

L'énergie électrique peut- elle contribuer au développement soutenable de l'humanité ?

Bernard MULTON

Laboratoire SATIE CNRS

Département de Mécatronique ENS Rennes

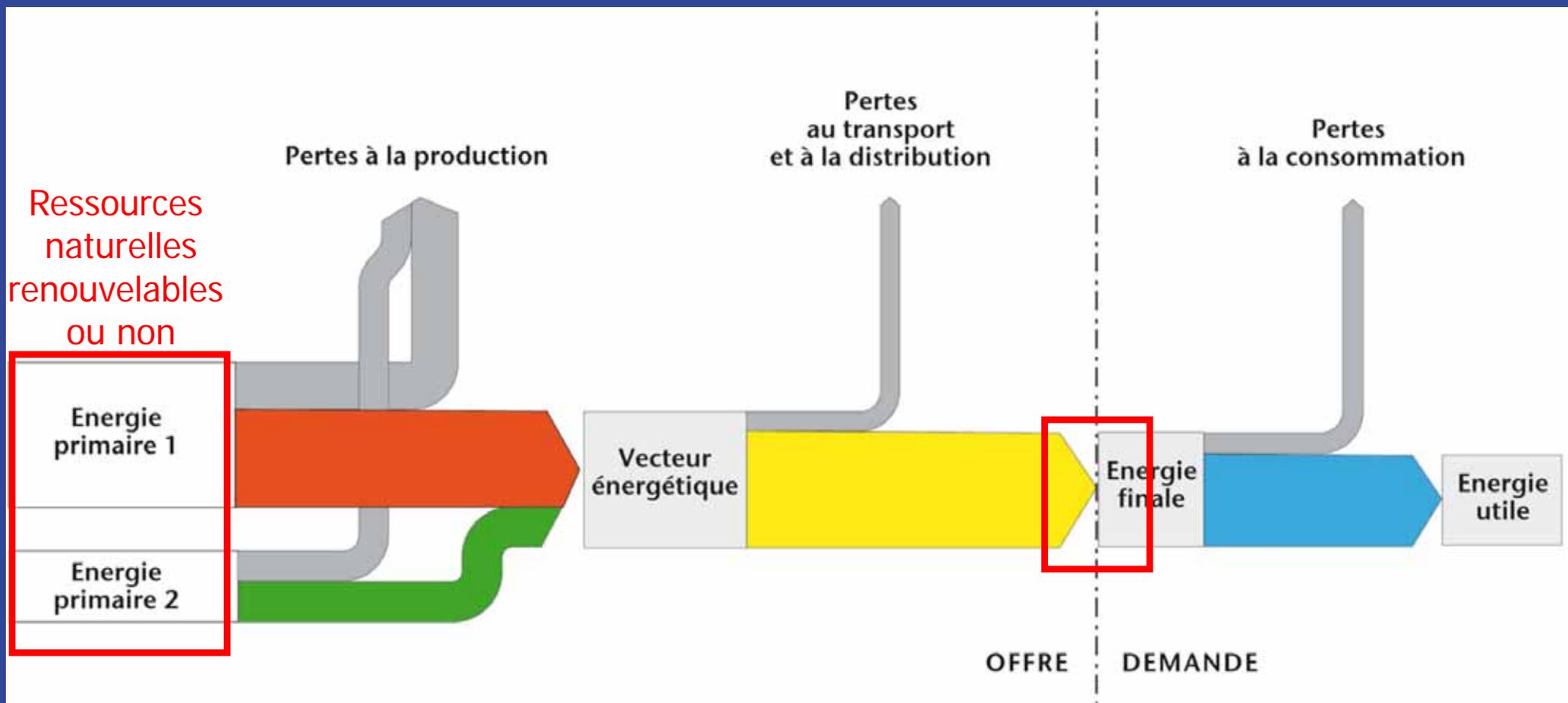
Quelques notions d'énergétique à l'échelle planétaire



Crédit : Fotolia
La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques

Quelques notions d'énergétique

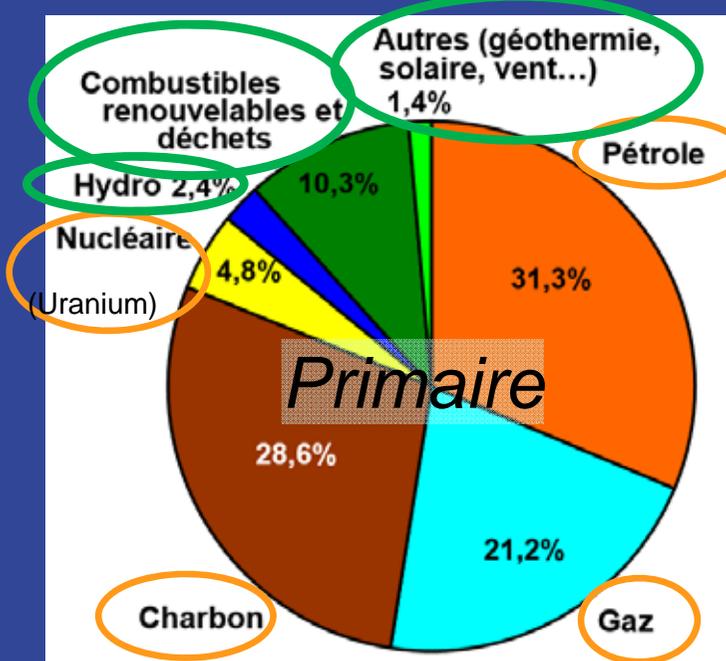
Energies primaire, finale et utile...



Source : négaWatt

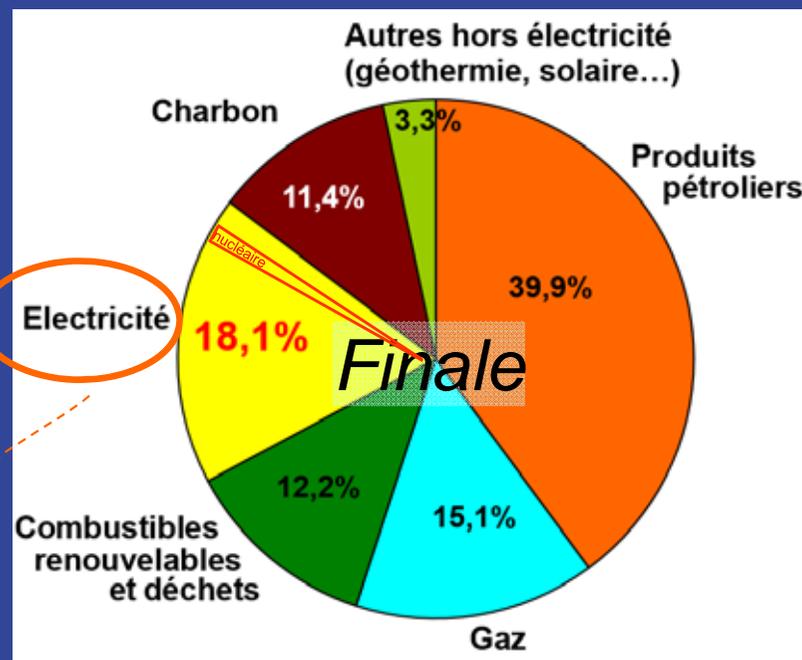
Quelques notions d'énergétique

Bilan énergétique mondial 2014, place de l'électricité



Non renouvelables > 86%

+3,3%/an (moyenne 2004-2014)



Total \cong 13,7 Gtep (159 000 TWh_p)

Total \cong 9,42 Gtep (109 000 TWh)

+2,1%/an (moyenne 2004-2014)

> 50 000 TWh_p (\cong 33%) prélevés pour : **23 800 TWh_e** d'électricité produite

pour commercialiser : **19 800 TWh_e** d'électricité finale (livrée aux compteurs)

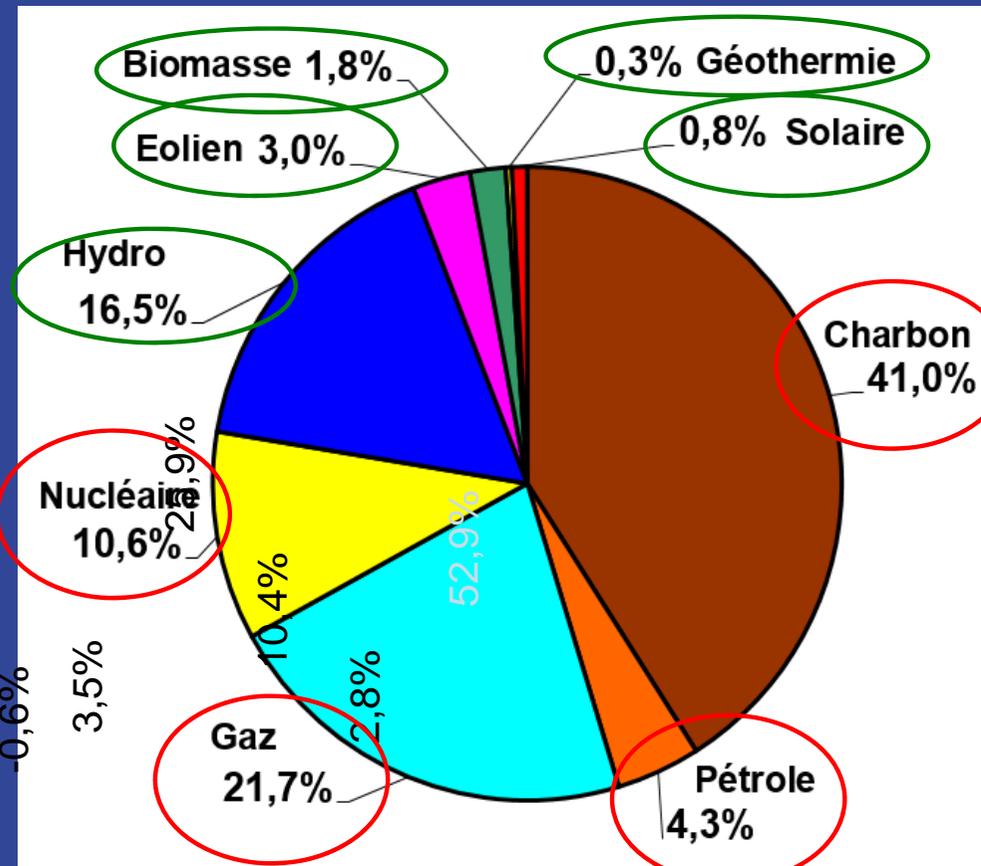
Source des données : Agence Internationale de l'énergie traitement par l'auteur

« Vraie » part du nucléaire : 4,8 % de l'énergie primaire
 1,9 % de l'énergie finale car 10,6% de l'électricité est d'origine nucléaire (10,6% * 18,1%=1,9%)

Quelques bases d'énergétique

La production mondiale d'électricité (2014) et les tendances

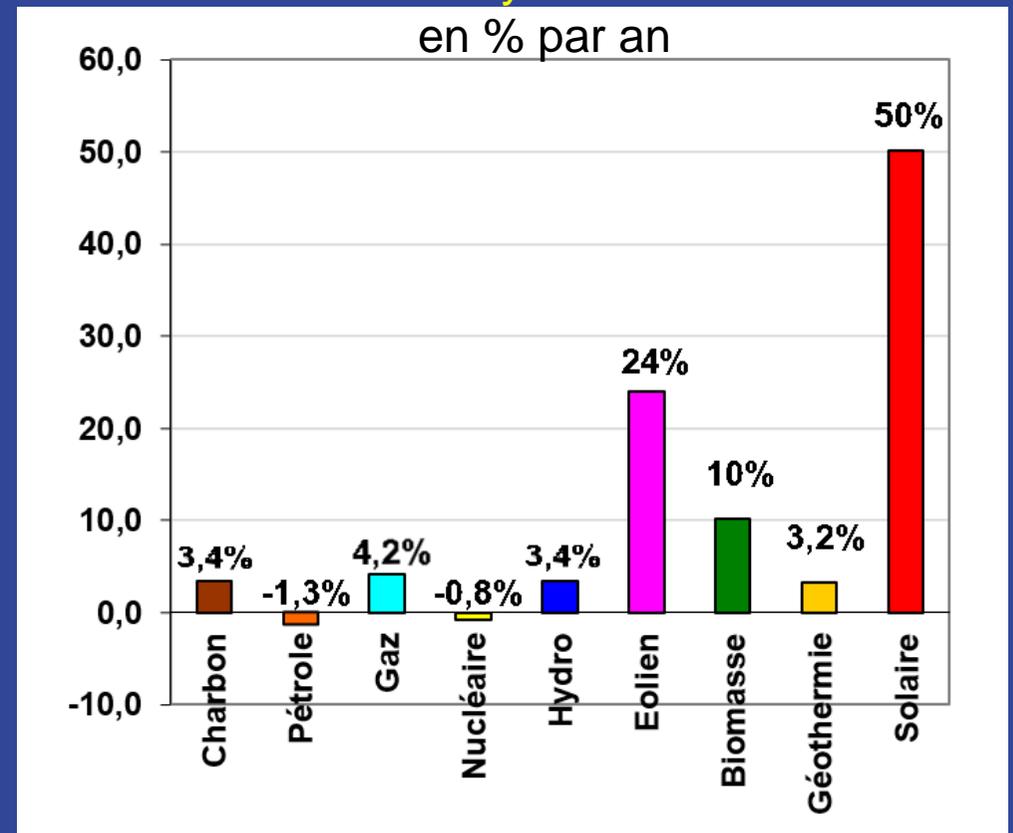
23 800 TWh +3,3% moy. 10 ans (2004-2014)



Non renouvelables : + 2,6% /an sur 10 ans

22,4 % renouvelables : + 5,5% /an sur 10 ans

Evolution moyenne sur 10 ans



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

Source : Renewables 2016 Global Status Report

Source : données AIE

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

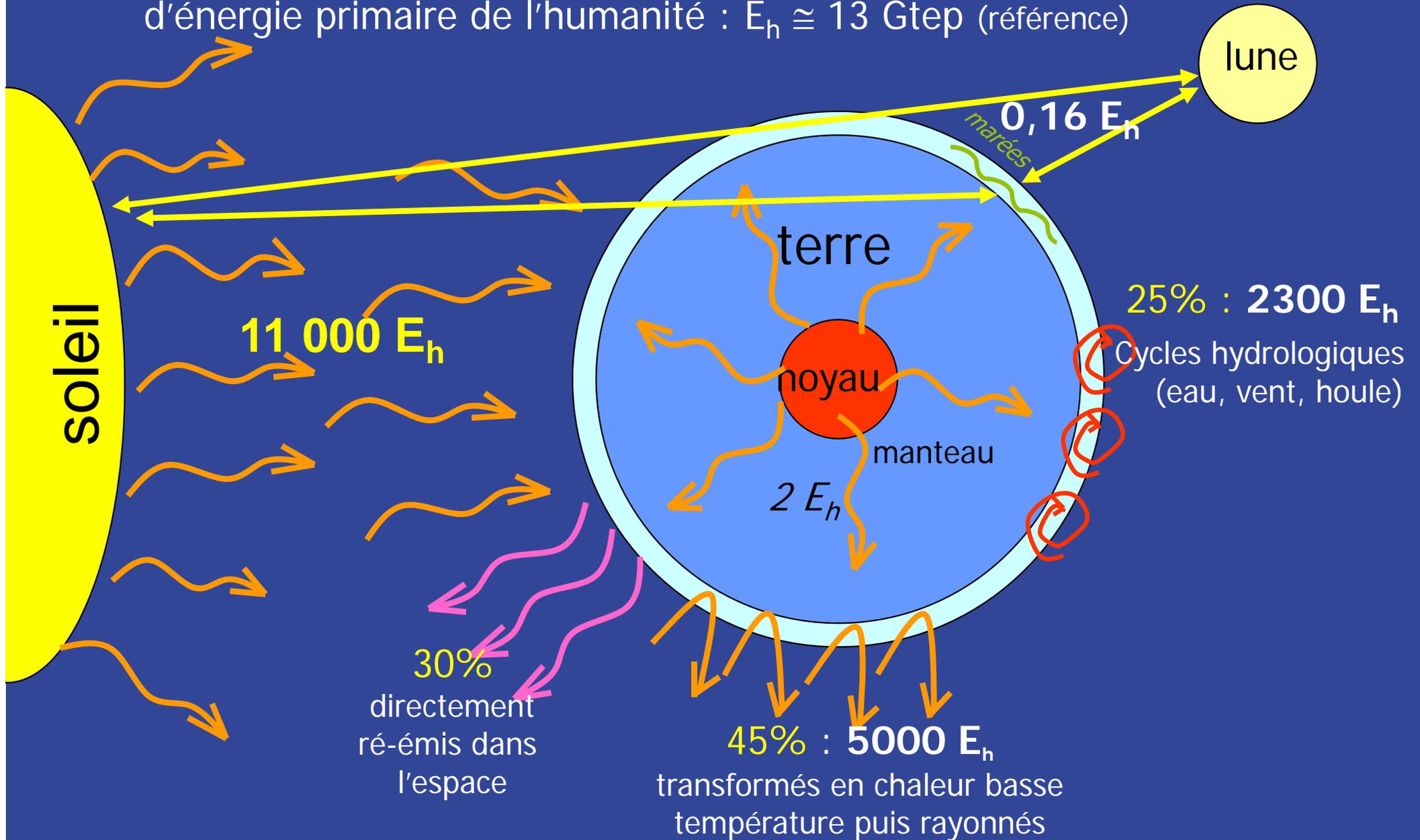
Réserves estimées : **60 Gtep**

RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :

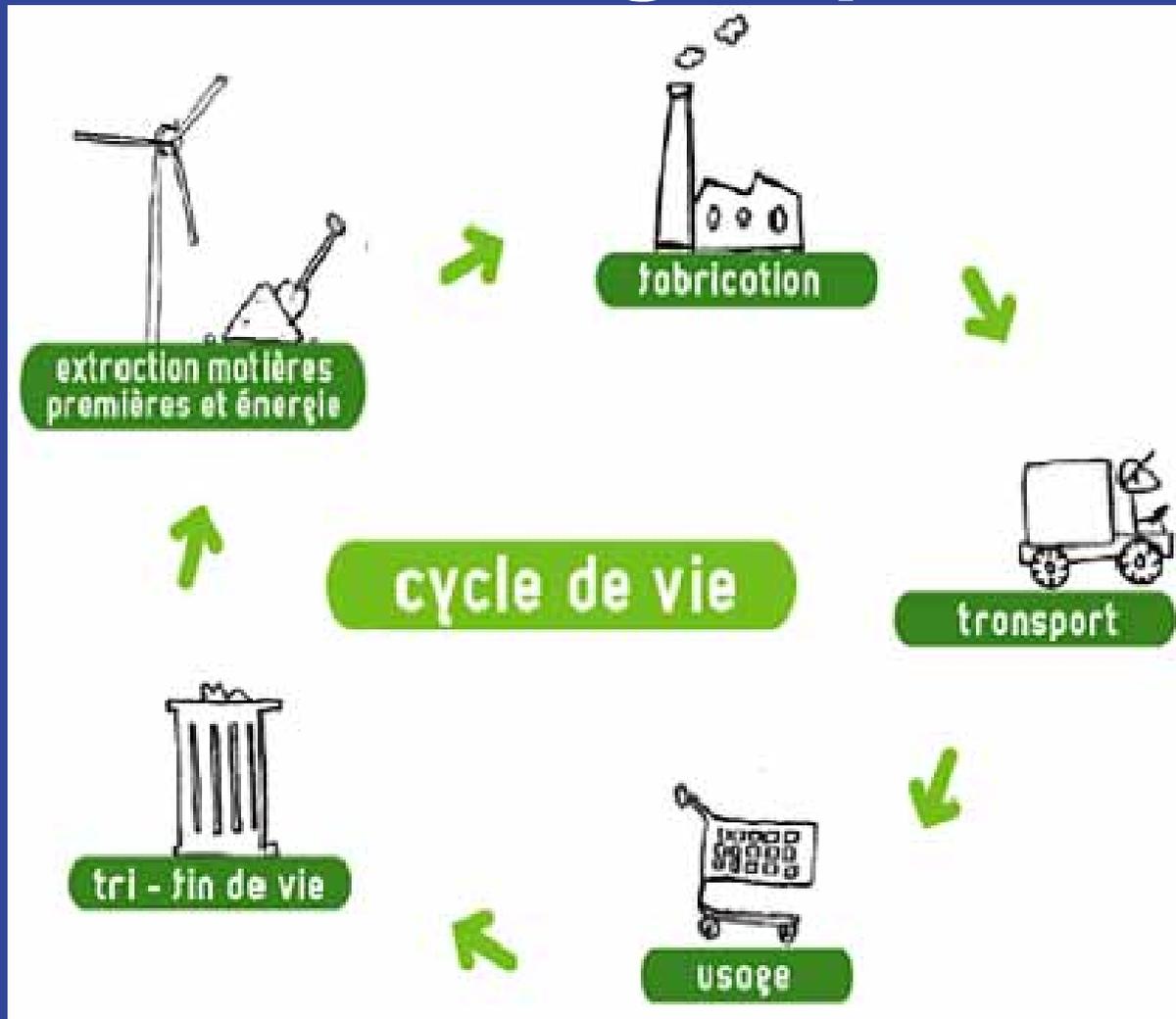
100 000 Gtep... par an !

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)



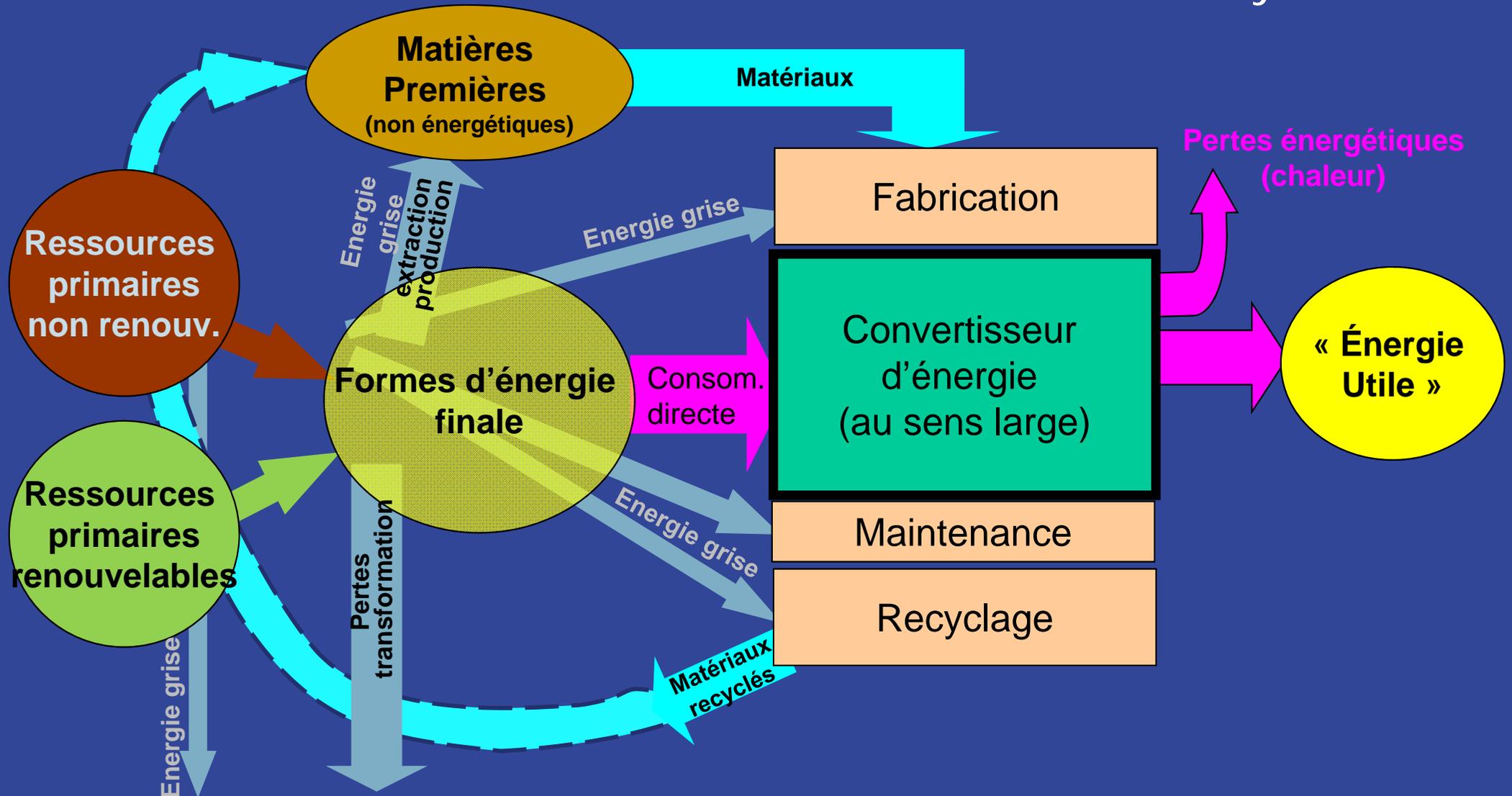
Considérations sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques



Crédit : Association HESPUL
<http://www.hespul.org/>

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

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

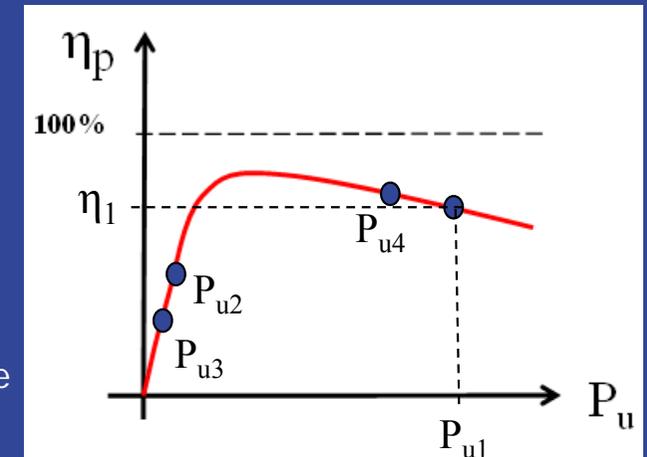


Notions de rendement

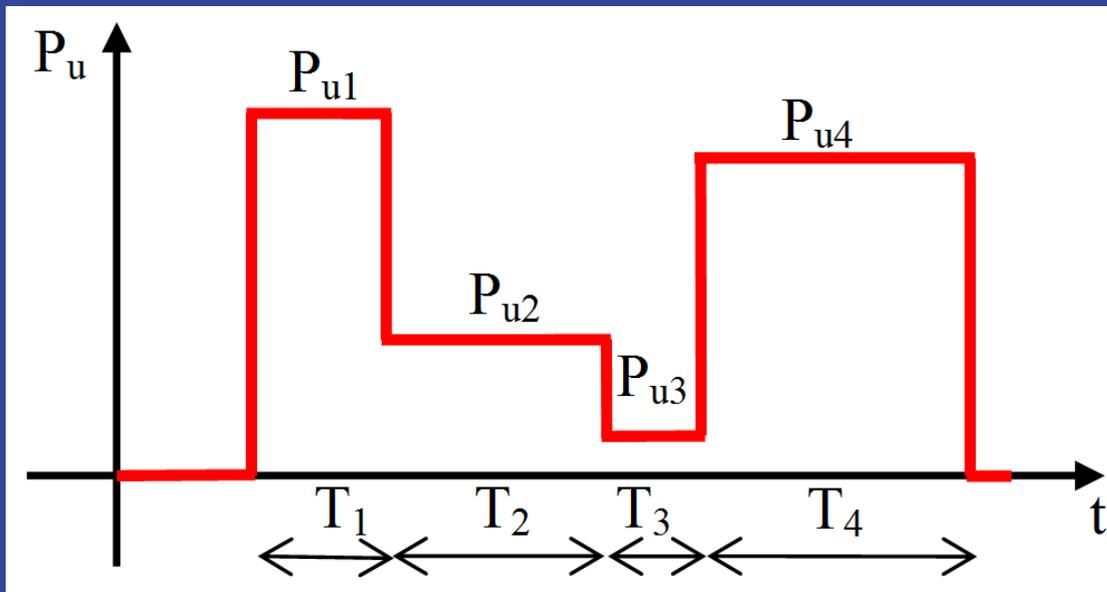
Rendement instantané ou en puissance :
(sur un point de fonctionnement)

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

P_u = puissance utile
 P_{cons} = puissance consommée



Mais, sur un cycle de fonctionnement, la puissance varie généralement :



Energie utile sur le cycle

$$E_u = P_{u1} \cdot T_1 + P_{u2} \cdot T_2 + \dots$$

Energie consommée sur le cycle

$$E_{\text{cons}} = \frac{P_{u1}}{\eta_1} \cdot T_1 + \frac{P_{u2}}{\eta_2} \cdot T_2 + \dots$$

Notions de rendement (suite)

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

$$\eta_E = \frac{E_u}{E_{\text{cons}}} = \frac{P_{u1} \cdot T_1 + P_{u2} \cdot T_2 + \dots}{\frac{P_{u1}}{\eta_1} \cdot T_1 + \frac{P_{u2}}{\eta_2} \cdot T_2 + \dots}$$

**Rendement soutenable
 sur cycle de vie** :

$$\eta_{\text{lca_sust}} = \frac{E_{u_life}}{E_{p_{NR_life}}} = \frac{E_{u_life}}{\frac{E_{u_life}}{\eta_{E_{NR}}} + E_{\text{emb}_{NR}}}$$

Rendement énergétique de transformation
 (durant la phase d'usage)
 donnant la consommation
 d'énergie primaire **non renouvelable**

Energie grise
 (part non renouvelable)

Comparaison de deux modes de génération d'électricité bas carbone

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) : $\eta_{\text{PNR_life}} \cong 33\%$

Rendement sur cycle de vie : $\eta_{\text{lca_sust}} = \frac{7 \times 40}{\frac{7 \times 40}{0,33} + 15,4} \cong 32\%$
 + des déchets à longue vie
 + matières non recyclables...



Comparaison de deux modes de génération d'électricité bas carbone

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% et PR = 0,8**)

Puissance nominale : **7,3 GW_c** (7 TWh_e / (1200 h x 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_c** (5,4 MWh_p x 7,3 10⁶ kW_c) soit **40 TWh_p**

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



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

Durée de vie : 20 ans

Rendement sur cycle de vie
pour 40 ans de production :

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

+ matériaux recyclables
moins
de déchets toxiques

Alors, l'électricité peut-elle contribuer à un développement soutenable de l'humanité ?



Développement durable compatible ?

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...

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

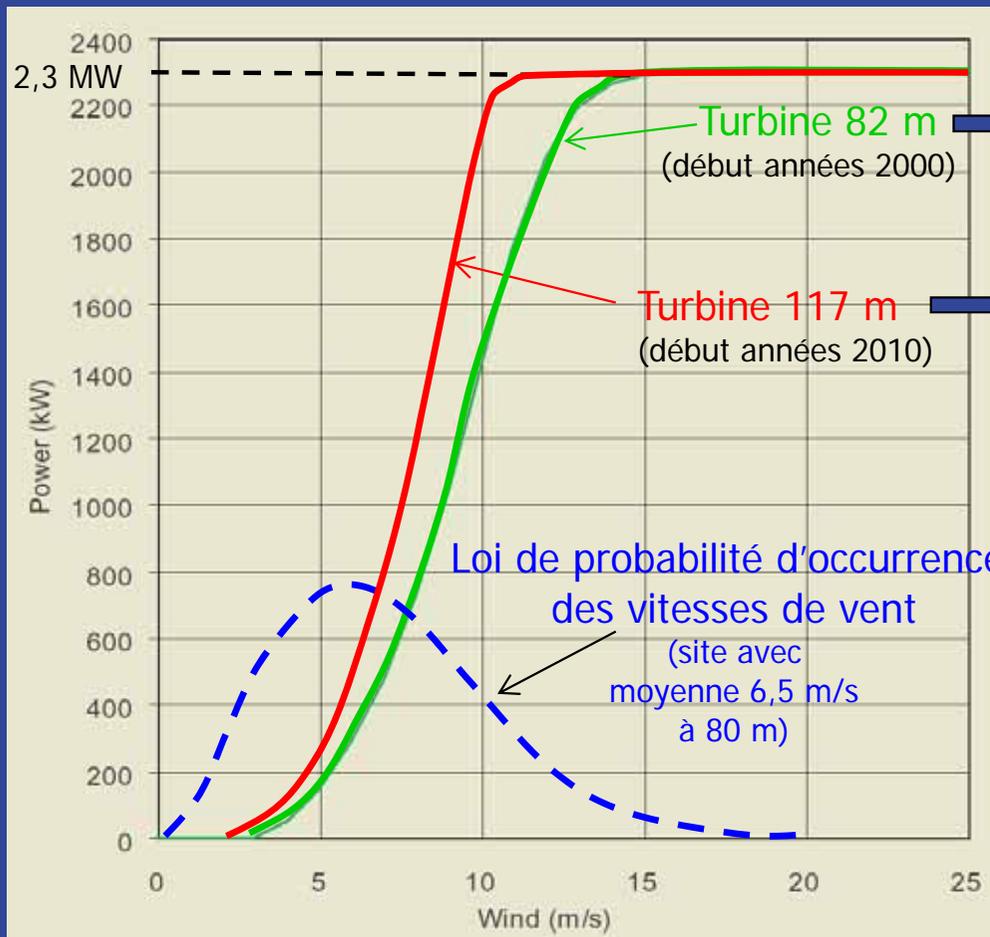
Suffisamment économiques ? Deux exemples :

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



Turbine 82 m
 (début années 2000) → productivité annuelle 5 GWh_e
 2200 h_{epp} (équivalent pleine puissance) par an

Turbine 117 m
 (début années 2010) → 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

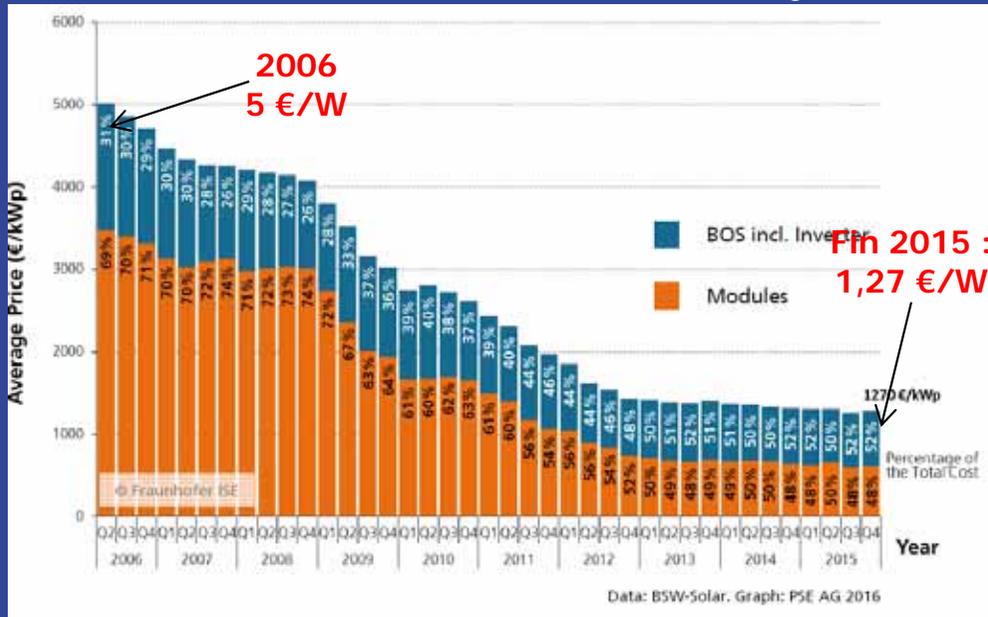


Source : SOLHAB



Source : EDF Energies Nouvelles

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



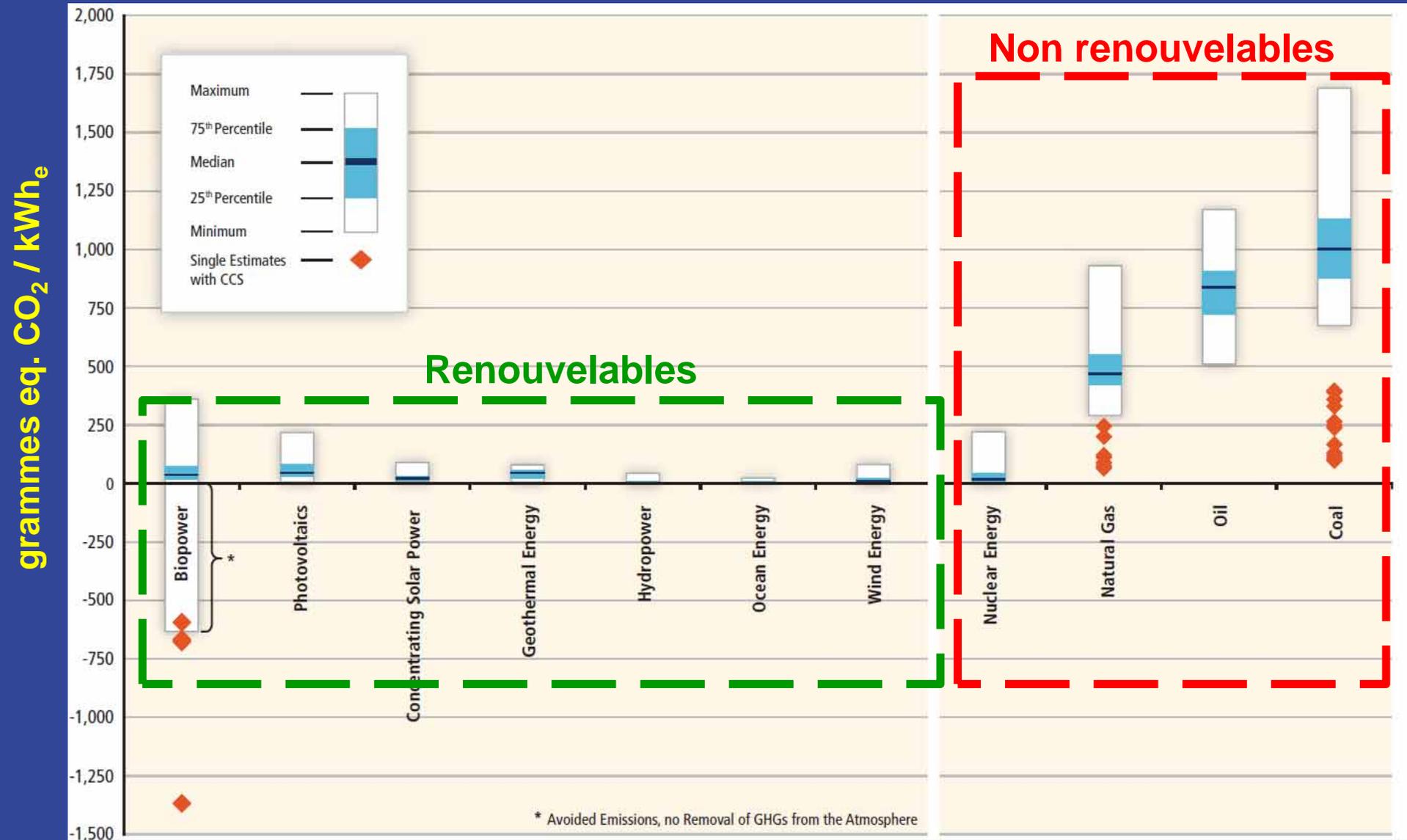
Source : Fraunhofer, oct. 2016

Prix actuels constatés des installations PV en France :
 environ 2 €/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

Emissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie



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...

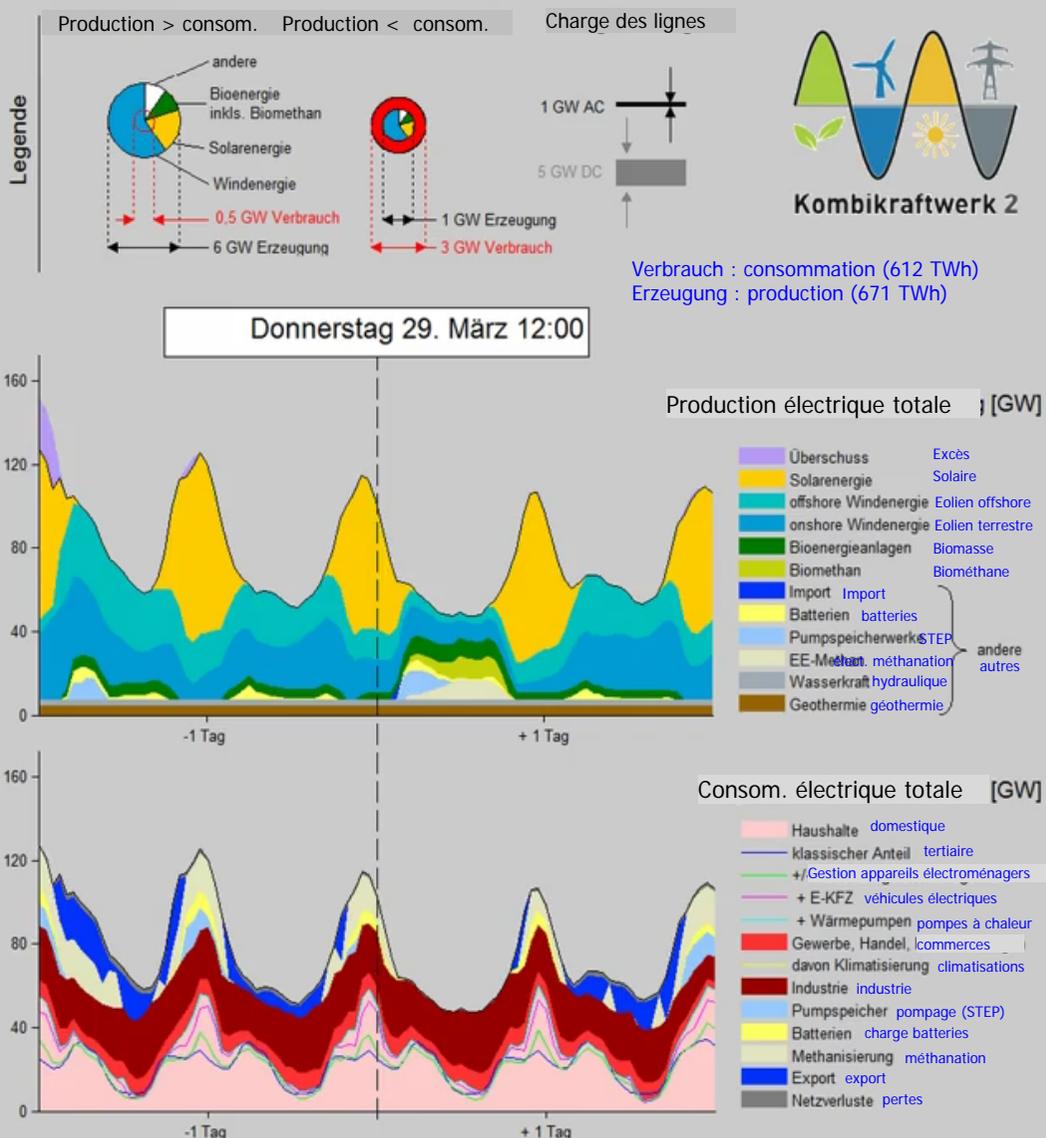
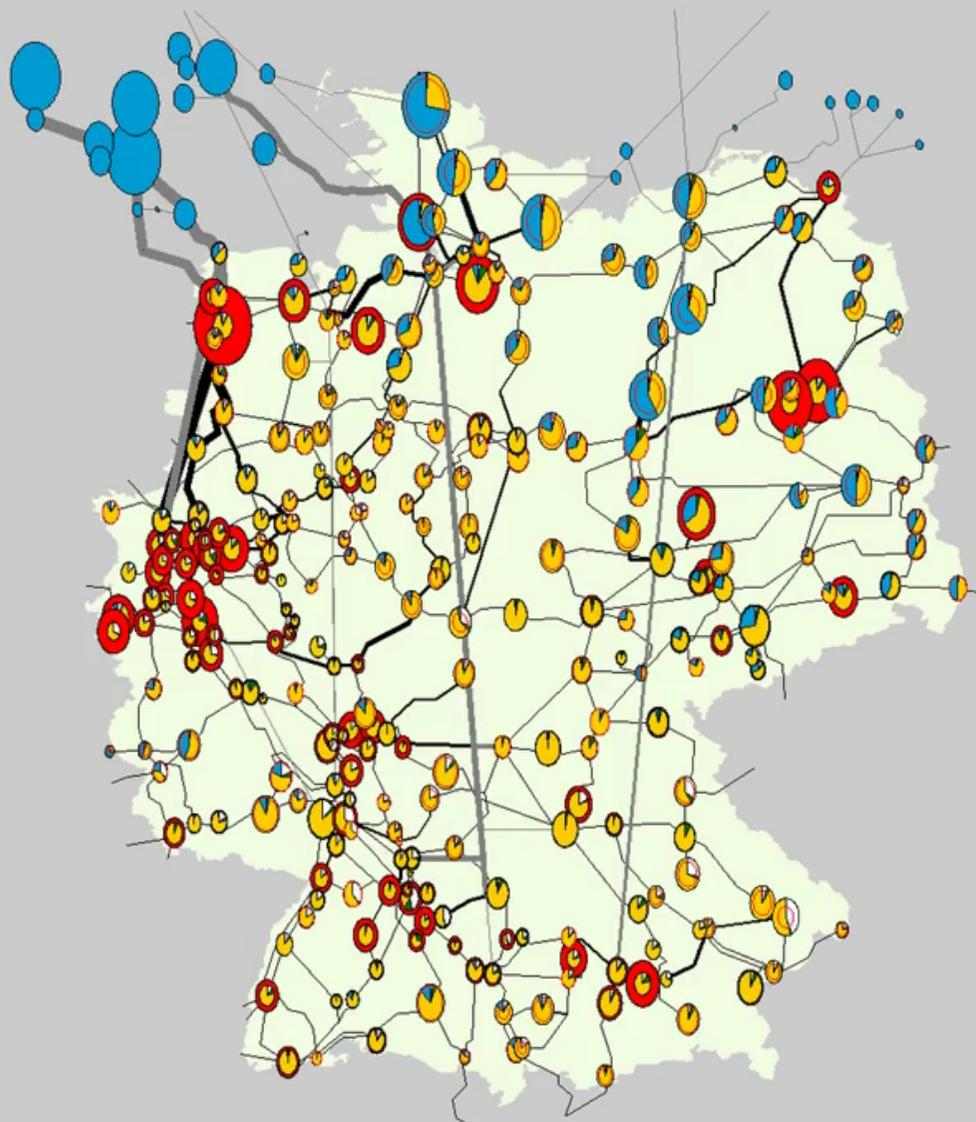
En **produisant des combustibles** (méthane de synthèse, hydrogène)

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



Conclusion

Pour éviter ça :



Et ça :



L'énergie électrique vecteur d'un développement soutenable

Dans le monde entier, un **mouvement de fond**
pour accroître les performances des renouvelables
et permettre leur insertion massive
dans les systèmes électriques

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

Permettant même de satisfaire de **nouveaux usages : transports**

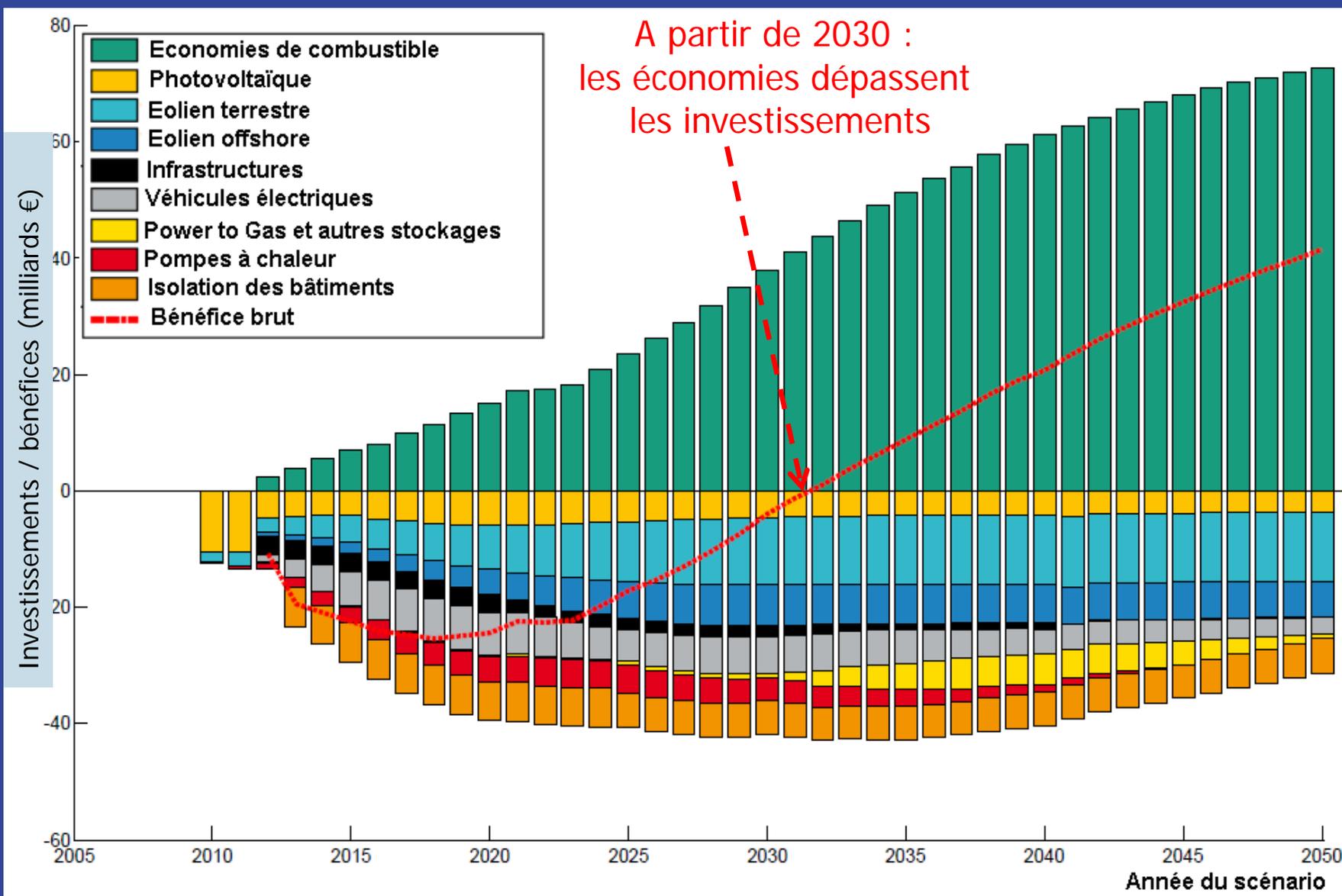
Avec **beaucoup de bénéfices** sur l'environnement,
sur l'emploi, sur l'économie et sur la **paix**

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

* Présentation du scénario négaWatt 2017 le 25 janvier à Paris !

**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION**

Scénario économique



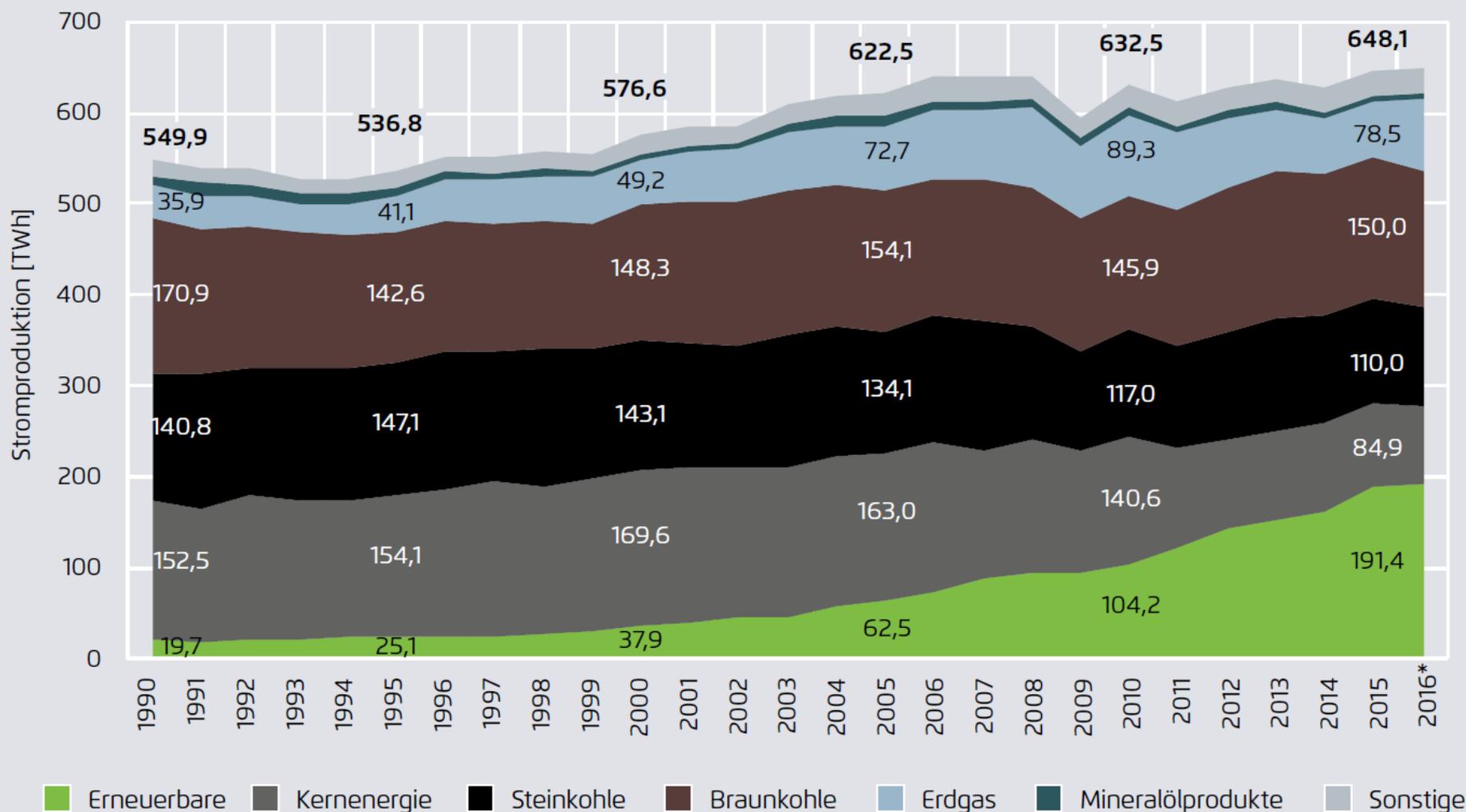
Source : Fraunhofer IWES, « Geschäftsmodell Energiewende. Eine Antwort auf das „Die-Kosten-der-Energiewende“ Argument », jan. 2014

https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Studie_Energiewende_Fraunhofer-IWES_20140-01-21.pdf

Transition énergétique en Allemagne

Production électrique 1990 – 2016 (consommation : - 2,4%)

Entwicklung der Stromproduktion 1990–2016

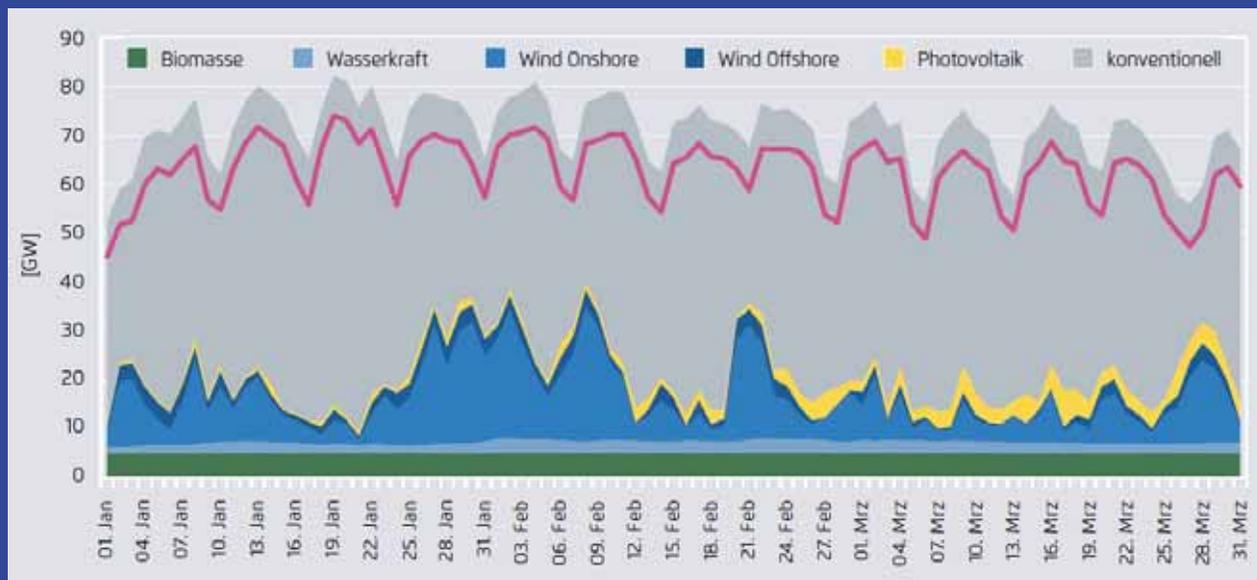


Source : Agora Energiewende, «Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2016 », jan. 2017

https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Jahresauswertung_2016/Agora_Jahresauswertung-2016_WEB.pdf

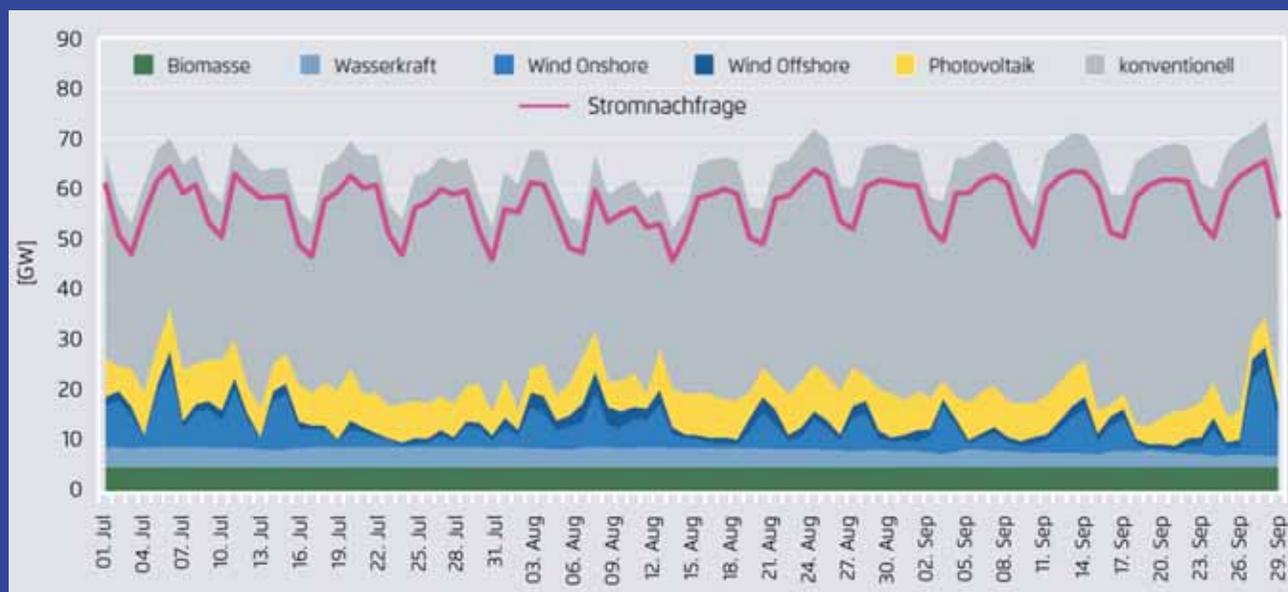
Transition énergétique en Allemagne

Production et consommation instantanée électriques en 2016 :



← En hiver

En été →

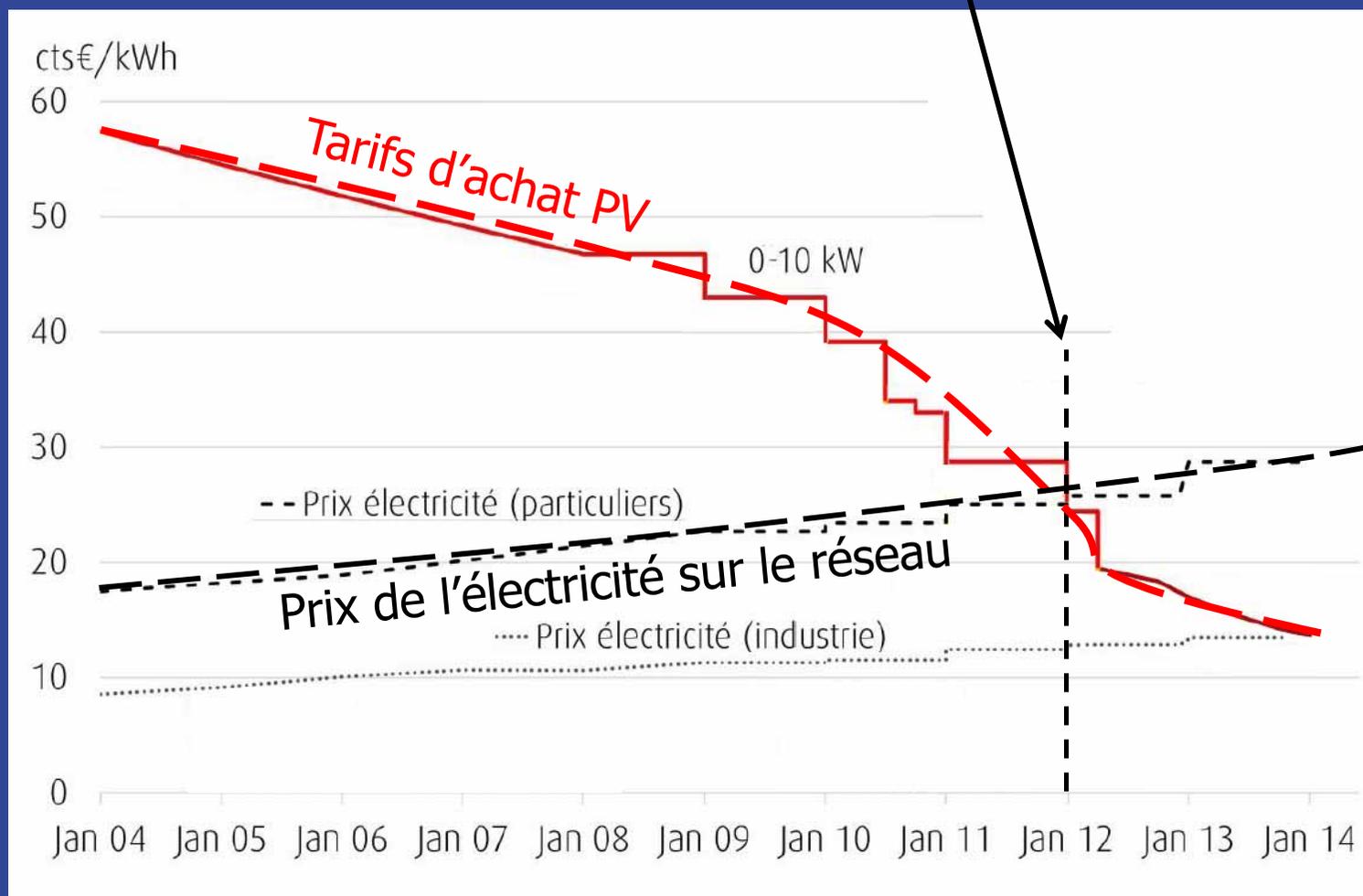


Source : Agora Energiewende, «Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2016 », jan. 2017

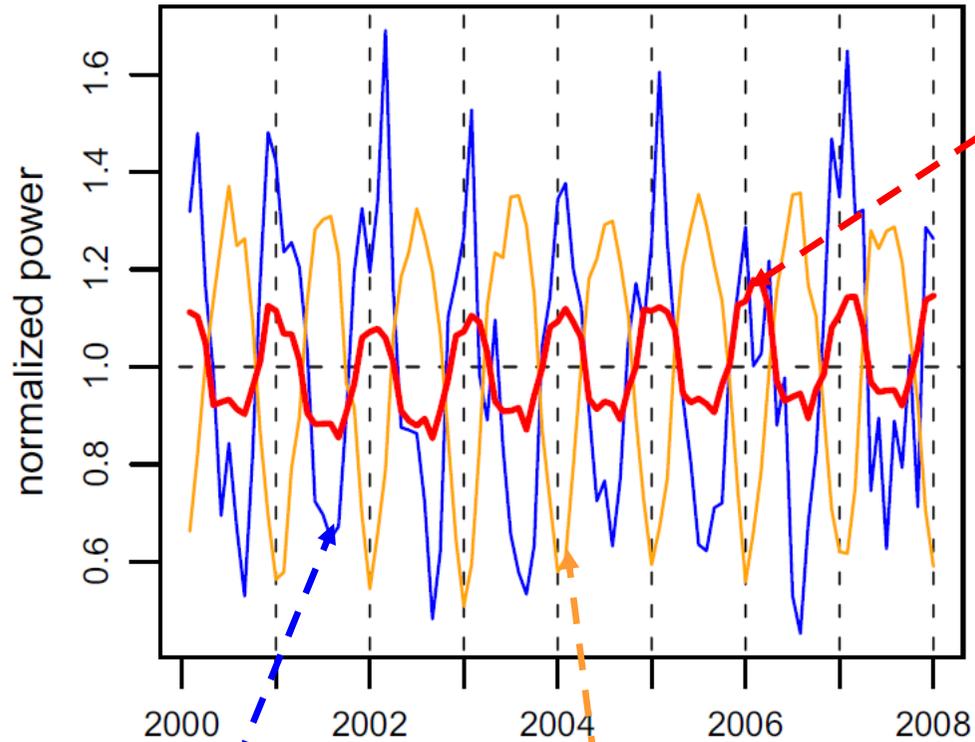
https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Jahresauswertung_2016/Agora_Jahresauswertung-2016_WEB.pdf

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

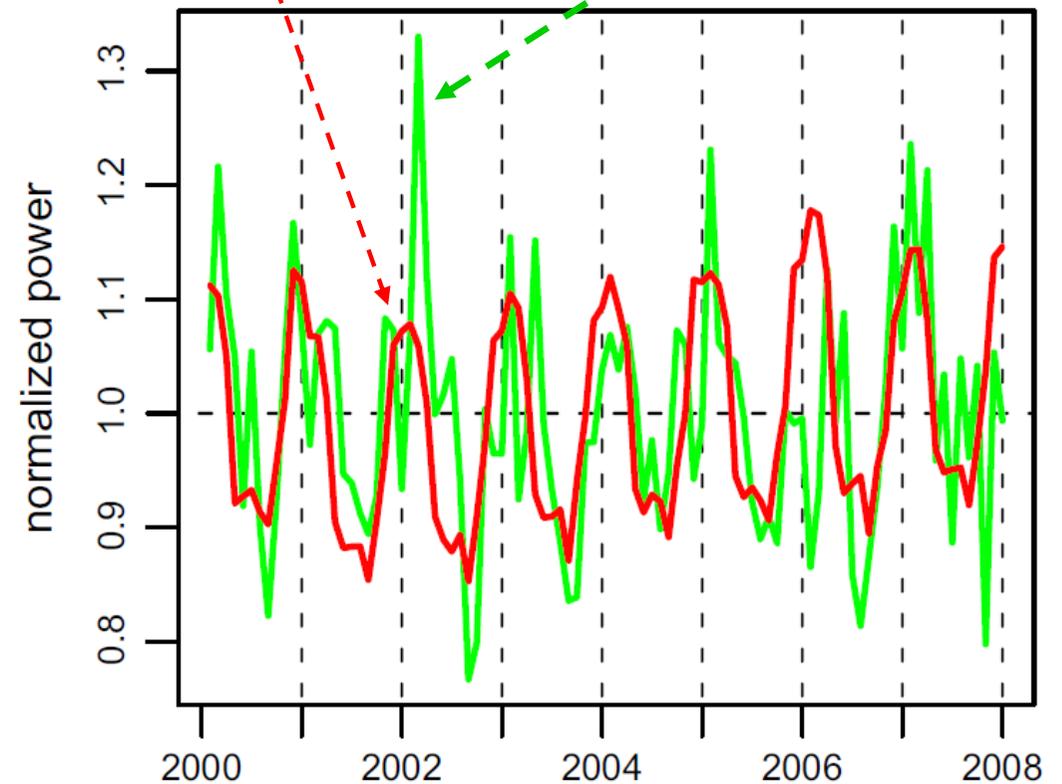


Productible éolien européen

Productible solaire européen

Consommation électrique européenne actuelle

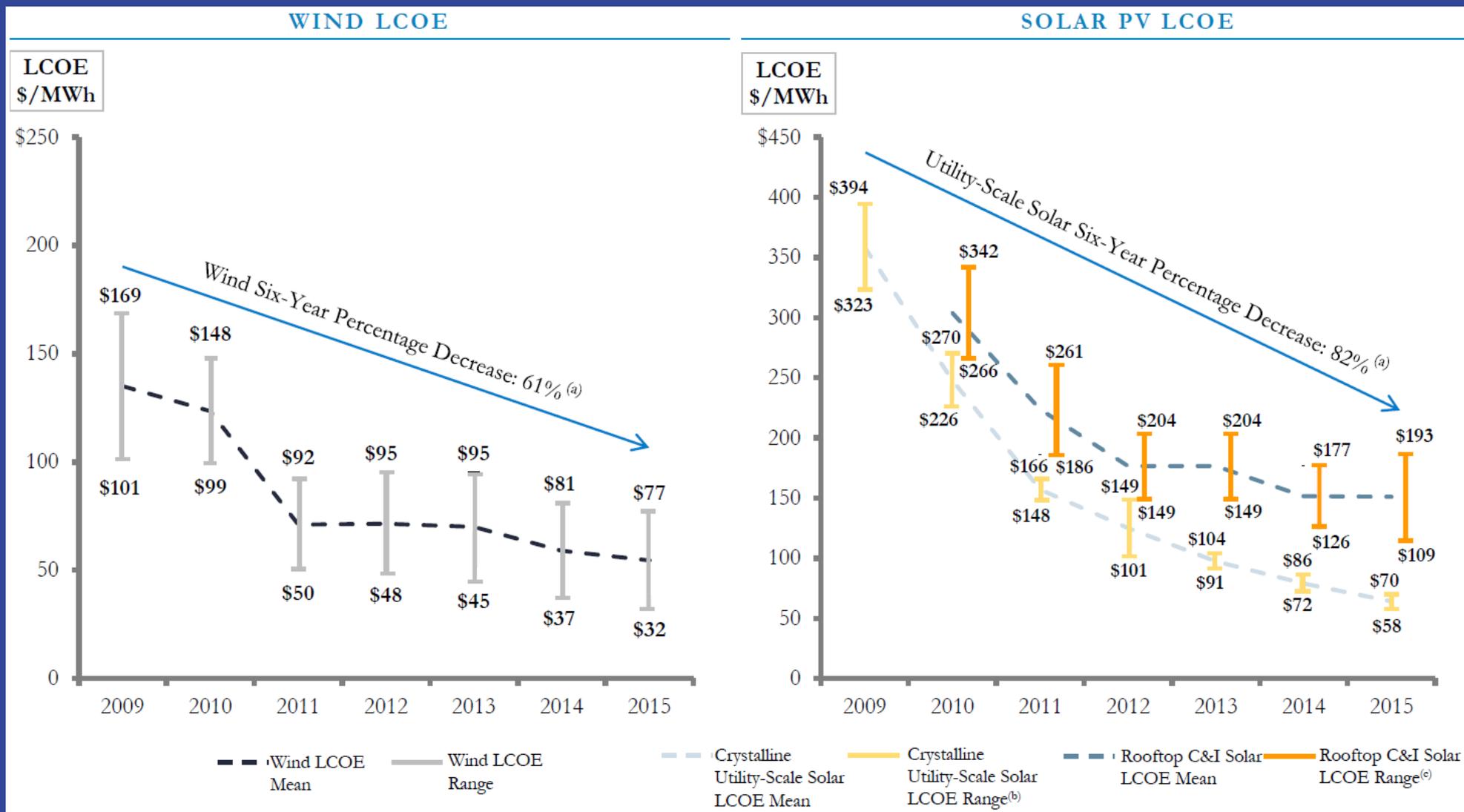
Mix éolien (60%) + solaire (40%)



Electricité : Baisse des coûts de production éolien et PV

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2015)

LCOE = Levelized Cost of Electricity

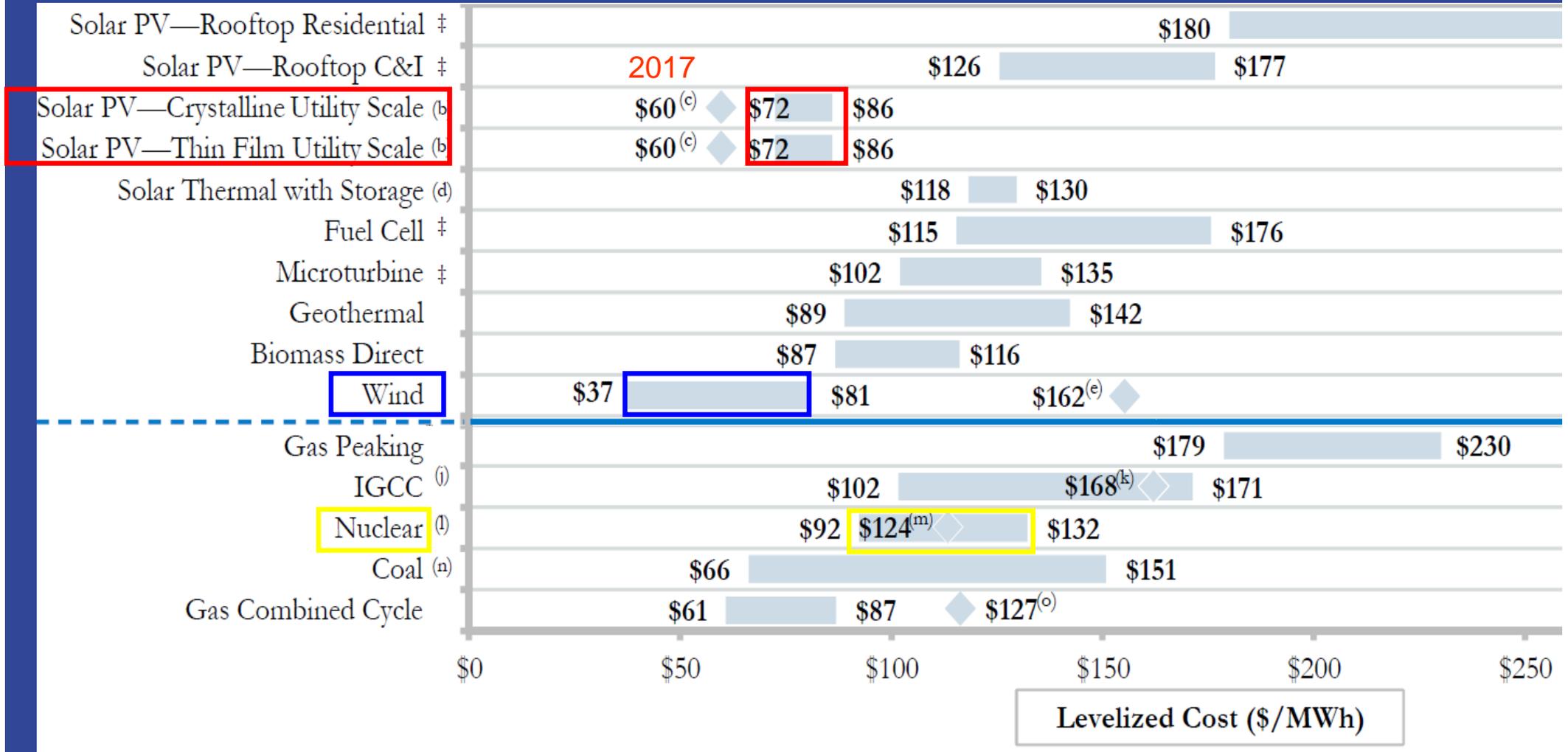


Source : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 9.0, nov. 2015. <https://www.lazard.com/media/2390/lazards-levelized-cost-of-energy-analysis-90.pdf>

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**



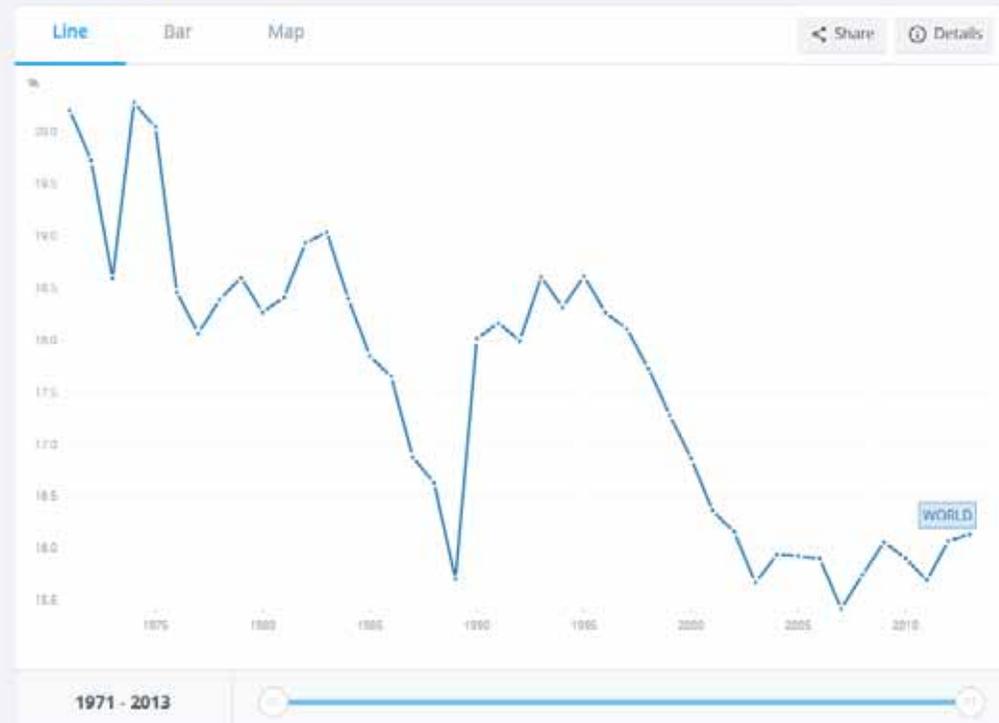
Source : World Bank

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