

ERO(E)I
Energy Return On (Energy) Invested

en français

Taux de retour énergétique (TRE)

Jacques Treiner

jtreiner@orange.fr

LIED et Shift Project

Ecole des Houches

6-11 mars 2016



science-and-energy.org

Préliminaire

Nous ne vivons pas d'énergie, nous vivons de **transformer la matière** : tous nos usages peuvent s'exprimer ainsi.

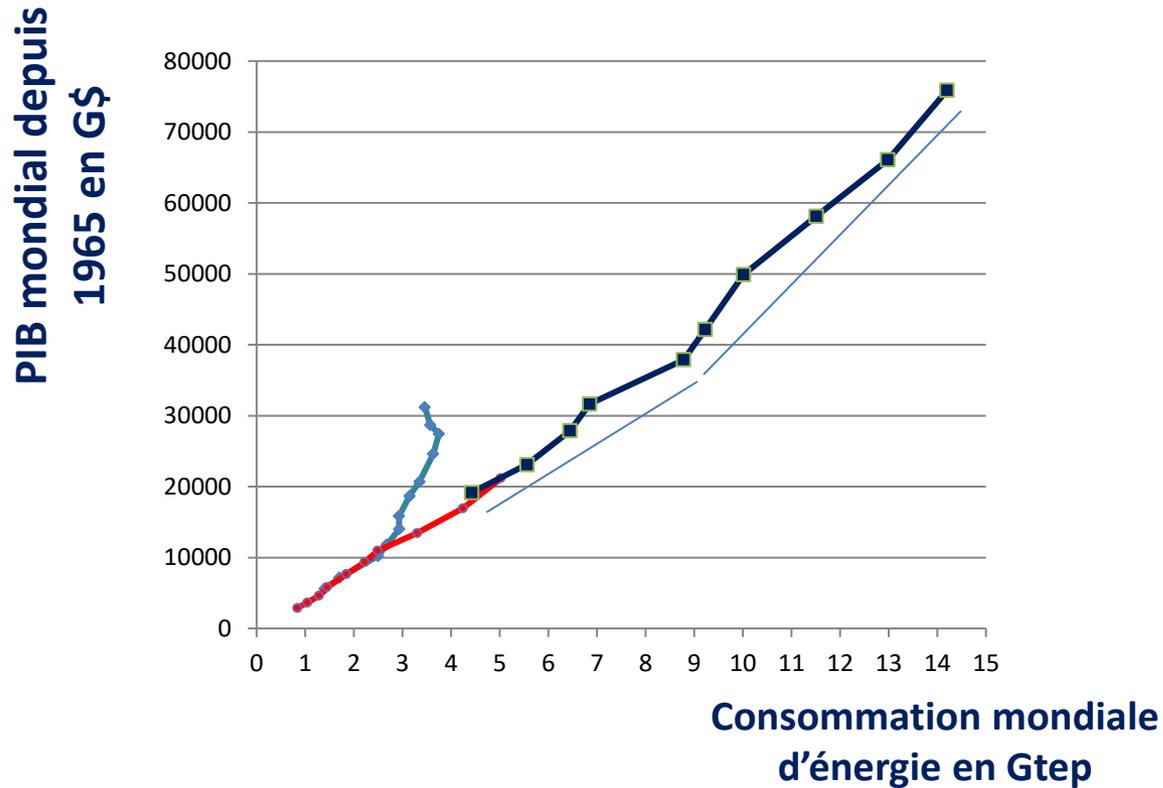
L'énergie est un concept abstrait qui permet de **quantifier** ces transformations, d'accrocher des nombres aux transformations de la matière.

Tout usage a par conséquent une traduction en termes de bilan énergétique : le passage d'un état initial à un état final s'accompagne du changement de « forme d'énergie ».

En amont du « besoin d'énergie », il y a le besoin de disposer de « matière à transformer ».

Le « PIB » et la « consommation d'énergie » constituent deux façons de comptabiliser les transformations effectuées au cours d'une année (on néglige les aspects spéculatifs et autres bulles susceptibles d'entrer dans le PIB). Le passage d'une comptabilité à l'autre représente un simple changement d'unité !

Relation PIB/énergie : un simple changement d'unité !



Taux de retour énergétique (EROI)

$$\text{EROI} = \frac{\text{énergie fournie}}{\text{énergie dépensée pour l'obtenir}}$$

$$\text{EROI}_{\text{pu}} = \frac{\text{énergie fournie}}{\text{énergie dépensée pour l'obtenir et la transporter}}$$

$$\text{EROI}_{\text{ext}} = \frac{\text{énergie fournie}}{\text{énergie dépensée pour l'obtenir, la transporter et l'utiliser}}$$



Définitions

$EROI_{st}$ = rapport de l'énergie produite à la somme de l'énergie *onsite* et *offsite* dépensées pour produire cette énergie.
L'énergie produite est considérée à la source.

$EROI_{pou}$: tient compte du coût associé au transport et au raffinage

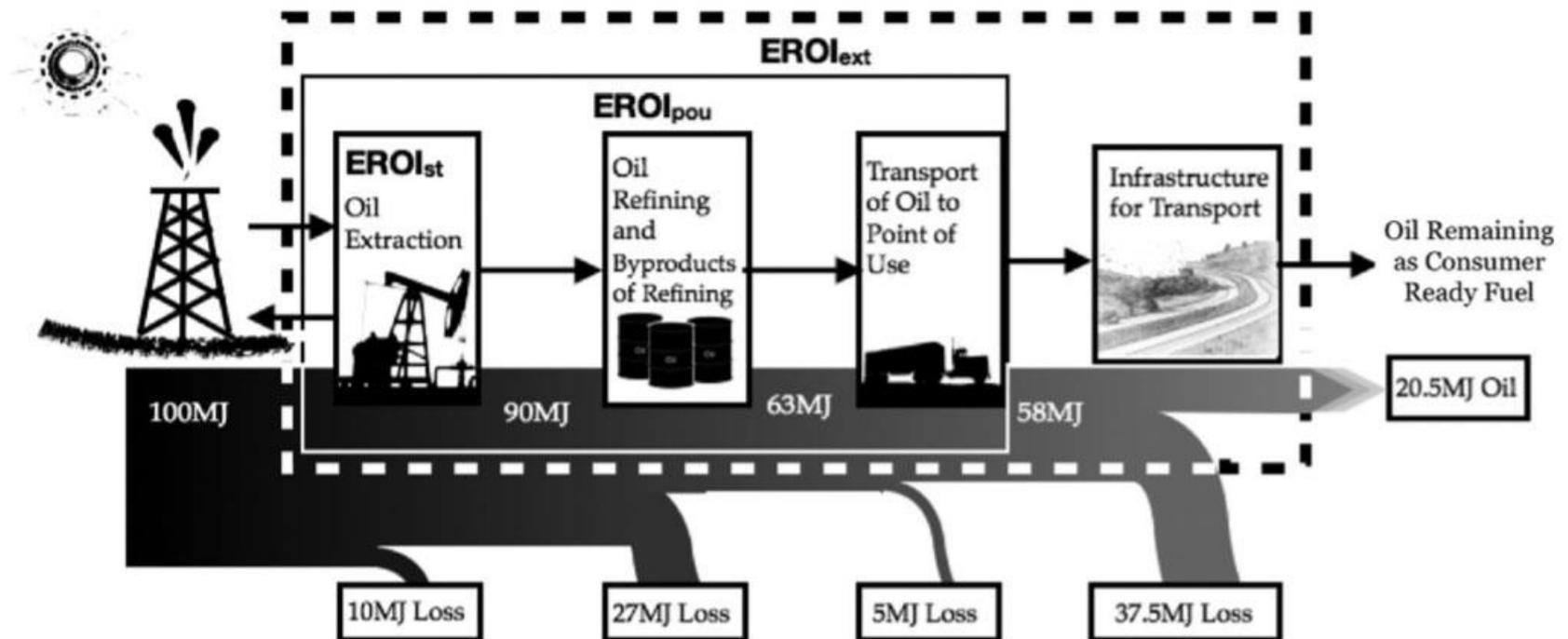
$EROI_{ext}$: tient compte de l'énergie nécessaire pour rendre cette énergie utilisable, par exemple conduire un camion

$EROI_{soc}$: étendu à l'ensemble de la société (toutes les sources et toutes les dépenses énergétiques pour les rendre utilisables)

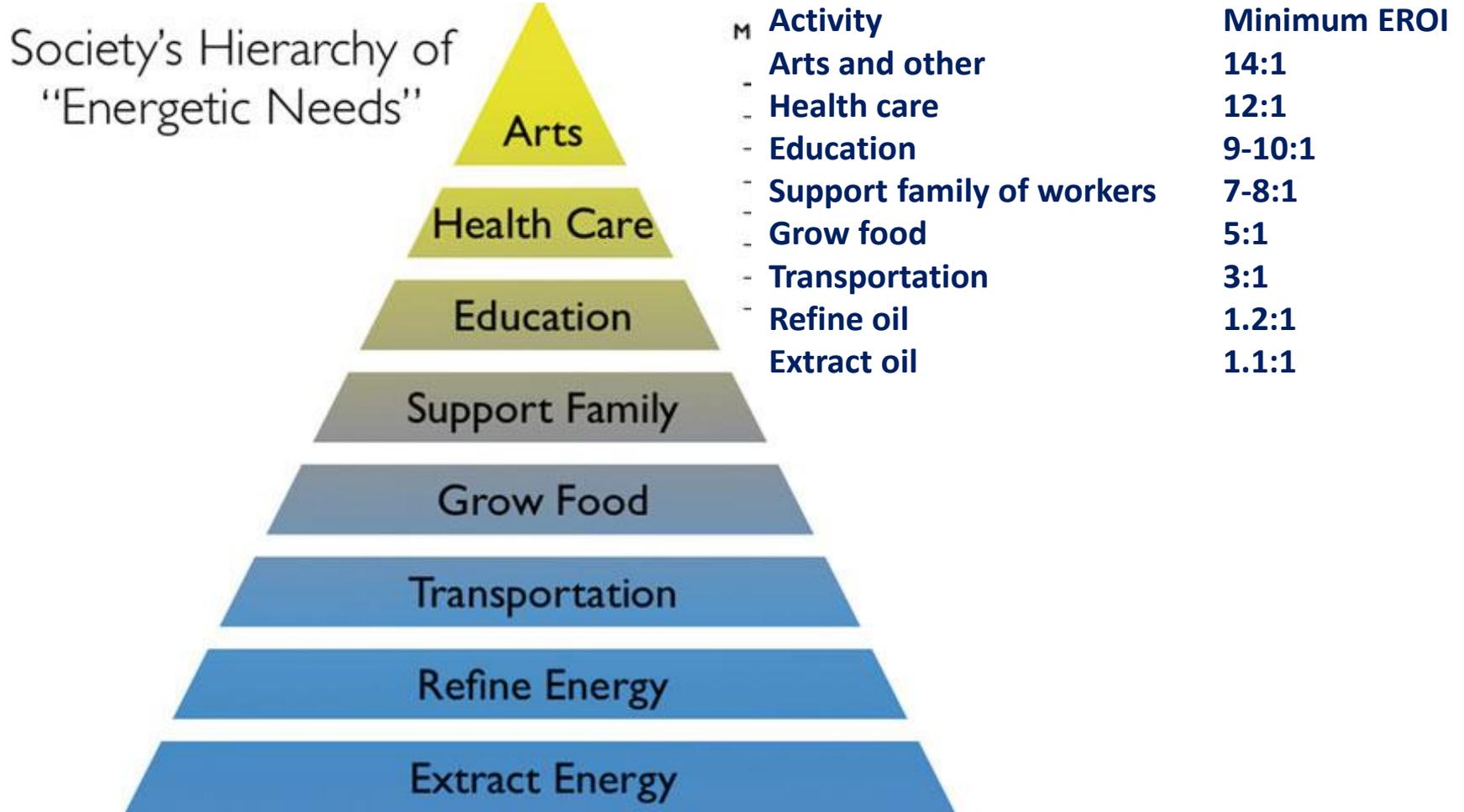
Différents EROIs

S'il faut 1 baril de pétrole pour extraire 1 baril de pétrole, tout ce qu'on peut faire, c'est s'asseoir dessus et le contempler...

D'autant que l'énergie dépensée est de haute qualité, alors que le baril extrait est brut, il y a donc déjà un déficit.



Pyramide des besoins et EROIs correspondants



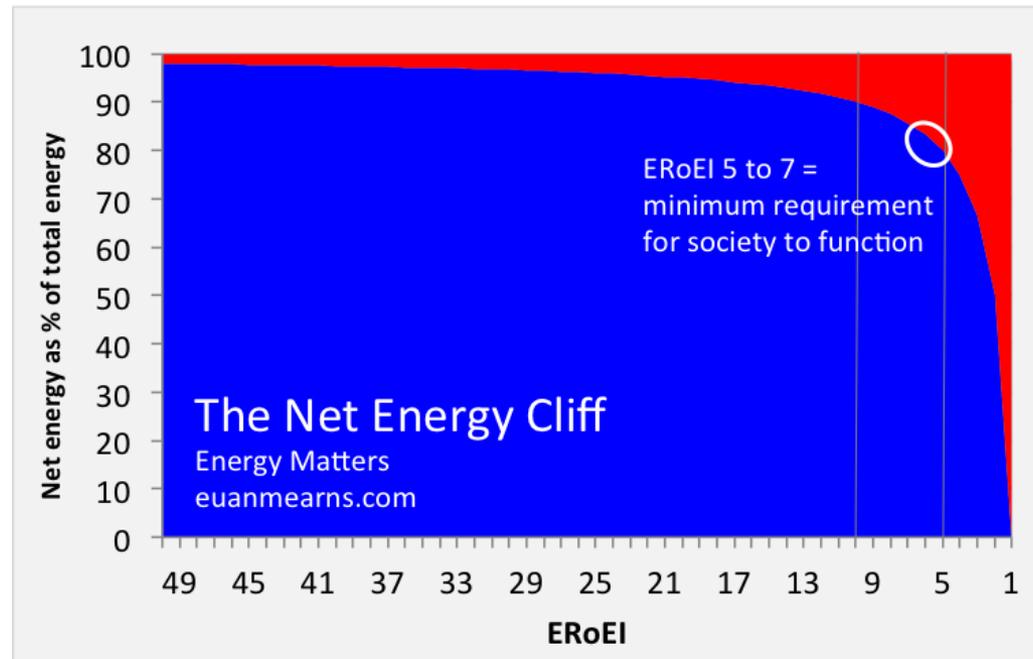
Energie nette relative

Energie nette relative à l'énergie investie

$$(E_{\text{out}} - E_{\text{in}}) / E_{\text{in}}$$

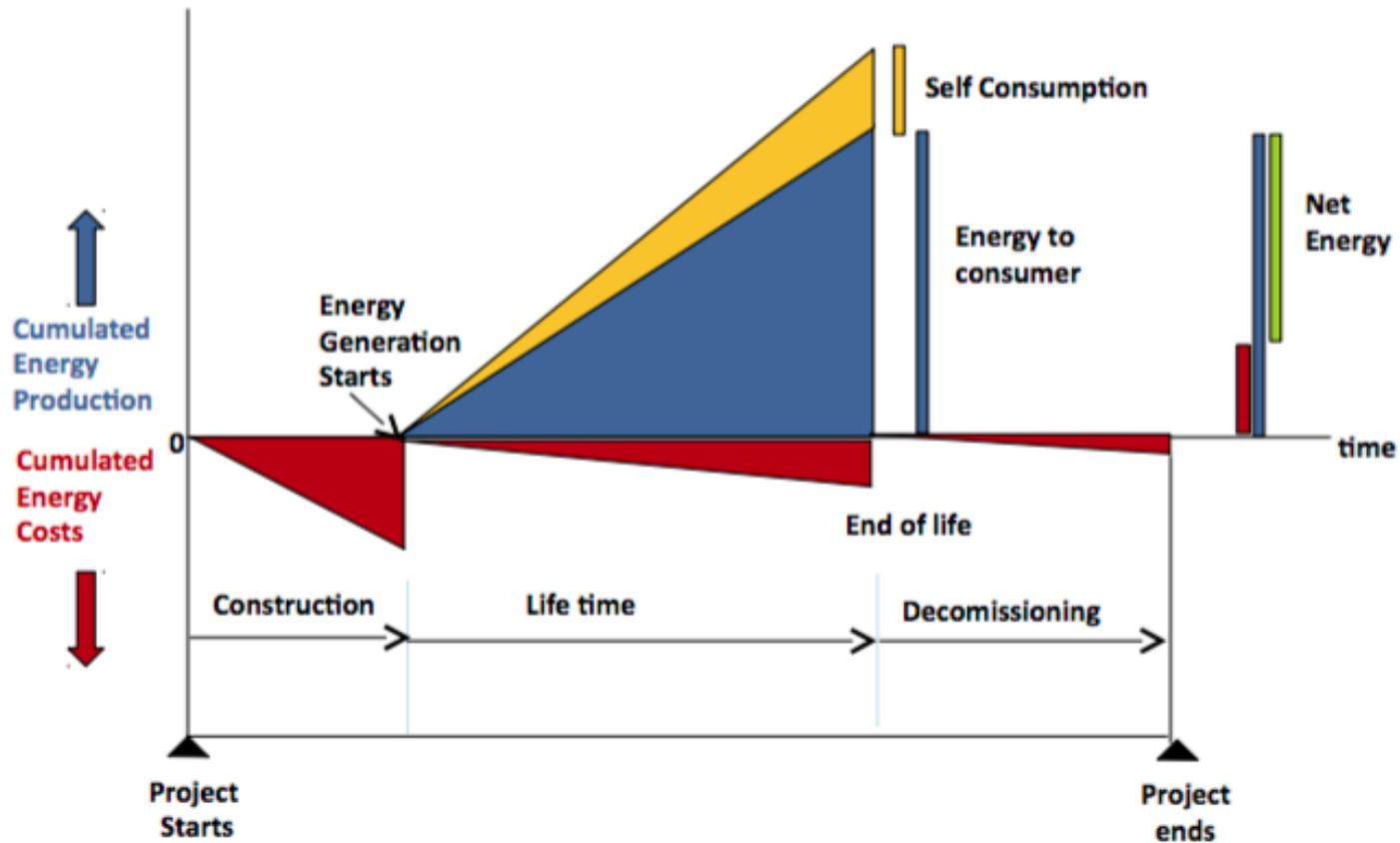
Energie nette relative à l'énergie disponible

$$(E_{\text{out}} - E_{\text{in}}) / E_{\text{out}} = 1 - 1/\text{EROI}$$



En bleu, la fraction d'énergie disponible pour les secteurs *autres* que le secteur énergétique

Bilan énergétique d'une installation



Source Euan Mearns, d'après Prieto et Hall

Weissbach et al.

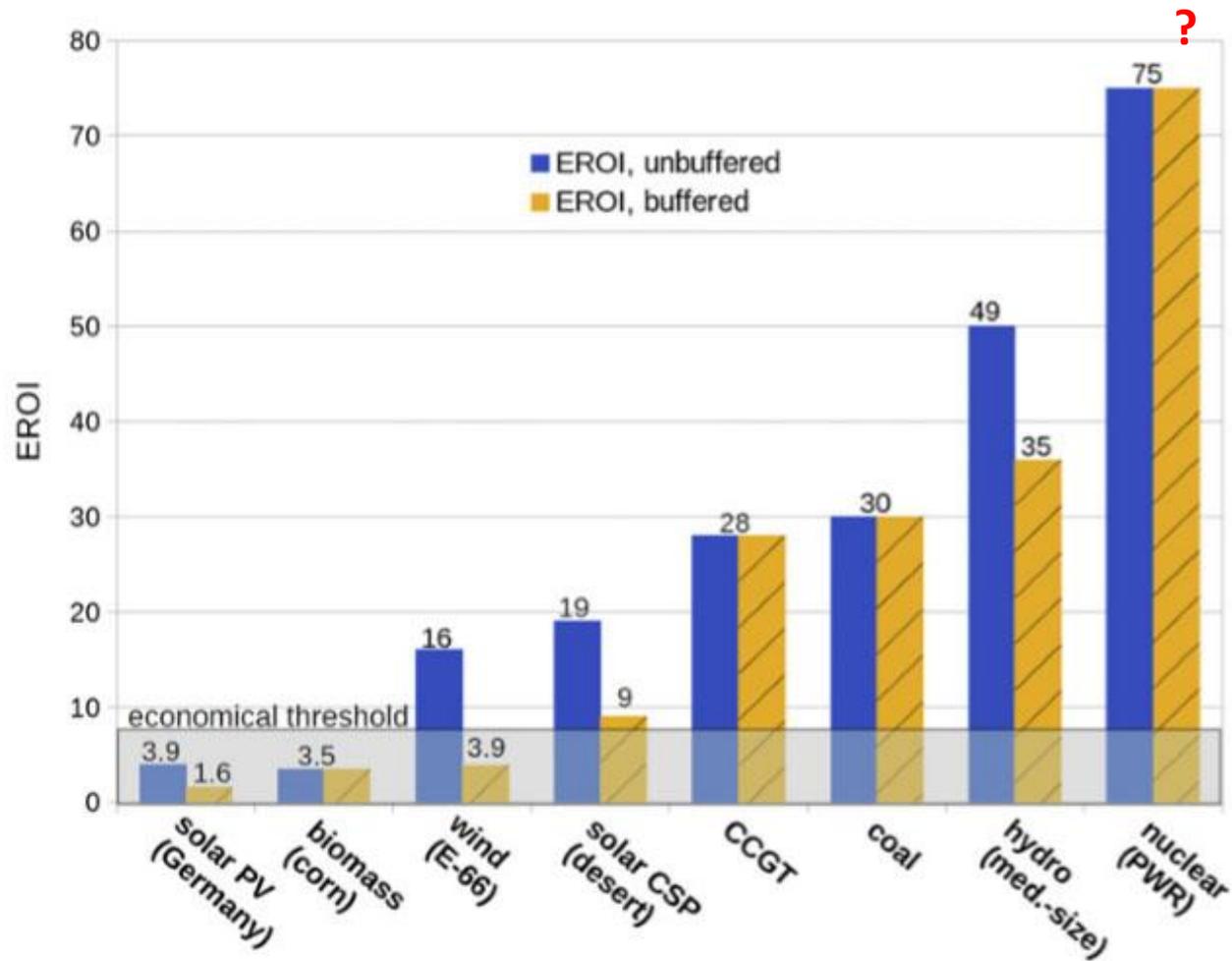
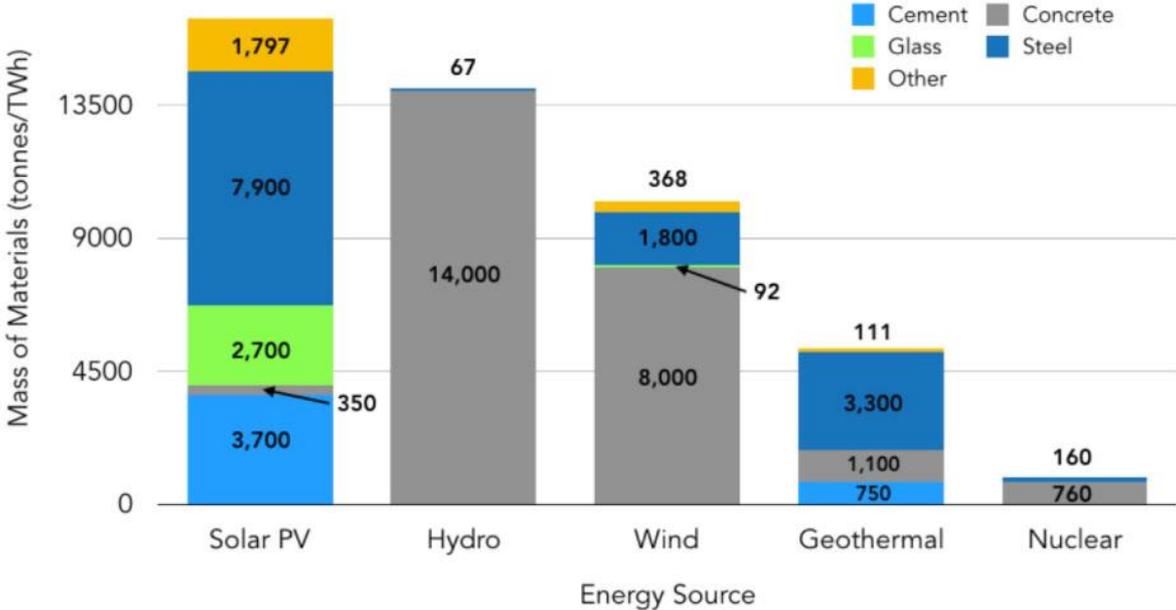


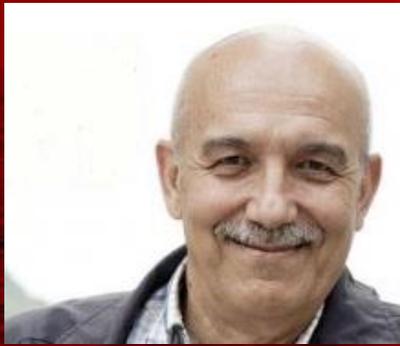
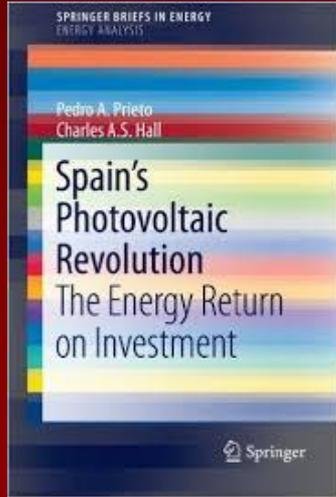
Fig. 3. EROIs of all energy techniques with economic “threshold”. *Biomass*: Maize, 55 t/ha per year harvested (wet). *Wind*: Location is Northern Schleswig Holstein (2000 full-load hours). *Coal*: Transportation not included. *Nuclear*: Enrichment 83% centrifuge, 17% diffusion. *PV*: Roof installation. *Solar CSP*: Grid connection to Europe not included.

Matériaux [tonnes/TWh]



"Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities," Table 10. September 2015. United States Department of Energy. Nuclear and hydro require 10 tonnes/TWh and 1 tonne/TWh of other materials, respectively, but are unable to be labeled on the graph.

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



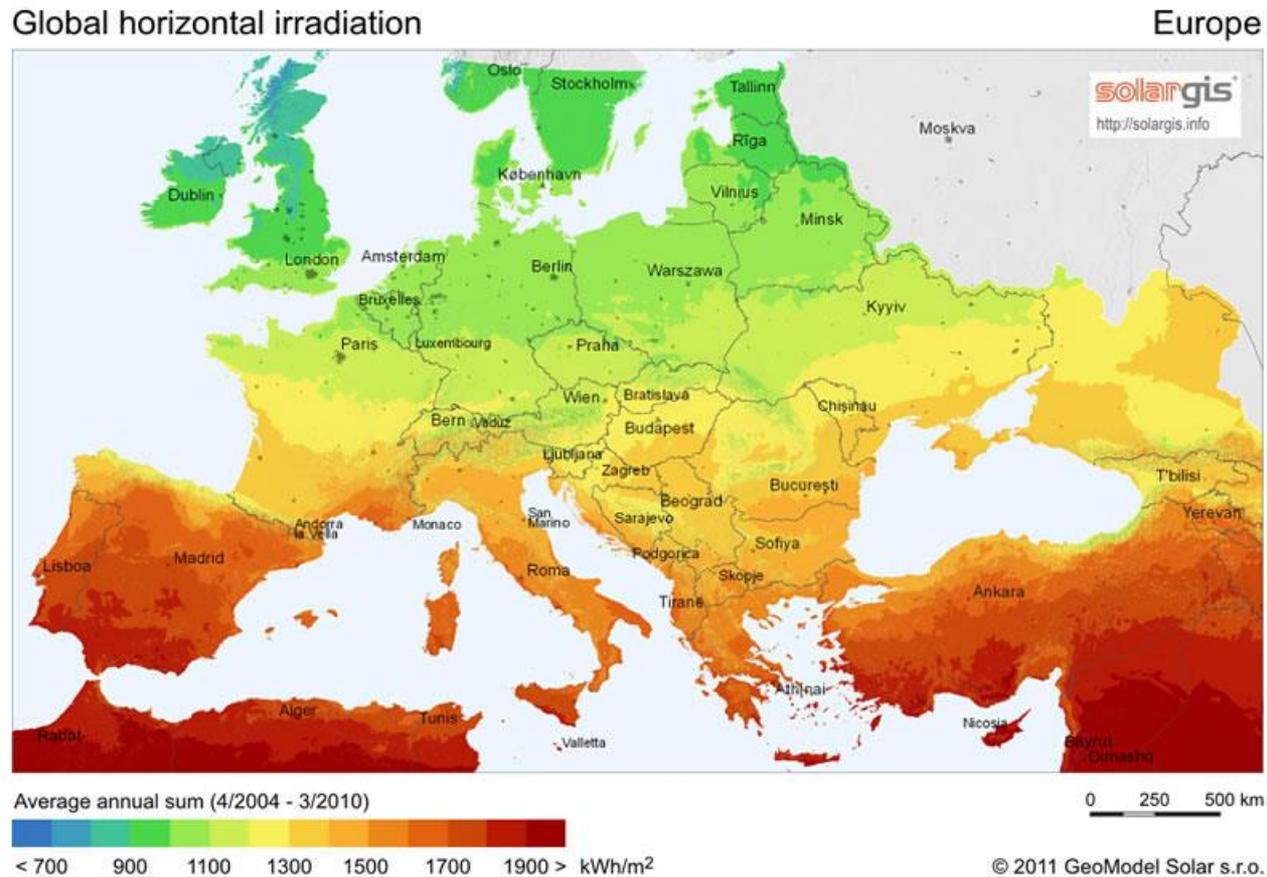
Les HOUCHES
March 7th. 2016
Pedro A. Prieto

ÉCOLE DE PHYSIQUE
des HOUCHES

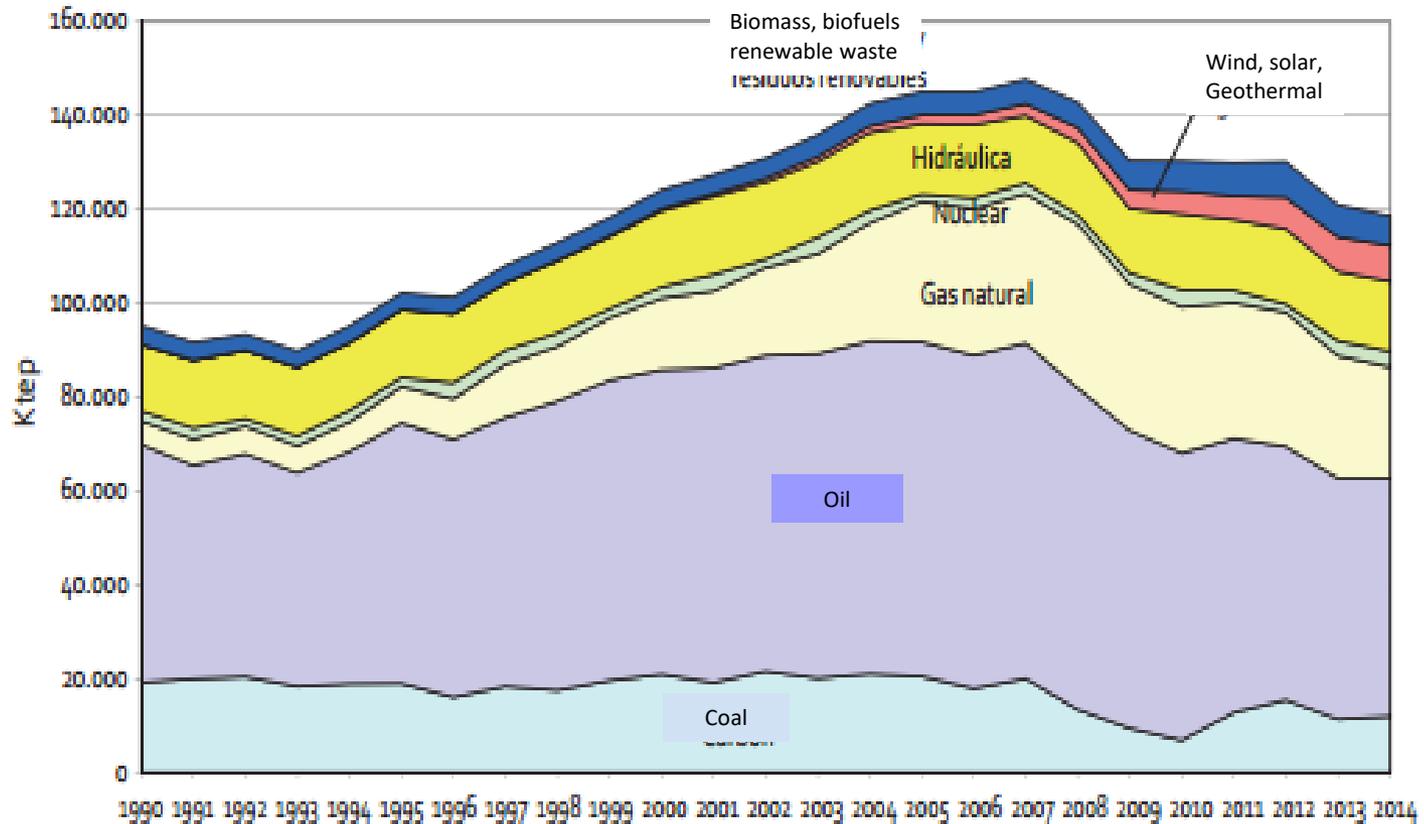


Pourquoi l'Espagne ?

La meilleure irradiance en Europe



Evolution de la consommation d'énergie primaire en Espagne



Retour énergétique (E_{out})

Durée de vie	25 years
Poussières	1 %
Mismatch de modules	0,6 %
Pertes angulaires	1 %
Effet de T	5,6 %
Pertes inverseurs	5,4 %
Pertes basse tension	0,4 %
Pertes tension intermédiaire	2,1 %
Pertes évacuation	2,4 %
Dégradation temporelle	11,4 % sur 25 ans

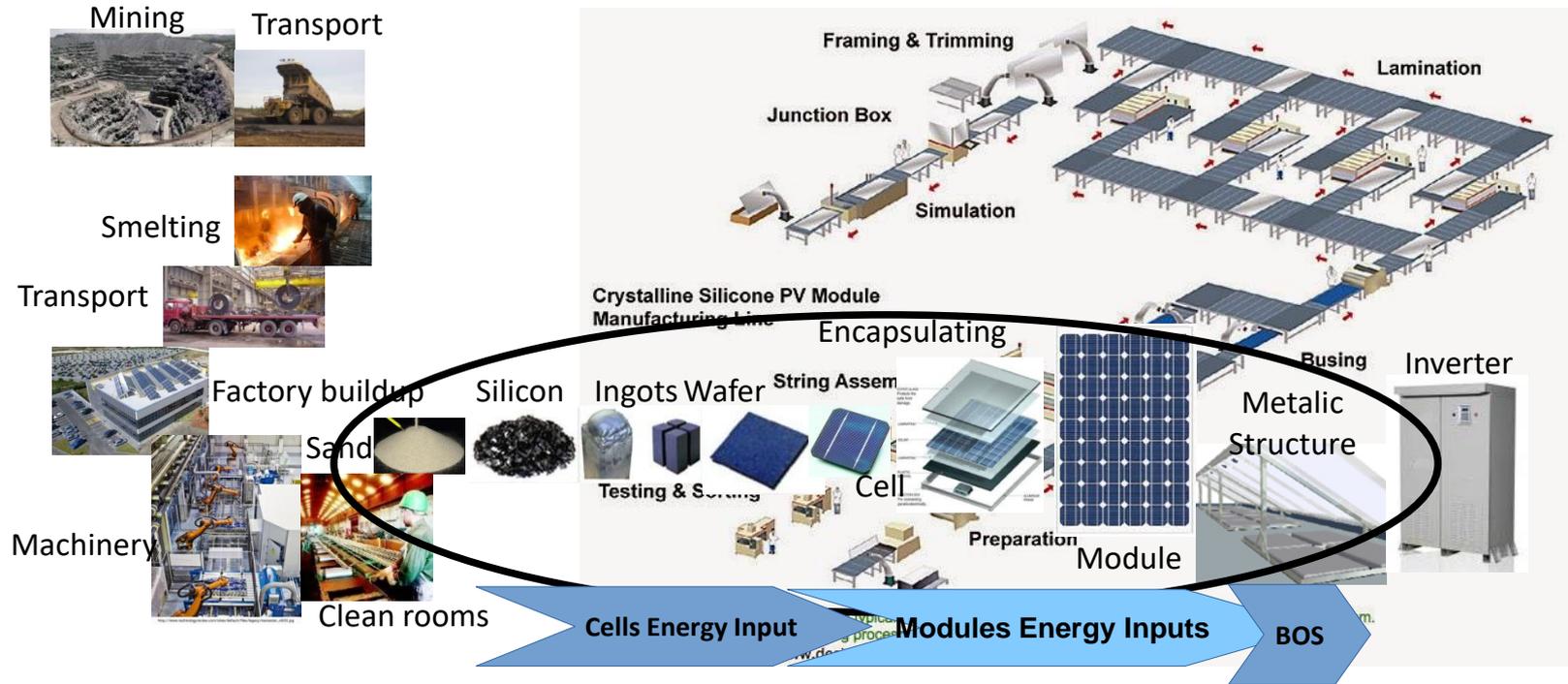
1. European Association PV CYCLE (PV CYCLE – Operational Status Report – Europe calculated about 10,000 Tons of failed and wasted modules by 2014. This could correspond to some 80 MW the overall installed capacity in 1997 in Europe.

2. From Quality Monitor 2013 of TUV Rheinland.

http://www.tuv.com/media/01_presse_2/all_languages_pressemitteilungen/Handout_Media_TUeV_Rheinland_Quality_Monitor_Solar_2013.pdf

Energie investie (E_{in})

Le cœur : cellules, modules ...



Dépenses énergétiques prises en compte dans une évaluation conventionnelle du PV solaire

$$E_{out}/E_{in} = 8.3$$

Energie investie (E_{in})

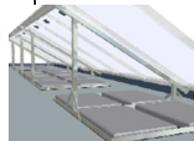
2. The Module Processes

+ Tempered Glass + Copper+ Soldering + Tedlar + EVA + Connect. Box + Cabling +encapsulating Packing box, etc.



1/3

3. Externalities of the PV System

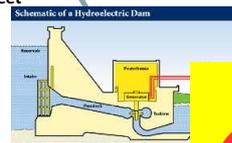


Evacuation Lines

PV Balance of System Energy Invested



Ministries, regulatory bodies, banks financial entities, municipalities, insurances, administration, etc., etc.



Pump-up, pressurized Massive Storage

2/3



National Electric Grid

Streets, roads, motorways

4. Societal Areas of SINE QUA NON energy inputs

Cell Energy Invested

PV Module Energy Invested

Societal Balance of System (BoS)

Coûts cachés, ignorés ou sous-estimés

Energie investie (Ein)

Sociétale (accès, fondations, canalisations)	1,1 %
Lignes d'évacuation	0,1 %
Fonctionnement et maintenance	7,7 %
Lavage et nettoyage	0,2 %
Auto-consommation	0,5 %
Surveillance et sécurité	2,4 %
Transport (matériel, personnel)	1,9 %
Vol et vandalisme	0,2 %
Matériel défectueux	0,8 %
Réseau électrique (restructuration)	3,5 %
Obsolescence prématurée	2,8 %
Assurances	0,5 %
Administration	0,7 %
Travail indirect	0,4 %
Taxes	0,3 %
Promotion, expositions	0,5 %
Lissage de la production	3,9 %
Travail direct	5 %

Bilan final

Factor	Typical Energy Invested Additions in a PV System	MEuros/ year (Equiv)	GWh Equiv/ year	Energy Invested in ER*X
a ₁	Module, inverters, trackers and metallic infrastructures (labor excluded)			0,120
a ₂	Accesses, foundations, canalizations and perimeter fences		148,0	0,028
a ₃	Transportations. From local manufacturers to		96,0	0,018
a ₄	Module Washing		10,7	0,002
a ₅	Self Consumption in Plants		26,8	0,005
a ₆	Operation and Maintenance Energy Costs	200	342,4	0,066
a ₇	Electrical Network/Power lines restructuring	45	77,0	0,015
a ₈	Security and Surveillance	68	116,4	0,022
a ₉	Communications and remote control and Management	5	8,6	0,002
a ₁₀	Faulty Modules, Inverters, trackers	10	17,1	0,003
a ₁₁	Fairs, Exhibitions, promotions, Conferences, etc.	40	68,5	0,013
a ₁₂	Circumstantial and Indirect Labor (not included in Direct labor activities) and Associated Economic/energy costs: Consultants, Notary Public, Public Register, , Civil Servants/Public Officers, etc.	5,7	19,3	0,004
a ₁₃	Cost of land rent or long term ownership	13	22,3	0,004
a ₁₄	Energy investments of Evacuation Lines and Rights of Way	3	5,1	0,001
a ₁₅	Pre-inscription, Inscription, Registration bonds and fees	0	0,0	0,000
a ₁₆	Associated Energy Costs to injection of intermitent loads: Pump up Costs and/or other massive storage systems, if applied		0	0
a ₁₇	Associated Energy Costs to injection of intermitent loads: Network Stabilization Associated Costs (Combined Cycles)	50	85,6	0,016
a ₁₈	Insurances	42	71,9	0,014
a ₁₉	Administration Expenses	32	54,8	0,011
a ₂₀	Equipment Stealing and vandalism	7	12,0	0,002
a ₂₁	Force Majeure Acts of God and others: Wind storms, Lighting, storms, flooding, hail		0	0
a ₂₂	Municipality Taxes, duties and levies (2-4% total project)	7	12,0	0,002
a ₂₃	Premature phase out of unamortized manufacturing and other equipment	30	51,4	0,010
a ₁ to a ₂₃	Total Invested Energy Additions	558	1245,8	0,360

Derived from conventional Life Cycle Analysis studies . Bankier and Gale quoting several studies and authors with poli, mono thin film, etc.

EROEI~8.3

Some Balance Of System (BoS) energy expenses, ignored in some or many LCA's on solar PV. These expenses are calculated directly in energy form (Prieto-Hall in preparation)

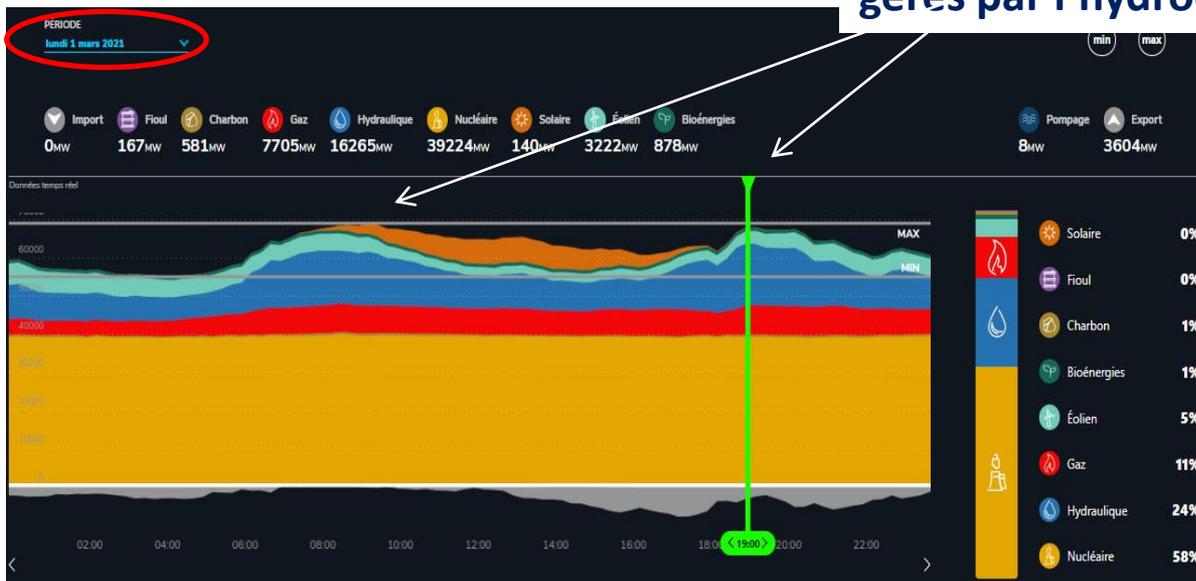
Other necessary energy inputs usually ignored in energy payback analyses for a Solar PV System in Spain. Most of them are derived from economic expenses translated into energy equivalences and distributed over a 25 year period (Some additional economic costs not included, such as Royal Decree tax for electricity producers or due payments to Agents representatives.

$$\text{Final EROEI} = \frac{1}{0.36} = 2.7$$

Fluctuations d'une production intermittente : l'Allemagne, un exemple en vraie grandeur

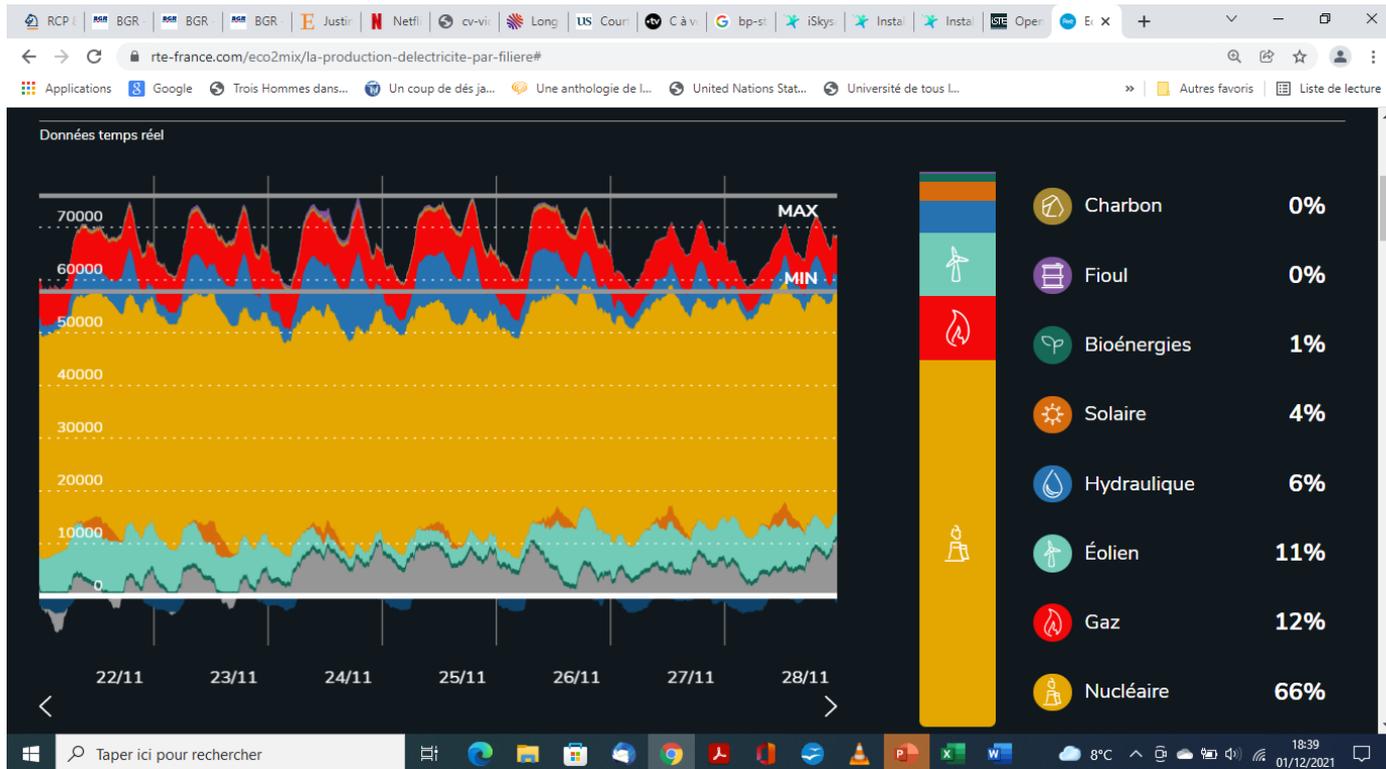
Fluctuations de la demande d'électricité sur une journée : de 10 à 15% de la puissance moyenne appelée

Pics du matin et de 19h : gérés par l'hydroélectricité

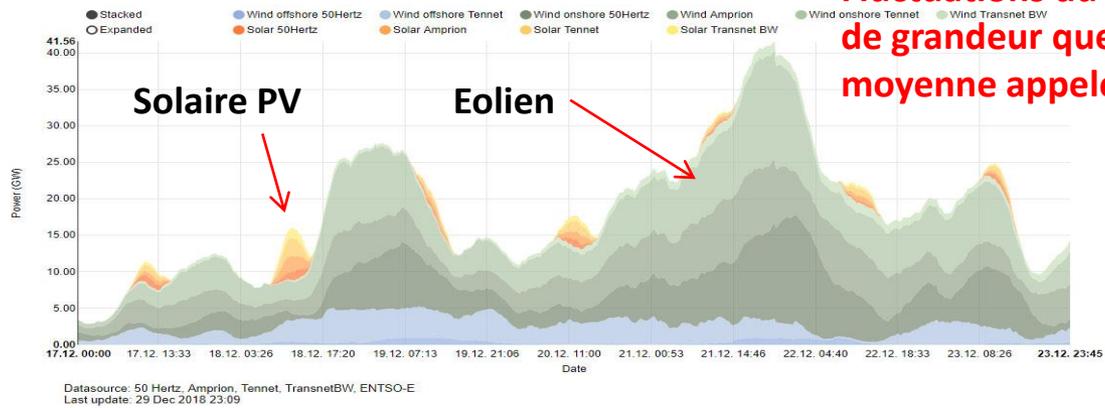
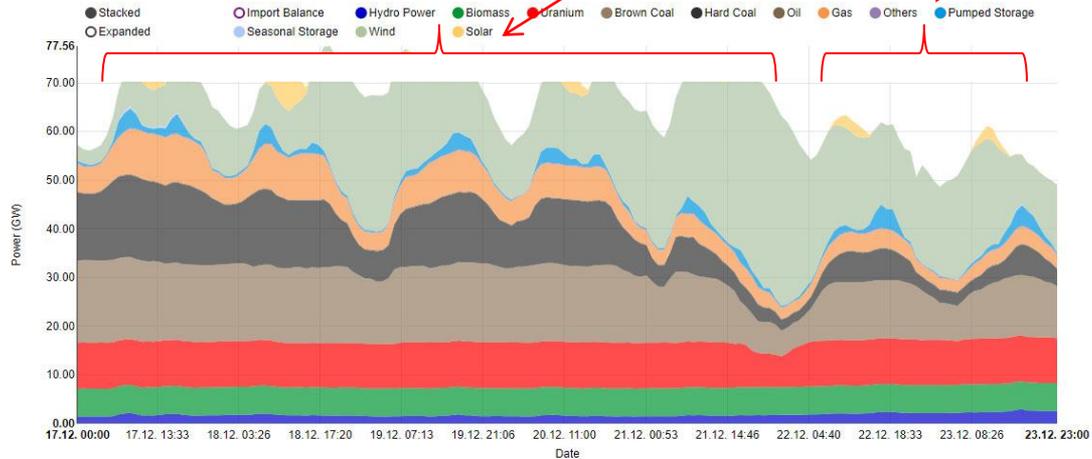


Source : RTE éCO2mix

Fluctuations de la production en France sur une semaine



Production sur une semaine : jours ouvrés week-end



Comparaison des fluctuations

Fluctuations de la **demande** : environ 10% de la puissance moyenne

Fluctuations des **productions intermittentes** : du même ordre de grandeur que la puissance moyenne

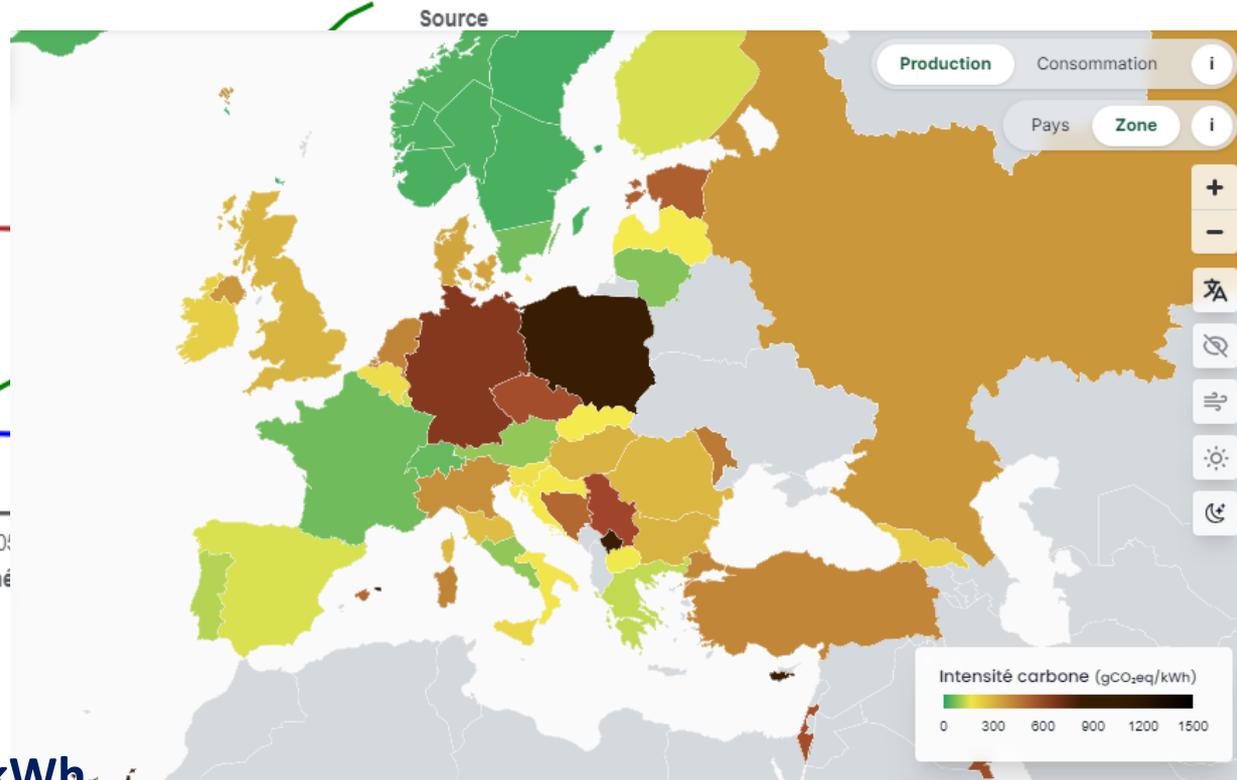
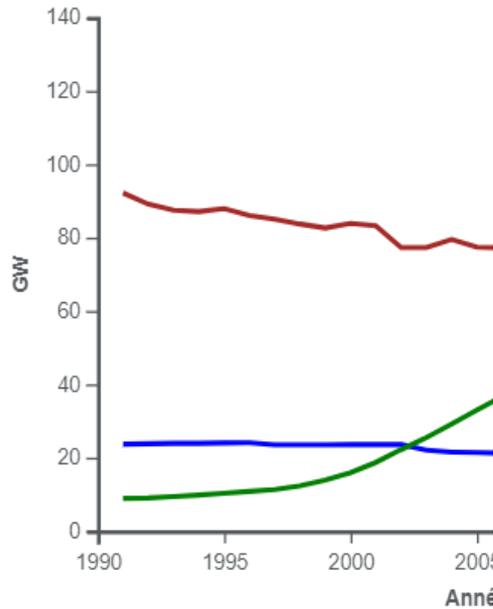
D'où nécessité de **stockage** ou de **back-up** pour gérer les fluctuations de la production

En Allemagne : back-up fourni par le charbon, le lignite et de plus en plus le gaz

L'installation de 120 GW d'éolien et de PV **n'a pas permis de diminuer** la puissance pilotable installée

Les émissions de CO₂, par kWh produit, sont de l'ordre de **10 fois celles de la France...**

Une expérience en vraie grandeur



France 52 gCO₂/kWh

Allemagne 650 gCO₂/kWh

Stockage électrochimique

Ordre de grandeur de la densité d'énergie stockée : 1 eV par atome , soit $1,6 \cdot 10^{-19}$ J/at

Densité d'énergie de stockage : de quelques dizaines à quelques centaines de Wh/kg

Stocker 1% de la consommation d'électricité en France : 5 TWh

Energie de toutes les batteries du monde : quelques TWh ...

Hydrogène

En France : 1 Mt/an (chimie, engrais, raffinage du pétrole)

Produit à 95% à partir de fossiles (par vaporeformage du méthane et gazéification du charbon), 3% de nos émissions de CO₂.

Production par électrolyse (pas d'émissions de CO₂ avec électricité décarbonée) :

1 kg H₂ : 50 kWh

1 Mt H₂ : 50 TWh (10% de la consommation d'électricité)

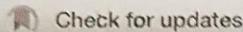
Plan français 2035 : 630 000 tH₂ (400 000 t industrie, 230 000 t énergie (réseau de chaleur et transport, R&D électrolyseurs), électricité nucléaire (piloteable, peu chère))

Limite des usages énergétiques : France 150 Mtep, 30% pour les transports, 50 Mtep.

Il faudrait dédier environ 800 TWh !

Transports collectifs (bus, remplacement de locomotives diesel)

Un brin de polémique...



Emerging consensus on net energy paves the way for improved integrated assessment modeling

Cite this: DOI: 10.1039/d3ee00772c

Louis Delannoy,^a *^{ab} Matthieu Auzanneau,^c Baptiste Andrieu,^{cd} Olivier Vidal,^d Pierre-Yves Longaretti,^{ae} Emmanuel Prados,^a David J. Murphy,^f Roger W. Bentley,^b Michael Carbajales-Dale,^g Marco Rauegi,^{hi} Mikael Höök,^{ij} Victor Court,^{klm} Carey W. King,ⁿ Florian Fizaine,^o Pierre Jacques,^p Matthew Kuperus Heun,^q Andrew Jackson,^r Charles Guay-Boutet,^s Emmanuel Aramendia,^t Jianliang Wang,^{uv} Hugo Le Boulzec^w and Charles A.S. Hall^x

Emerging consensus on net energy

As researchers in the field of NEA, we summarize our position with the following 8 key points, which approximate an emerging consensus around EROI:

1. The standard EROI of oil is usually lower than that of gas which is lower than that of most coal.¹⁷
2. Conventional fossil fuels (crude oil, natural gas liquids, *etc.*) may have lower standard EROIs than tight gas and oil produced from fracking^{18,19} but higher than other unconventional fuels (tar sands, mined shale oil, coal bed methane, *etc.*).^{6,20,21}

5. Today, the EROI of fossil-fueled electricity at point of end-use is often found to be lower than those of PV, wind and hydro electricity, even when the latter include the energy inputs for short-term (e.g., 8 h) storage‡ technologies.^{29,30} Average EROI values however hide strong regional variability, particularly for solar and wind technologies.^{31,32}

‡ The inclusion of storage devices in the system boundary (rather than at the level of an individual country or region) would likely increase the EROI of electric

6. The EROI of nuclear and hydropower have historically been high, however, the former is constrained by slow deployment times, the latter is limited in terms of availability of suitable locations, and both face many environmental considerations.

7. The point of use EROI for thermal fuels is usually low, specifically for liquid fuels (gasoline, biodiesel, bioethanol, etc.) compared to solid (coal, woodchips, etc.) or gaseous fuels.³⁰

8. A rapid large-scale deployment of renewable electricity and associated infrastructure will likely temporarily reduce the dynamic EROI (i.e., PROI) of the energy system as it requires a significant upfront energy investment embodied in infrastructure.^{7,8,33-36}

Comment dimensionner le stockage en cas de forte pénétration des EnR ?

Marc Fontecave et Dominique Grand

Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage des énergies Intermittentes

Académie des sciences, 2021

<https://doi.org/10.5802/crchim.115>

Condition des réseaux électriques : assurer, en tout point du réseau et à chaque instant, la condition :

$$P(x,t) = C(x,t)$$

Pour un mix électrique donné, comparer la consommation (connue) et la production (anticipée) sur une année.

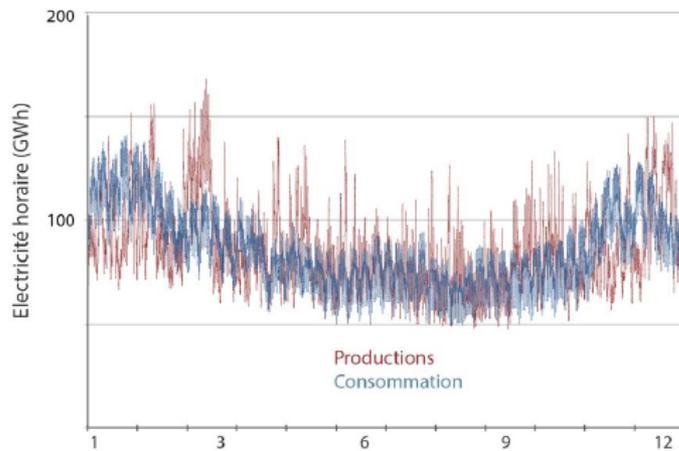


FIGURE 6. Productions cumulées (rouge) et consommation (bleue) du scénario 50% ENR.

que dans le scénario précédent (comparer avec la Figure 1).

Cela se traduit par une tension beaucoup moins importante sur le réseau électrique pour équilibrer

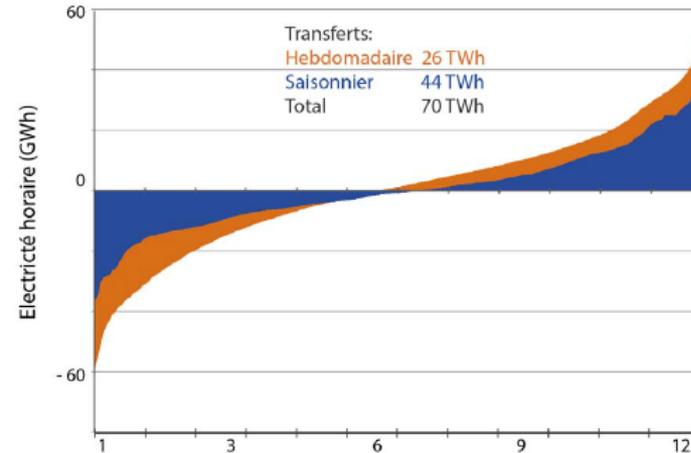


FIGURE 7. Monotone rangeant l'énergie horaire de la réserve de la valeur effacée (négative) extrême à la valeur restituée maximale dans le scénario 50% nucléaire. La définition des abscisses, des ordonnées et des couleurs est la même que dans la Figure 3.

Scénario 2050 – nucléaire 50%

TWh/an	Nucléaire	Hydro	Eolien	PV	Biomasse	Gaz	Charbon	Σ
2019	379	60	34	12	10	37	4	536
2050	375	60	220	55	40	0	0	750

Pour chaque source, on calcule $E_{in} = E_{out}(max)/EROI$ rapporté à la durée de vie de l'installation.

EROI filières	Nucléaire	Hydro	Eolien	PV	Biomasse	Gaz	Charbon
Weissbach	50	49	16	4	4	28	30
UNECE	28	22,2	20	5,6			

L'EROI(global) est calculé comme :

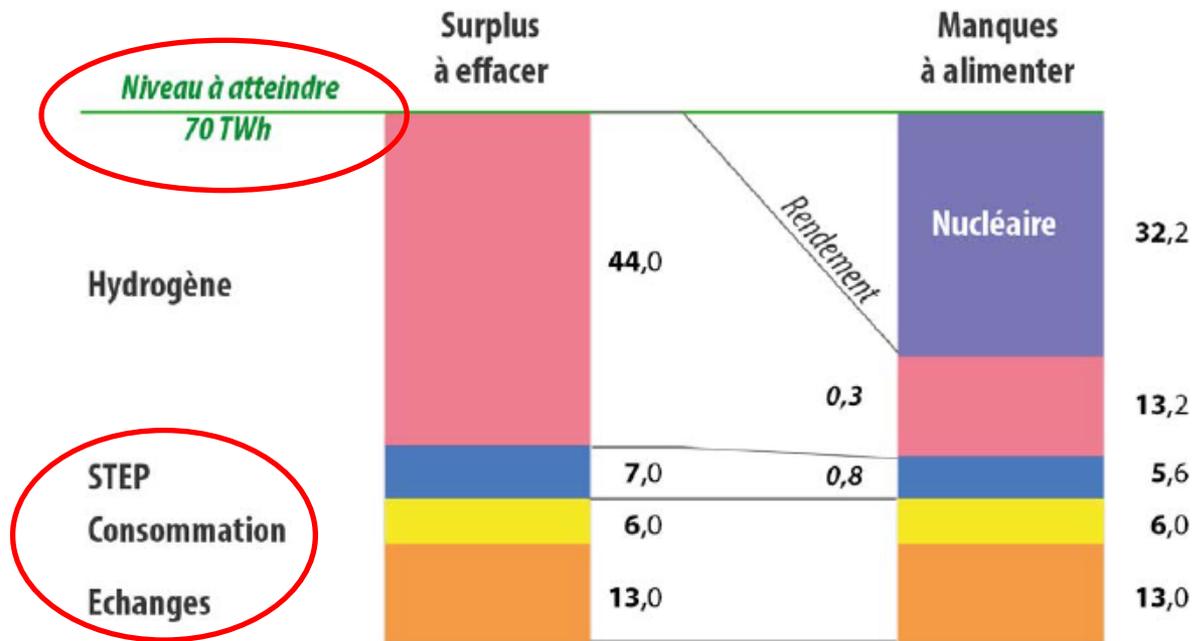
$$EROI(global) = \text{Somme}(E_{out}) / \text{Somme}(E_{in})$$

Résultats

	2019	E _{in} 2019	2050 50%	E _{in} 2050
Nuke	379	6,10	375	7,20
Hydro	60	3,40	60	3,40
Eol	34	2,60	220	16,93
PV	12	3,13	55	14,06
Gaz	37	3,57		
Biomass	10	2,94	40	11,76
Charb	4	0,13		
	536	21,88	750	53,36
EROI global		25		14

Et la gestion de l'intermittence ?

Solution Hydrogène + Nucléaire



$E_{in}(ad)$

$32+31 = 63$

à ajouter à
53

**EROI (global)
divisé par 2 !**

FIGURE 9. Récapitulation des différents moyens d'appoint utilisés pour transférer l'électricité des périodes de surplus aux périodes de manque dans le scénario 50% ENR

Fin (provisoire) de la polémique

Fin de la conférence

Merci de votre attention...

Pyramide inversée des besoins énergétiques (EROI minimum)



Société industrielle/technologique
EROI 12-25



Société industrielle développée
EROI 8-15:1



Société industrielle
EROI 6-13:1



Société agricole avancée
EROI 5-6:1

**Minimum EROI
Strip Required
for Civilization**



Agriculture et élevage primitifs
EROI 4-5:1



Chasseurs cueilleurs
EROI métabolique 2-3:1

Conclusions

EROI requis

12-25:1



8-15:1



6-13:1



5-6:1



4-5:1



2-3:1



...au pire

Le PV a un EROI_{ext} de ce niveau (au mieux)..



... mais la discussion est vive !

Solar-PV energy payback and net energy: Meta-assessment of study quality, reproducibility, and results harmonization

R.H.E.M. Koppelaar 2016

The study harmonization yielded a mean EPT for mono- and polysilicon solar-PV of 3.9 and 2.9 years, and **a mean NER of 8.6 and 9.2 times**, as expressed in solar energy output gain per unit of energy input.

The average time between study publication and sourced data was established at 7 years within a 2–18 year range, due to which **energy input costs are typically overestimated** as **recent technological improvements are not captured**.

When filtering for studies with manufacturing data collected after 2008, the harmonized average EPT for mono- and polysilicon was found to be approximately half (e.g. 2.0 instead of 3.9) and **NER double (e.g. 14.4 instead of 7)**, relative to studies with data from 2008 or older.

but ... !

... hypothèses contestables : (dommage !)

"Energy input values for **batteries, auxiliary services, and power lines operation and restructuring** were removed from studies incorporating these."

"Energy input values for labour and capital investment cost based on conversions via the energy intensity of economies were removed from studies incorporating these. Wages in the view of this author represent an **allocation of energy surplus**, not an energy consumption on-site, and including capital expenditures causes **double counting** of embodied material and direct energy costs in manufacturing of solar-PV."

"Electricity output values were recalculated using a **1700 kWh/m²/ year** radiation value."