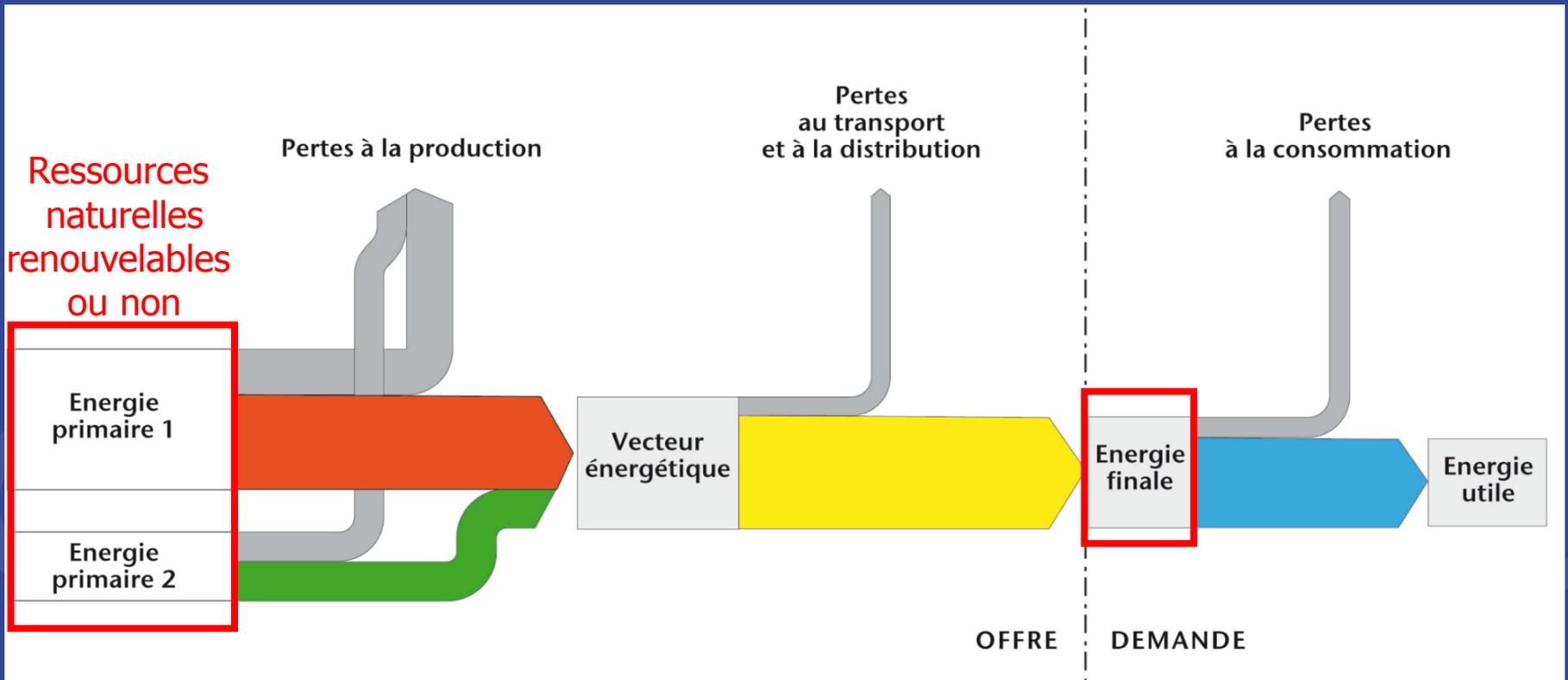


Électricité et développement durable

Bernard MULTON
Laboratoire SATIE CNRS
Département de Mécatronique ENS Rennes

Quelques bases d'énergétique

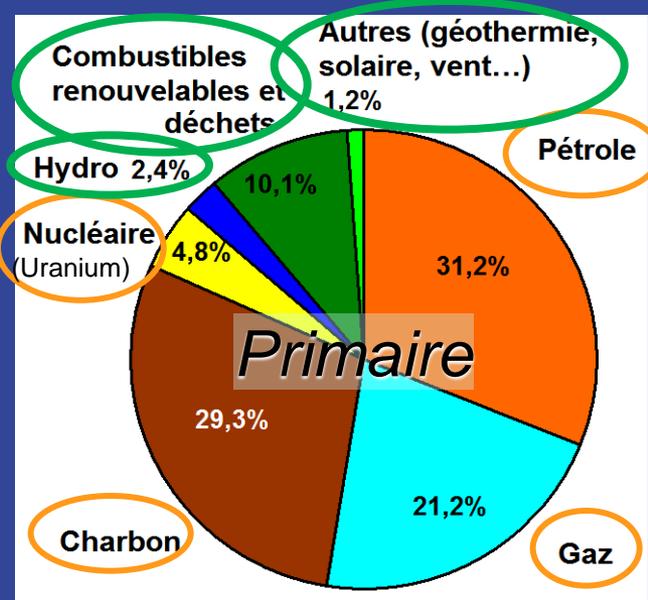
Des ressources primaires à l'énergie utile
en passant par l'énergie finale...



Source : négaWatt

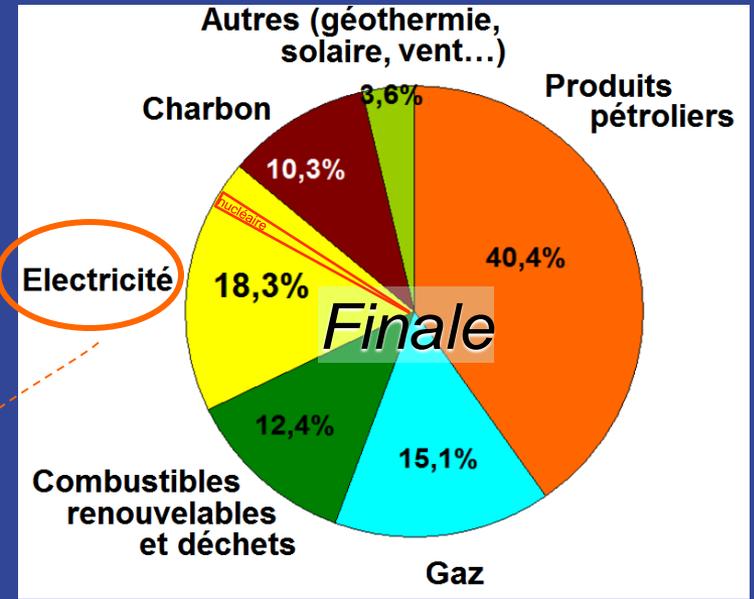
Quelques bases d'énergétique

Bilan énergétique mondial 2013, place de l'électricité



Non renouvelables > 86%

+3,4%/an (moyenne 2003-2013)



Total \cong 13,6 Gtep (157 500 TWh_p)

Total \cong 9,09 Gtep (105 500 TWh)

+2,2%/an (moyenne 2003-2013)

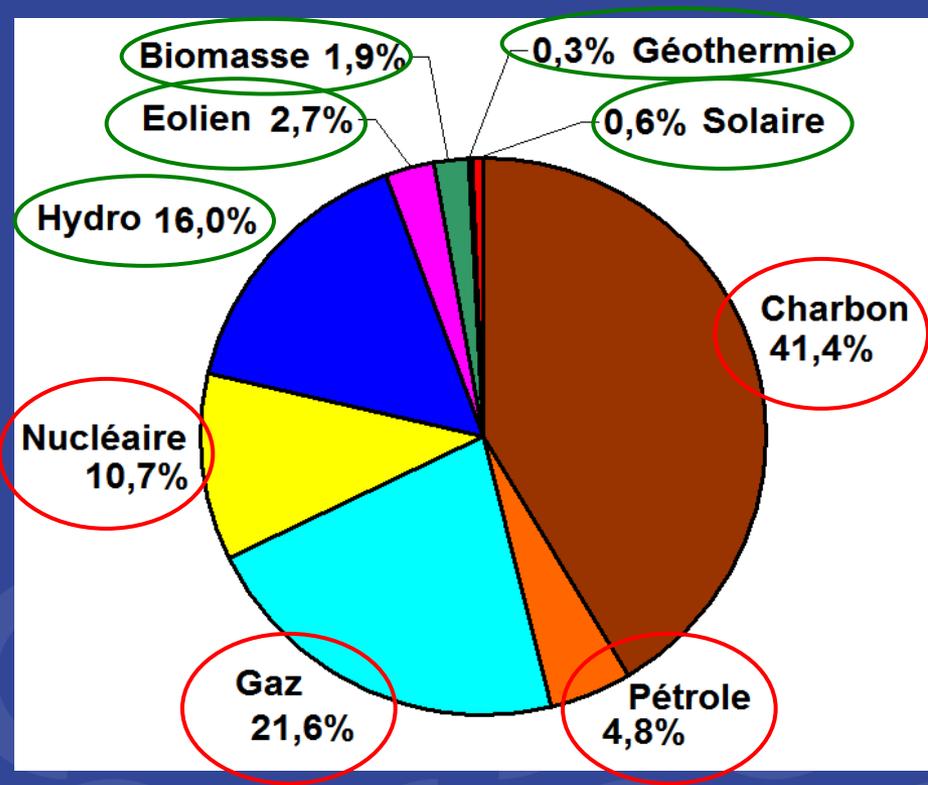


Source des données : Agence Internationale de l'énergie

Quelques bases d'énergétique

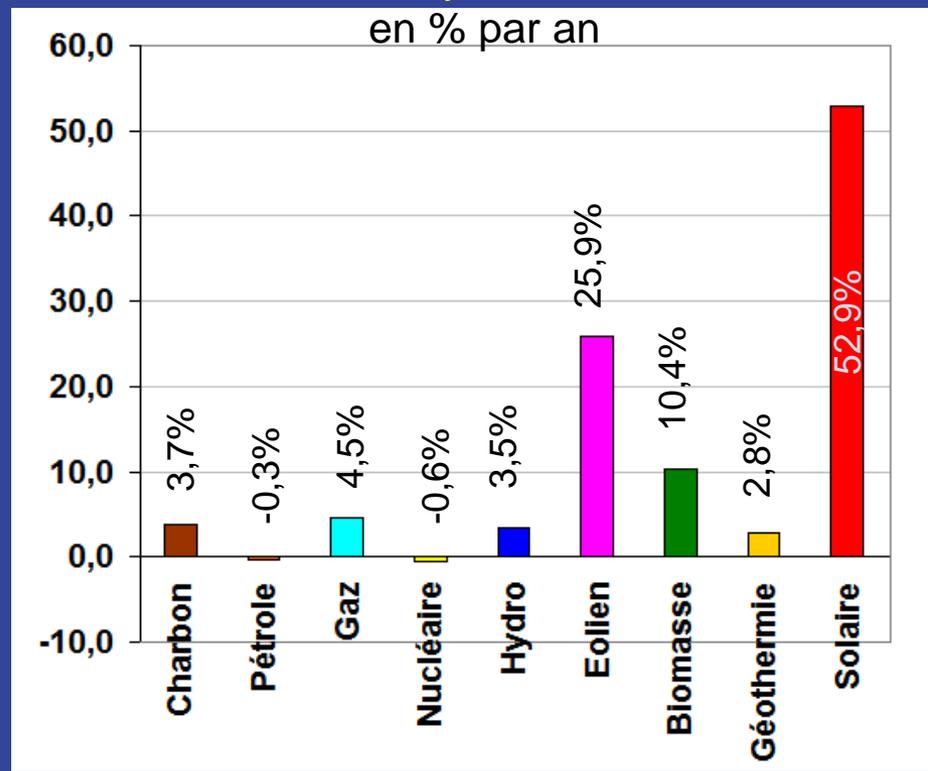
La production mondiale d'électricité (2013) et les tendances

23 230 TWh +3,4% moy. 10 ans (2003-2013)



21,5 % renouvelables : + 5,5% /an sur 10 ans

Evolution moyenne sur 10 ans en % par an



Non renouvelables : + 2,9% /an sur 10 ans

En 2015 : 76,3% NR et 23,7% Ren.

Source : Renewables 2016 Global Status Report

Source : données AIE

Quelques bases d'énergétique

Ressources et réserves primaires

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbons, pétroles, gaz naturel) :

environ 5000 Gtep (400 à 700 pétroles – 250 gaz – 3500 charbons)

Réserves prouvées : 1000 Gtep (300 pétroles, 160 gaz, 620 charbons)

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

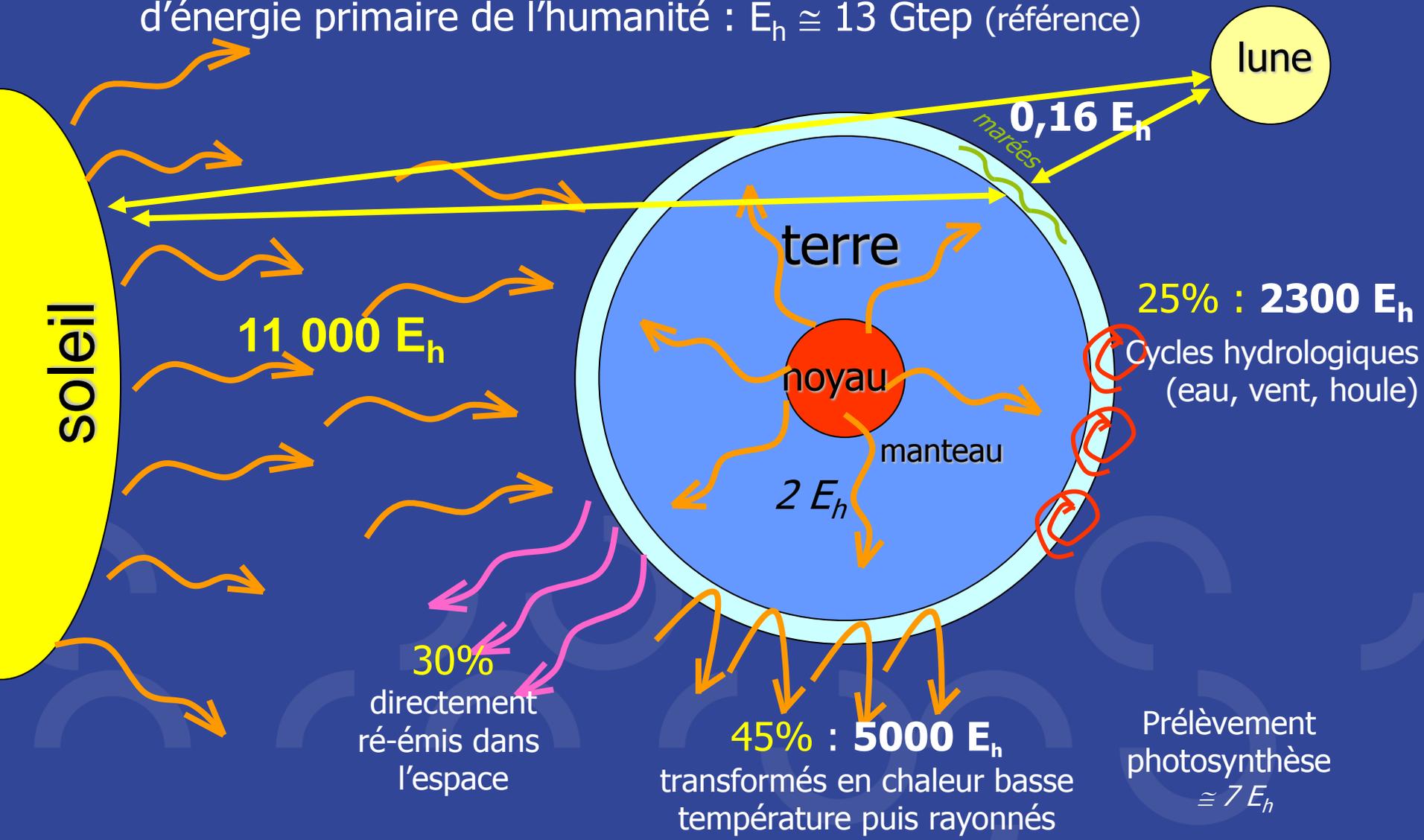
Réserves estimées : 60 Gtep

RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :

100 000 Gtep... par an !

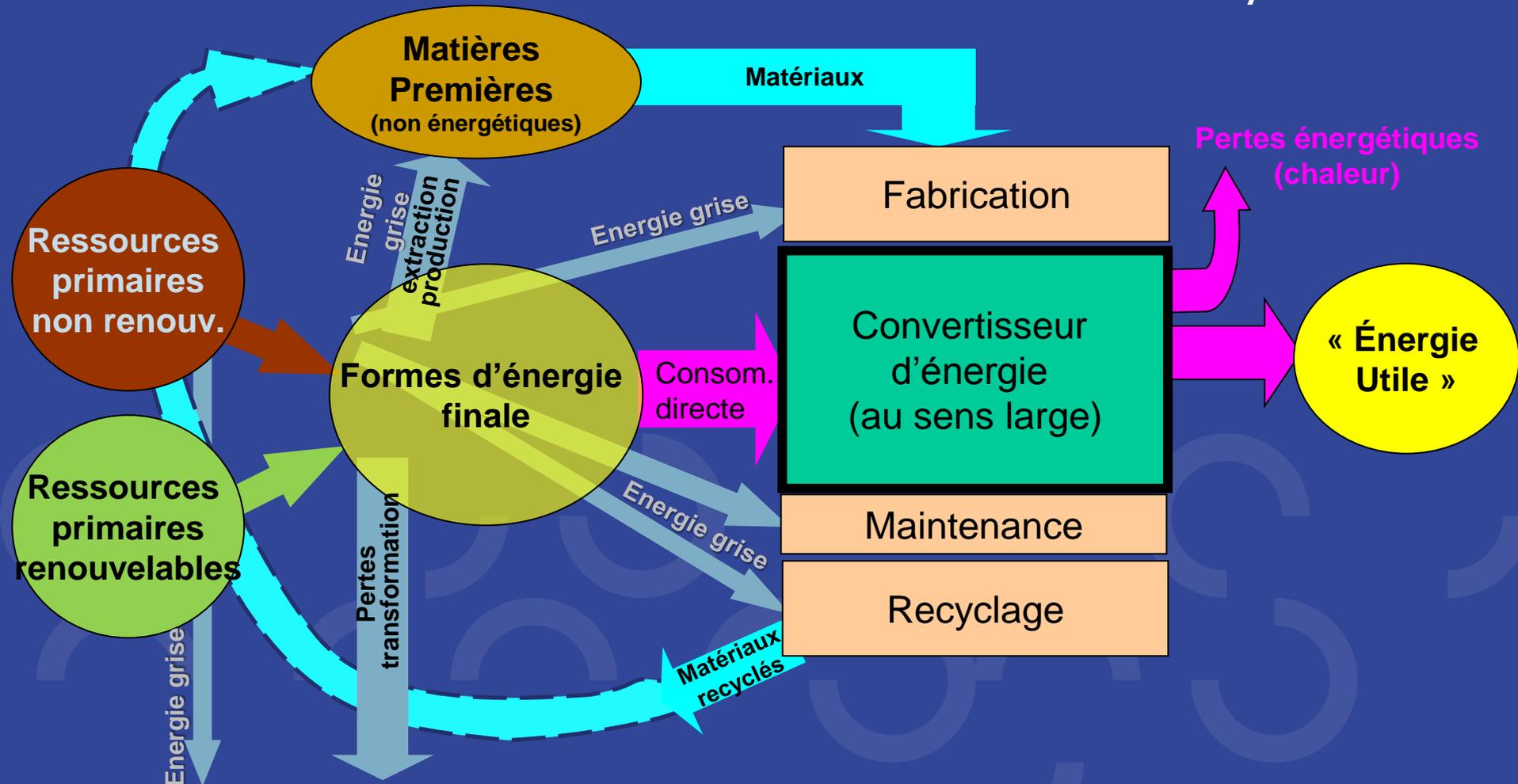
Quelques bases d'énergétique

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

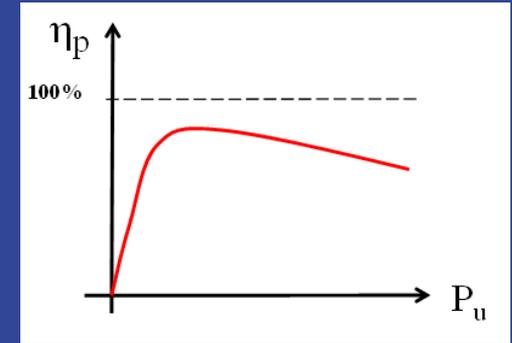


Cycle de vie d'un « convertisseur » d'énergie

Un critère important : l'énergie primaire non renouvelable consommée sur le cycle de vie



Notions de rendement



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

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

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

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

Rendement soutenable sur cycle de vie :

$$\eta_{lca_sust} = \frac{E_{u_life}}{\frac{E_{u_life}}{\eta_{(p-f)NR}} + E_{embNR}}$$

Energie grise (part non renouvelable)

$$\eta_{(p-f)NR} \cong \frac{E_{u_life}}{E_{u_life} + E_{lossNR_life}}$$

Rendement de transformation (phase usage) énergie primaire **non renouvel.** en énergie finale

Comparaison génération PV et électronucléaire

Réacteur nucléaire

Productivité : 1 GW x 7000 h = **7 TWh_e** x 40 ans

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

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

Transformation en combustible fissile : **5,1 TWh_p**

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

Stockage déchets : **0,43 TWh_p**

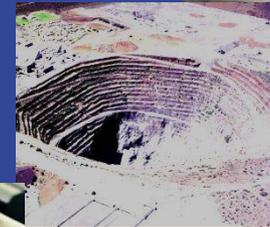
Énergie grise : **15,4 TWh_p**

Rendement primaire NR vers électricité (phase d'usage) : $\eta_{(p-f)_{NR}} \cong$ **33%**

Rendement sur cycle de vie :

$$\eta_{lca} = \frac{7 \times 40}{\frac{7 \times 40}{0,33} + 15,4} \cong 32\%$$

+ des déchets à longue vie
+ matières non recyclables...



Comparaison générations PV et nucléaire

Photovoltaïque en toiture

Pour produire **7 TWh_e /an** avec un rayonnement
de **1200 kWh_p/m²/an** (1200 h @ 1 kW/m²)

Avec technologie silicium polycristallin (**rendement 14%, FT = 0,8**)

Capacité nominale : **7,3 GW_p** (7 TWh_e / (1200 h) / 0,8)
soit **52 km²** (7,3 GW_c / (1200 W/m²) / 0,14)

(en France : 8500 km² de superficie bâtie)

Énergie grise : **5,4 MWh_p/kW_e** soit **40 TWh_p**

(panneaux, montage en toiture, onduleur, maintenance...)



Rendement primaire NR vers électricité (phase d'usage): $\eta_{(p-f)NR} \cong 100\%$

Durée de vie : 20 ans

Rendement sur cycle de vie
pour 40 ans de production

$$\eta_{lca} = \frac{2 \times [7 \times 20]}{2 \times \left[\frac{7 \times 20}{1} + 40 \right]} \cong 77\%$$

+ matériaux recyclables
moins de déchets toxiques

Source : Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, Report IEA-PVPS T12-02:2011

**Alors, qu'est-ce qu'une
production d'électricité
compatible un
développement durable ?**

Production d'électricité soutenable

Une conversion à base 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

Et sur le plan social : des ressources équitablement réparties,
gage de réduction des conflits, plus d'emplois locaux...

Production d'électricité soutenable

Les ressources énergétiques les plus abondantes
sont **le soleil et le vent**

Mais sont-elles suffisamment économiques ?

Leurs impacts environnementaux (sur cycle de vie)
sont-ils vraiment plus faibles ?

Y a t-il des solutions viables pour le traitement de leur variabilité ?

Les matières premières nécessaires pour réaliser leurs convertisseurs
sont-elles suffisamment abondantes et recyclables ?

Production d'électricité soutenable

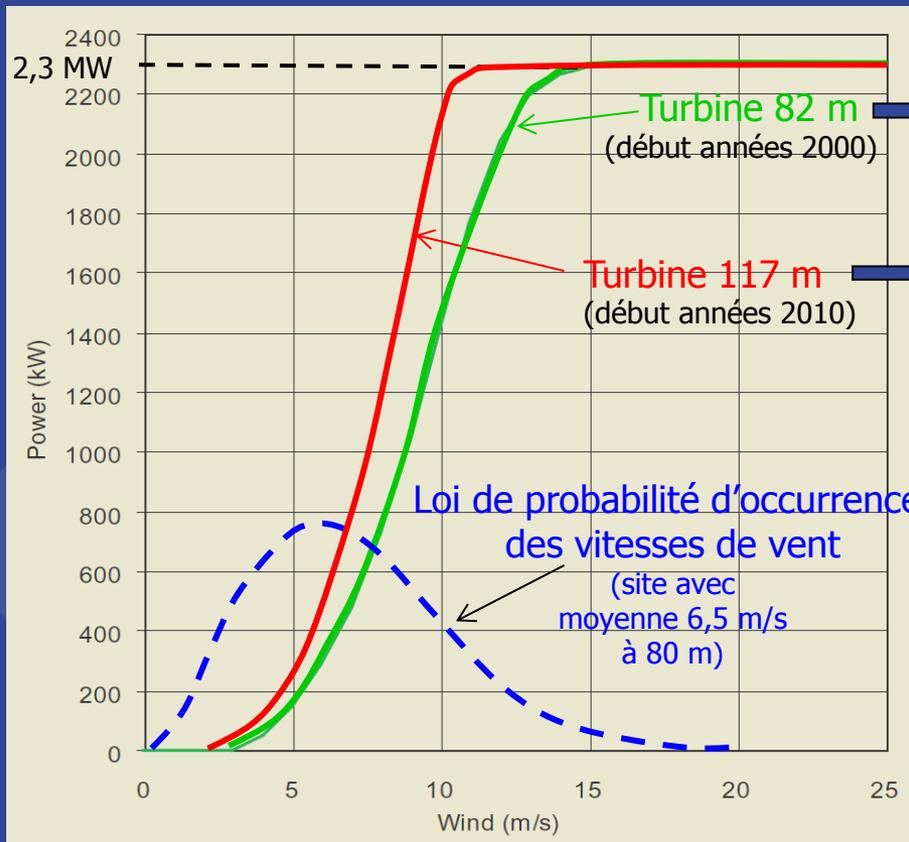
Suffisamment économiques ? Deux exemples :

1- Eolien : la révolution silencieuse⁽¹⁾

Accroissement du diamètre des turbines à même puissance nominale
 Comparaison de 2 machines de 2,3 MW_e



Source : Nordex



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

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

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 durant 10 ans,
 puis 2,8 à 8,2 durant 5 ans selon les sites)

⁽¹⁾ 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 d'électricité soutenable

Suffisamment économiques ? Deux exemples :

2- Photovoltaïque : l'effondrement des prix

Toits solaires et fermes au sol



Source : SOLHAB



Source : EDF Energies Nouvelles

Baisse des prix du système complet installé en toiture 10 à 100 kW, en Allemagne



Source : Fraunhofer, nov. 15

Prix actuels constatés des installations PV en France :

< 2,5 €/W en toiture faible puissance

< 1,5 €/W au sol

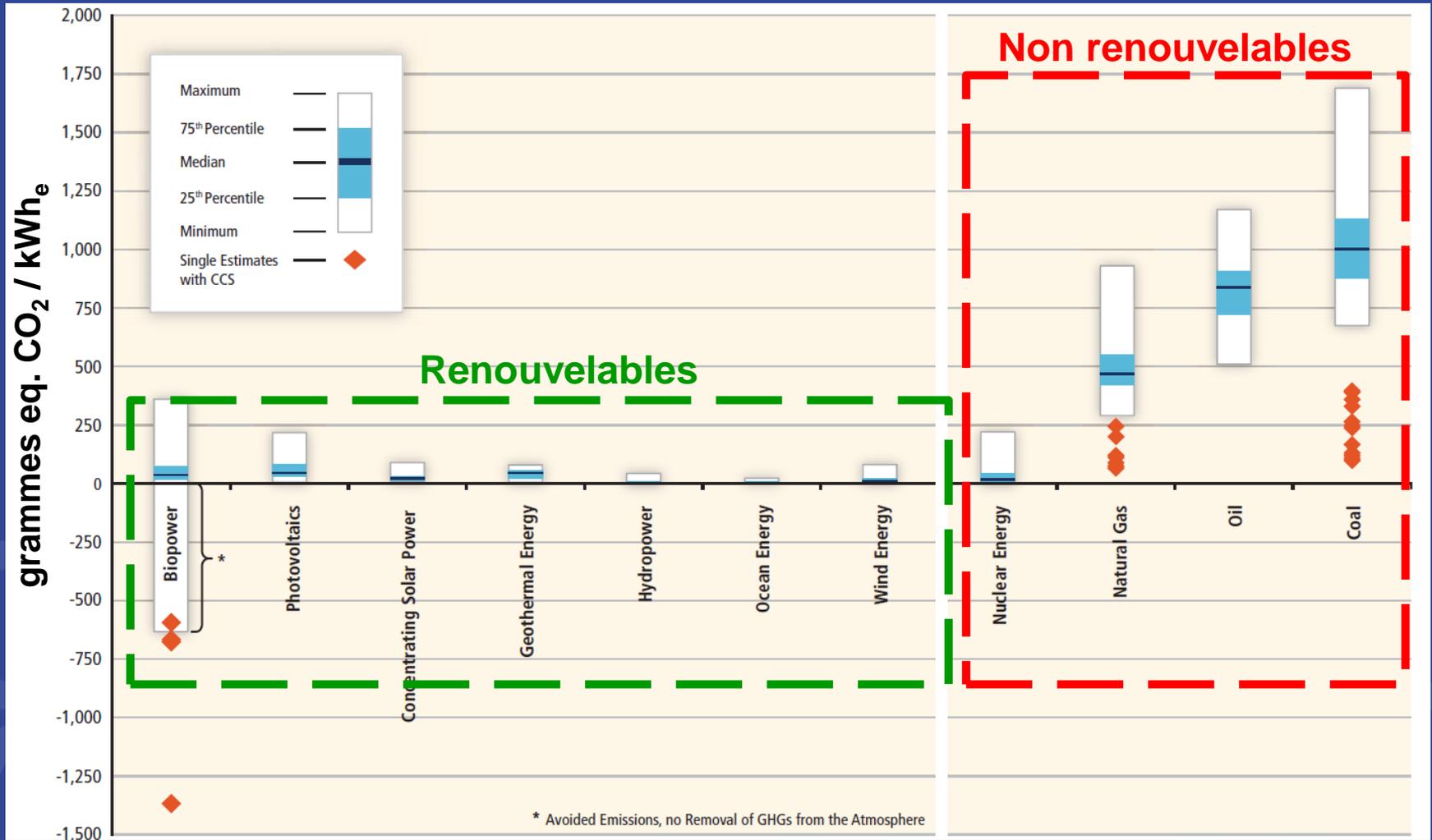
Et donc des coûts de production qui s'effondrent justifiant des tarifs d'achat de plus en plus bas, par ex. en France :

5,8 c€/kWh dans les grandes fermes

13 c€/kWh pour les toitures sans intégration au bâti

Production d'électricité soutenable

Impacts environnementaux : cas des gaz à effet de serre



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

Production d'électricité soutenable

Traitement de la variabilité :

Optimisation de la **complémentarité** des ressources variables...

En exploitant pleinement : - les **prévisions météorologiques**
- la flexibilité des **barrages hydro**

En utilisant des **centrales thermiques** à combustibles renouvelables
pour accroître la puissance flexible

En ajoutant des 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...

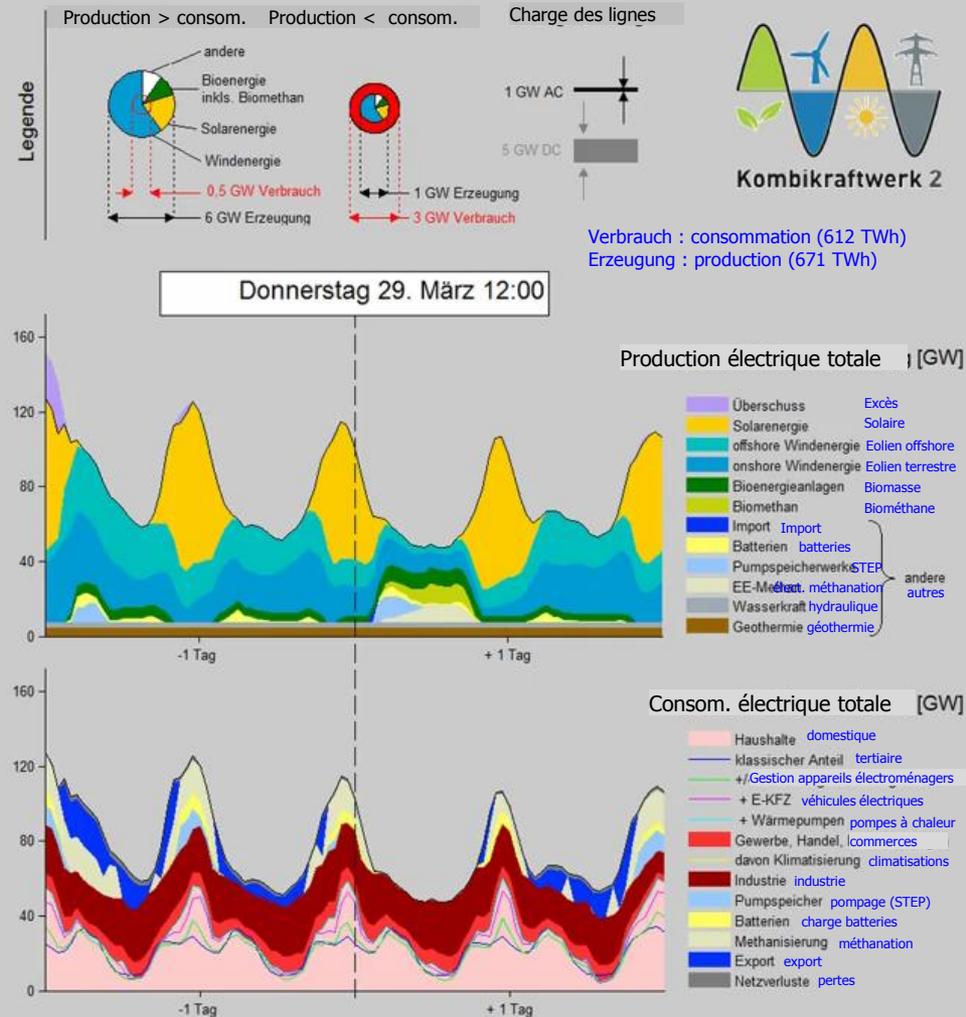
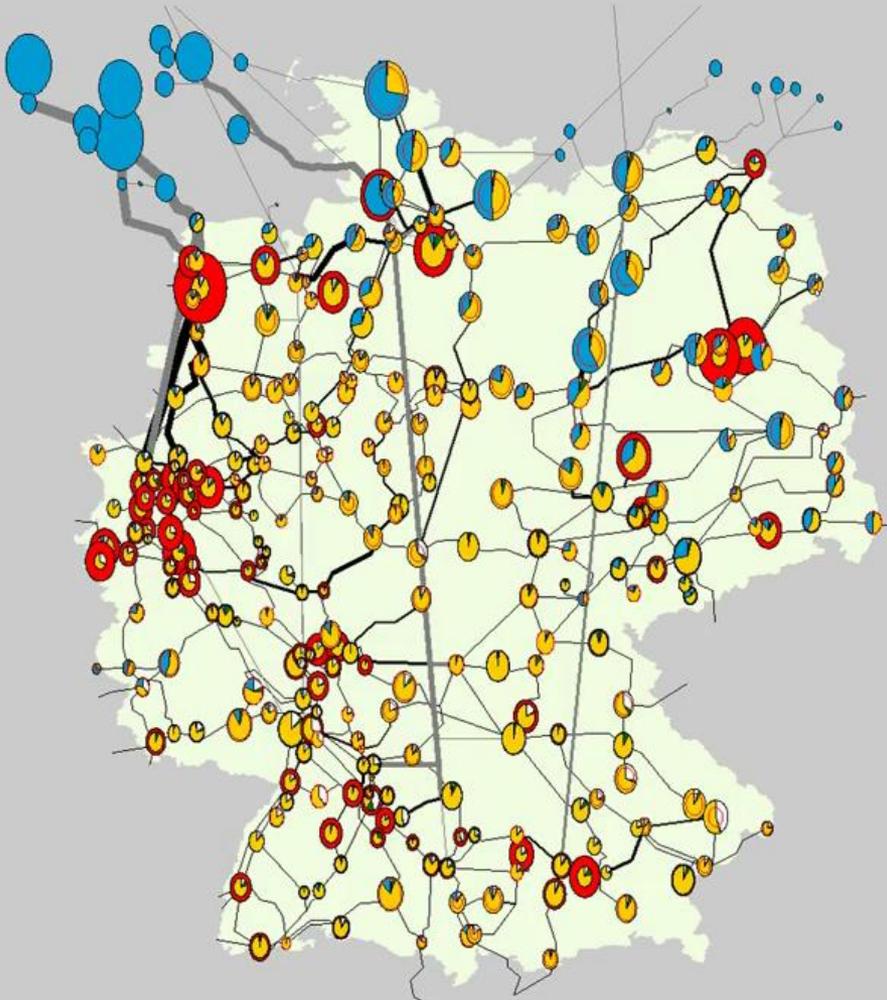
En **produisant des combustibles** (méthane de synthèse, hydrogène)

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

Production d'électricité soutenable

Traitement de la variabilité : Kombikraftwerk 2 : simulation 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>

Conclusion

Dans le monde entier, un important effort de recherche pour accroître les performances des renouvelables et pour permettre leur insertion massive dans les systèmes électriques

De nombreux scénarios d'une électricité 100% renouvelable, même en France (négaWatt, ADEME...) !

Avec beaucoup de bénéfices sur l'environnement, sur l'emploi, sur l'économie et sur la paix

Et le bilan sera encore bien meilleur avec une réduction des consommations via l'efficacité et la sobriété !

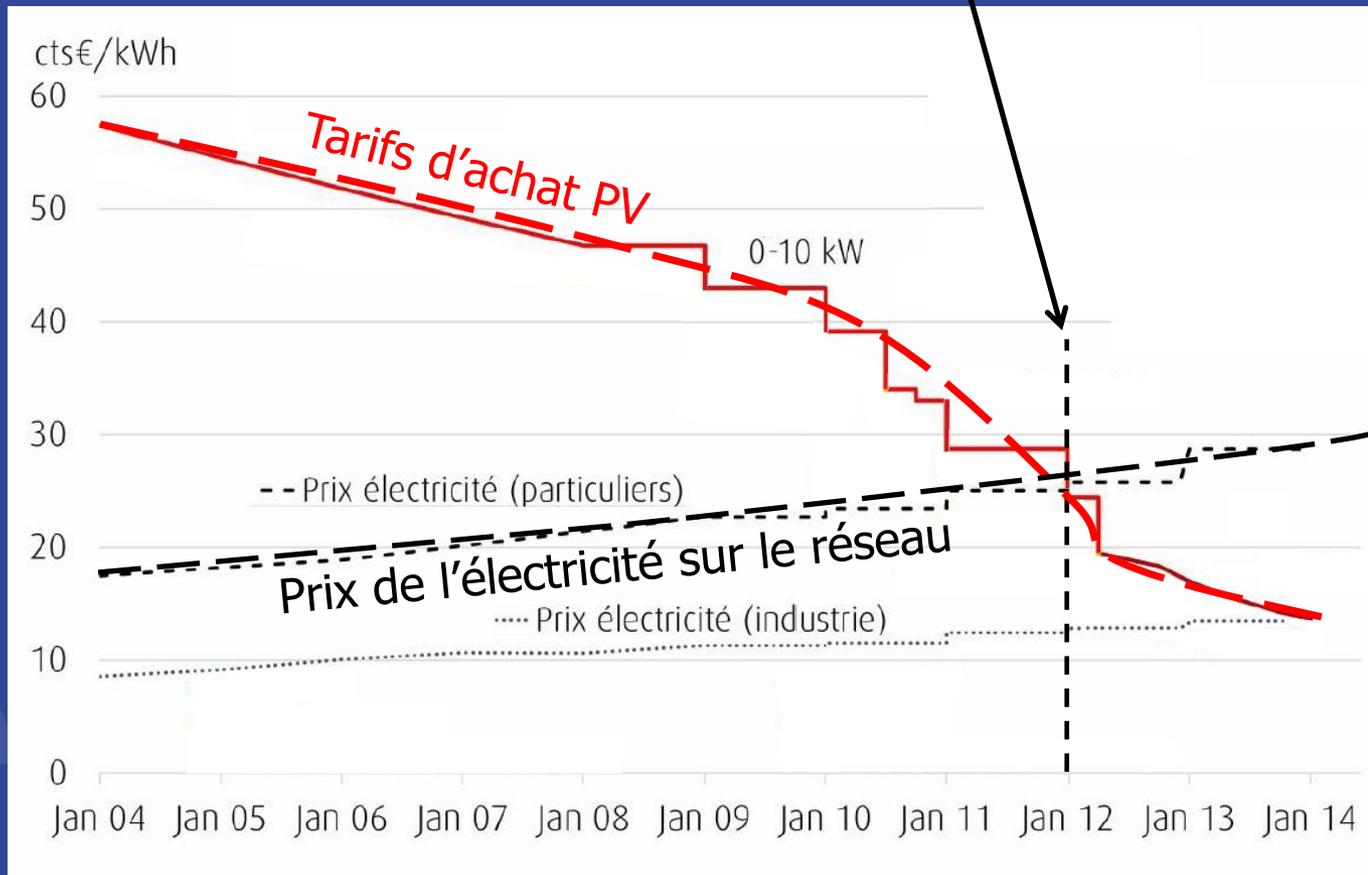
**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION**

Production d'électricité soutenable

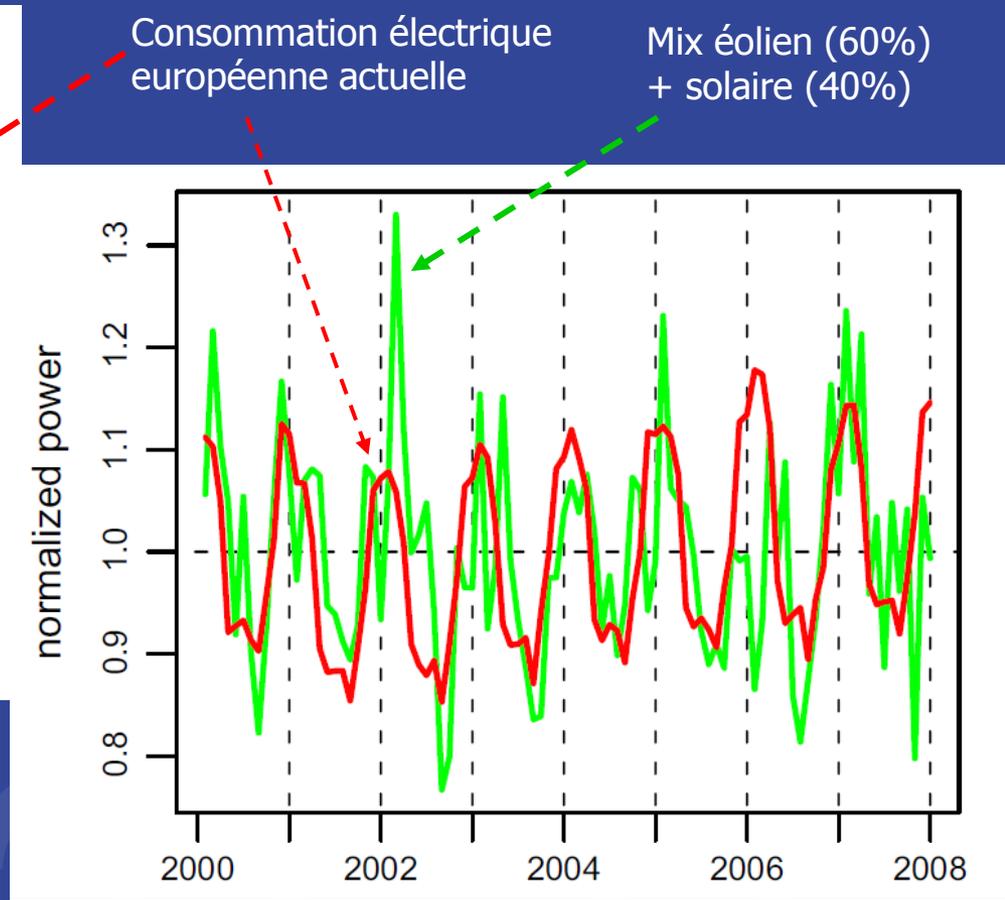
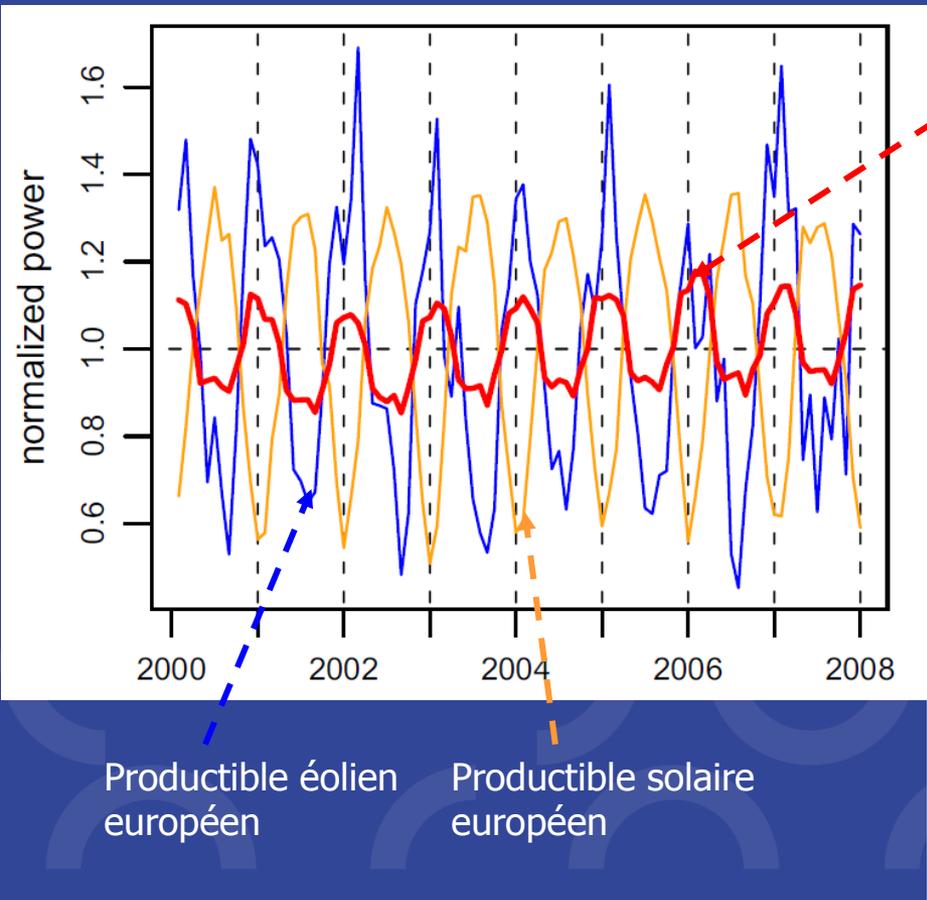
Suffisamment économiques ? Deux exemples

2- Photovoltaïque : l'effondrement des prix

En Allemagne, pour un ménage, depuis janvier 2012, le tarif de revente de l'électricité PV est inférieur au prix d'achat de l'électricité du réseau



Eolien solaire : complémentarité à l'échelle de l'Europe

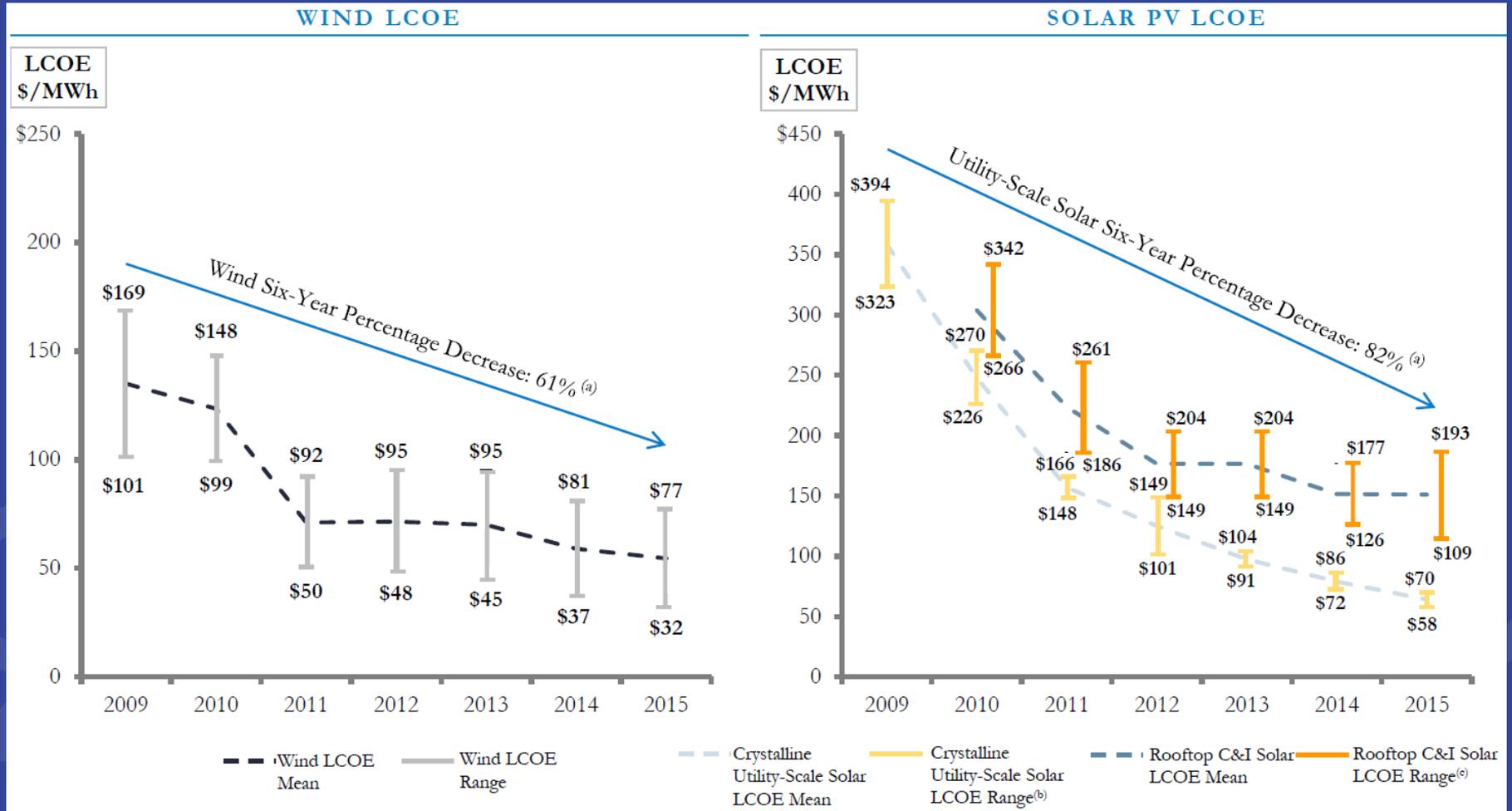


Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future highly renewable Europe », *Renew. Energy*, Elsevier 2010.

Electricité : Baisse des coûts de production éolien et PV

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2015)

LCOE = Levelized Cost of Electricity

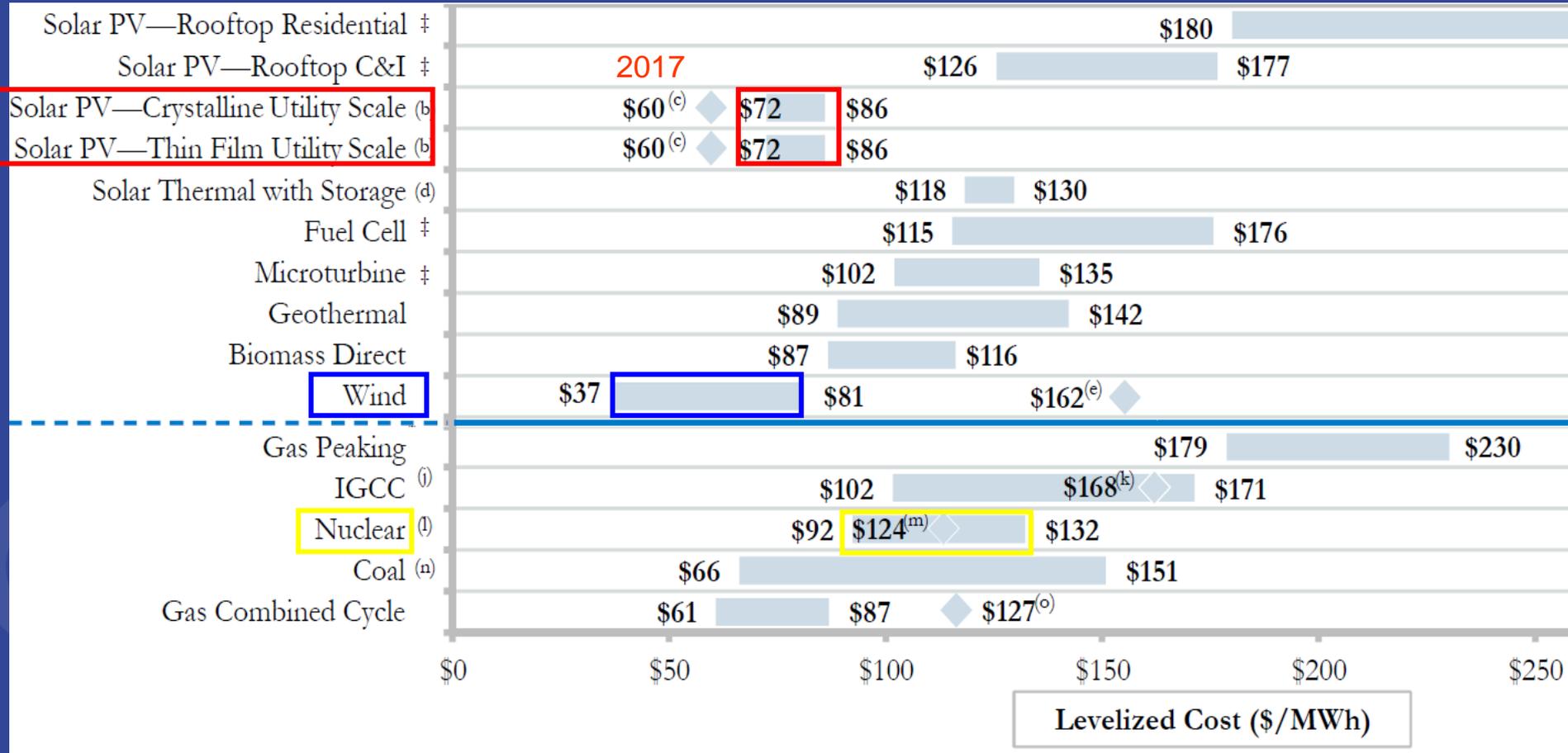


Source : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 9.0, nov. 2015. <https://www.lazard.com/media/2390/lazards-levelized-cost-of-energy-analysis-90.pdf>

Electricité : comparaison des coûts

Rapport banque Lazard pour les USA (sept. 2014)

LCOE = Levelized Cost of Electricity



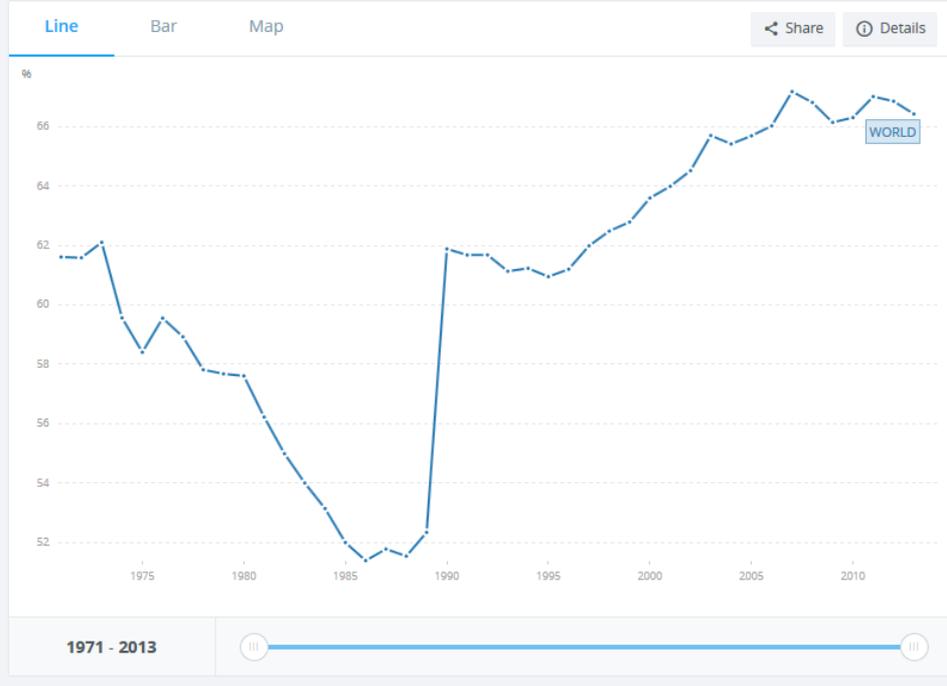
Source : : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 8.0, september 2014. <http://www.lazard.com/PDF/Levelized%20Cost%20of%20Energy%20-%20Version%208.0.pdf>

Electricité : grandes tendances au niveau mondial

Electricity production from oil, gas and coal sources (% of total)

IEA Statistics © OECD/IEA 2014 (iea.org/stats/index.asp), subject to iea.org/t&c/termsandconditions

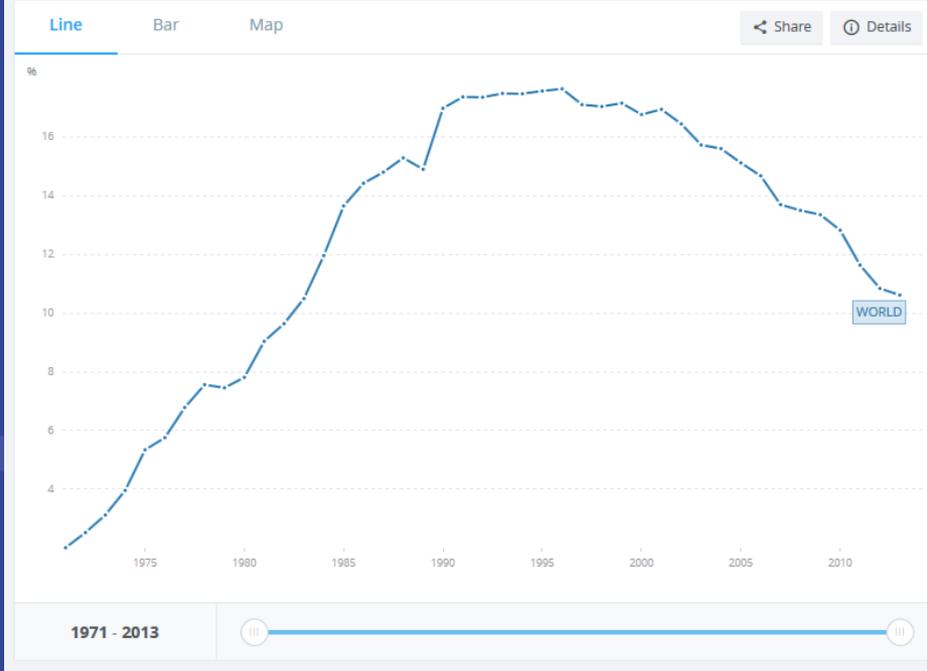
License: **Restricted**



Electricity production from nuclear sources (% of total)

IEA Statistics © OECD/IEA 2014 (iea.org/stats/index.asp), subject to iea.org/t&c/termsandconditions

License: **Restricted**



Source : World Bank

Electricité : grandes tendances au niveau mondial

Electricity production from hydroelectric sources (% of total)

IEA Statistics © OECD/IEA 2014 (iea.org/stats/index.asp), subject to iea.org/t&c/termsandconditions
 License: **Restricted**



Electricity production from renewable sources, excluding hydroelectric (% of total)

IEA Statistics © OECD/IEA 2014 (iea.org/stats/index.asp), subject to iea.org/t&c/termsandconditions
 License: **Restricted**



Source : World Bank