

Parlons énergie !

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



„Überzeugungen sind gefährlichere Feinde der Wahrheit als Lügen“

Friedrich Nietzsche (Werk: Menschliches, Allzumenschliches)

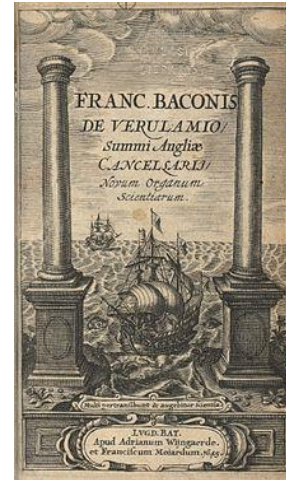
« Les convictions sont de plus dangereux ennemis de la vérité que des mensonges »

“*Natura non nisi parendo vincitur*”. **Francis Bacon** (1561-1626)

On ne commande la nature qu'en lui obéissant.

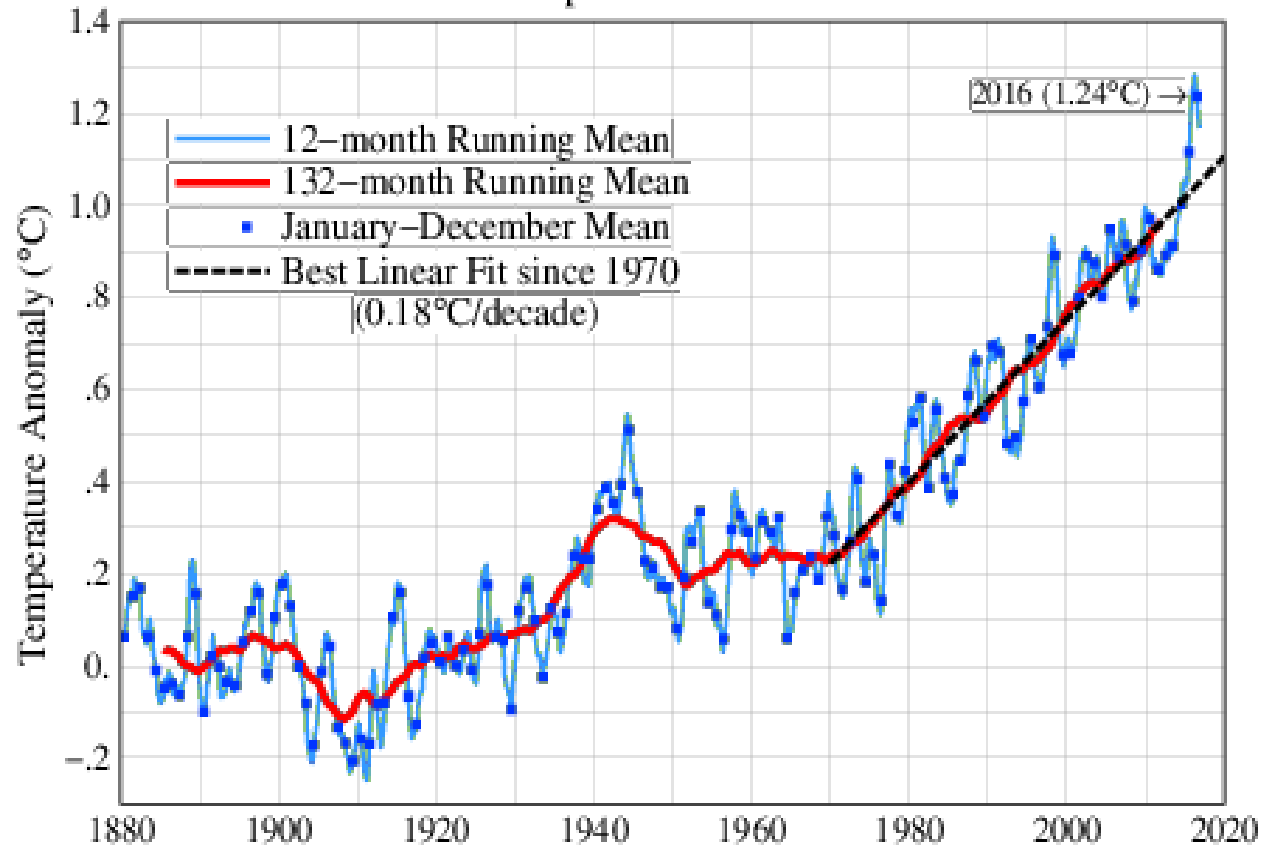
Novum Organum Scientiarum,

“Les sciences ont été traitées; ou par les empiriques; ou par les dogmatiques. Les empiriques semblables aux fourmis, ne savent qu'amasser et user ; les rationalistes, semblables aux araignées, font des toiles qu'ils tirent d'eux-mêmes; le procédé de l'abeille tient le milieu entre ces deux: elle recueille ses matériaux sur les fleurs des jardins et des champs; mais elle les transforme et les distille par une vertu qui lui est propre: c'est l'image du véritable travail de la philosophie, qui ne se fie pas aux seules forces de l'esprit humain et n'y prend même pas son principal appui; qui ne se contente pas non plus de déposer dans la mémoire, sans rien y changer des matériaux recueillis dans l'histoire naturelle et les arts mécaniques; mais les porte jusque dans l'esprit modifiés et transformés. C'est pourquoi il y a tout à espérer d'une alliance intime et sacrée de ces deux facultés expérimentale et rationnelle ; alliance qui ne s'est pas encore rencontrée.”



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 éloquent.

Elle est corroborée par la montée du niveau des mers due à la dilatation thermique des océans et à la fonte des glaciers.

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 (comparé 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 sommes-nous en Allemagne?

DIE ZEIT No 45

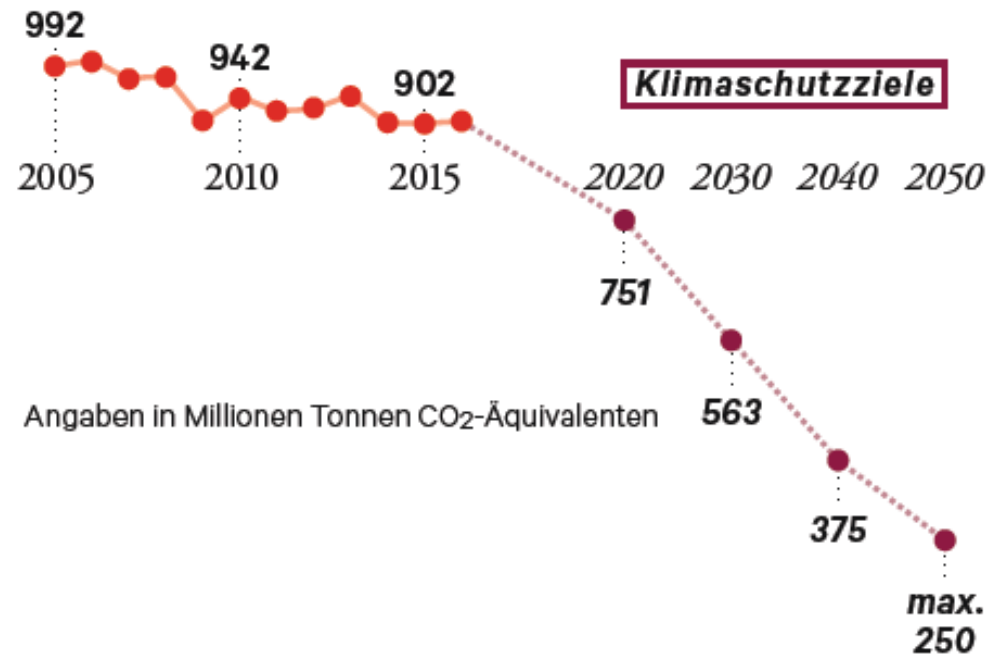
DOSSIER

2. November 2017

Das Naturschauspiel

So wird das nichts

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



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

Nouvelles directives en préparation : Energie propre pour tous les Européens

Au vu des trajectoires les objectifs de 2011 ne seront pas atteints, mais déniaient la réalité, 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,

Last news from the EU

- 18 June 2018, Commissioner for Climate Action and Energy Miguel Arias Cañete said:

"Europe is by far the largest importer of fossil fuel in the world. Today we put an end to this. This deal is a major push for Europe's energy independence. Much of what we spend on imported fossil fuels will now be invested at home in more efficient buildings, industries and transport. ***The new target of 32.5% will boost our industrial competitiveness, create jobs, reduce energy bills, help tackle energy poverty and improve air quality.*** Our path to real energy security and climate protection begins here at home, and this deal shows Europe's determination to build a modern economy that is less dependent on imported energy and with more domestically produced clean energy".

- **Clean Energy for All Europeans (10 July 2018)**

One step closer towards fulfilling the Energy Union: Commission welcomes Parliament committee votes on Clean Energy Package (presented by the European Commission on 30 November 2016)

European Commission – Statement

- Europe leads the global clean energy transition: Commission welcomes ambitious agreement on further renewable energy development in the EU
Strasbourg, 14 June 2018
- Energy efficiency first: Commission welcomes agreement on energy efficiency
Brussels, 19 June 2018
- **New CO₂ targets for cars explained, (News EU Parliament, 27.09.2018)**
MEPs proposed tougher CO₂ limits on cars and a new target for rolling-out e-cars on 3 October. Here's what you should know the plans. Why it is needed
Cars and vans produce about 15% of the EU's CO₂ emissions, which contribute to climate change. Transport is the only sector in which greenhouse gas emissions are still higher than they were in 1990.
Toughening car emissions standards would help to achieve the EU's climate targets for 2030 and consumers would save on their fuel bills.

Réactions du patron de PSA



Carlos Tavares pendant la présentation presse au Salon de l'Auto hier.
Photo Alexandre MARCHI

Carlos Tavares, un patron sceptique

« On ne peut pas régler le problème des émissions polluantes simplement en plaçant le zoom d'une caméra sur un pot d'échappement », résume Carlos Tavares, qui prône « une approche à 360 degrés de la problématique ». « Nous croyons totalement à l'électrique car cela nous a été demandé par les responsables politiques. L'électrique est en effet le seul moyen d'atteindre les taux de réduction d'émission de CO₂ envisagé par le Parlement européen. »

Et de souhaiter « la prise en compte de l'extraction des matières premières, le traitement des fournitures, notamment l'empreinte écologique de la fabrication et du recyclage des batteries... »

« On ne peut pas régler le problème des émissions polluantes simplement en plaçant le zoom d'une caméra sur un pot d'échappement », résume Carlos Tavares, qui prône « une approche à 360° de la problématique ». **« Nous croyons totalement à l'électrique car cela nous a été demandé par les responsables politiques. »**

L'électrique est en effet le seul moyen d'atteindre les taux de réduction d'émission de CO₂ envisagé par le Parlement européen. » **Et de souhaiter « la prise en compte de l'extraction des matières premières, le traitement des fournitures, notamment l'empreinte écologique de la fabrication et du recyclage des batteries... ».**

Vessies et lanternes, rêves et réalités

- 1^{ère} illusion : « **La croissance verte** », i.e. découplage possible entre PIB et consommation d'énergie et de ressources
- 2^{ème} illusion : la panacée existe: il suffit de développer les énergies dites renouvelables !

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 ...

→ **Venons en aux faits !**

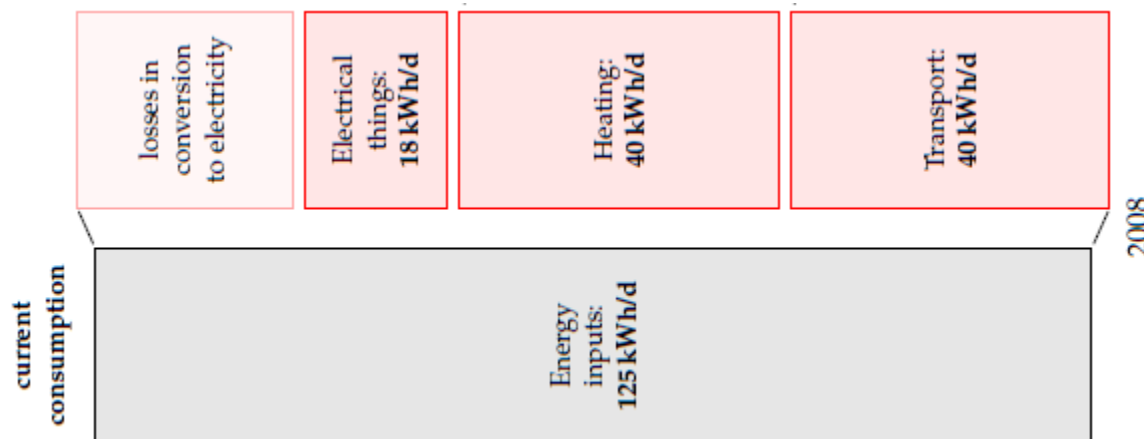
L'énergie : un concept pas si facile à appréhender

Elle ne peut pas être créée (1^{er} principe de la thermodynamique), et mesure la capacité de mettre le monde en mouvement.

- Elle est stockée dans la matière et les champs de force ;
- Elle existe sous différentes formes de différentes qualités ;
- Sa **conversion**, de la forme dont elle est stockée dans la nourriture, en travail musculaire, chaleur et déchets est réalisée dans les processus du métabolisme des organismes vivants ;
- Sa conversion (de l'énergie primaire jusqu'aux usages finaux) assure la production de biens et de services dans les sociétés humaines ;
- La conversion d'énergie s'accompagne toujours de rejets de chaleur (forme dégradée de l'énergie) et de déchets matériels (production d'entropie) → 2nd principe de la thermodynamique

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** → ~ **11 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

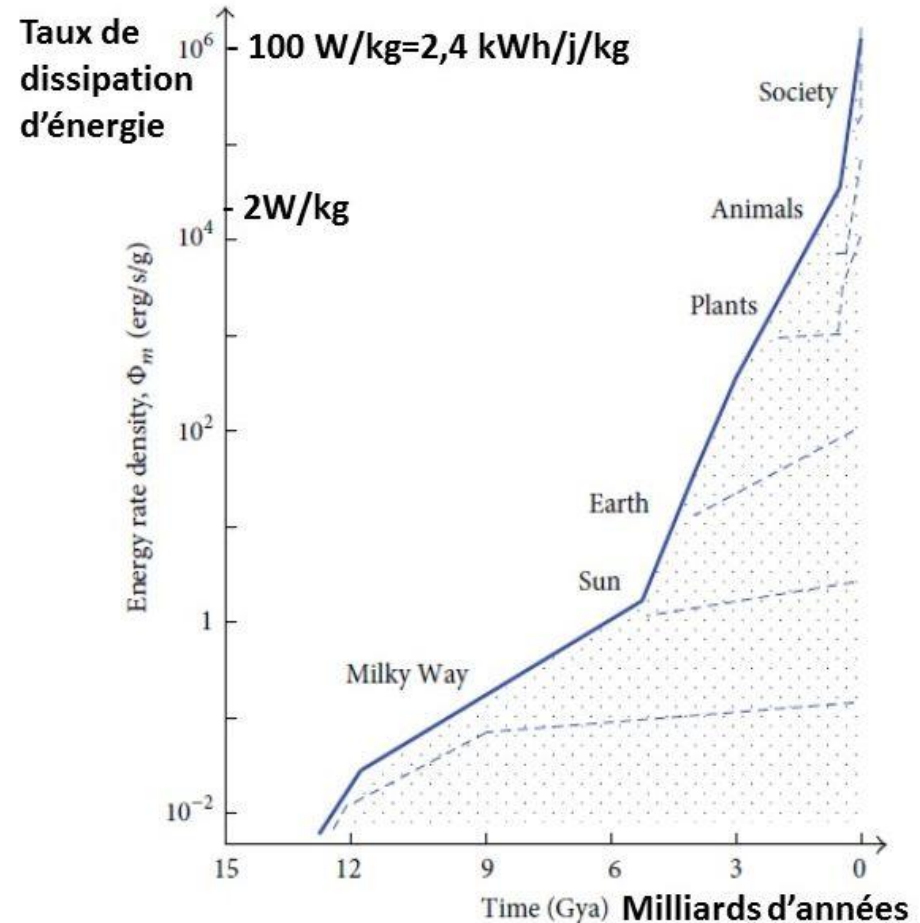
La quantité d'énergie dissipée par unité de masse mesure de l'évolution de la complexité dans notre univers.

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

- Métabolisme humain: 2W/kg (2584 kcal/j = 3 kWh/j/pers → 125W in et ~35W out mécanique)
- Société agraire : 12 kWh/j/pers
- European médiévale: 30kWh/j/pers
- Société industrielle: 150 kWh/pers

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

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



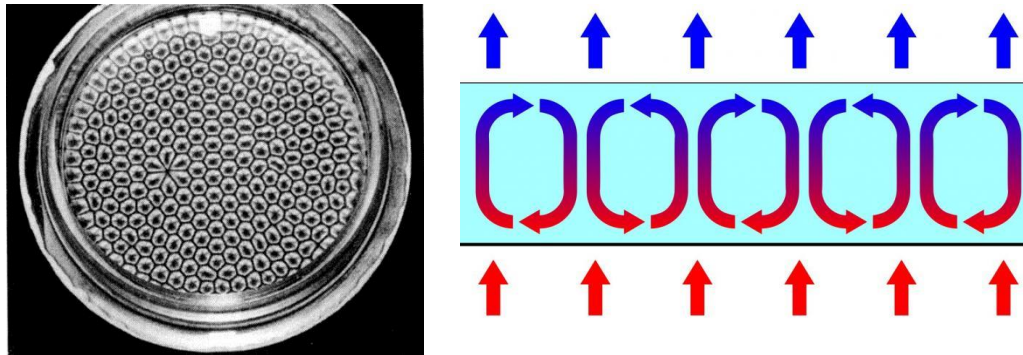
Eric J. Chaisson, The Scientific World Journal

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)

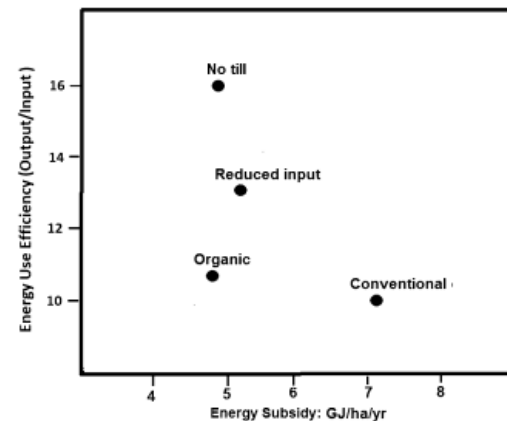
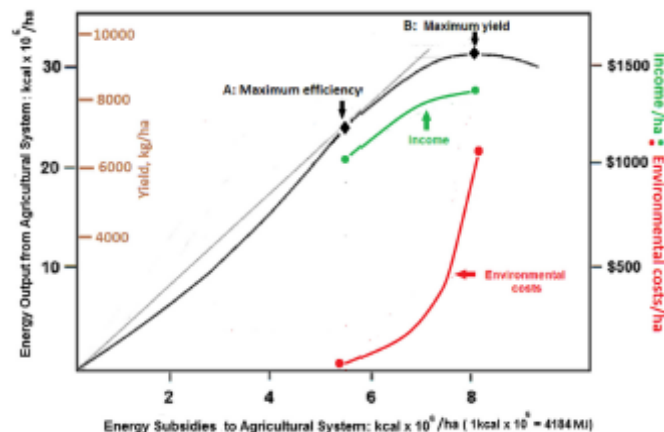


Systèmes ouverts loin de l'équilibre thermodynamique (e.g. systèmes vivants, sociétés) → **Principe de la Production Maximale d'Entropie (MEPP)**, e.g., Martyushev (2006), Herrmann-Pillath (2018)

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

MEPP – Quelques exemples

- ‘Modeling Electric Discharges with Entropy Production Rate Principles’, Thomas Christen, Entropy (2009), **11**, 1042-1054
- ‘Comparison of entropy production rates in two different types of self-organized flows: Bénard convection and zonal flow’, Y. Kawazura, Z. Yoshida, Phys. of Plasmas **19**, 012305 (2012)
- ‘Maximum Entropy Production and Plant Optimization Theories’, Roderick C. Dewar, Phil. Trans. R. Soc. B (2010) **365**, 1429-1435
- ‘Non-equilibrium thermodynamics, maximum entropy production and Earth-system evolution’, Axel Kleidon, Phil. Trans. R. Soc. (2010) **368**, 181-196
- ‘The Farm as a Thermodynamic System: Implications of the Maximum Power Principle’, Carl F. Jordan, Biophys. Econ. Resour. Qual. (2016) 1:9



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 ~ 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)

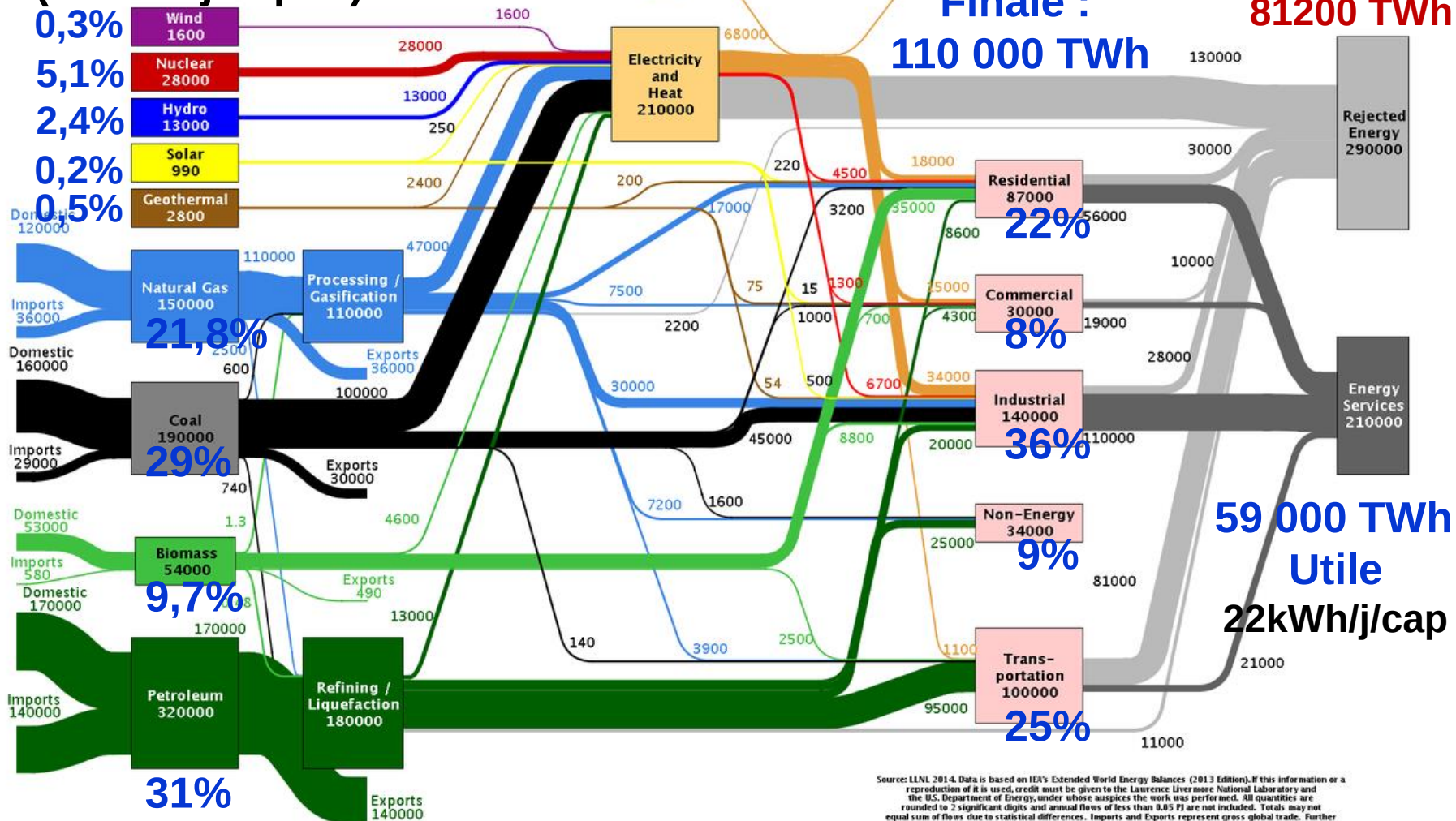
Lawrence Livermore
National Laboratory

Electricité 19 000 TWh

Finale :

110 000 TWh

81200 TWh



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-14-419537>.

82% fossiles

Usages de l'énergie - Monde

World
FINAL CONSUMPTION (2015)

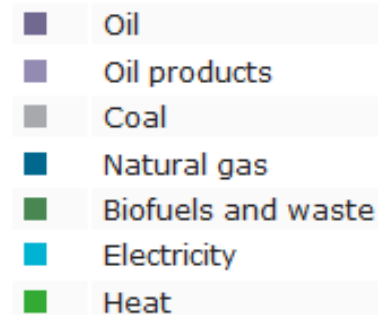
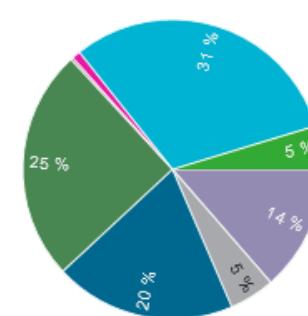
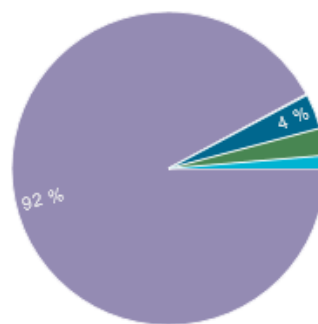
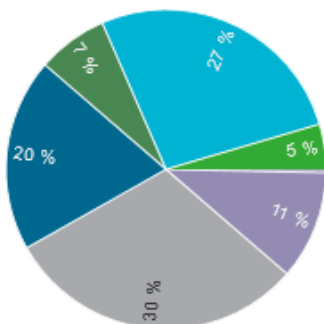
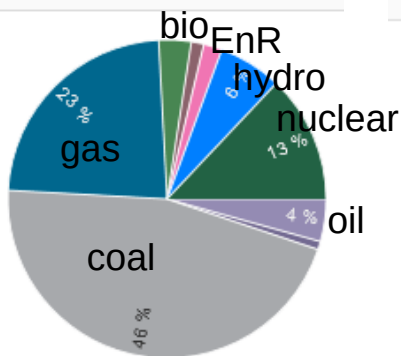
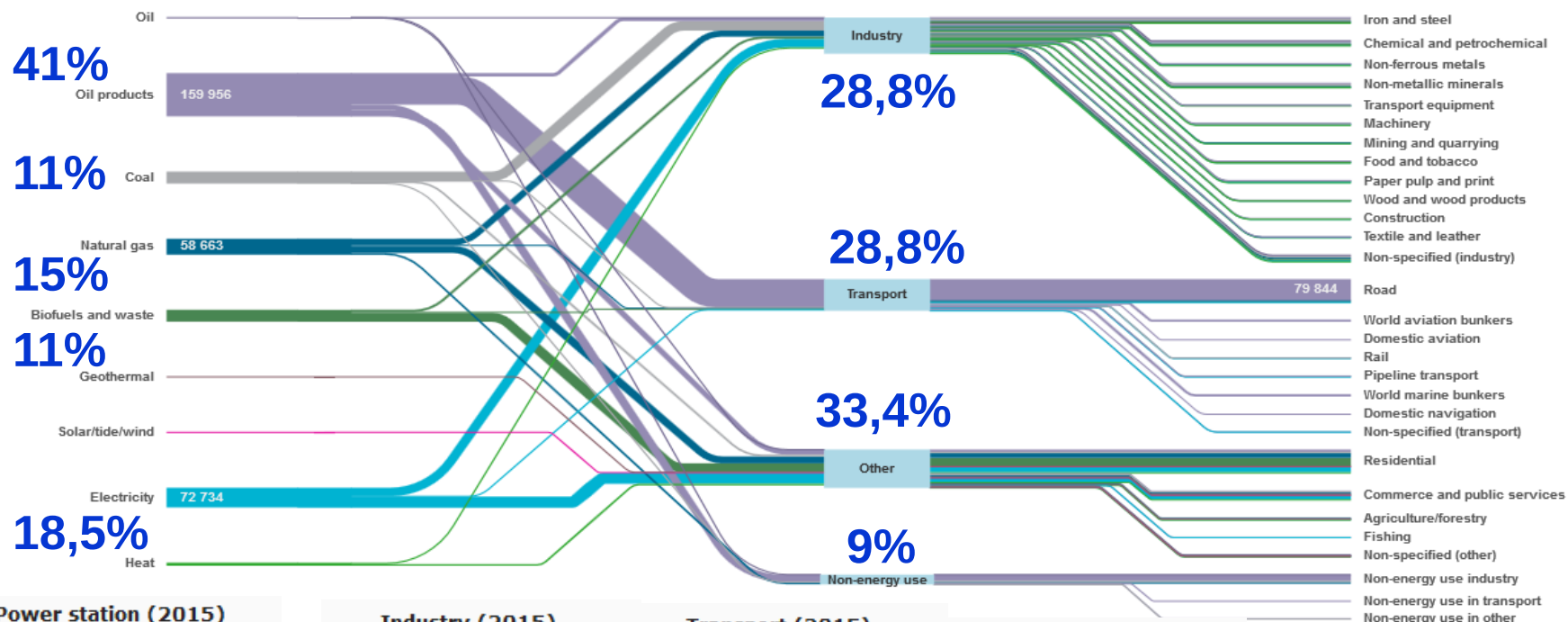
110 000 TWh (primaire: 150 000 TWh)

9 383 Mtoe

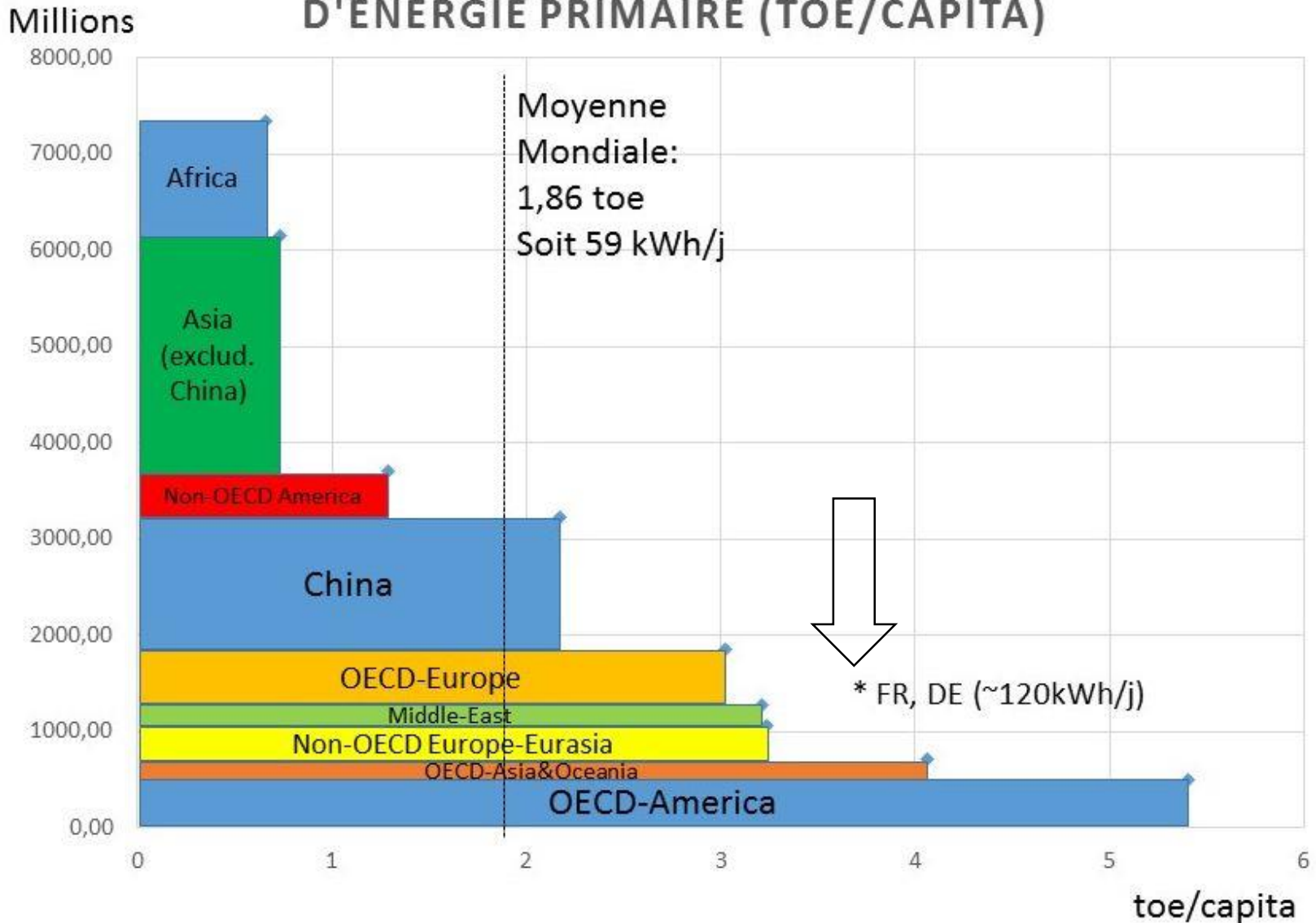
Petajoules ▼



Consumption by sector



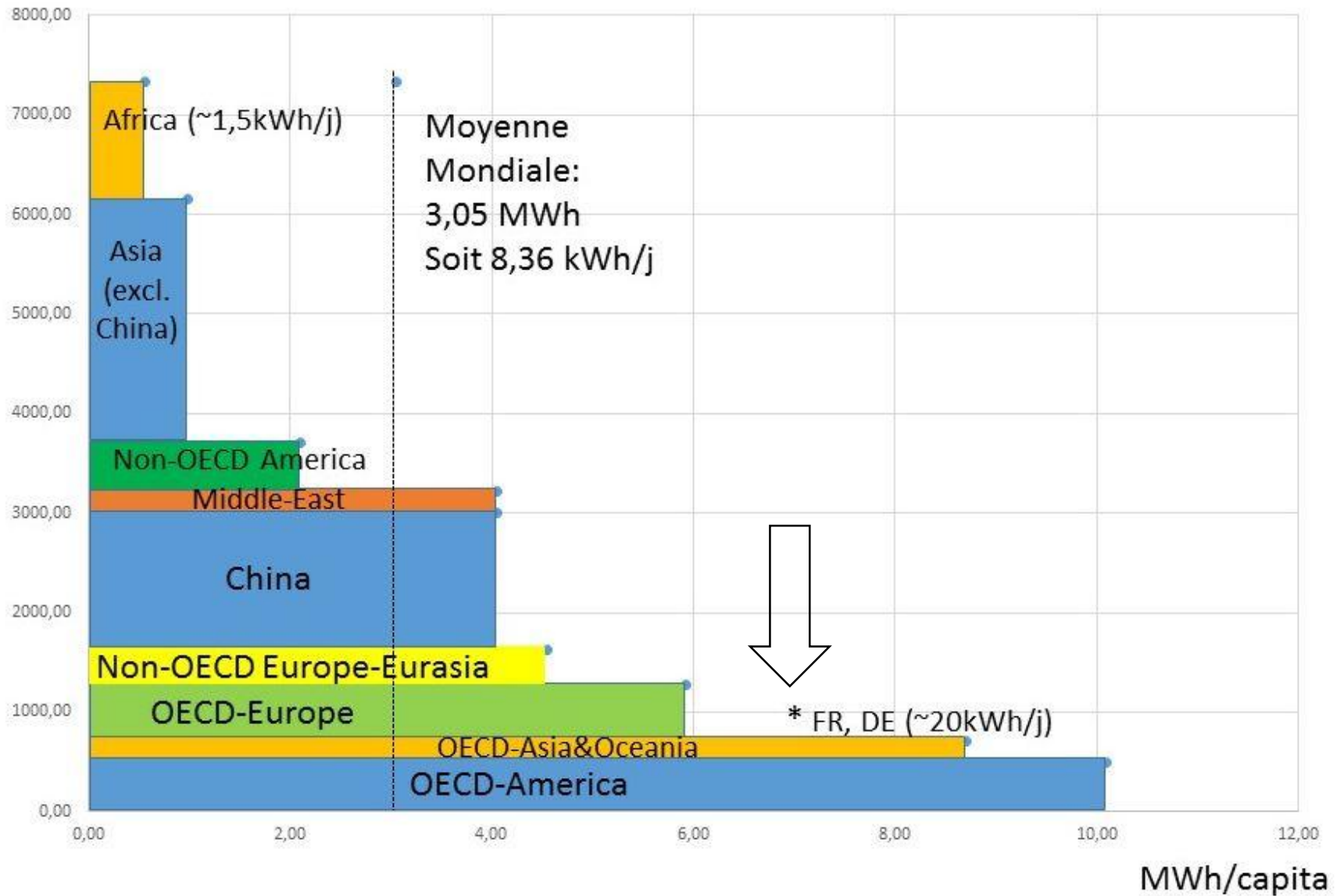
RÉPARTITION GEOGRAPHIQUE DE L'USAGE D'ÉNERGIE PRIMAIRE (TOE/CAPITA)



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

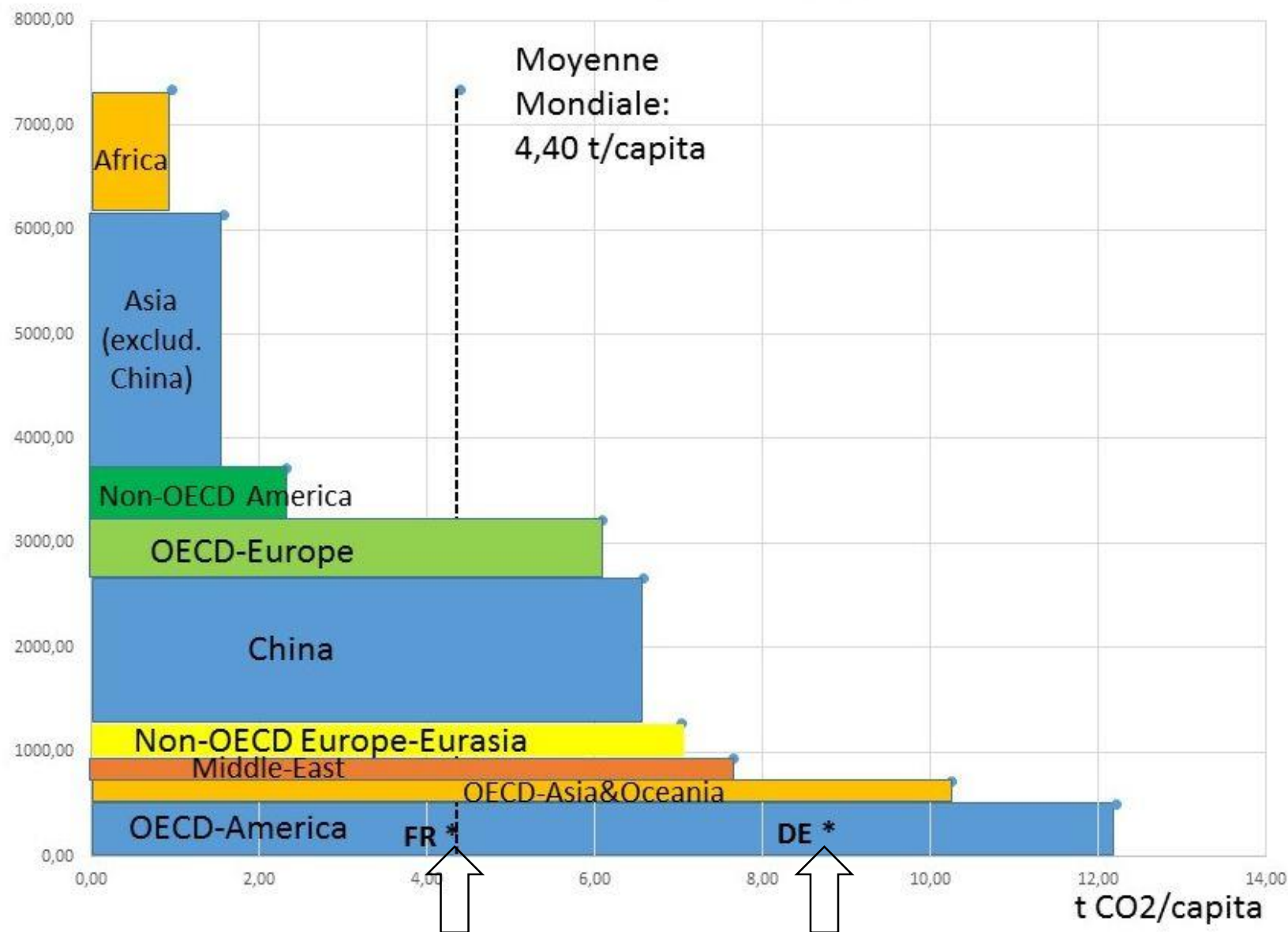
Millions

Consommation annuelle d'électricité (MWh/capita)



Millions

CO2 Emissions (t CO2/capita)

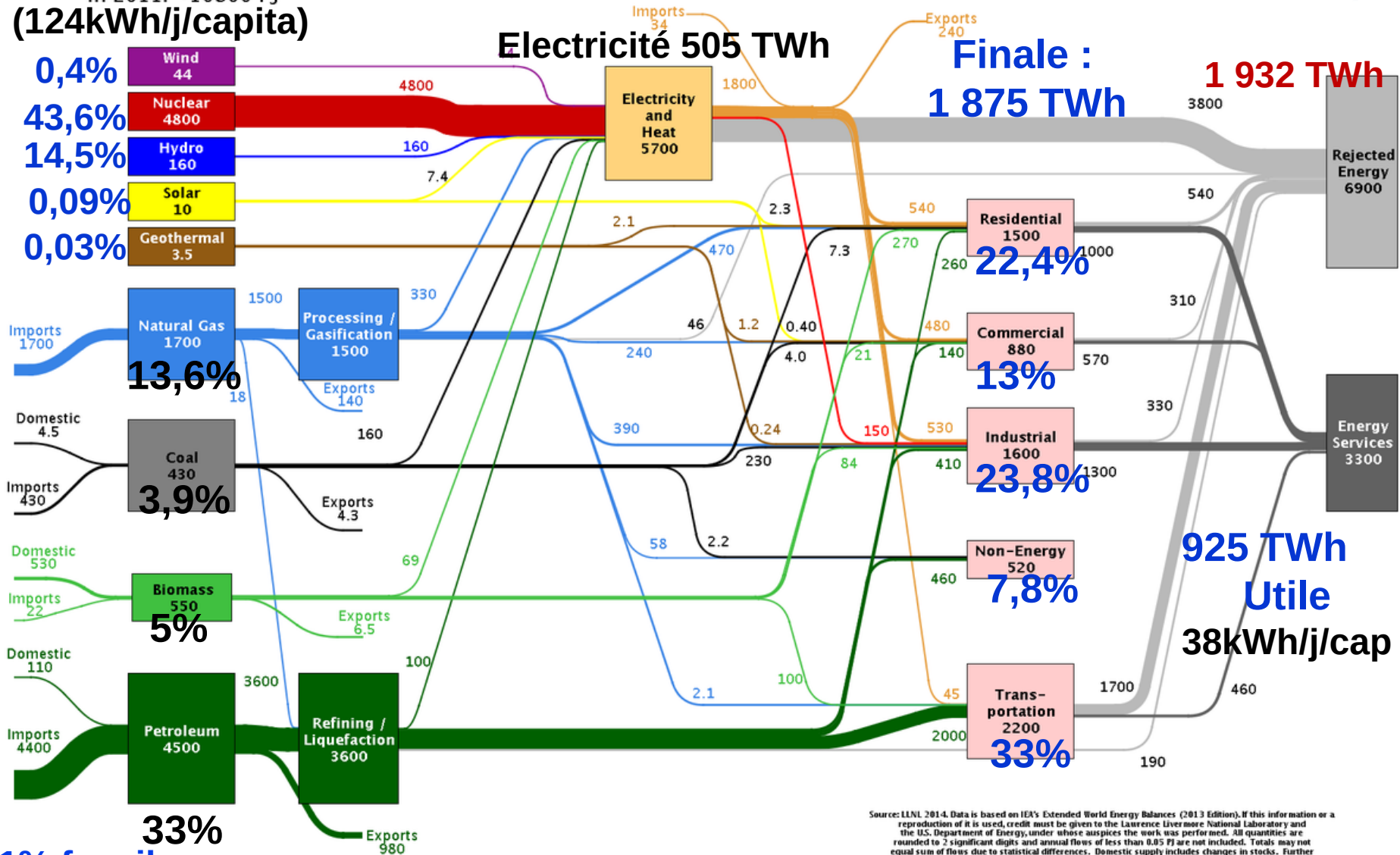


France - Diagramme de flux

Primaire: 3 000 TWh

France Energy Flow
in 2011: ~10800 PJ

(124kWh/j/capita)



Source: EIA, 2014. Data is based on EIA'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-410527.

Deutschland - Diagramme de flux

Primaire: 3 800 TWh

Germany Energy Flow
in 2011: ~13300 PJ

(127kWh/j/capita)

1,3%

8,8%

0,4%

0,7%

0.2%

Domestic 390 0,2%

Wind
180

**Nuclear
1200**

Hydro
62

Solar
93

Geothermal
24

10

Natural Gas
3500

22%

11

Coal
3300

24%
3.4

Biomass
970

7%

10/10/2016

Petroleum
5600

100

36%

ssiles

Electricité 530 TWh

Electricity and Heat 5500

Finale :

2 770 TWh

2 072 TWh

Rejected Energy	7400
-----------------	------

Residential
2300
23,2%

Commercial
1300
13%

Industrial
2600
26,2%

Non-Energy
1000
10%

Transportation
2700
27%

1 400 TWh
Utile

47kWh/j/cap

Source: EIA, 2014. Data is based on EIA'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.

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** ?

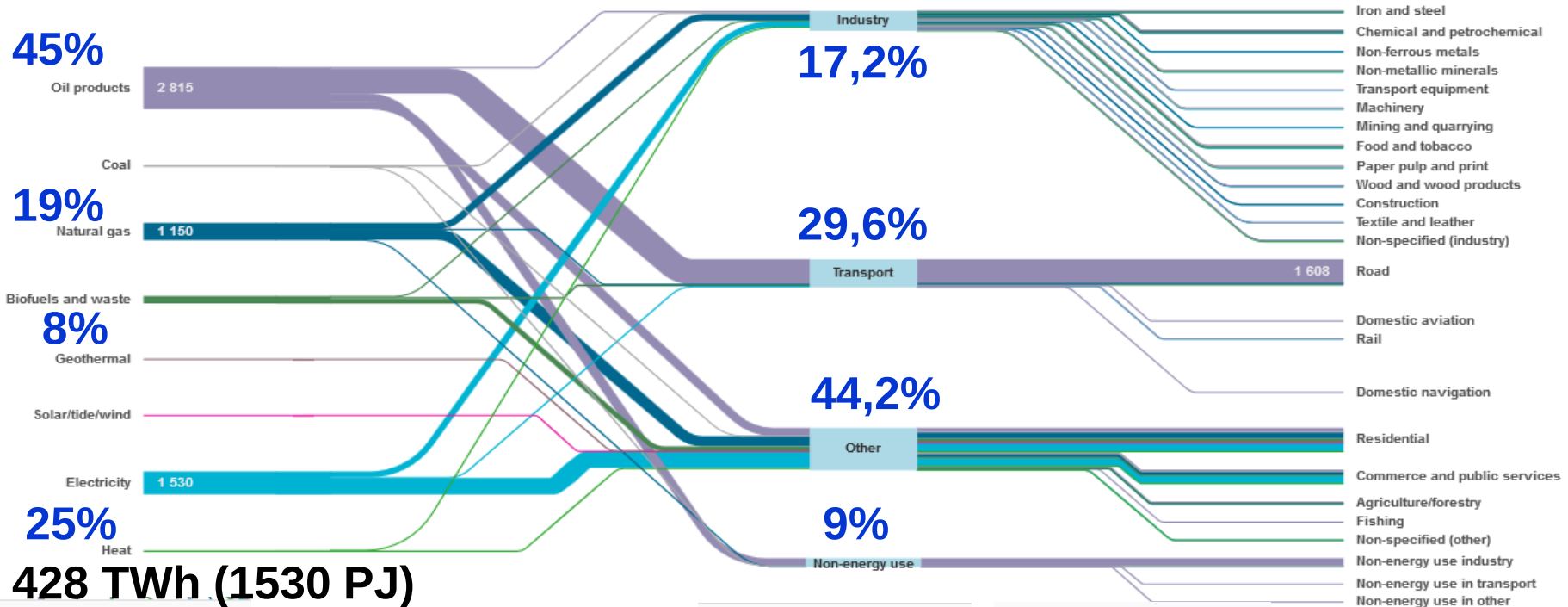
Usages de l'énergie - France

France
FINAL CONSUMPTION (2015)

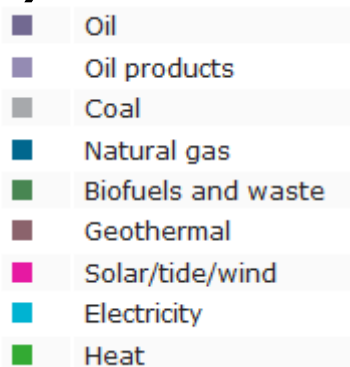
1733 TWh (primaire: 3300TWh)
286 Mtoe

Total final consumption
(6 188 PJ)

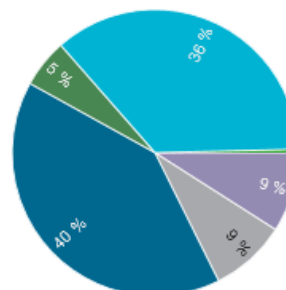
Consumption by sector



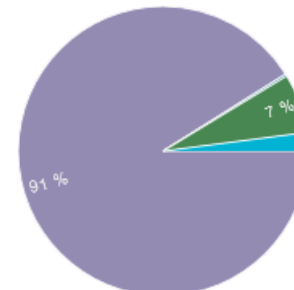
Power station (2015)
Total: 5 589 PJ



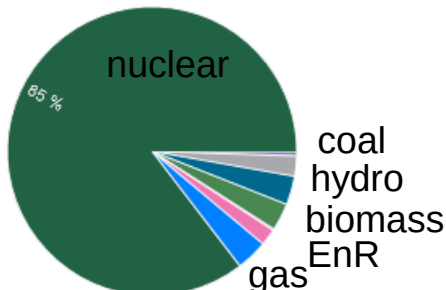
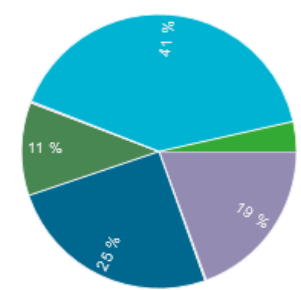
Industry (2015)
Total: 1 063 PJ



Transport (2015)
Total: 1 833 PJ



Other (2015)
Total: 2 735 PJ



Usages de l'énergie - Allemagne

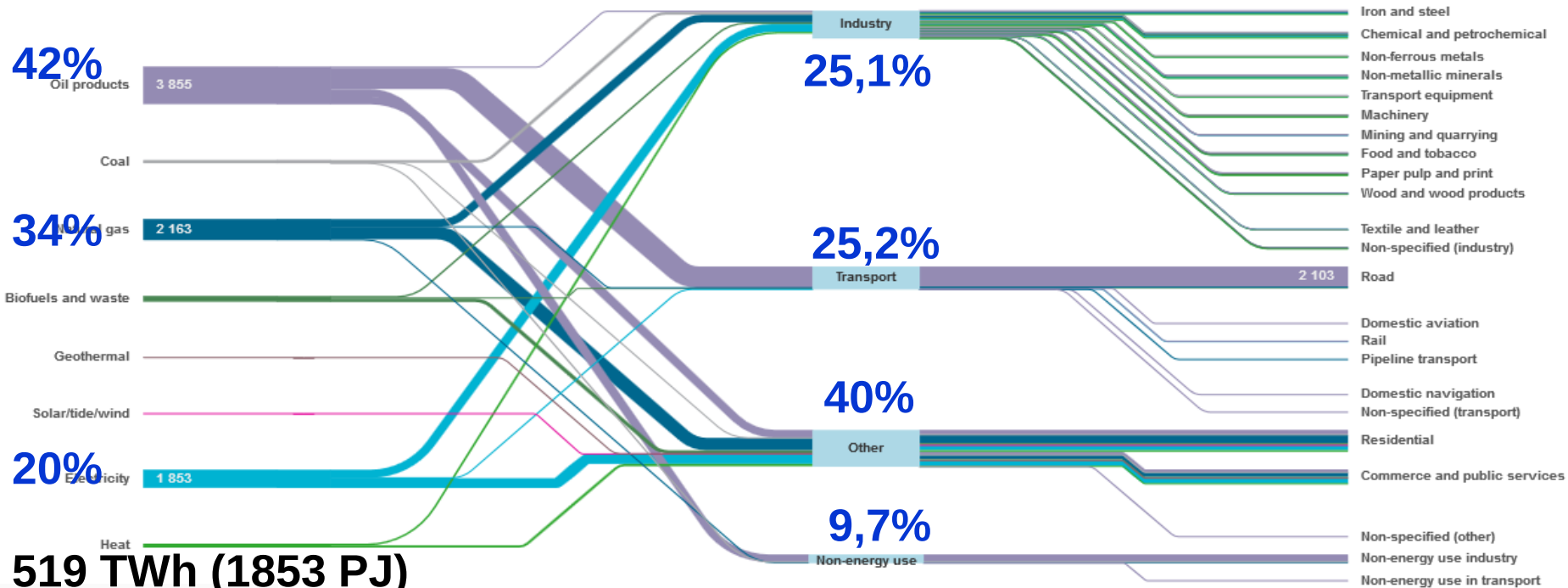
Germany
FINAL CONSUMPTION (2015)

2581TWh (primaire: 4429TWh)

286 Mtoe

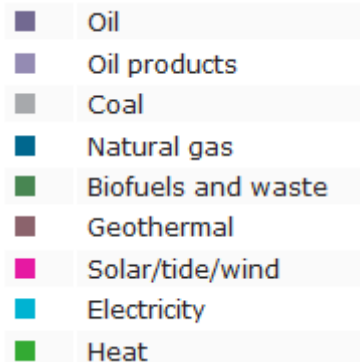
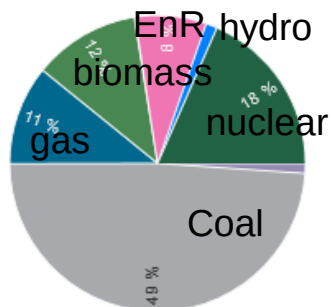
Total final consumption
(9 218 PJ)

Consumption by sector

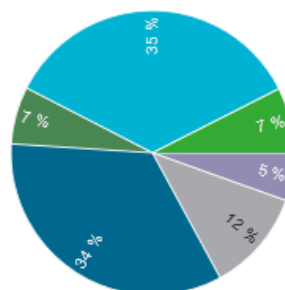


519 TWh (1853 PJ)

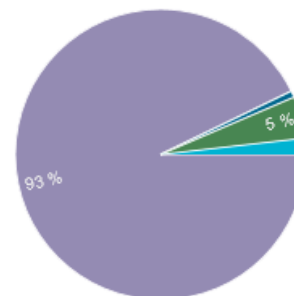
Power station (2015)
Total: 5 437 PJ



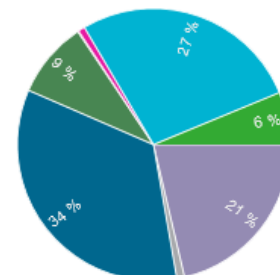
Industry (2015)
Total: 2 315 PJ



Transport (2015)
Total: 2 332 PJ



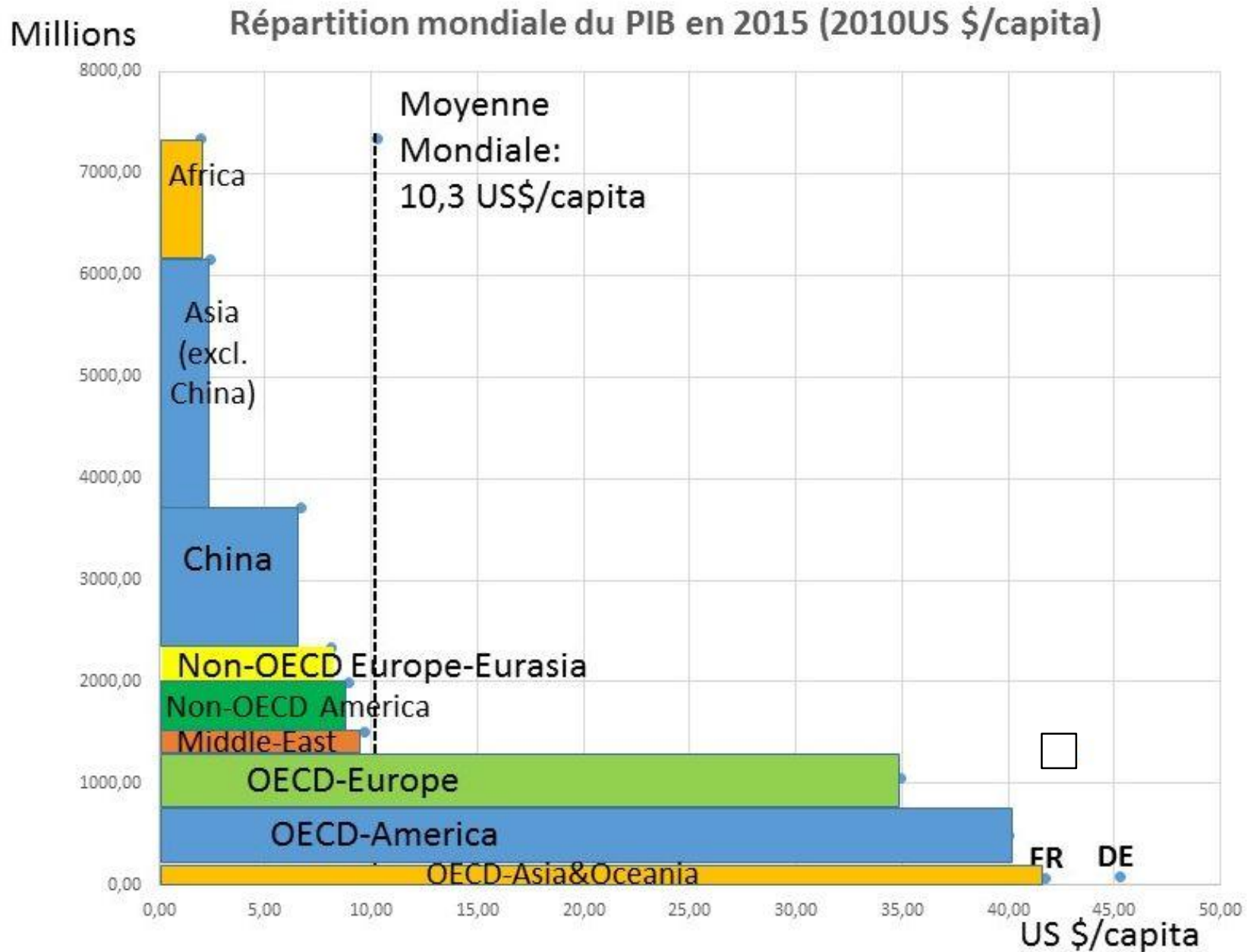
Other (2015)
Total: 3 681 PJ



Énergie et PIB

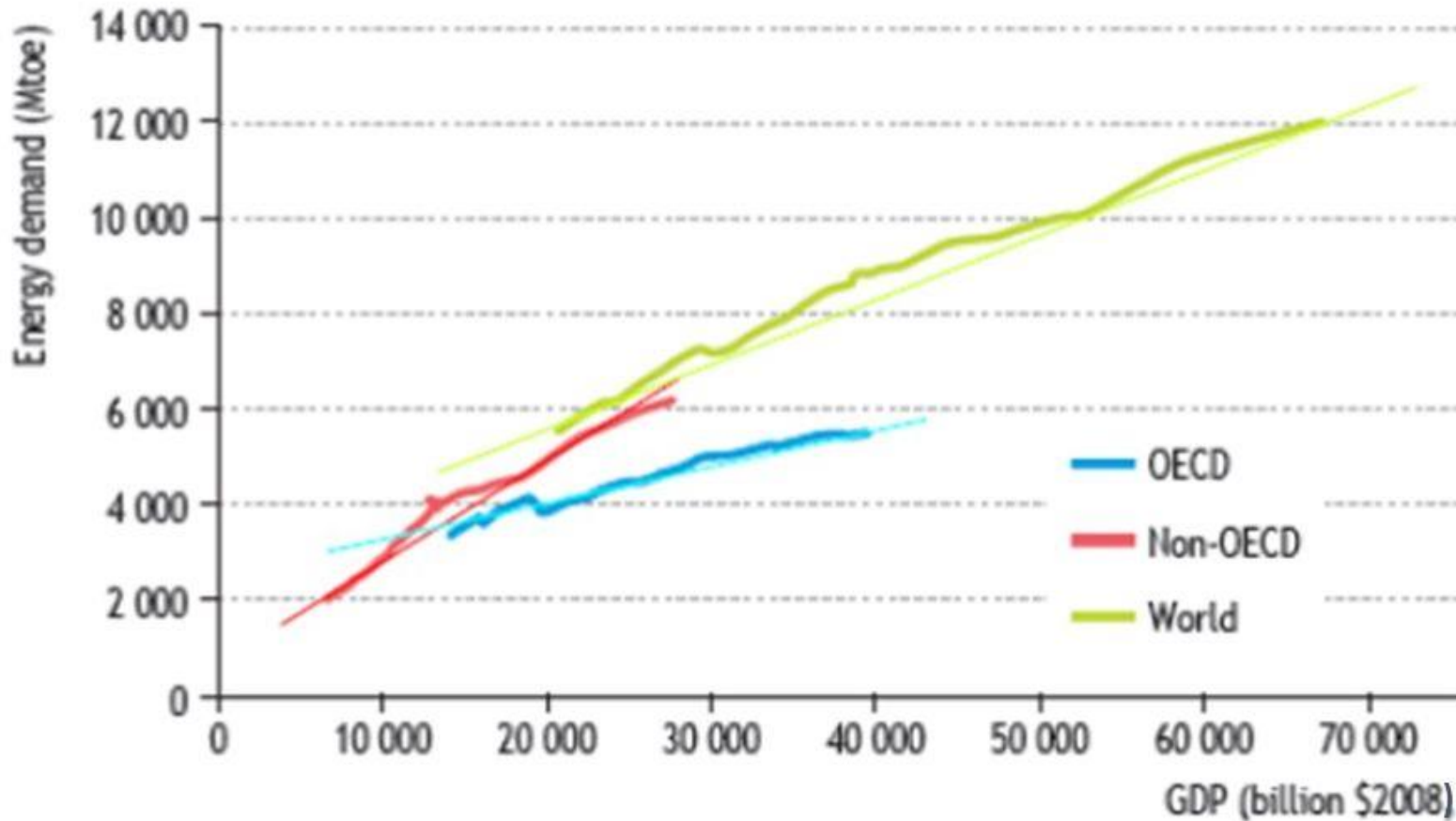
Quelle sorte de relation ?

Non, le capitalisme n'a inventé ni la croissance ...des besoins en énergie, ni le gaspillage !



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

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 :

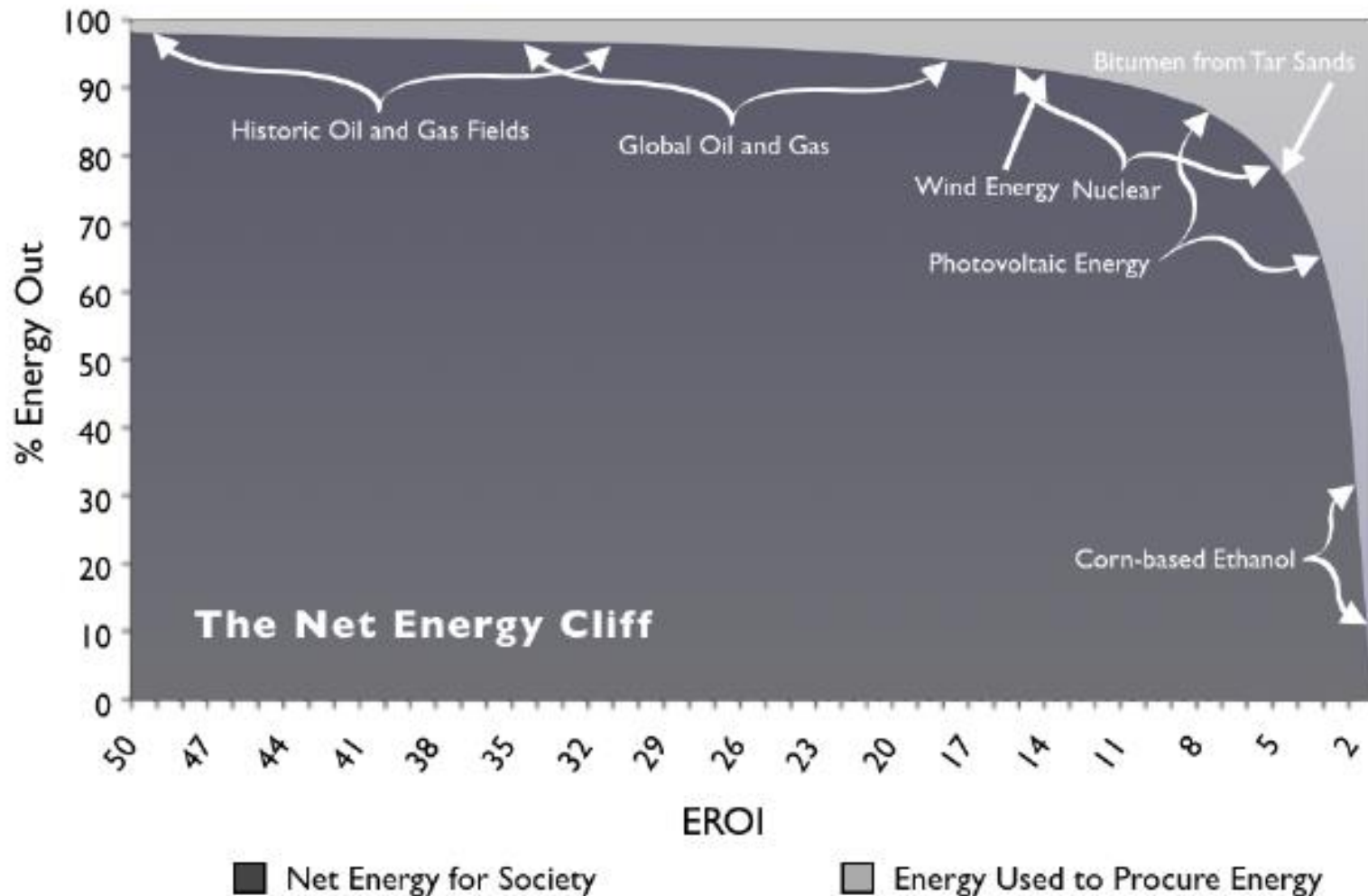
- de l'énergie, de la matière et leurs transformations.

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.

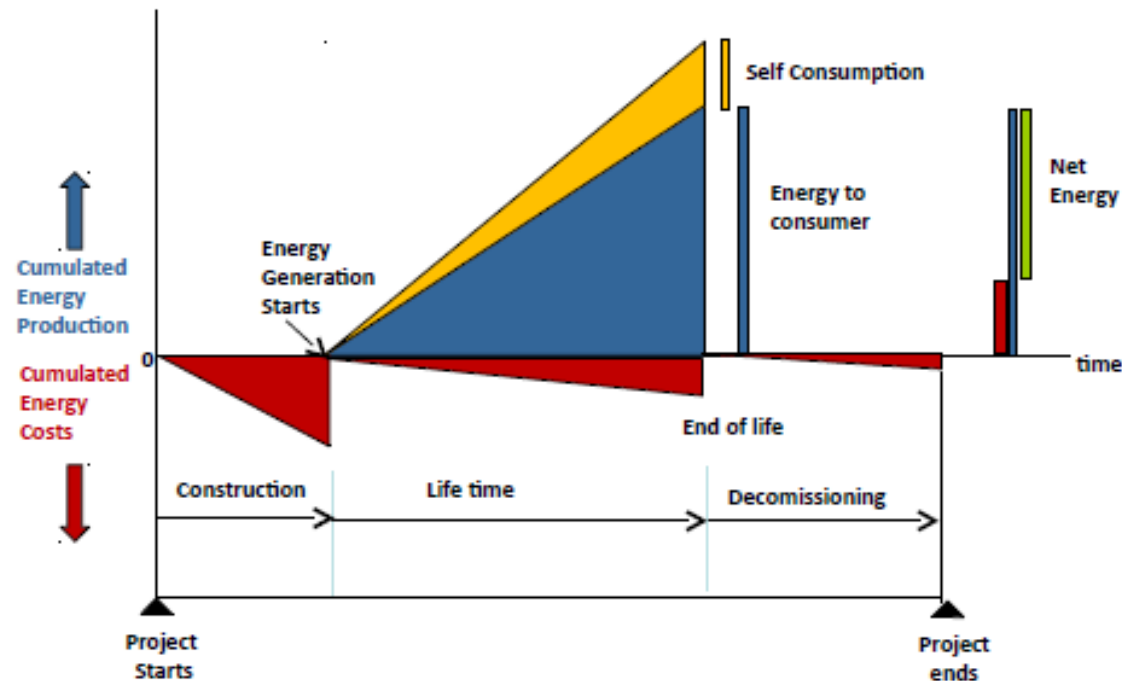
***“Natura non nisi parendo vincitur”*. Francis Bacon (1561-1626) On ne commande la nature qu'en lui obéissant.**

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



From Charles Hall and Jessica Lambert

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

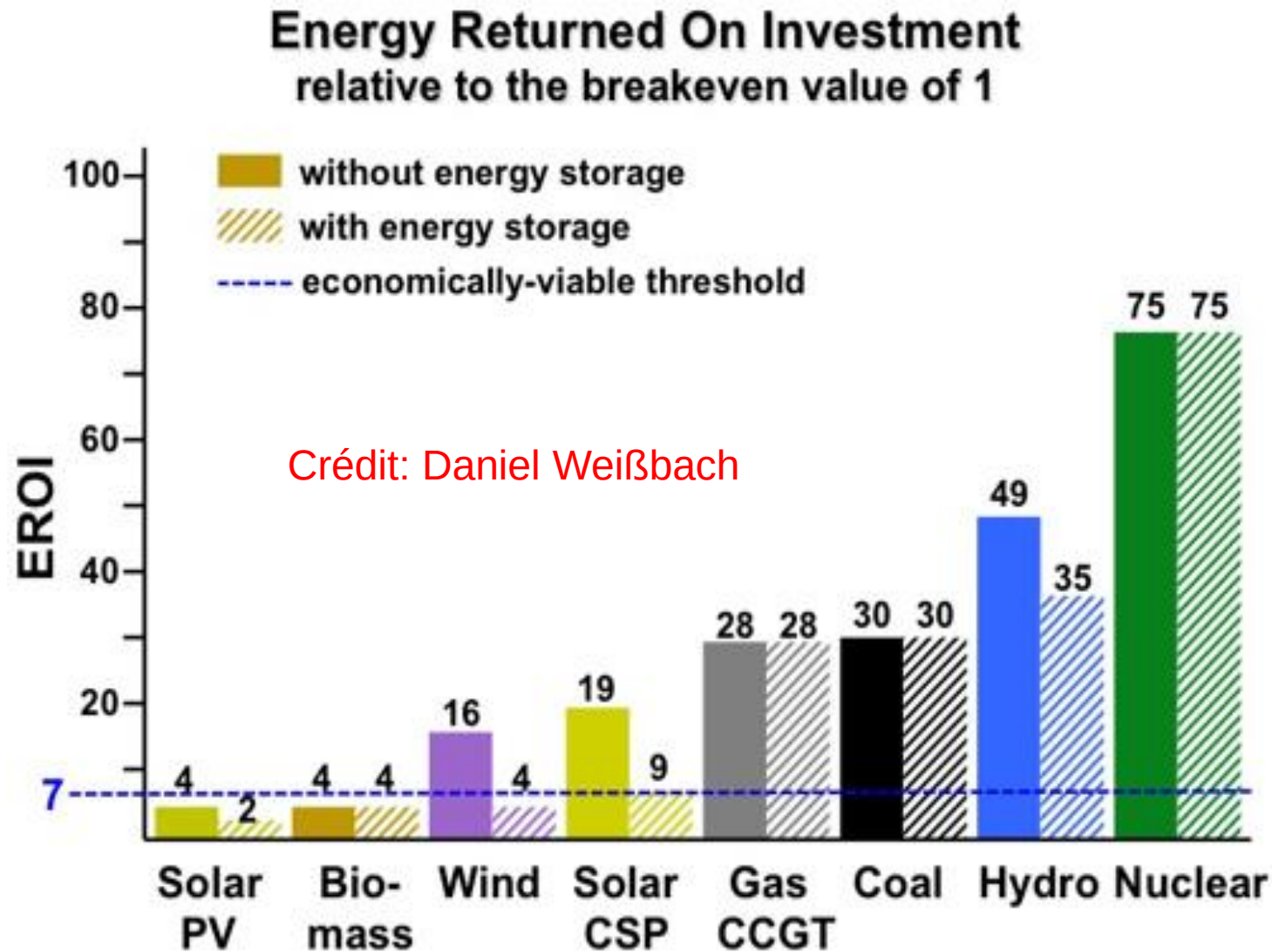


Analyse de cycle de vie (LCA)

Source: Energy from Wind: A Discussion of the EROI Research. Cutler Cleveland. Quoted by Nate Hagens at <http://www.theoilrumormongers.com/node/1865>

Crédit: Pedro Prieto

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



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 ($0,5 \text{ W/m}^2$ en Europe):
 - Soit $\sim 16 \text{ MWh/ha}$, (jusqu'à $\sim 80 \text{ MWh/ha}$ 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 $\sim 28 \text{ Mha}$.
 - À titre de comparaison, pour nourrir un cheval de trait qui doit absorber $\sim 30 \text{ kWh/jour}$ (pour fournir une énergie mécanique de 3 à 6 kWh/jour, ce qui correspond à ~ 600 à 700 W), il faut $\sim 0,7 \text{ ha}$.
 - 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 $\sim 1 \text{ kWh/ha}$, celle permise par la maîtrise de l'agriculture a permis de faire un bond jusqu'à $\sim 3 \text{ MWh/ha}$.

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*

Les énergies renouvelables. Une panacée ?

Disponibilité des énergies renouvelables en Europe

Ressources estimées:

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

➔ Total 42.6 kWh/j par personne

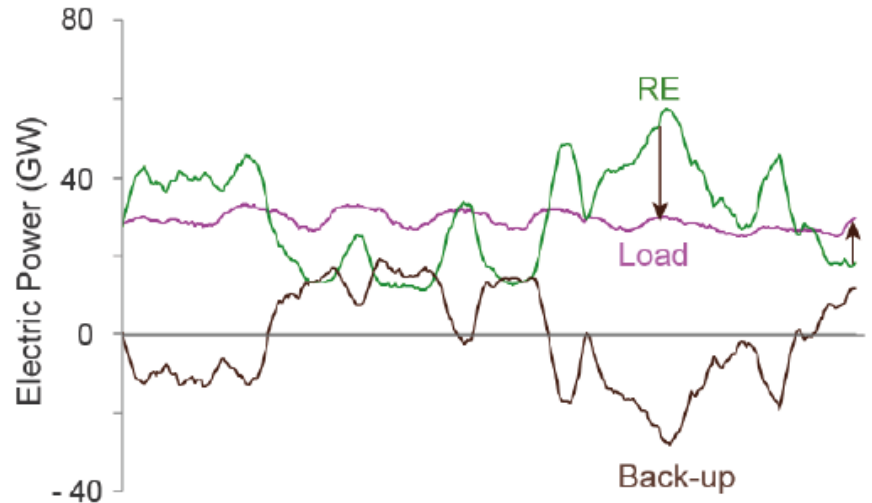
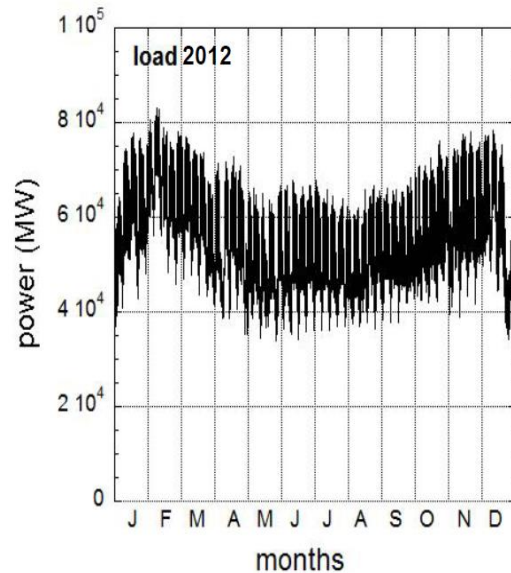
⇒ Fermes solaires requises : 5% de la superficie de l'Europe (450 m^2 par pers.)
→ 54 kWh/j par personne

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

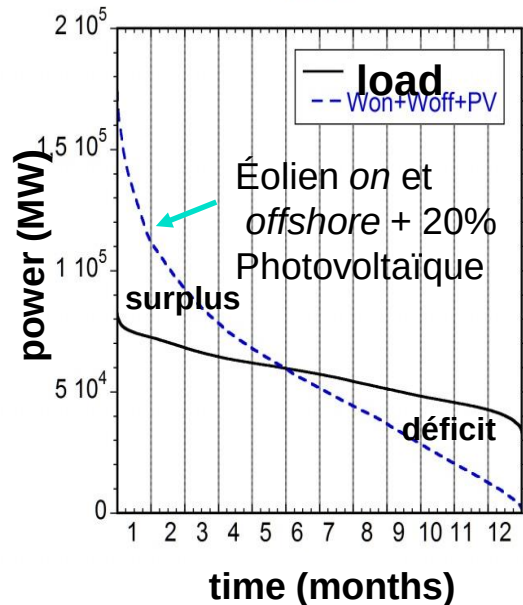
➔ Total $96.6 < 125 \text{ kWh/j}$ par personne (cf. MacKay, <http://www.withouthotair.com/>)
(Transport $\sim 40 \text{ kWh/j}$, Chauffage $\sim 40 \text{ kWh/j}$, Electricité $\sim 20 \text{ kWh/j}$)

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

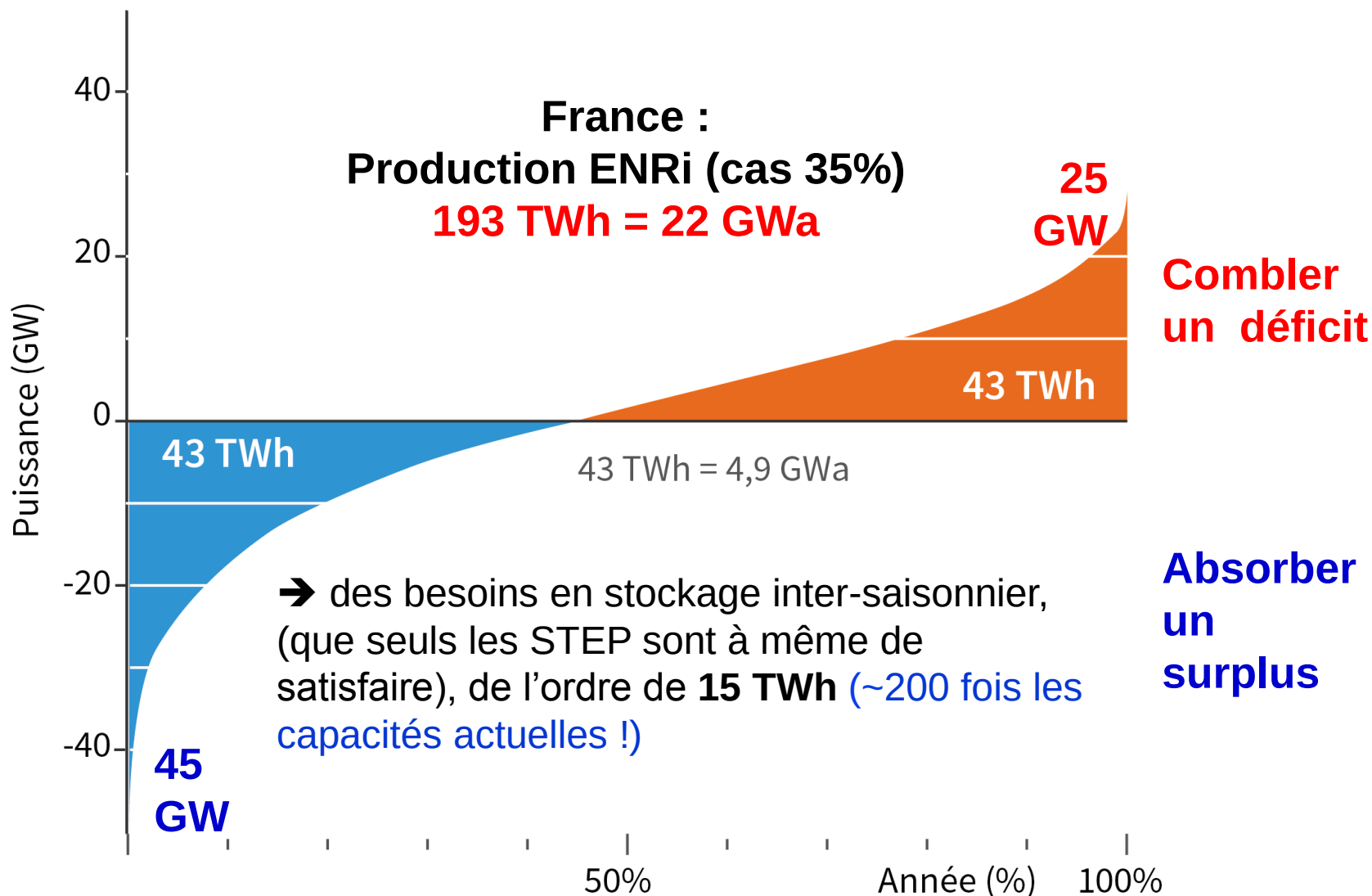


- Surplus perdu en l'absence de solutions de stockage suffisantes
- "Back-up" nécessaire
- Instabilité du réseau au-delà de 40% d'ENR intermittentes

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

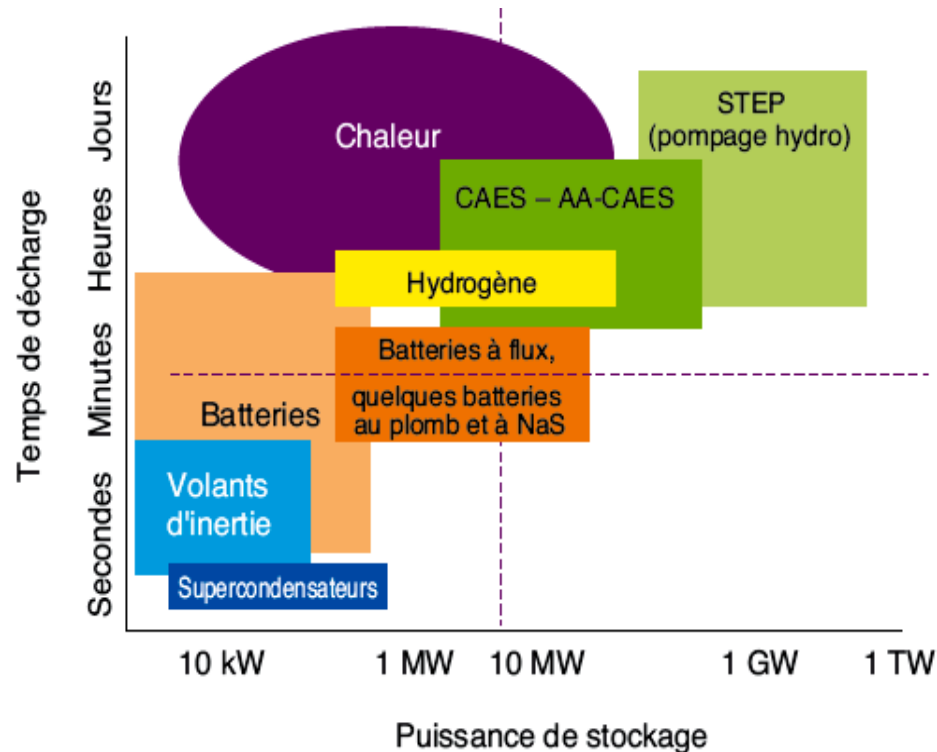
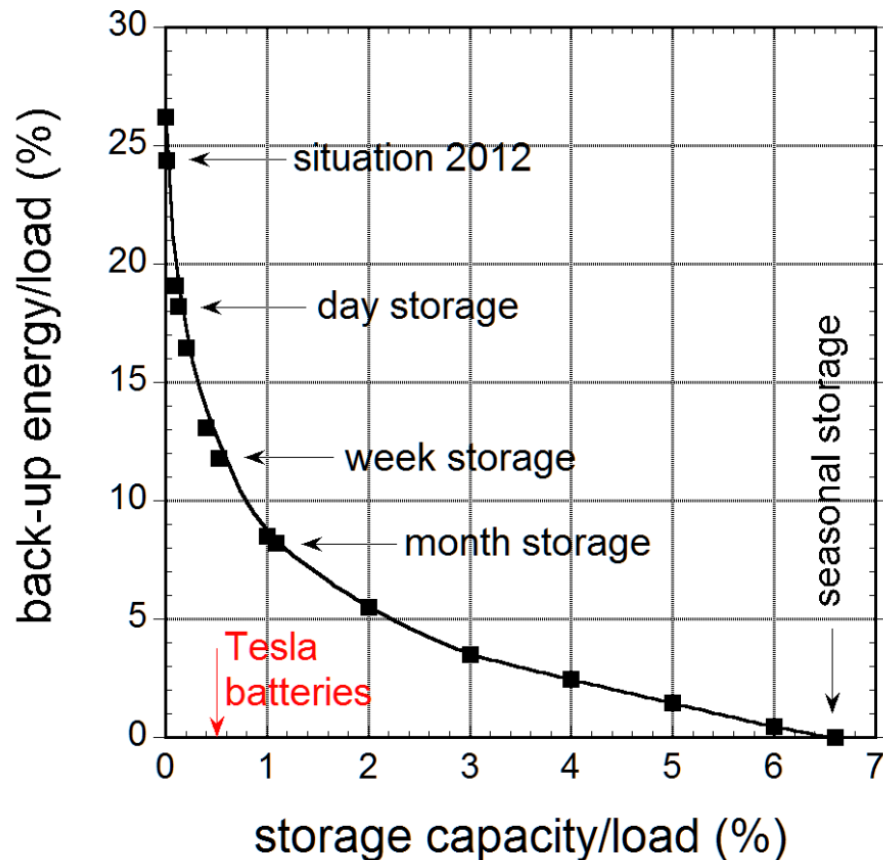
Adapter la demande à l'offre ? (→ ...Linky)

Monotone de charge d'équilibrage



Crédit: D. Grand

Quid du stockage de l'électricité ?



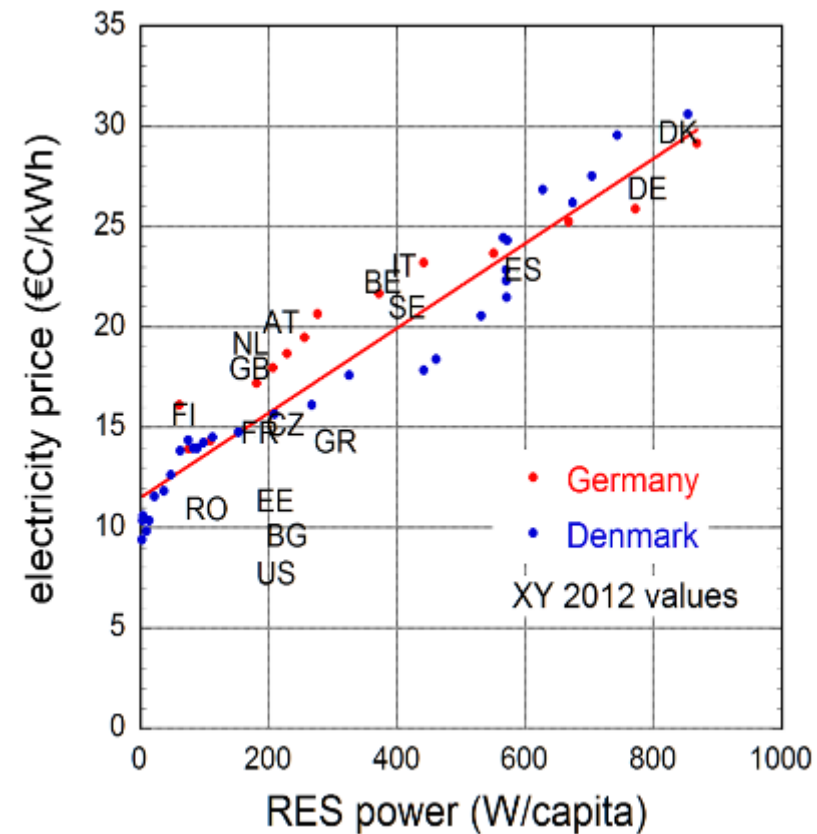
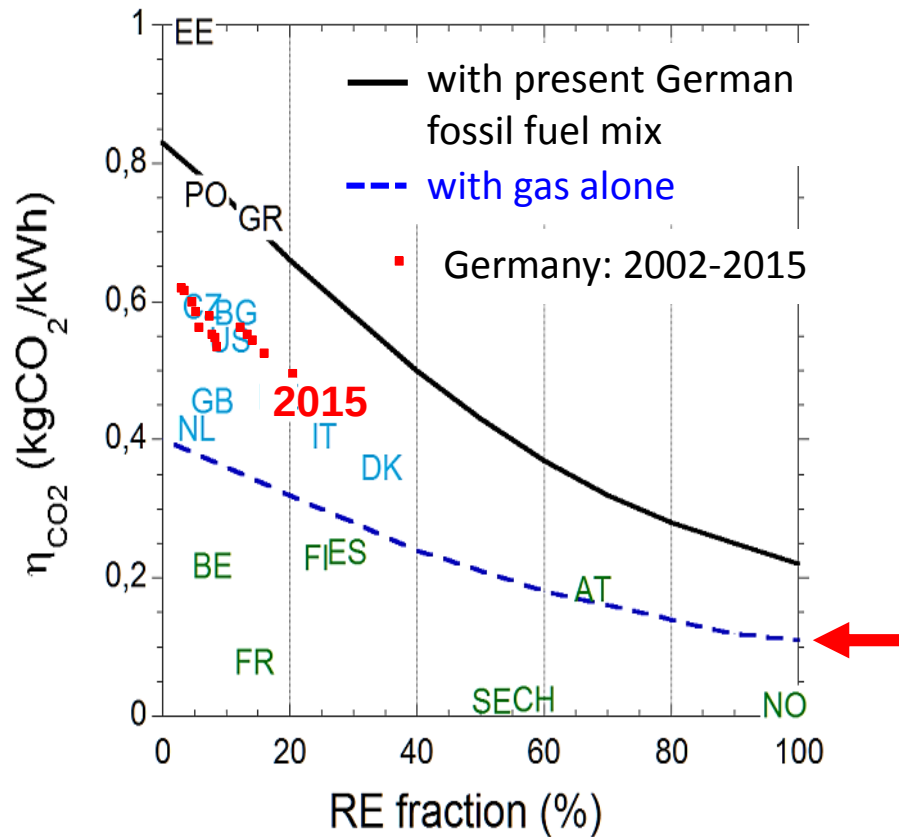
La capacité de stockage à long terme (saisonnier) est très insuffisante: **(pour l'Allemagne 660×capacité actuelle de pompage hydro requis)**

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

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 doublement des émissions de CO₂ [D. Grand, Ch. Le Brun, R. Vidil, Techniques de l'Ingénieur, juillet 2015, IN301]

Coût de l'électricité →

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

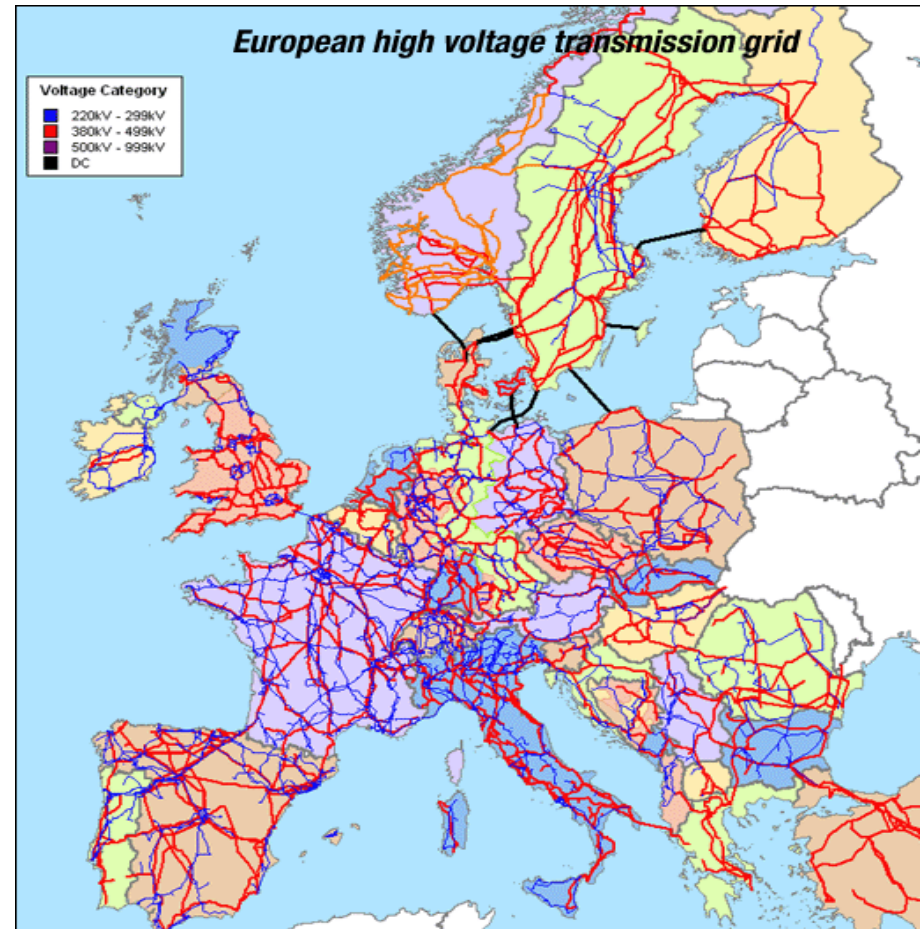
Echanges transfrontaliers?

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 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 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 50 millions de voitures électriques équipées d'une batterie de 20 kWh pour stocker 1 TWh, *et en utilisant ~250 000 t de lithium !* (**production mondiale 2007 = 25 000 t**)

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) ?

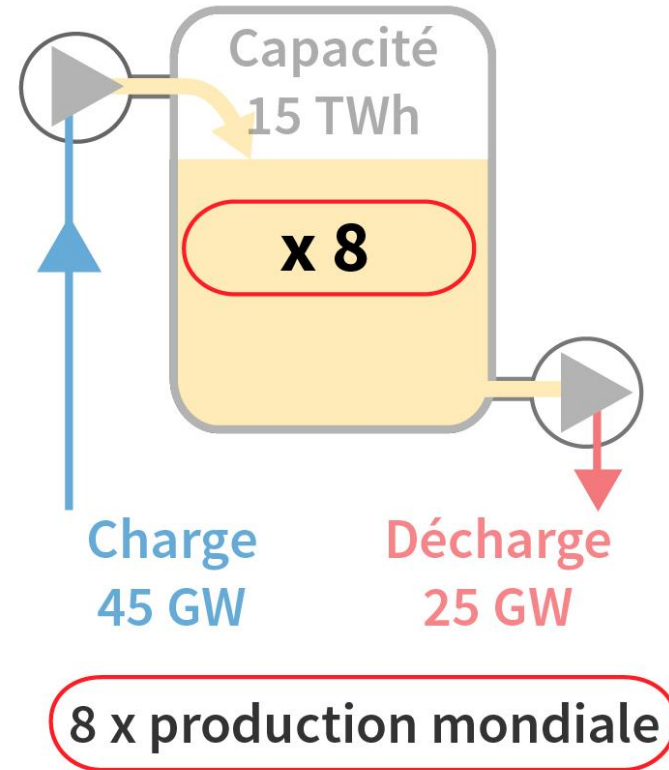
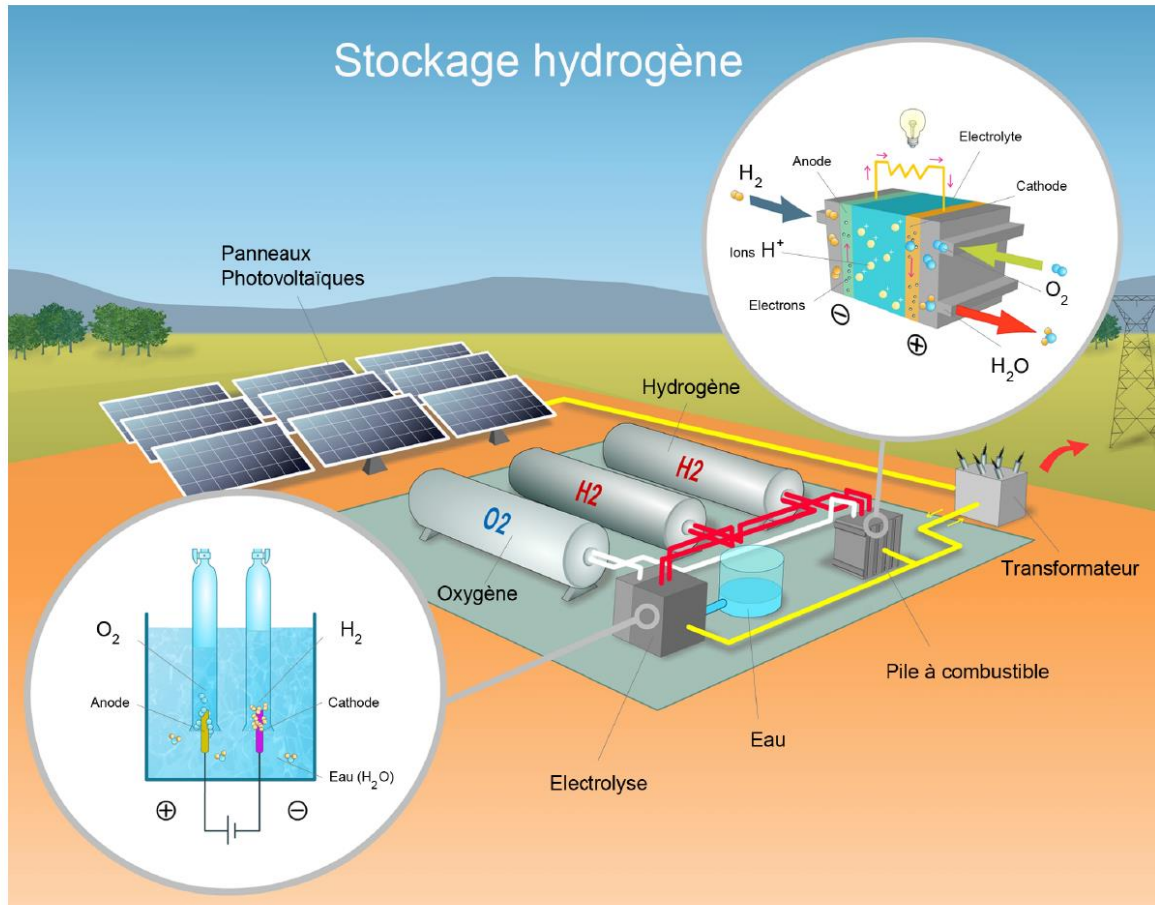
Handicap majeur : très faibles rendements globaux (credit G. Sapy)

Transformations Rendement	Voie hydrogène	Voie méthanation
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

Stockage hydrogène ($20\% < r < 40\%$)



Production mondiale d'hydrogène = 1,8 TWh

Crédit: D. Grand

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.

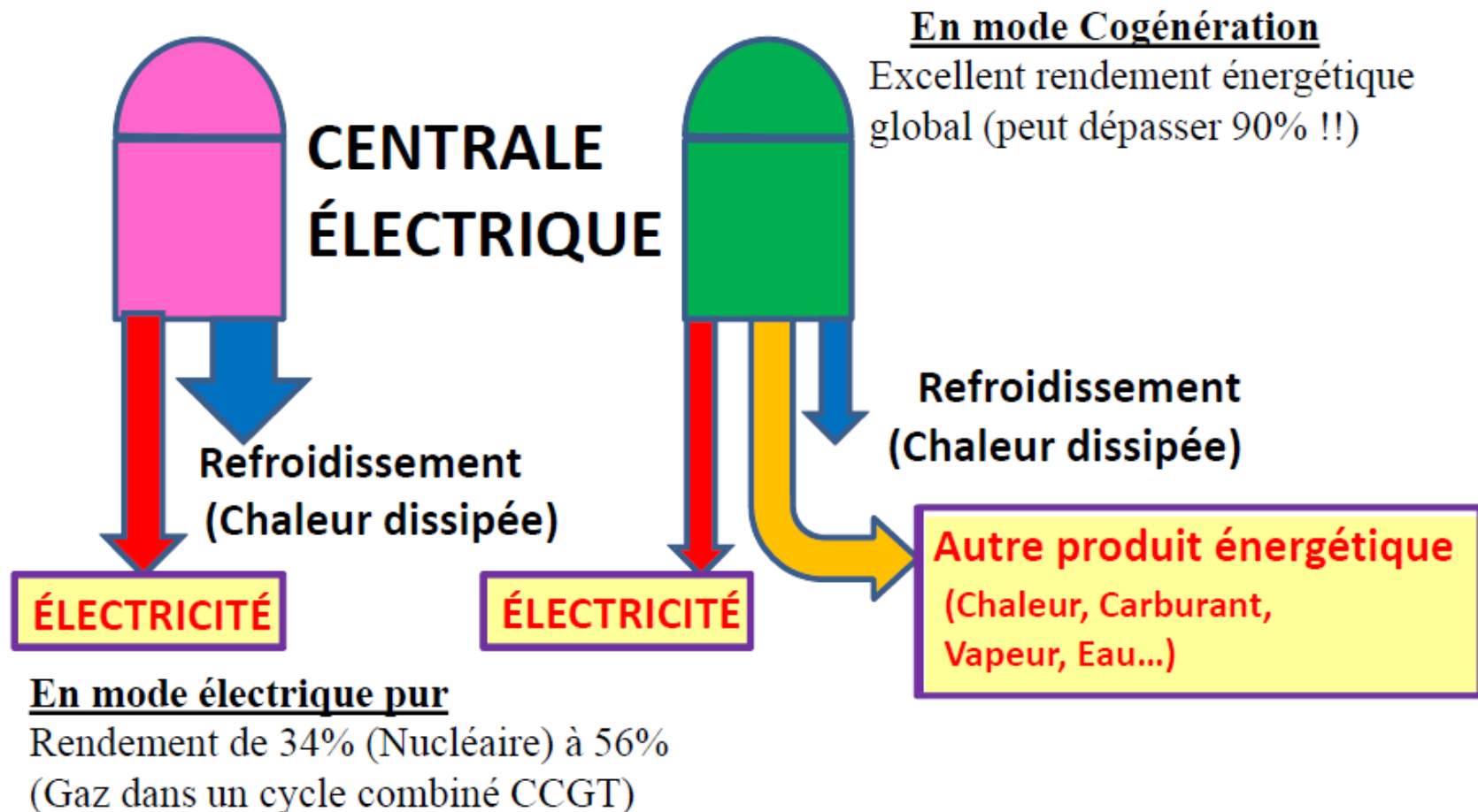
Gigafactory de Tesla :

**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

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.**

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 $150 \times 3000 = 450\,000$ 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**

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

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 !

Conclusions 1/2

- L'étroit couplage entre prospérité économique (PIB), qualité de la vie (HDI) et consommation d'énergie est maintenant clairement établie.
- 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 2/2

- 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. **Des sources à haute densité sont nécessaires pour disposer de technologies permettant 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...

Publications



Marie Christine Marghem

Hier, à 09:23 · 🌐

Je déplore le sous-investissement chronique dans certains secteurs stratégiques de notre pays. Comme les infrastructures. Pensez à l'état des routes en wallonie ou des tunnels à Bruxelles. Ou encore l'énergie. Au final, on décourage l'investissement et c'est systématiquement le citoyen qui paye. Pour toutes ces raisons, plus que jamais, nous devons poursuivre le coeur de notre action politique: la réforme!



RTBF.BE

Selon un de ses collaborateurs, Engie Electrabel a laissé ses centrales nucléaires se dégrader, la société dément

Réactions :

- Das belgische Anti-Atom-Bündnis **Nucléaire Stop Kernenergie** hält dieses Szenario für "Propaganda", wovon die Nuklearindustrie profitiere.
- (Loïk Le Floch-Prigent) :
...que le déni de réalité n'est pas la meilleure façon de gouverner un pays ou un continent et qu'il existe des lois de la physique qu'il serait bon de connaître et d'assimiler avant de définir des politiques.

“...c’est aussi vrai pour le royaume humain de la science que pour le royaume de Dieu : aucun homme ne peut y pénétrer s’il ne devient pas d’abord comme un petit enfant.”
Francis Bacon (1561-1626)

E
N
E
R
G
I
E

sans
a
priori



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

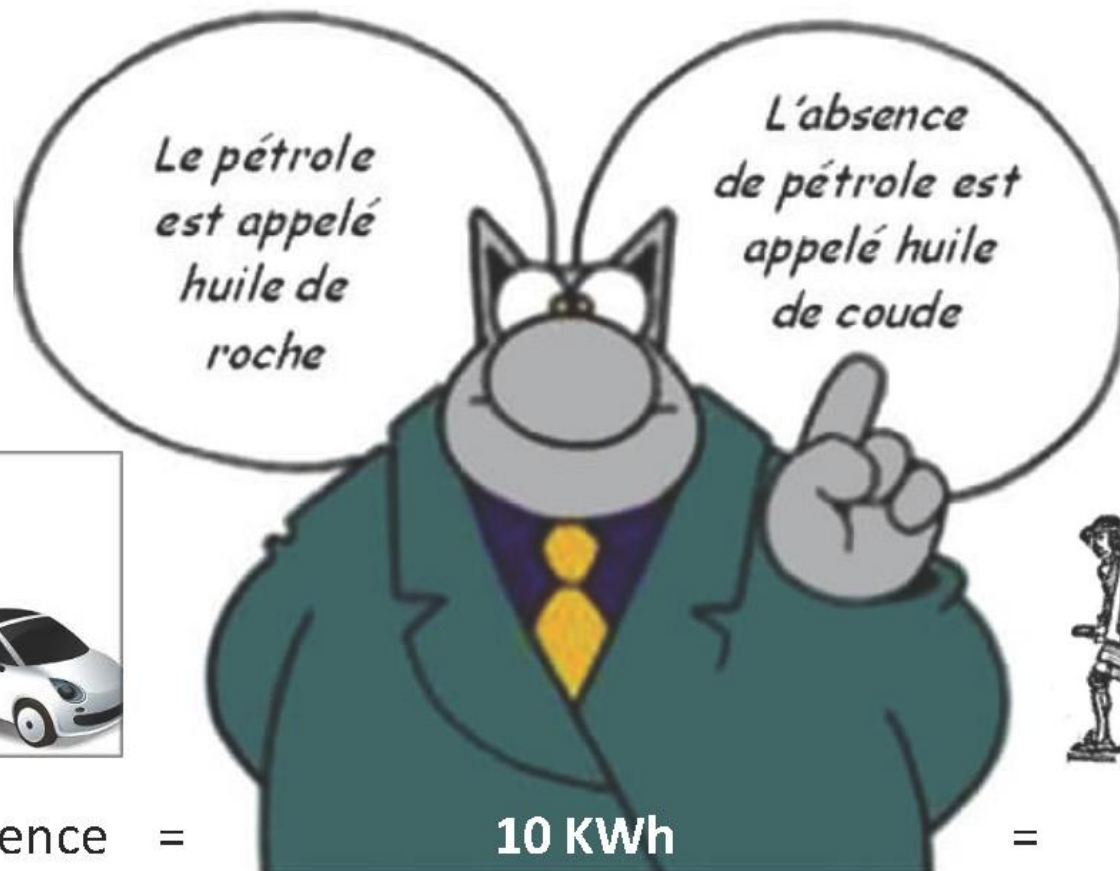
... jugements



Les membres de l'ONG Urgenda célèbrent avec leurs avocats la décision du tribunal en leur faveur, le 24 juin 2015 à La Haye. C 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 distopies... 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