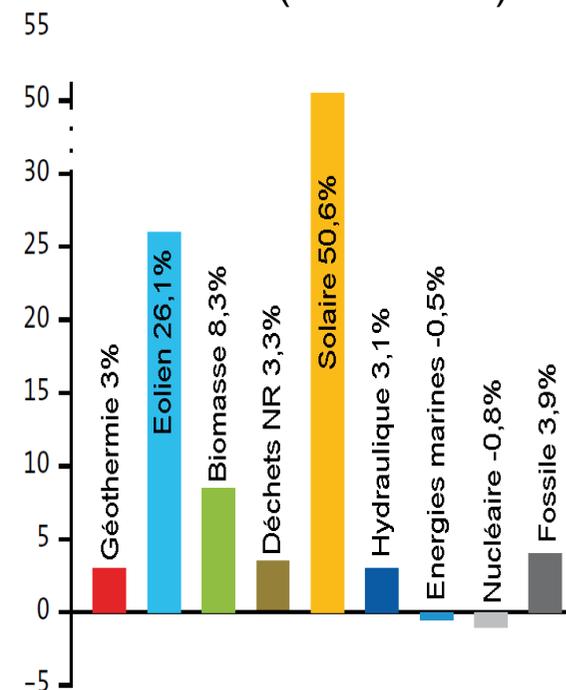
Source : La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde Observ'ER 2013



Renouvelable : 20,8 %
+ 4,7% par an sur 10 ans

Non renouvelable : 79,2%
+ 3,1% par an sur 10 ans

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

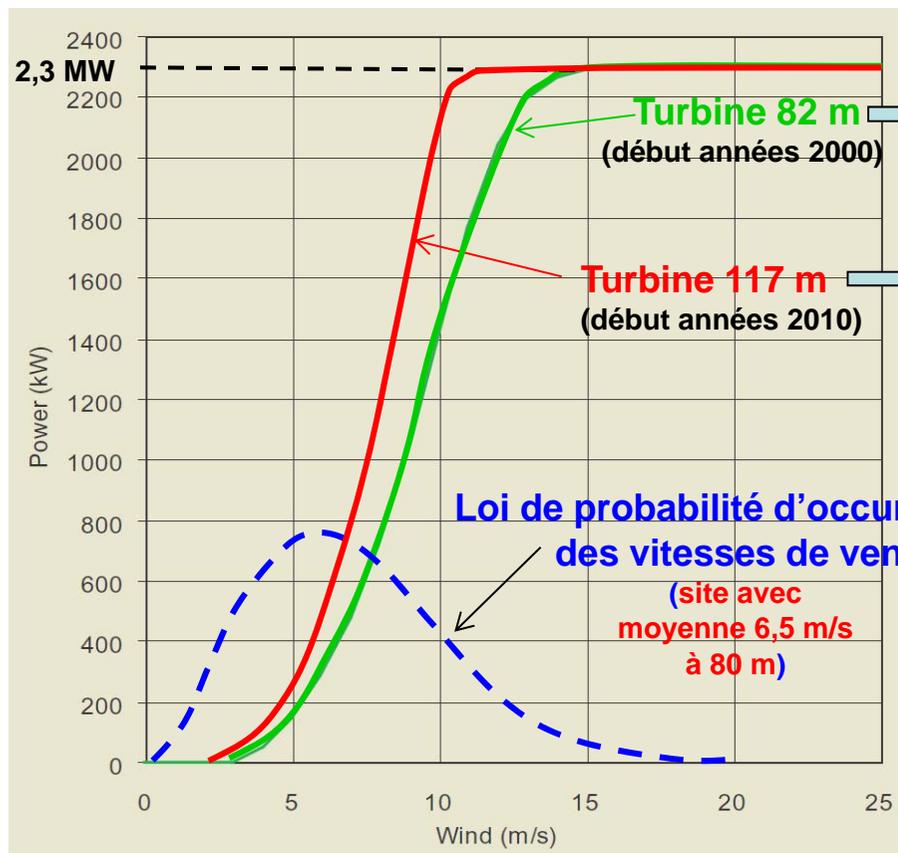


Production électrique totale : +3,4% / an (moyenne 10 ans)
(référence : +2,5% /an pour la consommation totale d'énergie finale)

Production éolienne : la révolution silencieuse⁽¹⁾

Des turbines de plus grand diamètre, pour la même puissance nominale

Exemple : comparaison de 2 éoliennes de 2,3 MW_e



productivité annuelle 5 GWh_e
2200 h_{epp} (équivalent pleine puissance) par an

productivité annuelle 7,6 GWh_e
3300 h_{epp} par an



source : Nordex

Loi de probabilité d'occurrence
des vitesses de vent

(site avec
moyenne 6,5 m/s
à 80 m)

Pour un surcoût d'investissement modeste :

- des machines beaucoup plus productives
- avec moins de variabilité
- des coûts de production en baisse : 5 à 8 c€/kWh_e
- derniers tarifs d'achat France : 8,2 c€/kWh_e

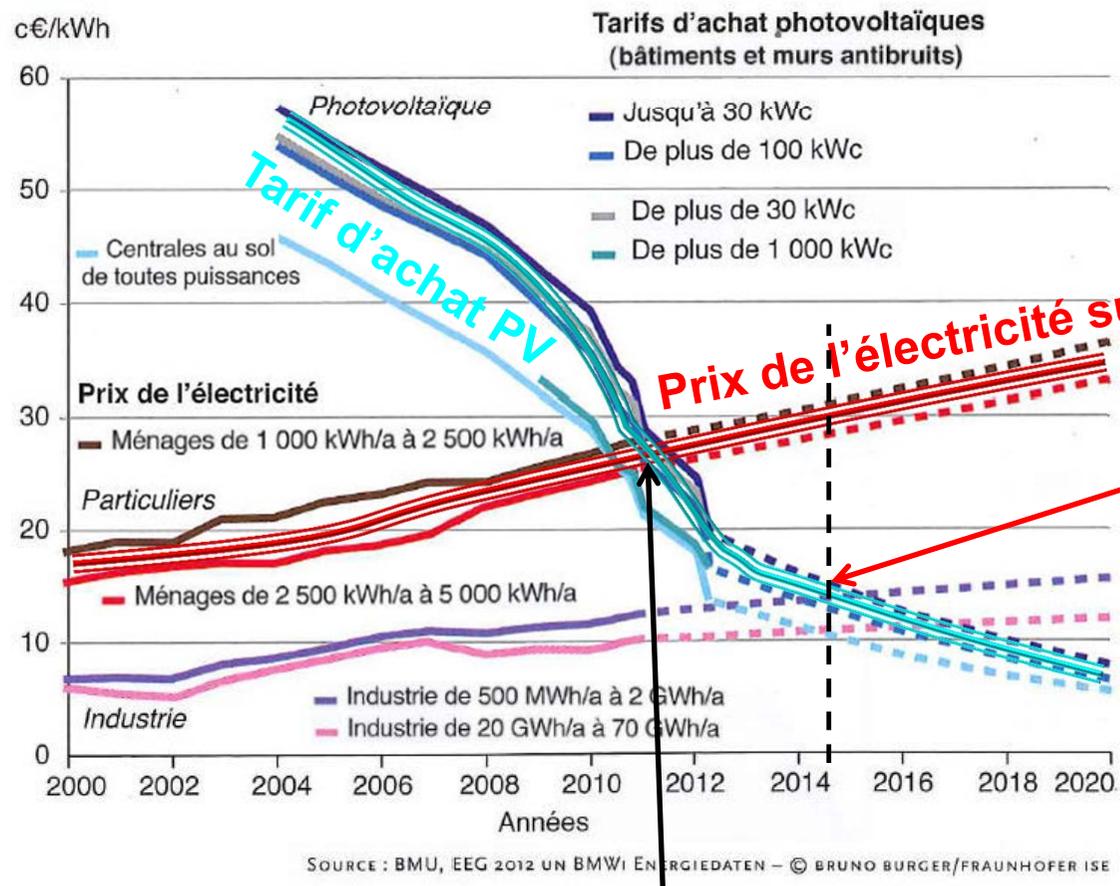
Et un potentiel terrestre considérablement ré-évalué à la hausse (en Allemagne : près de 3000 TWh_e)

⁽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 : la chute rapide des coûts permet la « parité réseau »

En Allemagne, depuis 2011, pour un ménage,
le tarif d'achat de l'électricité PV est inférieur au prix de l'électricité :



Prix de l'électricité sur le réseau

Tarifs juillet 2014 :
(non indexés sur l'inflation, sur 20 ans)

Installations < 10 kW:
12,88 c€/kWh
(électricité réseau 2 fois plus chère !)

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

Génération thermodynamique solaire à concentration

Exemple de technologie flexible :

les centrales à tour avec stockage de chaleur

Espagne Gemasolar (2011) : 19,9 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 **5500 h_{epp} par an**



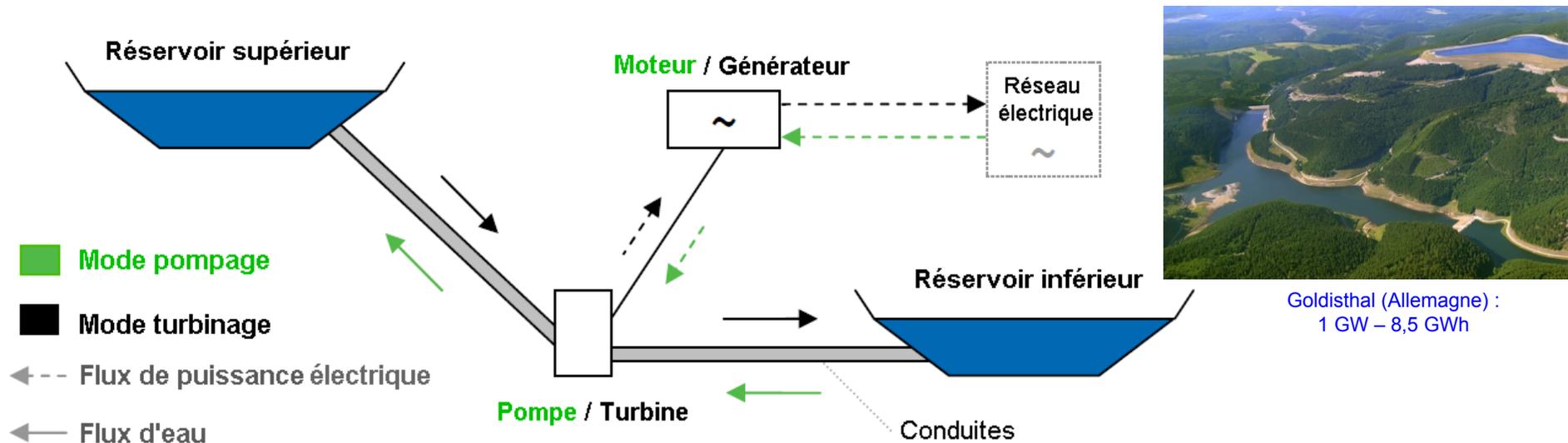
Des centrales solaires aussi flexibles qu'une centrale à gaz...

capables de produire la nuit !

Une solution de flexibilité importante : le stockage

Pompage - turbinage (STEP) :

solution la plus répandue pour le stockage de masse



Puissance et capacité énergétique : jusqu'à plusieurs GW

durant quelques heures à quelques jours

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

Encore de nombreuses possibilités de conversion de barrages existants en STEP.

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

Alors, une électricité 100% renouvelable ?

Un **potentiel plus que suffisant de ressources primaires**
accessibles et convertibles en électricité

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

À tel point que l'électricité pourrait satisfaire de
nouveaux usages, par exemple pour les transports :
véhicules à batterie, production de combustibles de synthèse



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

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

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

En exploitant pleinement les **barrages hydroélectriques**

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

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

En exploitant pleinement les **prévisions météorologiques**

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

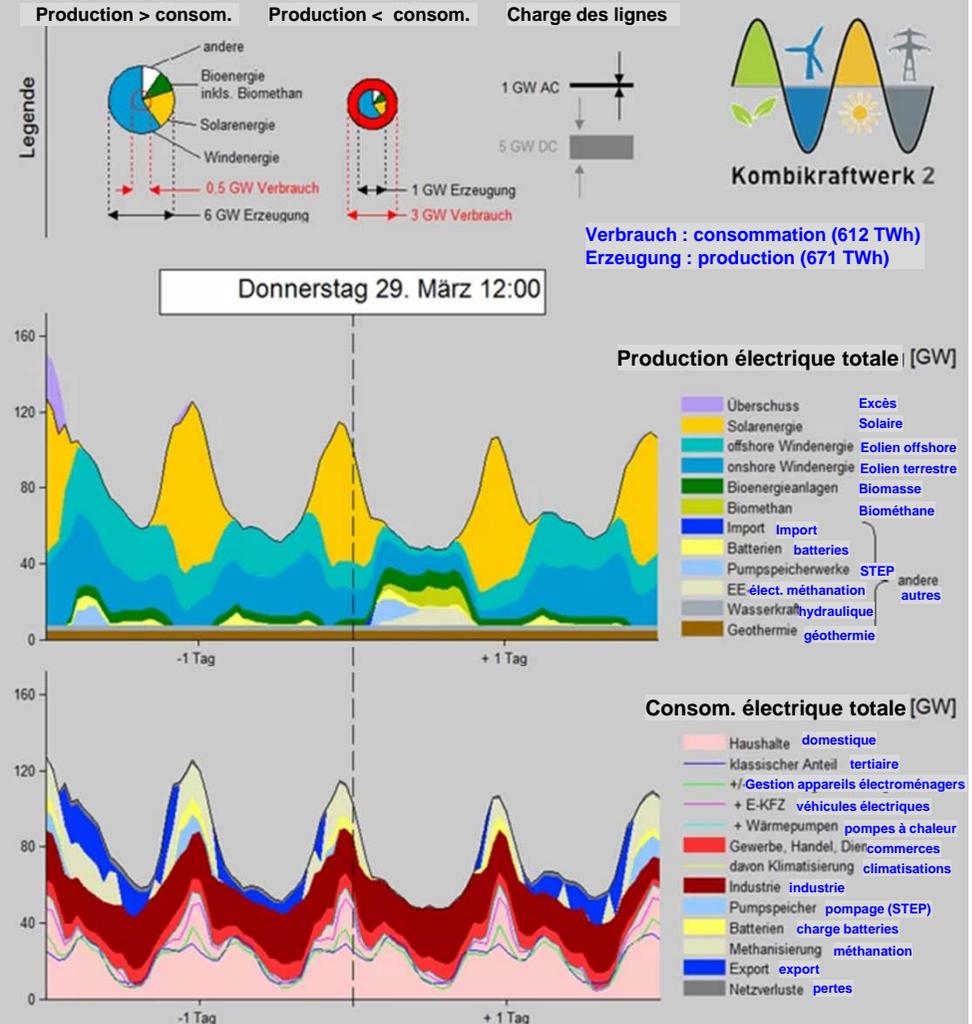
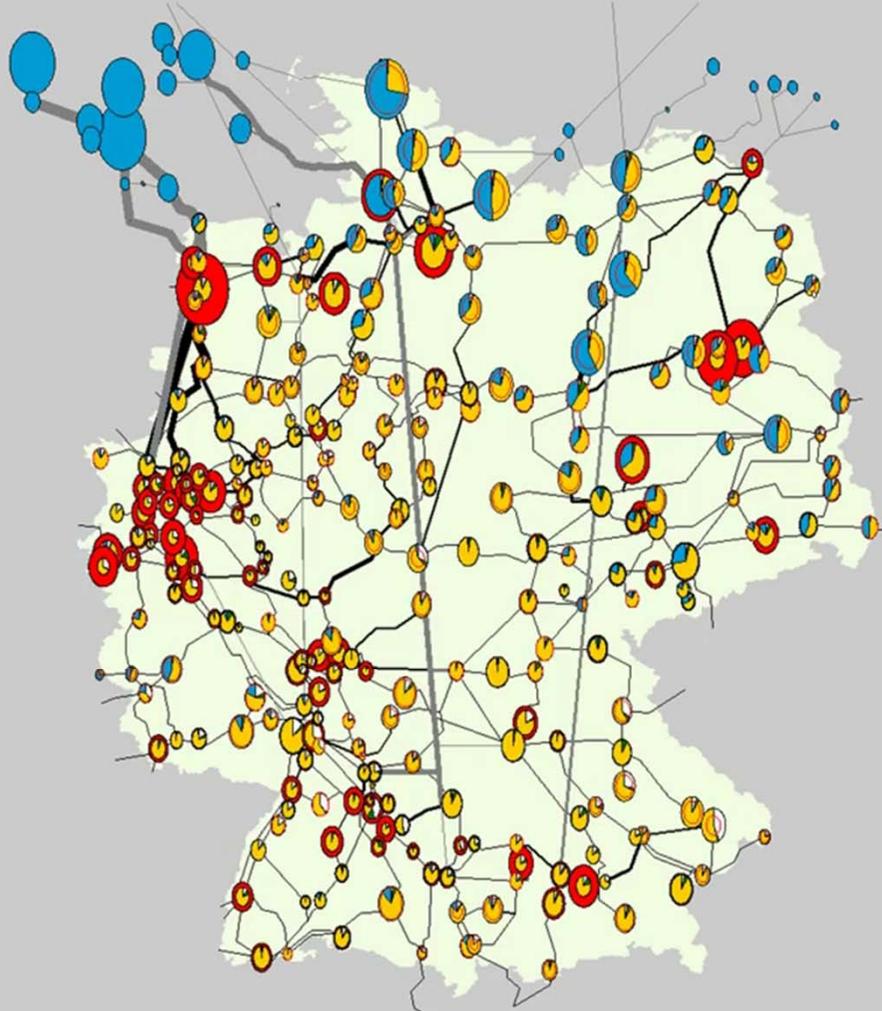
En généralisant le **pilotage des charges** flexibles :
eau chaude sanitaire, batteries VE...

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

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

Kombikraftwerk : une simulation électrique à l'échelle de toute l'Allemagne, sur une année complète

Production, consommation, transport à partir d'une énergie électrique 100% renouvelable



Source : <http://www.kombikraftwerk.de/100-prozent-szenario.html>

Animation heure par heure complète ici : <http://www.kombikraftwerk.de/100-prozent-szenario/leistungsflussanimation>

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.

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



- la production massive de chaleur supplémentaire
et de vapeur d'eau



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

Conclusion en matière 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, d'où une réduction des tensions géopolitiques sur les ressources.

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

Elles deviennent **compétitives**, mais nécessitent d'investir (supporter des amortissements longs).

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

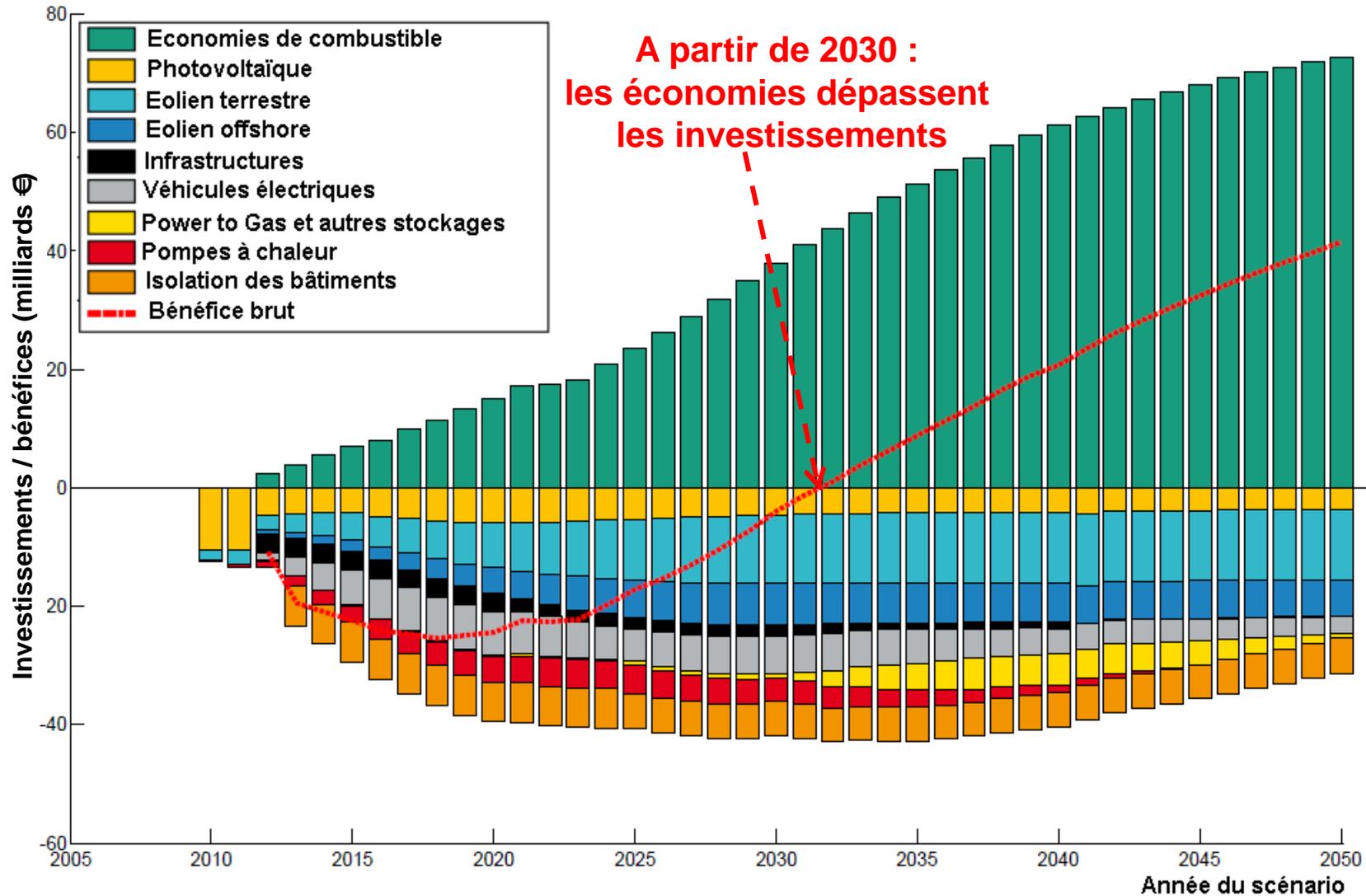
Mais, si elles constituent la voie la plus prometteuse, **l'optimum global** consiste **à consommer mieux et moins** afin que toute l'humanité puisse en profiter...

1992

A vous la parole !

Et le volet économique global ?

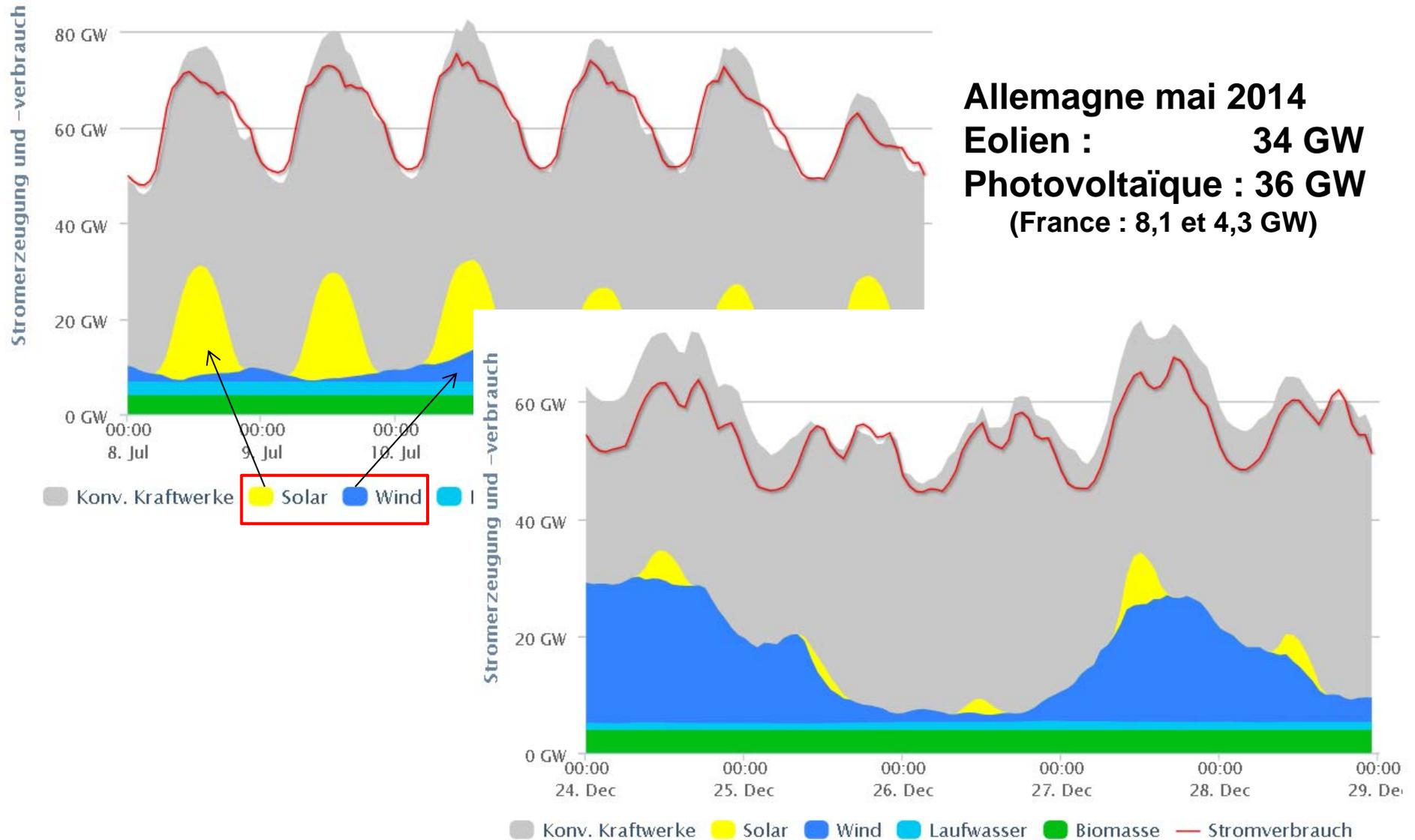
Scénario économique de la transition énergétique allemande en cours



Source : Fraunhofer IWES, « Geschäftsmodell Energiewende. Eine Antwort auf das „Die-Kosten-der-Energiewende“ Argument », jan. 2014
http://www.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes/de/documents/2014/Studie_Geschaeftsmodell_Energiewende_IWES_20140130_final_v1a.pdf

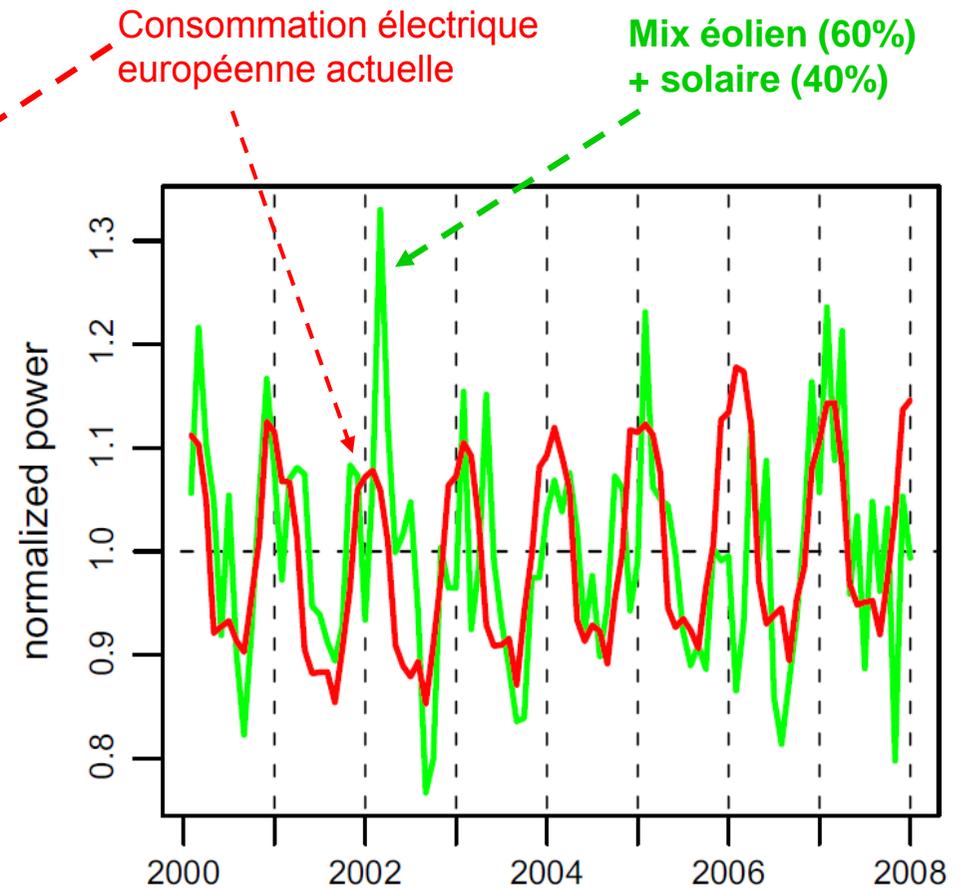
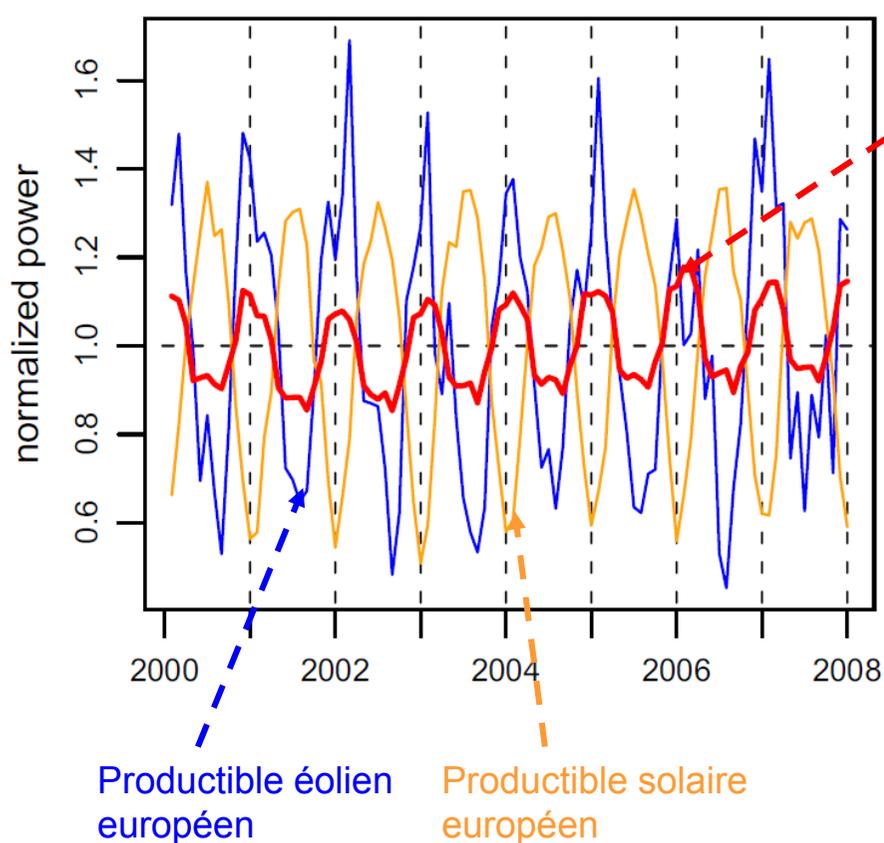
Production électrique instantanée en Allemagne

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



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

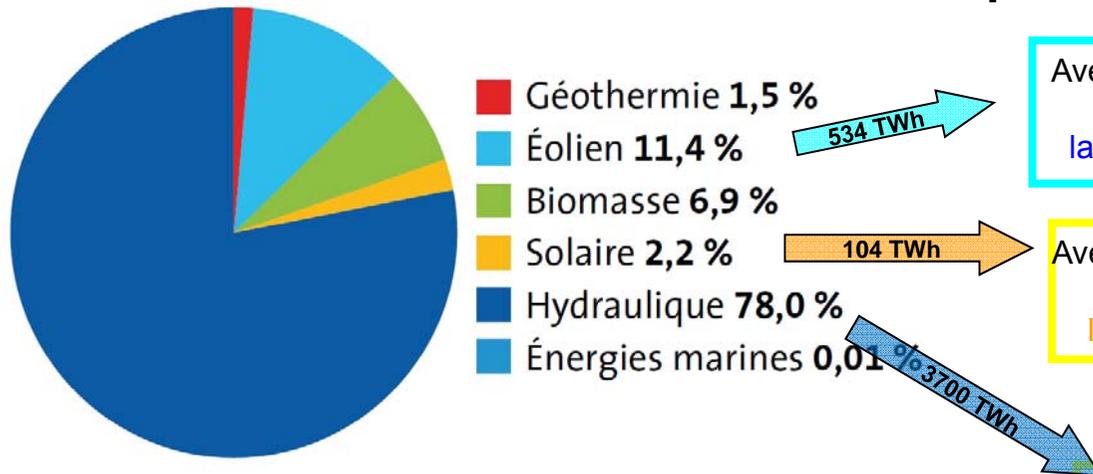


Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future highly renewable Europe », *Renew. Energy*, Elsevier 2010.

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

Renouvelables 20,8% \cong 4700 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% de 30 000 TWh

En 2050 :
100% renouvelable réalisable

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

Production photovoltaïque : la chute vertigineuse des prix

Toits solaires et fermes au sol : un développement extrêmement rapide

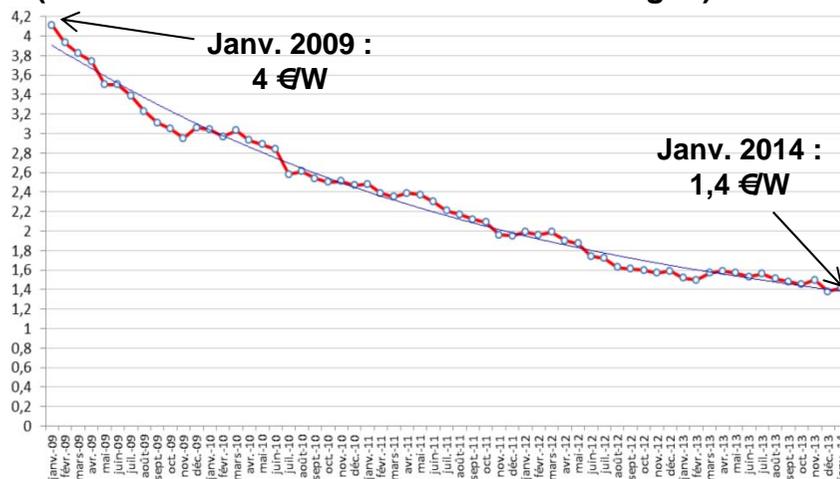


Source images : SOLHAB



Source : EDF Energies Nouvelles

Baisse des prix
(installations en toiture < 100 kW Allemagne)



Source : B. Chabot 2014

Prix actuels constatés des installations PV en France :

< 2 €/W en toiture faible puissance

< 1,5 €/W au sol

Et donc des coûts de production qui s'effondrent :

< 8 c€/kWh dans les grandes fermes

(tarif achat 100 kW à 12 MW : 7,17 c€)

< 12 c€/kWh pour les toitures

(tarif achat intégration simplifiée < 36kW : 14 c€)

Rejets issus de l'exploitation des ressources renouvelables

Des rejets surtout associés à la part non renouvelable
de l'énergie consommée pour la fabrication (**énergie grise**)

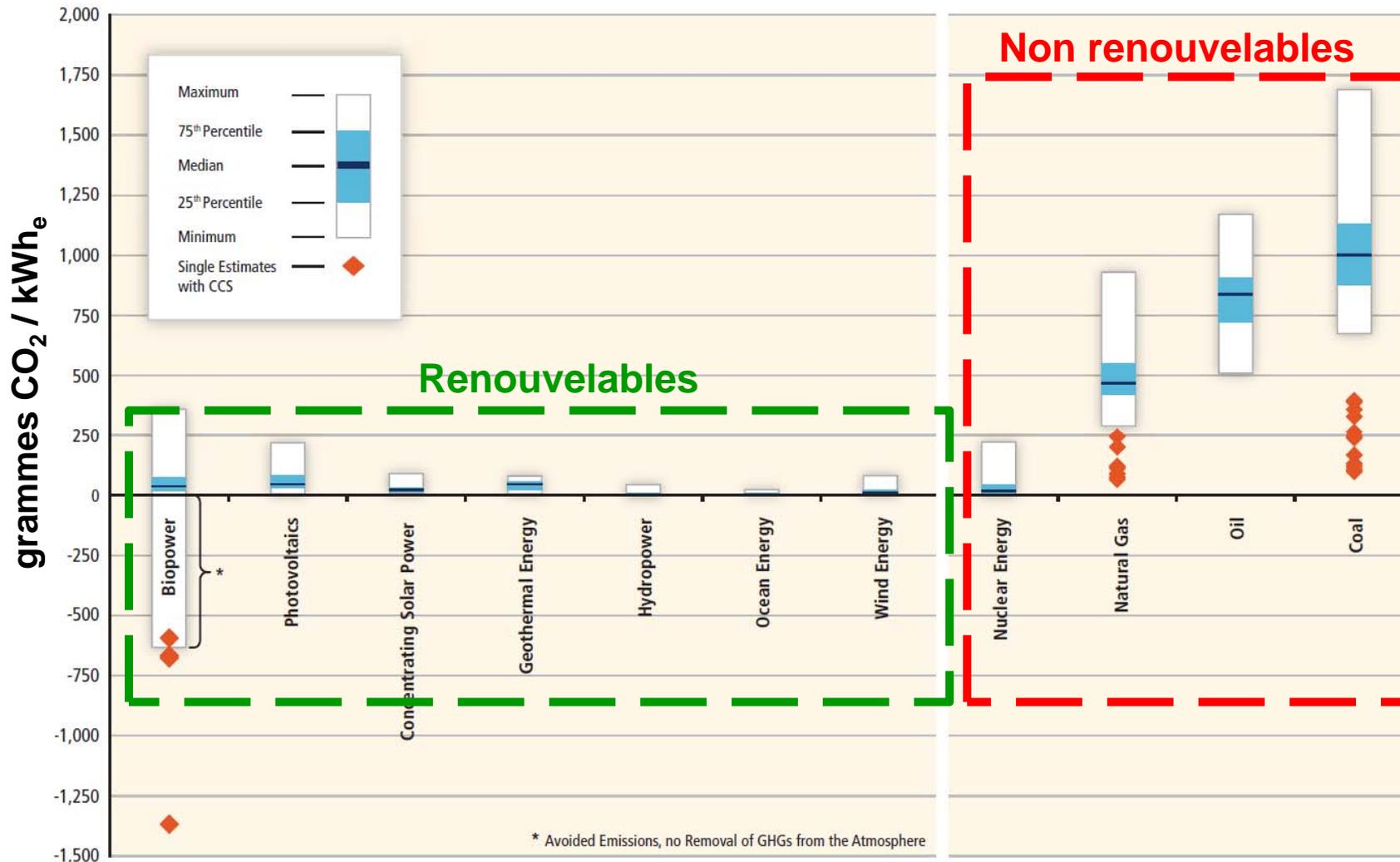
Même fabriqué en Chine (forte proportion de charbon),
un **système photovoltaïque ou éolien** émettra, sur sa vie,
moins de gaz à effet de serre ou de radiations ionisantes
que toute autre solution conventionnelle

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

Cas de la **biomasse solide et liquide** :
le carbone s'inscrit dans les cycles naturels,
ce sont les apports externes (machines, usines) 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