



Transition énergétique ? Oui, mais pas si simple !

Gérard Bonhomme

Professeur émérite à l'Université de Lorraine

Président de la Commission Énergie de la Société Française de Physique

Membre du groupe énergie de l'EPS

gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr

Tentons d'aborder la question...sans a priori !

“...Il faut, se dépouillant de toute opinion exagérée, ouvrir au règne de la philosophie et des sciences (trésor des puissances humaines), un accès comme celui du royaume des cieux, où il n'est donné d'entrer qu'avec le cœur de l'innocence; car la nature ne se laisse vaincre que par celui qui sait lui obéir.” Francis Bacon (1561-1626)

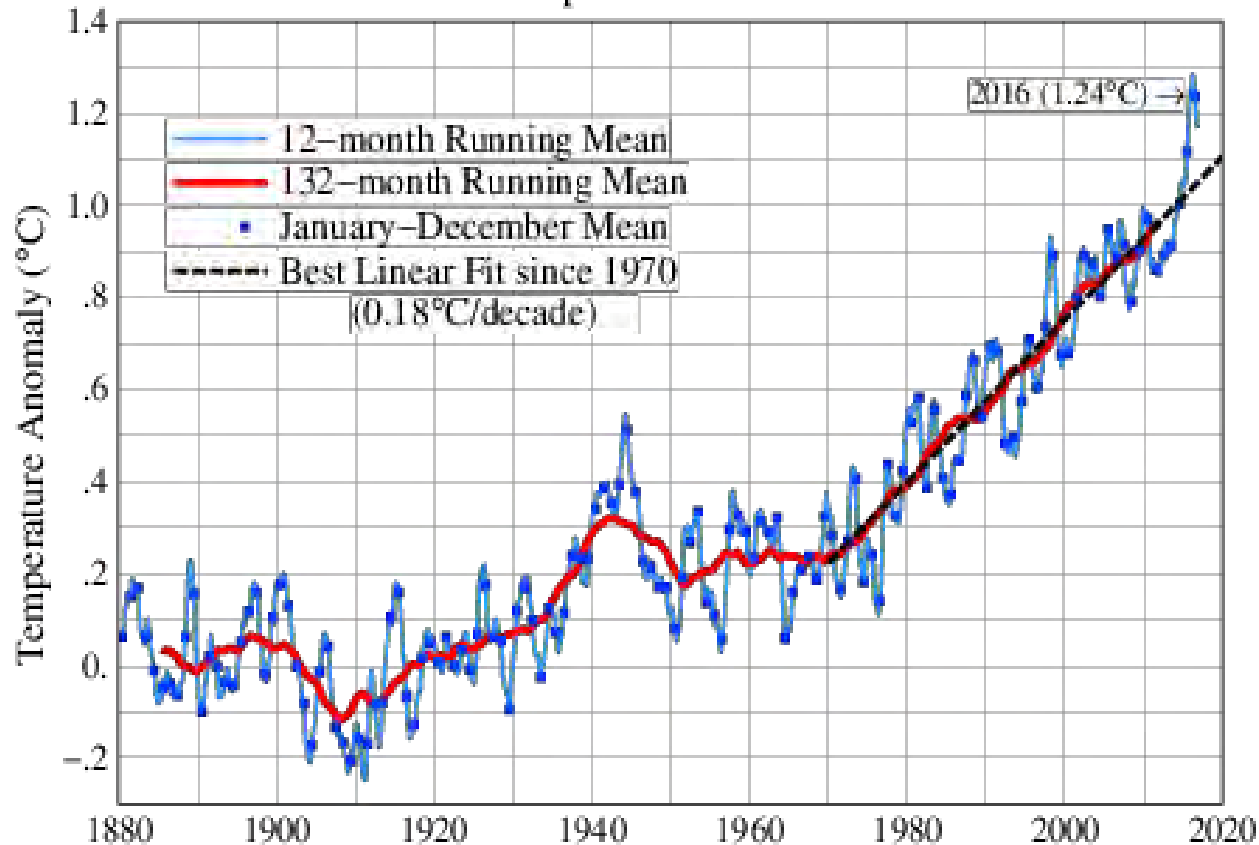
« Les convictions sont de plus dangereux ennemis de la vérité que les mensonges. »

Friedrich Nietzsche



Le risque climatique

Global Surface Temperature: 1880–1920 Base Period



source NASA, Columbia University, New-York

- **Observation**
- **Cause**
- **Prévisions?**
- **Actions??**

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.

L'énergie : un concept pas si facile à appréhender (1)

C'est l'énergie qui met le monde en mouvement, les êtres vivants comme les sociétés humaines.

- Elle existe sous différentes formes de différentes qualités → unités variées : unité légale (joule), chaleur (calories), nourriture (kilocalories), carburants (tonne-équivalent-pétrole), électricité (kWh);
- 1 kWh = quantité d'énergie délivrée par une installation pendant 1 heure pour un débit de 1 kilowatt (analogie avec le volume d'eau délivré par un robinet)
- Organismes vivants : leur métabolisme assure la **conversion**, de la façon dont elle est stockée dans la nourriture, en travail musculaire, chaleur et déchets → apport quotidien ~ 3 kWh (2584 kcal) → puissance moyenne 125 W, convertie en chaleur (100 W), travail musculaire et déchets ;

Exemple : la machine à vapeur



L'énergie contenue dans l'alcool à brûler permet de faire bouillir l'eau, mais seule une fraction est convertie dans le mouvement mécanique du piston qui entraîne la roue, le reste est dissipé en chaleur

Historiquement :

- Leibnitz & Papin (1666)
- Newcomen (1712)
- James Watt (1769)

La machine à vapeur a permis la révolution industrielle ... et conduit à une très vaste déforestation de l'Europe ... jusqu'à l'utilisation du charbon !

Elle a aussi permis le développement de la science de l'énergie :

- Conservation de l'énergie, équivalence de la chaleur et de l'énergie mécanique, (**Joule**)

- Efficacité de conversion de chaleur en travail (rendement de **Carnot**, 2nd principe)

L'énergie : un concept pas si facile à appréhender (2)

- Sur 24h l'énergie musculaire utilisable représente environ 10% de l'apport en nourriture, soit $\sim 0,3$ kWh \rightarrow énergie contenue dans $1/30^{\text{ème}}$ de litre de pétrole pour un apport de $1/3$ de litre !
- Sociétés humaines : la conversion (de l'énergie primaire jusqu'aux usages finaux) assure le chauffage des bâtiments, la mobilité des personnes et des marchandises, tous les usages dans la production des biens et services ;
- Moyenne mondiale : 60 kWh/jour/tête, mais énormes écarts :
- Sociétés agraires : environ 12 kWh/jour/pers (~ 4 kg de bois)
- Sociétés industrielles européennes : environ à 120 kWh/jour par tête, dont en gros 20 kWh/jour pour les usages de l'électricité, 40 kWh/jour en chauffage et autant pour les transports $\rightarrow \sim 400$ esclaves mécaniques !

L'énergie : un concept pas si facile à appréhender (3)

- Pour la France : la consommation totale d'énergie primaire correspond à environ 3000 TWh, dont 51% proviennent de ressources fossiles, avec une consommation ~ 500 TWh pour l'énergie électrique.
- Consommation mondiale ~ 155 000 TWh, dont 82% proviennent de ressources fossiles.
- 1 TWh = 1 milliard de kWh → pour stocker 1 TWh d'électricité il faudrait ~ 25 millions de batteries de voiture électrique de type Zoé (40 kWh par véhicule ~ 4 litres de carburant !)
- pour récupérer l'équivalent de la quantité d'énergie contenue dans un litre de pétrole, soit 10 kWh, il faut faire descendre 10 m³ d'eau d'environ 400 m !
- → Enorme défi et enjeu du stockage de l'énergie électrique !

Énergie et puissance: quelques données 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, 1000 PJ ~ 278 TWh**)
Puissance → **1 kWh/j** (1 kWh par jour) = **41,7 W**, avec **1 kW = 24 kWh/j**
- **Relations utiles :**
 - 1 baril de pétrole (159 l, ~ 0.136 tonne) → 1632 kWh, **1 litre de pétrole → ~ 10 kWh**
 - 1 tep (ou tonne oil equivalent, **1 toe**) → ~ 42 GJ ~ **11.63 MWh** ~ 7.4 boe (barils)
 - 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 !**
- **Besoins :**



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

Dissipation d'énergie vs. complexité

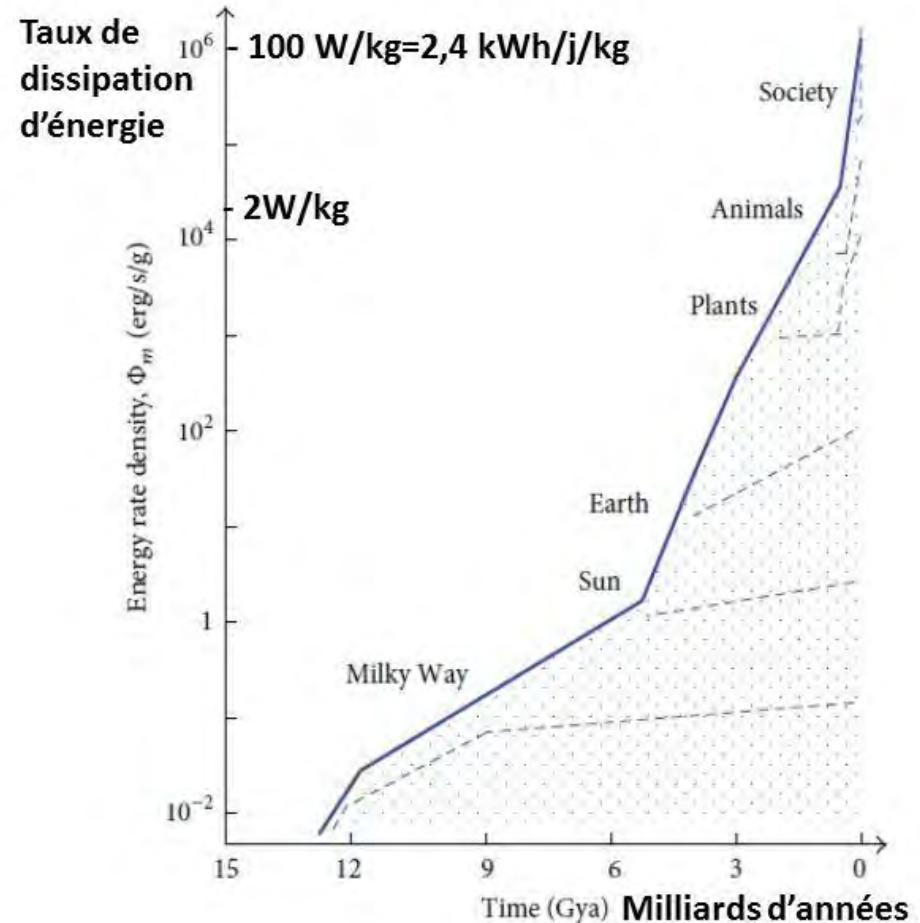
La quantité d'énergie dissipée par unité de masse mesure de l'évolution de la complexité dans notre univers.

Les ruptures de pente correspondent à des phénomènes d'émergence de nouvelles structures complexes :

- Métabolisme humain: 2W/kg ($2584\text{ kcal/j} = 3\text{ kWh/j/pers} \rightarrow 125\text{W in}$ et $\sim 35\text{W out}$ mécanique)
- Société agraire : 12 kWh/j/pers
- Europe médiévale: 30 kWh/j/pers
- Société industrielle: 150 kWh/pers

Note: $1\text{ erg/s/g} = 10^{-4}\text{ W/kg}$, $1\text{ litre de pétrole} \sim 11\text{ kWh}$, $1\text{ kg bois} \sim 3\text{ kWh}$ et

$1\text{ l de pétrole} \sim 10\text{ m}^3\text{ d'eau élevés de } \sim 400\text{ m}!$

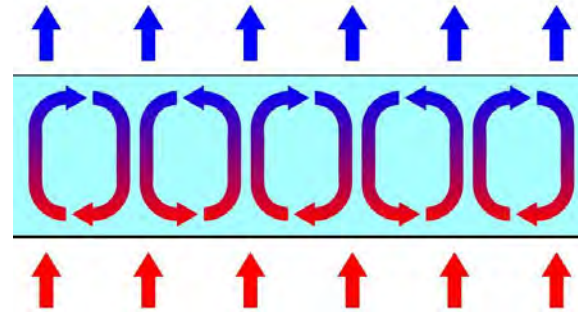
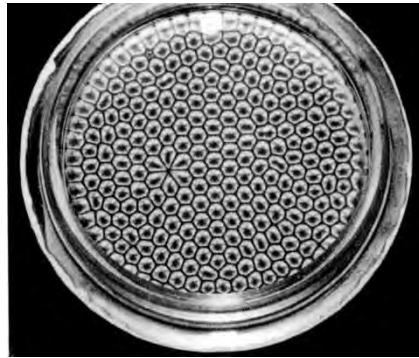


Eric J. Chaisson, The Scientific World Journal

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

Évolution et dissipation d'énergie

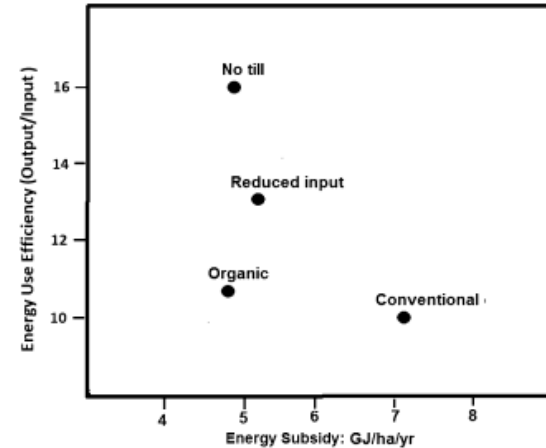
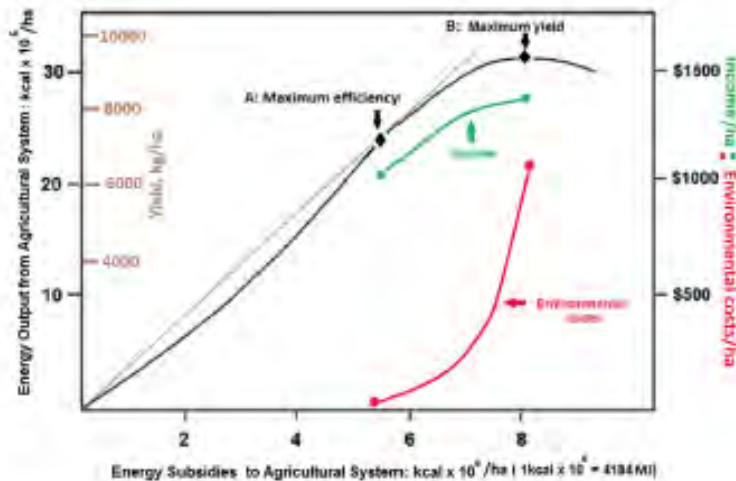
- Lotka (1922) : « Les espèces qui utilisent des fractions du flux d'énergie disponible le plus efficacement (toutes choses égales par ailleurs) pour leur croissance et leur existence, accroîtrons leur population et ainsi le flux d'énergie au travers du système s'en trouvera augmenté »
- Swenson (1997):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



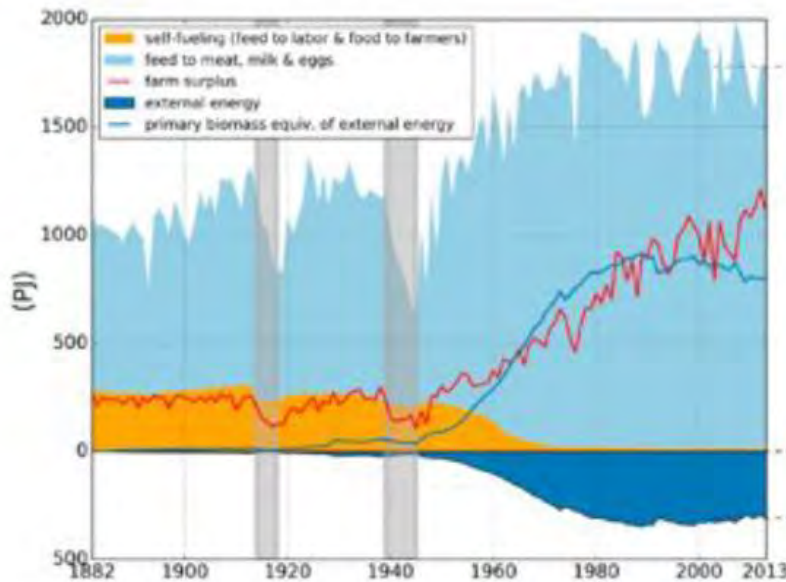
Systemes ouverts loin de l'équilibre thermodynamique (e.g. systemes vivants, sociétés) → **Principe de la Production Maximale d'Entropie (MEPP)**

→ **La Loi Constructale**, A. Bejan & S. Lorente, (2013) J. Appl. Phys. **113**, 151301

Le cas de l'agriculture



'The Farm as a Thermodynamic System: Implications of the Maximum Power Principle', Carl F. Jordan, *Biophys. Econ. Resour. Qual.* (2016) 1:9



On estime qu'une agriculture décarbonée pourrait nourrir entre 1 et jusqu'à moins de 10 milliards d'habitants. (cf. Petros Chatzimpiros).

Consommation et utilisations de l'énergie

- A partir des data de l'IEA, <http://www.iea.org/> :
 - Diagrammes de flux des processus de conversion de l'énergie (l'énergie n'est pas créée, elle est seulement convertie d'une forme et qualité en une autre forme et qualité, e.g. dégradée)
 - Répartition régionale
- Observations:
 - ✓ Environ la moitié de la population mondiale doit se contenter d'un tiers de la moyenne mondiale, i.e. per capita ~ 20 kWh/j, i.e. moins que ce dont disposaient les Européens au moyen-âge (~ 30 kWh/day/pers);
 - ✓ Les écarts sont bien sûr encore plus grands pour ce qui concerne la consommation d'électricité ;
 - ✓ Un rapport \sim trois est systématiquement observé entre les consommations d'énergie primaire et les utilisations finales, (cf. Sankey diagrams). Dans quelle mesure ce rapport pourrait-il être réduit en augmentant l'efficacité énergétique ?

Consommation mondiale - Diagramme de flux

155 000 TWh : Primaire

World Energy Flow
in 2011: ~534000 PJ

(58kWh/j/capita)

0,3%

Wind
1600

5,1%

Nuclear
28000

2,4%

Hydro
13000

0,2%

Solar
990

0,5%

Geothermal
2800

Domestic
120000

Imports
36000

Domestic
160000

Imports
29000

Domestic
53000

Imports
580

Domestic
170000

Imports
140000

Natural Gas
150000

Coal
190000

Biomass
54000

Petroleum
320000

Processing /
Gasification
110000

Refining /
Liquefaction
180000

Electricity and
Heat
210000

Electricity and
Heat
210000

Electricité 19 000 TWh

Finale :

110 000 TWh

81200 TWh

Residential
87000
22%

Commercial
30000
8%

Industrial
140000
36%

Non-Energy
34000
9%

Transportation
100000
25%

59 000 TWh
Utile
22kWh/j/cap

Rejected
Energy
290000

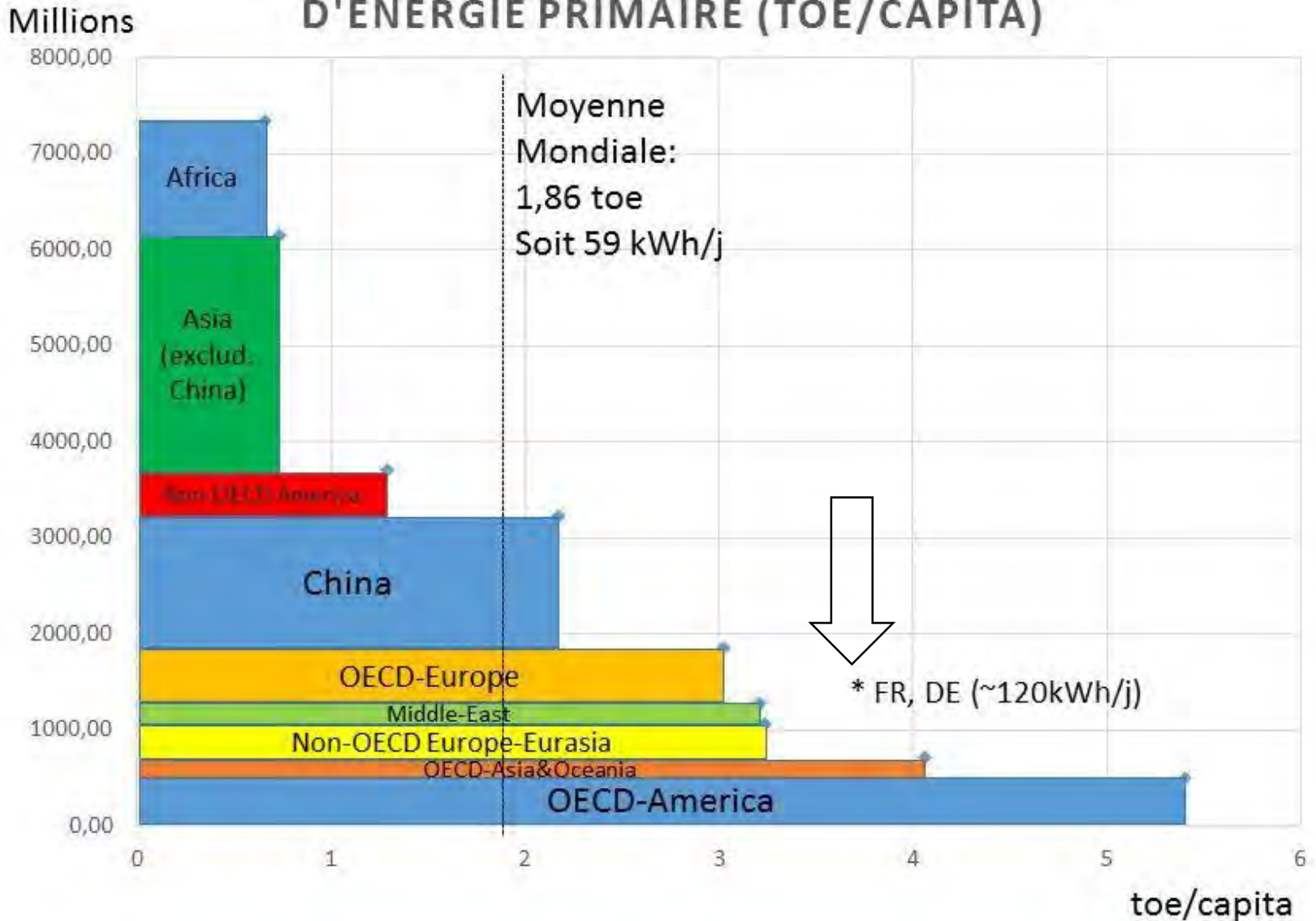
Energy
Services
210000



Source: LLNL 2014. Data is based on IEA's Extended World Energy Balances (2013 Edition). If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the U.S. Department of Energy, under whose auspices the work was performed. All quantities are rounded to 2 significant digits and annual flows of less than 0.05 PJ are not included. Totals may not equal sum of flows due to statistical differences. Imports and Exports represent gross global trade. Further detail on how all flows are calculated can be found at <https://flowcharts.llnl.gov/LLNL-14-11527>.

82% fossiles

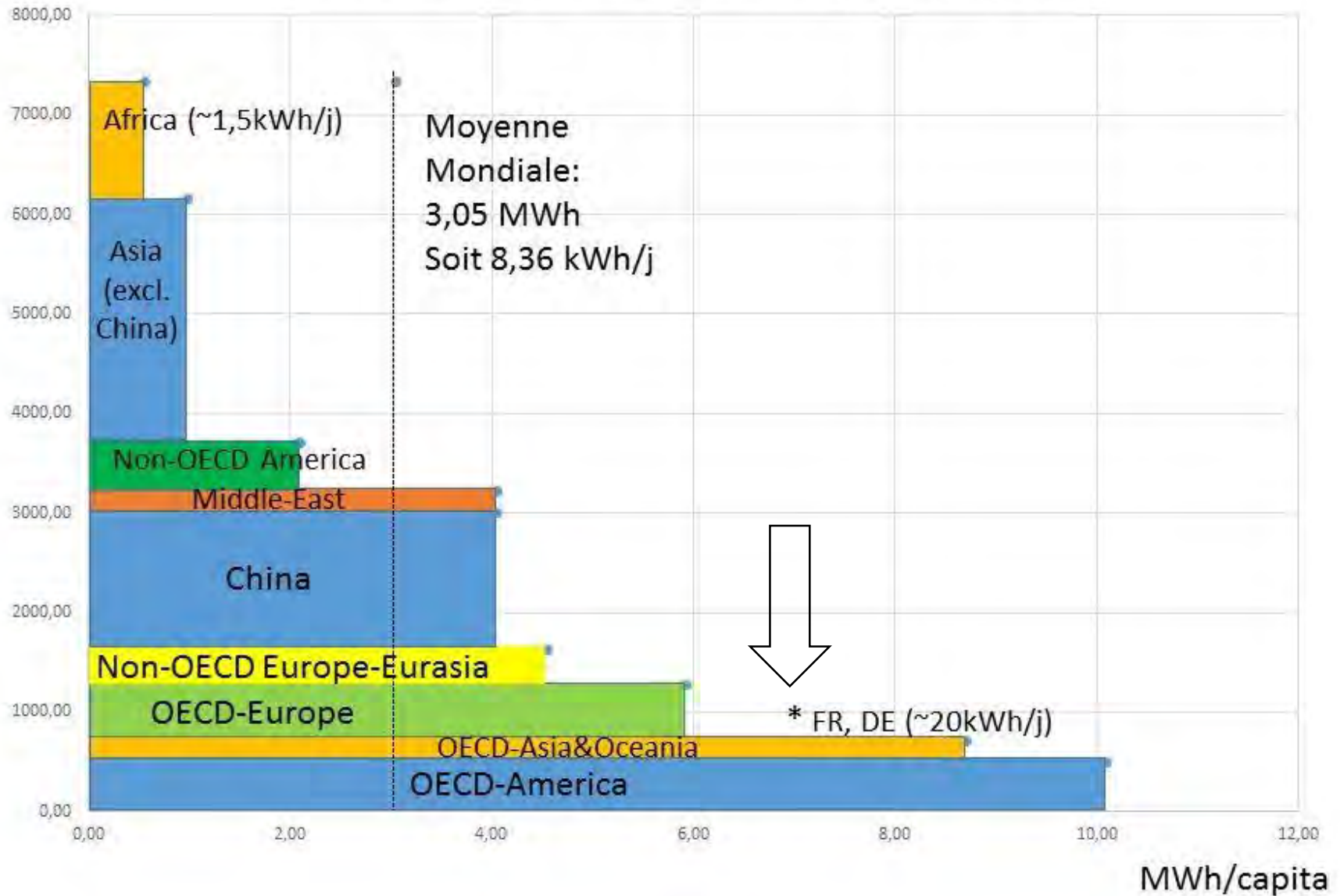
RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE L'USAGE D'ÉNERGIE PRIMAIRE (TOE/CAPITA)



Based on IEA data, <http://www.iea.org/>

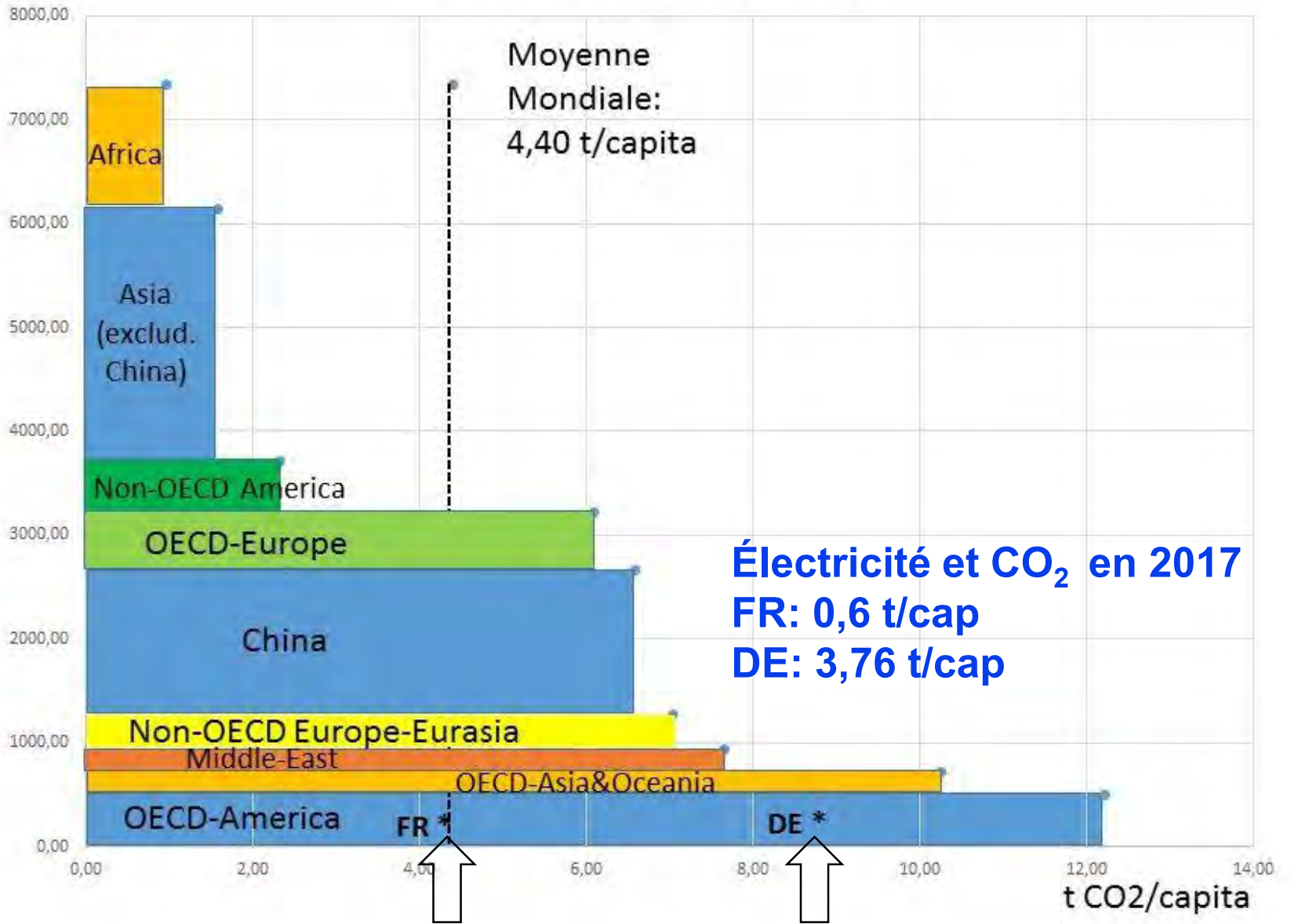
Millions

Consommation annuelle d'électricité (MWh/capita)



Millions

CO2 Emissions (t CO2/capita)



Usages de l'énergie - Monde

World
FINAL CONSUMPTION (2015)

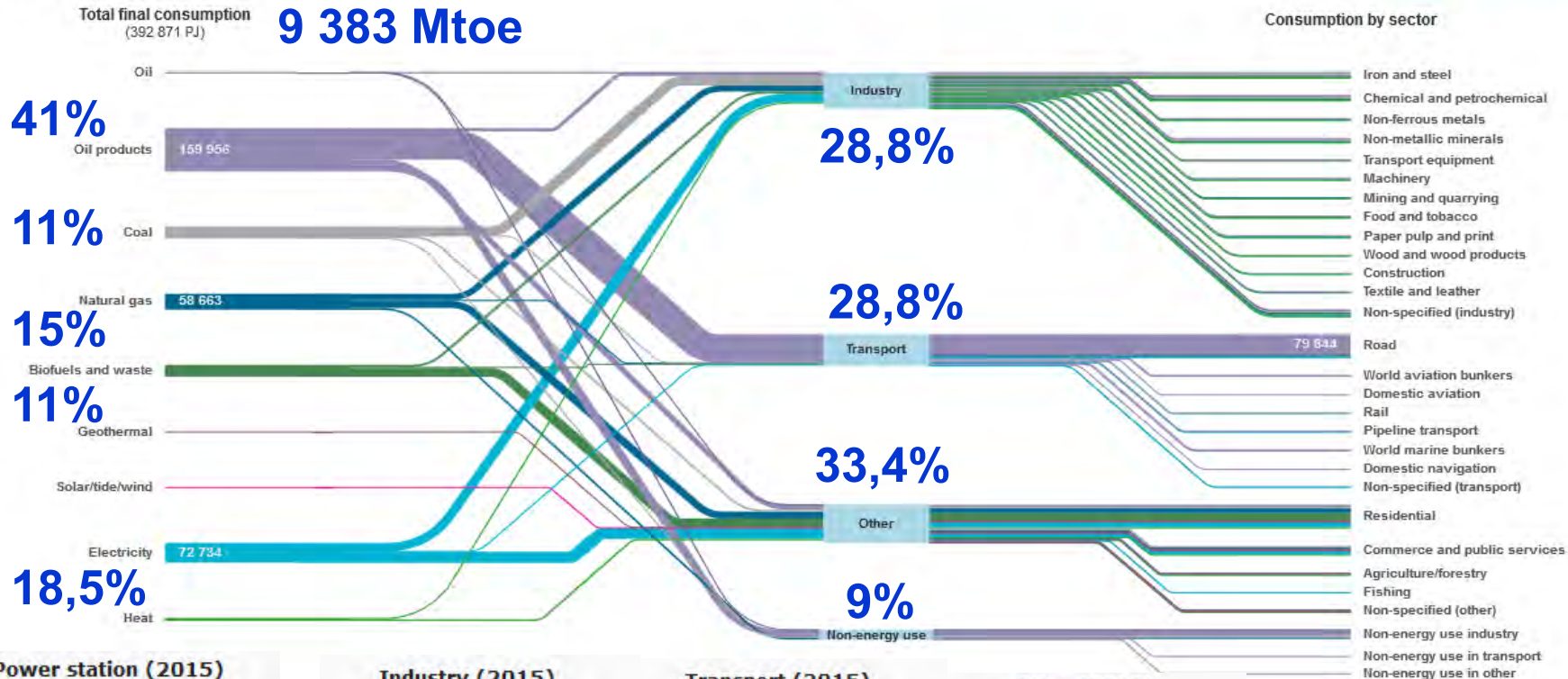
110 000 TWh (primaire: 150 000 TWh)

9 383 Mtoe

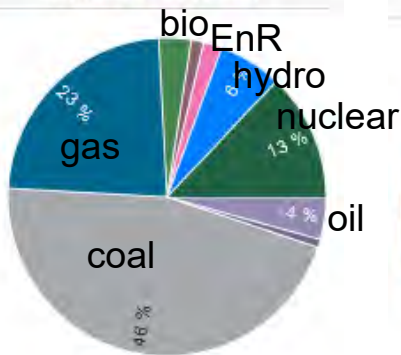
Petajoules



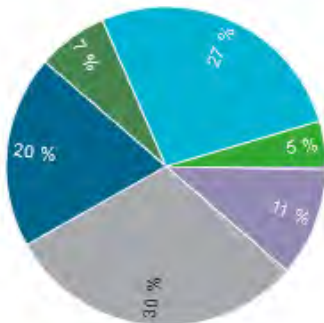
Consumption by sector



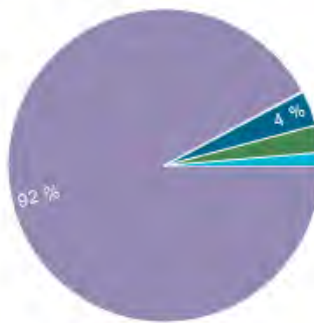
Power station (2015)
Total: 216 762 PJ



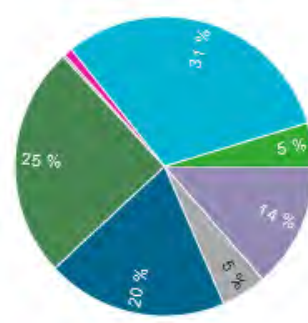
Industry (2015)
Total: 2 712 Mtoe



Transport (2015)
Total: 2 704 Mtoe



Other (2015)
Total: 3 132 Mtoe



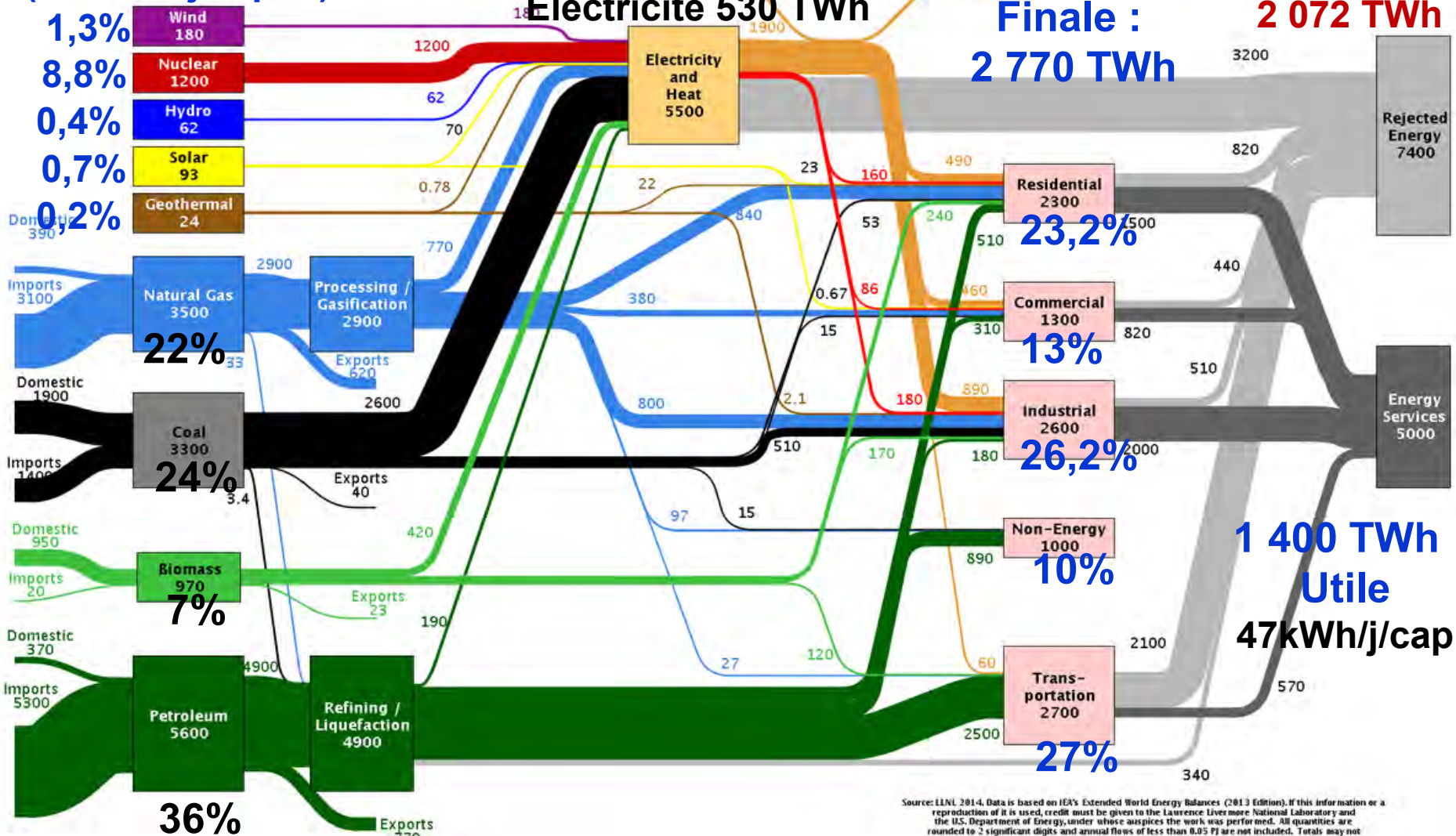
- Oil
- Oil products
- Coal
- Natural gas
- Biofuels and waste
- Electricity
- Heat

Deutschland - Diagramme de flux

Primaire: 3 800 TWh

Germany Energy Flow
in 2011: ~13300 PJ

(127kWh/j/capita)



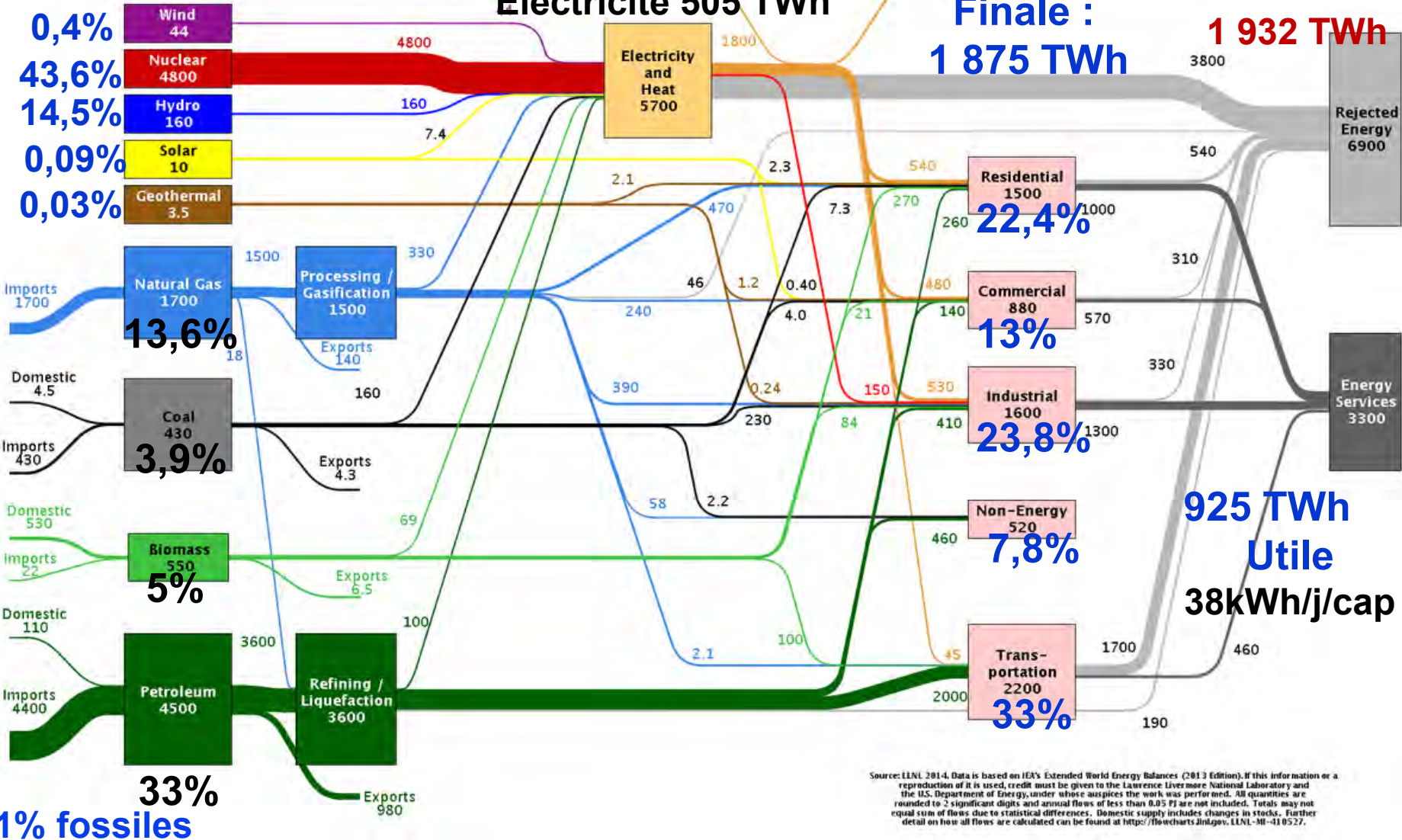
Source: EIA 2014. Data is based on IEA's Extended World Energy Balances (2013 Edition). If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the U.S. Department of Energy, under whose auspices the work was performed. All quantities are rounded to 2 significant digits and annual flows of less than 0.05 PJ are not included. Totals may not equal sum of flows due to statistical differences. Domestic supply includes changes in stocks. Further detail on how all flows are calculated can be found at <http://flowcharts.llnl.gov>. LLNL-MI-41 0527.

France - Diagramme de flux

Primaire: 3 000 TWh

France Energy Flow
in 2011: ~10800 PJ

(124kWh/j/capita)



Source: LNL 2014. Data is based on IEA's Extended World Energy Balances (2013 Edition). If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the U.S. Department of Energy, under whose auspices the work was performed. All quantities are rounded to 2 significant digits and annual flows of less than 0.05 PJ are not included. Totals may not equal sum of flows due to statistical differences. Domestic supply includes changes in stocks. Further detail on how all flows are calculated can be found at <http://flowcharts.llnl.gov>. LNL-11-110527.

Usages de l'énergie - France

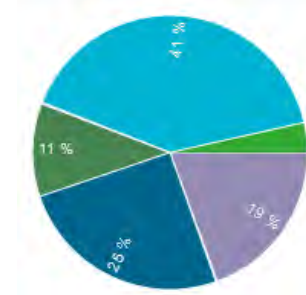
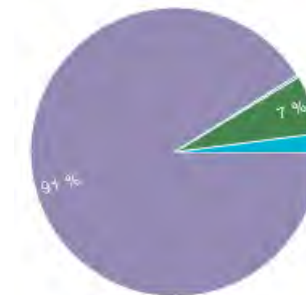
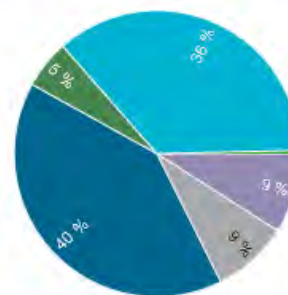
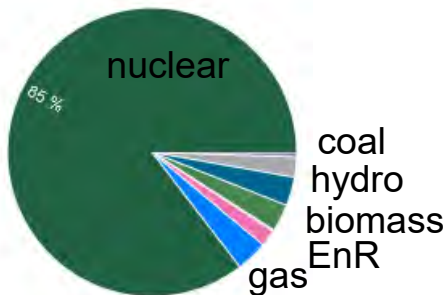
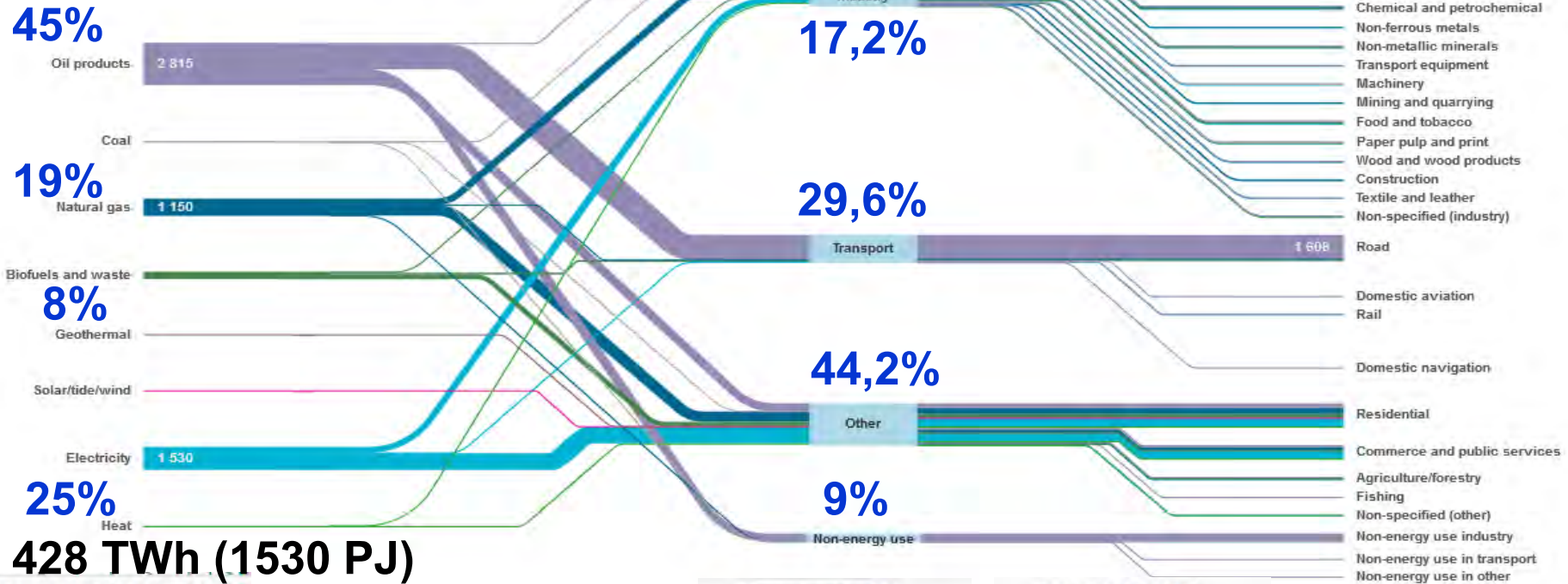


France
FINAL CONSUMPTION (2015)

1733 TWh (primaire: 3300TWh)
286 Mtoe

Total final consumption
(6 188 PJ)

Consumption by sector



Usages de l'énergie - Allemagne

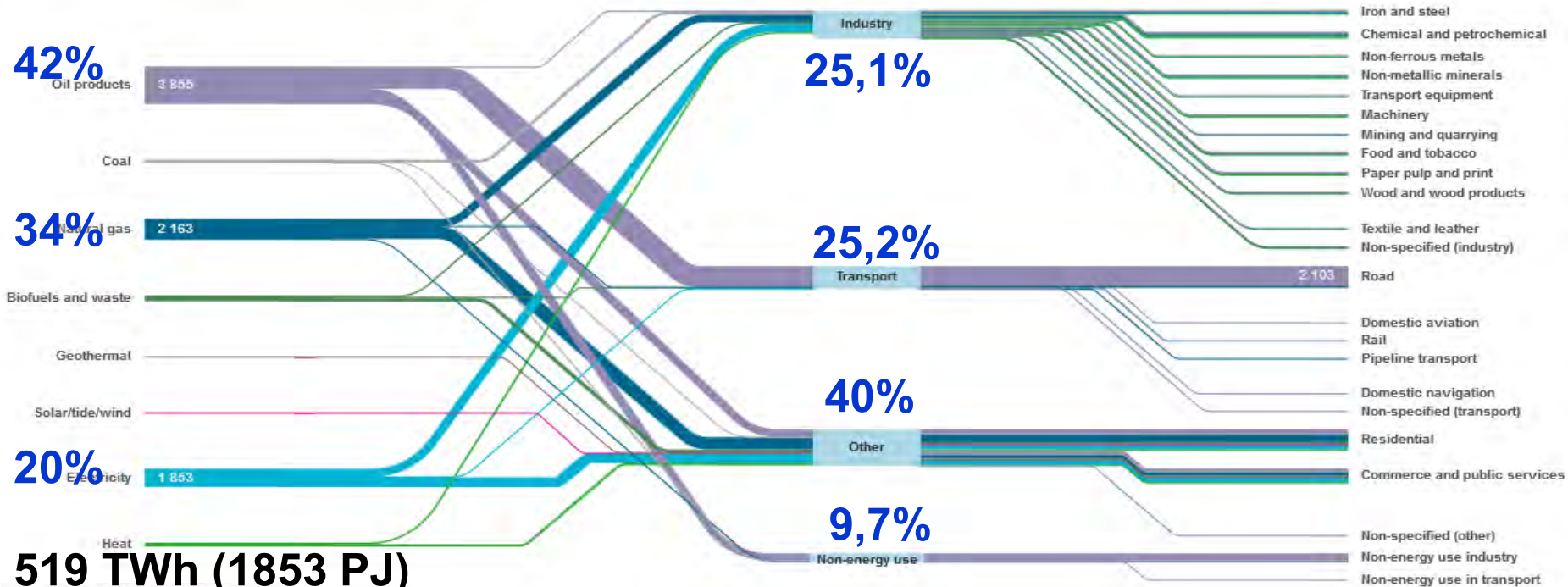


Germany
FINAL CONSUMPTION (2015)

2581 TWh (primaire: 4429 TWh)
286 Mtoe

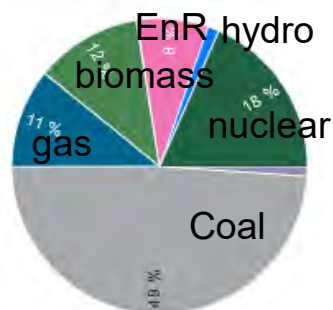
Total final consumption
(9 218 PJ)

Consumption by sector



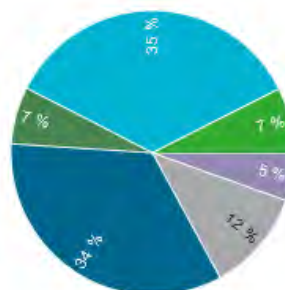
519 TWh (1853 PJ)

Power station (2015)
Total: 5 437 PJ

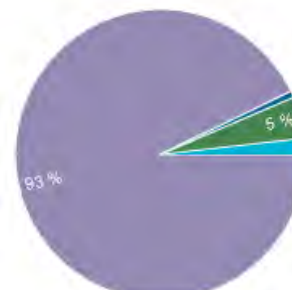


- Oil
- Oil products
- Coal
- Natural gas
- Biofuels and waste
- Geothermal
- Solar/tide/wind
- Electricity
- Heat

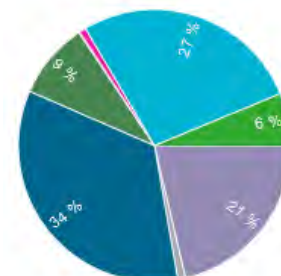
Industry (2015)
Total: 2 315 PJ



Transport (2015)
Total: 2 332 PJ

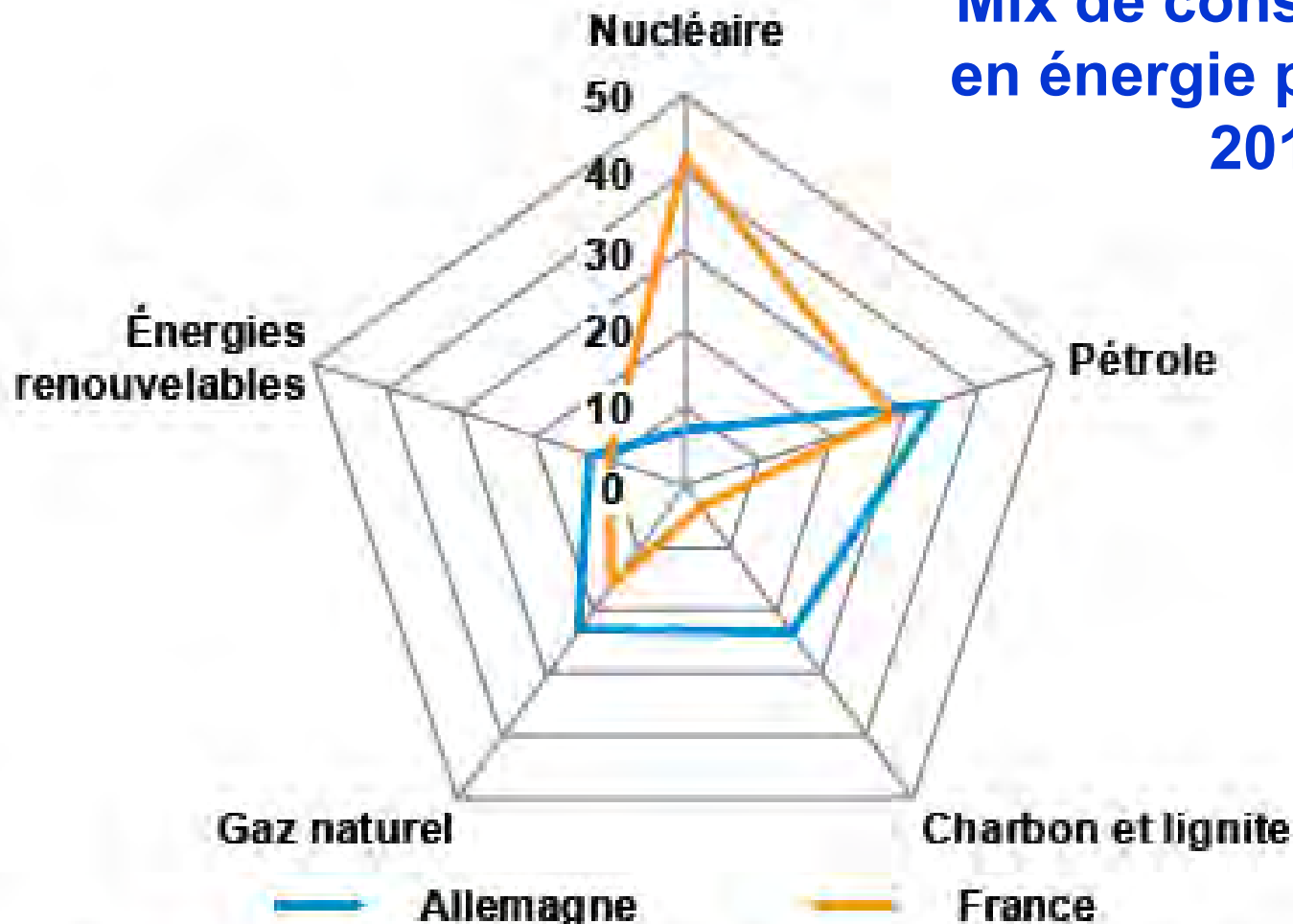


Other (2015)
Total: 3 681 PJ



Comparaison France - Allemagne

Mix de consommation en énergie primaire en 2016



Source : France Stratégie, d'après Bilan France, ministère de la Transition écologique et solidaire et AG Energiebilanzen

Consommation et utilisations de l'énergie

- A partir des data de l'IEA, <http://www.iea.org/> :
 - Diagrammes de flux des processus de conversion de l'énergie (l'énergie n'est pas créée, elle est seulement convertie d'une forme et qualité en une autre forme et qualité, e.g. dégradée)
 - Répartition régionale
- Observations:
 - ✓ Environ la moitié de la population mondiale doit se contenter d'un tiers de la moyenne mondiale, i.e. per capita ~ 20 kWh/j, i.e. moins que ce dont disposaient les Européens au moyen-âge (~ 30 kWh/j);
 - ✓ Les écarts sont bien sûr encore plus grands pour ce qui concerne la consommation d'électricité ;
 - ✓ Un rapport environ trois est systématiquement observé entre les consommations d'énergie primaire et les utilisations finales, (cf. Sankey diagrams). Dans quelle mesure ce rapport pourrait-il être réduit en augmentant **l'efficacité énergétique** ?

Réponse UE : Energy roadmap 2050

1. Introduction



2. A secure, competitive and **decarbonised** energy system in 2050 is possible

Un jeu d'enfant !

- EU Roadmap 2050 (2011):
 - ✓ **40-50% de réduction des émissions en Europe** (~ 11% des émissions mondiales) en 2050 (...correspondant à une réduction de **4-5% des émissions mondiales...**)
 - ✓ Réduction (comparée à 1990) de ~ 60% en 2030 et ~ 95% en 2050 de la part des énergies fossiles dans la production d'électricité (**actuellement ~ 50% en Europe et 5-8% en France**)

Réduction des émissions de gaz à effet de serre : ces objectifs sont-ils réalistes ?

COP21 : Objectif d'une limitation du réchauffement mondial entre 1,5 °C et 2°C d'ici 2100 (→ **comment ??**)

- **Loi de transition énergétique Française de 2015 :**
 - ✓ **Baisse des émissions de CO₂ : 40% d'ici 2030, facteur 4 en 2050**
 - ✓ Baisser la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025 ; atteindre 32% d'EnR (énergie finale) en 2030
 - ✓ 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 ;
 - ✓ **découpler progressivement la croissance économique et la consommation de matières premières → Croissance verte**

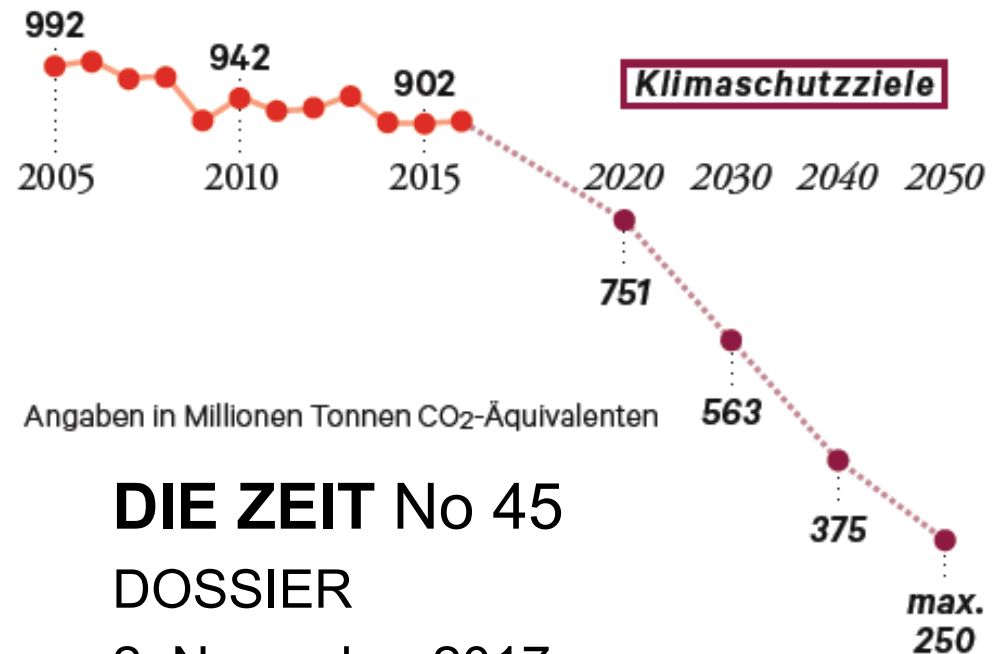
COP23 à Bonn: Où en étions-nous en Allemagne?

Malgré ~ 300 Mrds € déjà investis (500 Mrds à terme sur 20 ans) dans les EnRs électrogènes, l'Allemagne ne réussit pas à baisser grâce aux énergies renouvelables ses émissions, tout en sortant du nucléaire.

En 2017, la production d'électricité a émis près de 10 fois plus de CO₂/kWh en Allemagne qu'en France (environ 490 g CO₂/kWh en Allemagne contre 53 g CO₂/kWh en France)

So wird das nichts

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



DIE ZEIT No 45

DOSSIER

2. November 2017

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

Das Naturschauspiel

Nouvelles directives européennes : Energie propre pour tous les Européens

Au vu des trajectoires les objectifs de 2011 ne seront pas atteints, mais les décideurs politiques surenchérissent !

Mise à jour du package **Clean Energy for All Europeans** (Nov. 2016):

(Priorité à l'efficacité énergétique ; Parvenir au premier rang dans le secteur des EnR ; Offrir des conditions équitables aux consommateurs)

- ✓ 40% GES réduction en 2030, et **80-100% en 2050!**
- ✓ Comment ? **EnR** + économies d'énergie (objectif 30% en 2030)
- ✓ **32% part des ENR** pour UE en 2030 (→ 55% de l'électricité à partir EnR en 2030, et **totalelement décarbonée en 2050**)

NEWS | 10 July 2018 | Brussels | Energy

One step closer towards fulfilling the Energy Union: Commission welcomes Parliament committee votes on Clean Energy Package



The European Commission welcomes today's strong endorsement by the European Parliament of three key proposals of the [Clean Energy for All Europeans](#) package (presented by the European Commission on 30 November 2016). A joint meeting of the Committee on Industry,

Dernières nouvelles de l'UE : « Green Deal »

- **Ursula von der Leyen, présidente de la Commission européenne expose ses mesures destinées à faire de l'Europe le premier continent neutre sur le plan climatique
→ Objectif neutralité carbone en 2050**
- **Déclarations à la COP25 :**
 - «Une poignée de pays riches à promis ... d'atteindre la neutralité climatique en tant d'année. ... Cela semble impressionnant au premier abord, mais même si les intentions sont bonnes, ce n'est pas du leadership, ce n'est pas montrer la voie, c'est une tromperie». Greta Thunberg
 - «Les solutions sont juste sous nos yeux. Mais où sont les champions? Où sont les leaders? Où sont les adultes dans la salle?». Jennifer Morgan, Greenpeace International

Ces deux affirmations sont-elles réalistes ?

- « **La croissance verte** », i.e. découplage possible entre niveau de vie et consommation d'énergie et de ressources
- La panacée existe : il suffit de développer les énergies dites renouvelables*

*** 100% d'énergie renouvelable, c'est possible !**

(cf. Mark Jacobson, (2011) WWS (Vent, Eau, Soleil), '*Les obstacles à l'implémentation du programme d'énergie renouvelable sont principalement d'ordre social et politique, mais ni technologique ni économique*', ADEME (rapport final 2016), Negawatt ...

→ **Examinons les faits ... sans a priori**

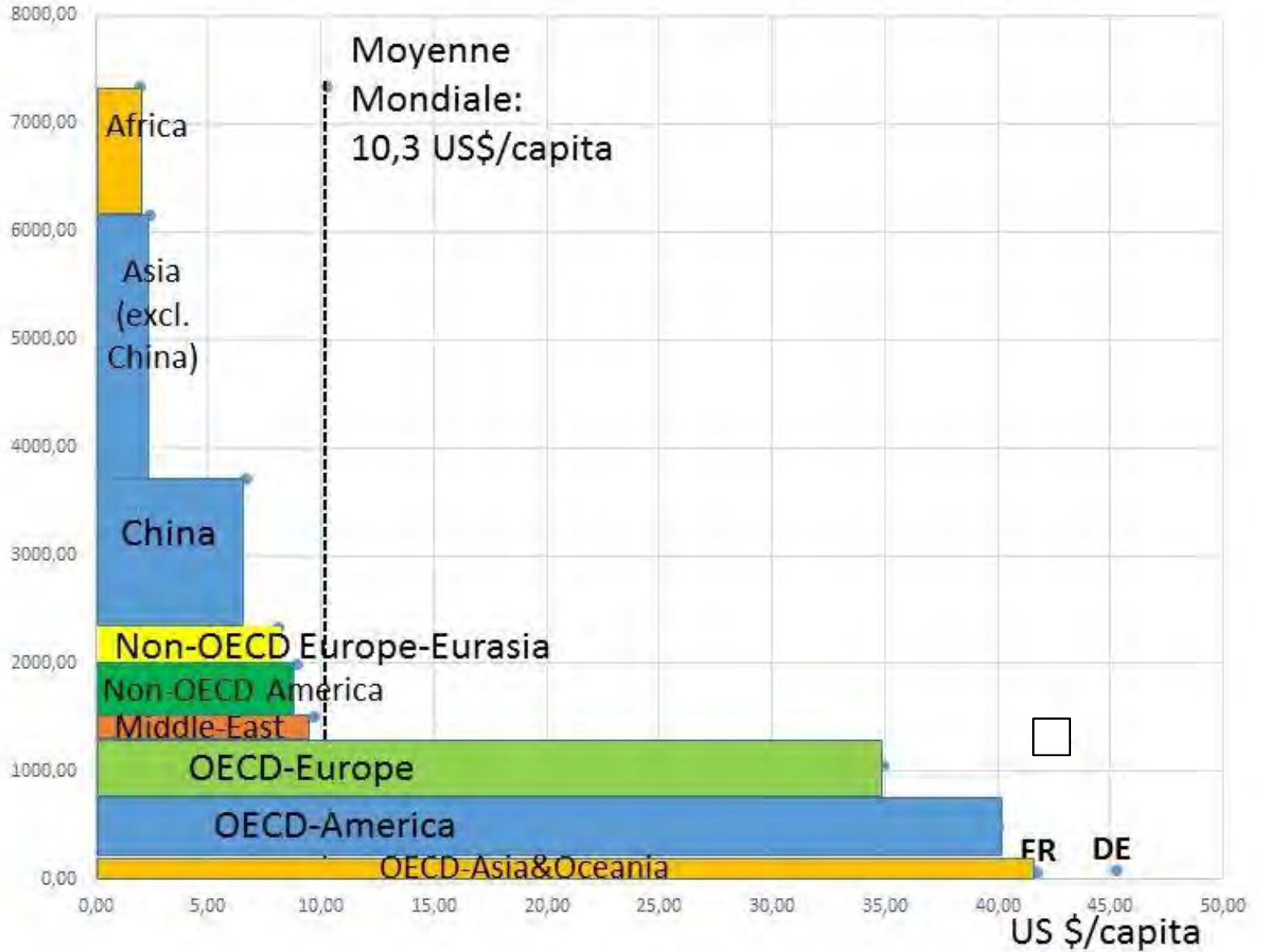
Énergie et niveau de vie

Quelle sorte de relation ?

- **Dans quelle mesure l'économie dépend-elle de l'énergie ?**
- **Quelle relation entre PIB et consommation d'énergie ?**
- **Le PIB est-il l'indicateur le plus pertinent ?**

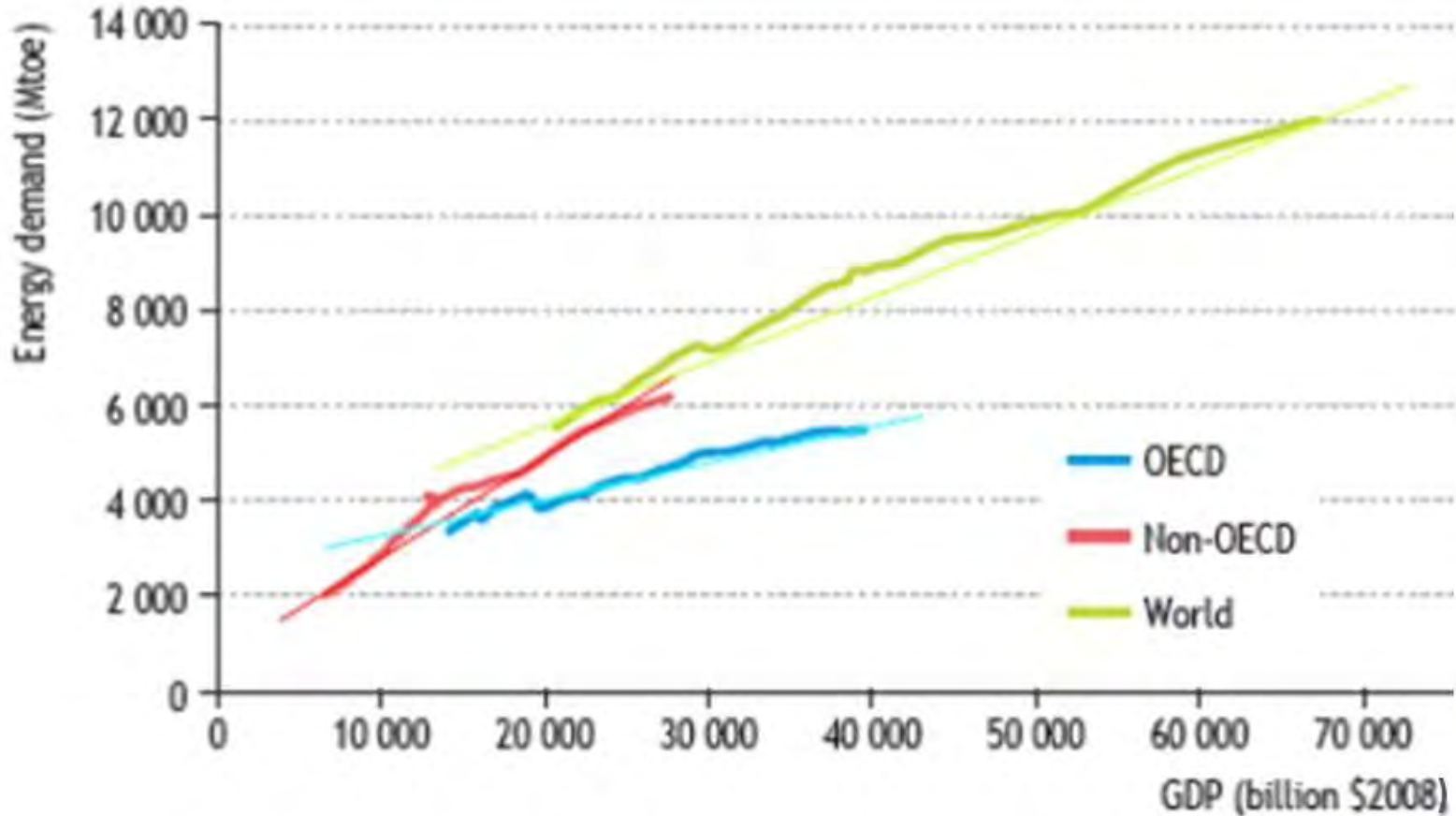
Répartition mondiale du PIB en 2015 (2010US \$/capita)

Millions



Qu'observe t-on ?

Énergie primaire et PIB, 1971-2007



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

Quid du couplage entre énergie et PIB ?

- Problème : ?
 - À partir des observations on mesure une élasticité* de l'énergie 10× plus grande (de l'ordre de 60%).
- Explication : des économistes 'hétérodoxes' sérieux (R. Ayres, R. Kümmel, G. Giraud, ...) ont reconsidéré le problème en intégrant les contraintes des lois de la nature :
 - ➔ les élasticités des facteurs de production (capital, travail, énergie) ne sont plus égales à leur part respectives dans le PIB (~ 6% seulement pour l'énergie), et sont alors en accord avec les données empiriques ;
 - ➔ les modélisations reproduisent correctement les évolutions observées.

*Coefficient qui mesure le poids, dans la variation relative du PIB, d'une variation relative d'un des facteurs de production

Économie, société et énergie

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 leurs transformations.

Il n'existe aucun substitut !

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

“*Natura non nisi parendo vincitur*”. Francis Bacon (1561-1626) **On ne commande la nature qu'en lui obéissant.**

Comment mesurer la qualité de vie?

Corrélations avec des indices énergétiques ?

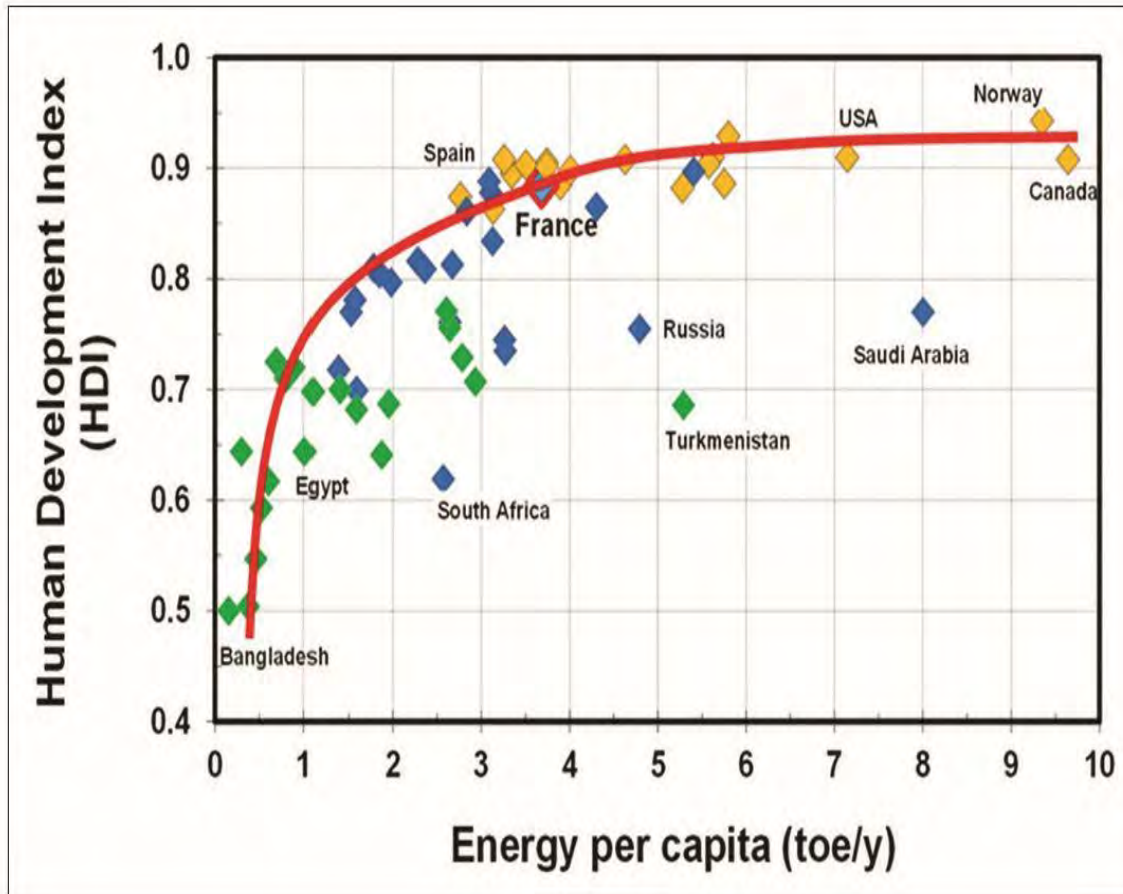
Le PIB est-il une bonne mesure ?

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)

Indice de développement Humain vs. PIB

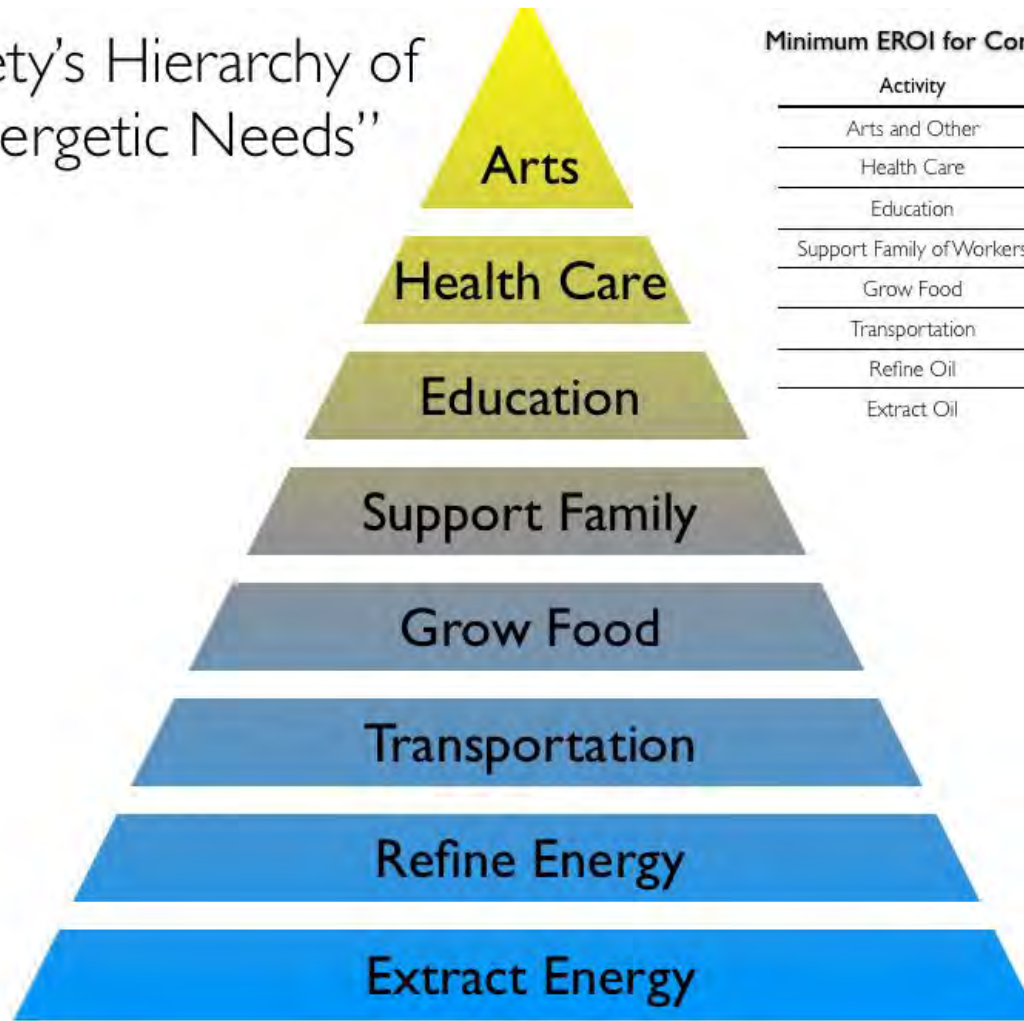


Le HDI, introduit par l'UNESCO, combine 3 indicateurs : santé/longévité, niveau d'éducation, niveau de vie

Crédit : Henri Safa,
International Journal of
Energy Economics and
Policy, 2017, 7(2), 287-
295

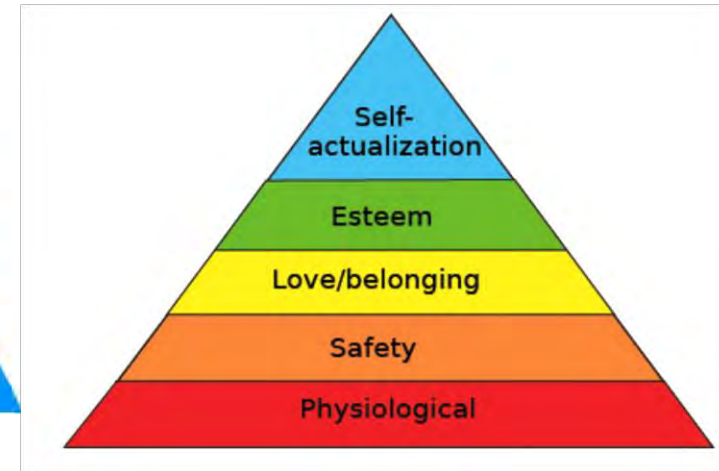
- Un seuil d'énergie (> 1.5 toe/y, soit ~ 50 kWh/jour/cap) semble clairement requis
- Un excès d'énergie, au-dessus de 130 kWh/j/cap ne contribue plus à accroître le HDI

Society's Hierarchy of "Energetic Needs"



Minimum EROI for Conventional Sweet Crude Oil

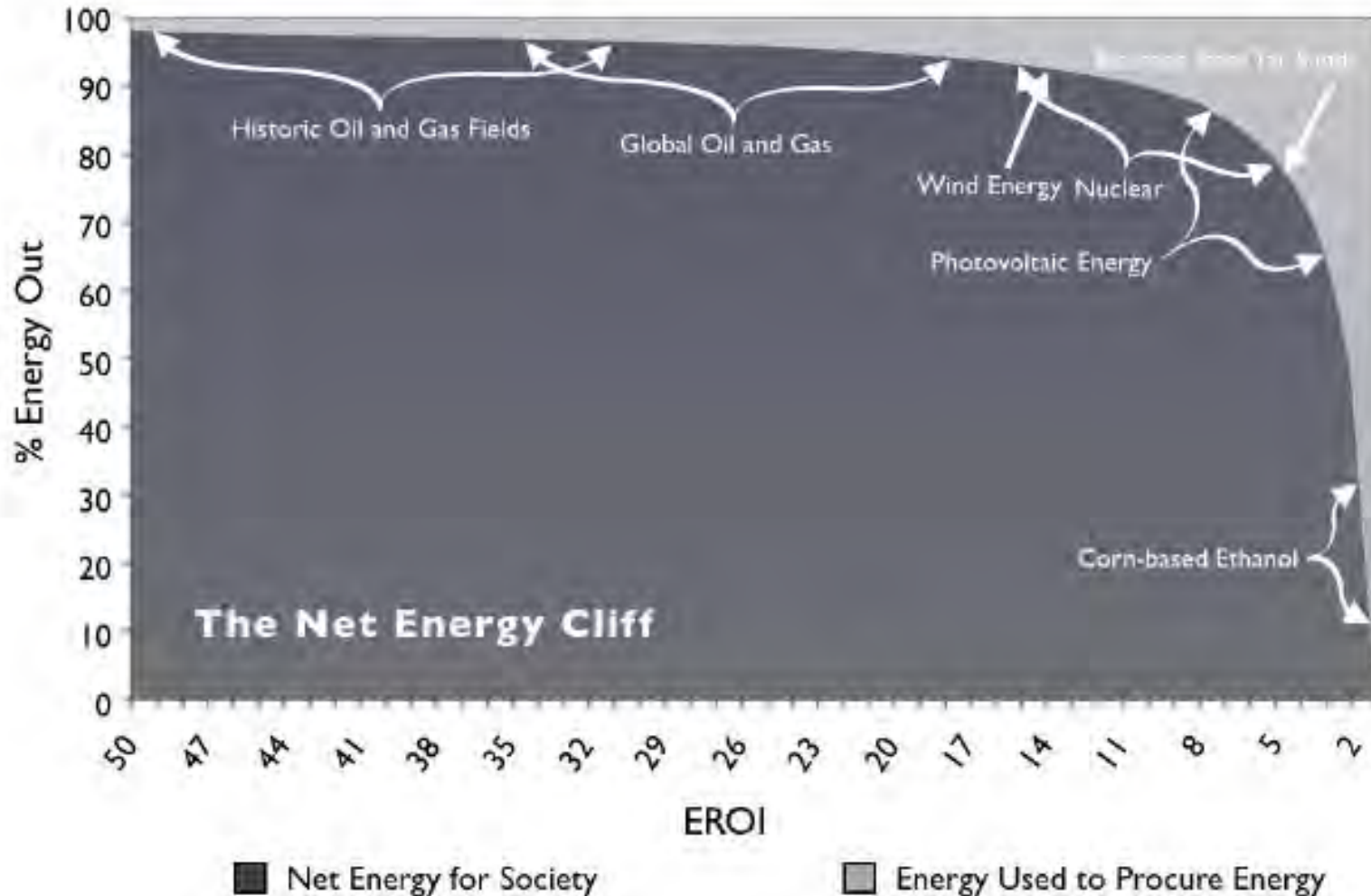
Activity	Minimum EROI Required
Arts and Other	14 : 1
Health Care	12 : 1
Education	9 or 10 : 1
Support Family of Workers	7 or 8 : 1
Grow Food	5 : 1
Transportation	3 : 1
Refine Oil	1.2 : 1
Extract Oil	1.1 : 1



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

[Pyramide de Maslow](#)

Pour se maintenir une civilisation ne doit consacrer qu'une fraction (~ 10%), de ses ressources énergétiques à l'obtention de ces mêmes ressources.



From Charles Hall and Jessica Lambert

Les énergies renouvelables. Une panacée ?

Énergies de flux vs. Énergies de stock

- Les énergies éolienne et solaire relèvent de la catégorie des énergies dites de flux au contraire des énergies fossiles et nucléaires qui sont des sources stockées au cours de millions d'années dans la croûte terrestre.
- Les énergies éolienne et solaire sont pour cela qualifiées de renouvelables.
- **Leur flux est bien renouvelable, mais *quid* de leur captation qui nécessite de mobiliser de nombreuses ressources en matériaux ?** (d'autant plus importantes qu'il s'agit d'énergie à faible intensité)
- **Pour évaluer les performances et la compétitivité d'une source d'énergie on doit prendre en compte la totalité du système** qui réalise les transformations permettant d'extraire d'une source d'énergie primaire donnée l'énergie adaptée aux usages finaux voulus.
- **Les lois de la physique ne permettent pas que ces transformations se fassent sans consommation ni d'énergie ni de matière.**

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

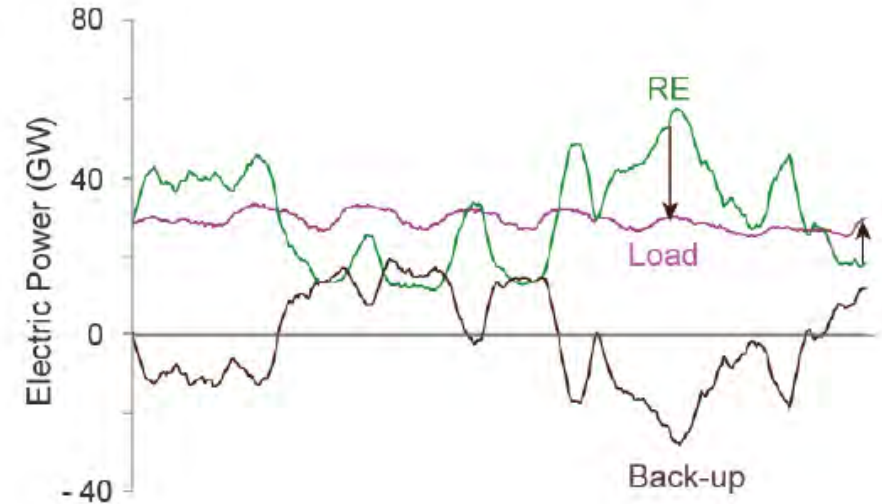
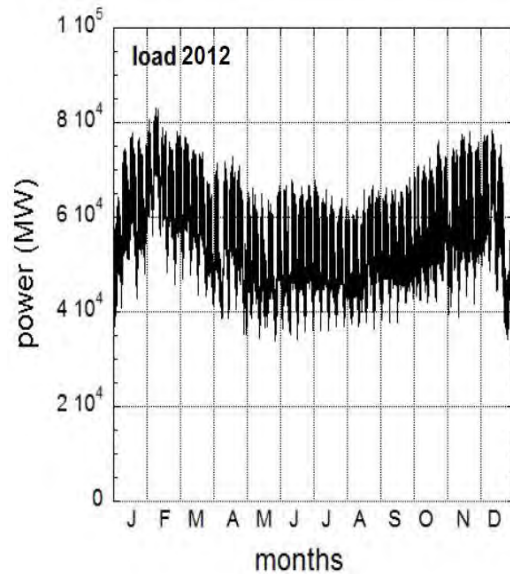
- ⇒ Fermes solaires requises : 5% de la superficie de l'Europe (450 m² par pers.)
→ 54 kWh/j par personne

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

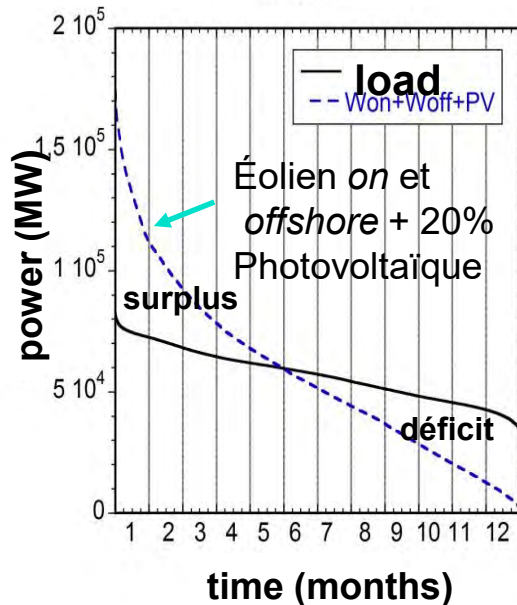
→ Total 96.6 < 125 kWh/j par personne (cf. MacKay, <http://www.withouthotair.com/>) (Transport ~ 40kWh/j, Chauffage ~ 40 kWh/j, Electricité ~ 20 kWh/j)

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

Les problèmes posés par l'intermittence des EnR



Crédit:
F. Wagner

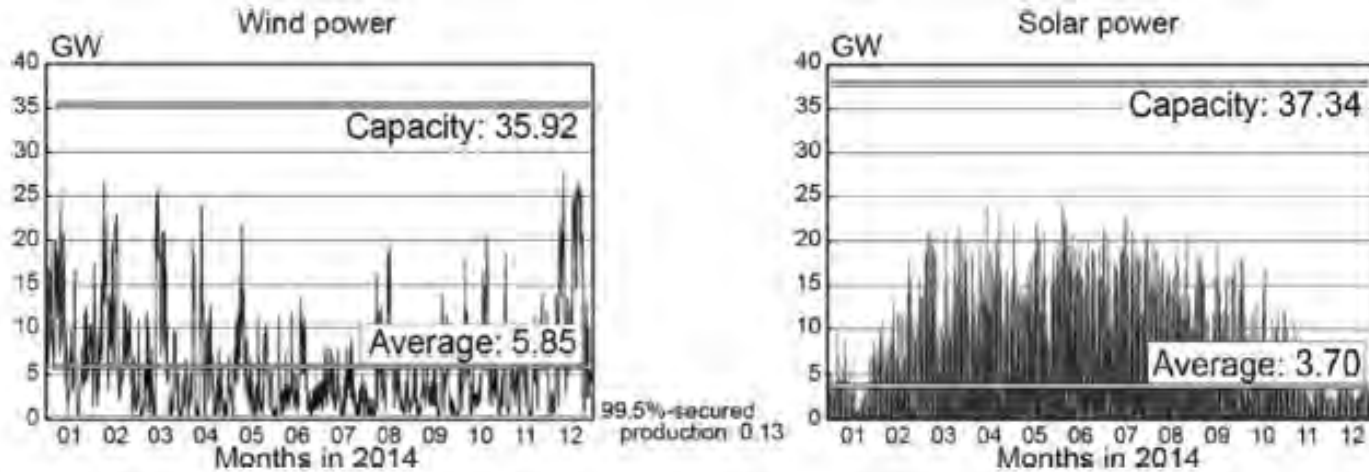


- Surplus perdu en l'absence de solutions de stockage suffisantes
- "Back-up" nécessaire
- Instabilité du réseau au-delà de 40% d'ENR intermittentes

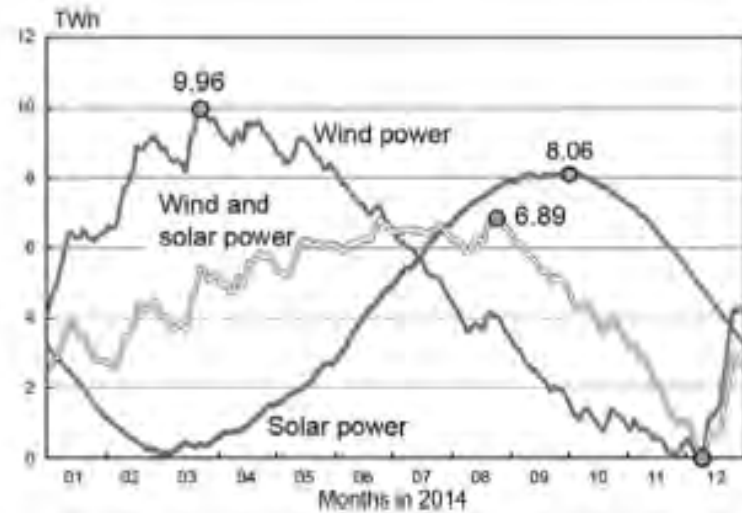
[From F. Wagner, Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 20]

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

Combien stocker et sur quelle durée ?

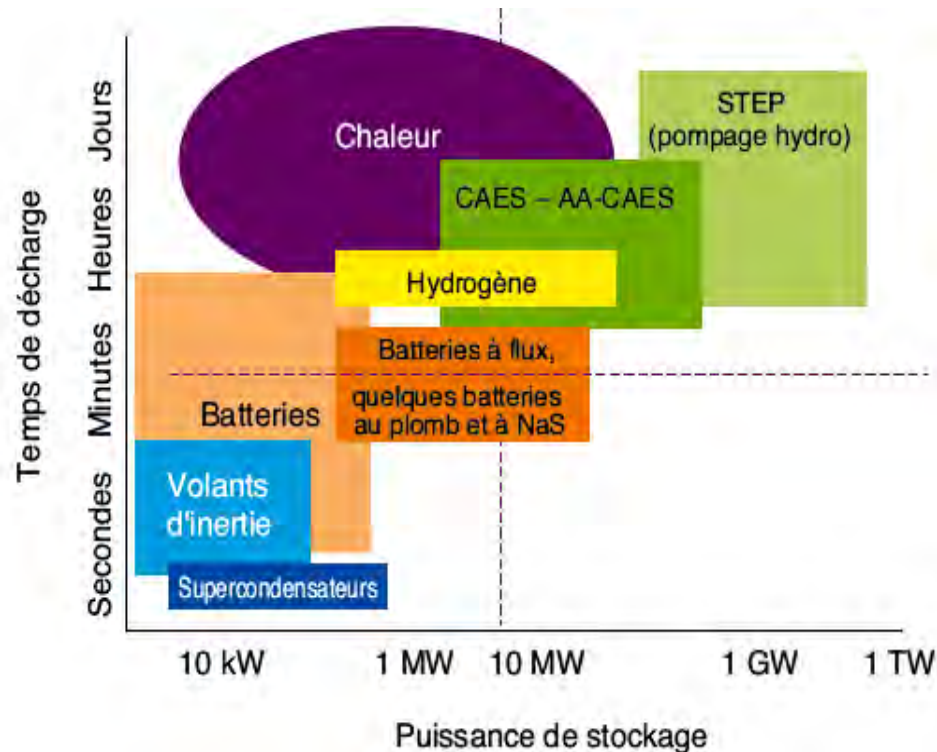
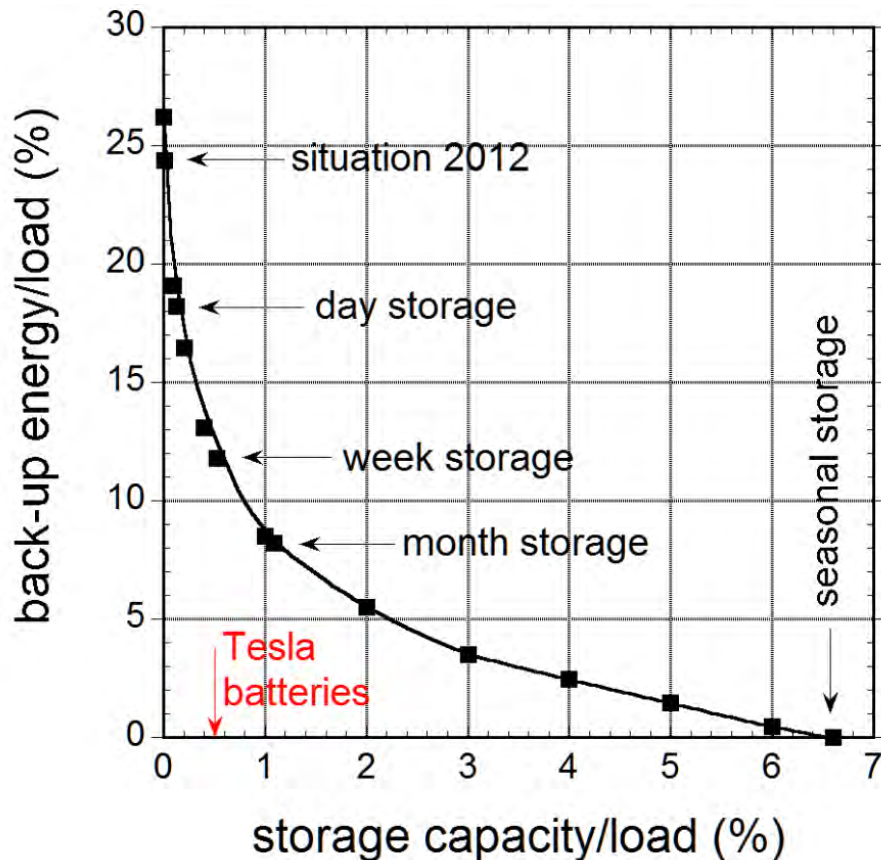


Simulation d'un réservoir de stockage qui est alimenté en continu au long de l'année par le flux intermittent de l'électricité photovoltaïque ou éolienne, tandis que le flux de sortie est maintenu constant et égal au débit d'entrée moyen, i.e. 5.85 GW or 3.7 GW, respectivement.



Hans-Werner Sinn, European Economic Review 99 (2017) 130–150

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

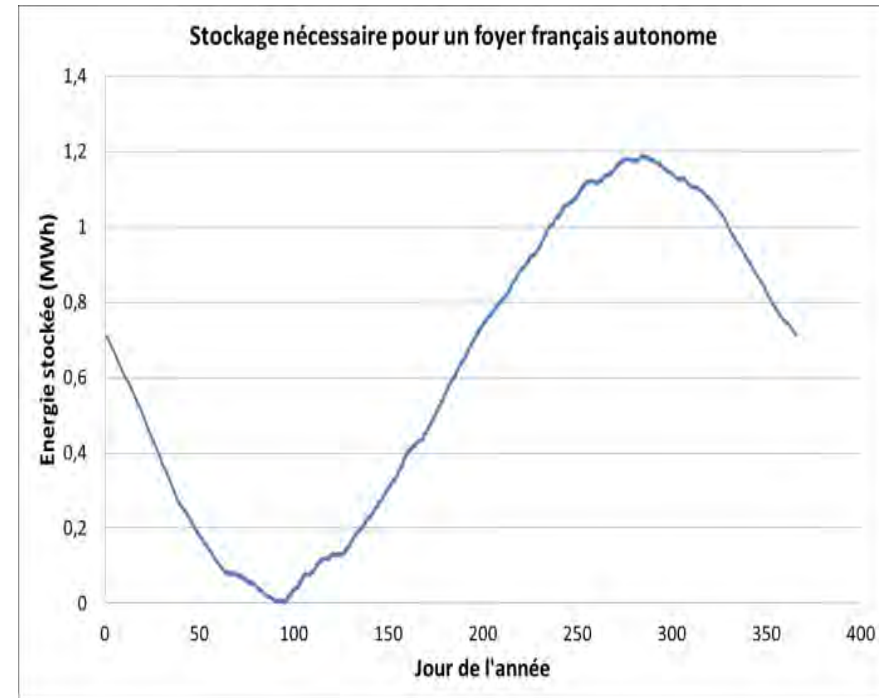
Auto-consommation ?

Exemple : évaluation des besoins en stockage individuel associé à des panneaux photovoltaïques

Un foyer français moyen consomme 4,7 MWh par an.

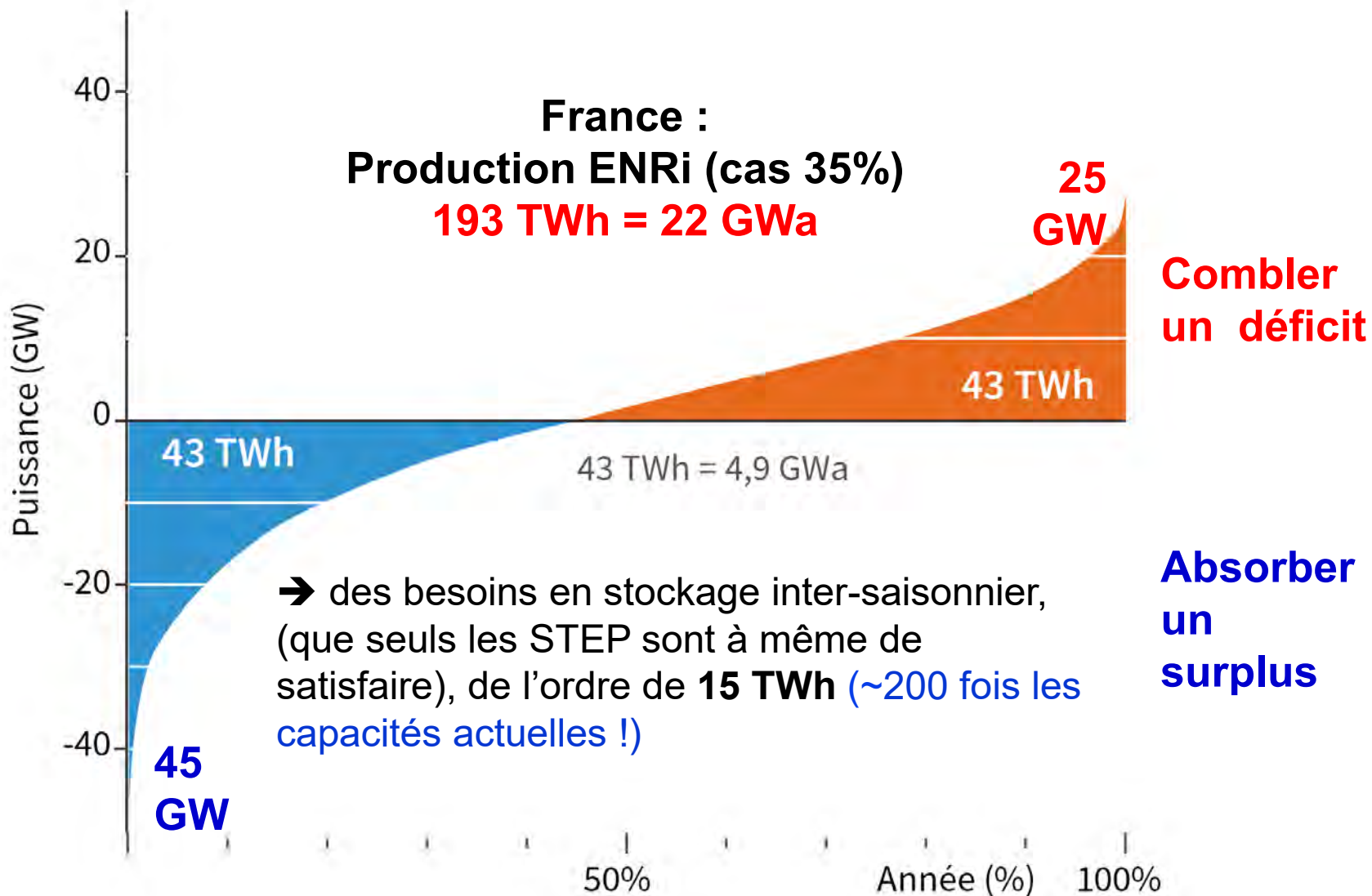
A partir des données RTE 2015 →
Puissance crête des panneaux 3 kW
et stockage de 25% (soit 1,2 MWh) de
la consommation en inter-saisonnier.
Puissance max, de stockage (débit
d'entrée) de 2,2 kW et de déstockage
de 0,9 kW → énergie max stockée
par jour = 13,6 kWh et déstockée
14,5 kWh.

→ ~ 50 batteries de voiture !



**L'auto-consommation (production annuelle = consommation)
cela ne marche aujourd'hui qu'en étant raccordé au réseau !**

Monotone de charge d'équilibrage



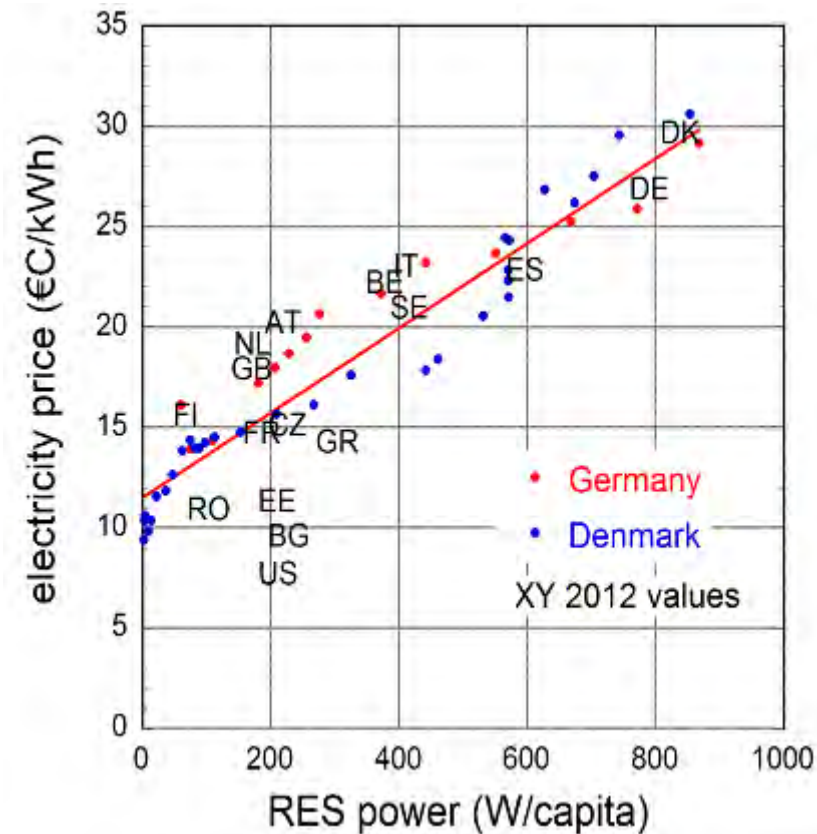
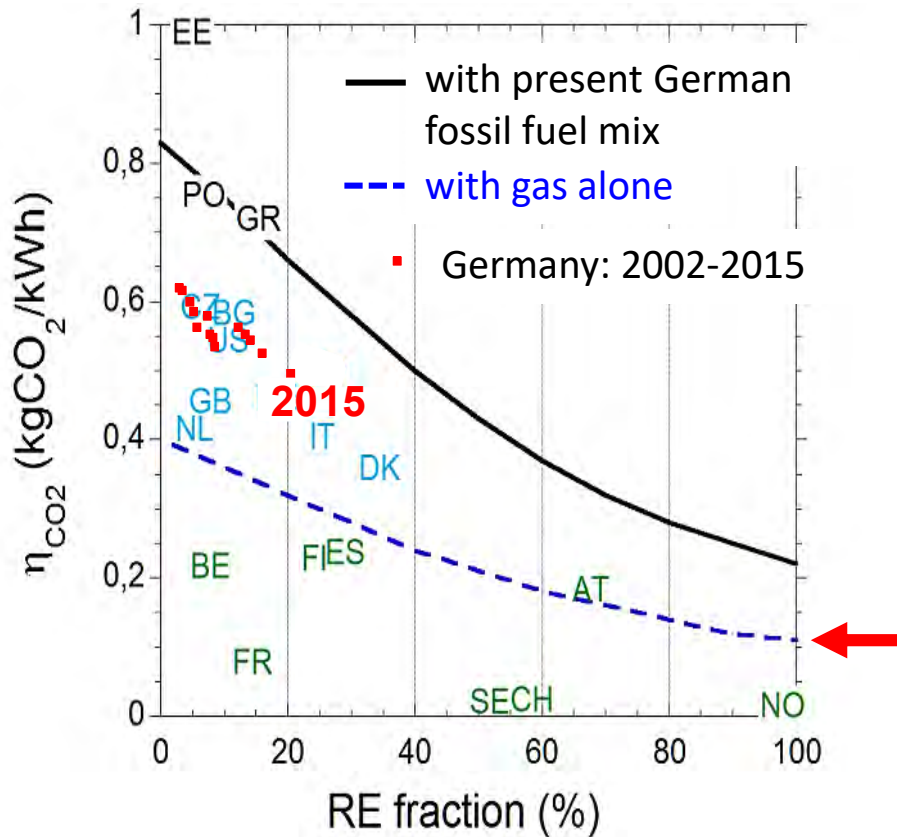
Crédit: D. Grand

Impact sur le marché de l'électricité

Évolution des taxes (CSPE en France, EEG-Umlage en Allemagne)

- Ces taxes visent à compenser l'écart entre le prix garanti de rachat de l'électricité solaire et éolienne et les prix de gros du marché.
- Le montant total de ces taxes, payées par les particuliers, se monte en France (~2c€/kWh pour la partie renouvelables) et en Allemagne (7c€/kWh) en 2017, respectivement à 5,7 et 25,7 G€.
- L'écart croissant observé depuis leur introduction en 2003 résulte à la fois de l'augmentation des surplus et de la baisse de rentabilité des centrales thermiques traditionnelles pourtant nécessaires pour gérer l'intermittence.
- **Les baisses réellement observées du coût du photovoltaïque et de l'éolien, en termes de prix de revient du MWh, ne suffisent pas à garantir leur compétitivité en terme de valeur économique de leur production.**

Conséquences du déploiement des EnR intermittentes



Émissions de CO₂

Pour la France, la baisse à 50% de la part du nucléaire conduirait à un **doublment 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€)

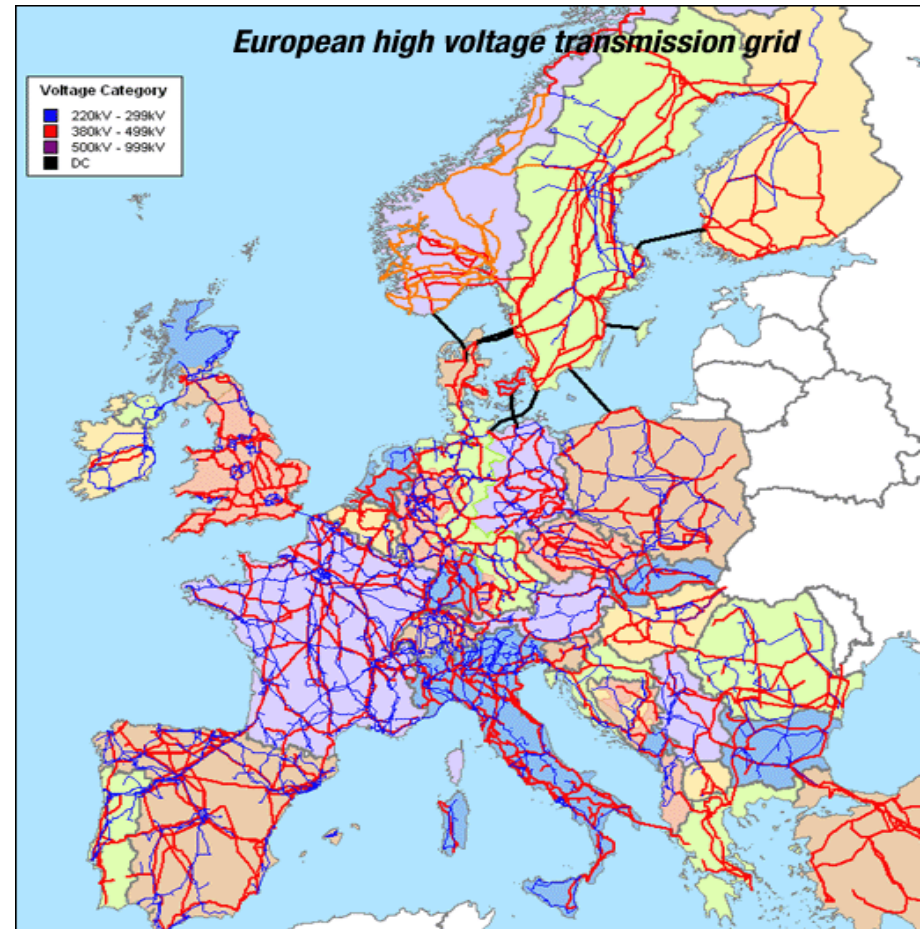
Echanges transfrontaliers?

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

Les énergies renouvelables électrogènes ne sont pas (malheureusement) pas la panacée !

La production intermittente de ces EnRi **non pilotables** RE peut :

- impacter dangereusement la **stabilité des réseaux électriques** (un taux de pénétration de 40% est considéré comme un maximum) ;
- Et aussi à la production d'**énormes surplus** (50 TWh pour l'Allemagne en 2016) **qu'il est impossible de stocker dans l'état actuel de la technologie**, et qui en outre perturbe gravement le marché de l'électricité

Pour la France, avec 35% d'**EnRi** dans la production d'électricité :

→ des besoins en stockage inter-saisonnier, (que seuls les STEP sont à même de satisfaire), de l'ordre de 15 TWh (~200 fois les capacités actuelles !)

Il faudrait 25 millions de voitures électriques équipées d'une batterie de 40 kWh pour stocker 1 TWh, **et en utilisant ~250 000 t de lithium ! (production mondiale 2007 = 25 000 t), sans compter le problème du Cobalt**

Comparaison ...innocente : Fessenheim vs. éoliennes

- Centrale de Fessenheim: puissance 1800 MW pour une production annuelle d'électricité correspondant à un facteur de charge de 75% --> $1800 \times 0,75 = 1350 \text{ MW}$
- Il faudrait pour obtenir la même production d'électricité, avec des éoliennes de 2 MW chacune, mais un facteur de charge de 22,5% --> $1350 / (2 \times 0,225) = 3000$ éoliennes
- Le coût unitaire des éoliennes doit être de l'ordre de 2 à 3 millions d'euros, soit au total $3000 \times 3 = 9$ Milliards d'euros... comparable au prix d'un EPR
- Pour le démantèlement de ces 3000 éoliennes, (il faut compter de 50 à 200 k€/MW), cela coûterait de $(100 \text{ à } 400) \times 3000 = 0,3 \text{ à } 1,2$ Milliard d'euros...

Fessenheim vs. Éoliennes : le problème des ressources minérales

- Pour une seule éolienne il faut mobiliser ~150 t d'acier et 400 m³ de béton, soit pour 3000 éoliennes 150×3000= 450 000 tonnes d'acier et 1,2 million de m³ de béton, à comparer aux 100 000 tonnes d'acier et 300 000 m³ de béton d'un réacteur EPR de 1600 MW (~quatre à cinq fois moins) → **Pb des ressources à mobiliser pour capter les énergies de flux**

Les réacteurs nucléaires actuels **ne sont pas non plus la panacée pour sortir des fossiles**. Mais à court terme ils nous permettent, en France, d'avoir une électricité décarbonisée à plus de 90%.

Les baisses du coût du photovoltaïque et de l'éolien, (prix de revient du MWh), ne garantissent pas leur compétitivité !

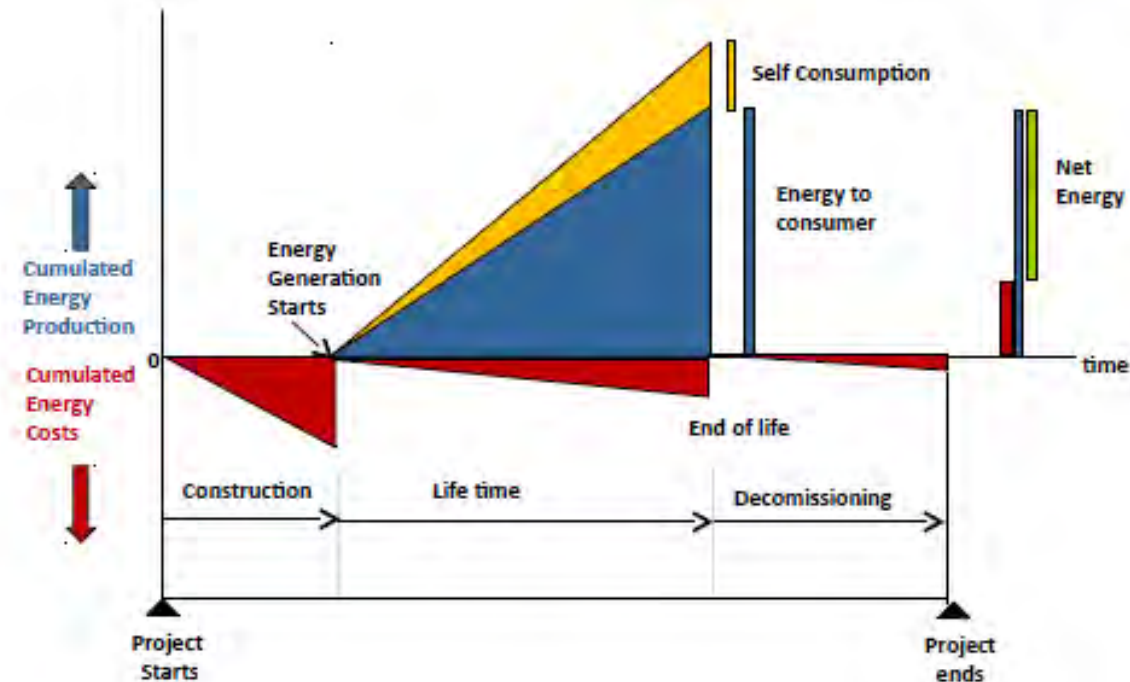
→ Il faut utiliser des critères objectifs !

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) Les quantités de ressources immobilisées par MW installé, et consommées par MWh ;
- (vi) Le taux de retour en énergie MWh par MWh → EROI**

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

Représentation classique d'un système énergétique en vue de l'analyse EROI



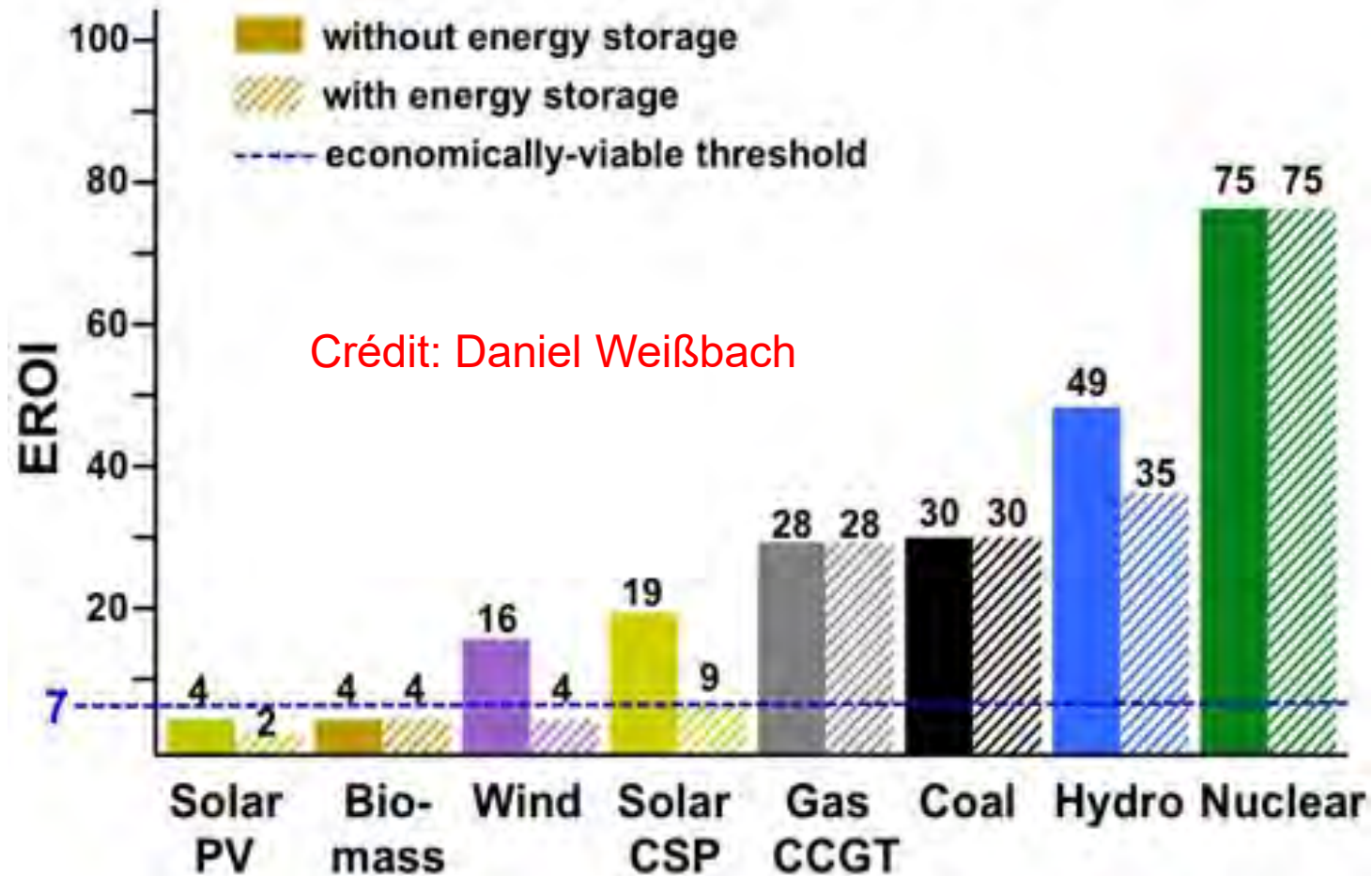
Analyse de cycle de vie (LCA)

Crédit: Pedro Prieto

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

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

Energy Returned On Investment relative to the breakeven value of 1



Note :

- Record absolu : 100:1 pétrole 19^{ème} siècle ;
- A discuter : biomasse, solaire PV, nucléaire

Pourquoi si peu pour la biomasse ?

- La culture des céréales est pourtant à l'origine de la révolution du néolithique*. Mais la conversion de l'énergie solaire en biomasse (exergie) par la photosynthèse a une faible intensité énergétique (0,5 W/m² en Europe):
 - Soit ~ 16 MWh/ha, (jusqu'à ~ 80 MWh/ha dans les rizières d'extrême orient), ce qui correspond à environ 1550 litres/ha de biocarburant,
 - ce qui permet d'alimenter en carburant, pendant un an, une automobile effectuant 40 km/jour ;
 - Or la totalité des surfaces agricoles en France se monte à ~ 28 Mha.
 - À titre de comparaison, pour nourrir un cheval de trait qui doit absorber ~30 kWh/jour (pour fournir une énergie mécanique de 3 à 6 kWh/jour, ce qui correspond à ~ 600 à 700 W), il faut ~ 0,7 ha.
 - Ce qui permet de comprendre pourquoi **avant la révolution industrielle 20% des terres agricoles en Europe étaient consacrées à l'alimentation des chevaux.**

* La collecte de nourriture des chasseurs-cueilleurs correspondait à ~ 1 kWh/ha, celle permise par la maîtrise de l'agriculture a permis de faire un bond jusqu'à ~ 3 MWh/ha.

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*

En France il faut avant tout décarboner les transports, et surtout la chaleur !

Pour la production d'électricité, le solaire et l'éolien **intermittents** ne sont pas la solution miracle. Mais *quid* de l'utilisation des surplus des EnR pour alimenter une filière **Power to Gas** (stockage chimique) ?

Handicap majeur : très faibles rendements globaux (crédit G. Sapy)

Transformations	Voie hydrogène	Voie méthanation
Rendement		
Rendements opérationnels obtenus dans étude Réf. [2]	Actuels : 29 – 31 % Futurs : 36 – 43 %	Actuels : 17 – 20 % Futurs : 27 – 32 %
Rendements obtenus par l'Institut Fraunhofer cités dans Réf. [3]	Futurs : 34 – 44 %	Futurs : 30 – 38 %
Moyennes arrondies des rendements obtenus en [2] et [3]	Actuels : ≈ 30 % Futurs : ≈ 40 %	Actuels : ≈ 20 % Futurs : ≈ 32 %
Estimation des rendements opérationnels maximum	Futurs : 42 – 44 %	Futurs : 35 – 37 %
Moyennes des rendements opérationnels maximum	Futurs : ≈ 43 %	Futurs : ≈ 36 %

Lourds impacts économiques :

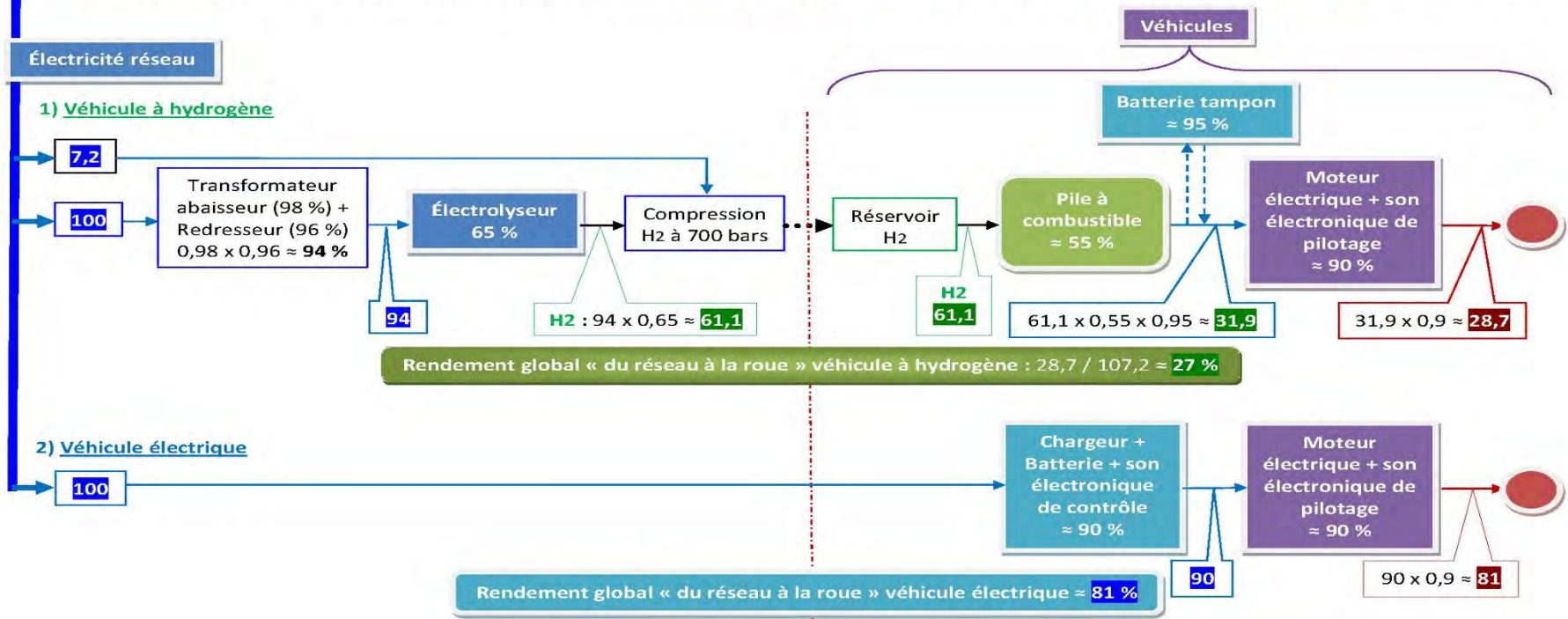
- prix de l'électricité multiplié par un rapport de 3 (H₂) à 5 (CH₄)
- Très difficile amortissement d'installations alimentées par des sources à faible facteur de charge

Voiture électrique : batterie vs H₂

Georges Sapy

Comparaison énergétique véhicule à hydrogène versus véhicule électrique

Septembre 2018



- Comparaison énergétique globale actuelle : un véhicule à hydrogène consomme ≈ **3 fois plus d'électricité** du réseau qu'un véhicule électrique
- Comparaison énergétique globale avec rendements opérationnels réalistes maximaux (90 % pour électrolyse ; 80 % pour pile à combustible ; autres données inchangées) → Rendement global x 2 au maximum
→ un véhicule à hydrogène consommera encore ≈ **1,5 fois plus d'électricité du réseau qu'un véhicule électrique à batterie**

Stockage hydrogène (20% < r < 40%)

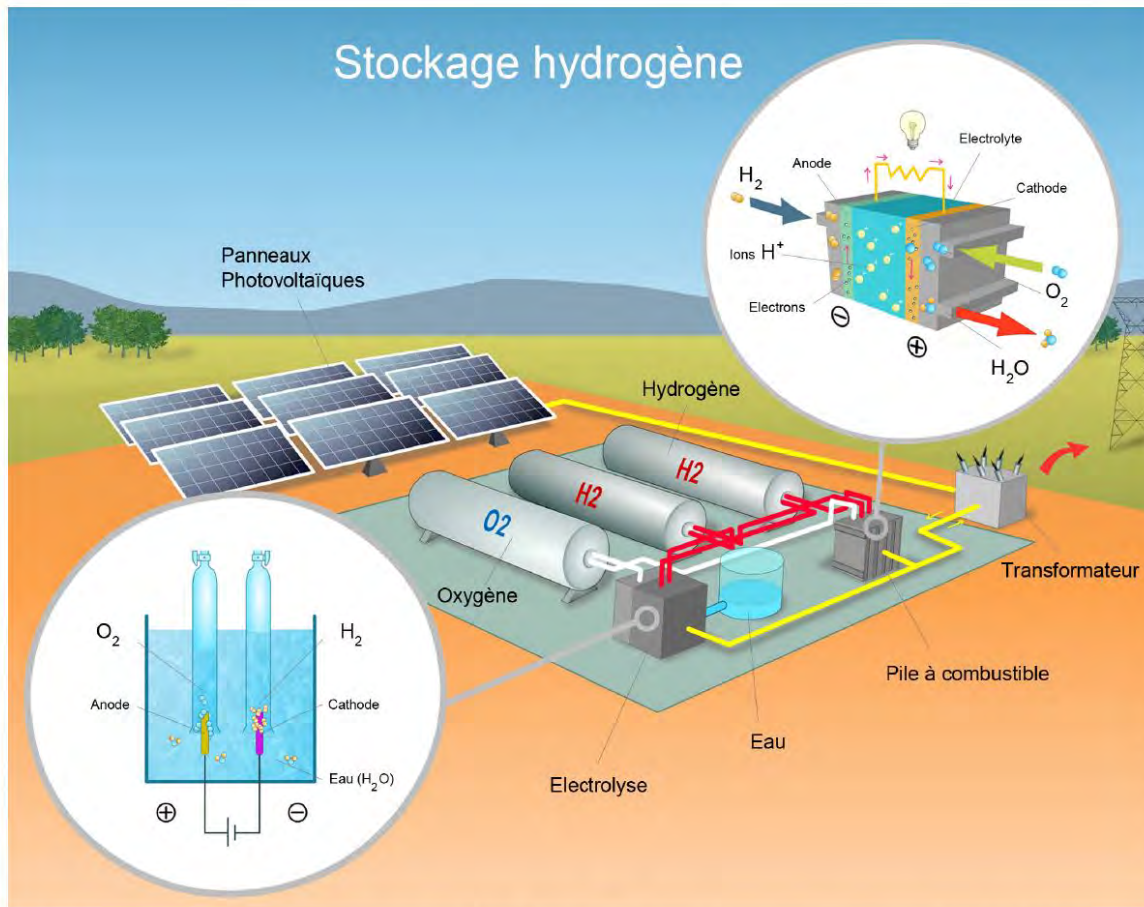
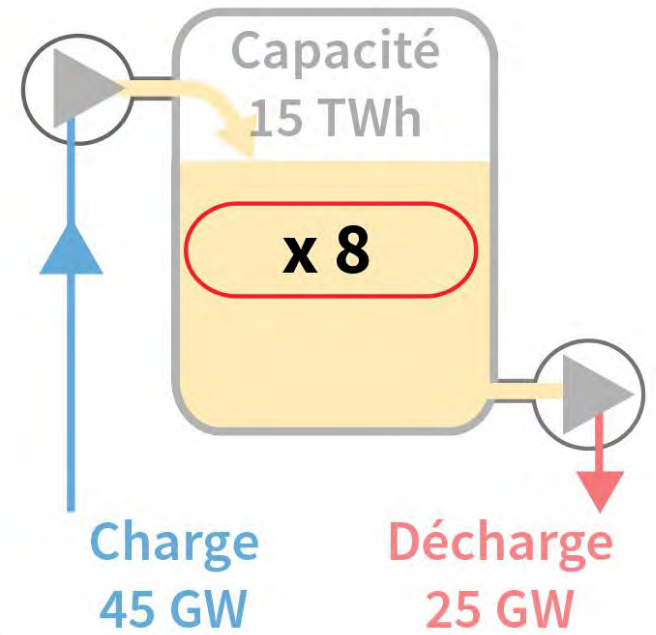


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY



8 x production mondiale

Crédit: D. Grand

Production mondiale d'hydrogène = 1,8 TWh

Problème du Platine : ~ 40g/véhicule → 1000 t pour équiper 25 millions de véhicules = 5 fois la production mondiale 2003

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.

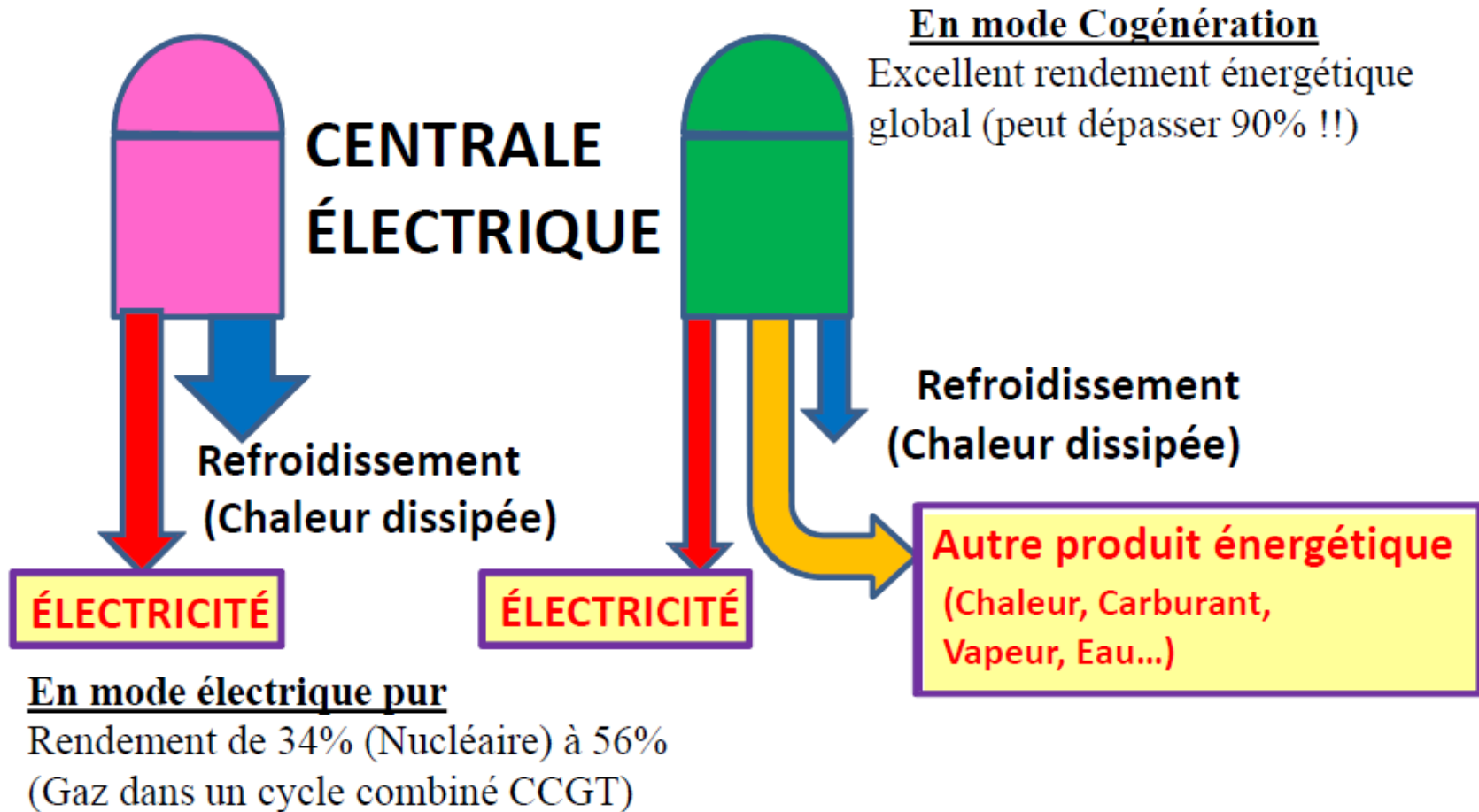
Gigafactory de Tesla :

**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**

Une solution pour la chaleur, (65% des besoins sont à basse température, i.e. $< 120^{\circ}\text{C}$) : **La Cogénération**



Point clé: la ligne de transport ($> 100\text{km}$)

Crédit: Henri Safa

Rapport de la Cour des Comptes sur le soutien de l'Etat aux énergies renouvelables

- Soutien public en 2016 aux EnRs estimé
 - ✓ 5,3 Mrds €/an, puis croissance à 7,5 Mrds €/an en 2023
 - ✓ Mais sur les 5,3 Mrd €, 4,4 Mrds € pour les EnRs électriques pour 10% de la production nationale
 - ✓ et seulement 467 M € pour les EnRs thermiques, pour 60% de production nationale.
- Soutiens disproportionnés par rapport aux contributions des filières aux objectifs de développement :
 - ✓ PV (prix garantis définis avant 2011 → 2/3 du soutien) → 2 Mrds €/an jusqu'en 2030 soit **38,4 Mrds €** cumulé, pour 0,7% du mix électrique
 - ✓ Eolien offshore (appels d'offres 2011-2013) → → 2 Mrds €/an jusqu'en 2030 soit **40,7 Mrds €** cumulé, pour 2% du mix électrique
- Le coût cumulé des financements publics se monte actuellement à 121 Mrds € pour couvrir 7% de notre production d'électricité, alors que le coût total du nucléaire (R&D inclus) de 1949 à 2010 s'est monté à 250 Mrds € pour 75% de notre production d'électricité.

Science vs. Politique : Echos d'Australie

- Jacobson and others continue to promise the moon... or rather the sun, e.g. *'Low-cost solutions to the grid instability reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes'*, PNAS **112**, no. 49
- B.P. Heard et al. 'Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems', *Ren. Sust. Energy Reviews* **76** (2017) 1122-1133
- Ted Trainer, a scientist, having understood that renewables would not be sufficient to meet energy needs, is promoting ('The simpler way') a drastic degrowth, claiming that the resource consumption per capita has to be cut to ~ 10% of present levels, i.e. back to levels of agrarian societies ...

→ Débats animés entre utopistes de tous poils, e.g. Capitalisme vert, Eco-socialisme, Décroissance heureuse, Eco-anarchisme radical (décroissance dure) ... sans oublier le climato-scepticisme !

Querelle d'allemands : Sinn vs. Kempfert

- Hans-Werner Sinn a soigneusement étudié les besoins en stockage induits par la variabilité de la production des EnRi et de la demande → pour 2014 (16,6% d'EnR) il faudrait stocker 11,3 TWh → avec 50% d'EnR il faudrait 22,1 TWh, soit ~ 500 fois les possibilités estimées (STEPS) ! **Solution actuelle = double système (fossiles + EnRs)**
 - Claudia Kempfert, économiste très influente dans l'Energiewende mais aussi en Europe, commence d'admettre les conséquences de l'intermittence mais décide que ce n'est pas du tout un problème car le vent et le soleil étant gratuits on peut se permettre de faire de l'effacement. Le stockage n'est alors plus un problème, et elle trouve que ce n'est pas si mal de pouvoir encore disposer de quelques centrales au gaz ! Elle oublie simplement les ressources minérales à mobiliser pour construire des éoliennes qui vont tourner une partie du temps à vide !
- C'est très écolo comme attitude, un peu comme le producteur de fruits et légumes bio qui renoncerait à récolter car il manque d'espace de stockage ...et demande à ses clients d'aller acheter leurs fruits et légumes au supermarché du coin quand il n'a plus rien en rayon !**

Conclusions 1/3

- L'étroit couplage entre prospérité économique (PIB), qualité de la vie (HDI) et consommation d'énergie est clairement établi.
- Avec une population mondiale en route vers les 10 milliards d'humains, dont aujourd'hui la moitié doit se contenter de 20kWh/jour, soit le tiers de la consommation moyenne par habitant, **il est illusoire de compter sur une décroissance globale de la consommation pour sauver le climat.**
- La deuxième grave illusion serait de prendre les énergies renouvelables intermittentes pour une panacée. **Même si localement elles peuvent constituer une ressource non négligeable, les EnR ne pourront pas se substituer aux ressources fossiles.**
- Les performances des systèmes de conversion de l'énergie doivent impérativement être évaluées à l'aide de critères objectifs, e.g. EROI, ressources minérales mobilisées, impact sur la santé, ...

Conclusions 2/3

- En France, soutien public quasi exclusif (via tarifs de rachat garantis et CSPE) fléché vers les renouvelables électrogènes. (4,4 Mrds en 2016 sur 5,3 Mrd, pour seulement 567 millions aux EnR thermiques). Ce soutien cumulé au PV et à l'éolien, devrait représenter jusqu'en 2023 ~120 Mrd d'euros, (dont 38,4 Mrds pour le PV < 2% du mix électrique).
- La trajectoire suivie n'est pas la bonne en dépit de déjà très lourds investissements. Il faut réviser radicalement cette politique si l'on ambitionne vraiment d'agir contre le réchauffement climatique.
- En France, la vraie priorité être donnée aux renouvelables thermiques, à la rénovation thermique des bâtiments, et à la décarbonisation des transports.
- il est impératif d'aider les pays du Sud à recourir aux énergies décarbonées. Le solaire y est vraiment pertinent et doit être développé pour remplacer le recours aux combustibles fossiles ... et à la biomasse pour limiter la déforestation.

Conclusions 3/3

- Après avoir connu la révolution du néolithique (par l'invention de l'agriculture) et la révolution industrielle (grâce aux énergies fossiles), en décuplant sa dissipation d'énergie, l'humanité est-elle maintenant condamnée à la décroissance, et à ses conséquences ?
- Oui, probablement si l'on décidait, sur la base des (réels) problèmes actuels de déchets, de sécurité et d'acceptation sociétale, de renoncer à utiliser l'énergie nucléaire. **Mais seule la maîtrise de sources à haute densité peut permettre de découpler consommation d'énergie et consommation de ressources minérales.**
- 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, (réacteurs dits de Génération IV, à sels fondus, puis à **Fusion**), alors l'effondrement n'est peut-être pas inéluctable...

Hier (Rogations)



Aujourd'hui (marches climat et...)



Aux Pays-Bas, le premier jalon historique d'une justice climatique

Pour la première fois, un tribunal ordonne à un gouvernement de réduire ses émissions de gaz à effet de serre

LE MONDE | 25.06.2015 à 10h42 • Mis à jour le 25.06.2015 à 18h22

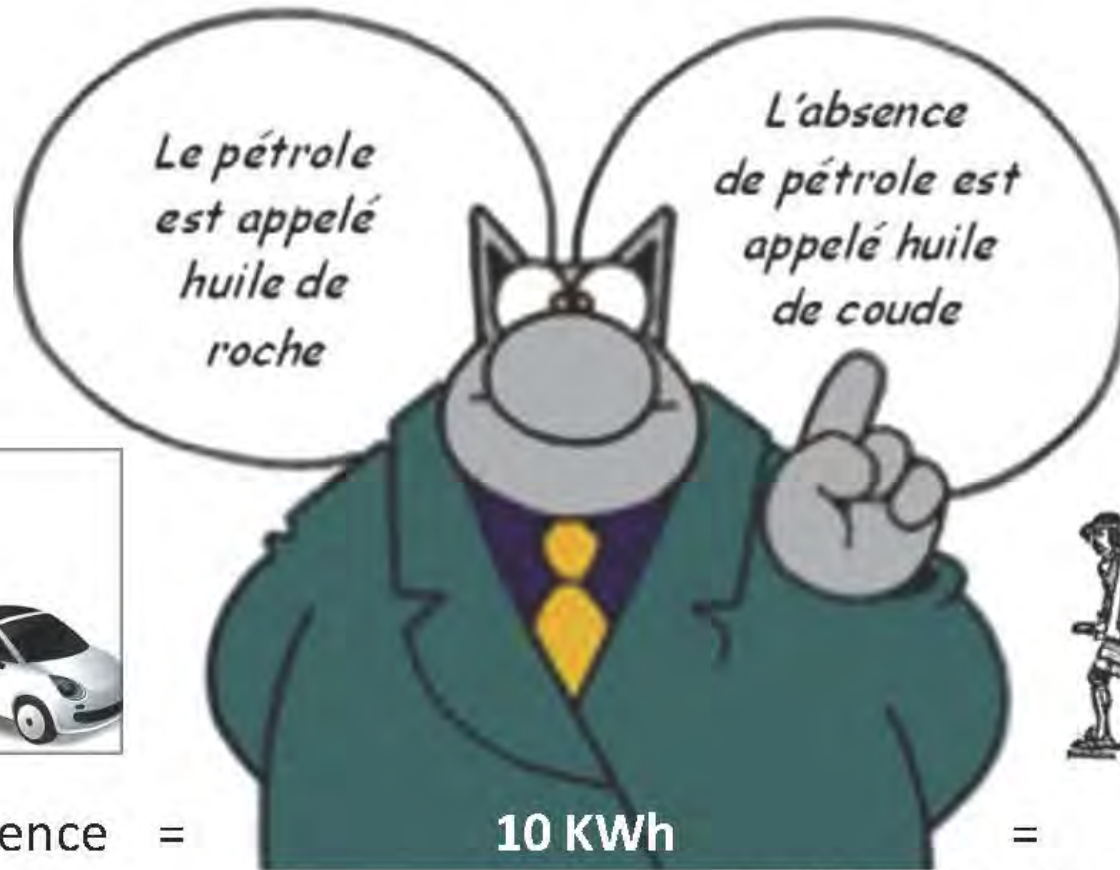
... jugements



Les membres de GroenLinks célèbrent avec leurs avocats la décision du tribunal en leur faveur, le 24 juin 2015 à La Haye. © HANTAL BEKKER

- Rien n'est plus faux que d'affirmer que ce n'est plus ni la technologie ni la visibilité économique, qui bloquent, mais la volonté politique.
- **Résistons à la séduction des utopies (e.g. à la Rifkin) ou dystopies ... et ne les nourrissons pas !**
- **Des efforts majeurs en R&D sont absolument nécessaires.**

Quand le pétrole domine l'économie...



1 litre d'essence =

10 KWh

=

Travail de 2 esclaves pendant une journée

↕
20 km en 15 minutes

↕
20 km en 10 heures



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* **2** (2009) 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) 225–235
- John Gilleland et al., The Traveling Wave Reactor: Design and Development, *Engineering* **2** (2016) 88–96
- Olivier Vidal et al., Metals for a low-carbon society, *Nature Geoscience* **6**, (2013) 894-896