

# *L'évaluation des systèmes énergétiques à l'aide de l'indice EROI*

Présentation et Discussion du concept d'ERoEI, (Energy Return on Energy Invested), comme outil d'évaluation des systèmes énergétiques.

(Tentative de compte-rendu du 3ème séminaire des Houches "Science for Energy Scenarios" (6-11 mars 2016))

<http://science-and-energy.org/>

**Gérard Bonhomme**

Professeur émérite à l'Université de Lorraine

[gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr](mailto:gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr)

Mes remerciements à tous les auteurs des contributions dans lesquelles j'ai pu puiser pour préparer cette présentation

# Motivation

- La **transition énergétique** ambitionne une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, alors que ~85% de la consommation mondiale d'énergie primaire provient encore des combustibles fossiles.
- Un déploiement massif des énergies renouvelables intermittentes permettra-t-il, sans recours au nucléaire, d'atteindre les objectifs fixés ?
- Problème des EnR intermittentes:
  - ✓ faible intensité énergétique,
  - ✓ caractère intermittent (→ surplus et problème du stockage, backup nécessaire, stabilité des réseaux électriques).
- Mais outre le problème de la disponibilité, quid de la “qualité” de l'énergie délivrée et de la rentabilité énergétique ?

→ Existe-t-il un outil permettant d'évaluer les performances des systèmes énergétiques ?

→ Energy return on Energy investment (ERoEI) =  $E_{out} / E_{in}$  ?

# Plan de l'exposé

- D'où vient, et que mesure cet indice EROI (ou ERoEI) introduit par Charles Hall en 1970 alors qu'il étudiait la migration des saumons en Amérique du Nord ?
- Quelle est la pertinence de cet indice, appliqué aux sociétés humaines (corrélation avec le niveau de vie ?) et à différents systèmes énergétiques (Fuels vs. EnR, énergie vs. exergie) ?
- Les problèmes de méthodologie ont particulièrement été discutés par Daniel Weißbach, qui a appliqué le concept aux différents systèmes de génération d'électricité.
- L'application aux EnR pose en particulier le problème des conditions aux limites. Pedro Prieto, qui fût très impliqué dans le programme PV espagnol a publié avec C. Hall une étude exhaustive.
- Critiques, voies d'amélioration du concept et de la méthodologie. Quelles conclusions pratiques pour la construction de scénarios?

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

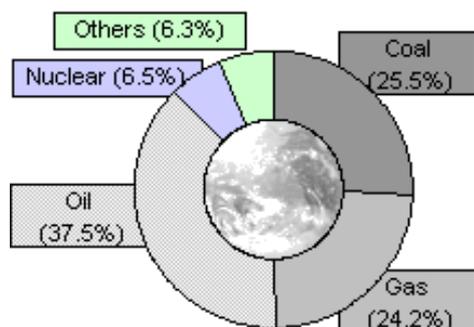
- Loi de transition énergétique Française de 2015 :
  - ✓ Réduction de la part du nucléaire à 50% dans la production d'électricité
  - ✓ Baisse des émissions de CO<sub>2</sub> de 40% d'ici 2030
- Roadmap 2050 de l'UE publiée en 2011 :
  - ✓ Réduction de 40-50 % des émissions totales en Europe (~ 11% 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

- part du nucléaire dans la production d'électricité réduite à 50 % à l'horizon 2025
- 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)
- 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)
- Rénover 500.000 logements par an: objectif de 150 kWh/m<sup>2</sup>/an en 2030

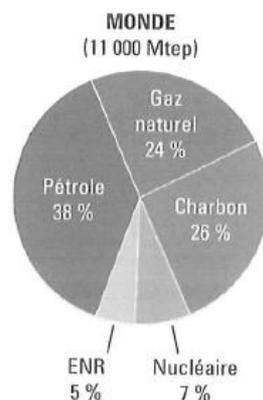
# Rappel: Énergie primaire et production d'électricité

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

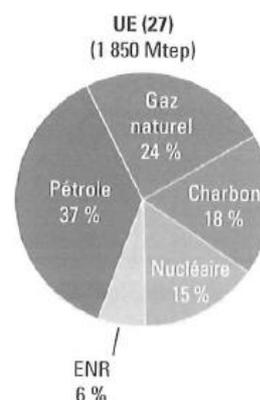


**Structure de la production d'électricité (2007)**

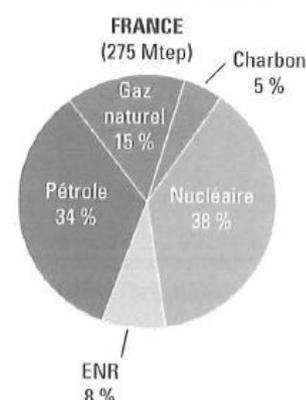
1 Mtep =  $10^6$  tonne équivalent pétrole,  
 1 tep ou toe correspond à ~ 12 000 kWh  
 1 TW =>  $24 \times 365 = 8760$  TWh/an



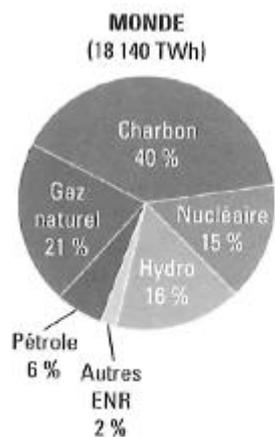
**11 000 Mtep par an  
 ~ 132 000 TWh/an  
 correspond à ~ 15 TW**



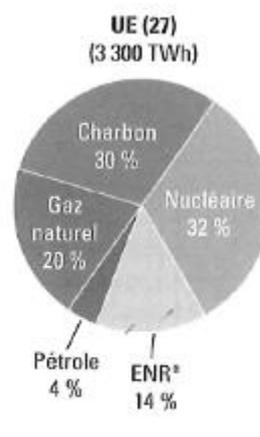
**TAUX DE DÉPENDANCE : 56 %**  
 • Pétrole : 75 % importé  
 • Gaz naturel : 60 % importé  
 • Charbon : 40 % importé



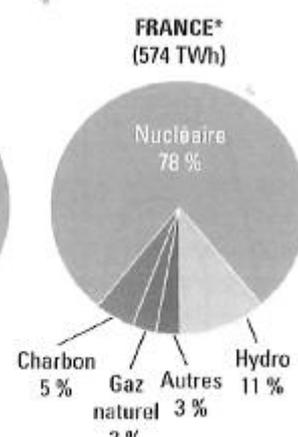
**TAUX DE DÉPENDANCE : 51 %**  
 • Pétrole : 99 % importé  
 • Gaz naturel : 95 % importé  
 • Charbon : 100 % importé



**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

# 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  $0.5 \text{ W/m}^2$  ou 5 kW/ha) → 12 kWh/j par personne
- Solaire photovoltaïque et panneaux thermiques sur les toitures :
  - 10 m<sup>2</sup> de toit équipés en panneaux PV → 7 kWh/j (énergie de haute qualité)
  - 2 m<sup>2</sup> de capteurs thermiques à eau chaude → 3.6 kWh/j (énergie dégradée)

## → Total 42.6 kWh/j par personne

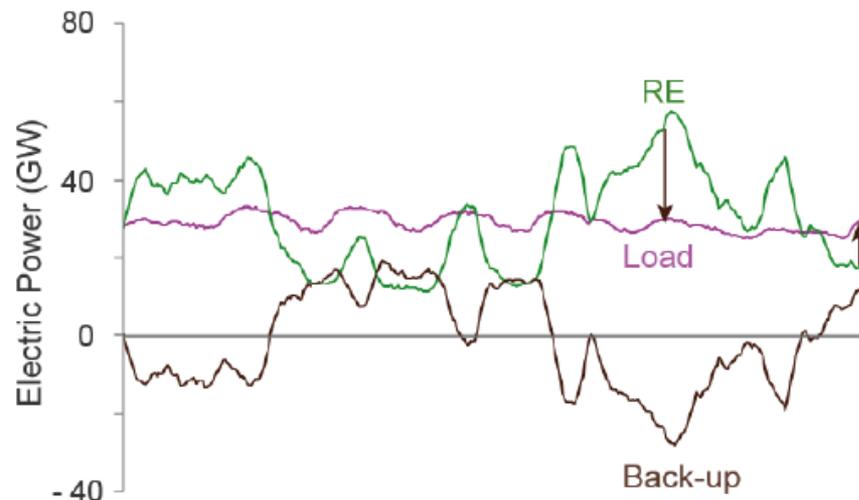
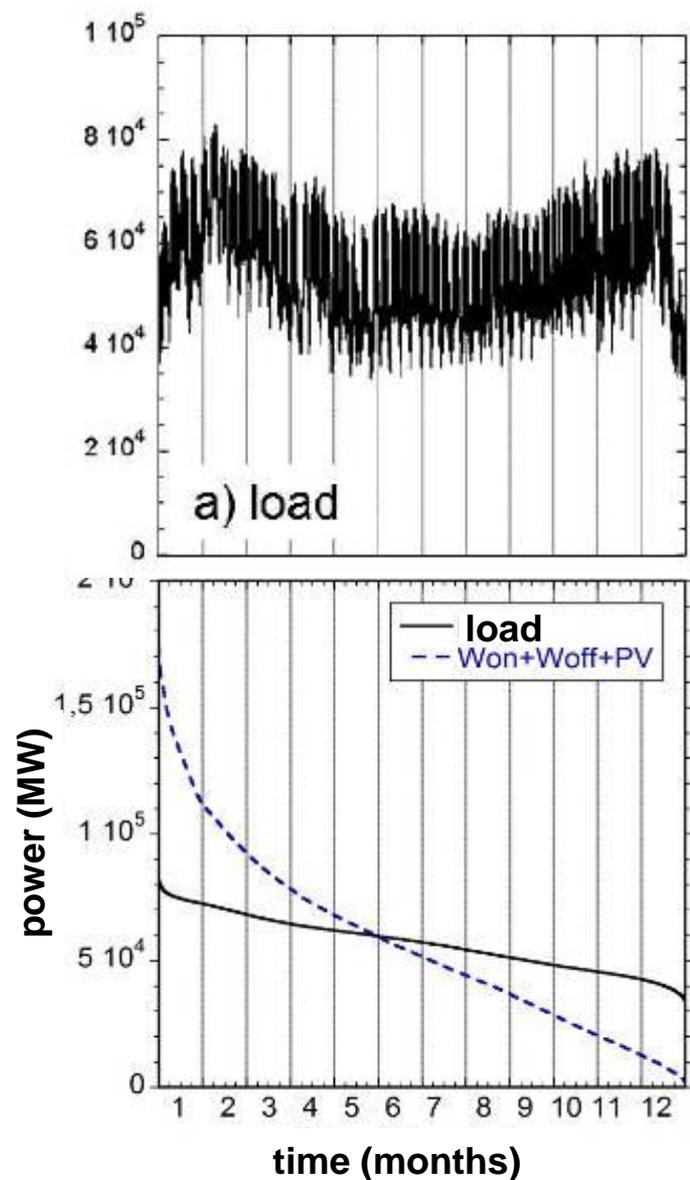
- ⇒ Fermes solaires requises : 5% de la superficie de l'Europe (450 m<sup>2</sup> par pers.)  
→ 54 kWh/j par personne

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 problèmes posés par l'intermittence des EnR

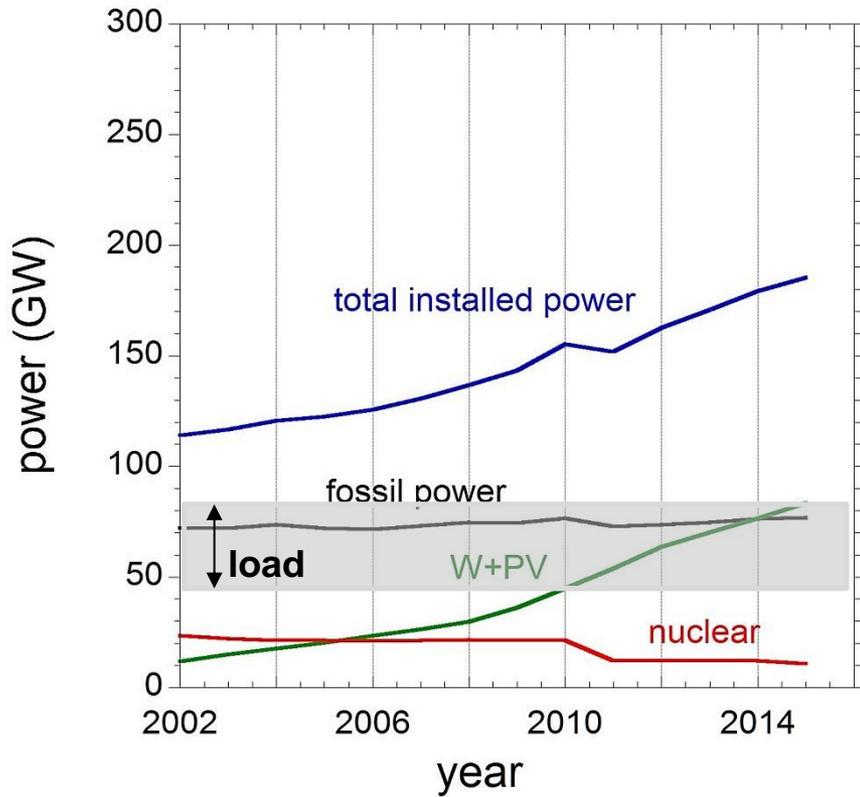


- Surplus perdu en l'absence de solutions de stockage suffisantes
- "Back-up" nécessaire
- Instabilité du réseau au-delà de 40% d'ENR intermittentes

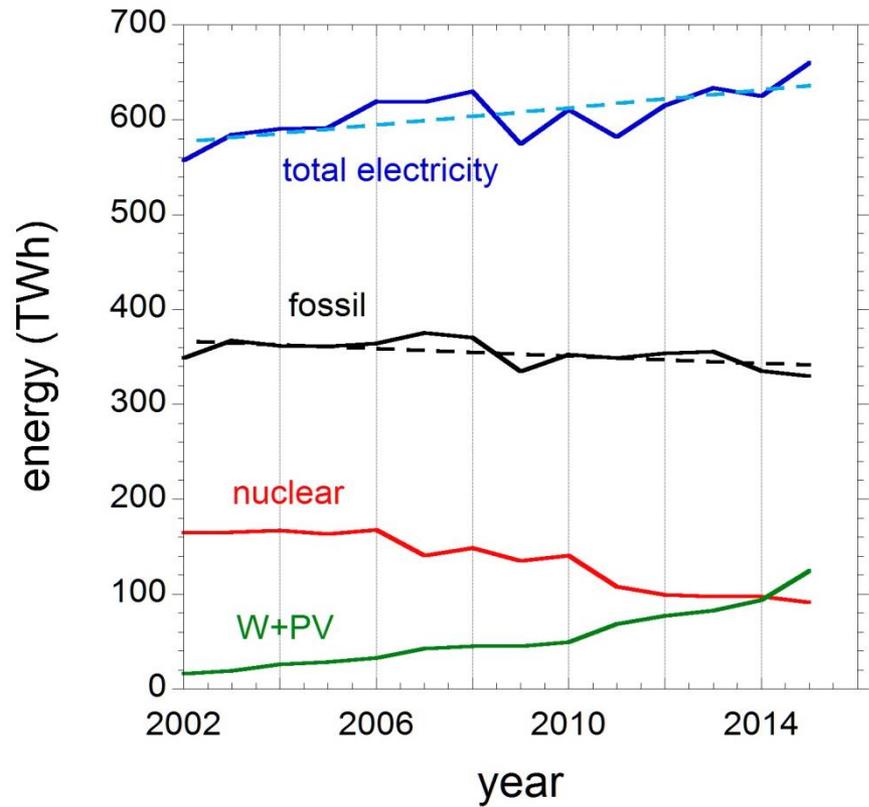
[ From F. Wagner, Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 20 ]

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

# How much power has to be installed?

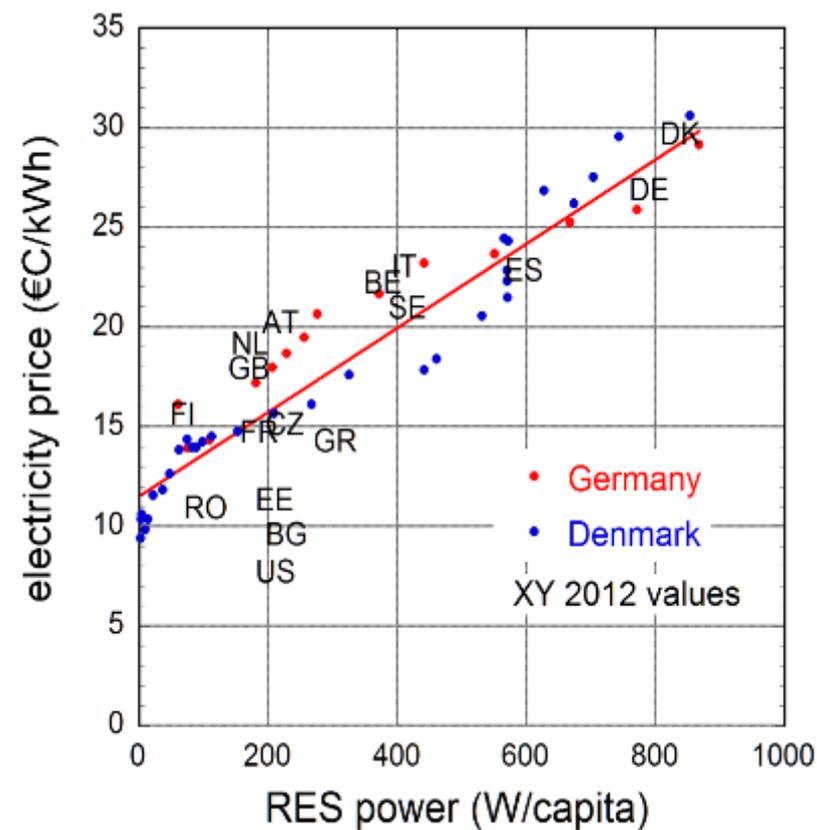
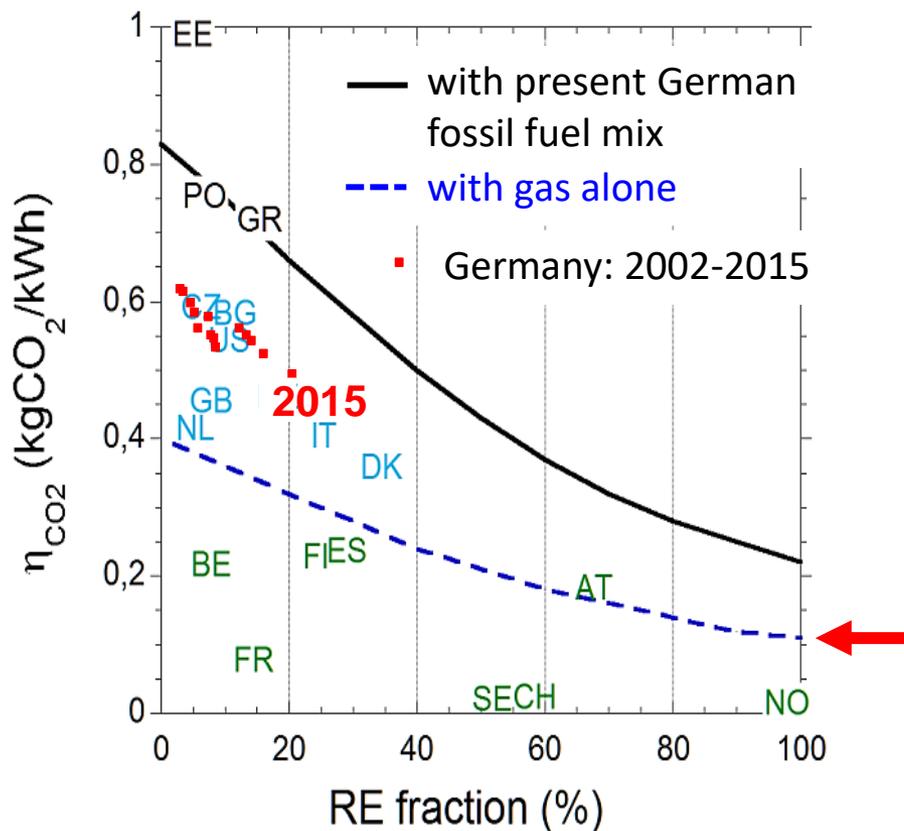


## Energy TWh



d'après F. Wagner

# Conséquences du déploiement des EnR intermittentes

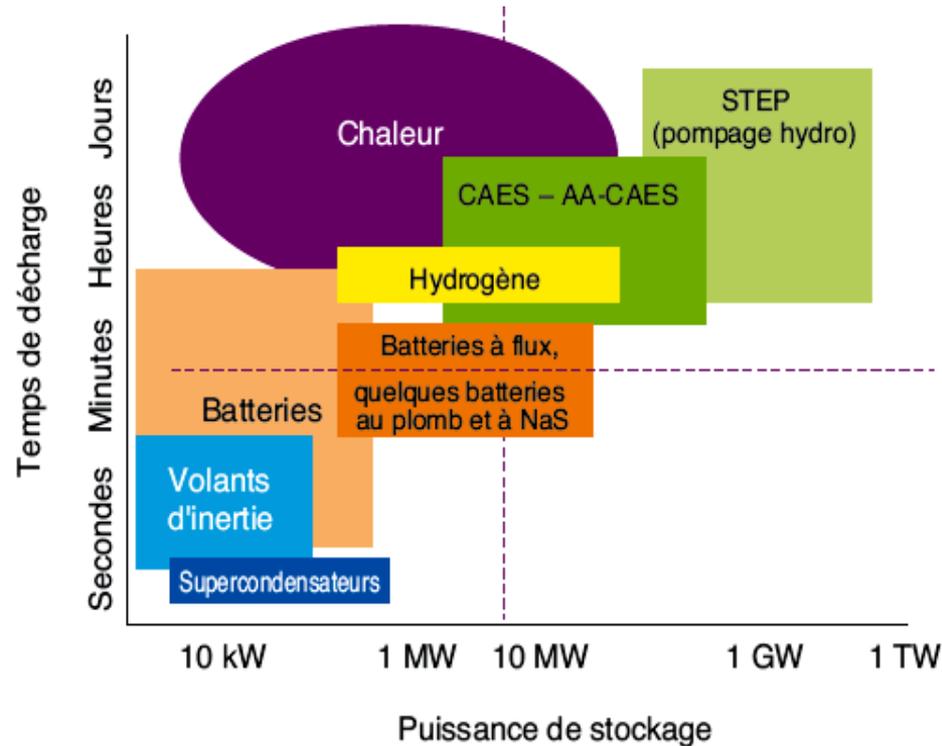
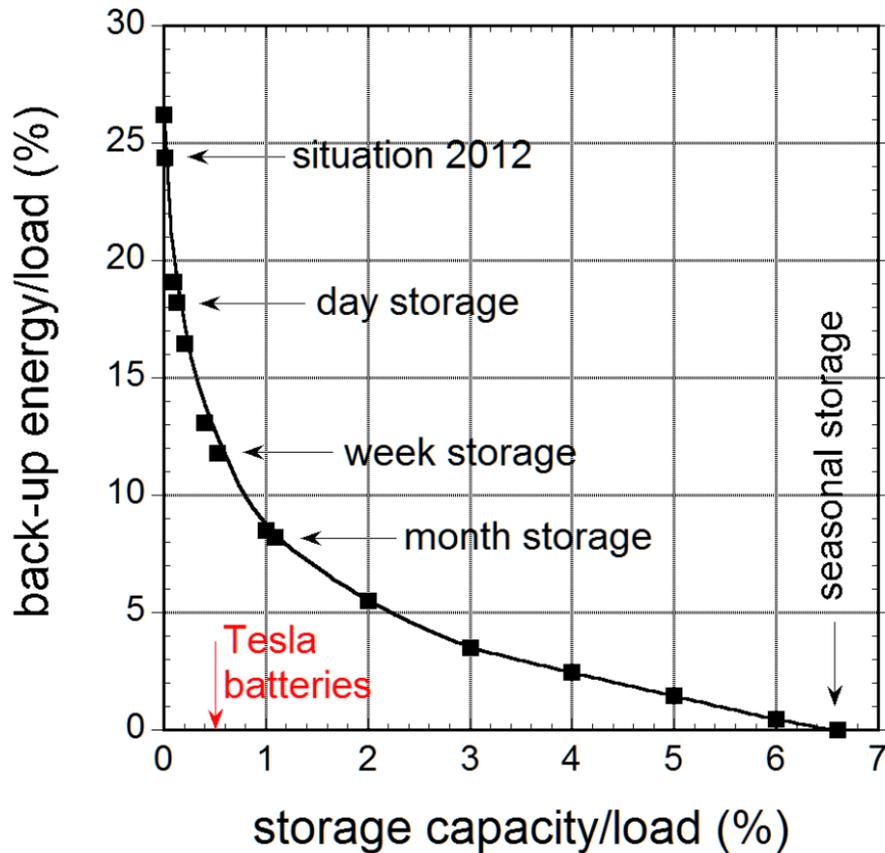


## Émissions de CO<sub>2</sub>

Pour la France la baisse à 50% de la part du nucléaire conduirait à un doublement des émissions de CO<sub>2</sub> [D. Grand, Ch. Le Brun, R. Vidil, Techniques de l'Ingénieur, juillet 2015, IN301]

## Coût de l'électricité

# 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

# “Die Energiewende” en Allemagne

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

d'après F. Wagner

# 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?

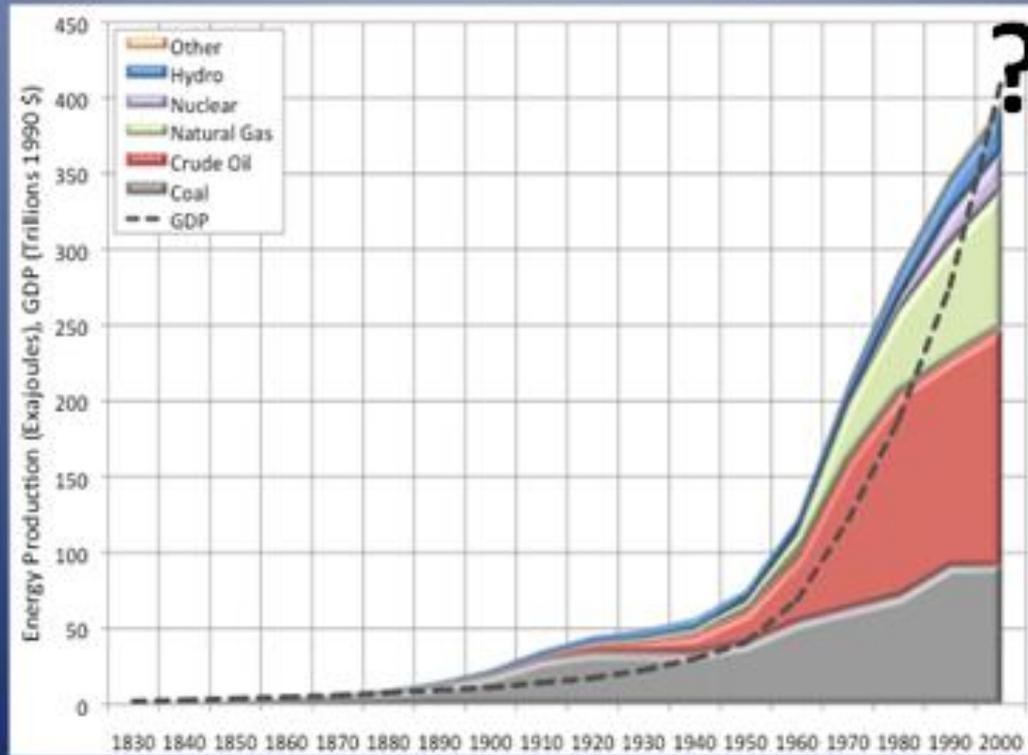
→ environ un minimum de 5 Calories  
est gagné pour chaque Calorie  
investie dans la migration

'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.

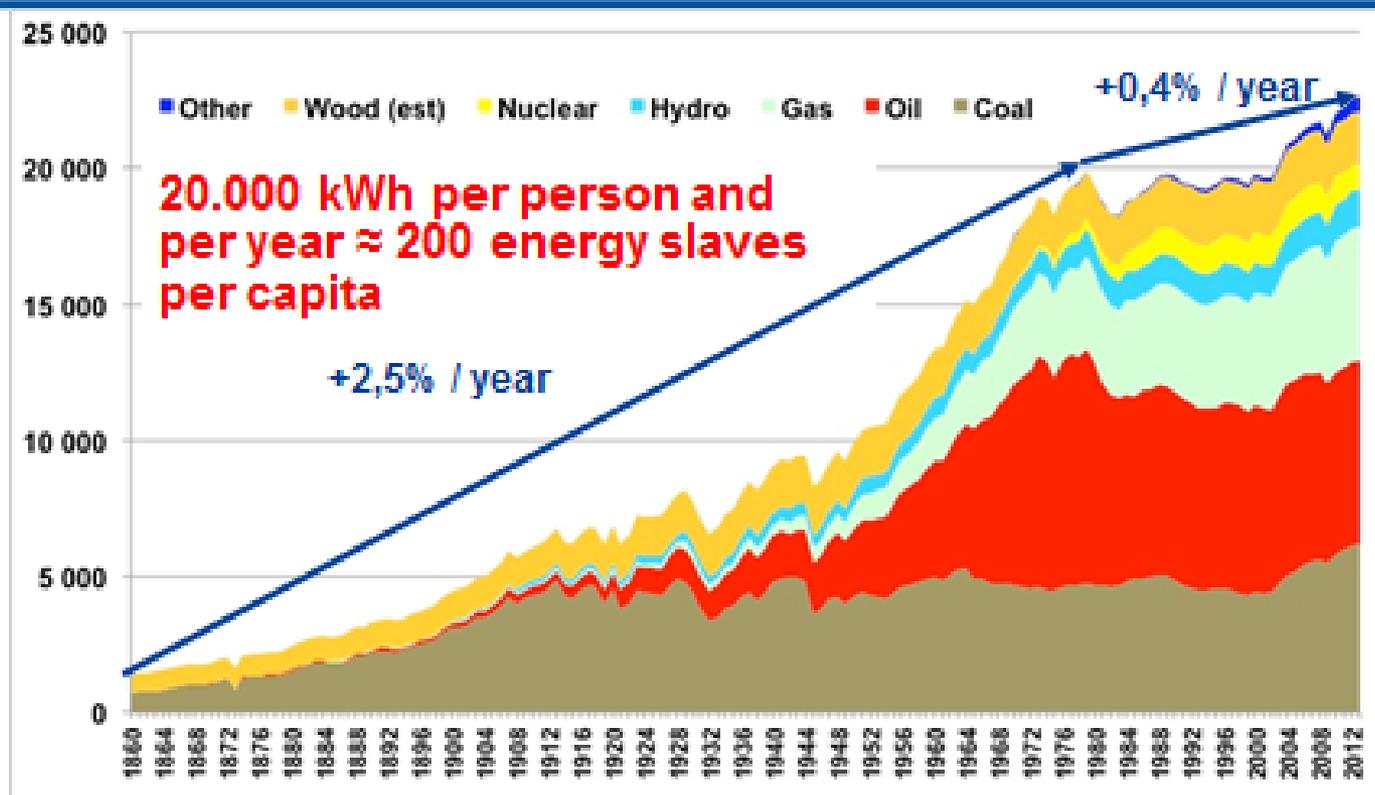
# The dirty secret to wealth production: Use more energy



From Charles Hall

Au cours de l'histoire des sociétés humaines, et ceci depuis la préhistoire, une croissance quasi-monotone du flux d'énergie est observée.

# 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](http://www.manicore.com)

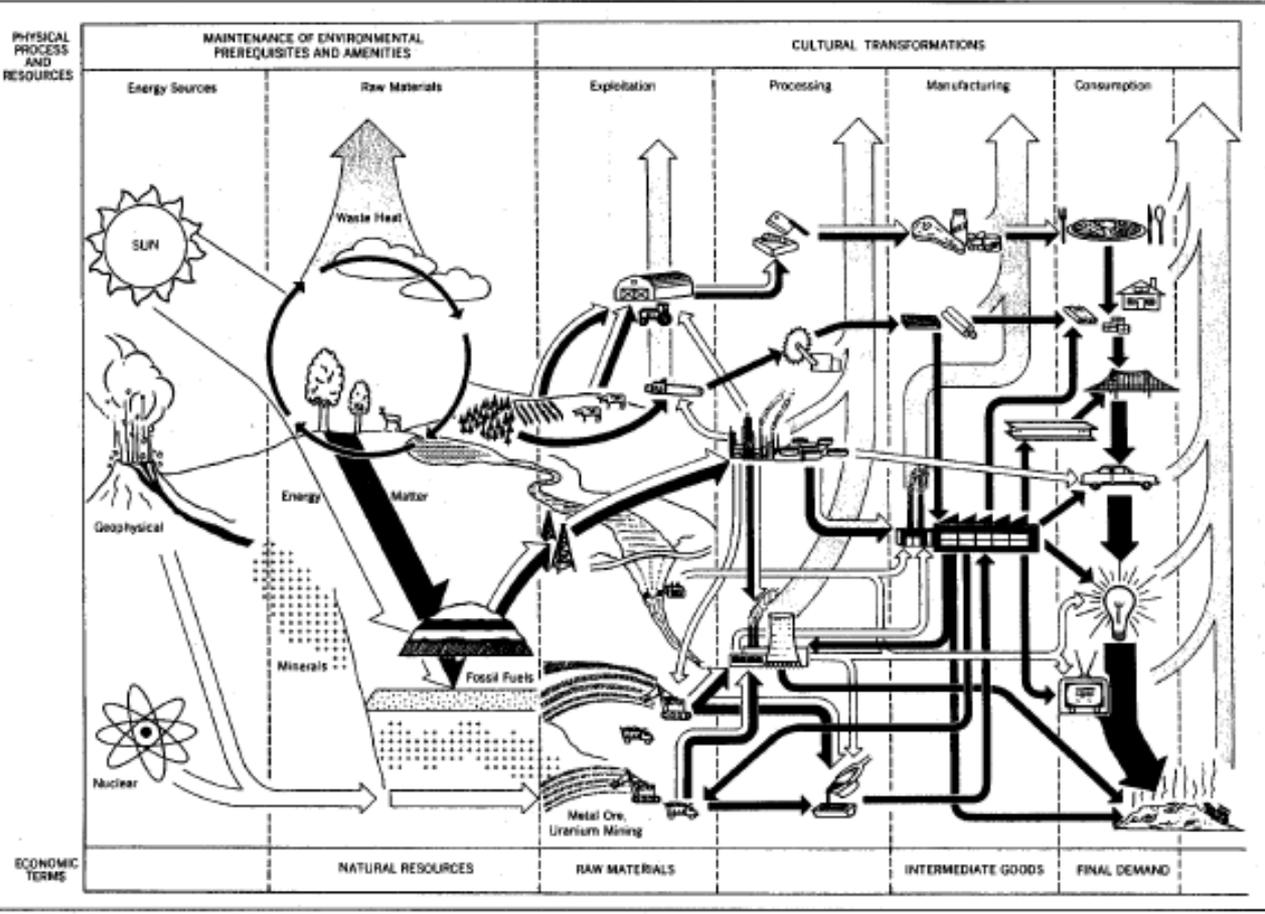


20 MWh = 72 GJ, et 100 kWh/an = 0.36 GJ/an

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

# Les modèles économiques et l'énergie

- La relation entre flux d'énergie et sa nécessité pour maintenir une société et une organisation complexe a fait l'objet de développements récents, e.g. John Constable (directeur de la Renewable Energy Foundation, [www.ref.org.uk](http://www.ref.org.uk)), et Reiner Kümmel, dans des approches interdisciplinaires fondant ainsi la thermoéconomie.
- Ces approches s'appuient sur le second principe de la thermodynamique, selon lequel l'apparition et l'entretien d'un état (organisé) à basse entropie, dans un système ouvert, n'est possible que si un flux d'énergie suffisant traverse ce système.
- Elles correspondent à des tentatives pour faire évoluer les concepts et les modèles macro-économiques, alors que les théories économiques dites néo-classiques n'intègrent ni l'énergie ni les ressources naturelles dans leurs approches.
- Quelques économistes (e.g. Steve Keen, Gaël Giraud) proposent une révision fondamentale des modèles macro-économiques

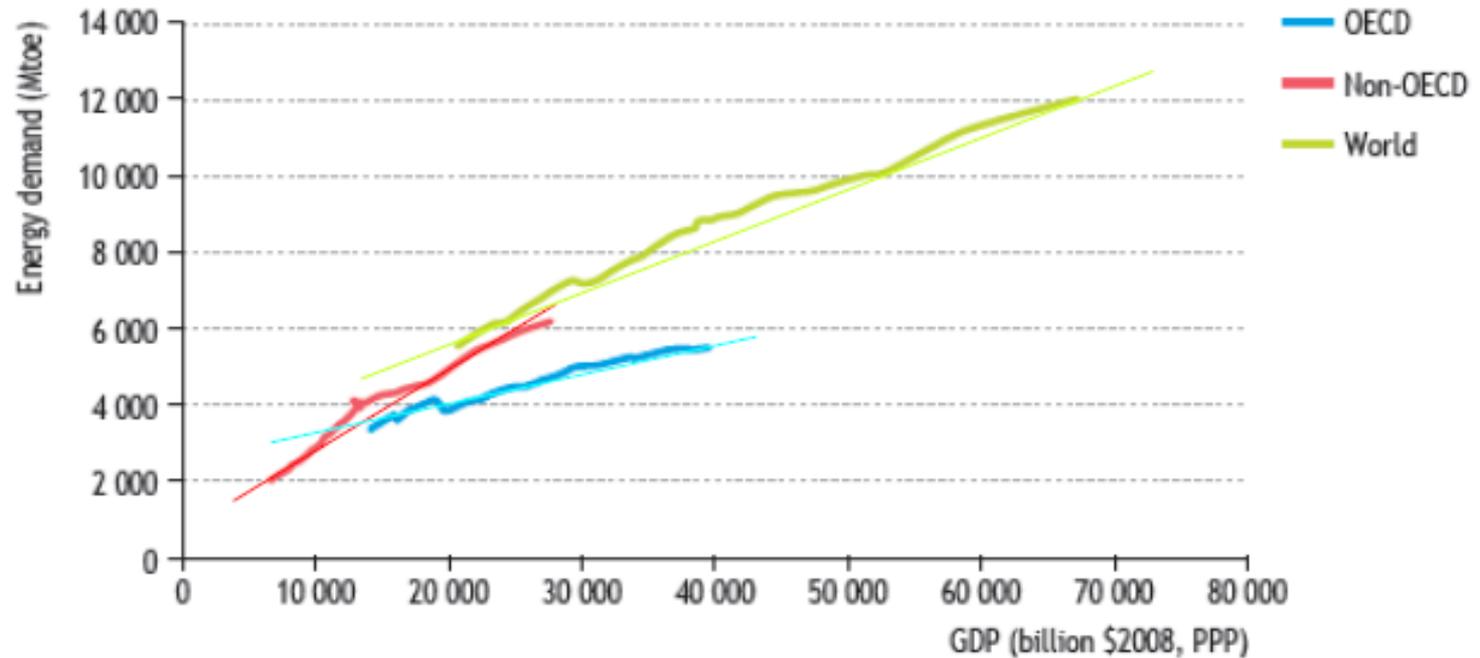


C. Hall, D. Lindenberger,  
 R. Kümmel, T. Kröger, W.  
 Eichorn *The Need to  
 Reintegrate  
 the Natural Sciences  
 with Economics,*  
 BioScience, August 2001  
 / Vol. 51 No. 8, 663-673

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.

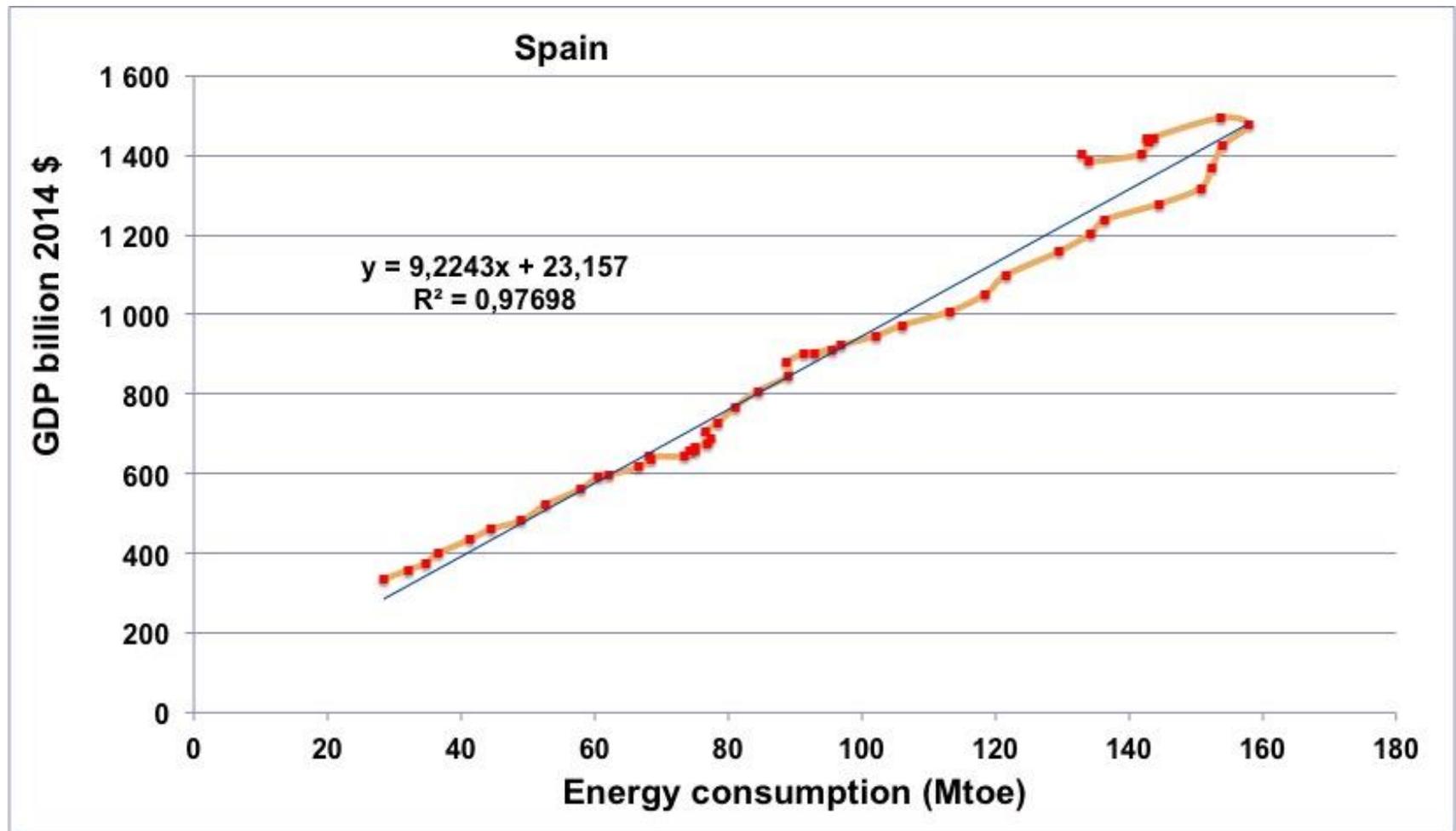
# Quelle relation entre Energie et Croissance ?

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



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

Et relation entre argent et énergie ? Energie primaire totale / PIB total → ~ 2 kWh/€  
d'après Pedro Prieto



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

from Jean-Marc Jancovici

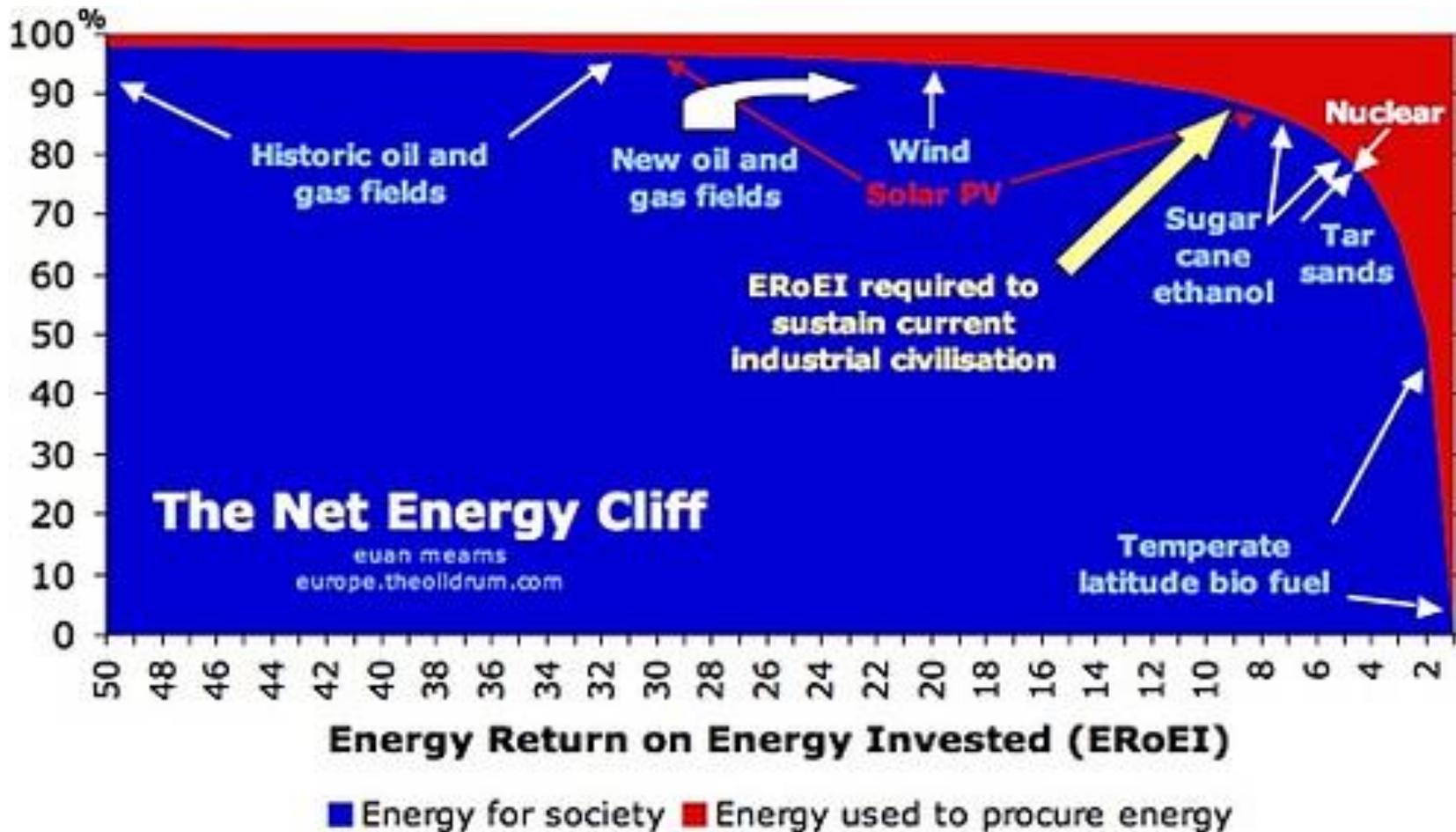


# Examining The Relation between Quality of Life and Biophysical vs Economic Conditions

Jessica G. Lambert  
March 8, 2016  
École De Physique des Houches  
[JLambert@NGEI-USA.org](mailto:JLambert@NGEI-USA.org)

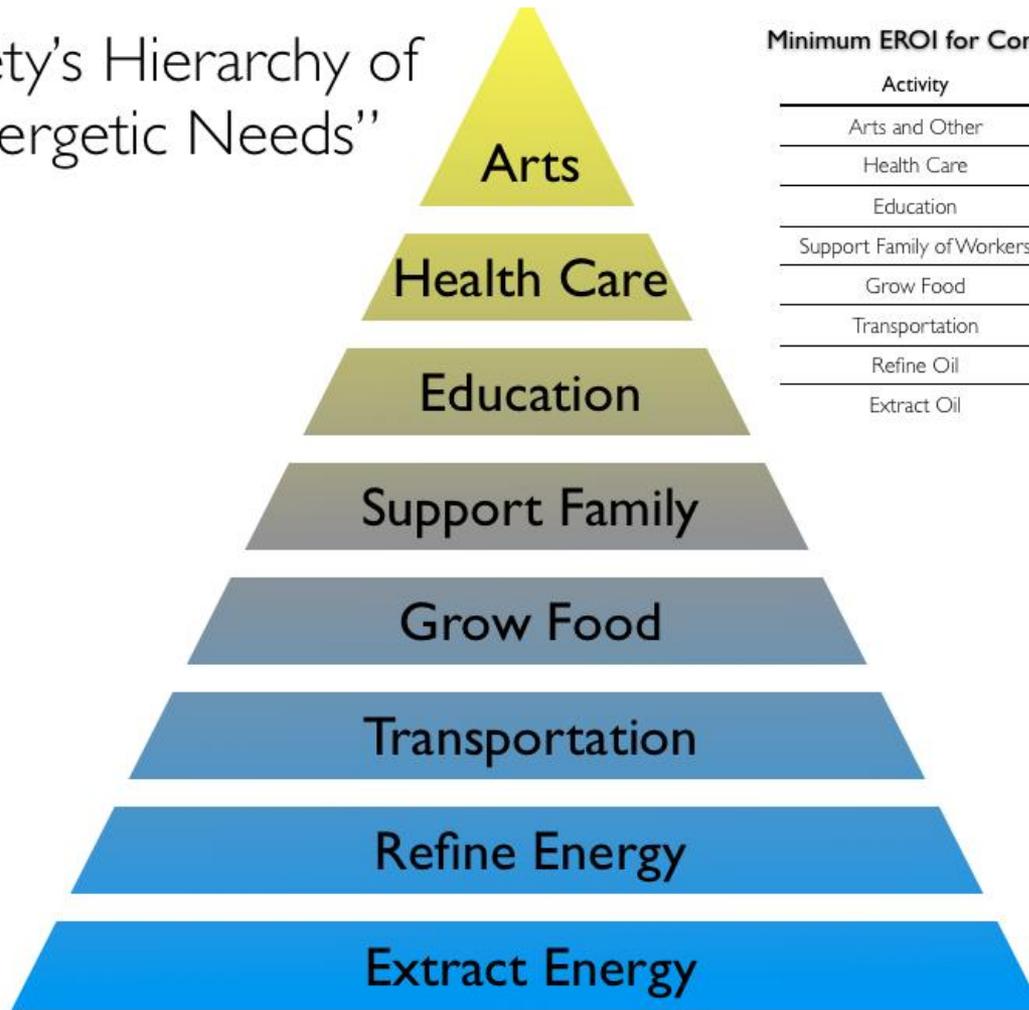
Comment mesurer la qualité de la vie et établir des corrélations avec des indices énergétiques ?

J. Lambert a introduit pour cela un EROI dit sociétal en mixant des grandeurs physiques (énergie par unité de fuel) et données économiques (prix par unité de fuel, PIB).



From Charles Hall and Jessica Lambert

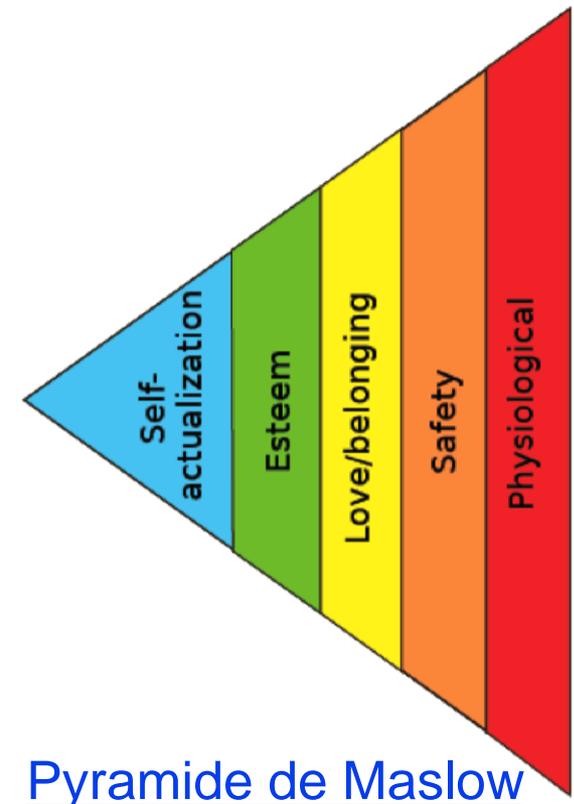
# Society's Hierarchy of "Energetic Needs"



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:

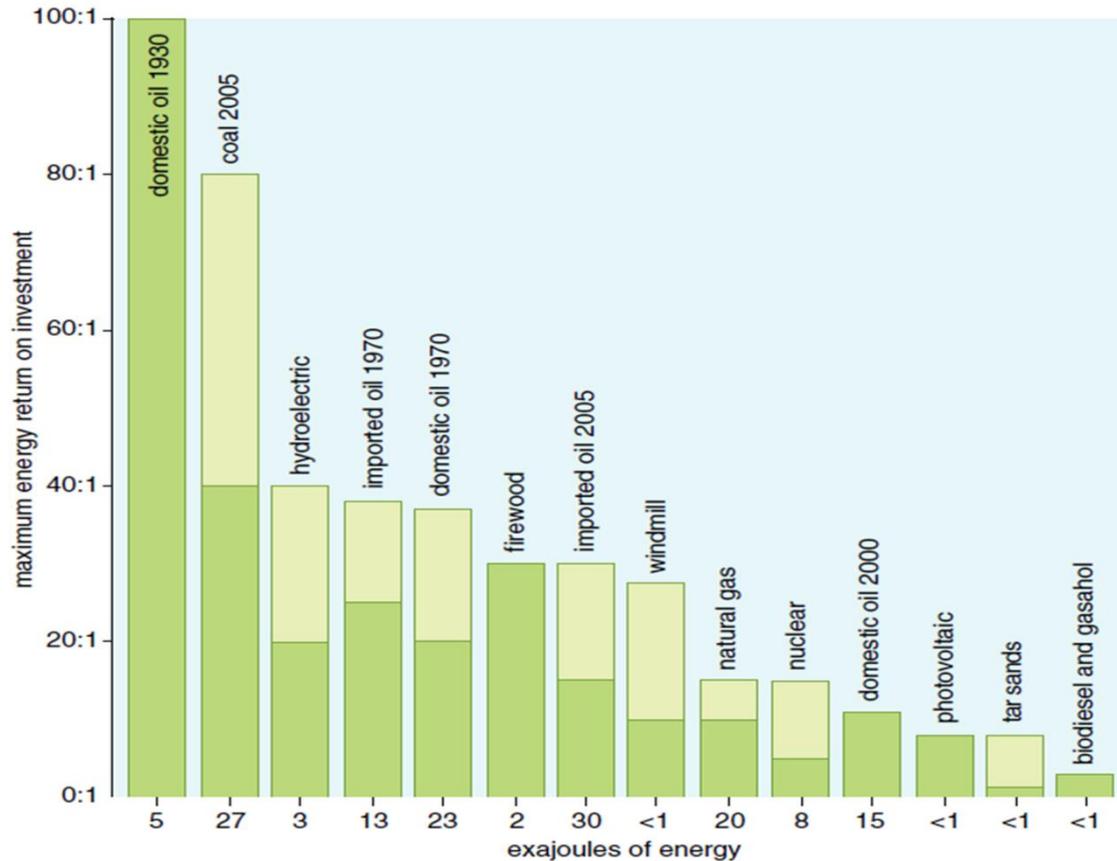
- EROIsoc of <15-25:1, <100 GJ per capita, <0.15-0.20 LEI tend to have a poor to moderate “quality of life”.
- A threshold is passed with an EROIsoc 20-30:1, 100-200 GJ per capita, 0.2-0.4 LEI which is correlated with a “higher” (e.g. an HDI index of above 0.7) standard of living.
- This improvement 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.

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

200 GJ/an ~ 152 kWh/j par personne

Rappel: moyenne européenne ~ 125 kWh/j

From Jessica Lambert



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) ;

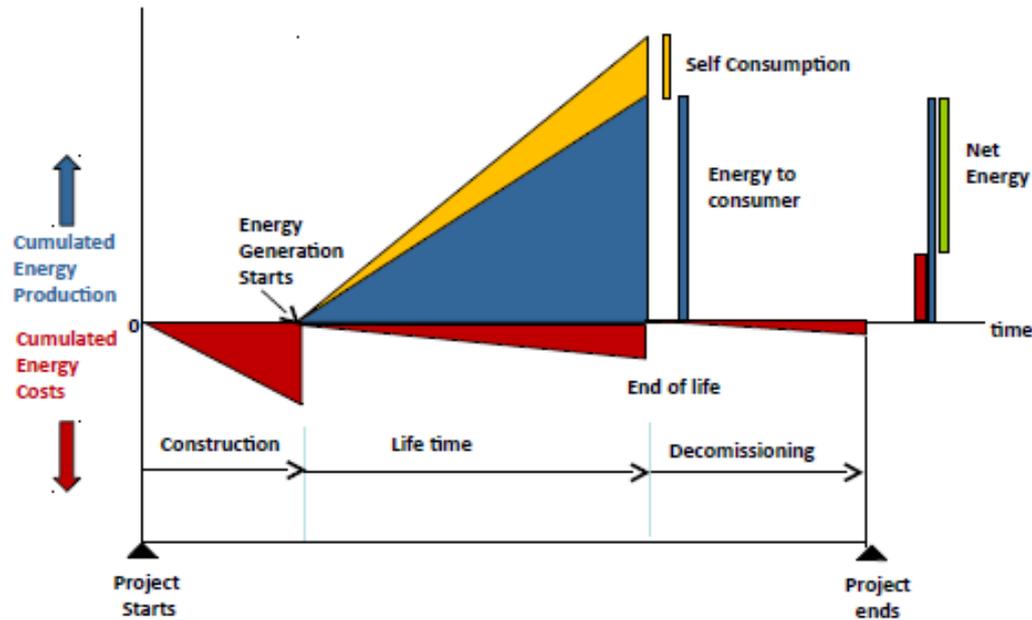
Problème: comment évaluer et comparer les EROIs pour les simples fuels (pétrole) et les systèmes complexes de génération de puissance ?

# 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

D'après Daniel Weißbach

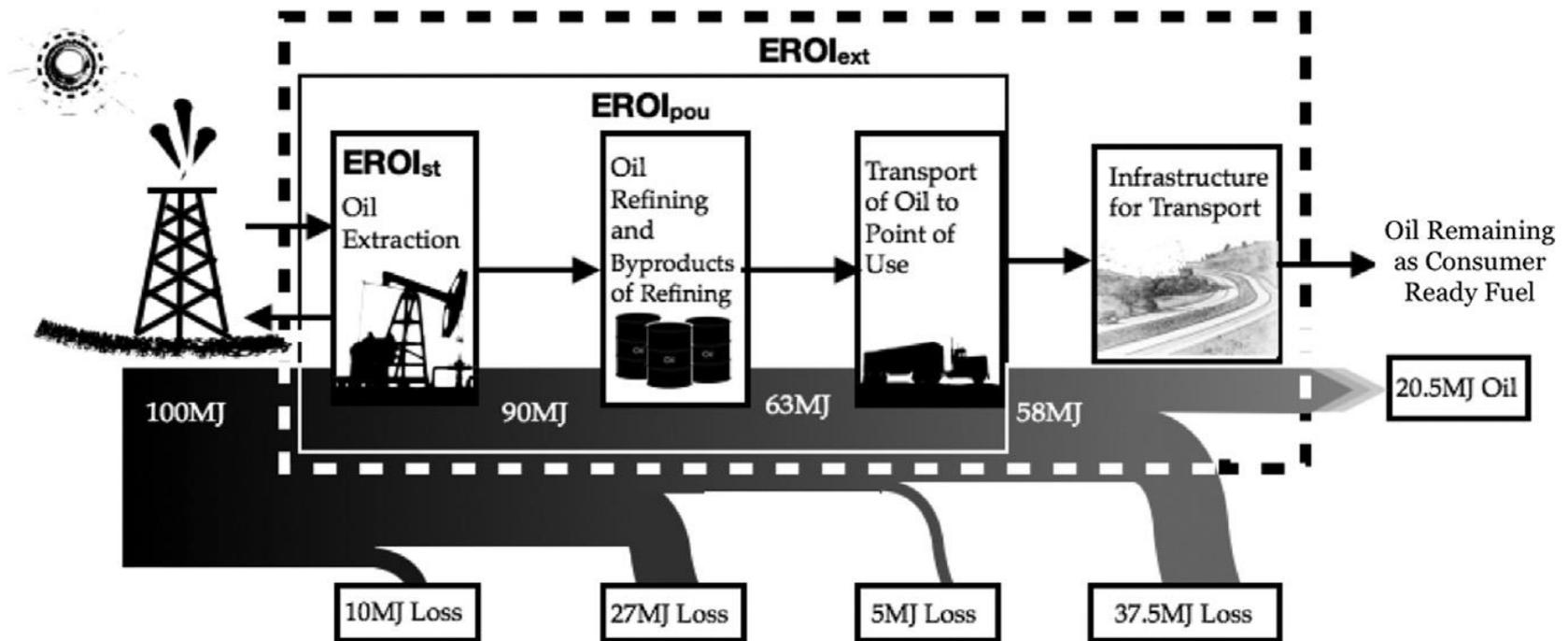
# Classic EROI Vision of an Energy System



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

Analyse de cycle de vie (LCA), d'après 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

# 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	

# 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.



# 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
<b>EROI</b>	<b>28</b>
$E_I$ , biogas provisioning [TJ]	201,000 (60% electrical)
<b>EROI</b>	<b>3.5</b>

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

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

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
<b>Corrected EROI</b>	<b>16</b>
<b>Corrected EROI, buffered</b>	<b>4</b>

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
<b>EROI</b>	<b>50</b>
<b>EROI, buffered</b>	<b>35</b>

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)
<b>EROI</b>	<b>29</b>	<b>31</b>

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

# Résultats

## Nuclear example

Installed capacity (net)	1,340 MW
Full-load hours	8,000
Lifetime	60 a
<b>Output</b>	<b>2,315,000 TJ</b>
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?

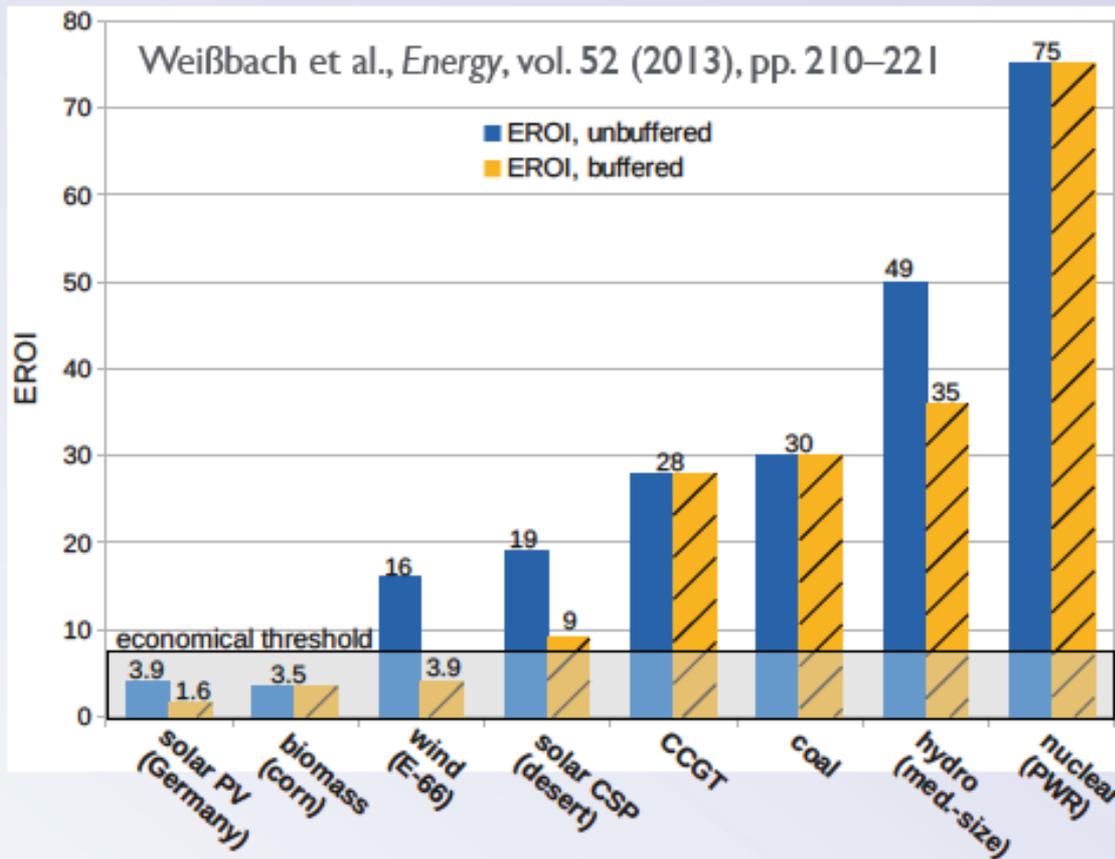
	<b>Coal</b>		<b>Nuclear (PWR)</b>
EROI	30	x 2,5	75
Energy content	Hydrocarbon atom: 2 eV	x 100 mil.	Uranium nucleus: 200.000.000 eV

D'après Daniel Weißbach

# 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

From Daniel Weißbach

# Pourquoi seulement 75:1 pour le nucléaire ?

- Pour la filière PWR :
  - ✓ Coût énergétique de l'enrichissement
  - ✓ Très faible utilisation du contenu énergétique du combustible
- 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, mais chlorures au lieu de fluorures), avec circuits distincts pour combustible et caloporteur (Pb).
  - ✓ Un EROI 20× plus grand ( $\geq 2000:1$ , limite théorique 10000) pourrait être atteint
- Quid des futurs réacteurs à Fusion ?

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

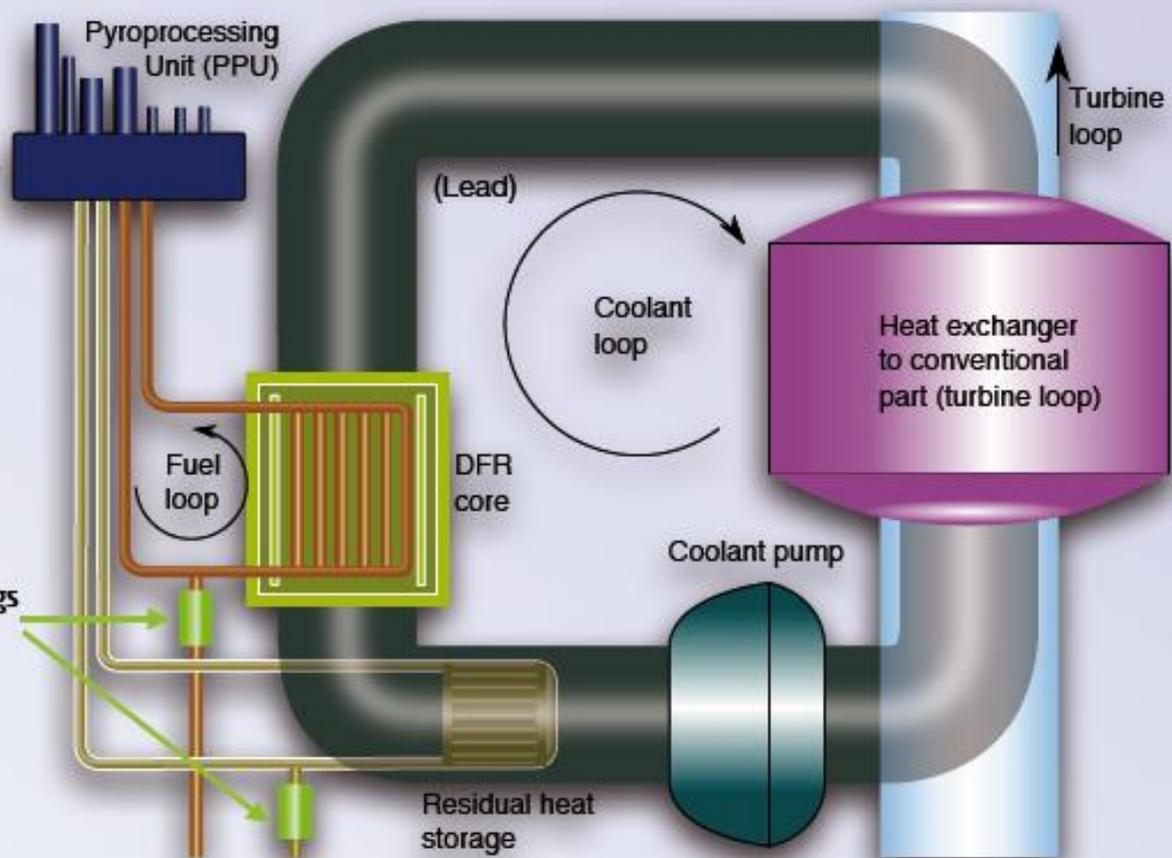
- Natural Uranium
- Depleted Uranium
- Thorium
- Used fuel elements

- Fission products
- Med. radioisotopes
- Fissile material

Melting fuse plugs = run-away safe



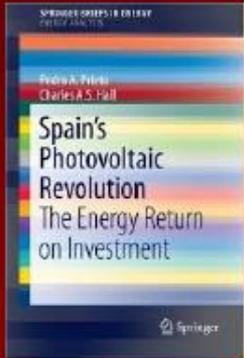
International patent protection for the Dual Fluid principle since Sep. 2011



From Daniel Weißbach

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

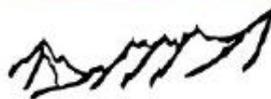
## The net EROI for solar PV: a case study for Spain



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



UNIVERSITÉ  
Grenoble  
Alpes

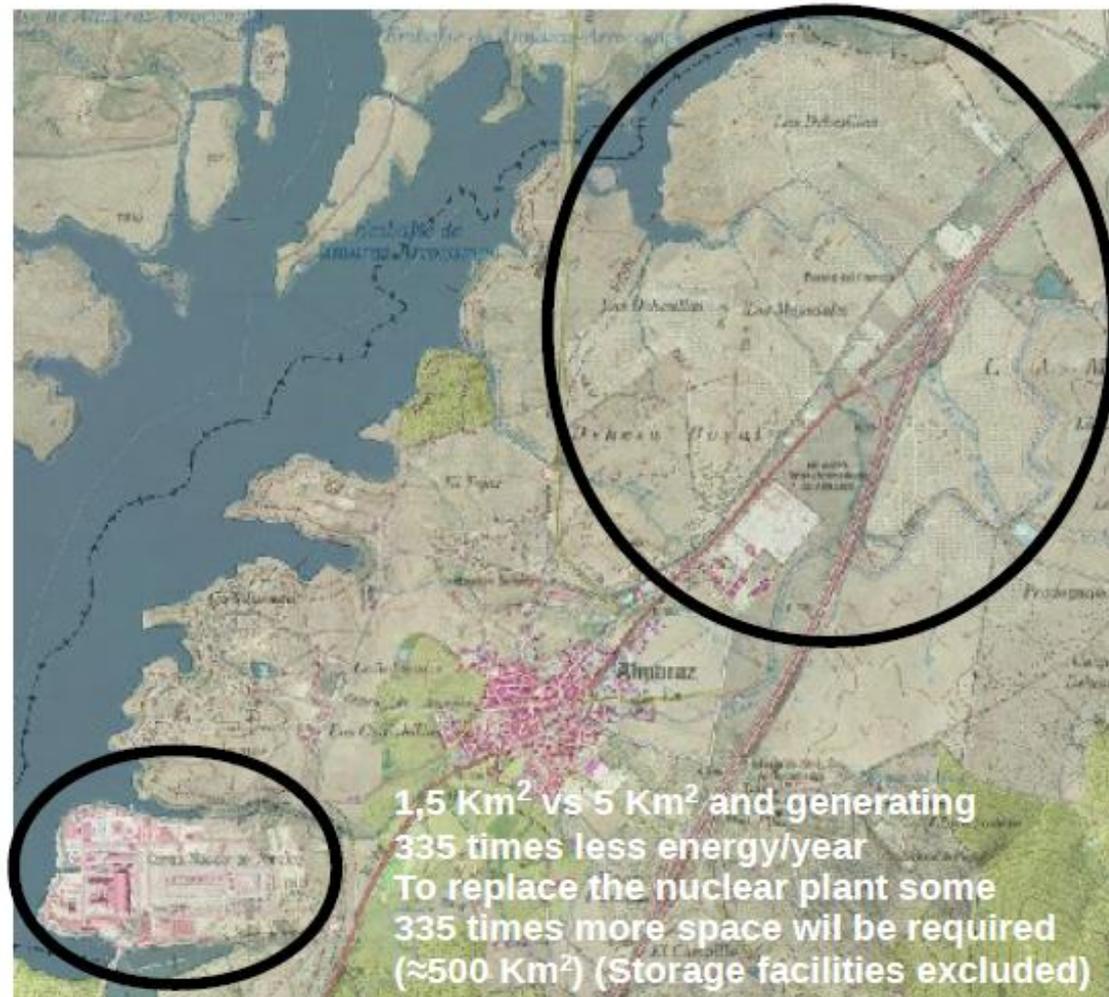
“Spain’s Photovoltaic Revolution. The Energy Return on Investment”,  
Pedro Prieto, Charles Hall, Springer 2013

# 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

# A curious comparative

2 GW nuclear  
power plant  
(85% load  
factor)  
versus 23 MW  
solar PV plant  
(22% load  
factor) in  
Almaraz  
(Cáceres)



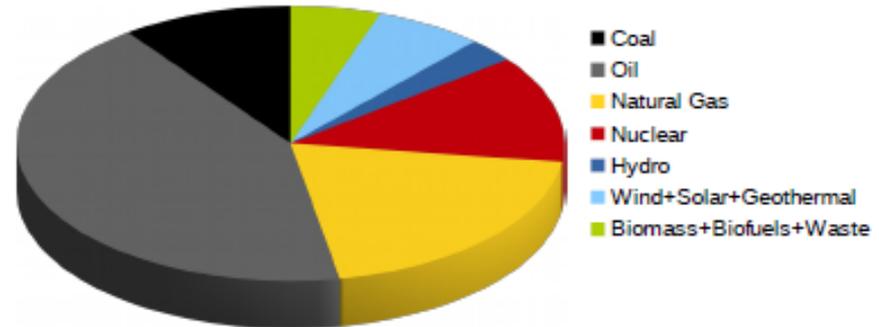
D'après Pedro Prieto

# The Energy System in Spain

PRIMARY ENERGY SPAIN 2014	Ktoe	%
Coal	11975	10%
Oil	50740	43%
Natural Gas	23664	20%
Nuclear	14933	13%
Hydro	3361	3%
Wind+Solar+Geothermal	7617	6%
Biomass+Biofuels+Waste	6296	5%
<b>TOTAL</b>	<b>118586</b>	<b>100%</b>

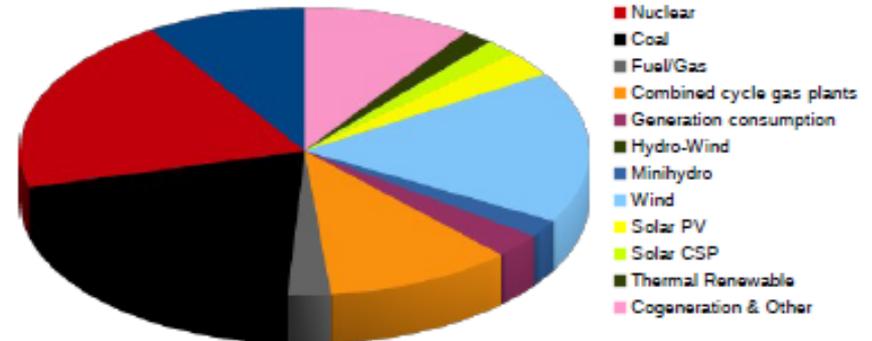
~ 1400 TWh

PRIMARY ENERGY IN SPAIN (2014)



ELECTRIC SYSTEM SPAIN 2015	Gwh	%	MW Inst.	%	LOAD FACTOR
Hydroelectricity	25733	9.60%	18669	17.24%	15.73%
Nuclear	56796	21.19%	7866	7.26%	82.43%
Coal	56672	21.14%	11482	10.60%	56.34%
Fuel/Gas	6891	2.57%	2784	2.57%	28.26%
Combined cycle gas plants	30217	11.27%	27199	25.11%	12.68%
Generation consumption	-7838	-2.92%			
Hydro-Wind	9	0.00%	12	0.01%	8.56%
Minihydro	5663	2.11%	2109	1.95%	30.65%
Wind	48380	18.05%	23003	21.24%	24.01%
Solar PV	8264	3.08%	4667	4.31%	20.21%
Solar CSP	5158	1.92%	2300	2.12%	25.60%
Thermal Renewable	4930	1.84%	989	0.91%	56.90%
Cogeneration & Other	27183	10.14%	7219	6.67%	42.98%
<b>NET GENERATION</b>	<b>268058</b>	<b>100%</b>	<b>108299</b>	<b>100%</b>	<b>28.26%</b>
Pump up Consumption	-4497	-1.68%			
International Exchanges	-467	-0.17%			
<b>DEMAND IN BARS</b>	<b>263094</b>				
<b>TOTAL RENEWABLE</b>	<b>125320</b>	<b>46.75%</b>			

ELECTRICITY GENERATION (2015)

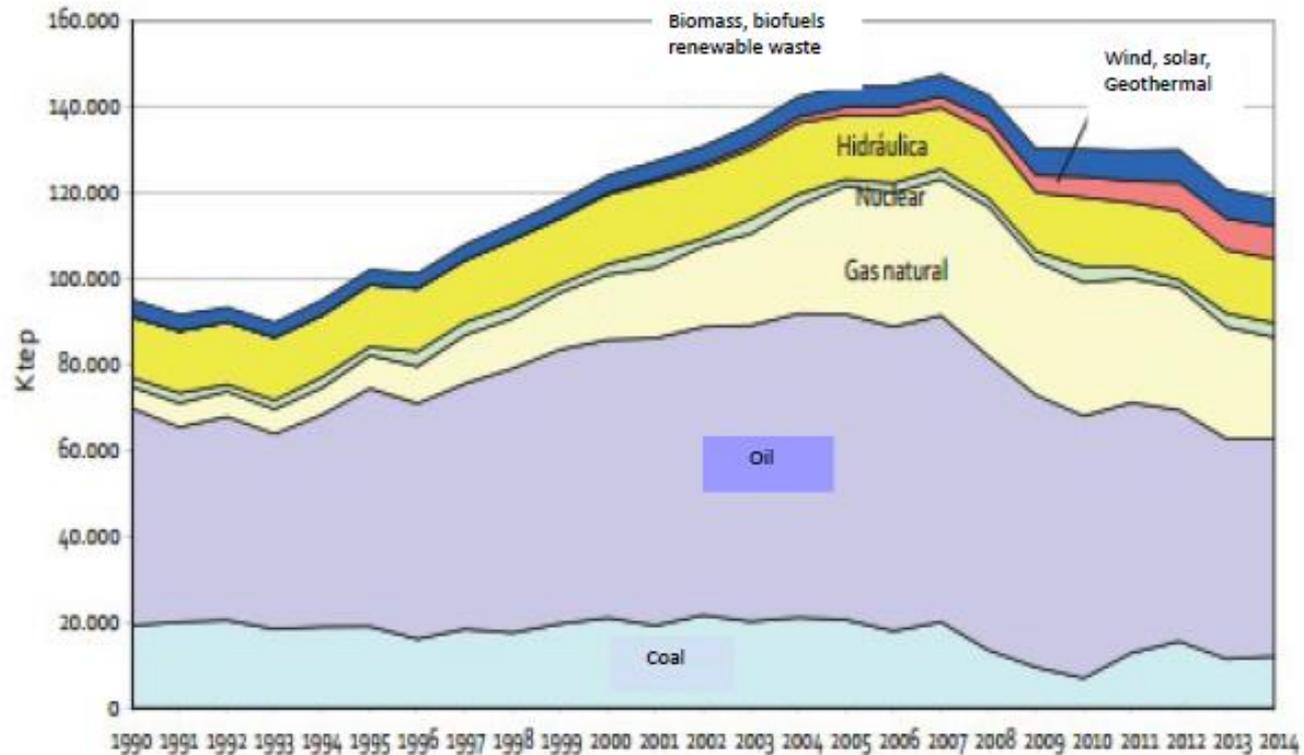


Sources: El libro de la energía 2014. Ministerio de Industria. [http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La\\_Energ%C3%ADa\\_2014.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La_Energ%C3%ADa_2014.pdf)  
 REEEI sistema eléctrico español 2015. [http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance\\_informe\\_sistema\\_electrico\\_2015\\_v2.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2015_v2.pdf)

Électricité ~ 270 TWh  
 ~ 19% énergie primaire

D'après Pedro Prieto

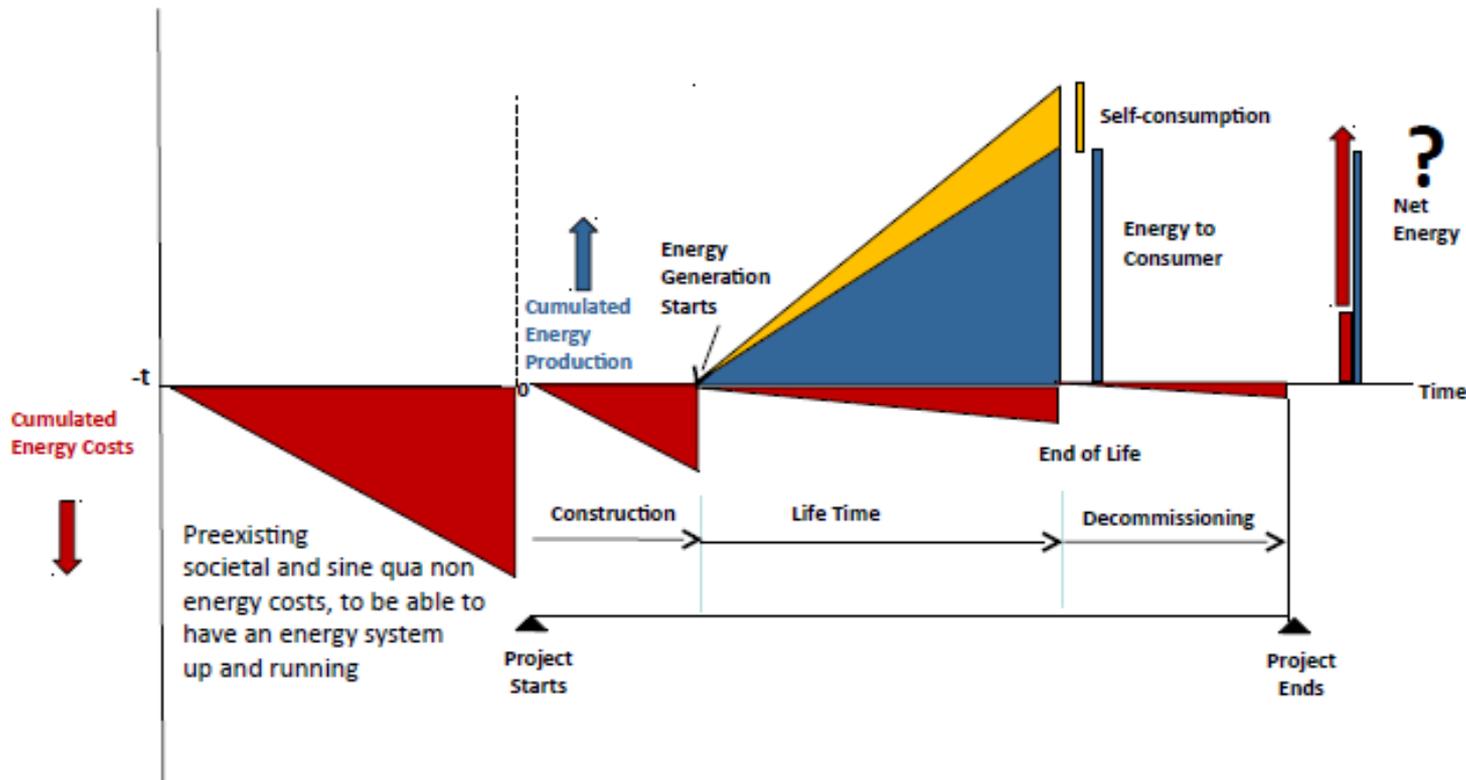
# Evolution of Primary energy in Spain



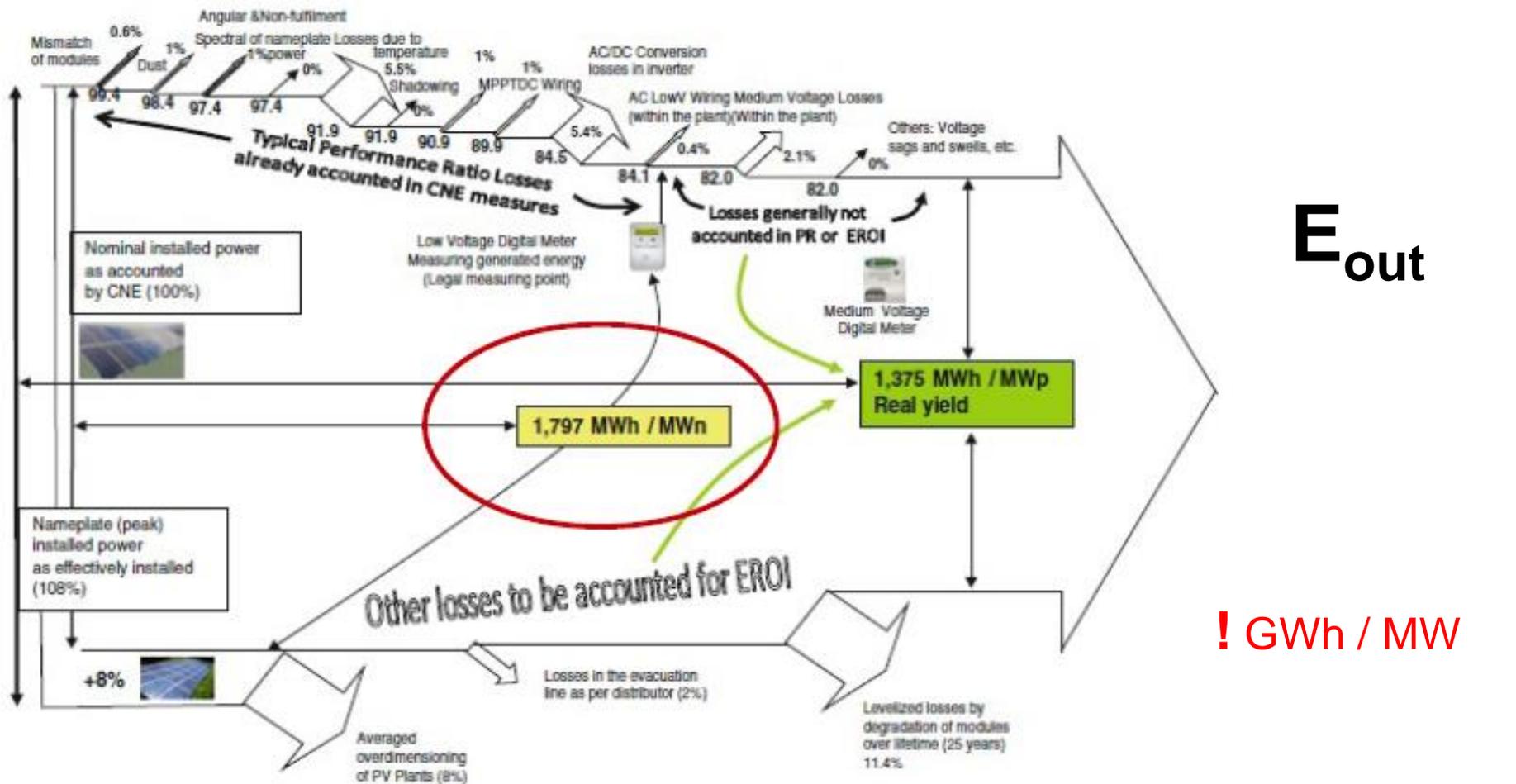
Source: Ministry of Industry. El Libro de la Energía 2014. Page 312. [http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La\\_Energ%C3%ADa\\_2014.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La_Energ%C3%ADa_2014.pdf)

D'après Pedro Prieto

# A More Holistic Vision of a Modern Energy System



Analyse du cycle de vie, d'après Pedro Prieto



Sankey diagram of solar PV energy in Spain

D'après Pedro Prieto

- 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

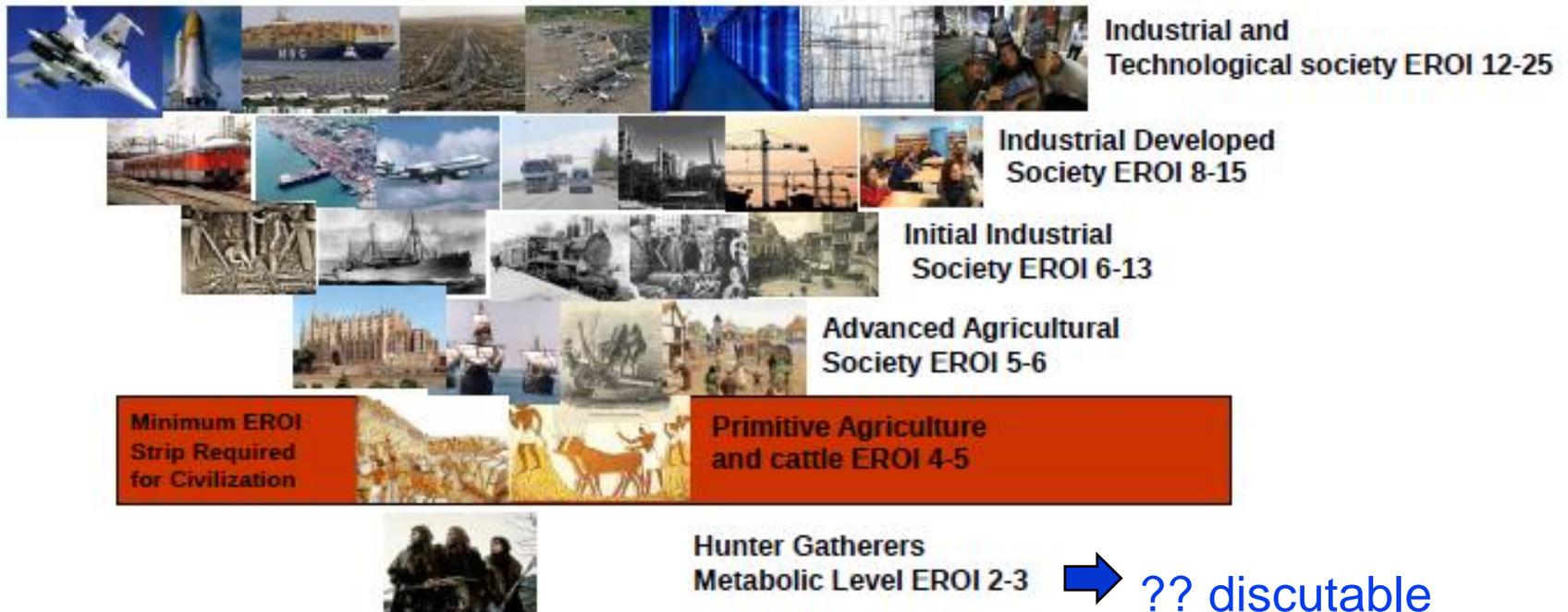
# The Energy Invested ( $E_{in}$ )



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

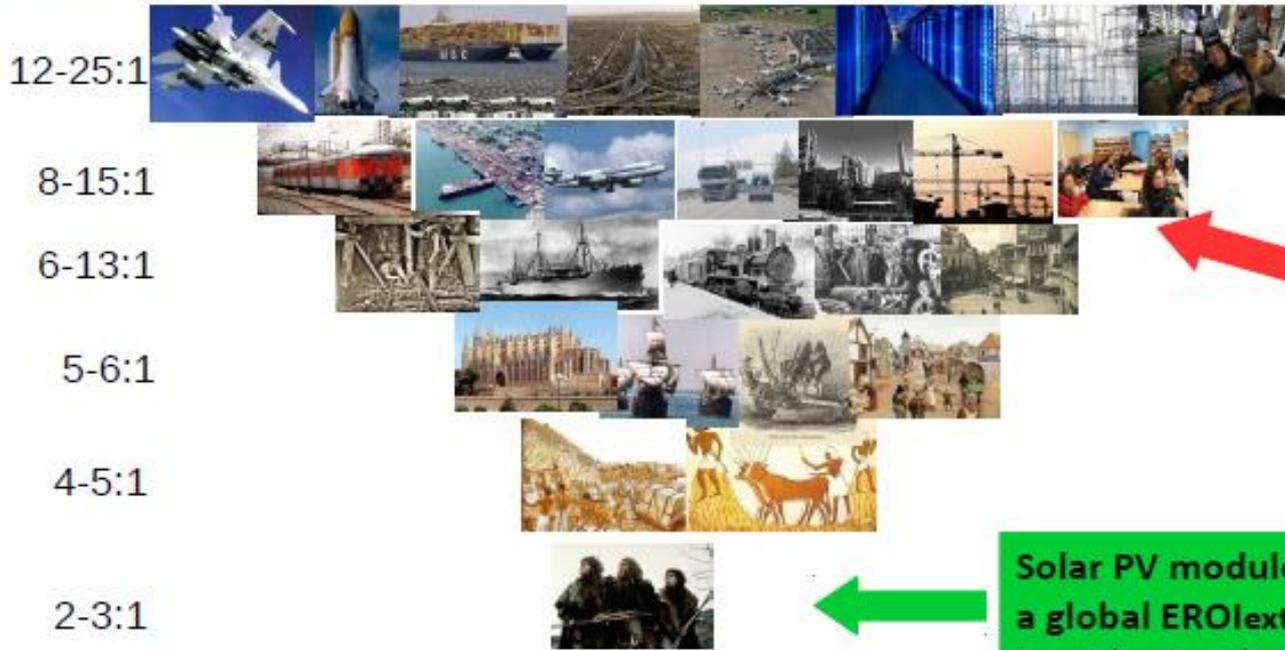
D'après Pedro Prieto

# The Social Inverted Pyramid on the Energy Needs (Minimum EROI)



From Pedro Prieto

# APPROX. REQUIRED EROI



...but they need a society with this EROI<sub>ext</sub> level (at worst)

Solar PV modules have a global EROI<sub>ext</sub> of this level (as best)...



## CONCLUSIONS from Pedro Prieto

12-25:1

8-15:1

6-13:1

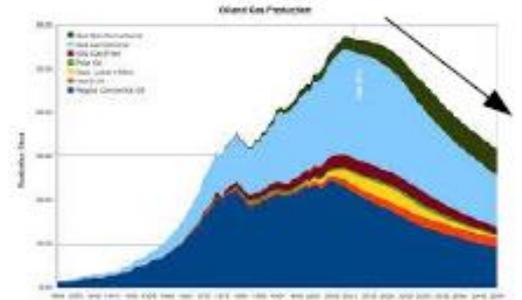
5-6:1

4-5:1

2-3:1



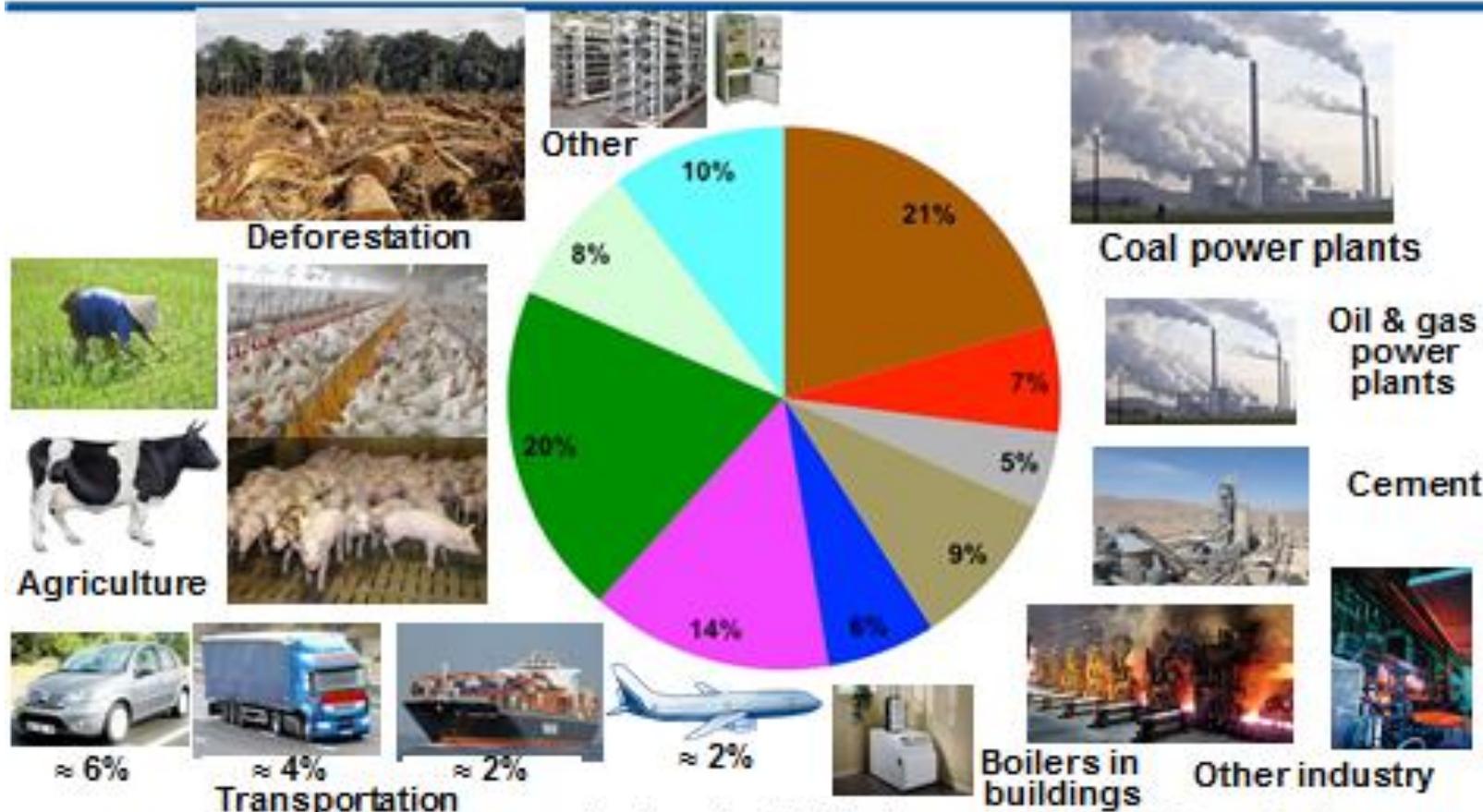
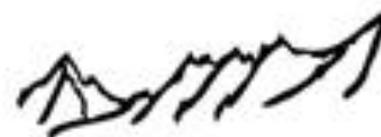
As fossil fuels approach their peaks or go past peak and their EROI's go down, the building blocks of our modern society will start falling apart.



Modern Renewables do not seem to be able to sustain the present world infrastructure

## CONCLUSIONS from Pedro Prieto

# Dividing emissions by 3, where do we start?



Breakdown of world emissions in 2014. Jancovici, on various data.



[www.manicore.com](http://www.manicore.com)



From Jean-Marc Jancovici

# So I hope to have shown you that:

1. There are parallels between energetics in ecology, anthropology and economics .. All require high EROIs
2. The evolution of human society has been mostly about sequestering more energy
3. That fossil fuels, and especially oil, are the main reason that human numbers and economies have grown
4. Human societies cannot possibly be sustainable at anything like our present level without a large flow of cheap (i.e. high EROI) energy
5. That the availability of oil in the immediate future is of considerable concern
6. That this may be our greatest issue related to sustainability of humans and civilization
7. As far as I know it I and my students (and a few others: King, Brandt) are about the only to think about this.

Conclusions from Charles Hall

# Some very simple conclusions... extremely hard to accept



After two centuries of growth, we have lost our habits of ruling a constrained world. The good question is not how we avoid “degrowth”, but how we manage it at best. EROI can help in that respect.

As less energy = less GDP, going low carbon is equivalent to triggering a recession. In a democracy, we must think of the counterpart that makes it desirable/manageable for a majority.

Engineers can help explicit “physical” counterparts (e. g. you cannot extract oil and still have the same amount in the ground), sort between what is possible and what is not, but in the end the society decides (even imperfectly) for itself.

Less energy = less GDP. Going to zero carbon in 65 years is equivalent to following a recessive path, that we accept because it allows our species to (sur)vive longer.



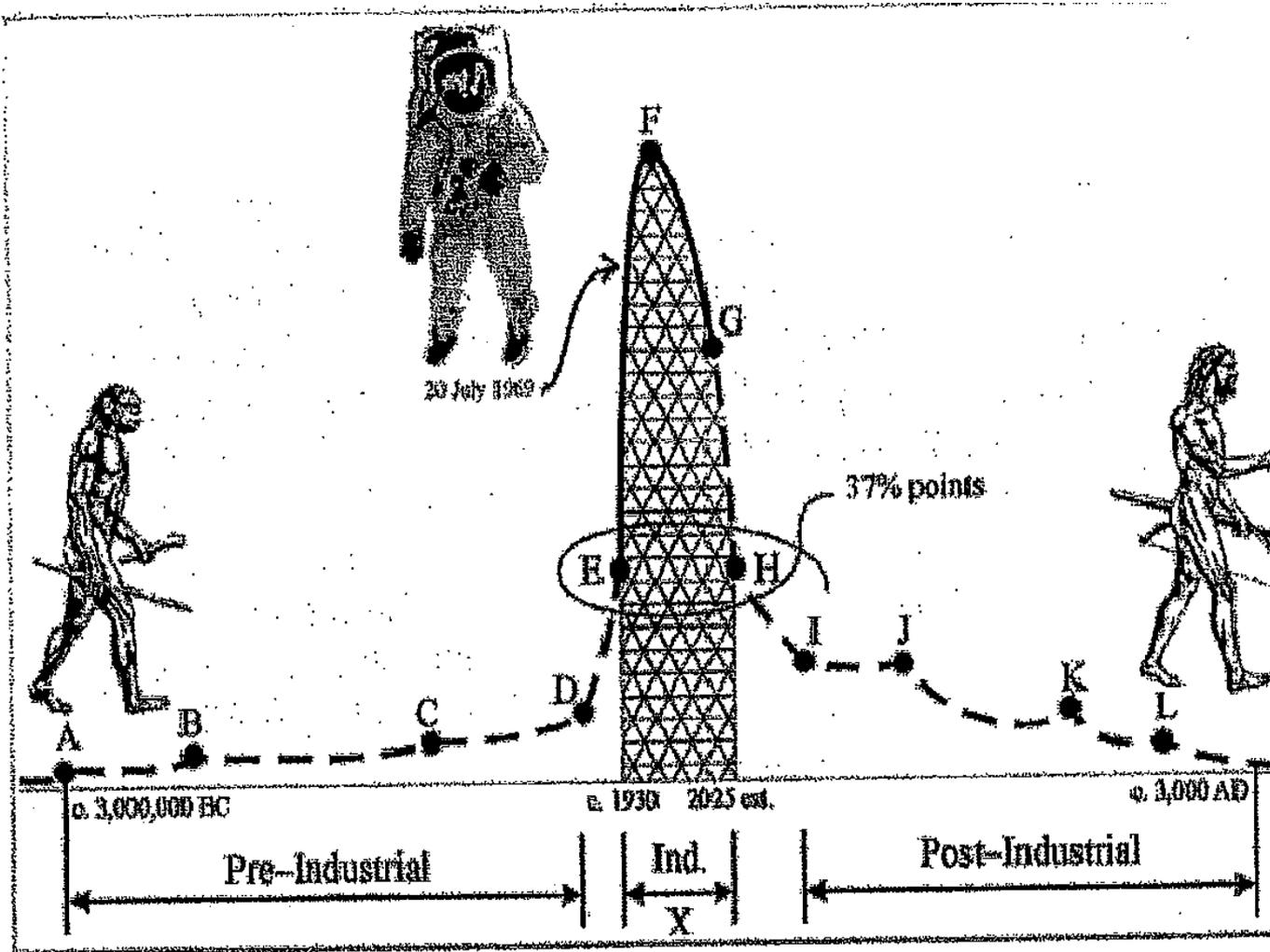
[www.manicore.com](http://www.manicore.com)



Conclusions from Jean-Marc Jancovici

# Conclusions

- À cause de l'épuisement des ressources, ou de la volonté de limiter les émissions de gaz à effet de serre, la part des combustibles fossiles dans la consommation mondiale d'énergie primaire devra fortement diminuer.
- Malgré les incertitudes des estimations (~ 25%) et les problèmes de définition et de méthodologie, les analyses EROI confirment les craintes que les EnR ne pourront pas se substituer miraculeusement aux ressources fossiles.
- Mais les solutions EnR off-grid ne sont certainement pas à négliger pour les pays en voie de développement.
- La décroissance de la consommation énergétique est-elle inévitable ?
- Oui, certainement si l'on décidait de renoncer au nucléaire. Comment maintenir dans ce cas une société évoluée ?
- Si l'on trouve à moyen terme des solutions, énergétiquement rentables, et plus acceptables pour la société, en développant de nouvelles sources d'électricité nucléaire, alors la décroissance n'est peut-être pas inéluctable.



Un cartoon provocateur présenté par Charles Hall

# Énergie et puissance: quelques chiffres utiles

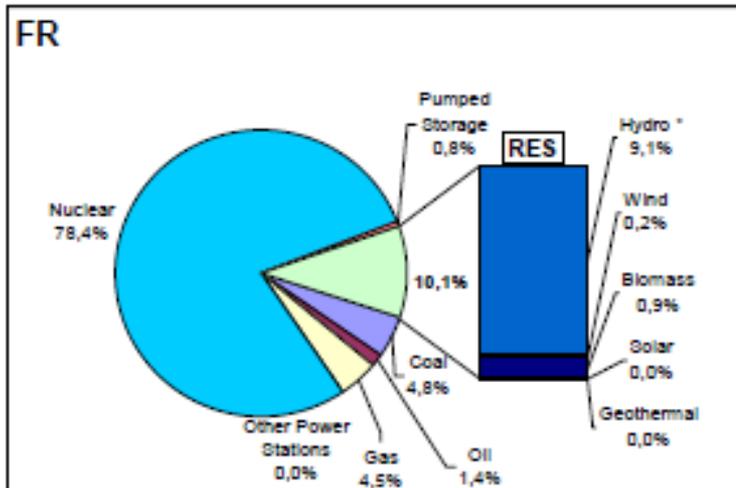
- Le joule (J) et le watt (W), (un joule par seconde (J/s)), sont respectivement les unités internationales d'énergie et de puissance.  
Ces unités sont beaucoup trop petites à l'échelle humaine → on leur préfère :  
**Energie** → **1 kWh** = 3.6 million joules (**3.6 MJ =  $3.6 \times 10^6$  J**)  
**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 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
- Besoins :



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

# Electricité et renouvelables en France

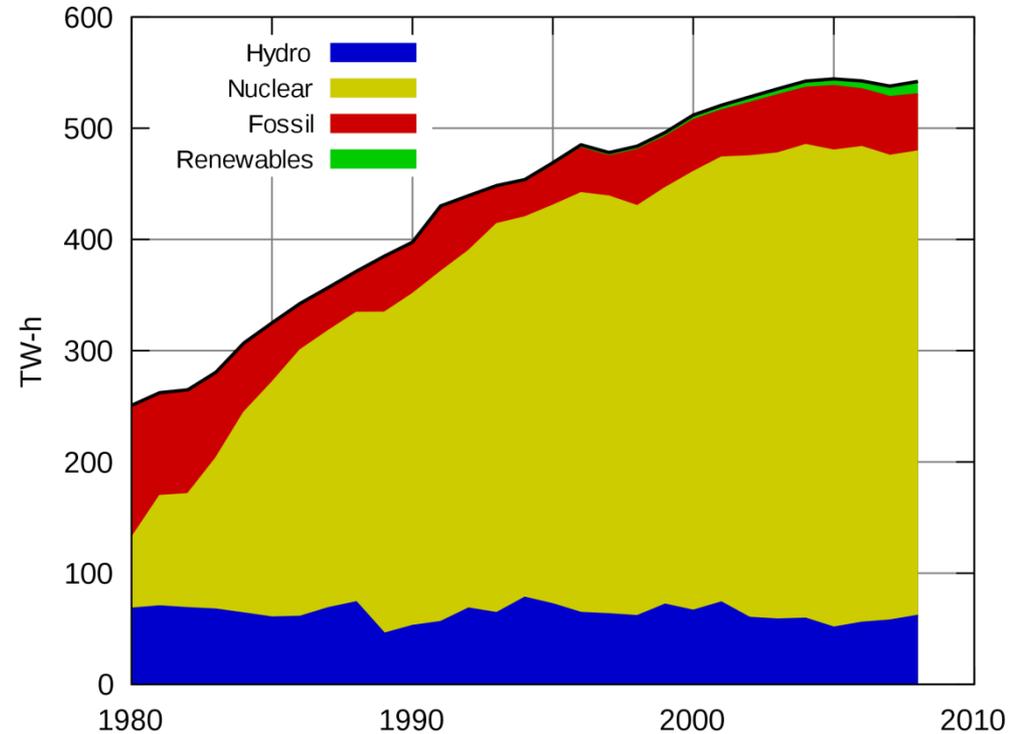
Gross Electricity Generation by fuel (2005)



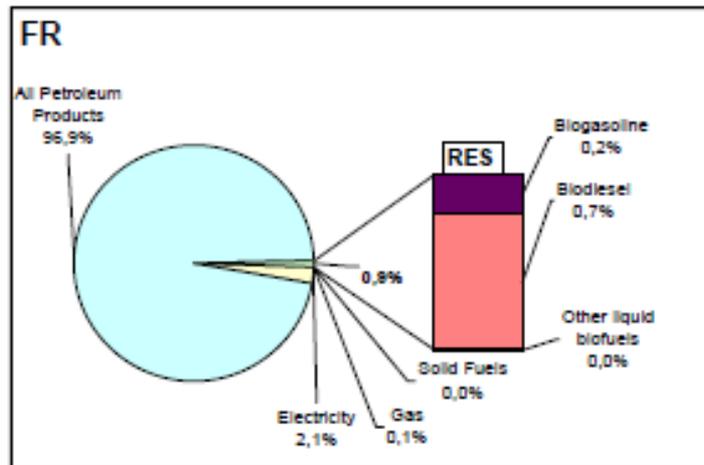
Source: Eurostat

\* 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

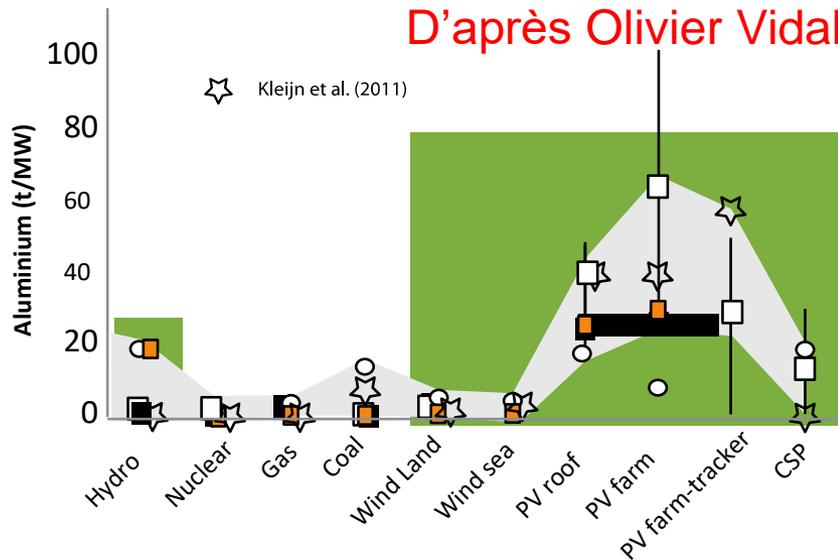
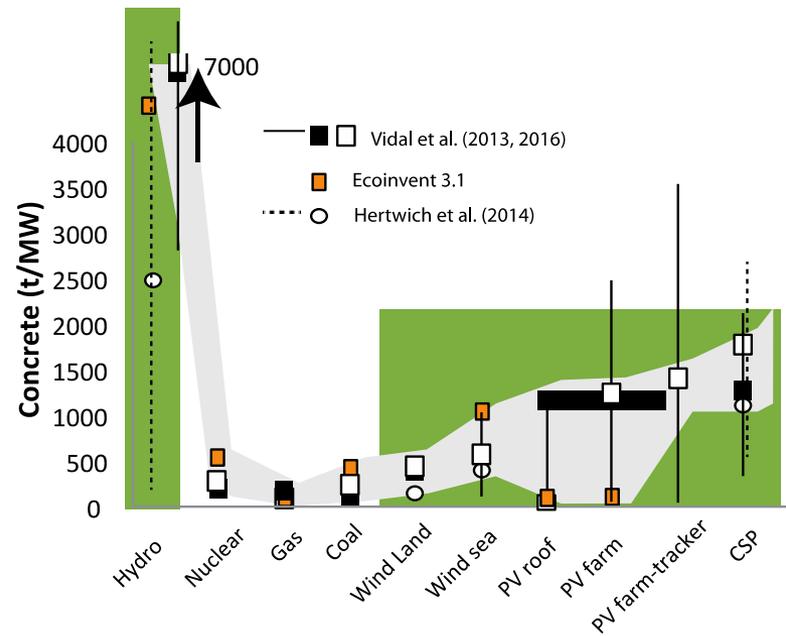
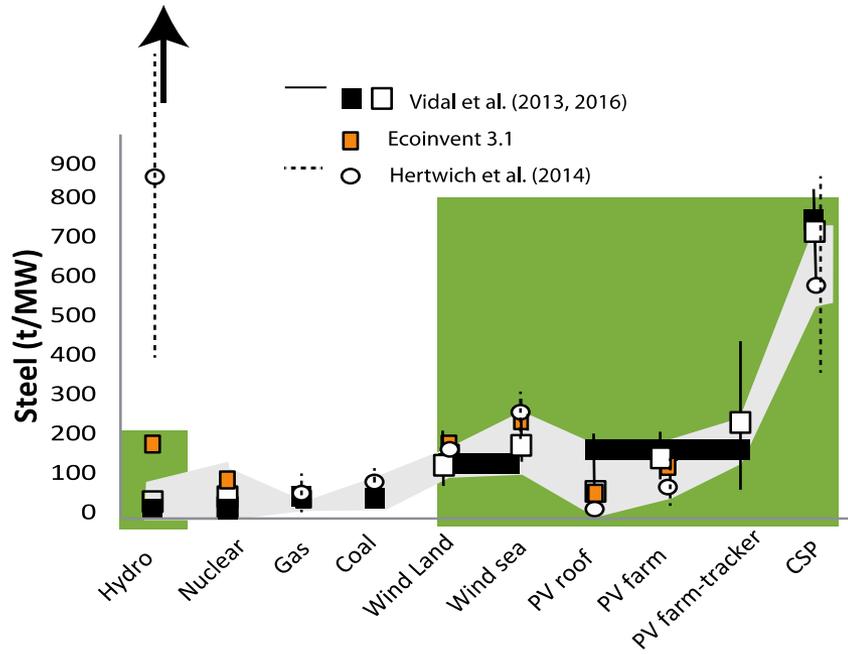


Final Energy Consumption by Fuel, Transport (2005)

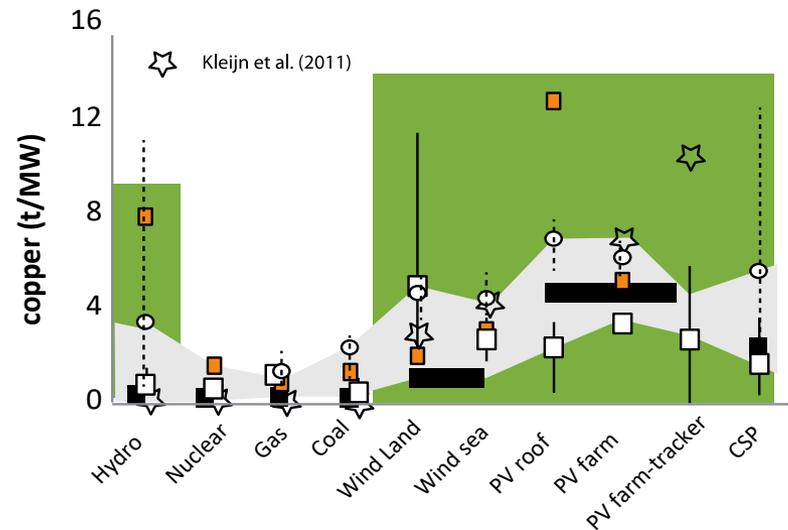


La situation énergétique en 2015,  
2<sup>e</sup> édition - novembre 2015, EDP Sciences

# Le problème des ressources



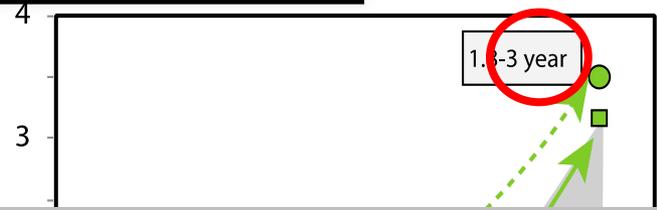
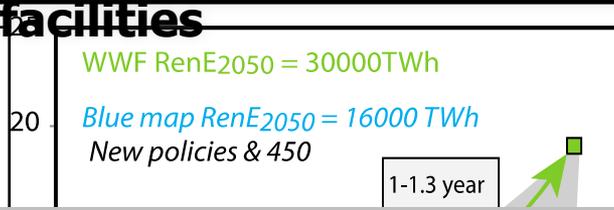
D'après Olivier Vidal



# Materials requirements for renewable energy production facilities

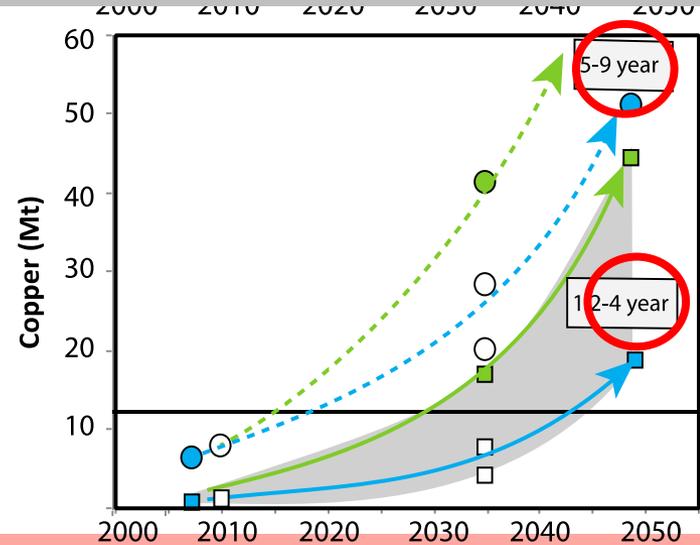
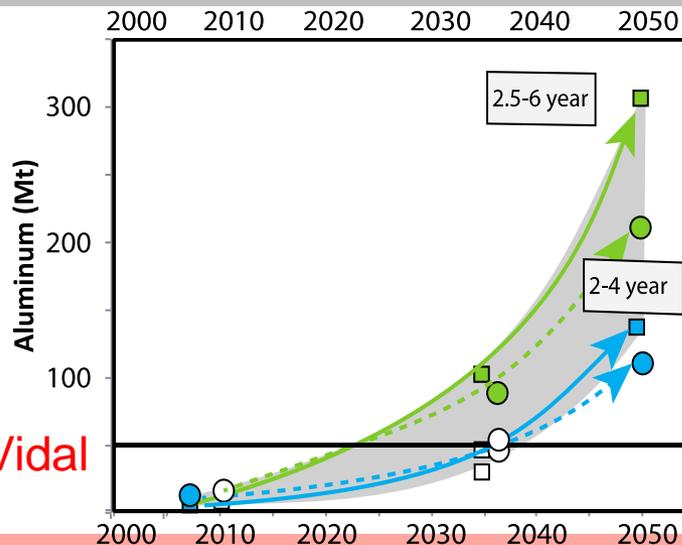
## production facilities

ies & 450



In the « worst » case, the energy for Al, Cu, Iron & concrete primary production is equivalent to

**1.5 years of global crude oil production 2012**



D'après Olivier Vidal

In 2050, the **cumulative** amount of steel, Al, Cu sequestered in hydropower, wind and solar facilities could be up to 9 times the global 2010 production

# 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 = 1,3km<sup>2</sup>  
= 35GWh/year



Science for energy scenarios | Fabien Perdu | 8

D'après Fabien Perdu