Rennes, 26 juin 2018

La place des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique du futur

Bernard MULTON
Laboratoire SATIE CNRS
Département de Mécatronique ENS Rennes

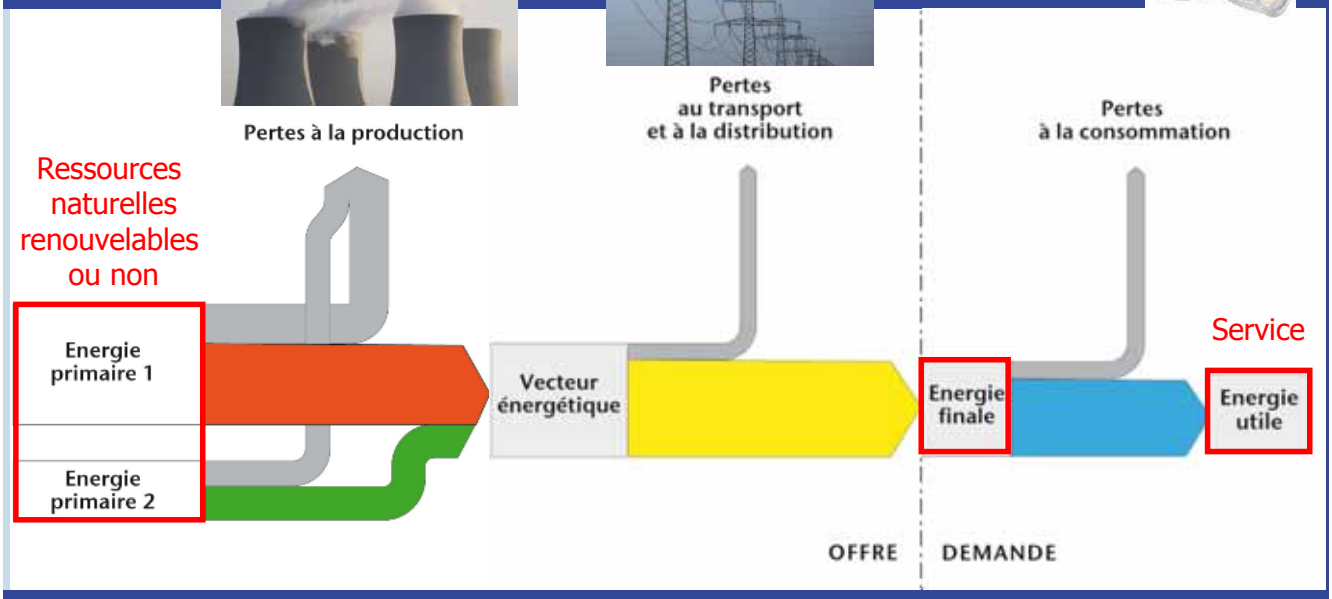
Quelques notions d'énergétique à l'échelle planétaire

Crédit : Fotolia
La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques

Notions d'énergétique

Energies primaire, finale et utile…

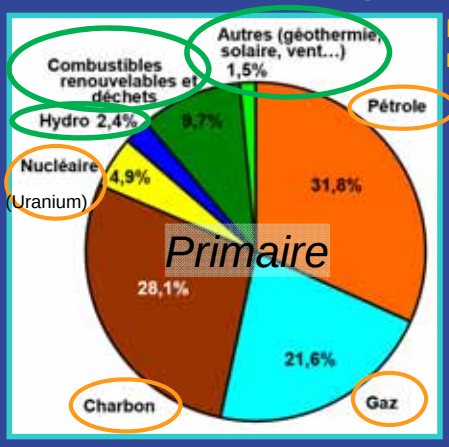
Exemple électrique



Source : négaWatt

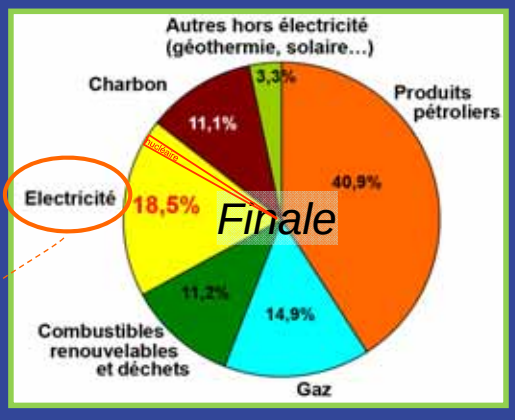
Notions d'énergétique

Bilan énergétique mondial 2015, place de l'électricité



Non renouvelables > 86%

+3%/an (moyenne 2005-2015)



Total ≅ 158 000 TWh$_p$

Total ≅ 109 000 TWh

+1,7%/an (moyenne 2005-2015)

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

> 60 000 TWh$_p$ (≅ 40%) prélevés pour : **24 400 TWh$_e$** d'électricité produite

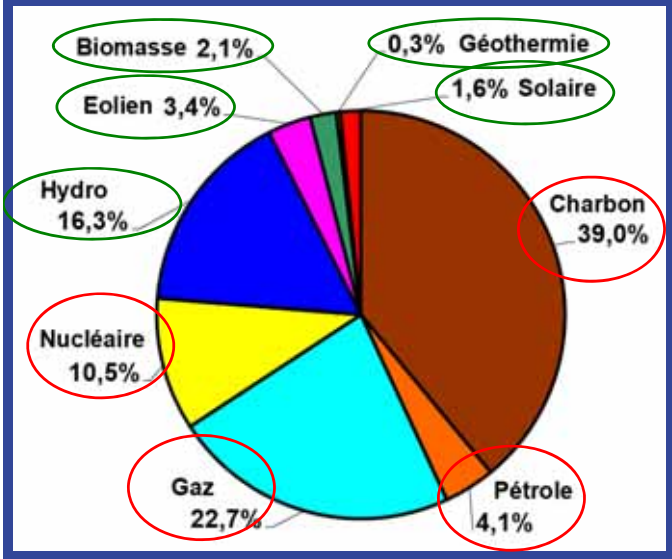
pour commercialiser : **20 100 TWh$_e$** d'électricité finale (livrée aux compteurs)

« Vraie » part du nucléaire : 4,9 % de l'énergie primaire

1,9 % de l'énergie finale car 10,5% de l'électricité est d'origine nucléaire (10,5% * 18,5%=1,9%)

Notions d'énergétique

La **production mondiale d'électricité** : les sources et les tendances
24 400 TWh en 2015

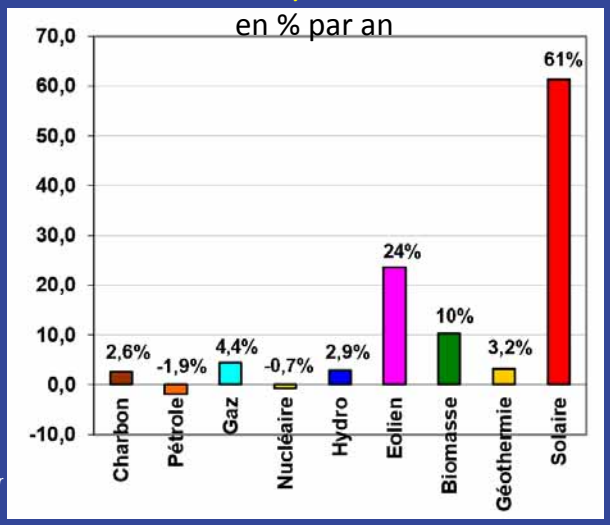


76,3% non renouvelables
+ 2,3% /an sur 10 ans

Source : données IEA, analyse auteur

23,7 % renouvelables : + 5,7% /an sur 10 ans

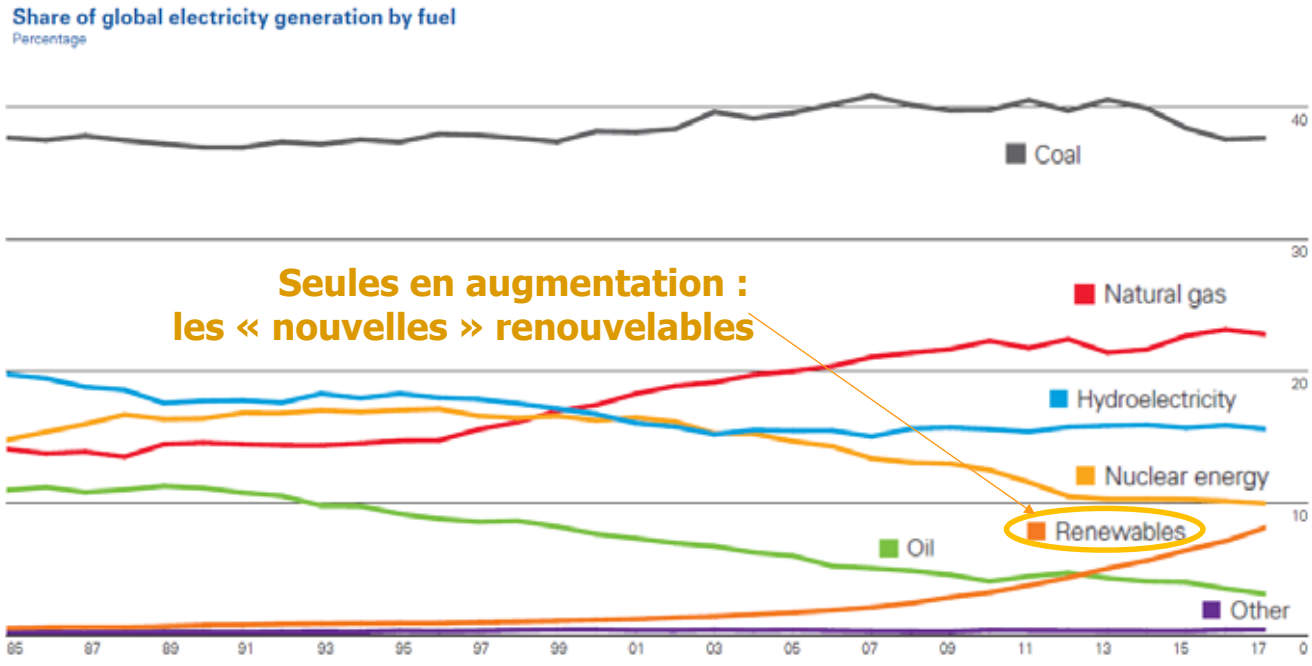
Evolution moyenne sur 10 ans
en % par an



En 2017 : 73,5% NR et 26,5% Ren.
Source : Renewables 2018 Global Status Report

Notions d'énergétique

Evolution de la part des sources primaires
dans la production d'électricité de 1985 à 2017



Source : BP Statistical Review 2018 (june 2018)

Notions d'énergétique

Ressources et réserves primaires de la planète Terre

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

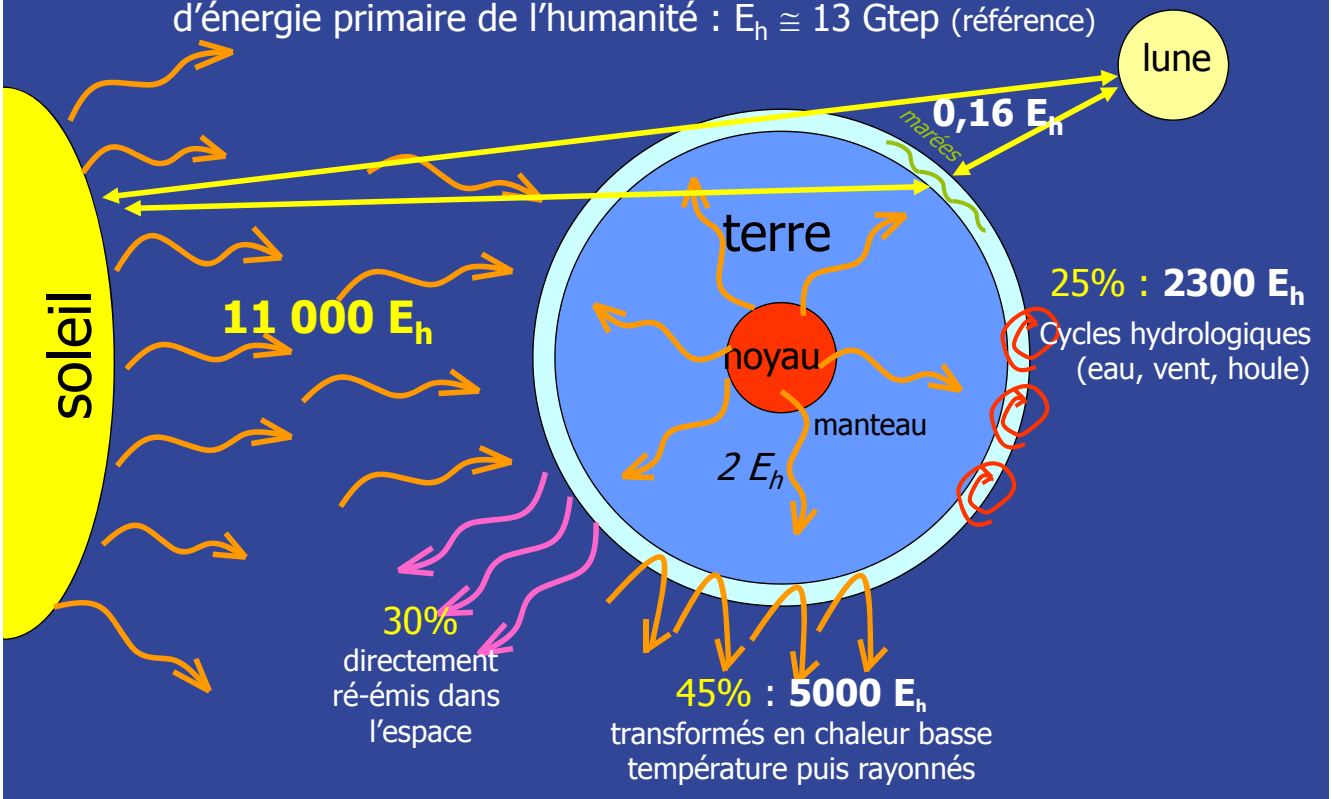
RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :

100 000 Gtep… par an !

près de 8000 fois la consommation d'énergie primaire

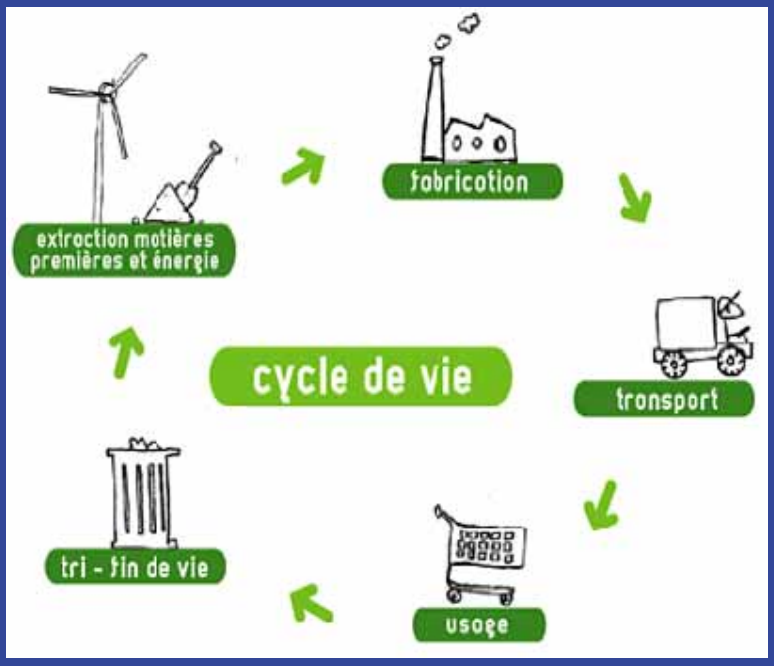
Notions d'énergétique

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



École normale supérieure de Rennes
Laboratoire SATIE - CNRS

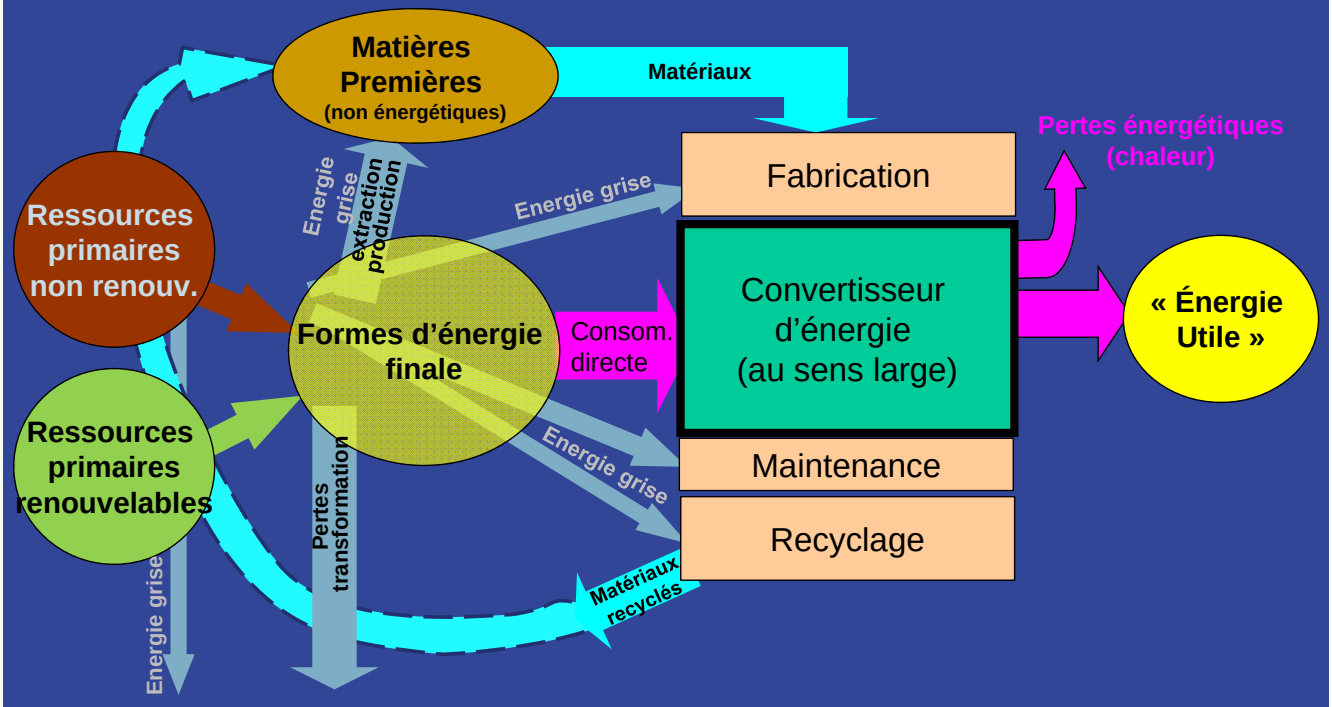
Considérations sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques



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**



Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Un critère habituellement utilisé dans le domaine de l'énergie :

L'EROEI (Energy Returned On Energy Invested)

$$EROEI = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie dépensée à l'investissement}}$$

« rentabilité » si EROEI > 1

Attention, l'EROEI **ne prend pas en compte** les ressources consommées durant toute la vie et leur nature non renouvelable

Ainsi l'EROEI de la production d'électricité au pétrole peut être supérieur à celui de l'éolien ou du PV !

Nécessité de comptabiliser la part non renouvelable consommée sur la vie :

$$EROEI_{sust} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie non renouvel. dépensée sur la vie}}$$

soutenabilité si $EROEI_{sust} > 1$

Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Comparaison de deux modes de génération d'électricité bas carbone

Réacteur nucléaire

Productivité : 1 GW x 7000 h = 7 TWh x 40 ans = **280 TWh_e**

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

$$EROEI = \frac{280}{15{,}4} = 18$$

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie :
avec un rendement de production électrique de 33% :

E_{pNR} = 3 x 280 + 15,4 ≈ 855 TWh_p

$$EROEI_{sust} = \frac{280}{855} = 0{,}33 < 1$$

+ des déchets à longue durée de vie
+ beaucoup de matière non recyclable...

Source : Energy Analysis of Power Systems, feb. 2015, World Nuclear Association http://world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Energy-Analysis-of-Power-Systems/

Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Photovoltaïque en toiture

Pour produire 7 TWh_e /an avec un rayonnement
de 1000 $kWh_p/m^2/an$ (1000 h @ 1 kW/m^2)

Avec technologie silicium polycristallin (rendement 16% et PR = 0,75)
Puissance nominale : 9,3 GW_c (7 TWh_e / (1000 h x 0,75))
soit **58 km²** (9,3 GW_c / (1000 W/m^2) / 0,16)
(en France : 8500 km^2 de superficie bâtie)

Fabrication des modules + montage en toiture + onduleur
fourchette de données (voir source) : 280 à 730 $kWh_p/(m^2$ PV)

Énergie grise : 16 à 42 TWh_p

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie :
sur 40 ans (1 renouvellement au bout de 20 ans) $\mathbf{E_{pNR} \approx}$ 2 x (16 à 42) = **32 à 84 TWh_p**

Production d'énergie sur 40 ans : $\mathbf{E_u \approx}$ 2 x 20 x 7 = **280 TWh_e**

$$EROEI = EROEI_{sust} = \frac{280}{32 \text{ à } 84} = 3{,}3 \text{ à } 8{,}7 > 1$$

(en réalité, énergie grise en baisse)
+ matériaux recyclables
et beaucoup moins de déchets toxiques

Source : Koppelaar Imperial College
Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 72, May 2017

Accroitre la part des sources renouvelables variables dans le système électrique

Electricité renouvelable variable

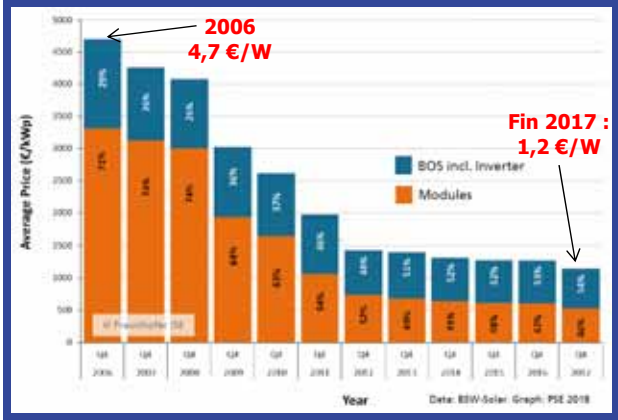
Photovoltaïque : l'effondrement des prix

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, feb. 2018

Prix actuels constatés des installations PV en France :

environ 2 à 3 €/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 :

< 6 c€/kWh dans les grandes fermes

18,5 c€/kWh toitures sans intégration au bâti et < 3 kW

Pour tout renseignement sur le PV :

Association **HESPUL** : http://www.photovoltaique.info/

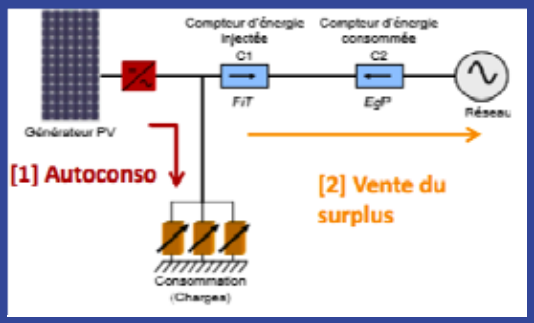
Electricité renouvelable variable

Photovoltaïque : comment agir au niveau local

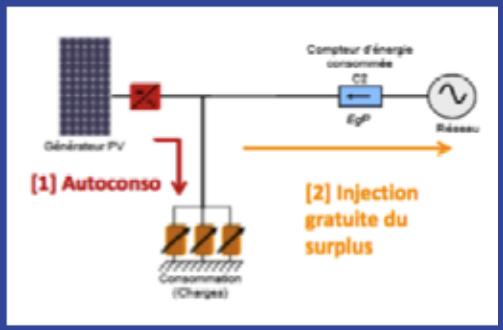
A titre individuel : installer du PV sur la toiture de son habitat

Encore plus responsable que la revente totale : l'autoconsommation

avec revente des surplus



ou sans revente



Source : Thèse Yann Riffonneau
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00458260/

Possibilités de participer financièrement à des projets citoyens :

banques d'investissement telles qu'**Energie Partagée Investissement**

Acheter son électricité à un fournisseur

de **nouvelles** sources renouvelables et coopératif tel qu'**Enerccop**

École normale supérieure de Rennes

Laboratoire SATIE - CNRS

Electricité renouvelable variable

Optimisation de la complémentarité éolienne et solaire

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

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

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

En affinant le pilotage des charges flexibles : eau chaude, batteries VE… et en favorisant l'autoconsommation PV

En produisant des combustibles (méthane de synthèse, hydrogène)

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

Potentiel du photovoltaique en France ?

Quelles superficies pour satisfaire la moitié des besoins électriques actuels via le photovoltaïque ?

La moitié de **480 TWh** (consommation annuelle 2017)

Rayonnement solaire horizontal moyen en métropole : **1200 kWh/m²**

Avec **PR = 0,75** (PR = performance ratio) et
une technologie au silicium polycristallin **180 W/m²**,
=> une productivité annuelle de **160 $kWh_e/m^2/an$**

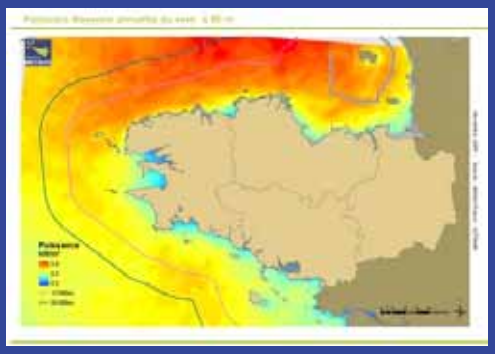
240 TWh nécessitent **210 km²** de superficie,
soit **0,6% des superficies déjà artificialisées !**

Situation électrique de la Bretagne

Production électrique :	2010 :	2017	2030 ?
éolienne	1 TWh	1,7 TWh	10 TWh
marémotrice	0,5 TWh	0,53 TWh	0,6 TWh
hydraulique	0,06 TWh	0,07 TWh	0,07 TWh
solaire	0,025 TWh	0,21 TWh	4 TWh
biomasse	0,003 TWh	0,29 TWh	2 TWh
TOTAL	**1,6 TWh**	**2,8 TWh**	**17,7 TWh**
(7,6% de la conso 21 TWh)		(13,3%)	(84%)

Eolien : +15%/an et PV : +25%/an
(parc de St Brieuc : 1,82 TWh)

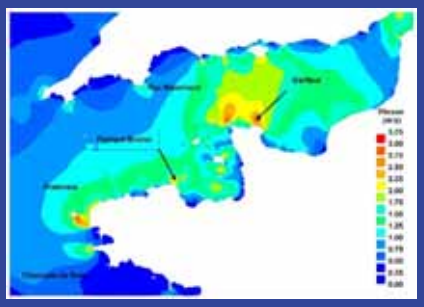
Ressources éoliennes offshore :



Stockage d'énergie :

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

Ressources courants de marée :



Conclusion

L'énergie électrique vecteur d'un développement soutenable

Dans le monde entier, un mouvement de fond de déploiement des sources électriques renouvelables variables

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

Permettant même de satisfaire de nouveaux usages : transports

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

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

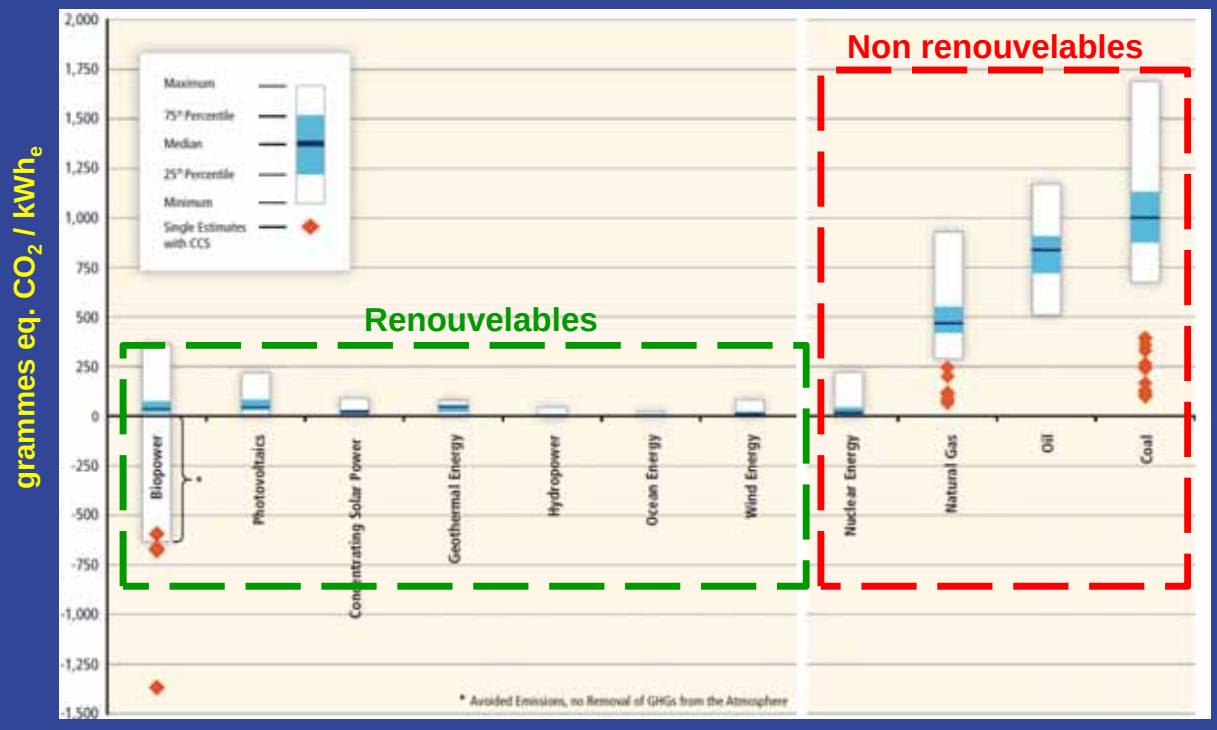
* Voir le dernier scénario négaWatt sur le site de l'association

Citoyens, prenez en main votre avenir énergétique !

Source : énergie partagée,
https://energie-partagee.org/les-projets/monter-un-projet/soumettre-un-projet/

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

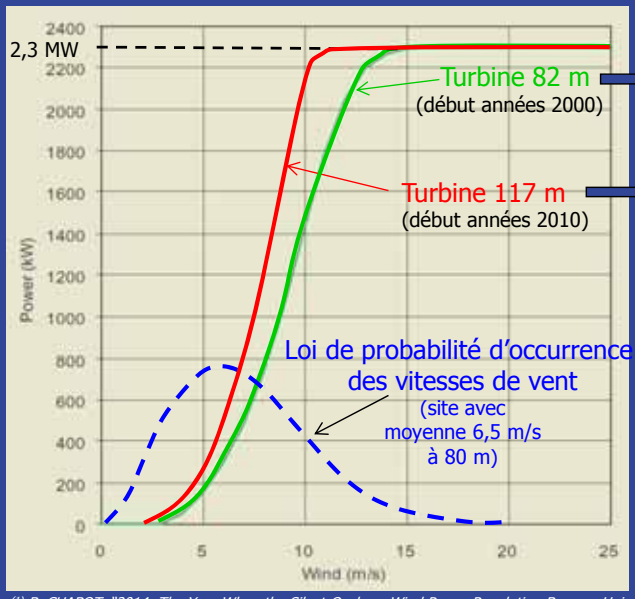
Production d'électricité soutenable

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

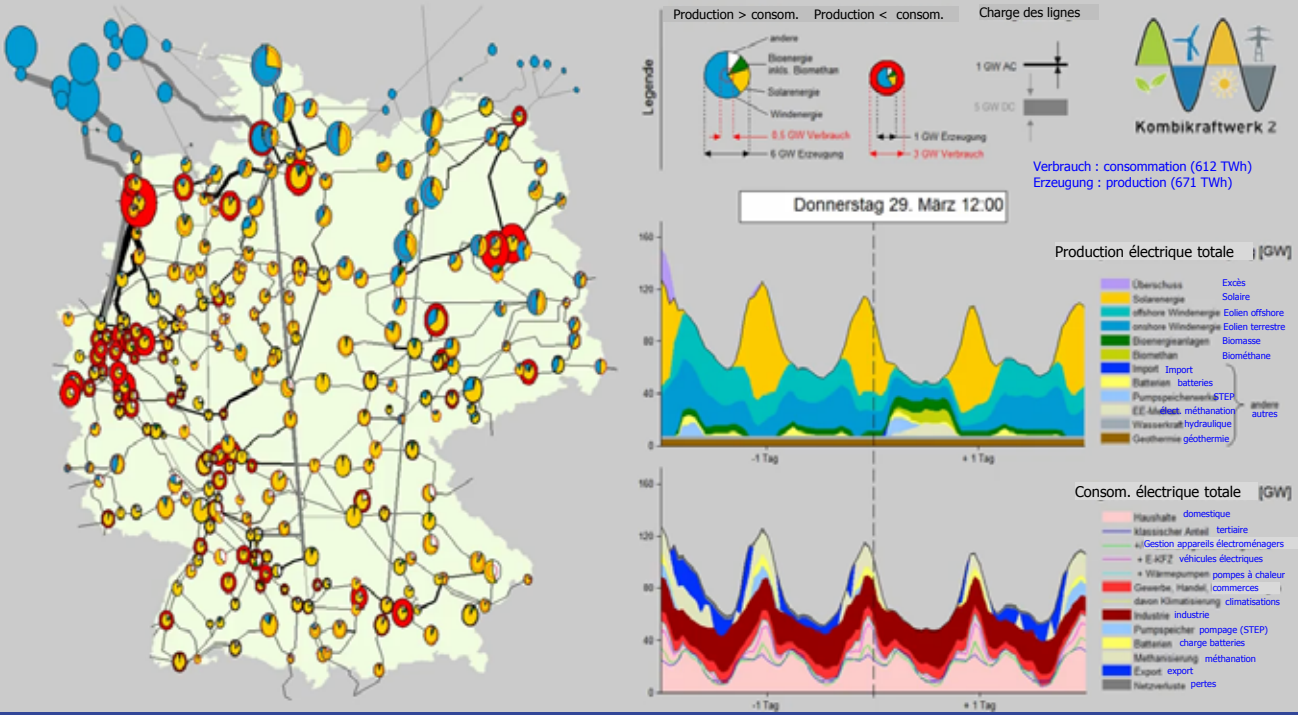
(derniers tarifs d'achat France :
8,2 c€/kWh_e durant 10 ans,
puis 2,8 à 8,2 durant 5 ans selon les sites)

[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

Exemple allemand, le projet Kombikraftwerk

Simulation à l'échelle de toute l'Allemagne, sur une année complète

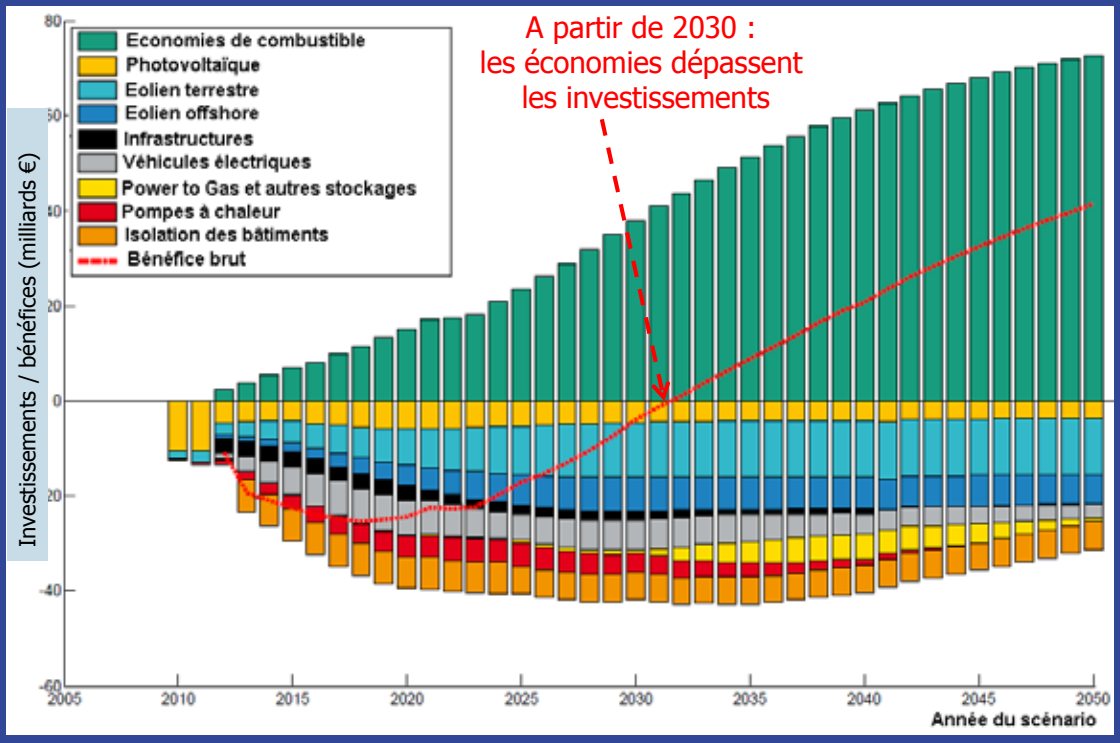
Production, consommation, transport à partir d'une énergie électrique 100% renouvelable



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

Transition énergétique en Allemagne

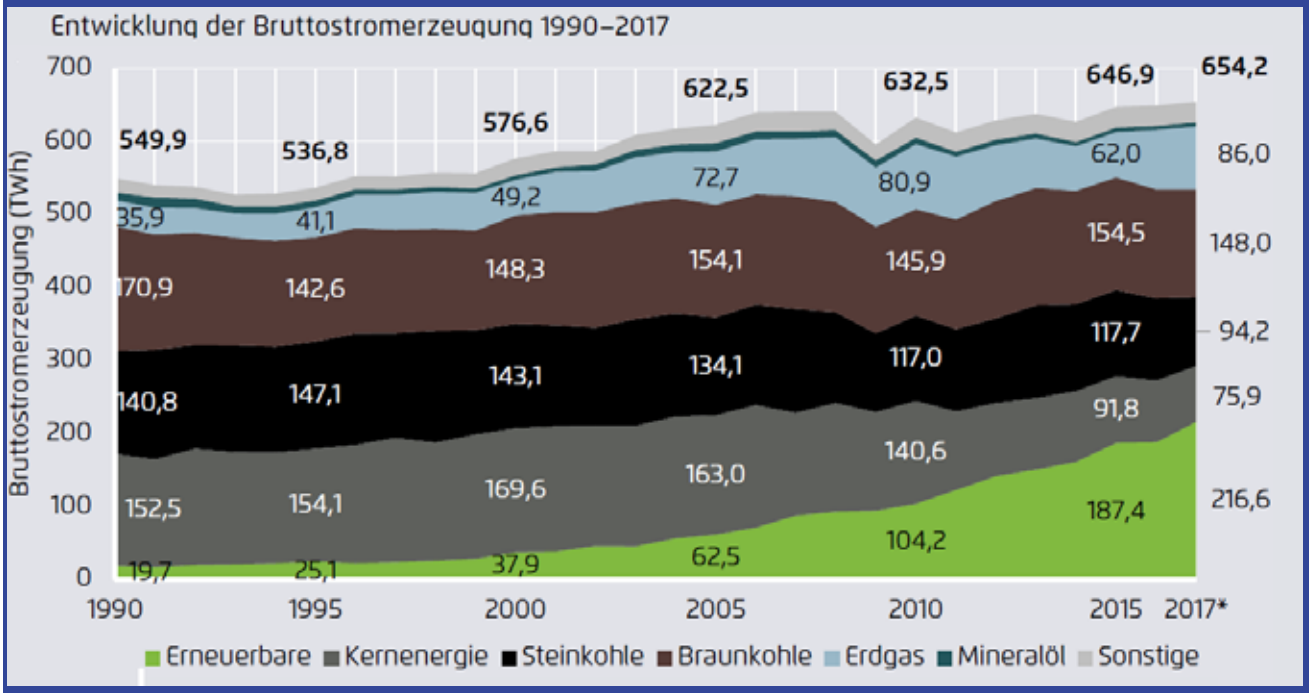
Scénario économique



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 – 2017 (consommation : - 2,4%)

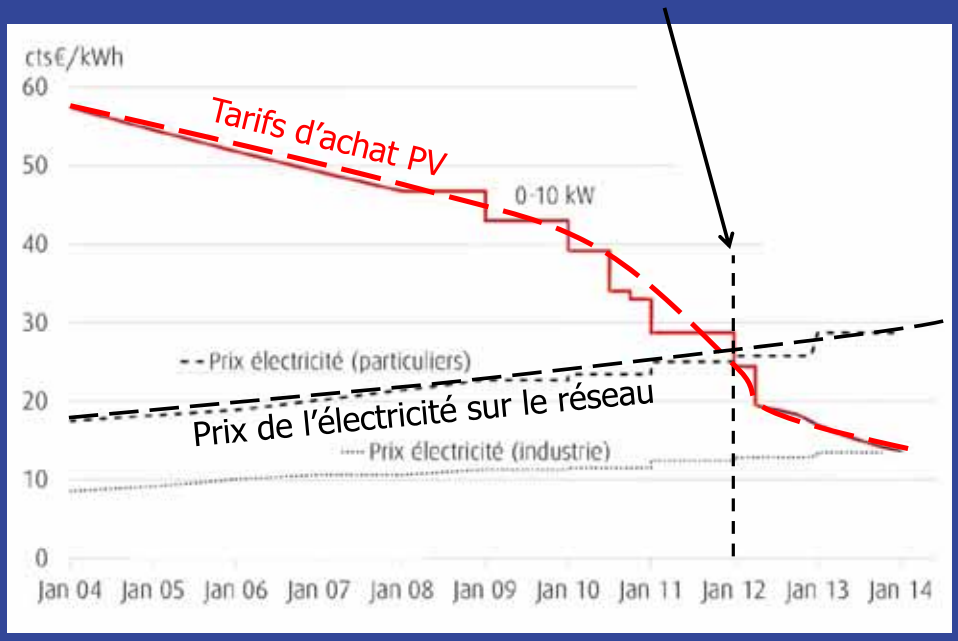


Source : Agora Energiewende, «Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017 », jan. 2018
https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung_2017/Agora_Jahresauswertung-2017.pdf

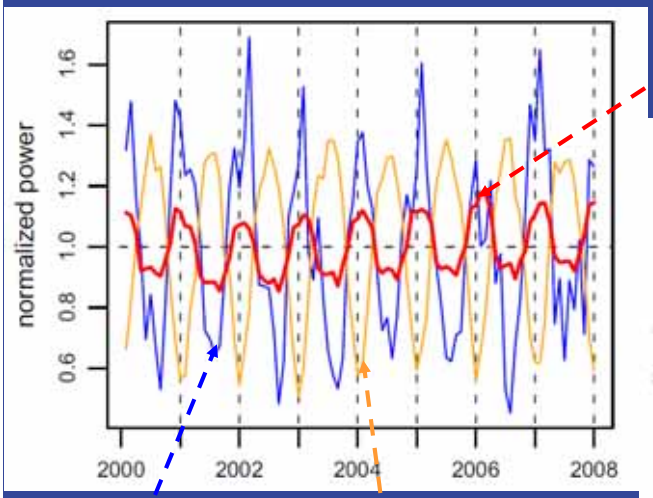
Production d'électricité soutenable

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

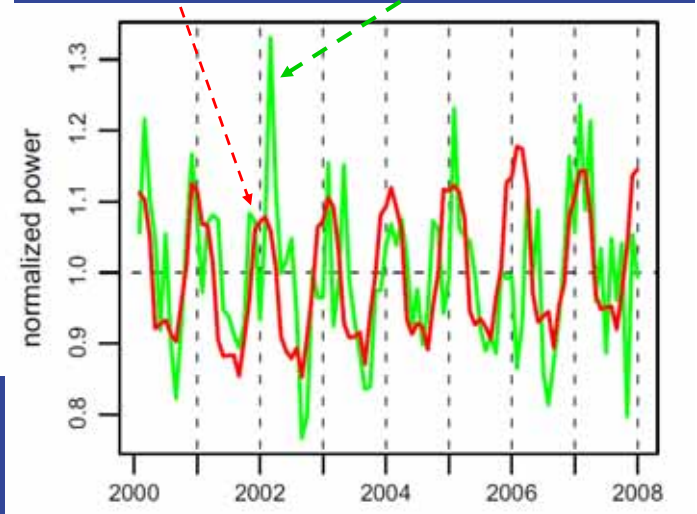


Productible éolien européen

Productible solaire européen

Consommation électrique européenne actuelle

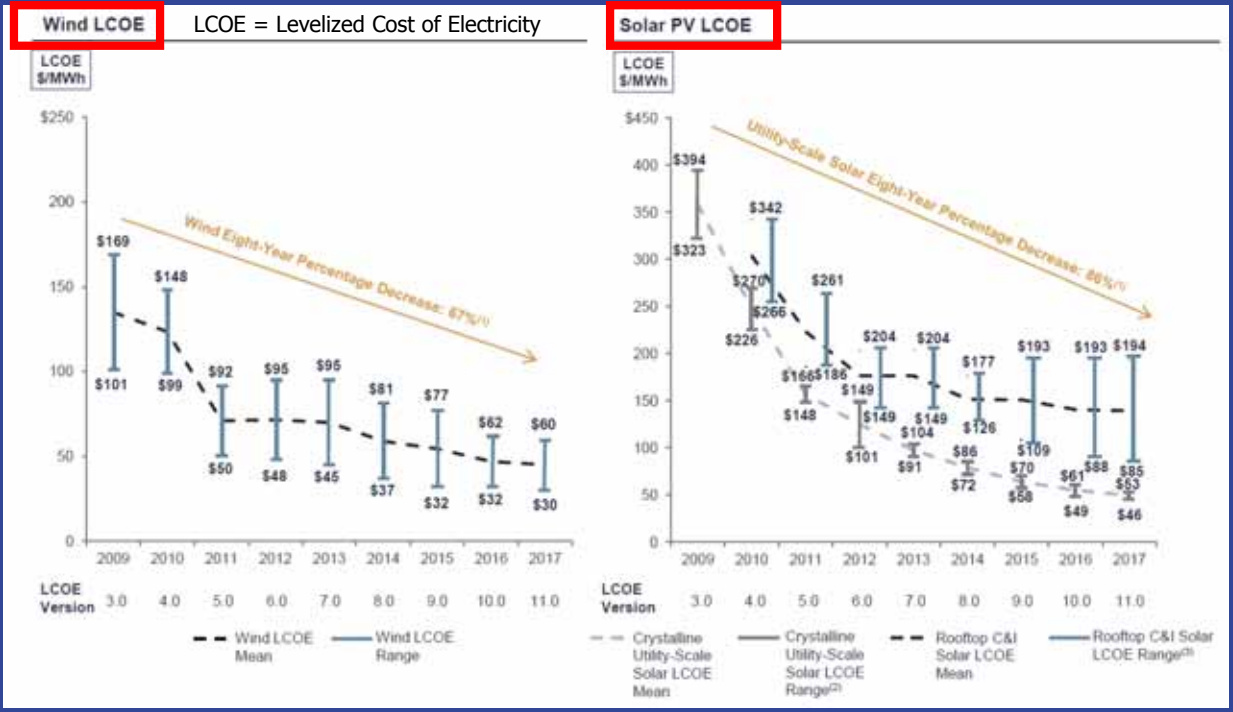
Mix éolien (60%) + solaire (40%)



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

Et, pour l'éolien et le PV, des baisses de coût extrêmement rapides

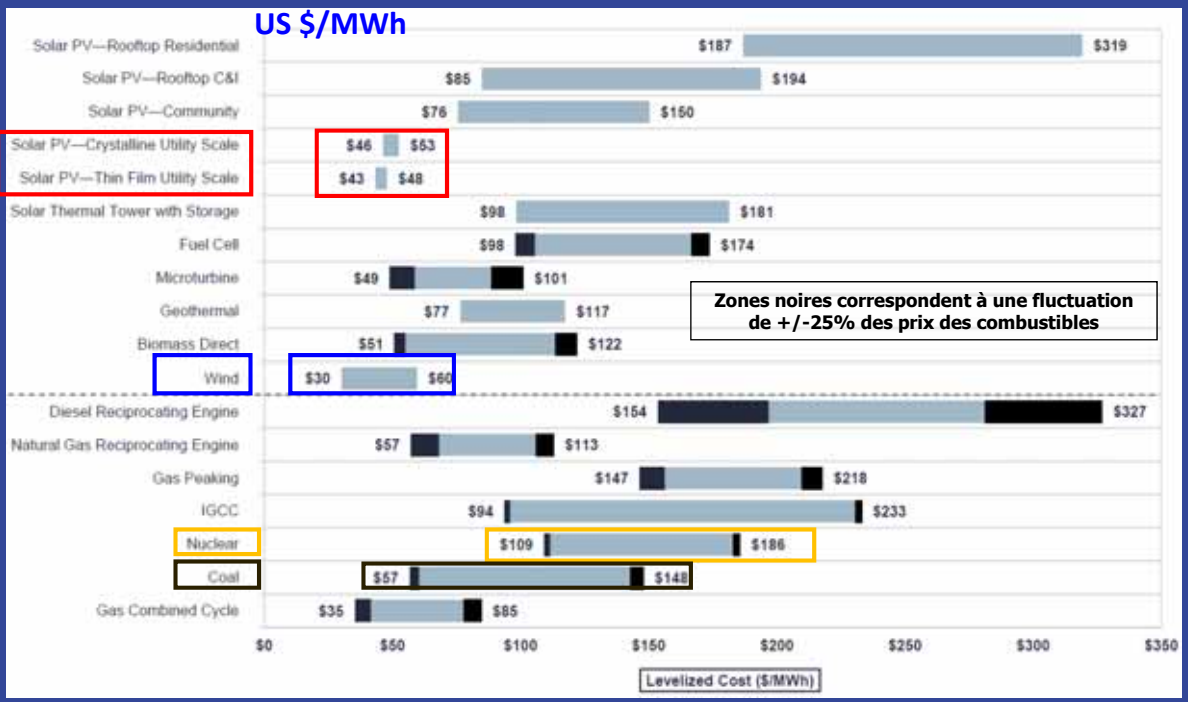
Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2017)



Source : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 11.0 nov. 2017 https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf

Electricité photovoltaïque et éolienne, désormais compétitive

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2017) LCOE = Levelized Cost of Electricity



Source : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 11.0 nov. 2017 https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf