

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

Friedrich W. Nietzsche

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

Devant la menace des conséquences d'un réchauffement climatique, dont la réalité semble bien se confirmer de jour en jour, et compte tenu du rôle que jouent les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropiques dans cette évolution, la décarbonation de l'économie représente un défi majeur pour nos sociétés développées, et c'est tout l'enjeu de ce que l'on entend par transition énergétique.

Cette transition devrait conduire à une réduction drastique de la part des énergies fossiles (environ 80% actuellement) dans l'énergie primaire totale utilisée au niveau mondial.

C'est ainsi qu'aussi bien la feuille de route de l'Union Européenne de 2011 que la « LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte » prévoient une baisse de 40% des émissions d'ici 2030, et d'ici 2050 une division par 4, ainsi pour la France qu'une division par deux de la consommation finale d'énergie.

### **Deux illusions à dissiper :**

#### **Première illusion : La croissance verte**

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, grandeur permettant de quantifier les transformations de la matière dont nous vivons. Aucun substitut n'existe.

Cependant, pour des raisons qui ont été clairement démontrées par des économistes conscients de la nécessité pour les modèles macro-économiques de respecter les lois fondamentales de la nature, les approches des modèles dominants conduisent à très largement sous-estimer le poids de l'énergie dans la formation du PIB.

Concrètement, un théorème de l'économie néo-classique exprime que l'élasticité du PIB par rapport à chacun des facteurs de production, (capital, travail, énergie etc.), i.e. la façon dont la variation relative de l'un de ces facteurs se répercute sur la variation relative du PIB, est exactement donnée par la part de ce facteur dans le PIB. Comme les dépenses énergétiques ne représentent en coût qu'entre 5 et 10% du PIB, l'élasticité du PIB par rapport à l'énergie, selon l'économie néo-classique, doit aussi être de 5 à 10%. De ce point de vue, la question des ressources en énergie ne peut constituer un problème important.

Or, les données empiriques montrent une sensibilité beaucoup plus grande du PIB à l'énergie, et que les élasticités réelles ne sont pas données par les facteurs de coûts. Preuve en est que les modèles néo-classiques basés sur une maximisation sans contrainte sont incapables de reproduire ces données et en particulier les récessions économiques qui ont suivi les chocs pétroliers. Autrement dit, les hypothèses de l'économie néo-classique ne sont pas remplies dans la réalité, en particulier celle concernant la substituabilité des différents facteurs de production !

Mais les modèles prenant cette fois en compte les contraintes du monde réel fixées par les lois de la thermodynamiques (cf. Ayres<sup>1</sup>, Kümmel et Lindenberger<sup>2</sup>, Giraud<sup>3</sup>, ...) conduisent, pour

---

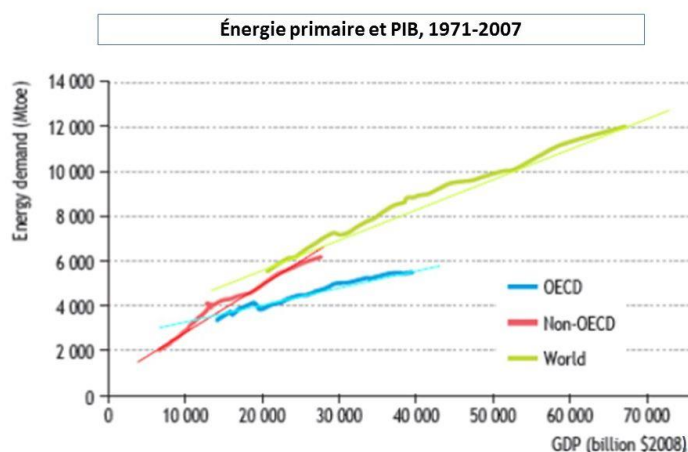
<sup>1</sup> Robert Ayres et al., "The underestimated contribution of energy to economic growth", *Structural Change and Economic Dynamics* 27 (2013) 79–88

<sup>2</sup> 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

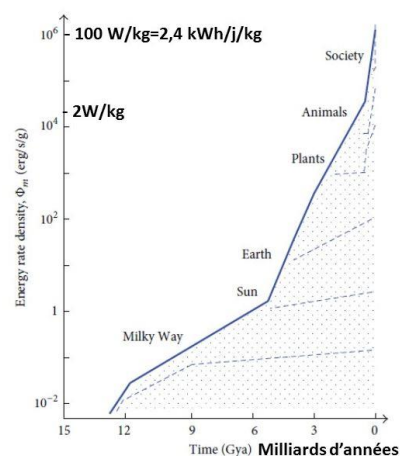
l'énergie à une élasticité de l'ordre de 60 à 70%, en accord avec la réalité. En outre les résultats des modélisations collent parfaitement avec les données empiriques pour l'évolution du PIB.

Ces modèles permettent aussi de comprendre l'origine de l'illusion que la croissance du PIB pourrait être découplée de la consommation d'énergie. De fait, et de façon plutôt évidente, le découplage apparent observé provient du glissement constaté au cours des dernières décennies des emplois depuis les secteurs de la production industrielle et de l'agriculture vers les services. Ceci tandis que la production était progressivement délocalisée vers des pays à bas coût de main-d'œuvre. Cela a réduit le coût des produits, de sorte que leur contribution au PIB a diminué. En conséquence on a pu observer corrélativement une forte augmentation du PIB par quantité employée d'énergie, i.e. de l'efficacité énergétique.

Ce que nous apprend l'histoire de notre univers et l'observation de son évolution depuis le big-bang devrait suffire à nous convaincre (cf. par exemple E. Chaisson<sup>4</sup>) du rôle moteur de l'énergie. Cette évolution est marquée par des sauts quantitatifs du taux de dissipation de l'énergie associés à l'émergence de nouvelles structures.



**Figure 1. Relation entre PIB et énergie (données IEA)**



**Figure 2. Relation entre complexité et taux d'énergie dissipée (E. Chaisson)**

Quelques données de base essentielles doivent être notées :

- Pour assurer le fonctionnement de notre propre métabolisme nous consommons en moyenne 2800 kcal/jour, soit 3 kWh/jour. Ceci correspond à une puissance moyenne de 130 watts, dont une centaine sont dissipés dans le fonctionnement des différents organes, ce qui en moyenne laisse seulement 30-40 W disponibles pour le déplacement et le travail musculaire.
- Le maintien d'une société préindustrielle nécessite la dissipation d'une quantité moyenne d'énergie par personne d'environ 12 kWh/jour, (ce qui correspond à environ 4 kg de bois/jour ou 1 litre de pétrole, ou ... 10 m<sup>3</sup> d'eau élevés de près de plus de 400 m !).
- La consommation quotidienne moyenne d'énergie primaire par habitant se situe en Europe à environ 120 kWh/jour<sup>5</sup>, ce qui correspond en termes d'usages à environ 25 kWh/jour pour les usages de l'électricité, 40 kWh/jour pour le chauffage et 40 kWh/jour pour les transports.

<sup>3</sup> G. Giraud and Z. Kahraman, "How Dependent is Growth from Primary Energy? Output Energy Elasticity in 50 Countries", (2014). [<https://www.parisschoolofeconomics.eu/IMG/pdf/article-pse-medde-juin2014-giraud-kahraman.pdf>]

<sup>4</sup> Eric J. Chaisson, "The Natural Science Underlying Big History", The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 384912

Même s'il existe des espoirs d'améliorations des rendements dans les processus de conversion de l'énergie depuis les sources primaires jusqu'aux usages finaux, il ne faut pas perdre de vue les limites absolues que fixent les lois de la thermodynamique.

**C'est donc bien une illusion dangereuse que de croire que nous pourrions maintenir une société prospère sans consommer ni énergie ni ressources, car ceci est totalement incompatible avec ce que nous apprend la thermodynamique sur le monde.**

Tous les systèmes complexes organisés, inertes ou vivants, ne peuvent subsister dans leur état loin de l'équilibre thermodynamique, qu'en échangeant suffisamment d'énergie et de matière avec le milieu extérieur, en maximisant leur taux de dissipation d'énergie<sup>6,7,8</sup>.

Pour maintenir et développer une civilisation il est en outre nécessaire que la société ne consacre qu'une fraction (typiquement moins de 10%) de ses ressources énergétiques à l'obtention de ces mêmes ressources. C'est justement pour cela que le pétrole et le charbon ont permis l'essor de nos sociétés industrielles. Cette notion de taux de retour en énergie, ou EROI<sup>9</sup> (de l'acronyme anglais 'Energy Return On Investment') fait justement partie des critères objectifs à utiliser pour évaluer des sources d'énergie ou des systèmes énergétiques complets.

**Alors *quid* de la croissance, du bien-être et de la prospérité si nous devons réduire de façon drastique notre consommation d'énergie pour sauver le climat ?**

Le défi posé par la transition énergétique et la décarbonation revient donc à trouver des sources d'énergie non carbonées remplaçant les sources d'énergie fossiles, répondant aux besoins en quantité, en qualité adaptée aux usages, et disponibilité adaptée à la demande, tout en satisfaisant aux contraintes économiques et environnementales. Or, il n'existe malheureusement actuellement aucune solution miracle.

**Deuxième illusion : Pour décarboner il suffit de développer massivement les énergies renouvelables !**

Pour ce qui concerne la production d'électricité, les études détaillées sur les conséquences de l'intermittence des énergies renouvelables et la manière de les gérer (cf. F. Wagner<sup>10</sup>, Dominique Grand<sup>11,12</sup>), ont clairement démontré que le solaire et l'éolien ne peuvent en aucun cas constituer la panacée en l'absence de possibilité de stockage massif à un coût énergétique raisonnable.

Concrètement, pour la France, l'objectif d'une part des EnR intermittentes de 35% dans la production d'électricité conduirait à des besoins en stockage inter-saisonnier, (que seuls les STEP, *i.e.* Stations de Transfert d'Énergie par Pompage, sont à même de satisfaire), de l'ordre de 15 TWh, ce qui correspond à ... environ 200 fois les capacités actuelles ! Inutile par ailleurs de rêver sur les possibilités qu'offriraient les batteries pour le stockage : 15 TWh cela correspond à

---

<sup>5</sup> David MacKay, <http://www.withouthotair.com/>, UIT Cambridge, 2008

<sup>6</sup> 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

<sup>7</sup> L.M. Martyushev et al., "Maximum entropy production principle in physics", chemistry and biology, Physics Reports 426 (2006)

<sup>8</sup> Carsten Herrmann-Pillath, "Energy, growth, and evolution: Towards a naturalistic ontology of economics", Ecological Economics 119 (2015) 432-442

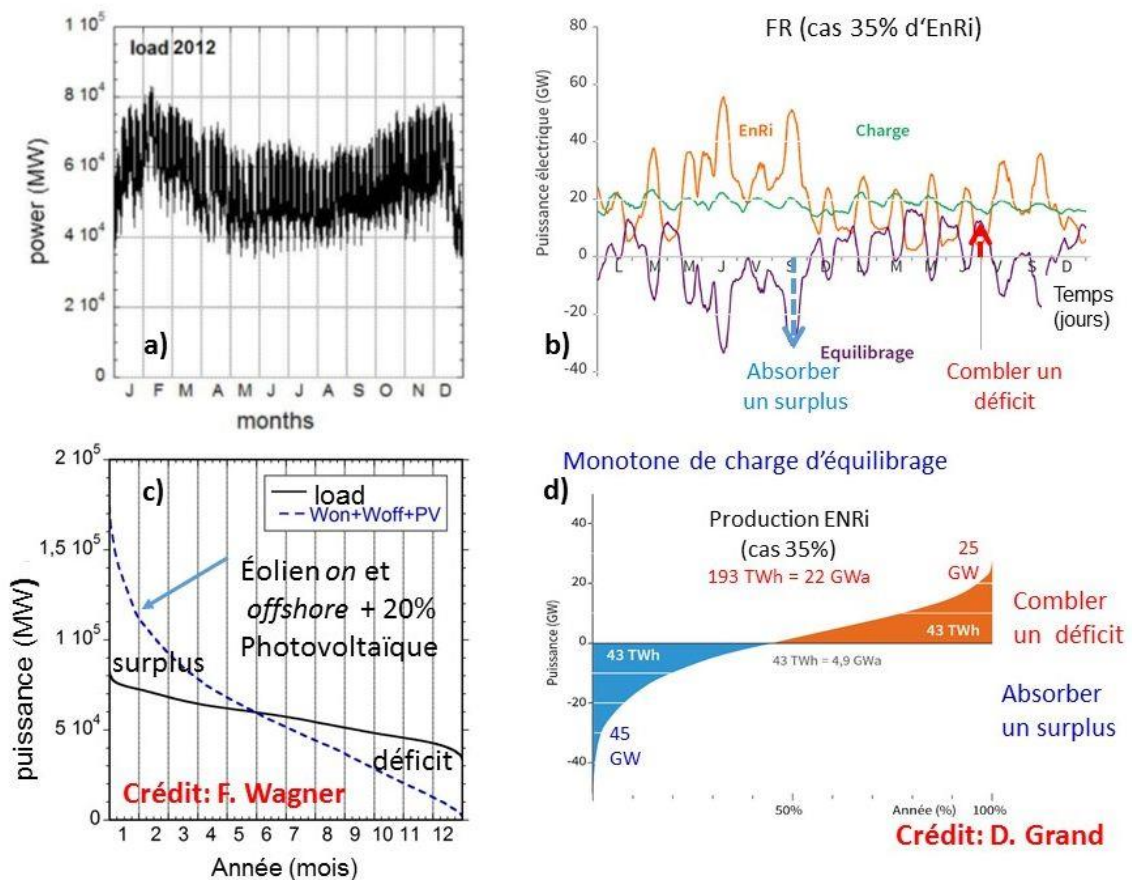
<sup>9</sup> Charles A. S. Hall et al., What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?, Energies 2009, 2, 25-47

<sup>10</sup> Friedrich Wagner, "Electricity by intermittent sources: An analysis based on the German situation 2012", Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 20

<sup>11</sup> Dominique Grand et al., Transition énergétique et mix électrique : ... , La Revue de l'Énergie n° 619 – mai-juin 2014

<sup>12</sup> 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

30 fois le parc mondial actuel et représente 2 Mt de lithium (pour une production mondiale actuelle de 25 000 t). (Il faut 50 millions de voitures électriques équipées d'une batterie de 20 kWh pour faire 1 TWh).



**Figure 3.** La réorganisation sur l'échelle de temps de douze mois des données (a) des fluctuations annuelles de la charge (load) pour former une monotone (cf. ligne continue de (c)), permet de comprendre comment l'intermittence de la production des énergies renouvelables (cf. sur (b) les courbes montrant sur un intervalle de temps de deux semaines les évolutions temporelles simultanées des fluctuations de la demande (charge), de l'offre renouvelable (EnRi), et de l'écart entre ces deux dernières (Equilibrage)), construit au bout d'une année (cf. figure (d) et sur (c) l'écart entre la monotone de charge et la monotone de production des EnR intermittentes, représentée en tireté), à la fois un surplus qu'il faudrait pouvoir stocker et un déficit qui doit impérativement être comblé par un système de back-up.

L'étude de la situation allemande depuis le lancement de la transition énergétique (« Energiewende ») est à cet égard pleine d'enseignements. Les émissions de CO<sub>2</sub>, (qui se situent, par habitant, au double des émissions françaises, cf. Fig. 7), n'ont pratiquement pas baissé malgré un déploiement massif de l'éolien et du solaire photovoltaïque intermittents, simplement à cause de la nécessité de disposer de centrales à combustibles fossiles permettant d'assurer le backup à la place des centrales nucléaires.

En outre la génération intermittente de ces sources non pilotables peut non seulement impacter dangereusement la stabilité des réseaux électriques<sup>13</sup>, (un taux pénétration de 40% est un maximum), mais conduit aussi à produire un énorme surplus impossible à stocker, dans l'état

<sup>13</sup> Marios Zarufakis et al., "Transient Stability of conventional power generating stations during times of high wind penetration", Vorträge auf der DPG Frühjahrstagung in Berlin 2015 (9/2015), Eur. Phys. J. Plus (2017) 132: 289.

actuel des techniques, et qui perturbe gravement le marché et le coût de l'électricité<sup>14</sup>. Quant à imaginer pouvoir adapter la demande à l'offre, il suffit d'observer en France les réactions à l'installation des compteurs Linky !

L'évolution des taxes (CSPE en France, EEG-Umlage en Allemagne) est à cet égard éloquente. Ces taxes visent à compenser l'écart, qui n'a fait que de se creuser depuis leur introduction en 2003, entre le prix garanti de rachat de l'électricité solaire et éolienne et les prix de gros du marché. Cet écart croissant 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. Le montant total de ces taxes, payées par les particuliers, se monte en France (avec environ 2c€/kWh pour la partie renouvelables) et en Allemagne (7c€/kWh) en 2017, respectivement à 5,7 et 25,7 G€.

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.

Compte tenu de leurs piètres performances en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, et de leur impact négatif sur le marché de l'électricité et le coût de cet impact pour les particuliers, les énergies renouvelables intermittentes ne nous permettront pas en Europe d'atteindre les objectifs souhaités et affichés dans les politiques de transition énergétiques.

Plutôt que de se focaliser sur la production d'électricité, il y a beaucoup plus à gagner du côté du chauffage des bâtiments et du secteur des transports qui sont de loin les plus gros contributeurs aux émissions en gaz à effet de serre, en particulier en France où l'électricité est déjà très largement décarbonée.

### **En France, il faut décarboner les transports et surtout la chaleur !**

L'utilisation de chaleur, avec en particulier le chauffage des bâtiments, constitue une part importante des usages finaux de l'énergie. C'est pourquoi la rénovation des immeubles et de l'habitat, en vue de limiter au minimum les déperditions, constitue un enjeu majeur dans la lutte pour la réduction de la consommation et des émissions de gaz à effet de serre.

Compte tenu du fait qu'une partie très importante de ces usages sont à basse température (65% à une température inférieure à 120°C), il ne faut pas négliger une possibilité intéressante de tirer profit pour une fois de l'inévitable production d'entropie dans les processus de conversion d'énergie. En effet, la cogénération d'électricité et de chaleur, qui consiste à récupérer la chaleur fatale, *i.e.* les rejets thermiques, des centrales électriques pour les usages non électriques de l'énergie, chauffage urbain notamment, permettrait de décarboner ces usages au simple prix d'une baisse du rendement de conversion de l'énergie primaire en électricité dans les centrales alimentées en combustibles fossiles ou nucléaire.

La décarbonation des transports devra certainement passer par un recours accru à l'électricité, ce qui conduit à tabler sur une augmentation des usages et des besoins pour cette ressource.

Pour cesser de s'illusionner sur les potentialités offertes par telle ou telle source d'énergie et éviter les biais idéologiques dans l'évaluation et le choix de solutions ou scénarios, **des critères objectifs doivent être définis**. Ceux-ci doivent en particulier prendre en compte : (i) La quantité de CO<sub>2</sub> émise par MWh produit ; (ii) Les surfaces mobilisées par MWh produit ; (iii) Le volume de déchets ultimes produits par MWh ; (iv) L'impact sur la santé par le nombre de malades et de morts par MWh ; (v) Les quantités de ressources immobilisées par unité de puissance installée, et consommées par MWh produit.

---

<sup>14</sup> Jacques Percebois et Stanislas Pommeret, « Coût complet lié à l'injection d'électricité renouvelable intermittente », La Revue de l'Énergie n° 632 – juillet-août 2016, 192-211.

Dans l'application de ces critères, la prise en compte du système complet à mettre en œuvre pour chaque ressource est nécessaire.

Ainsi les énergies éolienne et solaire relèvent-elles 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. C'est justement la raison pour laquelle **les énergies éolienne et solaire sont qualifiées de renouvelables. Mais si leur flux est bien renouvelable, *quid* de leur captation qui nécessite de mobiliser de nombreuses ressources en matériaux<sup>15</sup>, d'autant plus importantes qu'il s'agit d'énergie à faible intensité ?**

Illustrons ce point à l'aide d'un petit exemple de grande actualité : en faisant abstraction de l'important problème, discuté plus haut, de la disponibilité de l'électricité produite, on peut estimer que l'on devrait pour remplacer la production de la centrale nucléaire de Fessenheim, (qui correspond, avec un facteur de charge de l'ordre de 75%, à une puissance effective de 1350 MW), déployer environ 3000 éoliennes de puissance unitaire 2 MW chacune, (en estimant leur facteur de charge à 22,5% ). Pour une seule éolienne il faut mobiliser 150 t d'acier et 400 m<sup>3</sup> de béton, soit pour 3000 éoliennes 150x3000= 450 000 t d'acier et 1,2 million de m<sup>3</sup> de béton, à comparer aux 100 000 t d'acier et 300 000 m<sup>3</sup> de béton d'un réacteur EPR de 1600 MW, soit entre quatre et cinq fois moins. Il n'est pas inutile de poursuivre la comparaison par l'estimation du coût : avec un coût unitaire de ces éoliennes de l'ordre de 2 à 3 millions d'euros, cela conduit pour 3000 éoliennes à un investissement total d'environ ...9 milliards d'euros. Ce coût total ne prend naturellement pas en compte les investissements et ressources nécessaires induits par le caractère intermittent et non pilotable de cette source éolienne.

Prendre en compte le capteur seul pour évaluer les performances et la compétitivité d'une source d'énergie ne suffit pas. 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 évidemment pas que ces transformations se fassent sans consommation ni d'énergie ni de matière, aussi bien pour la mise en œuvre du système lui-même que pour son fonctionnement.

Le taux de retour en énergie ou EROI<sup>16,17,18</sup>, introduit plus haut, mesure quant à lui le rapport entre l'énergie délivrée et l'énergie consommée par le système lui-même. Comme il s'agit d'énergie et non de puissance, le calcul de cette quantité nécessite de faire une analyse de cycle de vie du système énergétique de façon à comptabiliser, sur toute sa durée de vie, l'énergie, ou équivalent en énergie, dépensée sans oublier d'inclure bien sûr les phases de construction et de démantèlement du système.

En dépit d'inévitables marges d'incertitude, mais aussi de l'absence d'un accord unanime sur les définitions et la méthodologie, des bases de données de résultats fiables sont déjà accessibles et riches d'enseignements (cf. Daniel Weißbach<sup>19,20</sup>, des travaux duquel provient le graphique ci-dessous).

---

<sup>15</sup> Olivier Vidal et al., Metals for a low-carbon society, Nature Geoscience 6, (2013) 894-896

<sup>16</sup> Jessica G. Lambert et al., Energy, EROI and quality of life, Energy Policy 64 (2014) 153

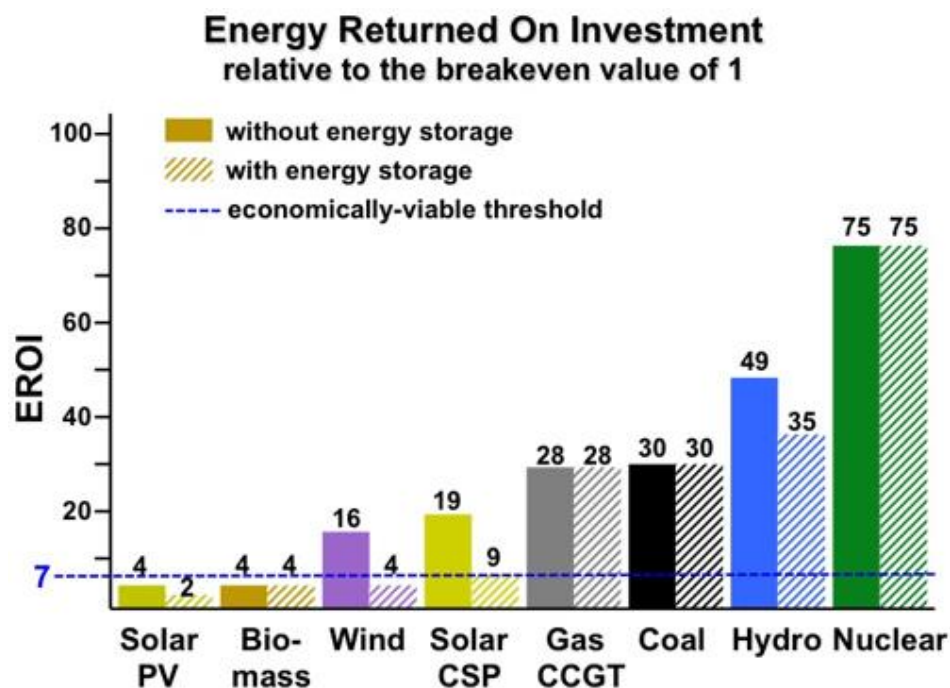
<sup>17</sup> Charles A. S. Hall et al., Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil:..., American Scientist, Vol. 97, 3 (2009) p230

<sup>18</sup> Charles A. S. Hall et al., EROI of different fuels and the implications for society, Energy Policy 64 (2014) 141

<sup>19</sup> D. Weißbach et al., Energy intensities, EROIs, and energy payback times of electricity generating power plants, Energy 52 (2013) 210-221

<sup>20</sup> 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





**Figure 4. Taux de retour en énergie des différentes techniques de production d'électricité<sup>19</sup>**

Si le score record de 100 :1 obtenu par le pétrole au 19<sup>ème</sup> siècle (non représenté sur la figure) n'est pas vraiment surprenant, l'analyse des piètres performances de l'éolien, du solaire et surtout de la biomasse est riche en enseignements. Et pour cette dernière sur laquelle misent un certain nombre de scénarios, rappelons qu'avant la révolution industrielle en Europe 20% des surfaces cultivables étaient consacrées à l'alimentation des chevaux ... C'est bien sa faible intensité énergétique et le danger avéré de compétition avec les cultures vivrières qui limitent sérieusement les espoirs mis dans le développement des agro-carburants, même si la méthanisation des déchets reste une ressource à ne pas négliger.

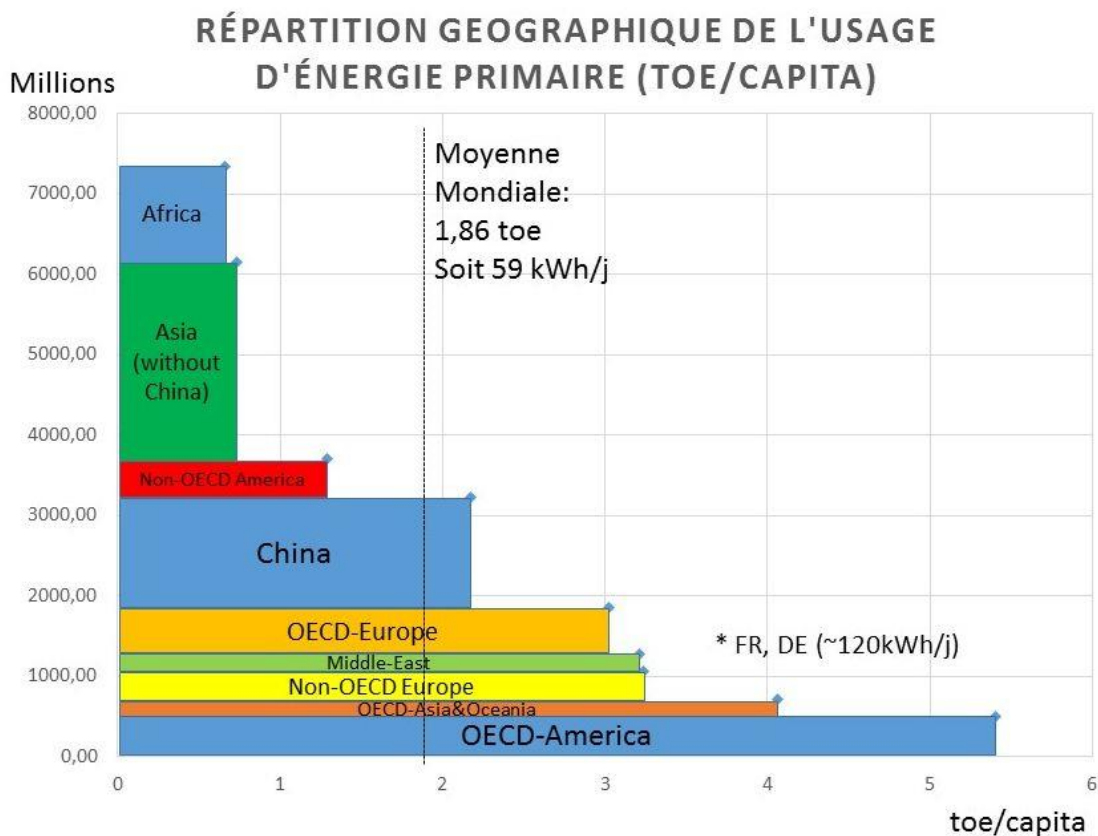
Poussons l'exemple précédent, avec un peu d'arithmétique et en partant de données de base. Un cheval de trait, qui développe une puissance de 600 à 700 W, correspondant à une énergie délivrée d'environ 3 à 6 kWh/jour, absorbe en nourriture de l'ordre de 30 kWh/jour (ce qui signifie un rendement mécanique maximum de 10%). En Europe, où la puissance moyenne récupérable au travers de la biomasse est de l'ordre de 0,5 W/m<sup>2</sup>, on peut collecter annuellement environ 16 MWh/ha, (la révolution agricole du néolithique avait en effet permis d'effectuer le bond considérable d'une collecte annuelle de l'ordre de 1 kWh/ha pour les chasseurs-cueilleurs à environ 3 MWh/ha). Ceci implique qu'environ 0,7 ha est nécessaire pour assurer la nourriture d'un cheval de trait. Il est utile de comparer cette surface agricole à celle qui devrait être mobilisée pour produire du biocarburant destiné à un seul véhicule automobile. En faisant l'hypothèse d'une utilisation correspondant en moyenne à 40 km/jour, et de là d'un besoin en carburant de l'ordre de 1500 litres/an, on aboutit à une surface de l'ordre d'un hectare. Précisons que la totalité des surfaces agricoles en France se monte à 28 millions d'hectares.

Certaines ressources, pourtant incapables d'offrir une solution généralisable à grande échelle, ne sont cependant pas à négliger pour des utilisations locales. Ce peut être le cas pour la production de chaleur, par exemple avec le solaire thermique, ou pour la production d'électricité dans des régions dépourvues de réseau de distribution, mais il ne faut pas perdre de vue que le problème des ressources, de l'énergie et de la décarbonation est un problème mondial, dans un contexte démographique qui doit impérativement être pris en compte.

Il est indispensable pour véritablement comprendre les enjeux d'observer plus en détails l'évolution historique et la répartition régionale de la consommation et des usages de l'énergie dans le monde.

En se basant sur les données fournies par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA, <http://www.iea.org/>), on observe (cf. figure 5) que la consommation annuelle moyenne en énergie primaire se monte actuellement à environ 1,9 tep<sup>21</sup>/hab (soit 60 kWh/jour), ce qui correspond à environ la moitié de la consommation européenne par tête. Cependant l'examen de la répartition régionale fait apparaître sans surprise de profonds écarts. Ainsi environ une moitié de la population mondiale doit encore se contenter d'un approvisionnement en énergie correspondant à seulement un tiers de la valeur moyenne, soit par personne environ 20 kWh/jour, c'est-à-dire une quantité inférieure à celle dont disposait les européens à l'époque médiévale.

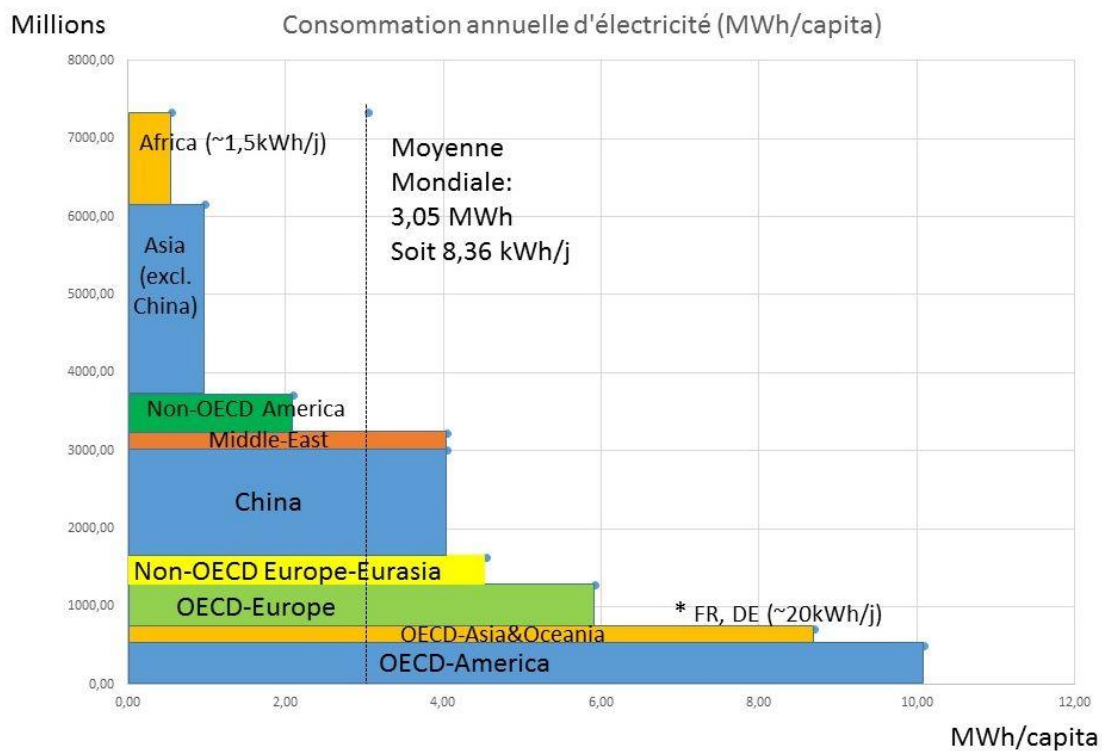
Pour ce qui concerne la consommation d'électricité (cf. figure 6) les écarts sont naturellement encore plus grands.



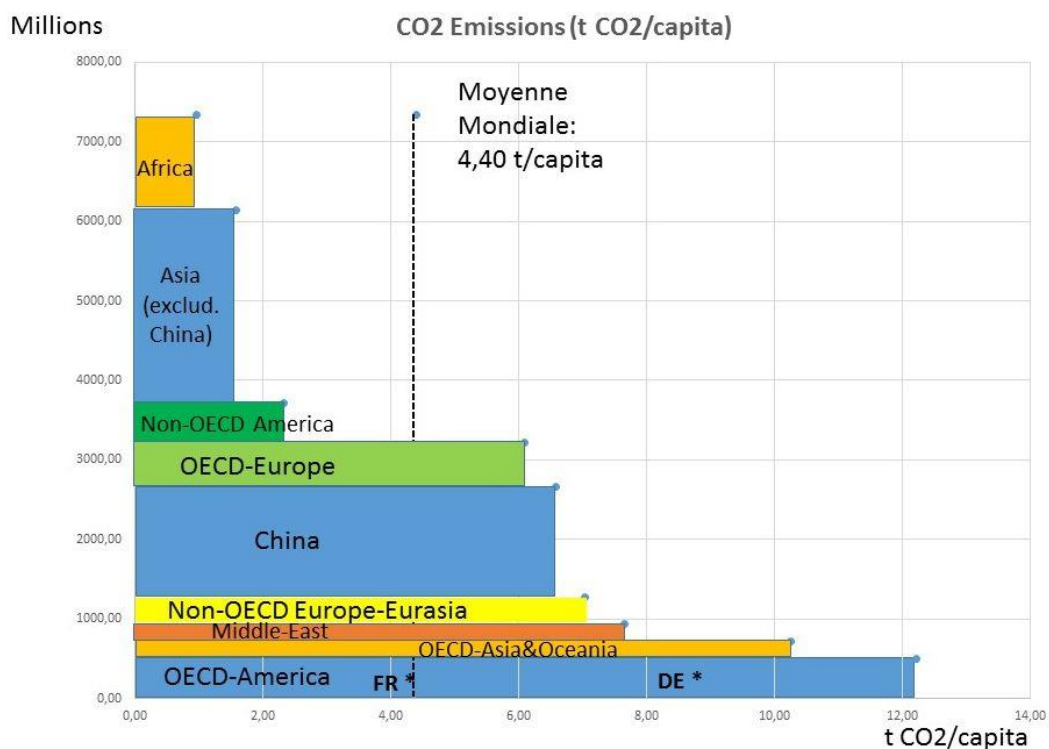
**Figure 5. Répartitions par régions du monde, (à partir des données de l'IEA pour l'année 2015) de la quantité annuelle d'énergie primaire utilisée par habitant**

<sup>21</sup> 1 tep (ou tonne équivalent pétrole, toe en anglais) représente une énergie de 11630 MWh.

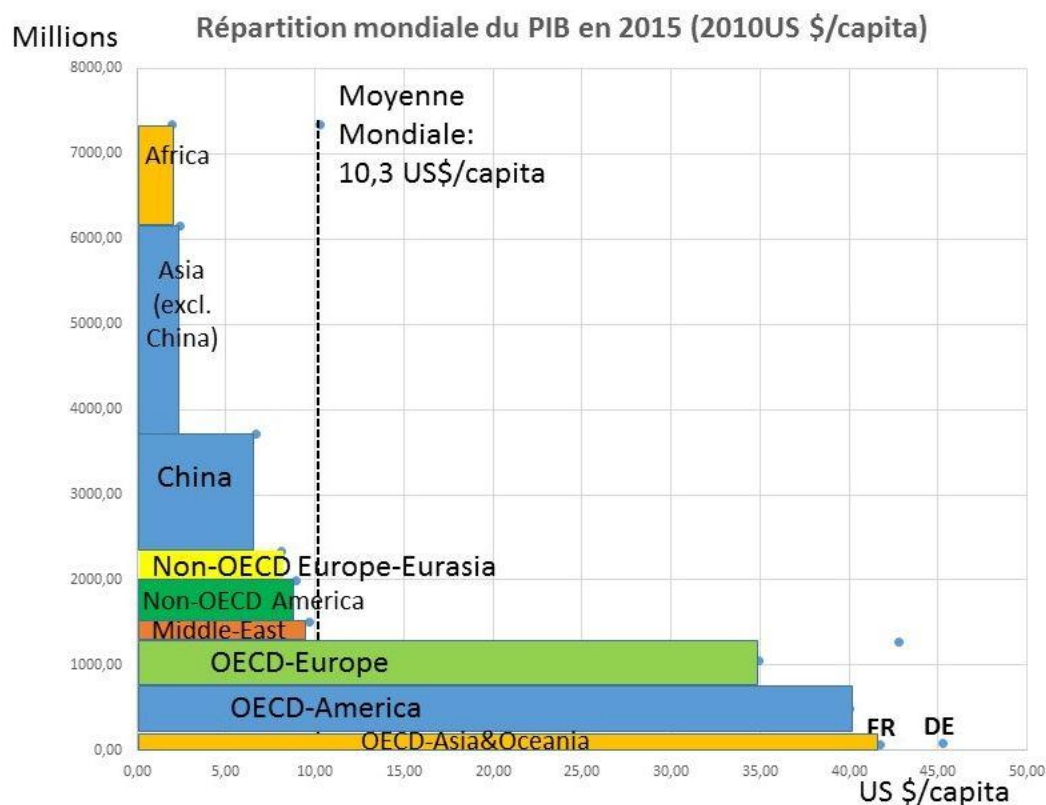




**Figure 6. Répartitions par régions du monde, (à partir des données de l'IEA pour l'année 2015) de la quantité annuelle d'électricité consommée par habitant.**



**Figure 7. Répartitions par régions du monde, (à partir des données de l'IEA pour l'année 2015) des émissions de CO<sub>2</sub> par habitant.**



**Figure 8. Répartitions par régions du monde, (à partir des données de l'IEA pour l'année 2015) du PIB par habitant.**

Compte tenu des énormes besoins, Il n'existe donc pas de solution miracle, qui permettrait à la fois d'écarter les risques climatiques et de sortir du nucléaire. Rien n'est plus faux et plus dangereux que de prétendre, comme on l'entend trop souvent, que ce ne sont plus ni la technique ni la viabilité économique qui bloquent, mais la volonté politique. L'effort en R&D est plus que jamais nécessaire.

Alors que la maîtrise de l'agriculture au néolithique d'abord, puis l'utilisation des ressources fossiles à partir du 19<sup>ème</sup> siècle ont permis deux changements majeurs d'ordres de grandeur dans l'utilisation de l'énergie par les sociétés humaines, l'humanité aujourd'hui confrontée aux limites des ressources et aux menaces du réchauffement climatique n'est-elle pas dans une impasse ?

Pour éviter la décroissance et l'effondrement de nos sociétés, peut-on miser sur un nucléaire du futur devenu une source d'énergie propre et socialement acceptable ? Que peut-on espérer des réacteurs nucléaires dits de 4<sup>ème</sup> génération<sup>22,23</sup>, en particulier ceux à sels fondus, sur le cycle du Thorium ? Sans parler à plus long terme des espoirs portés par la fusion thermonucléaire ...

Nancy, décembre 2017

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

Professeur émérite à l'Université de Lorraine

Président de la commission énergie/environnement de la Société Française de Physique

<sup>22</sup> Armin Huke et al., The Dual Fluid Reactor - A novel concept for a fast nuclear reactor of high efficiency, Annals of Nuclear Energy. 80 (2015), S. 225–235

<sup>23</sup> John Gilleland et al., The Traveling Wave Reactor: Design and Development, Engineering 2 (2016) 88–96