

Décarboner l'économie ? Oui, mais pas si simple !

Gérard Bonhomme

Professeur émérite à l'Université de Lorraine

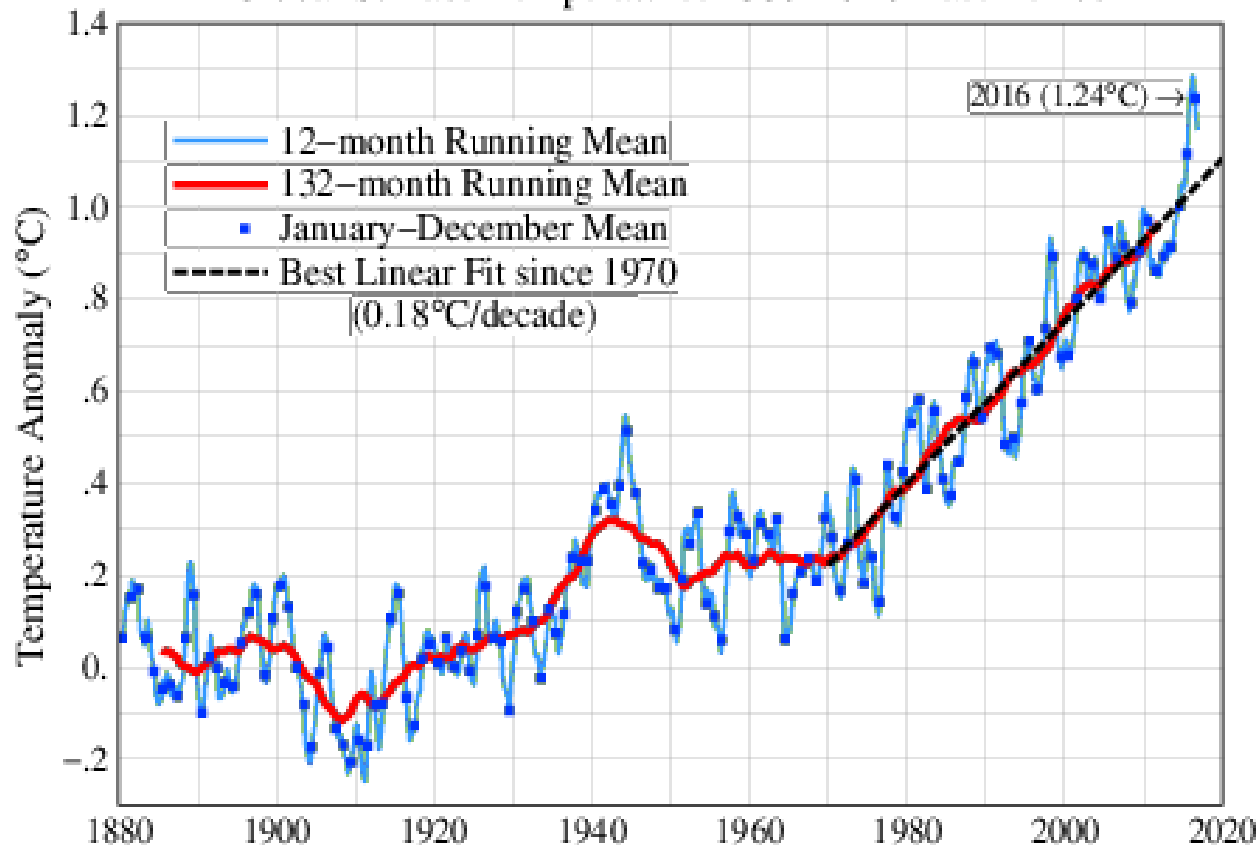
Président de la Commission Énergie/Environnement de la Société Française de
Physique

gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr

Le risque climatique

Le réchauffement climatique est une réalité. La courbe de la température moyenne à la surface du globe est éloquente. Elle est corroborée par la montée du niveau des mers due à la dilatation thermique des océans et à la fonte des glaciers.

Global Surface Temperature: 1880–1920 Base Period



source NASA,
Université
Columbia de
New-York

Réduction des émissions de gaz à effet de serre : quels objectifs ?

- Loi de transition énergétique Française de 2015 :
 - ✓ Baisse des émissions de CO₂ de 40% d'ici 2030
 - ✓ Consommation énergétique finale des énergies fossiles: baisse de 30 % en 2030 par rapport à 2012
- Roadmap 2050 de l'UE publiée en 2011 :
 - ✓ Réduction de 40-50 % des émissions totales en Europe (~ 11% des émissions mondiales) d'ici 2050 (...ce qui correspond à une réduction ~ 4-5 % du total mondial)
 - ✓ Réduction (par rapport à 1990) d'~ 60% d'ici 2030 et ~ 95% d'ici 2050 de la part des fossiles dans la production d'électricité (actuellement ~ 50% en Europe pour 5-8% en France)
- COP21 :
 - ✓ Objectif d'une limitation du réchauffement mondial entre 1,5 °C et 2 °C d'ici 2100 (→ comment ??)

Les objectifs de la Loi Française de 2015 sur la Transition énergétique

- Gaz à effets de serre: baisse de 40 % entre 1990 et 2030 (-67 Mt de 1990 à 2012 et -155 Mt de 2012 à 2030)
- Réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012 en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030
- Consommation énergétique finale des énergies fossiles: baisse de 30 % en 2030 par rapport à 2012 (Baisse de 3,5% de 1990 à 2013)
- énergies renouvelables: 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030 (de 7 à 13% de 1990 à 2013)
- Porter la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025

Les objectifs de la Loi Française de 2015 sur la Transition énergétique

- Atteindre un niveau de performance énergétique conforme aux normes « bâtiment basse consommation » pour l'ensemble du parc de logements à 2050 ; **Rénover 500 000 logements par an: objectif de 150 kWh/m²/an en 2030**
- Lutter contre la précarité énergétique ;
- Affirmer un droit à l'accès de tous à l'énergie sans coût excessif au regard des ressources des ménages ;
- Réduire de 50 % la quantité de déchets mis en décharge à l'horizon 2025 et **découpler progressivement la croissance économique et la consommation de matières premières** → Croissance verte (PIB : + 0,8% en 2020 et +1,5% e 2030)

COP23 à Bonn: Où en sommes-nous en Allemagne?

DIE ZEIT No 45

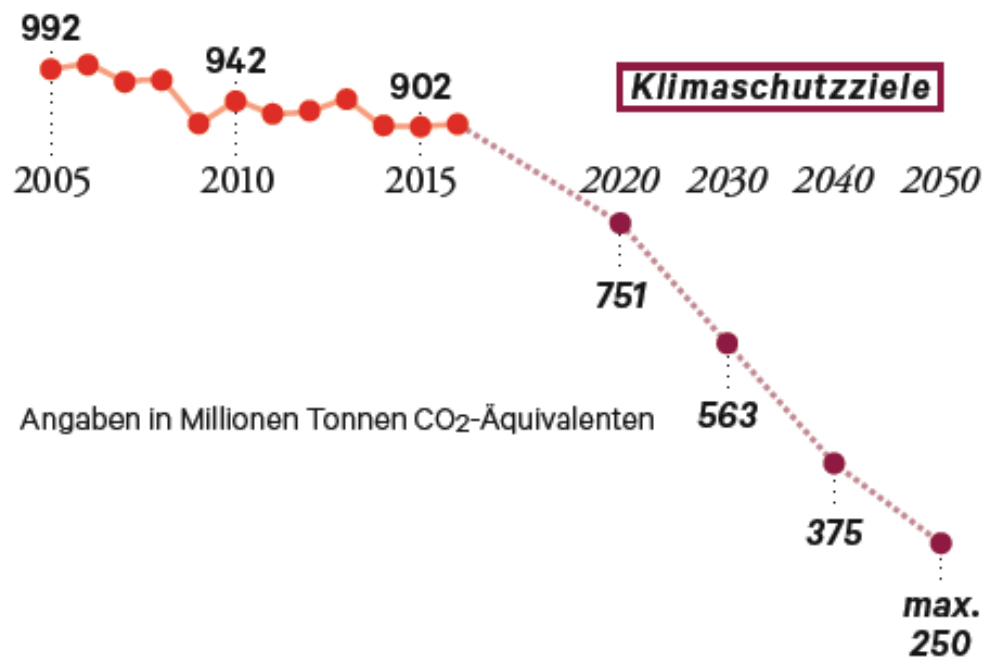
DOSSIER

2. November 2017

Das Naturschauspiel

So wird das nichts

Entwicklung der deutschen Treibhausgas-Emissionen während der Amtszeit von Angela Merkel



ZEIT-GRAFIK/Quelle: Umweltbundesamt; 2016 geschätzt; Stand 3/2017

Petit florilège ...

« Nucléaire : EDF renonce à être compétitif face aux énergies vertes », Le Monde (sept. 2017)

« En 2016, une électricité 100 % verte pour éclairer les rues de Paris », Le Monde (nov. 2015)

« En France, 100 % d'électricité renouvelable n'est pas plus coûteux que le nucléaire », Le Monde (avril 2015) et cf. rapport ADEME →

« Energie : le rapport caché sur une France 100% renouvelable », Mediapart (<https://www.mediapart.fr/journal/france/080415/energie-le-rapport-cache-sur-une-france-100-renouvelable>)

« La décentralisation est la clé pour révolutionner le système énergétique français », Le Monde (mai 2017) et cf. ekWateur

« 80% de renouvelables ne poseront aucun problème au réseau électrique allemand » Usine Nouvelle (Tribune énergie, juin 2016)

« Le 100% Renouvelable est possible pour la région PACA dès 2030 selon ENGIE. Et cela coutera 20% moins cher », Usine Nouvelle (déc. 2016)

« Le solaire contre la décroissance », Les Echos (oct. 2016)

« Data : l'énergie solaire est aussi performante que le pétrole ou le gaz », l'Obs (déc. 2016) et cf. R. Koppelaar, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.090>)

Est-ce en accord avec les lois de la nature ?

« **Ensemble, construire l'autosuffisance alimentaire de nos villes!**

La ville de demain sera autosuffisante sur le plan énergétique ! Elle le sera également sur le plan alimentaire ! »

Où comment de gentils militants de l'écologie semblent totalement ignorer les lois fondamentales de la nature (....et de l'arithmétique) !

NOS CAMPUS |

Conférence UTL / IEE : Ensemble, construire l'autosuffisance alimentaire de nos villes !

J'aime 22

Tweet

Partage



DATE(S):

Mardi 7 novembre 2017 -
18:00 - 20:00

LIEU(X):

Mairie de Metz
1 Place d'Armes Grand Salon
de la Mairie
57000 Metz -France

Focus « Transition écologique » :

Conférence Inaugurale à Metz

Mardi 07/11/2017 – 18 h00 – 20h00

LIEU : Metz - Grand Salon de la Mairie

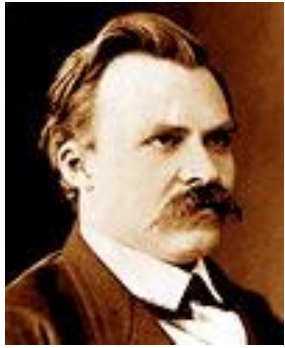
Ensemble, construire l'autosuffisance alimentaire de nos villes !

La ville de demain sera autosuffisante sur le plan énergétique ! Elle le sera également sur le plan alimentaire ! Produire une nourriture saine, de qualité, régénérative au cœur de nos espaces de vie moderne, est-ce possible ? Cette conférence montre comment, de l'agriculture urbaine participative à l'autosuffisance alimentaire, il est possible d'engager la transition alimentaire de nos villes et de nos territoires.

Conférencier : Jean-Michel Herbillon

Partenaires :

Institut Européen d'Écologie : conférences (cf programme) :



„Überzeugungen sind gefährlichere Feinde der Wahrheit als Lügen.“

Friedrich Nietzsche (Werk: Menschliches, Allzumenschliches I)

« Les convictions sont de plus dangereux ennemis de la vérité que les mensonges »

...Un scoop !

Nicolas Hulot reporte l'objectif de baisse du nucléaire de 50 % prévu pour 2025 :

La réduction de la part du nucléaire en France va prendre plus de temps que prévu. Alors que la loi de 2015 sur la transition énergétique prévoit de ramener de 75 % à 50 % d'ici à 2025 la part de l'atome dans la production d'électricité française, le ministre de la transition écologique, Nicolas Hulot, a affirmé mardi 7 novembre qu'il sera « *difficile* » d'atteindre un tel objectif. « *Sauf à relancer la production d'électricité à base d'énergies fossiles* », a-t-il prévenu à l'issue du conseil des ministres.

En savoir plus sur

http://www.lemonde.fr/energies/article/2017/11/07/nicolas-hulot-reporte-l-objectif-de-baisse-du-nucleaire-de-50-d-ici-a-2025_5211451_1653054.html#12k1KqOtet4W8zy.99

Deux illusions à dissiper

- 1^{ère} illusion : découplage possible entre PIB et consommation d'énergie et de ressources
- 2^{ème} illusion : la panacée existe: il suffit de développer les énergies dites renouvelables !

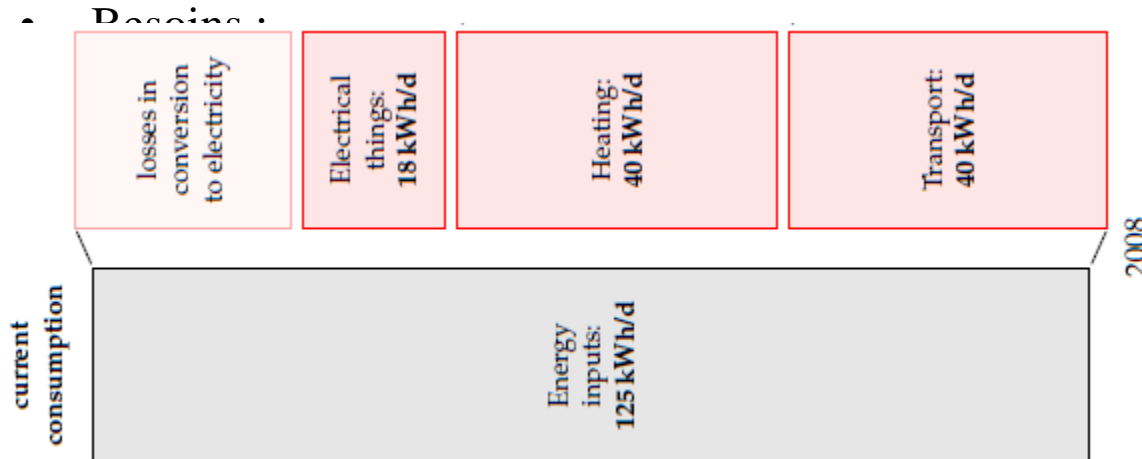
Rappel de quelques données de base sur l'énergie

Énergie et puissance: quelques chiffres utiles

- Le joule (J) et le watt (W), (un joule par seconde (J/s)), sont respectivement les unités internationales d'énergie et de puissance.
Ces unités sont beaucoup trop petites à l'échelle humaine → on leur préfère :
Energie → **1 kWh** = 3.6 million joules (**3.6 MJ = 3.6×10^6 J, 10 000 PJ ~ 2800 TWh**)
Puissance → **1 kWh/j** (1 kWh par jour) ~ **40 W**, avec 1 kW ~ 24 kWh/j
- Relations utiles:
 - 1 baril de pétrole (159 l, ~ 0.136 tonne) → 1632 kWh, **1 litre de pétrole** → **~11 kWh**
 - 1 tep (ou tonne oil equivalent, **1 toe**) → ~ 42 GJ ~ **11.63 MWh** ~ 7.4 boe
 - 1 TW (terawatt) = 10^3 GW (gigawatt) = 10^6 MW (megawatt)
= 10^9 kW (kilowatt) = 10^{12} W

1 l de pétrole = 10 m³ d'eau élevés de ~ 400 m

!



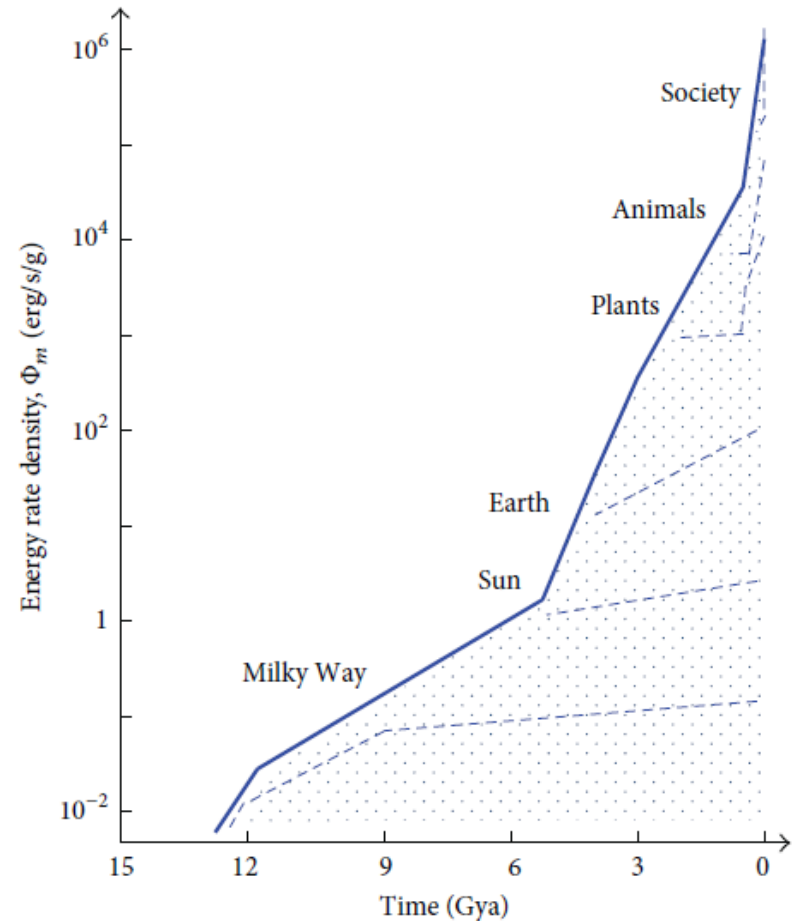
Consommation actuelle par personne in "cartoon Britain 2008". [From MacKay, <http://www.withouthotair.com/>, UIT Cambridge, 2008]

Dissipation d'énergie vs. complexité

La densité d'énergie dissipée par unité de masse comme mesure de l'évolution de la complexité dans notre univers. Les ruptures de pente correspondent à des phénomènes d'émergence de nouvelles structures complexes :

- Métabolisme humain: 2W/kg
(~ 3kWh/j/pers → 130W in et 35W out méca)
- Société agricole: 12kWh/j/pers
- Société industrielle: 150kwh//pers

Note: 1 erg/s/g = 10^{-4} W/kg, 1l pétrole ~ 12kWh, 1kg bois ~ 3kWh



Eric J. Chaisson, *The Scientific World Journal*

Volume 2014, Article ID 384912, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/384912>

Évolution et maximisation du flux d'énergie

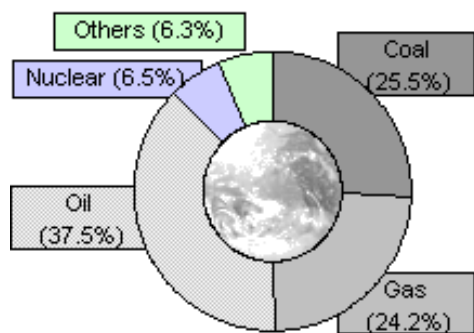
- Lotka (1922) : « Les espèces qui utilisent des fractions du flux d'énergie disponible le plus efficacement (toutes choses égales par ailleurs) pour leur croissance et leur existence, accroîtrons leur population et ainsi le flux d'énergie au travers du système s'en trouvera augmenté »
- Swenson (1997): order produces entropy faster!
Exemple: cellule convective de Bénard

Développements actuels sur l'étude des systèmes ouverts loin de l'équilibre thermodynamique (e.g. vivants, sociétés) → principe du taux maximum de production d'entropie (MEPP) (cf. C. Herrmann-Pillath, 2010)

Rappel: Énergie primaire et production d'électricité

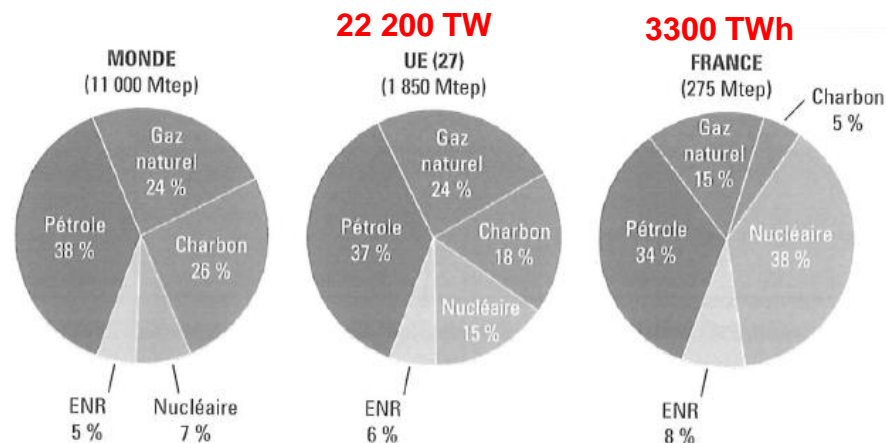
Population mondiale en 2007 : 6,75 Milliards
 → $132000/6,75 = 19,5\text{MWh/hab}$ soit 54kWh/j/hab
 France : $3300/60 = 55\text{MWh/hab}$ → 150kWh/j/hab

Structure de la consommation mondiale d'énergie primaire (2007)



Structure de la production d'électricité (2007)

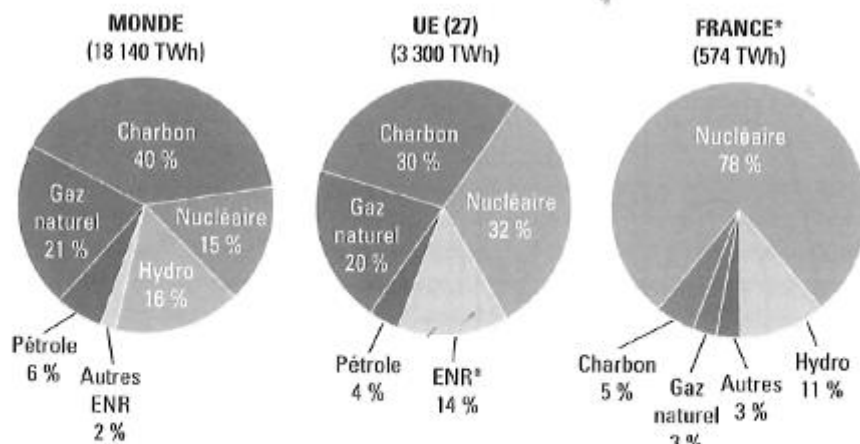
1 Mtep = 10^6 tonne équivalent pétrole,
 1 tep ou toe correspond à ~ 12 000 kWh
 1 TW ⇒ $24 \times 365 = 8760$ TWh/an



**11 000 Mtep par an
 ~ 132 000 TWh/an
 correspond à ~ 15 TW**

TAUX DE DÉPENDANCE : 56 %
 • Pétrole : 75 % importé
 • Gaz naturel : 60 % importé
 • Charbon : 40 % importé

TAUX DE DÉPENDANCE : 51 %
 • Pétrole : 99 % importé
 • Gaz naturel : 95 % importé
 • Charbon : 100 % importé

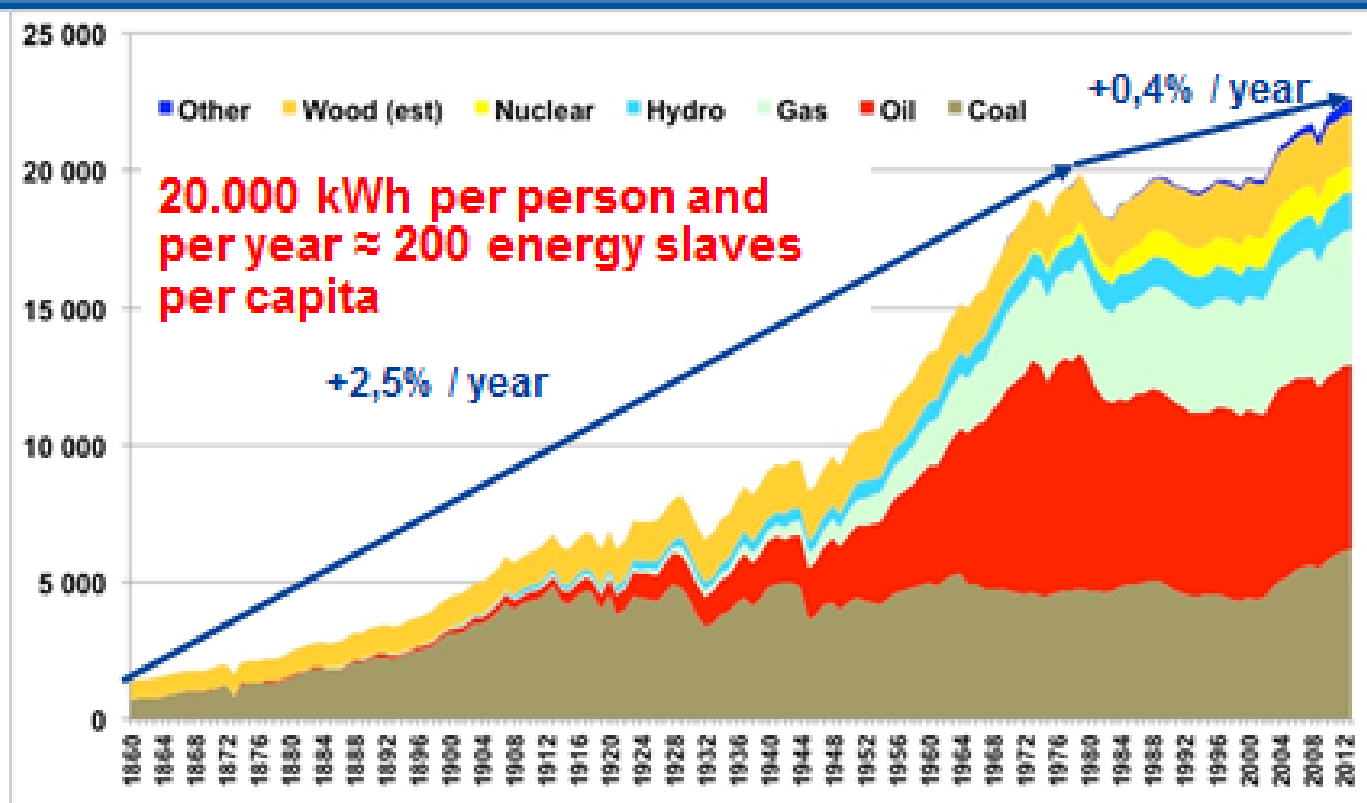


**18140 TWh par an
 correspondent à ~ 2 TW**

* Y compris l'hydraulique

* EDF assure 90 % de la production suivie de la CNR et d'ENDESA

Yummy kWh, or plenty of (fossil) food for plenty of machines...



de Jean-Marc Jancovici

Energy consumption per capita, 1880 to 2013. Source: Jancovici, 2014, on primary data coming from Schilling et al., 1977, BP Statistical Review, 2014, UN & World Bank 2014



www.manicore.com

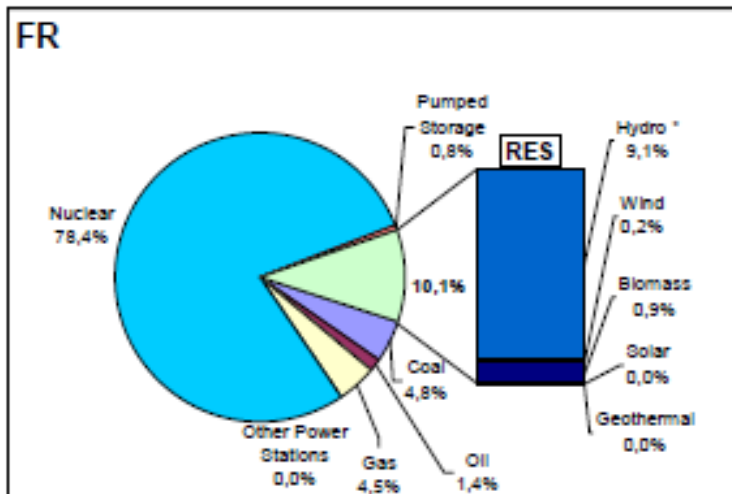


20 MWh = 72 GJ, et 100 kWh/an = 0.36 GJ/an

→ ~ 55 kWh/j par habitant, à comparer aux 125kWh/j pour l'Europe

Electricité et renouvelables en France

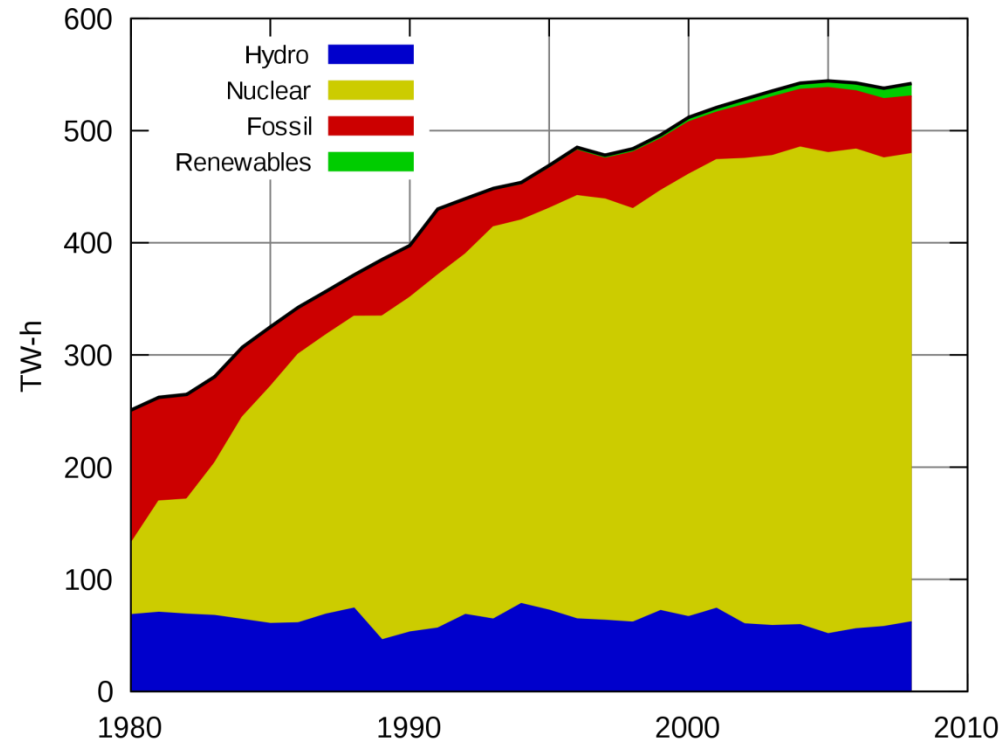
Gross Electricity Generation by fuel (2005)



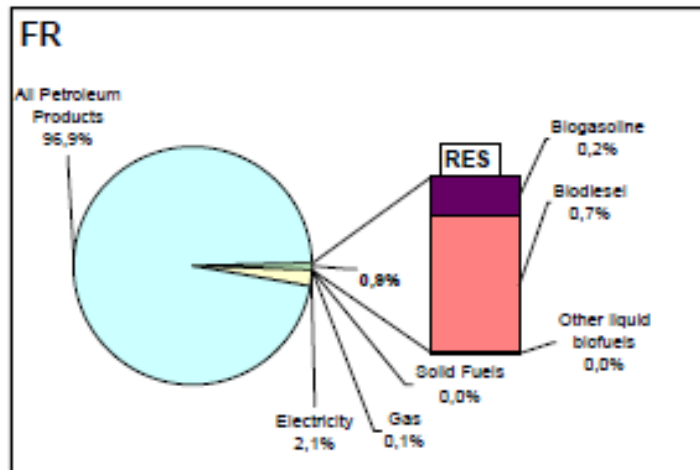
Source: Eurostat

* Not including generation from hydro pumped storage, but including electricity generation to pump water to storage. Municipal Solid Waste, Wood waste, Biogas included.

Electricity Production in France



Final Energy Consumption by Fuel, Transport (2005)



La situation énergétique en 2015,
2^e édition - novembre 2015, EDP Sciences

Énergie et PIB

Quelle sorte de relation ?

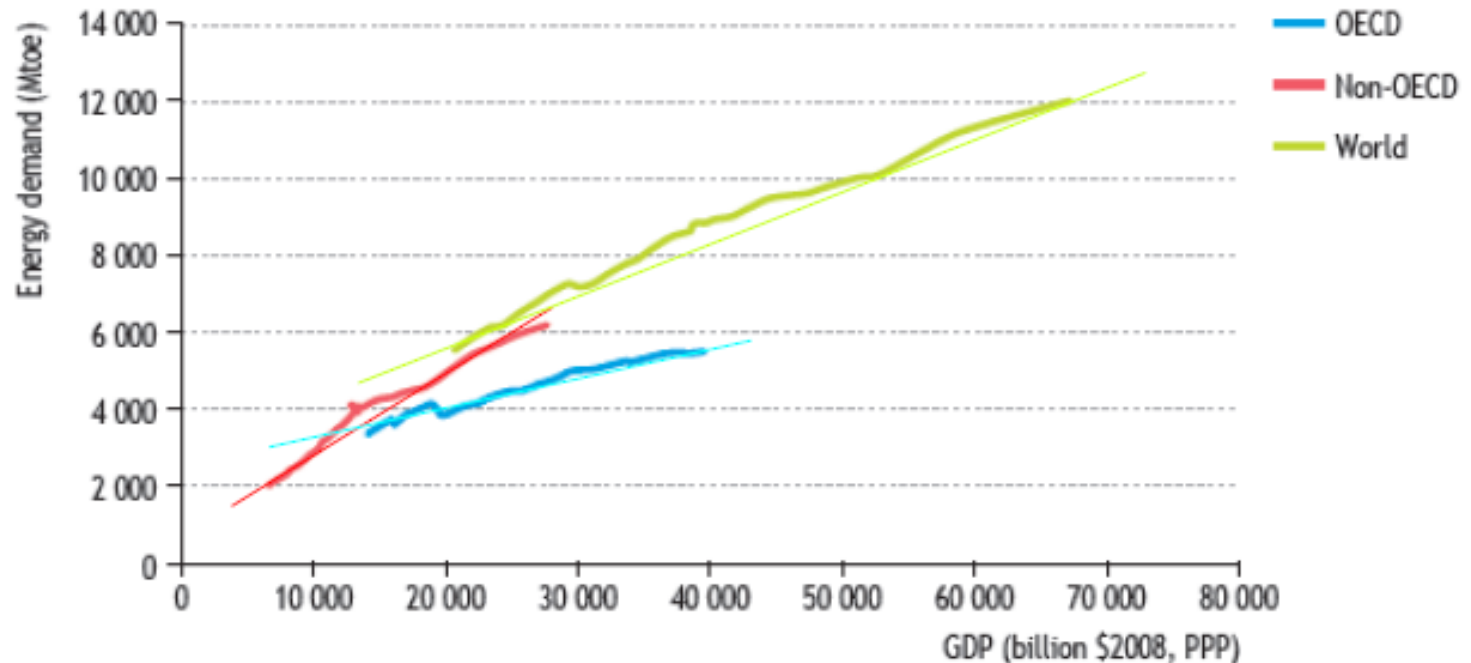
Que disent les modèles macro-économiques ?

- Élasticité du PIB par rapport à chacun des facteurs de production, i.e. capital, travail, énergie, = part de ce facteur dans le PIB.
- Par exemple, si les salaires représentent 20% du PIB, alors l'élasticité du PIB par rapport aux salaires doit être égale à 20%.
- Comme les dépenses énergétiques ne représentent en coût qu'entre 5 et 10% du PIB, l'élasticité du PIB par rapport à l'énergie, selon l'économie néo-classique, doit aussi être de 5 à 10%.

* Elasticité = mesure comment la variation relative de l'un de ces facteurs se répercute sur la variation relative du PIB

Qu'observe t-on ?

Figure 2 • Primary energy demand and GDP, 1971-2007



Source: International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook (WEO) 2009. Page 59

Pourquoi la pente de la courbe bleue est-elle plus faible ?

Augmentation de l'efficacité énergétique dans les pays occidentaux

Evolution du PIB par quantité d'énergie utilisée du fait de la délocalisation de la fabrication des produits à haute intensité énergétique vers les pays émergents au cours des 40 dernières années

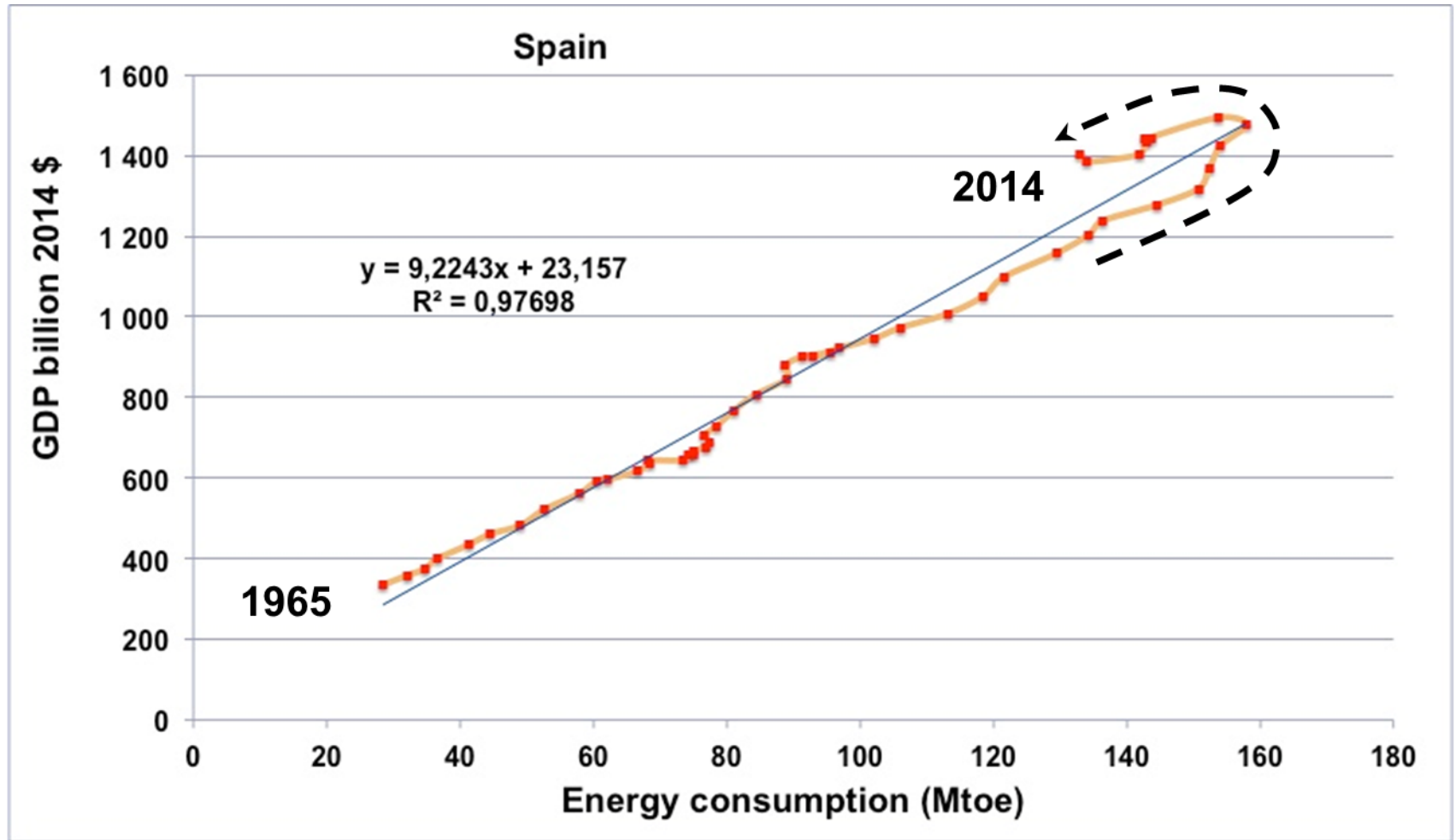
Produit intérieur brut par quantité d'énergie utilisée

Exemple allemand:

	en 1970		en 2009	
	Emplois	part PIB	Emplois	part PIB
Agriculture	8,6%	3,4%	2,4%	0,9%
Industrie	49,3%	51,7%	29,7%	27,1%
Services	42%	44,9%	67,8%	72%

→ Augmentation de 49% de l'efficacité entre 1990 et 2011 alors que la consommation passait de 14800 à 13500 PJ

L'exemple de l'Espagne

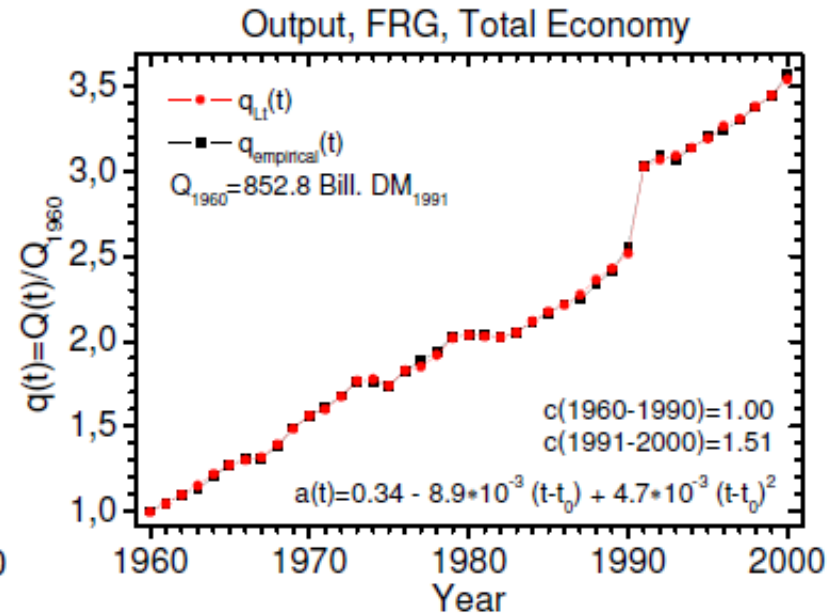
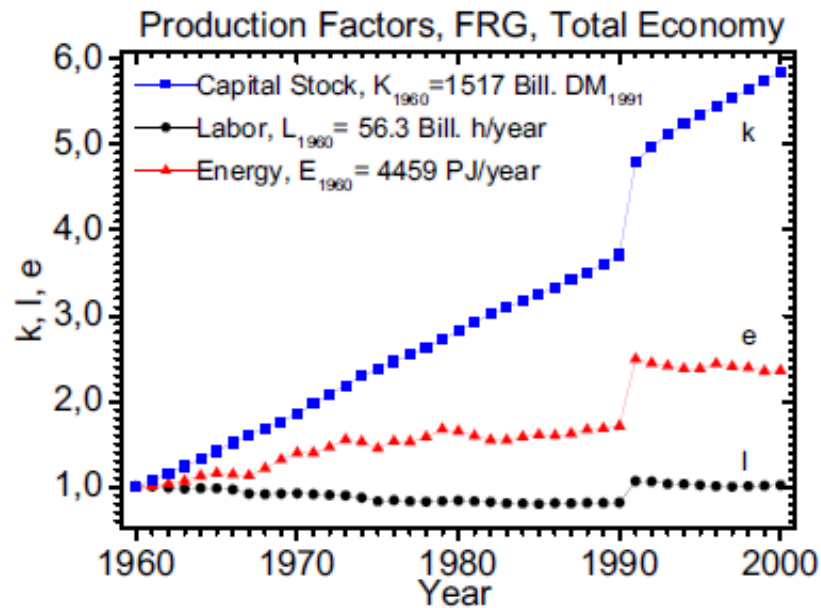


Energy consumption vs. GDP in constant \$ for Spain, 1965 to 2014. Source World Bank 2014 for the GDP, BP Statistical Review 2014 for energy

crédit Jean-Marc Jancovici

Quid du couplage entre énergie et PIB ?

- Problème : ?
 - À partir des observations on mesure une élasticité de l'énergie 10x plus grande (de l'ordre de 60%).
- Explication : des économistes 'sérieux' (R. Kümmel, G. Giraud, ...) ont reconsidéré le problème en intégrant les contraintes des lois de la nature
 - ➔ les élasticités des facteurs de production ne sont plus égales à leur part respectives dans le PIB, et sont en accord avec les données empiriques ;
 - ➔ les modélisations reproduisent les évolutions observées.



Left: Empirical time series of capital, labor, and energy.

Right: Growth of output; black: empirical, red: computed with LinEx function.

À gauche: données empiriques pour le capital, le travail et l'énergie ;

À droite: croissance du PIB, modélisé par la fonction Linex

D'après Reiner Kümmel (2014)

Même si cette réalité incontournable est encore loin d'être reconnue par les courants dominants de la science économique, prospérité et développement économique dépendent étroitement :
de l'énergie, de la matière et de leurs transformations.
Aucun substitut permettant d'assurer le fonctionnement de l'économie n'existe en vertu des lois de la nature.

C'est donc bien une illusion dangereuse que de croire que nous pourrions maintenir une société prospère sans consommer ni énergie ni ressources.

Comment mesurer la qualité de vie?

Corrélations avec des indices énergétiques ?

Le PIB est-il une bonne mesure ?

Peut-on établir une relation entre le flux d'énergie qui circule dans une société et le bien-être de ses membres ?

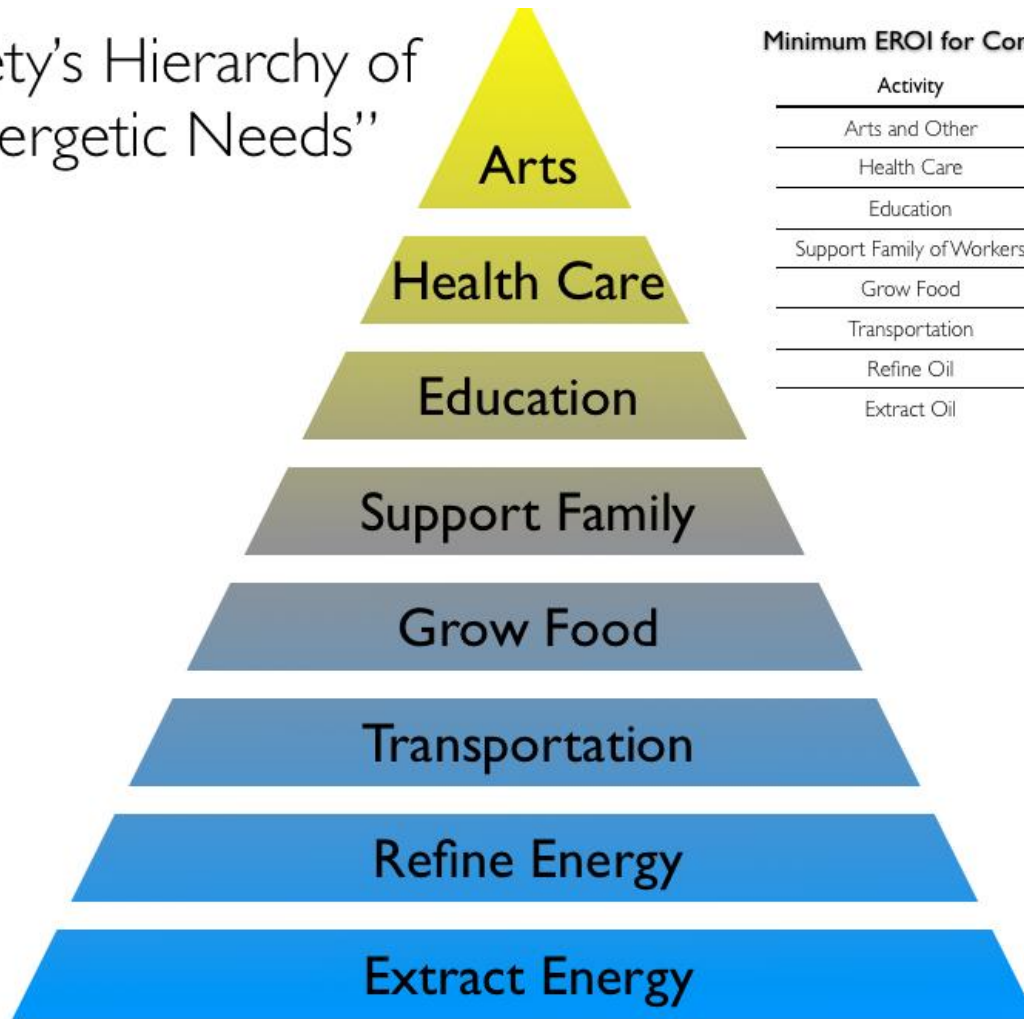
Comment définir un indice pertinent?

→ Indice de Développement Humain (UNESCO)?

→ EROI sociétal (J. Lambert) mixant des grandeurs physiques (énergie par unité de fuel) et données économiques (coût par unité de fuel, PIB).

**EROI = Energy Return On Investment*

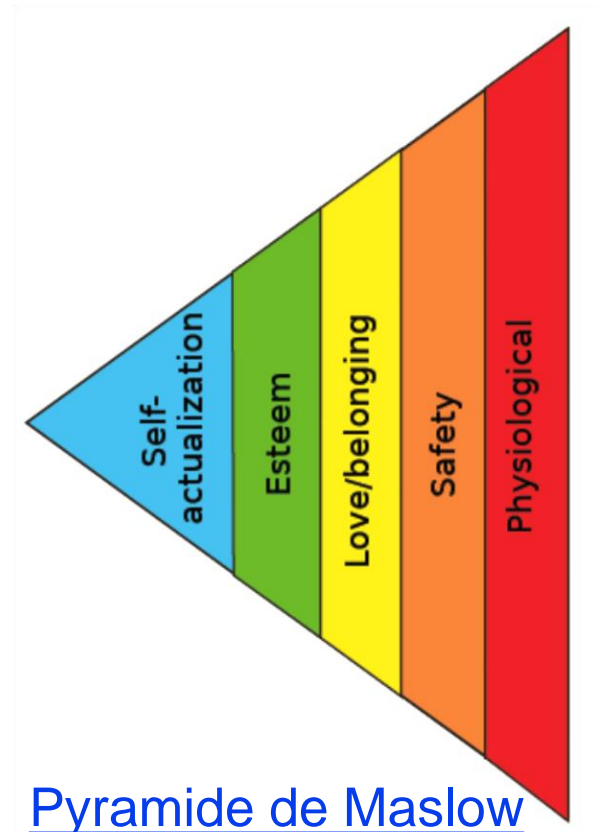
Society's Hierarchy of "Energetic Needs"



Minimum EROI for Conventional Sweet Crude Oil

Activity	Minimum EROI Required
Arts and Other	14 : 1
Health Care	12 : 1
Education	9 or 10 : 1
Support Family of Workers	7 or 8 : 1
Grow Food	5 : 1
Transportation	3 : 1
Refine Oil	1.2 : 1
Extract Oil	1.1 : 1

Ce diagramme comparable à la [pyramide de Maslow en psychologie](#), a été introduit par Charles Hall and Jessica Lambert



[Pyramide de Maslow](#)

THE IMPLICATIONS FOR ALL NATIONS

Three major findings that would appear to impact values for all nations are:

- EROIsoc of <15-25:1, <100 GJ per capita, <0.15-0.20 LEI tend to have a poor to moderate “quality of life”.
- A threshold is passed with an EROIsoc 20-30:1, 100-200 GJ per capita, 0.2-0.4 LEI which is correlated with a “higher” (e.g. an HDI index of above 0.7) standard of living.
- This improvement in well-being appears to level off at EROIsoc values >30:1, >200 GJ per capita, 0.4 LEI. There is no additional improvement in societal well-being above these levels.

crédit
Jessica
Lambert

Le seuil de 100 GJ/an correspond à ~ 76 kWh/j par personne

200 GJ/an ~ 152 kWh/j par personne

Rappel: moyenne européenne ~ 125 kWh/j/hab, mondiale ~55

Les énergies renouvelables. Une panacée ?

Disponibilité des énergies renouvelables en Europe

Ressources estimées:

- Vent ($\sim 2 \text{ W/m}^2$) : - 10% de l'espace disponible occupé par des fermes d'éoliennes
→ 360 W → 9 kWh/j par personne
- Hydroélectricité: actuellement 590 TWh/an (67 GW) → 3.2 kWh/j (500 millions d'habitants). Si doublement (?) → 6.4 kWh/j par personne
- Énergie des vagues : 4000 km de côtes avec 10 kW/m → 2 kWh/j par personne
- Énergie des marées : 2.6 kWh/j par personne
- Biomasse (les plantes captent 0.5 W/m^2 ou 5 kW/ha) → 12 kWh/j par personne
- Solaire photovoltaïque et panneaux thermiques sur les toitures :
 - 10 m² de toit équipés en panneaux PV → 7 kWh/j (énergie de haute qualité)
 - 2 m² de capteurs thermiques à eau chaude → 3.6 kWh/j (énergie dégradée)

→ Total 42.6 kWh/j par personne

- ⇒ Fermes solaires requises : 5% de la superficie de l'Europe (450 m² par pers.)
→ 54 kWh/j par personne

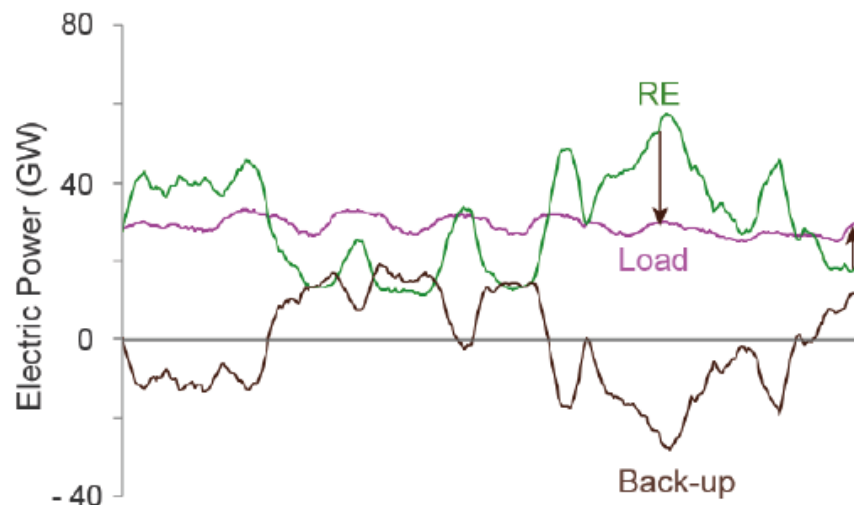
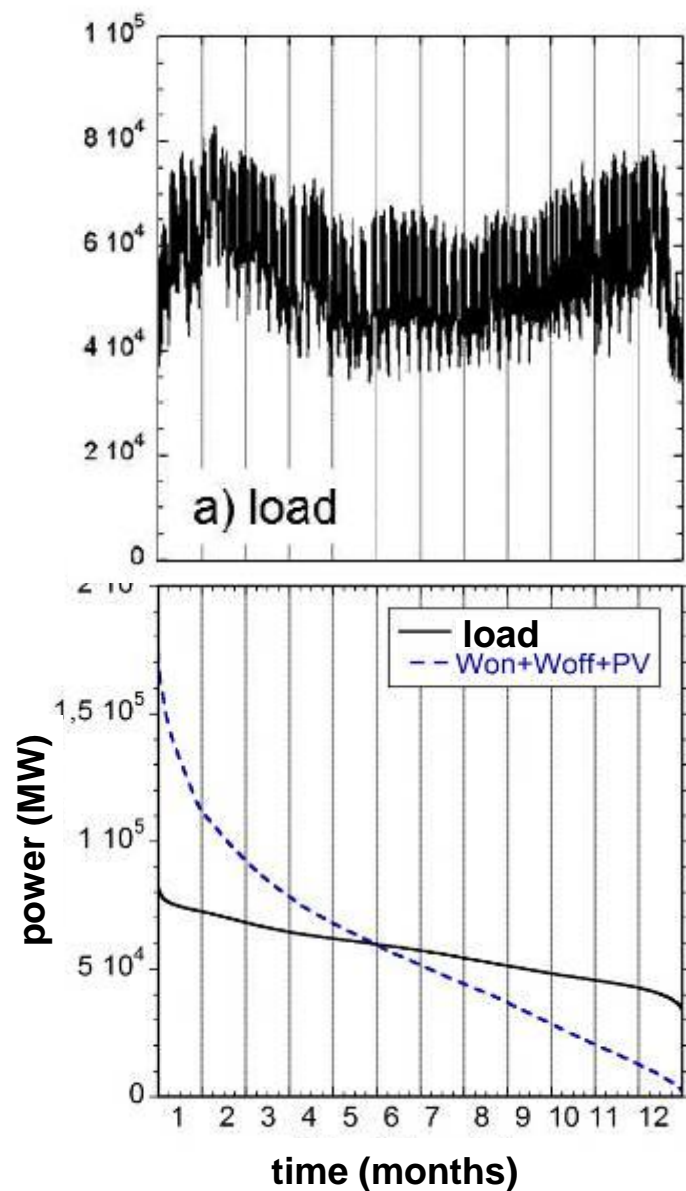
Problèmes = (i) coût, (ii) baisse de production hivernale, intermittence

→ Total 96.6 < 125 kWh/j par personne (cf. MacKay, <http://www.withouthotair.com/>) (Transport ~ 40kWh/j, Chauffage ~ 40 kWh/j, Electricité ~ 20 kWh/j)

Conclusion : Si le but est de se débarrasser des combustibles fossiles, l'Europe ne peut pas se suffire de ses propres ressources renouvelables.

***Les énergies renouvelables
intermittentes pour la production
d'électricité***

Les problèmes posés par l'intermittence des EnR

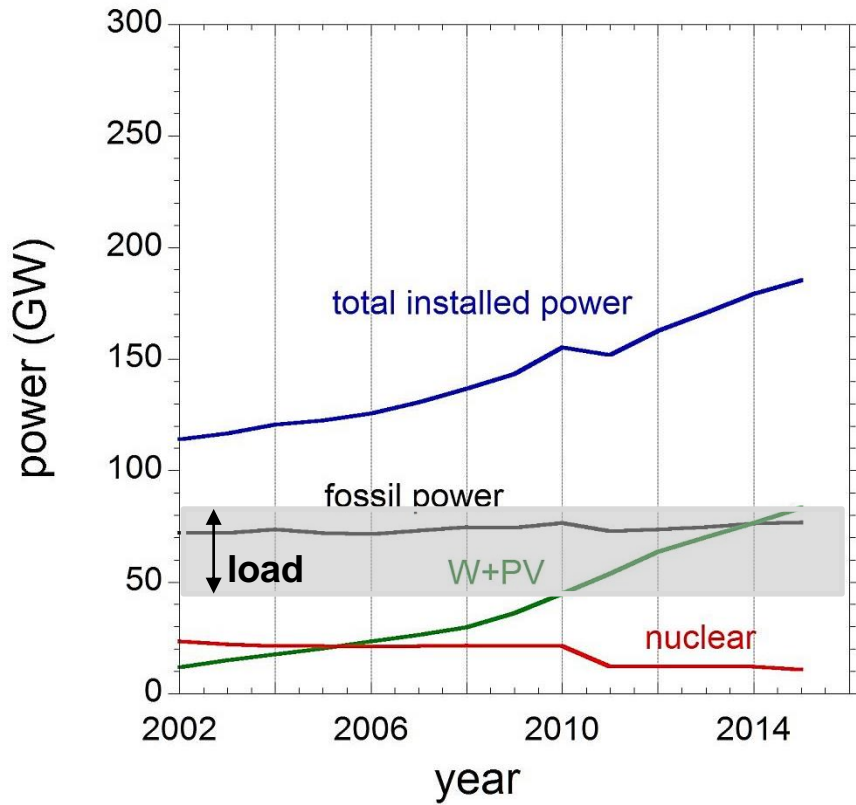


- Surplus perdu en l'absence de solutions de stockage suffisantes
- "Back-up" nécessaire
- Instabilité du réseau au-delà de 40% d'ENR intermittentes

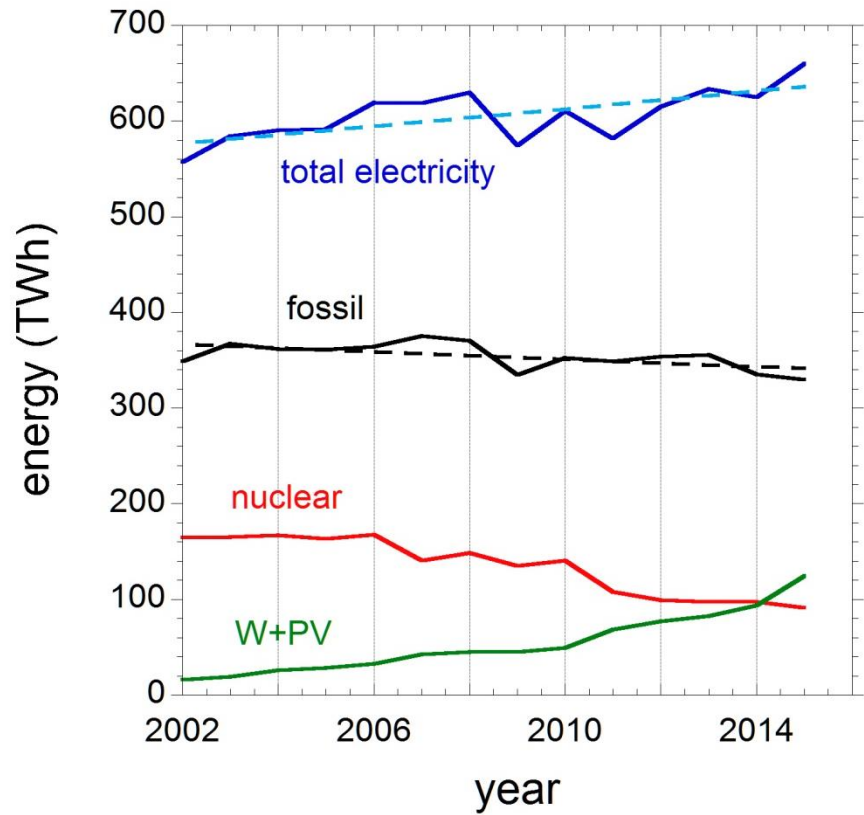
[From F. Wagner, Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 20]

Adapter la demande à l'offre ? (→ ...Linky)

How much power has to be installed?

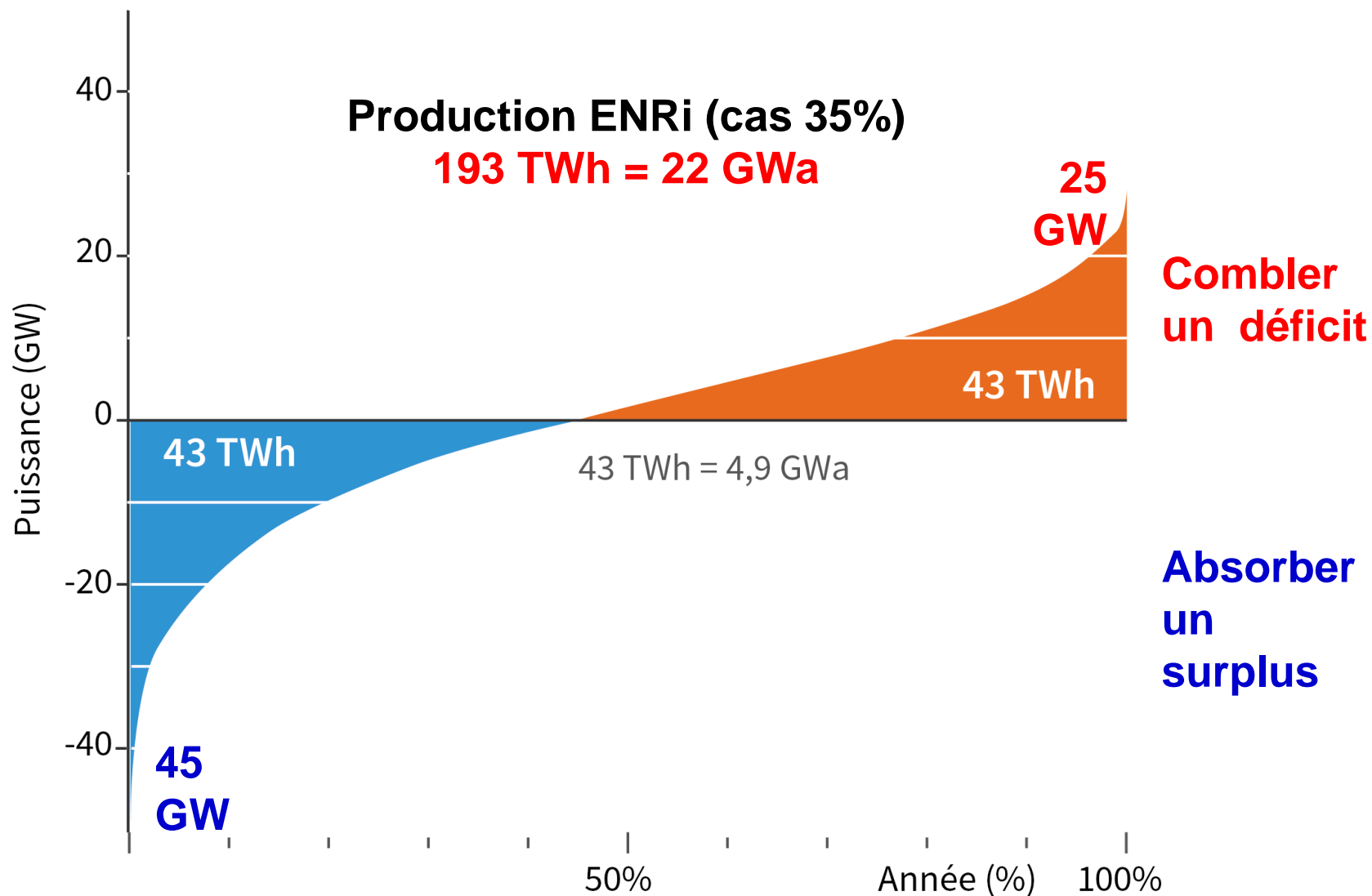


Energy TWh



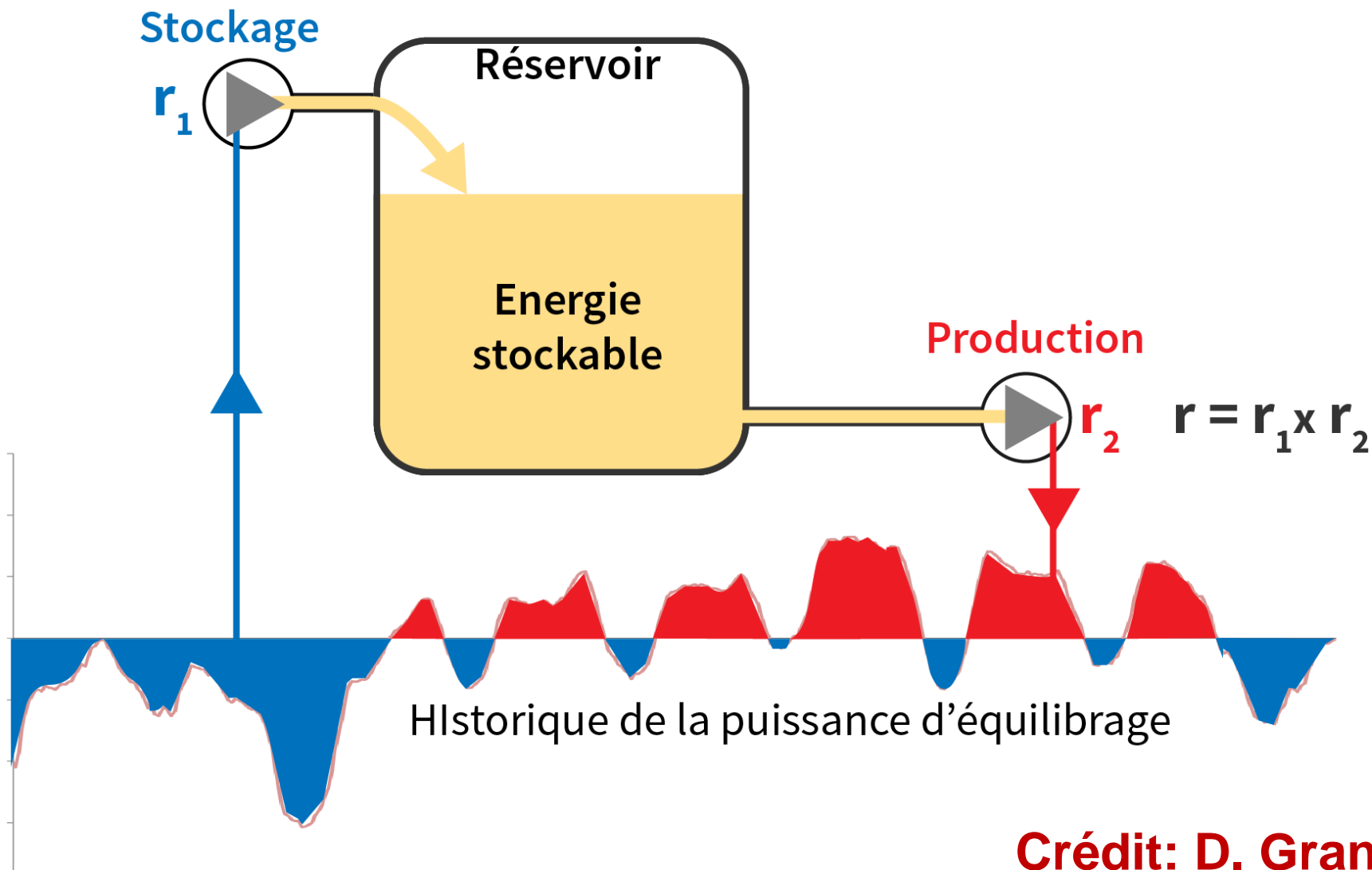
Crédit: F. Wagner

Monotone de charge d'équilibrage



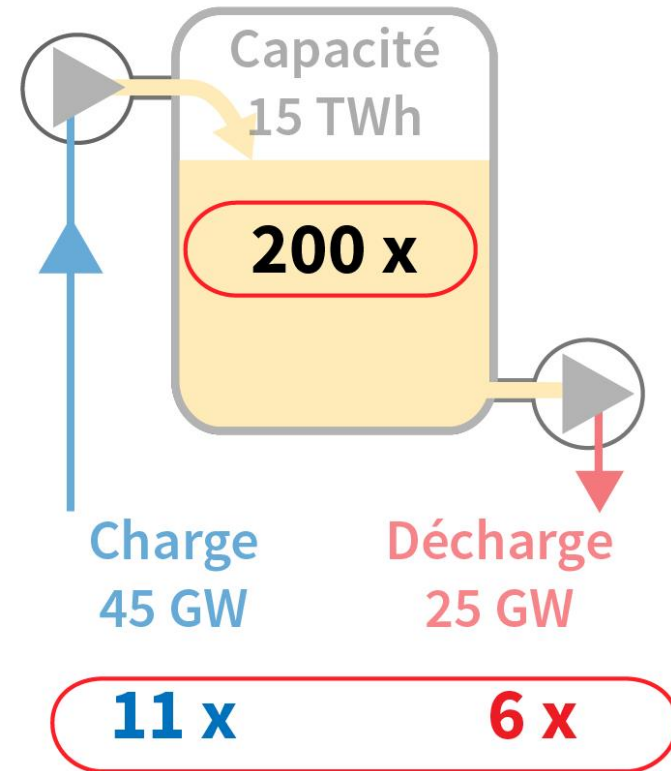
Crédit: D. Grand

Stockage: principe



Crédit: D. Grand

Stockage hydroélectrique ($r = 80\%$)

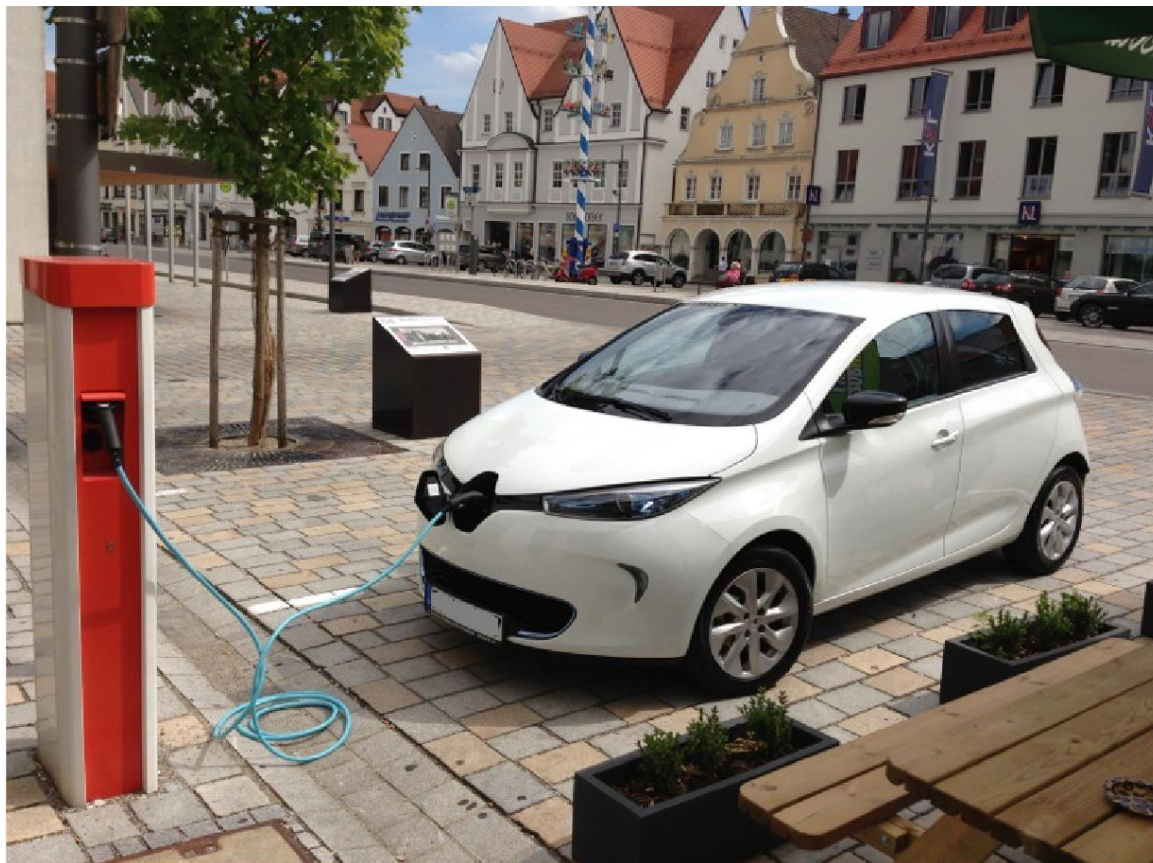


STEP françaises :

Capacité ≈ 70 GWh
Puissance = 4,1 GW

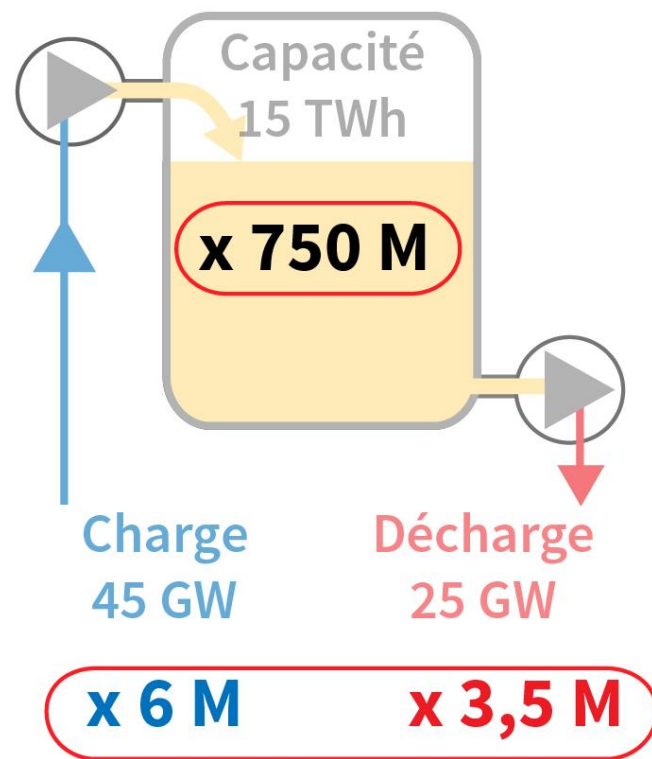
Crédit: D. Grand

Stockage par batteries ($r = 80\%$)



ZOE : Capacité ≈ 20 kWh
 Puissance charge = 7 kW

Crédit: Jacques Treiner



30 x parc **mondial** de batteries (0,5 TWh)

Les batteries au lithium bouleversent des pans entiers de l'industrie

Dans le secteur stratégique de l'énergie, l'Europe se fait distancer par l'Asie et les Etats-Unis.

LE MONDE ECONOMIE | 05.11.2017 à 18h33 • Mis à jour le 05.11.2017 à 18h47 | Par Pierre-Olivier Rouaud



L'usine Tesla « Gigafactory » en janvier 2017 TESLA

La montée en cadence a commencé en début d'année. Et le tempo doit accélérer jusqu'en 2020. Au cœur du désert du Nevada, la Gigafactory de Tesla produira alors plus de 1,7 milliard de « cellules » lithium-ion par an. Soit 35 GWh de capacité, davantage que la production mondiale en 2012 ! Et, surtout, de quoi équiper un demi-million de Model 3, la voiture « économique » du groupe d'Elon Musk, qui sera assemblée sur le site et dont Tesla pense pouvoir écouler un million d'exemplaires en 2020.

Gigafactory de Tesla :

**35 GWh/an,
soit plus que
la production
mondiale de
2012 pour
équiper
500 000
véhicules!**

Lithium:

**5kg/batterie →
2500 t = 10%
production
mondiale 2007**

Stockage hydrogène (20% < r < 40%)

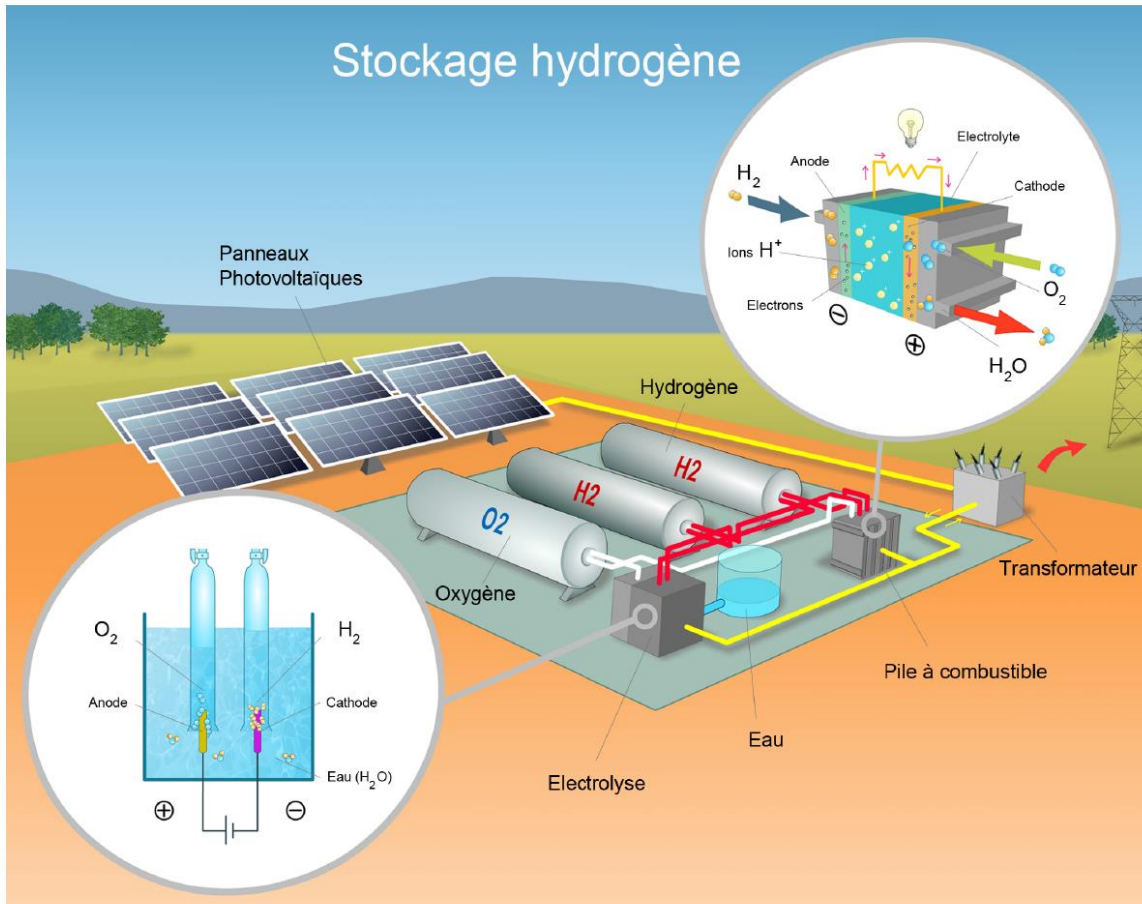
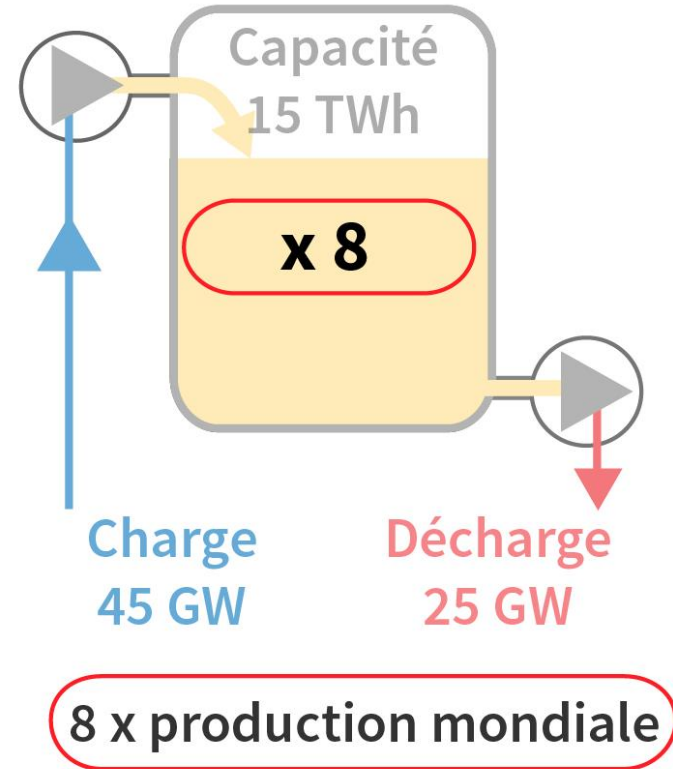


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY



Production mondiale d'hydrogène = 1,8 TWh

Crédit: D. Grand

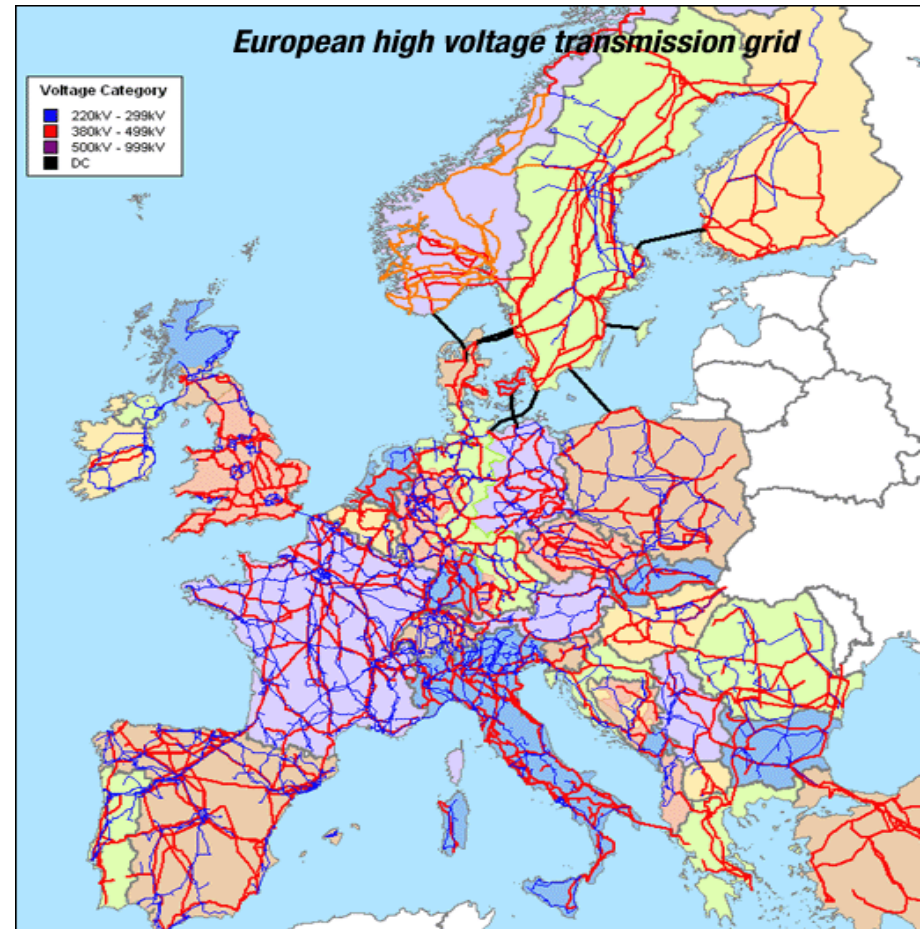
Echanges transfrontaliers?

Scénario 100% ENR
(Ademe):
56 TWh (export = import)

☀ **EnR?** Impossible:
productions en phase.

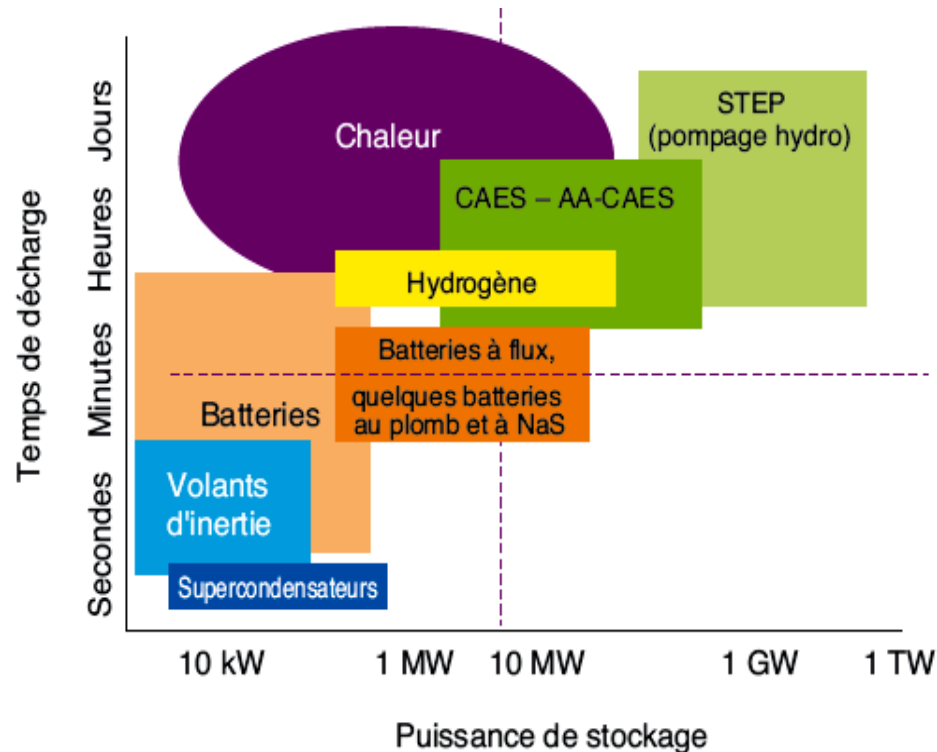
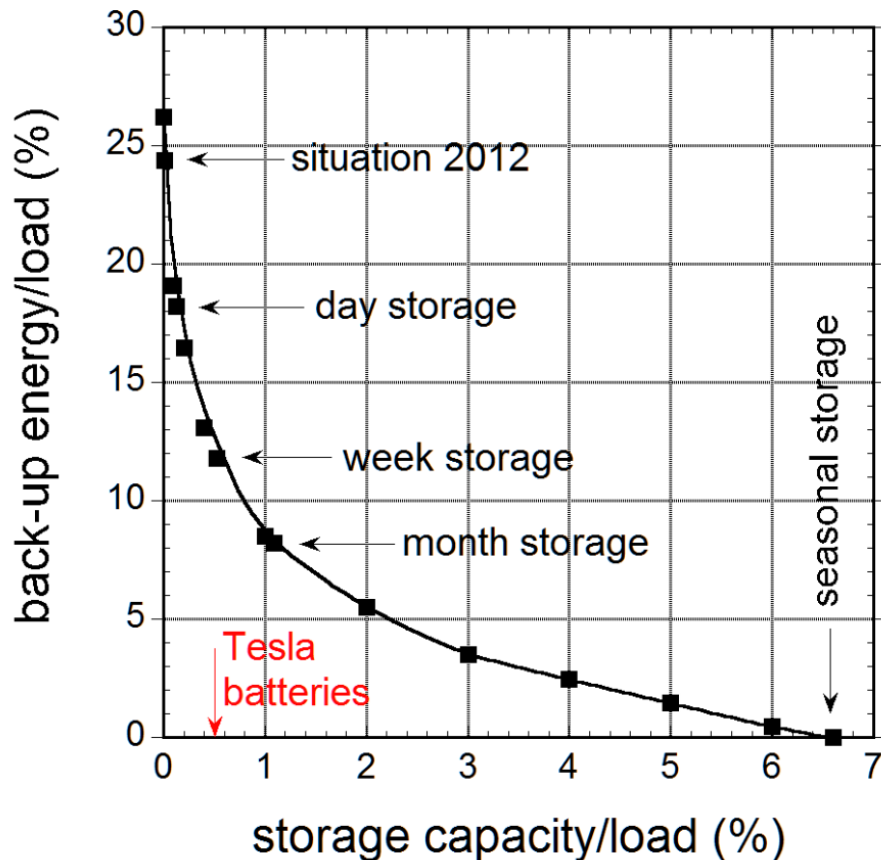
☁ **Fossiles** : « la majorité des échanges exploite la flexibilité fossile des systèmes électriques voisins » (Ademe)
Exporter nos émissions de CO₂?

Zéro



Crédit: D. Grand

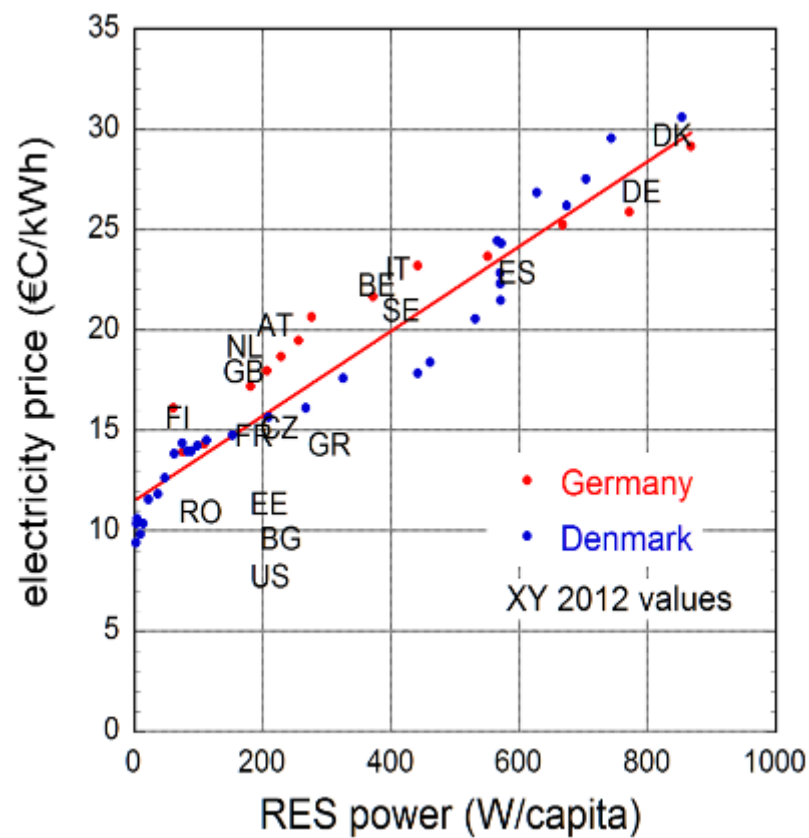
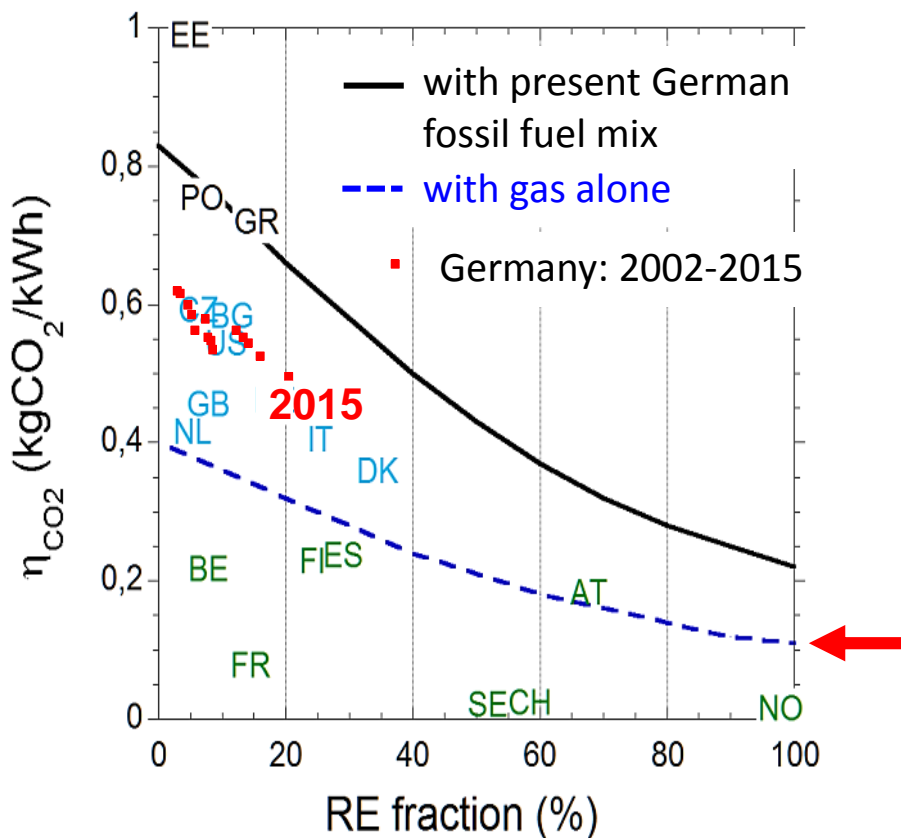
Quid du stockage de l'électricité ?



La capacité de stockage à long terme (saisonnier) est très insuffisante: (pour l'Allemagne 660×capacité actuelle de pompage hydro requis)

- Le surplus de production est perdu.
- Le back-up est assuré par les combustibles fossiles

Conséquences du déploiement des EnR intermittentes



Émissions de CO₂

Pour la France la baisse à 50% de la part du nucléaire conduirait à un doublement des émissions de CO₂ [D. Grand, Ch. Le Brun, R. Vidil, Techniques de l'Ingénieur, juillet 2015, IN301]

Coût de l'électricité →

- CSPE: 2017, ~2c€/kWh (5,7G€)
 EEG-Umlage: 2003, 0.41c€/kWh
 2017, 7c€/kWh (25,7G€)

“Die Energiewende” en Allemagne. Quid?

How much power has to be installed?
Enough to serve Europe in good days

$$P_{\text{won}} = 176 \text{ GW} ; P_{\text{woff}} = 33 \text{ GW} ; P_{\text{PV}} = 97 \text{ GW}$$

The remaining need for back-up power?

88%; 2 parallel systems

$$P_{\text{back-up}} = 73 \text{ GW (max. load: 83 GW)}$$

$$W_{\text{back-up}} = 26\%$$

The extent of surplus energy?
Formally enough to serve Poland

Dimension of storage?

For the 100% case: 660 x present capacity

The dynamics of the back-up system?
From 0 up to the load; strong gradients

The conditions for DSM (demand-side management)?

Cheap electricity prices during the day!

The amount of CO2 reduction?

Not to the level of France, Sweden...

Conditions of a 100% supply by RES?

Use of biogas (e.g. 40 TWh) and savings (down to 30%)

What could be a reasonable share by intermittent RES?

40% (in energy)

What are the costs of the transition?

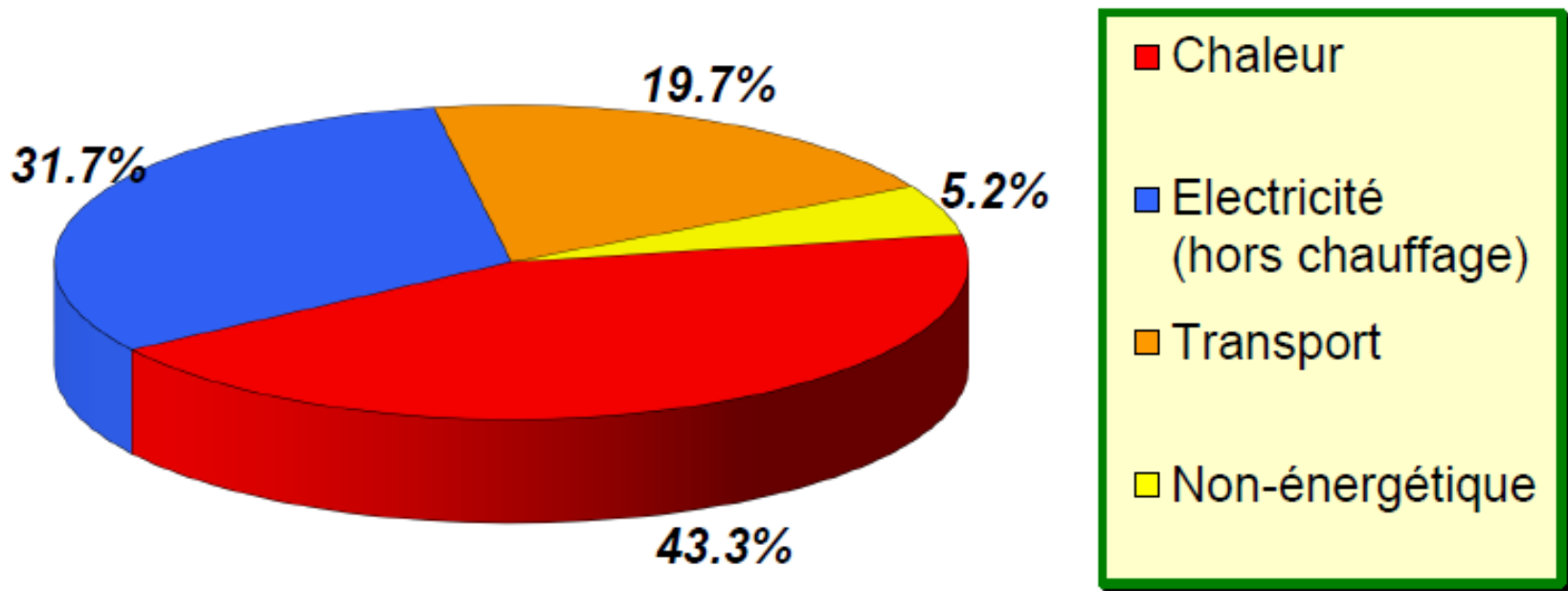
Very high: ~ 300 Mrd€ for 20% W+PV*

What are the economic implications?
substantial

* Finadvice

crédit F. Wagner

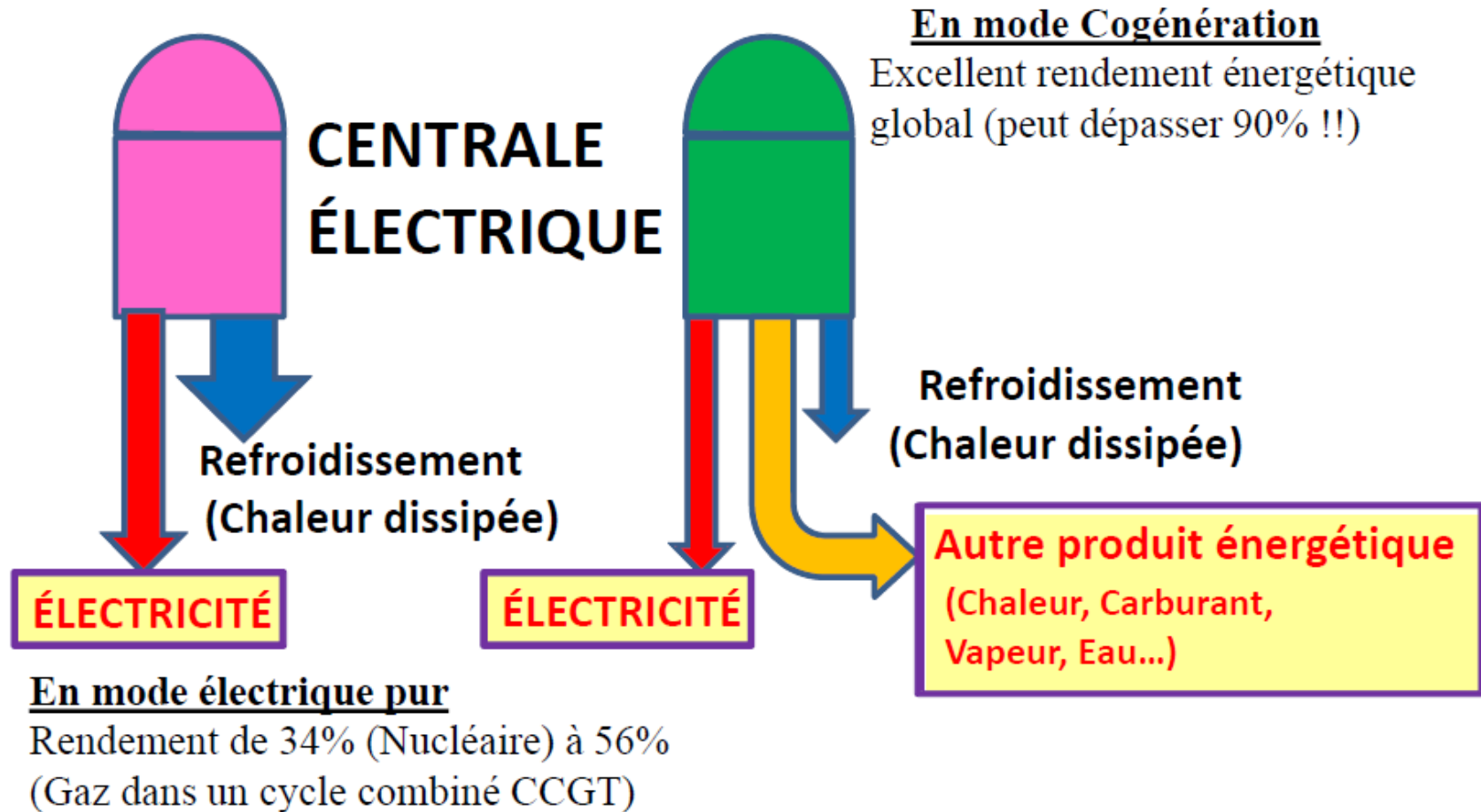
Energie primaire en France par utilisation (2016)



**Total = 250 Mtep
= 2900 TWh**

Il faut décarboner les transports et surtout la chaleur !

Une solution pour la chaleur (les besoins sont essentiellement à basse température) : La Cogénération



Point clé: la ligne de transport (>100km)

Crédit: Henri Safa

Il faut des critères objectifs !

Ils doivent prendre en compte :

- (i) La quantité de CO2 émise par MWh produit ;
- (ii) Les surfaces mobilisées par MWh produit ;
- (iii) Le volume de déchets ultimes produits par MWh ;
- (iv) Le nombre de malades et de morts par MWh ; (v)
- (v) Les quantités de ressources immobilisées par MW installé et consommées par MWh
- (vi) Le taux de retour en énergie MWh par MWh → EROI**

EROI (Energy Return On Investment) = E_{out} / E_{in}

Origine du concept d'EROI: Charles Hall

History, applications, numerical values
and problems with the calculation of
EROI (Energy Return on (energy)
Investment.

Science for energy scenarios
Les Houches, France

Charles A. S. Hall

Professor Emeritus

SUNY College of Environmental
Science and Forestry, Syracuse, NY

Charles Hall est un écologiste.

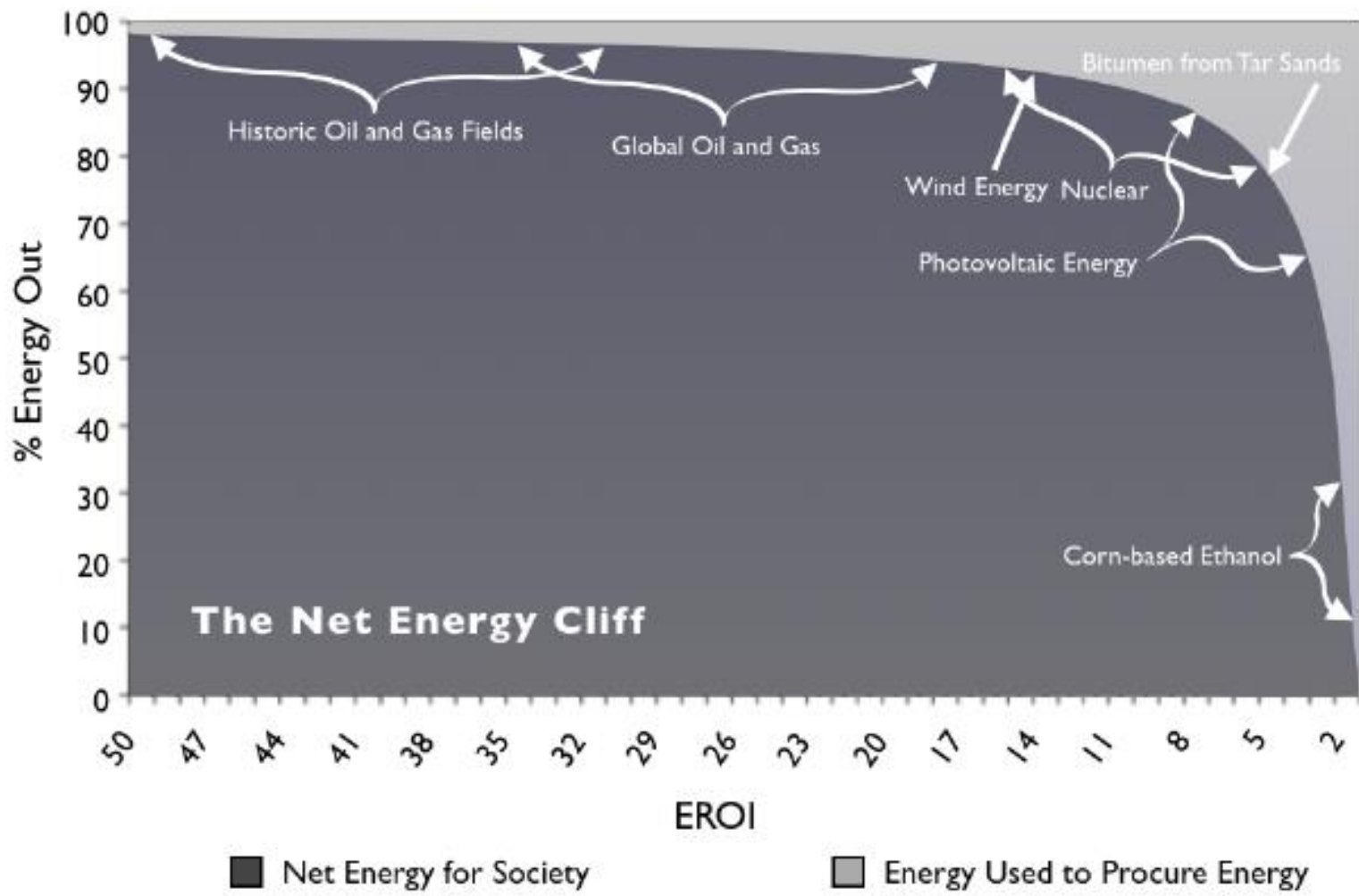
Il a introduit le concept de ERoEI en
essayant de répondre à la question:
Pourquoi un poisson migre-t-il?

→ environ un minimum de 5 Calories
est gagné pour chaque Calorie
investie dans la migration

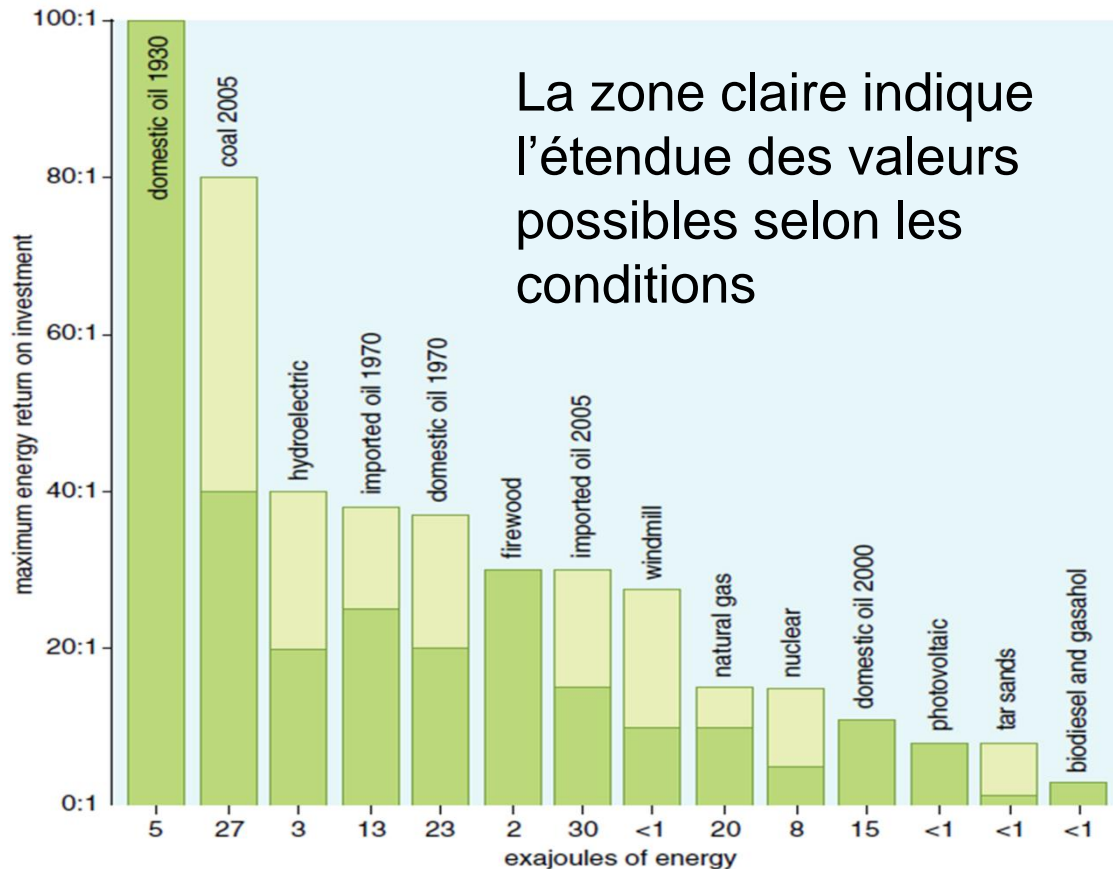
'Un prédateur doit gagner plus d'énergie
en mangeant une proie, qu'il n'a dépensé
d'**exergie** pour la capturer'

Contexte et filiation:

- Raymond Lindeman (avec G.E. Hutchinson), étudia le fonctionnement des écosystèmes et le conceptualisa comme flux d'énergie entre des structures trophiques en interaction. Il postula la loi des 10% dans la chaîne alimentaire: ~ 10% de l'énergie provenant de la matière organique est stockée sous forme de chair au cours du transfert d'énergie d'un niveau strophique, (i.e. position dans la chaîne alimentaire) au suivant.
- Howard Odum (directeur de thèse de Charles Hall) travailla sur l'énergétique de l'évolution, en utilisant la théorie des systèmes complexes.



From Charles Hall and Jessica Lambert



Hall, Charles A. S., and John W. Day. "Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil: In the 1970s a Rising World Population and the Finite Resources Available to Support It Were Hot Topics. Interest Faded—but It's Time to Take Another Look." *American Scientist*, vol. 97, no. 3, 2009, pp. 230–237. JSTOR, JSTOR, www.jstor.org/stable/27859331.

From Charles Hall

- Décroissance du EROI pour les fuels conventionnels ;
- valeurs faibles pour les sources 'renouvelables' intermittentes, (mais haute qualité de l'énergie délivrée (électricité) ;

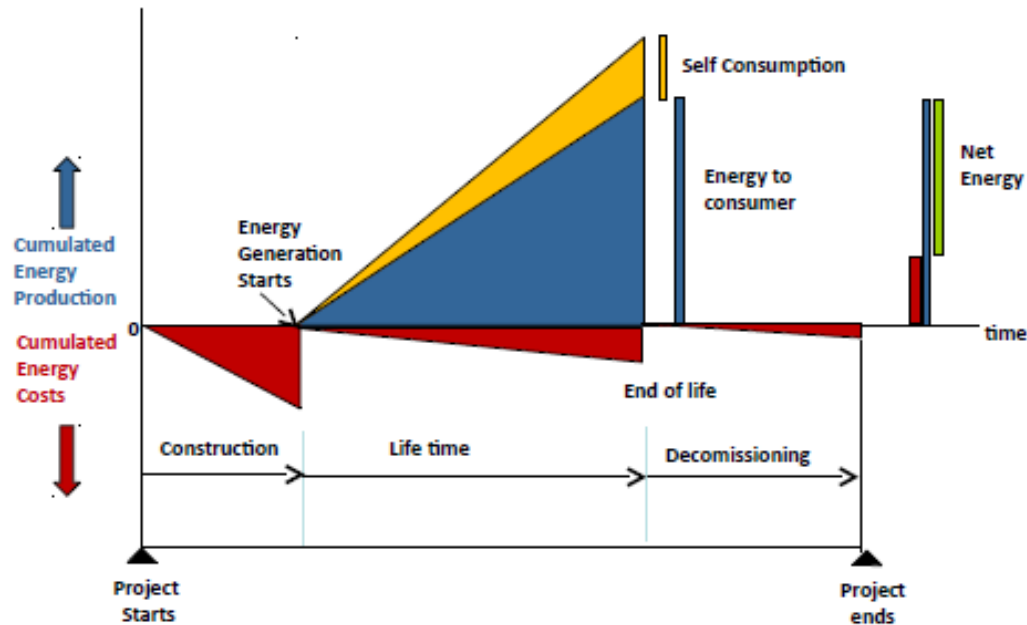
Problème: comment évaluer et comparer les EROIs pour les simples fuels (pétrole) et les systèmes complexes de génération de puissance ?

Méthodologie

- $EROI = E_R / E_I \rightarrow$ combien d'énergie 'utile' (E_R) peut-on récupérer en investissant E_I ?
- E_R (simple) et E_I (plus délicat) doivent être obtenus à partir d'analyses de cycle de vie
- Exergies (fraction de l'énergie pouvant fournir un travail mécanique, e.g. énergie électrique) seules considérées, sinon difficultés de comparaison (EMROI vs. EROI).
- Le contenu énergétique du fuel n'est pas pris en compte
- La dépense énergétique pour l'éventuel stockage est prise en compte (buffering).
- Calcul d'un seuil économique à partir du rapport PIB (GDP) / consommation énergétique \rightarrow rapport $\sim 7 \times$ prix de l'électricité

Crédit: Daniel Weißbach

Classic EROI Vision of an Energy System

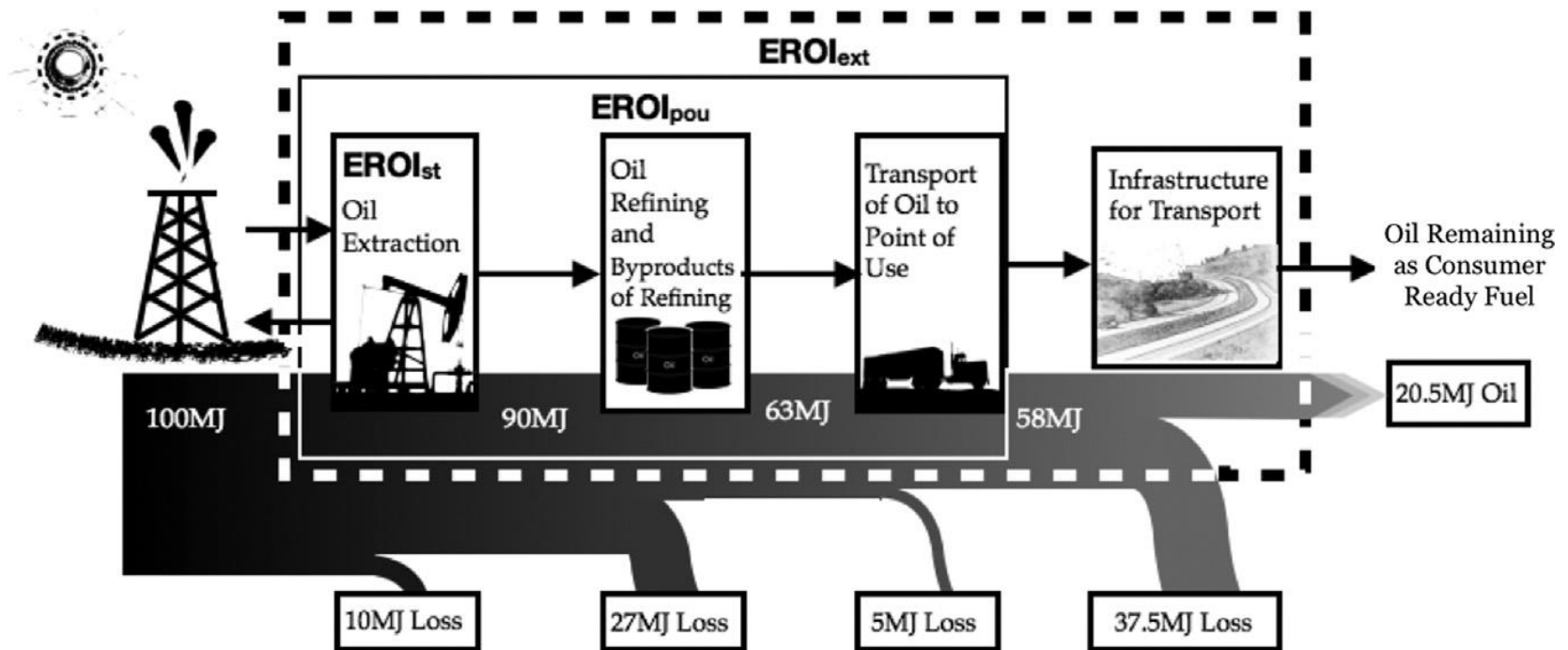


Source: Energy from Wind: A Discussion of the EROI Research. Cutler Cleveland. Quoted by Nate Hagens at <http://www.theoil Drum.com/node/1863>

Analyse de cycle de vie (LCA)

Crédit: Pedro Prieto

Problèmes de méthodologie: limites du système considéré



EROI_{st} (standard), EROI_{pou} (point of use), EROI_{ext}, EROI_{soc}, EMROI

From Charles Hall, Jessica Lambert, Stephen Balogh, *Energy Policy*, 64 (2014)141–152

Comment estimer l'indice EROI pour des centrales électriques ?

The EROIs of Power Plants - why are they so different?

You never find two publications with the same results...

Daniel Weißbach

Götz Ruprecht, Armin Huke, Konrad Czerski, Stephan Gottlieb, Ahmed Hussein
Institute for Solid-State Nuclear Physics

Weißbach et al., *Energy*, vol. 52 (2013), pp. 210–221

March 8th, 2016, Les Houches, France

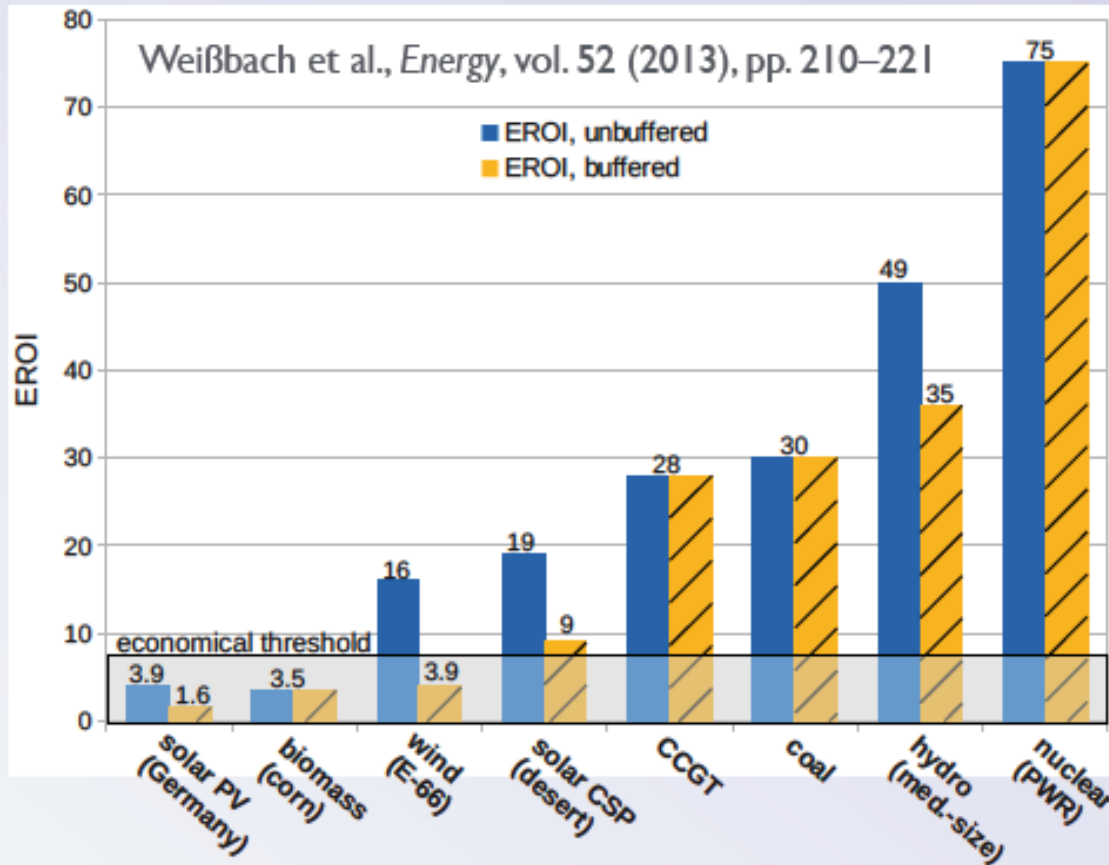


- Daniel Weißbach a fait une analyse détaillée des problèmes de méthodologie
- Il fournit les résultats pour tous les systèmes de génération d'électricité et en particulier pour les centrales nucléaires.

EROI Results

	Author 1	Author 2	Our work
Solar PV	~2.5 (Prieto/Hall)	>20 (Raugei)	3.9*
Nuclear	~2.2 (Leeuwen)	~1 (Tyner)	75

*unbuffered



Raugei:
Output weighting x 3

Prieto:
Labor etc.

Leeuwen:
Old data, top-down

Tyner:
Top-down, outdated costs

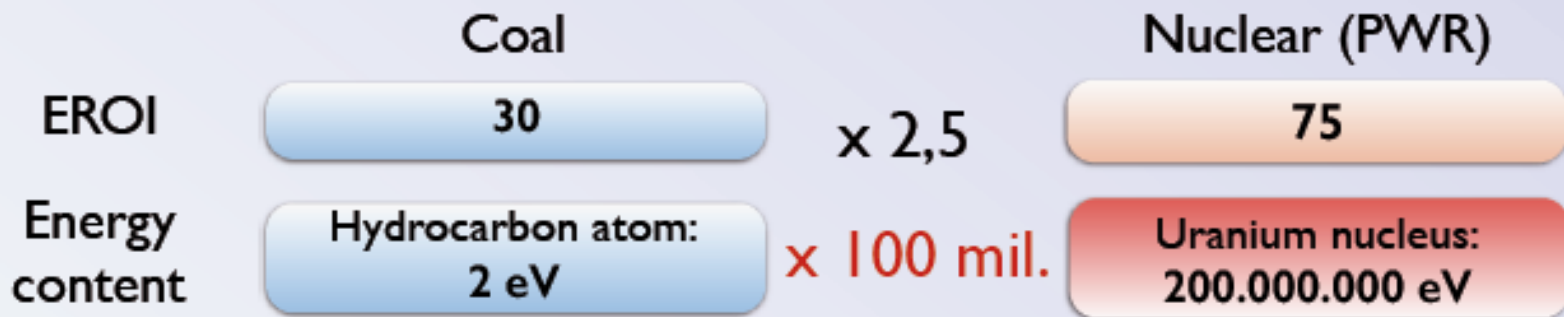
Pump-storage hydro assumed for buffering – not implementable in such scales for Germany

Crédit: Daniel Weißbach

Nuclear example

Installed capacity (net)	1,340 MW
Full-load hours	8,000
Lifetime	60 a
Output	2,315,000 TJ
Construction energy demand	4,050 TJ, thereof 35% electrical
Decommissioning energy demand	1,150 TJ, thereof 40% electrical
Maintenance energy demand	6,900 TJ, thereof 68% electrical
Fuel related energy demand	18,800 TJ (9,650 TJ), thereof 68% (40%) electrical
Sum energy demand	30,900 TJ (21,750 TJ), thereof 60% (50%) electrical
ERoEI	75 (105)

Is this EROI good?



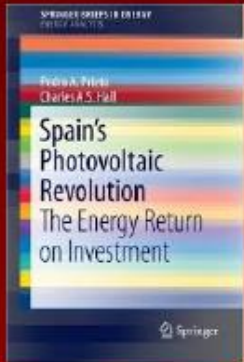
Crédit: Daniel Weißbach

Pourquoi seulement 75:1 pour le nucléaire ?

- Pour la filière PWR grosses variations (de 20:1 à 100:1) selon :
 - ✓ **Coût énergétique de l'enrichissement** (diffusion >> centrifugeuses)
 - ✓ **Très faible utilisation du contenu énergétique du combustible**
 - ✓ **Durée de vie des réacteurs**
- Seuls les réacteurs à neutrons rapides de Génération IV et au-delà permettraient une augmentation significative du facteur EROI :
 - ✓ D. Weißbach de l'IFK (*Institut für Festkörper-Kernphysik*) de Berlin a utilisé l'analyse EROI pour étudier les performances d'un nouveau concept de réacteur, dit "Dual Fluid Reactor". Combustible sous forme liquide (comme pour réacteurs à sels fondus, (cf. Molten Salt Fast Reactor, Daniel Heuer) mais chlorures au lieu de fluorures), avec circuits distincts pour combustible et caloporteur (Pb).
 - ✓ Un EROI 20× plus grand (\geq **2000:1**, limite théorique 10 000) pourrait être atteint
- *Quid des futurs(?) réacteurs à Fusion*

EROI net pour le solaire photovoltaïque, d'après Pedro Prieto

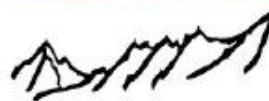
The net EROI for solar PV: a case study for Spain



D'après la propre expérience de l'auteur dans le programme PV espagnol

Des HOUCHES
March 7th. 2016
Pedro A. Prieto

ÉCOLE DE PHYSIQUE
des HOUCHES



“Spain’s Photovoltaic Revolution. The Energy Return on Investment”,
Pedro Prieto, Charles Hall, Springer 2013

Spécificités espagnoles

- Réseau électrique relativement isolé du reste de l'Europe
- Meilleure insolation en Europe
- Déploiement massif (~ 4 GW)
- Données très précises sur la puissance installée et l'énergie électrique générée (2011-2013)
- Nombreuses données techniques et économiques sur les installations PV

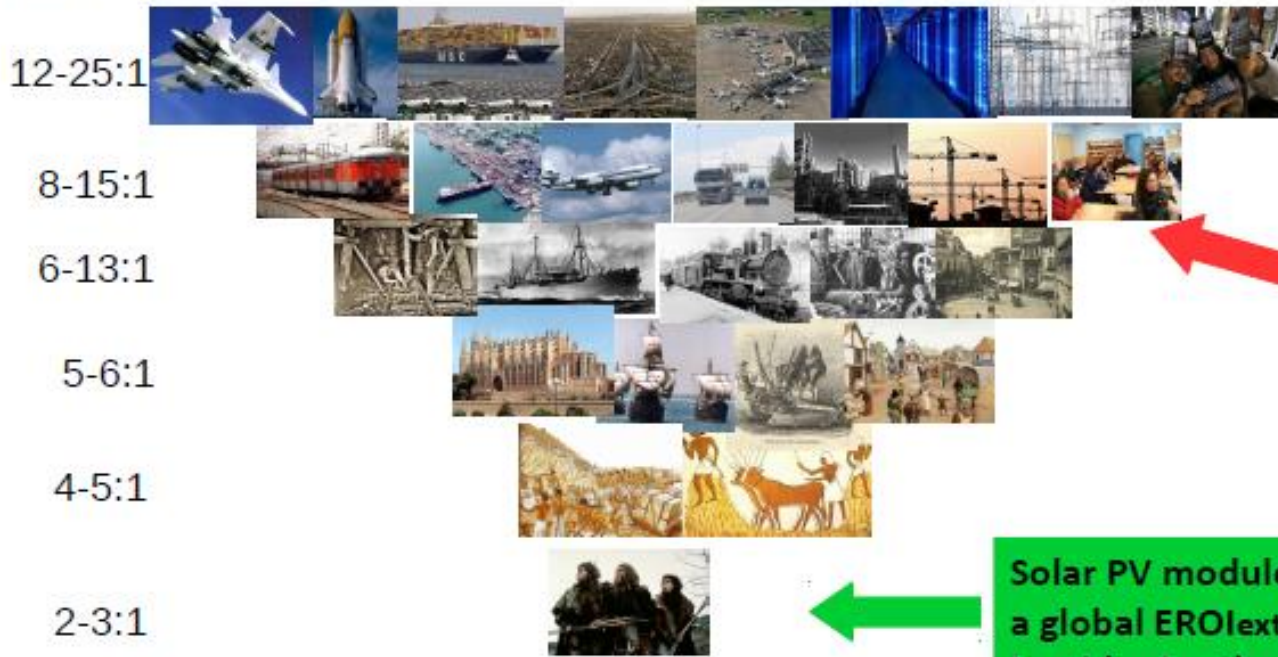
The Energy Invested (E_{in})



- Hidden, ignored, underestimated Energy Input costs. Complete BoS in all the social process

D'après Pedro Prieto

APPROX. REQUIRED EROI



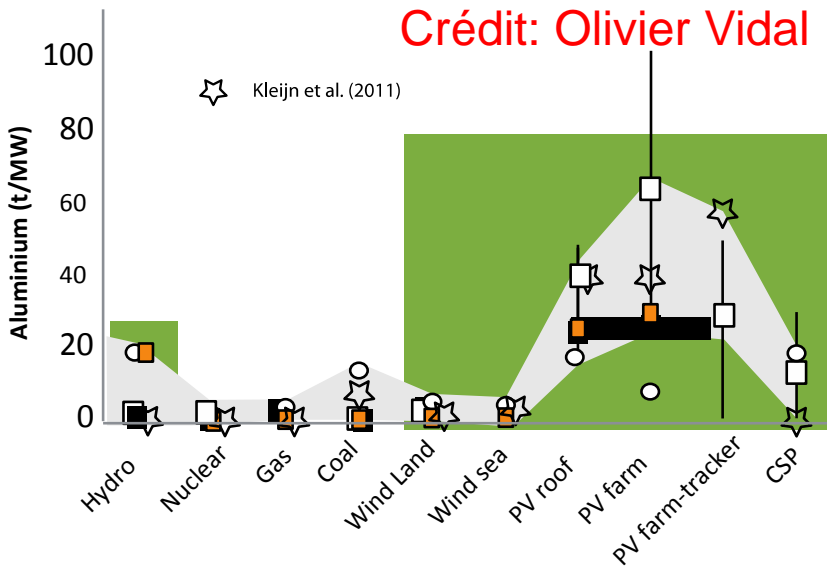
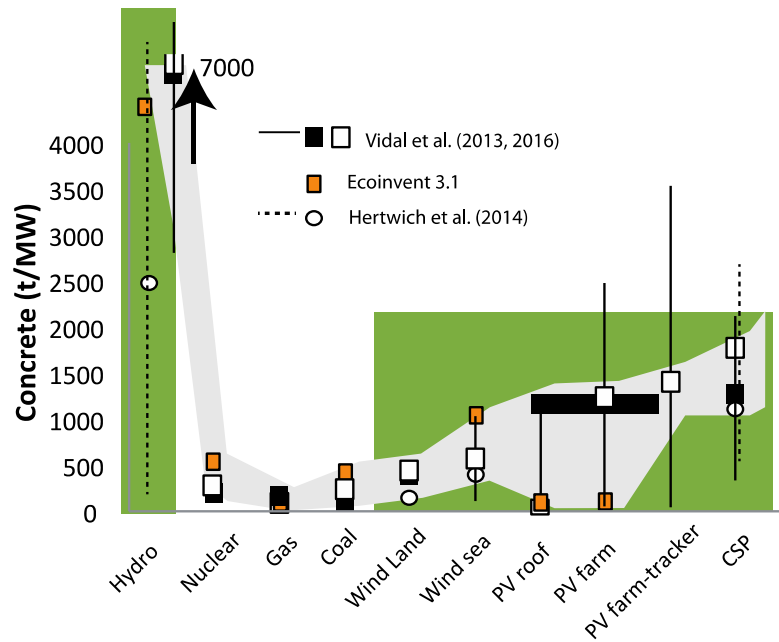
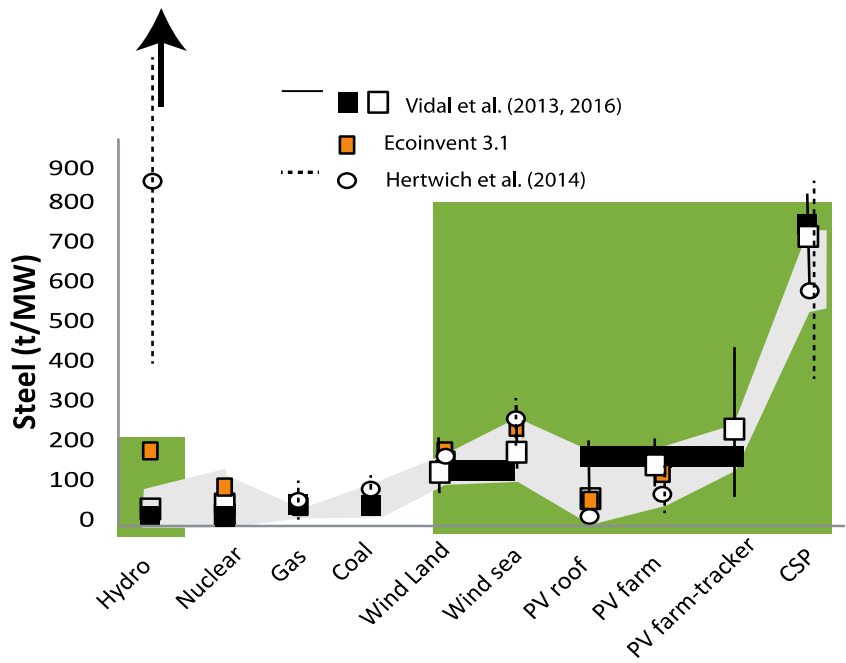
...but they need a society with this EROI_{ext} level (at worst)

Solar PV modules have a global EROI_{ext} of this level (as best)...

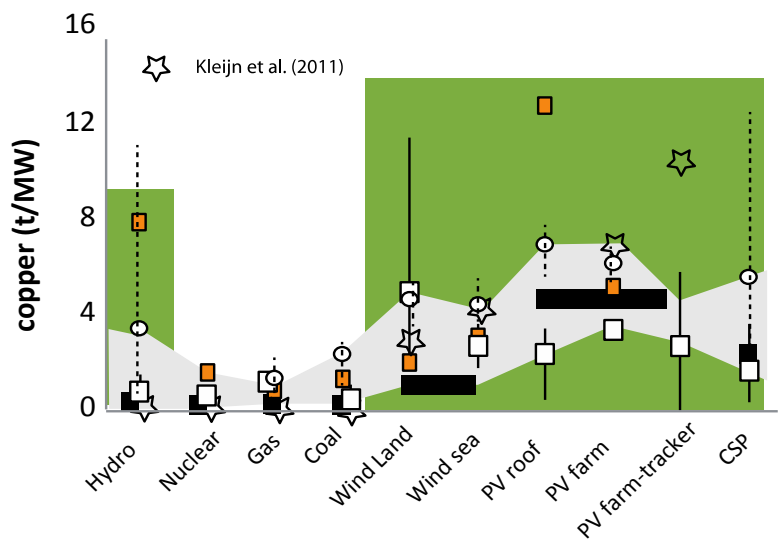


CONCLUSIONS from Pedro Prieto

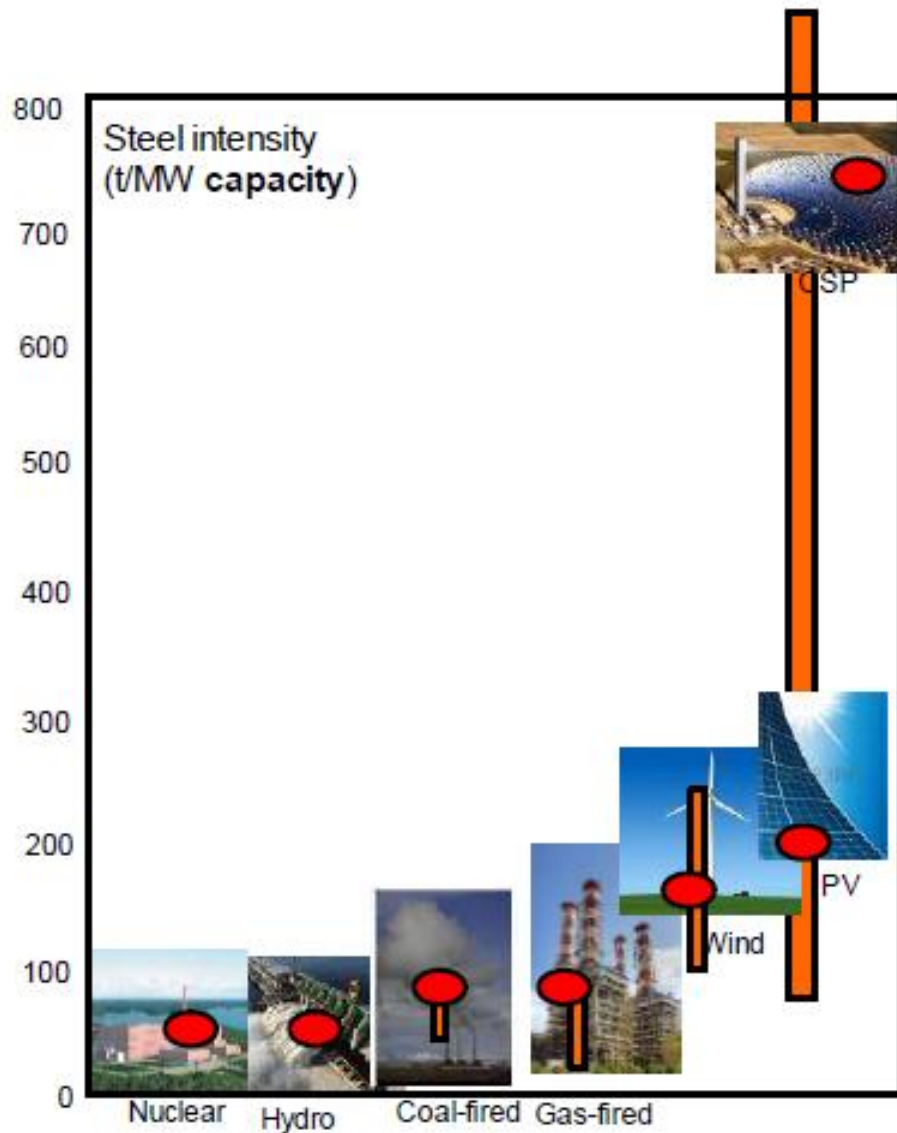
Le problème des ressources



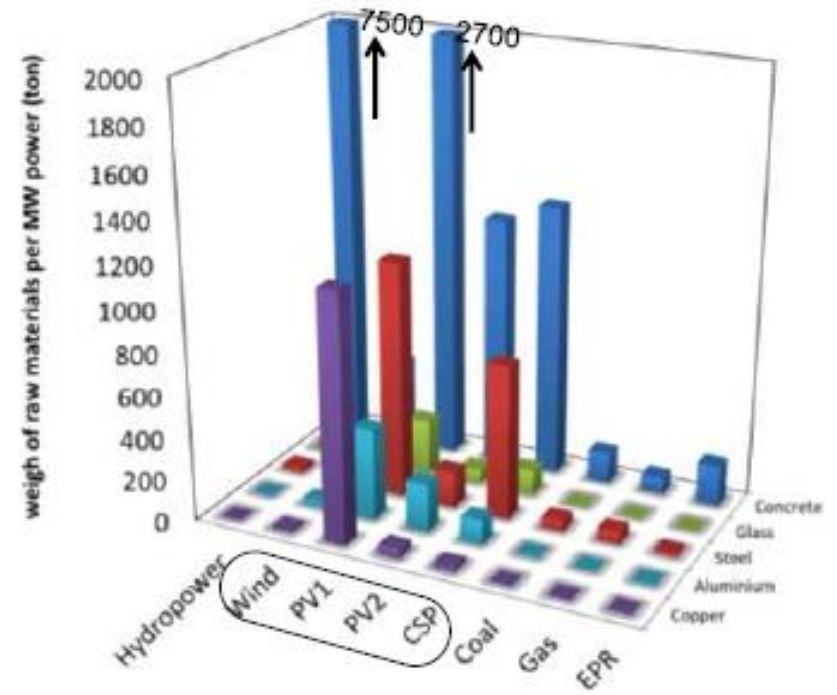
Crédit: Olivier Vidal



Sources d'énergie et ressources

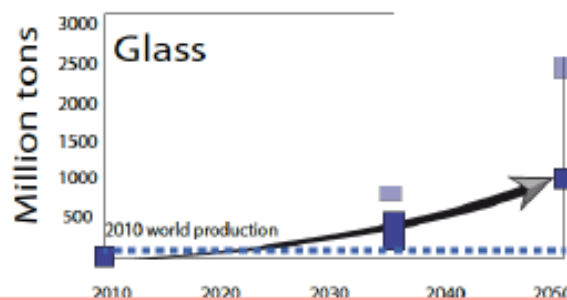
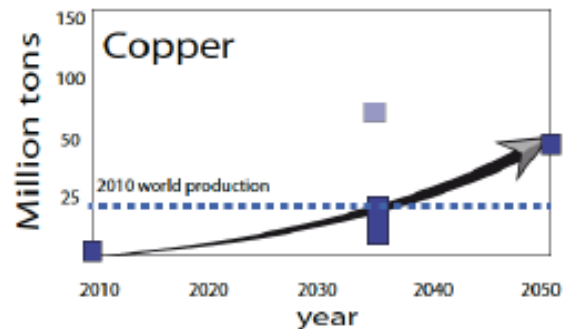
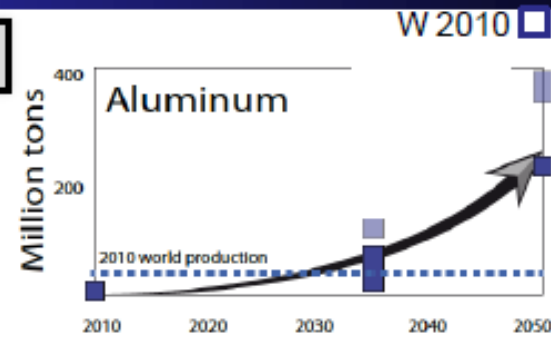
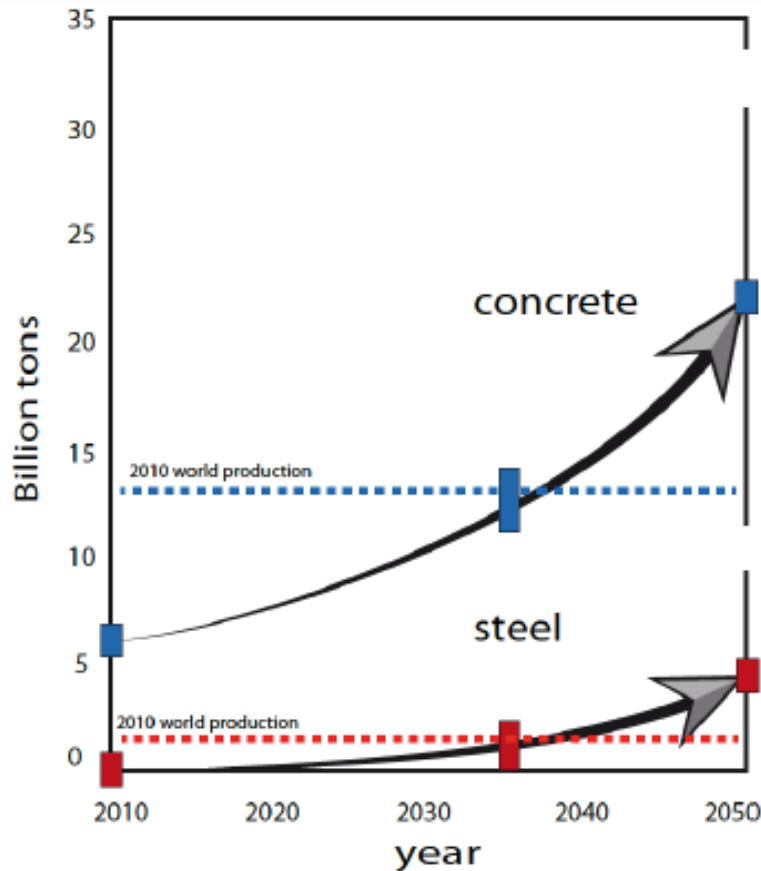


Vidal et al., 2013



EnR intermittentes et ressources

Materials requirements for wind and solar facilities



In 2050, the cumulative amount of concrete, steel, Al, Cu and glass sequestered in wind and solar facilities will be 2 to 8 times the 2010 world production

Conclusions

- Pour réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi à cause de l'épuisement des ressources, la part des combustibles fossiles dans la consommation mondiale d'énergie primaire devra fortement diminuer.
- Une analyse rationnelle à partir de critères objectifs est plus que jamais indispensable
- Malgré les incertitudes des estimations (~ 25%) et les problèmes de définition et de méthodologie, les analyses EROI confirment les craintes que les EnRi ne pourront pas se substituer miraculeusement aux ressources fossiles.
- Mais les solutions EnRi off-grid ne sont certainement pas à négliger sur certains sites et en particulier pour les pays en voie de développement.

Conclusions 2

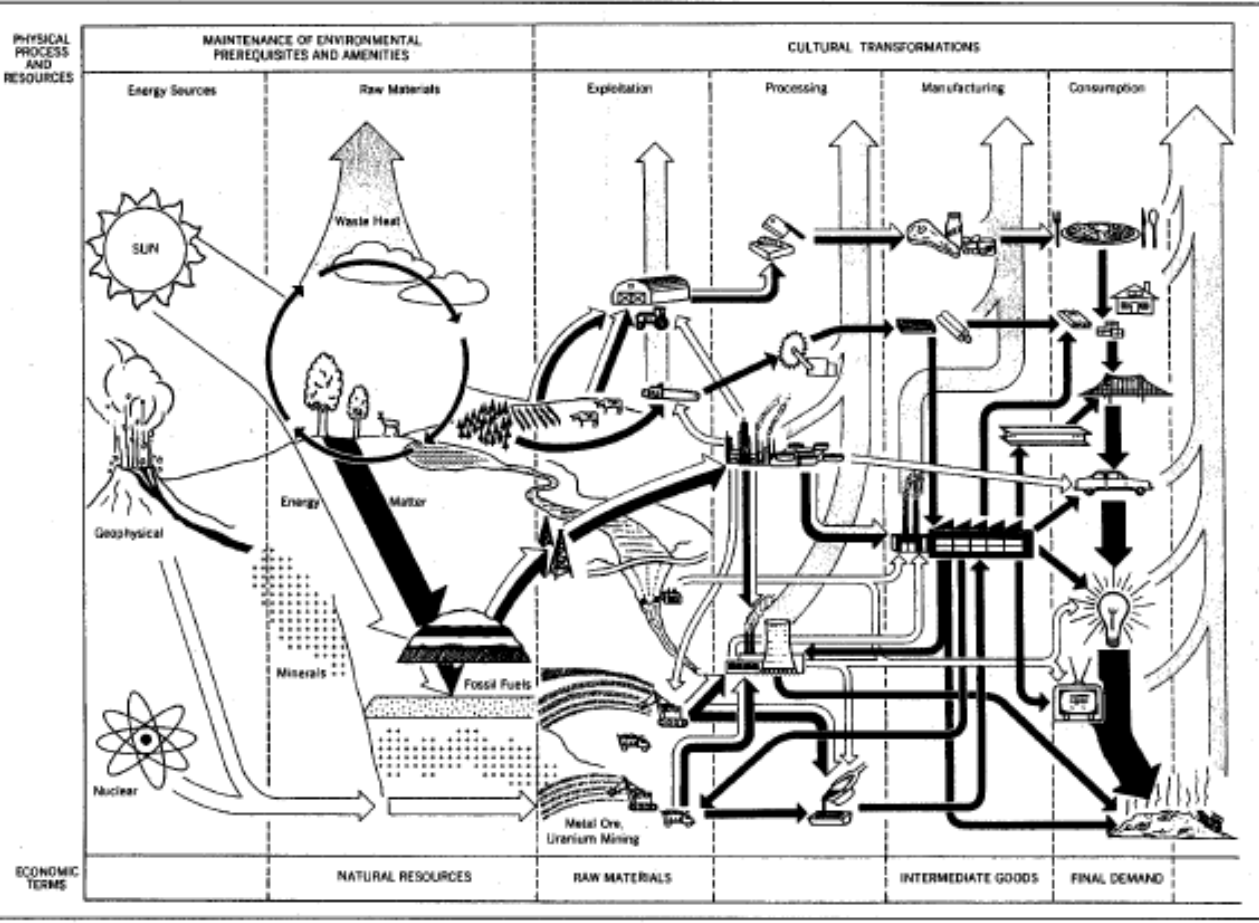
- L'étroit couplage entre prospérité économique et consommation d'énergie a été clairement établie. La décroissance, avec ses conséquences, est-elle inévitable ?
- Oui, probablement si l'on décidait de renoncer au nucléaire.
- Si l'on trouve à moyen terme des solutions, énergétiquement rentables, et plus acceptables pour la société, en particulier en développant de nouvelles sources d'électricité nucléaire, alors la décroissance n'est peut-être pas inéluctable.

Bibliographie

- Alfred J. Lotka, "Contribution to the Energetics of Evolution", Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Vol. 8, No. 6 (1922), pp. 147-151
- Carsten Herrmann-Pillath, « The evolutionary approach to entropy », Ecological Economics 70 (2011) 606–616
- Eric J. Chaisson, "The Natural Science Underlying Big History", The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 384912
- L.M. Martyushev et al., "Maximum entropy production principle in physics", chemistry and biology, Physics Reports 426 (2006)
- Reiner Kümmel and Dietmar Lindenberger, "How energy conversion drives economic growth far from the equilibrium of neoclassical economics", New Journal of Physics 16 (2014) 125008
- Gaël Giraud and Z. Kahraman, "How Dependent is Growth from Primary Energy ? Output Energy Elasticity in 50 Countries", (2014)
- Friedrich Wagner, "Electricity by intermittent sources: An analysis based on the German situation 2012", Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 20
- Dominique Grand et al., Transition énergétique et mix électrique: ... , La Revue de l'Énergie n° 619 – mai-juin 2014
- Roland Vidil et al., Le mirage de mix électriques à très forte proportion d'énergies intermittentes, La Revue de l'Énergie n° 634 – novembre-décembre 2016

Bibliographie

- Charles A. S. Hall et al., What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?, *Energies* 2009, 2, 25-47
- Jessica G. Lambert et al., Energy, EROI and quality of life, *Energy Policy* 64 (2014) 153
- Charles A. S. Hall et al., Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil:..., *American Scientist*, Vol. 97, No. 3 (2009), p. 230
- Charles A. S. Hall et al., EROI of different fuels and the implications for society, *Energy Policy* 64 (2014) 141
- D. Weißbach et al., Energy intensities, EROIs, and energy payback times of electricity generating power plants, *Energy* 52 (2013) 210-221
- D. Weißbach et al., Reply on “Comments on ‘Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants’ - Making clear of quite some confusion”, *Energy* 68 (2014) 1004-1006
- Armin Huke et al., The Dual Fluid Reactor - A novel concept for a fast nuclear reactor of high efficiency, *Annals of Nuclear Energy*. 80 (2015), S. 225–235
- Olivier Vidal et al., Metals for a low-carbon society, *Nature Geoscience* 6, (2013) 894-896



C. Hall, D. Lindenberger, R. Kümmel, T. Kröger, W. Eichorn *The Need to Reintegrate the Natural Sciences with Economics*, BioScience, August 2001 / Vol. 51 No. 8, 663-673

Figure 2. A more comprehensive and accurate model of how economies actually work. The second column of this diagram represents the entire global ecosystem milieu within which the rest of the global economy operates. Natural energies drive geological, biological, and chemical cycles that produce natural resources and public service functions and maintain the milieu essential for all other economic steps. Extractive sectors use economic energies to exploit natural resources and convert them to raw materials. Raw materials are used by manufacturing and other intermediate sectors to produce final goods and services. These final goods and services are distributed by the commercial sector to final demand. Eventually, nonrecycled materials and waste heat return to the environment as waste products. We believe this diagram to be the minimum model of how a real economy works.

Qualité de l'énergie échangée

Table 2. Specific exergy of different fuels, from Hermann [24].

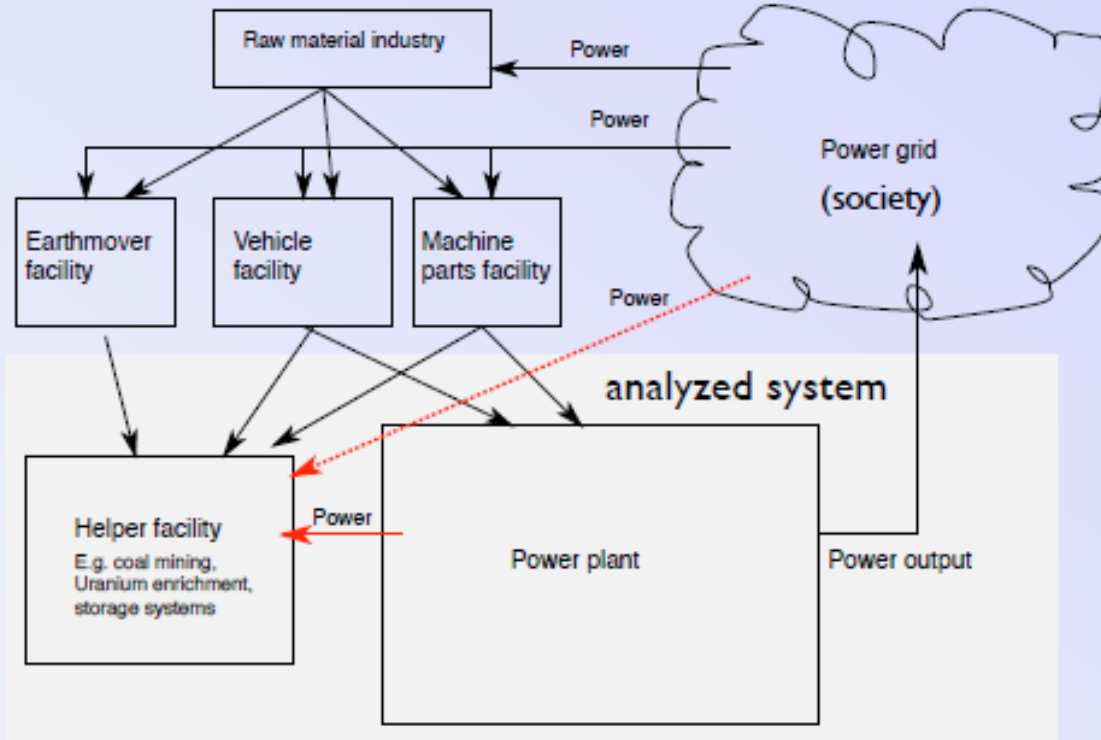
Fuel	Exergy [MJ/kg]	Error (+/-)
Coal	25.00	5.00
Bituminous coal (Blacksville)	29.81	
Bituminous coal (Absaloka)	19.87	
Petroleum	42.00	2.00
Heavy oil (bitumen)	40.00	
Oil shale (Estonian)	12.00	
Tar sands (US)	6.00	
Natural gas (representative, 80% humidity)	50.50	
Methane clathrate (Mid-America trench)	4.80	
Uranium 235	75000000.00	
Uranium 238	77000000.00	
Thorium 232	78000000.00	

From David J. Murphy et al.,
Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels, Sustainability 2011, 3, 1888-1907

Énergie vs. exergie

Fuel	Exergy [MJ/kg]	Error (+/-)
Lignin	25.00	
Cellulose	17.00	1.00
Eucalyptus (dry)	19.90	
Poplar (dry)	19.20	
Corn stover (dry)	18.20	
Bagasse (dry)	17.80	
Water hyacinth (dry)	15.20	
Brown kelp (dry)	10.90	
OTEC (20K difference)	<0.01	
Geothermal (150K difference)	0.13	

Méthodologie. Limites du système



Example:

Energy demand $E_{in,2}$ of on-site pump operation

Method 1:

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in,1} + E_{in,2}}$$

Method 2:

$$EROI = \frac{E_{out} - E_{in,2}}{E_{in,1}}$$

Buffering for inherent volatile techniques included
Real societal exergy/energy flows evaluated

Which one is correct?
→ „Investors point of view“

D'après Daniel Weißbach

Résultats

Net output [MW]	820
Load per year [h]	7500
Operational life time [a]	35
E_I , building [TJ]	470 (11% electrical)
E_I , decommissioning [TJ]	30
E_I , maintenance [TJ]	255 (14% electrical)
E_I , natural gas provisioning [TJ]	26100
EROI	28
E_I , biogas provisioning [TJ]	201,000 (60% electrical)
EROI	3.5

Table 1: EROI for gas-fired power plants. Key figures taken from [17]. The energy payback times for natural gas and biogas are 9 and 12 days, respectively.

D'après
Daniel
Weißbach

	Poly-Si roof / field	Amorphous roof / field
Embodied energy [MJ]	2102 / 2172	880 / 950
Lifetime energy production [MJ]	8353	2000
EROI	4.0 / 3.8	2.3 / 2.1
EROI, buffered	2.3 / 2.3	1.6 / 1.5

Table 3: EROIs for solar photovoltaics with 1,000 peak hours per year (Germany) using the energy inputs from Tab. 2. The energy payback times are in the range from 6 years (unbuffered) to 16 years (buffered).

Résultats

Installed capacity	1.5 MW
Full-load hours	2000 (flat land in Northern Schleswig-Holstein)
Lifetime	20 years
Lifetime output	216 TJ
Energy demand for construction	12.9 TJ, thereof 8% electrical (Geuder [32] 13.6 TJ)
Energy demand for maintenance	0.3 TJ (0% electrical)
Decommissioning	unknown, probably negligible
Corrected EROI	16
Corrected EROI, buffered	4

Table 5: Modified energy input and resulting EROI for the E-66 wind turbine based on [32]. The energy payback times are in the range from slightly above 1 year (unbuffered) to 5 years (buffered).

Installed capacity	90 MW
Lifetime	100 a
Location	Waitaki River, New Zealand
Full-load hours	3000 (predictable)
Energy demand construction	1800 TJ
Energy demand maintenance	75 TJ (100 TJ for an assumed turbine replacement not included here)
Decommissioning	60 TJ
EROI	50
EROI, buffered	35

Table 6: EROI of run-of-river hydro power plant, New Zealand, based on numbers from [7]. The energy payback times are in the range from 2 years (unbuffered) to 3 years (buffered).

D'après
Daniel Weißbach

Résultats

	Hard coal (underground mining)	Brown coal (open pit mining)
Installed capacity (net)	509 MW	929 MW
Full-load hours	7,500	7,500
lifetime	50 a	50 a
Annual hard coal usage	1.16 Mt	5.85 Mt
Construction energy demand	1,970 TJ (9% electrical)	4,600 TJ (12% electrical)
Decommissioning energy demand	91 TJ	170 TJ
Maintenance and operation energy demand	7,400 TJ	7,050 TJ
Coal extraction energy demand	14,500 TJ (60% electrical)	29,250 TJ (60% electrical)
Sum energy demands over lifetime	23,960 TJ (37% electrical)	40,170 TJ (45% electrical)
EROI	29	31

Table 7: EROIs of typical open pit brown coal and underground-mining hard coal power plants based on [42] and [45]. Transportation of mined hard coal is ignored, and the electricity for brown coal mining is assumed to be provided by the corresponding plant, building one unit. The energy payback time is about 2 months.

D'après Daniel Weißbach

Our institute (IFK) uses EROI analyses for the design of power plants with the highest possible efficiency utilizing contemporary technology

The Dual Fluid Reactor

A concept beyond Generation IV

Huke, et al. *Annals of Nuclear Energy* **80** (2015) 225–235

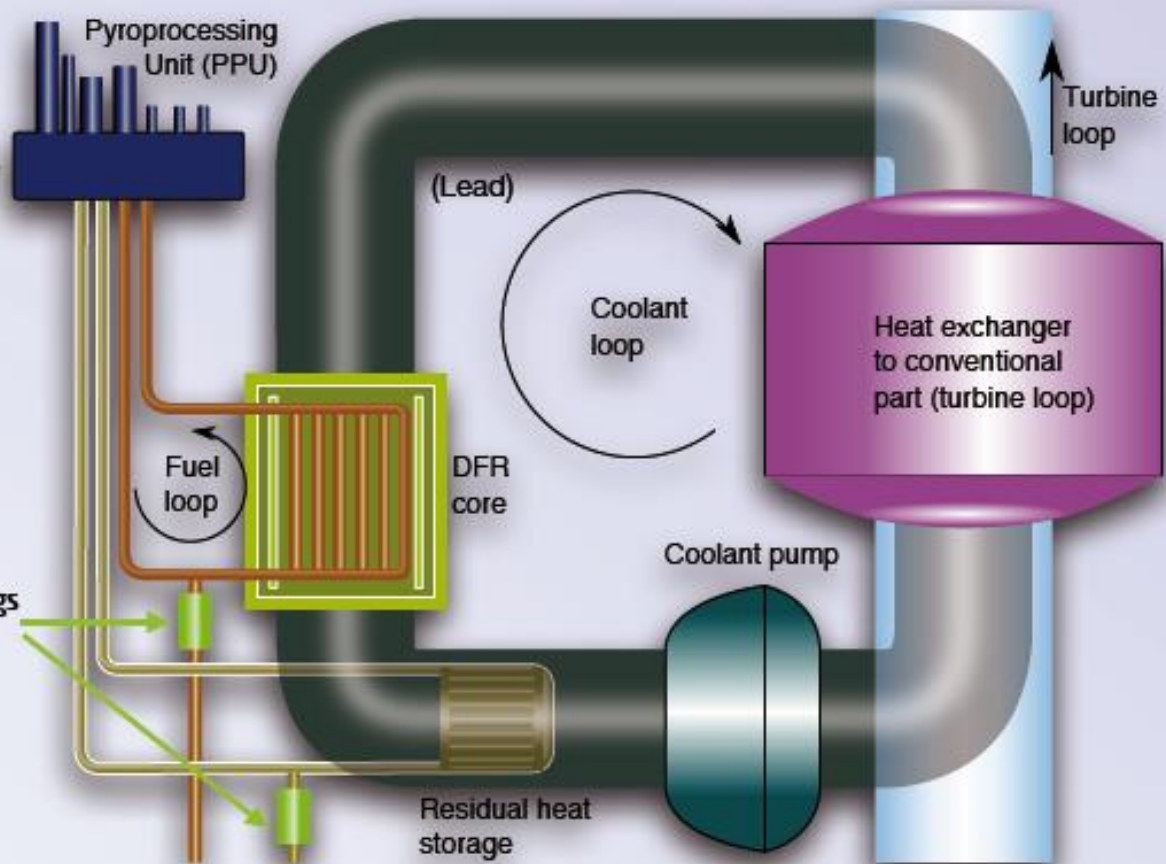
- Natural Uranium
- Depleted Uranium
- Thorium
- Used fuel elements

- Fission products
- Med. radioisotopes
- Fissile material

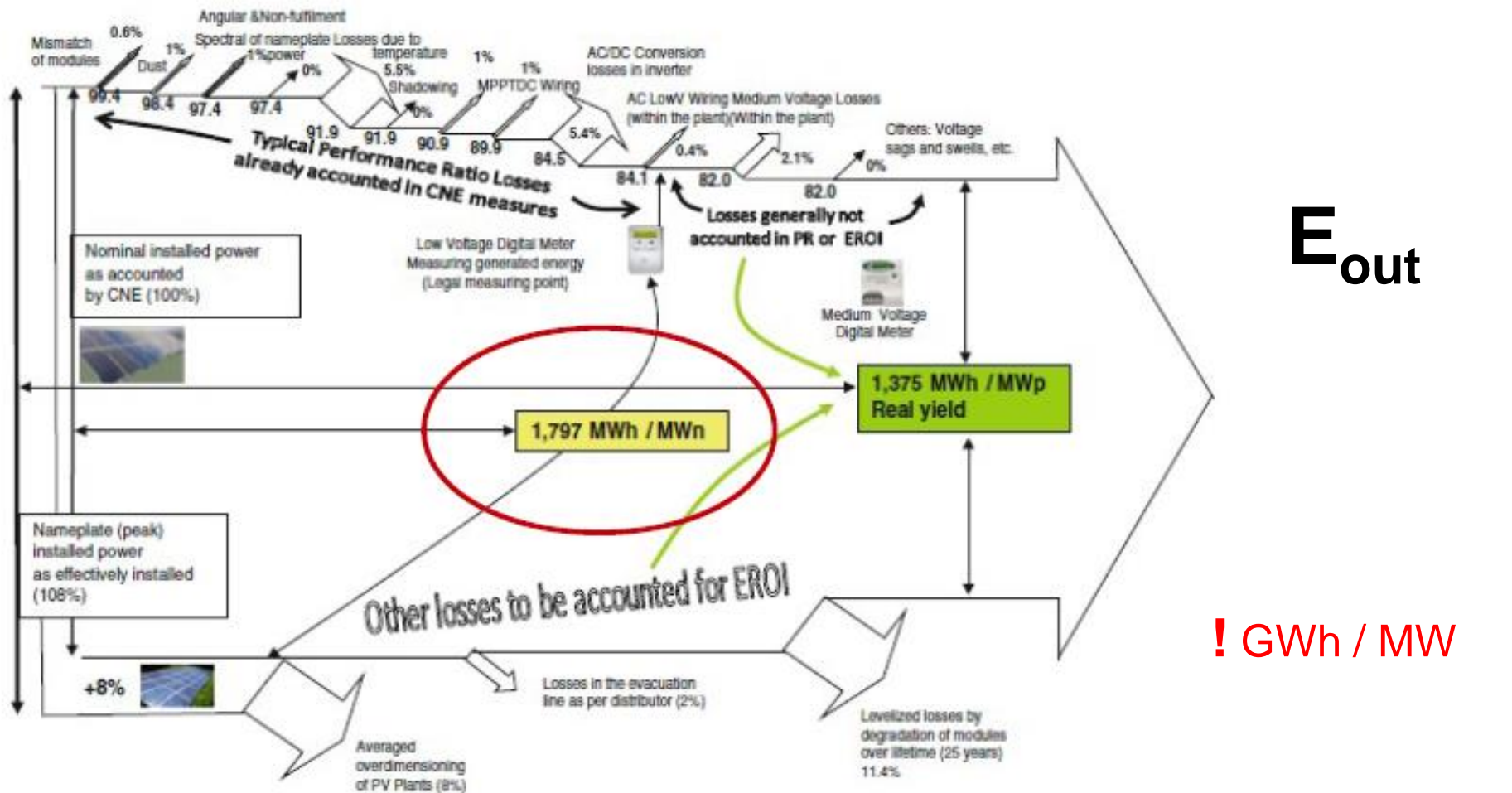
Melting fuse plugs = run-away safe



International patent protection for the Dual Fluid principle since Sep. 2011



From Daniel Weißbach



E_{out}

! GWh / MW

D'après Pedro Prieto

Sankey diagram of solar PV energy in Spain

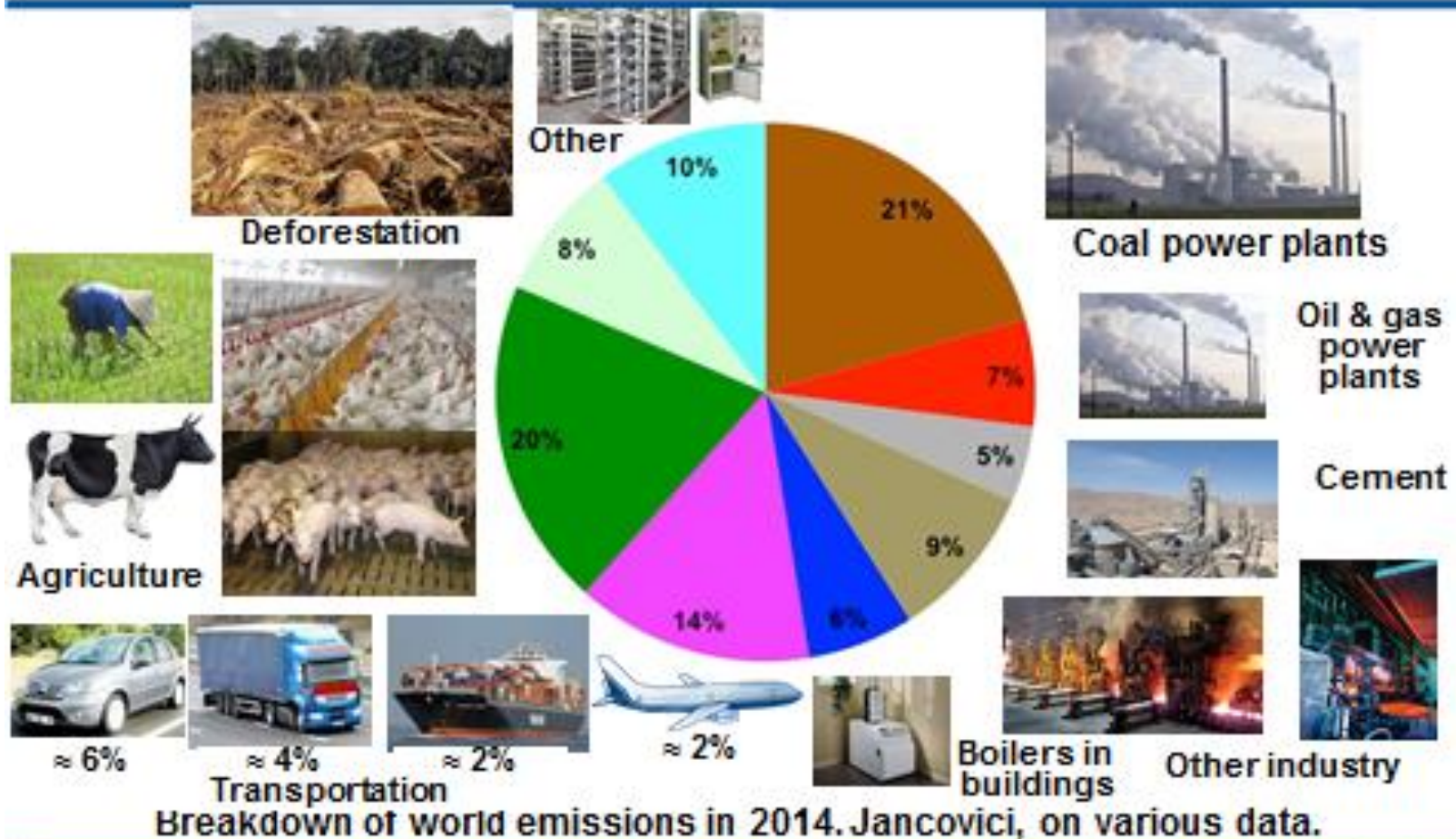
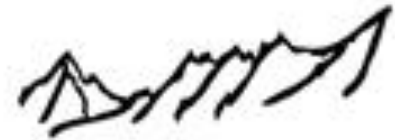
- Cycle de vie du solaire photovoltaïque → 25 ans
- Analyse des pertes (défauts de synchronisme entre panneaux, poussières, orientation, dégradation des performances avec le temps, effets thermiques, conversion DC-AC, puis LV-MV et lignes de transmission)

Estimation de l'énergie investie (E_{in})

- Les panneaux photo-voltaïques $\rightarrow E_{out} / E_{in} = 8.3$
- Dépenses sociétales: accès, fondations, canalisations, clôtures $\rightarrow \sim 1.1\%$ of E_{out}
- Lignes électriques $\rightarrow \sim 0.1\%$ of E_{out}
- Manpower $\rightarrow \sim 7.7\%$ of E_{out}
- Entretien des panneaux (nettoyage) $\rightarrow \sim 0.2\%$ of E_{out}
- Auto-consommation $\rightarrow \sim 0.5\%$ of E_{out}
- Sécurité et surveillance $\rightarrow \sim 2.4\%$ of E_{out}
- Transport $\rightarrow \sim 1.9\%$ of E_{out}
- Vol et vandalisme $\rightarrow \sim 0.2\%$ of E_{out}
- Contrôle, gestion à distance $\rightarrow \sim 0.03\%$ of E_{out}
- Défaillance $\rightarrow \sim 0.8\%$ of E_{out}
- Adaptation du réseau électrique $\rightarrow \sim 3.5\%$ of E_{out}
- Arrêt prématuré $\rightarrow \sim 2.8\%$ of E_{out}
- Assurances, administration, taxes, foncier $\rightarrow \sim 0.8\% + 0.5\% + 0.3\% + 0.2\%$ of E_{out}
- Communication, coûts personnel indirect $\rightarrow \sim 0.5\% + 0.4\%$ of E_{out}
- Stabilisation du réseau (cycles combinés) $\rightarrow \sim 3.9\%$ of E_{out}
- Stabilisation du réseau (stockage massif) \rightarrow **non pris en compte**
- Emplois directs \rightarrow minimum 5.% of E_{out}

D'après Pedro Prieto

Dividing emissions by 3, where do we start?



www.manicore.com



From Jean-Marc Jancovici

WHY CONSIDERING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF BATTERIES ?

What is the foreseeable battery fleet ?

Scenario :

- getting rid of fossile fuels to drastically decrease GHG emissions.
- no increase in worldwide energy consumption and cars (contrary to the predictions which are between x2 and x3 in 2050).

1. Vehicles

Massive electrification of vehicles with no increase in their number.
 10^9 vehicles * 30kWh/vehicle = **30 TWh of storage**



2. Renewable energy storage

Barnhardt&Benson 2013:
 for 50-80% renewables mix, global storage capacity
 should be ~4 to 12 hours of world average power demand.
 World electric consumption = 20,450 TWh in 2014 (indexmundi.com)
 4-12 hours = **9-30TWh of storage**
 Consistent with Tesla estimation of 7-10 kWh/home.



We thus consider a global battery fleet of 50 TWh

This is not an extreme value as it does not include long term storage for which batteries are not well suited

D'après Fabien Perdu

WHY CONSIDERING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF BATTERIES ?

What is 50 TWh of batteries ?

- It is 140 years of current production rate of PbA batteries
- Or nearly 1000 years of current production rate of every other type of battery
- To produce 50 TWh in 10 years (must be shorter than battery life...), we will need 140 gigafactories.



1 gigafactory = 1,3km²
= 35GWh/year



Science for energy scenarios | Fabien Perdu | 8

D'après Fabien Perdu