

Renouvelables, nucléaire : quels rôles dans les scénarios ?

Gérard Bonhomme

Professeur émérite à l'Université de Lorraine

Président de la Commission Énergie de la Société Française de Physique
(<https://www.sfpnet.fr/commission/energie-et-environnement>)

Membre du groupe énergie de l'EPS (<https://www.eps.org/#/>)

gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr

Résumé

La crise du gaz russe doit nous obliger à regarder en face, sans œillères idéologiques, la réalité de notre approvisionnement énergétique.

La sortie des combustibles fossiles nécessitera un recours massif à l'électricité, mais il faut compter avec les particularités de cette source d'énergie et avec la difficulté d'électrification de certains usages impliquant de grosses consommations de chaleur.

Les différents scénarios de transition énergétique reposent tous sur des hypothèses dont la pertinence et la cohérence doivent être discutées rationnellement et avec objectivité.

En France les scénarios s'appuyant sur la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) postulent ainsi à la fois une baisse très importante de la consommation finale d'énergie, une augmentation notable de la part de l'électricité, mais en imposant une réduction de la contribution du nucléaire.

Les hypothèses faites et la distribution de rôles prévues dans les scénarios sont-elles vraiment compatibles avec le "Happy End" de la neutralité carbone atteinte en 2050 ?

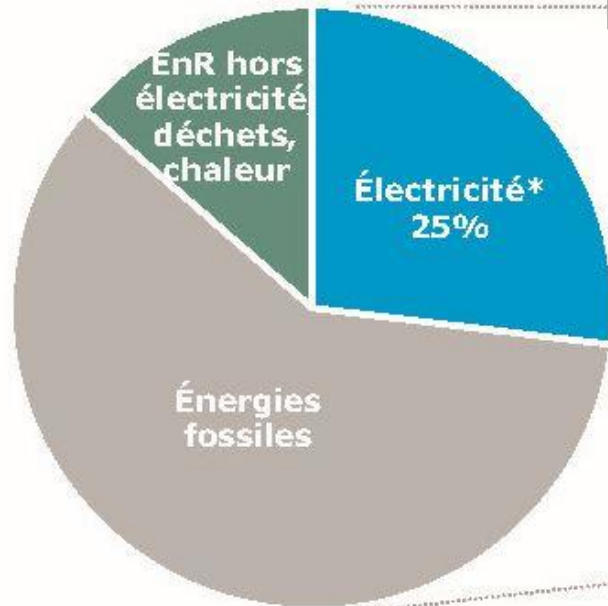
Scénarios énergétiques

- Pléthore de scénarios !!!
 - ✓ Scénario mondial de l'IEA → NZE-2050
 - ✓ Scénario UE → REPowerEU: une énergie abordable, sûre et durable pour l'Europe ...
 - ✓ Scénarios pour la France :
 - ❖ 6 RTE, 4 ADEME +
 - ❖ ONGs (Négawatt, Negatep (Sauvons Le Climat), Shift project, TerraWater (Voix du nucléaire)) ... **EnRs vs. Nucléaire ?**
- Quel but ?, Pourquoi 6 RTE et 4 ADEME ?, **Pour qui ?**
- Quelles **hypothèses** de départ ?
 - ✓ Quelle consommation finale ?
 - ✓ Quelle part pour l'électricité ?
 - ✓ Quelle stratégie de décarbonisation ?

Les scénarios RTE: Energie finale et SNBC

Aujourd'hui

1 600 TWh
d'énergie consommée



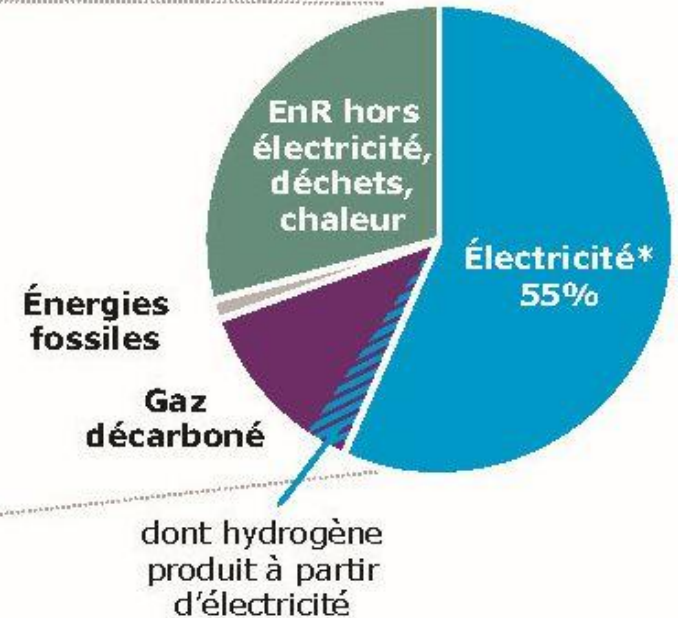
Tous les scénarios RTE sont fondés sur la stratégie nationale bas carbone

-40%



2050

930 TWh
d'énergie consommée



* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène (!?)
Consommation intérieure d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

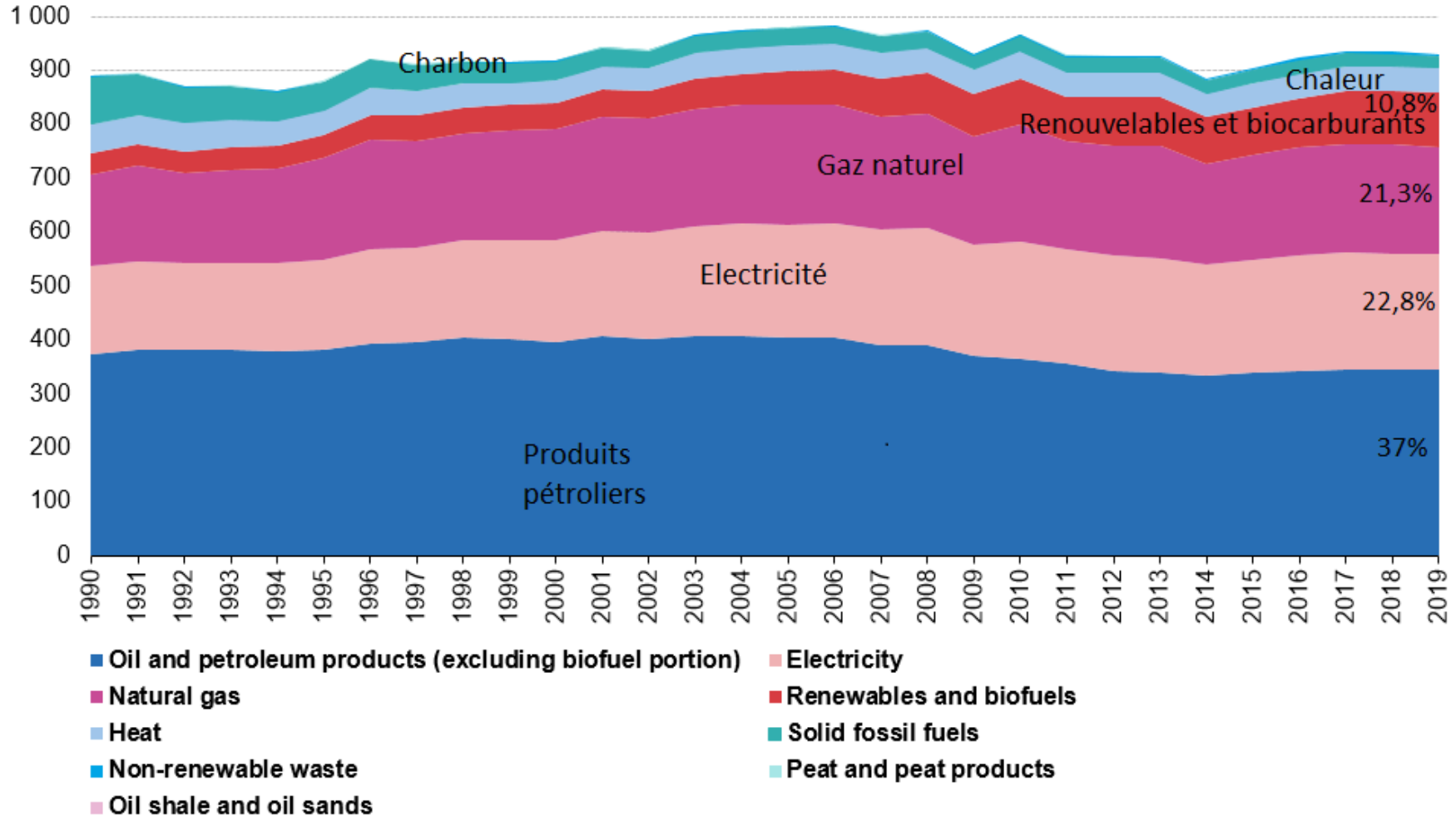
Retour vers le réel : *Enjeux et défis de la décarbonisation*

- Combien d'énergie consommons-nous aujourd'hui ? combien hier ? à partir de quelles ressources ? et pour quels usages ?
- Sommes-nous condamnés à consommer autant ? Existe-t-il un seuil ?
- *Quid* de l'efficacité et de la sobriété énergétique ?

Consommation d'énergie finale (UE)

**2019: Total 13 500 TWh
électricité > 3 000 TWh**

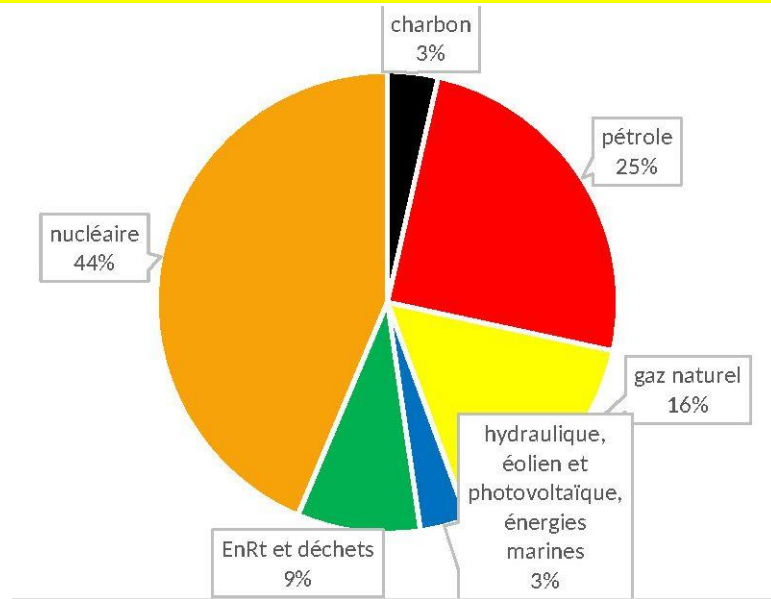
Final energy consumption by fuel, EU, 1990-2019
(million tonnes of oil equivalent)



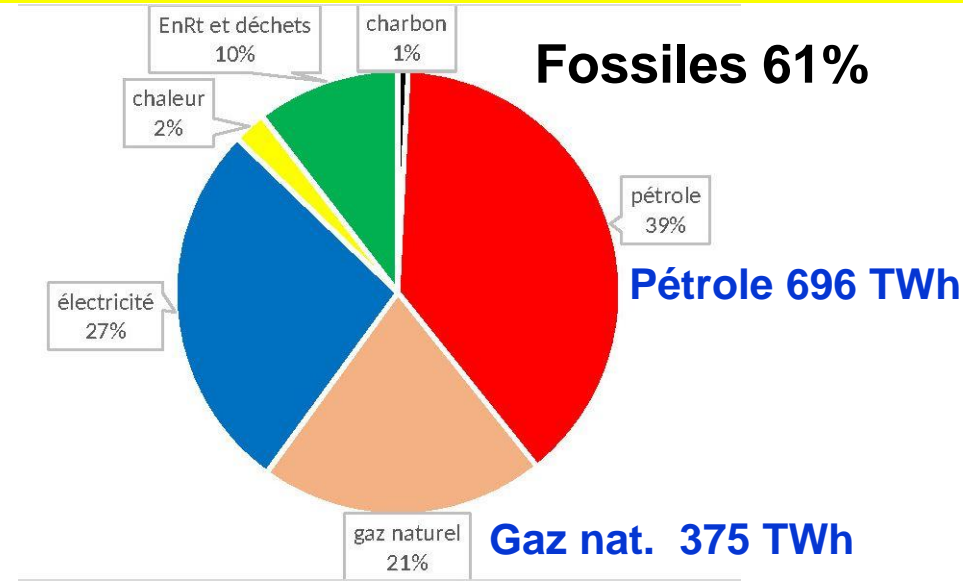
Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_c)

eurostat

Rappels: consommation d'énergie en France



Energie primaire en 2016: 232,4 Mtep
2700 TWh

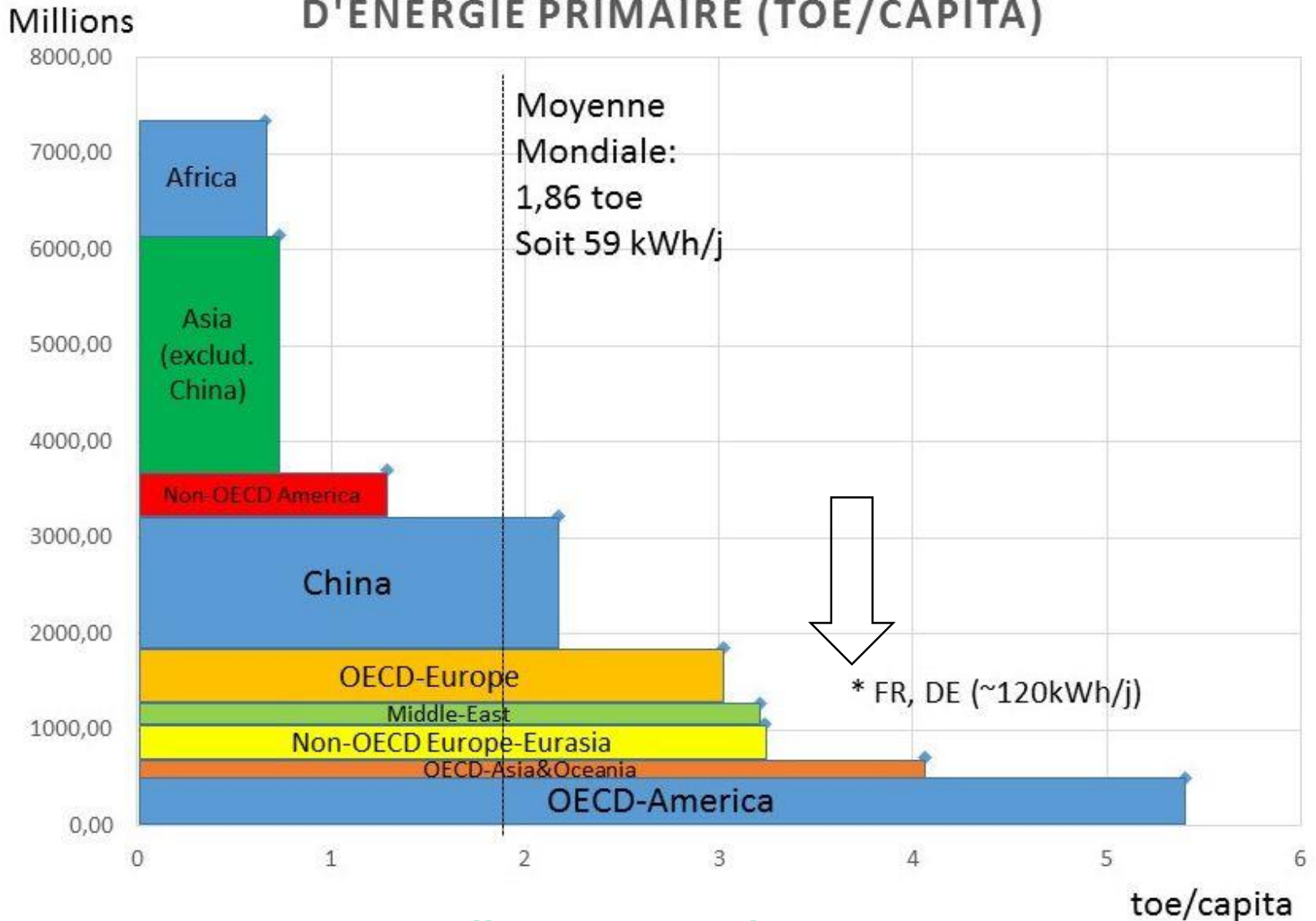


Energie finale en 2016: 153,4 Mtep
1784 TWh

Chaleur : ~ 45% de l'énergie finale (50 % résid., 20% services, et 30% industrie) ;
Dont : > 60° Fossiles et > 20% biomasse

- **43 % : Usages liés aux bâtiments** : particuliers (résidentiel 27%) ou par des entreprises (tertiaire 16%) : chauffage, cuisson, réfrigération, éclairage, équipements.
- **29 % : Mobilité** et transport de marchandise
- **17% : Industrie** : les fours, les procédés, etc.
- **3% : Agriculture** (machines agricoles, chauffage des serres, etc.)
- **9 % : Ressources** comme matière première (ex. pétrole → plastique, engrais, ...)

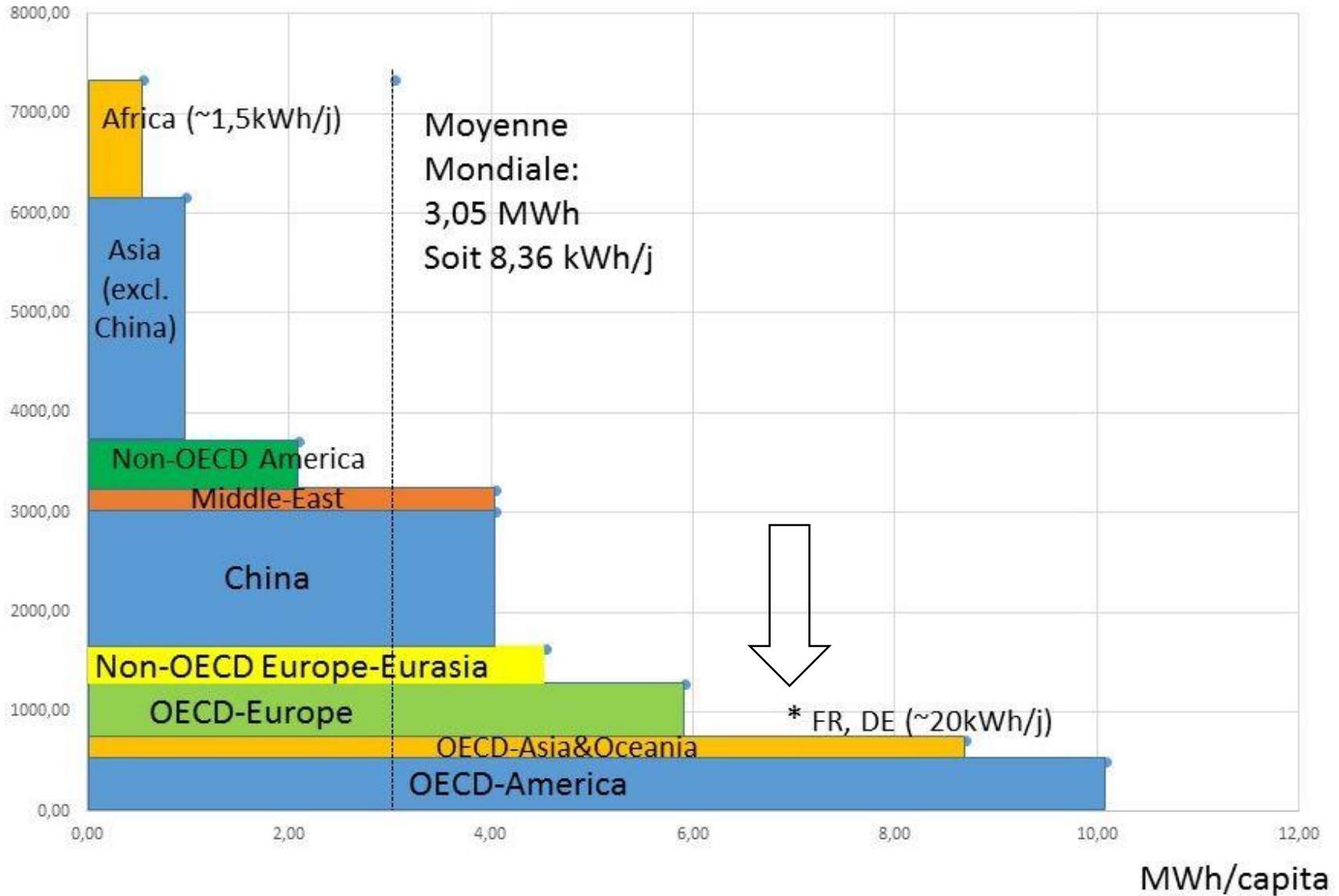
RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE L'USAGE D'ÉNERGIE PRIMAIRE (TOE/CAPITA)



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

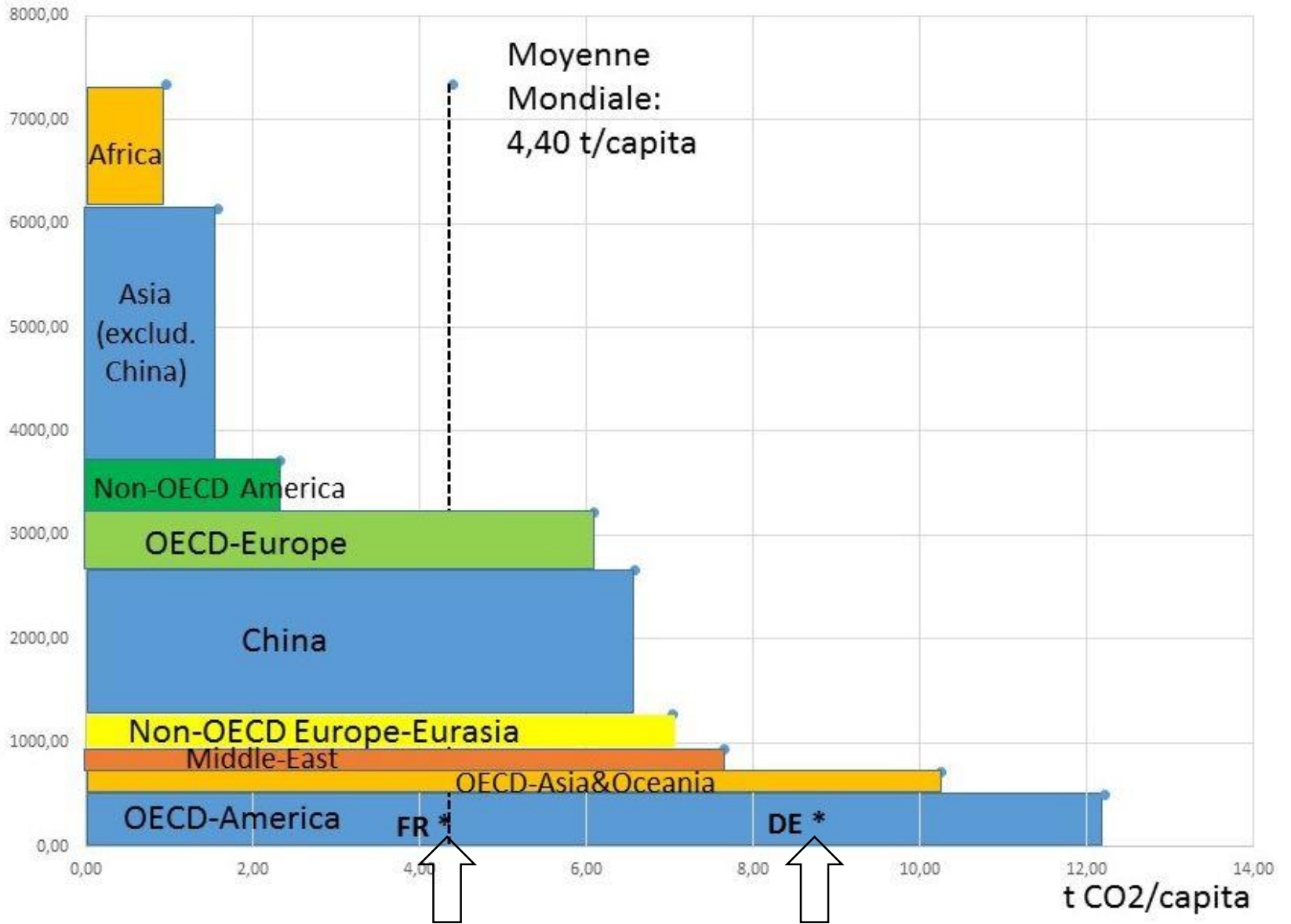
Millions

Consommation annuelle d'électricité (MWh/capita)



Millions

CO2 Emissions (t CO2/capita)



Premiers constats

- **Poids colossal des énergies fossiles** dans la consommation d'énergie. Environ **80% de l'énergie primaire** au niveau mondial, et **plus de 60% de l'énergie finale en Europe** .
- Principaux postes de consommation : résidentiel / tertiaire et l'industrie, **essentiellement sous forme de chaleur (~ 45% de l'énergie finale)**, et transports.
- En Europe la consommation des ménages représente au maximum **1/3** de la consommation totale.
- Pour atteindre l'objectif zéro carbone, il faut prioritairement **décarboner la chaleur et les transports**.
- Recours accru à l'électricité (décarbonée) nécessaire.
- Particularisme français : électricité déjà décarbonée. Ce n'est pas le cas général en Europe.
- Interrogation : **pourquoi alors se focaliser sur l'électricité ?**

Dissipation d'énergie vs. complexité

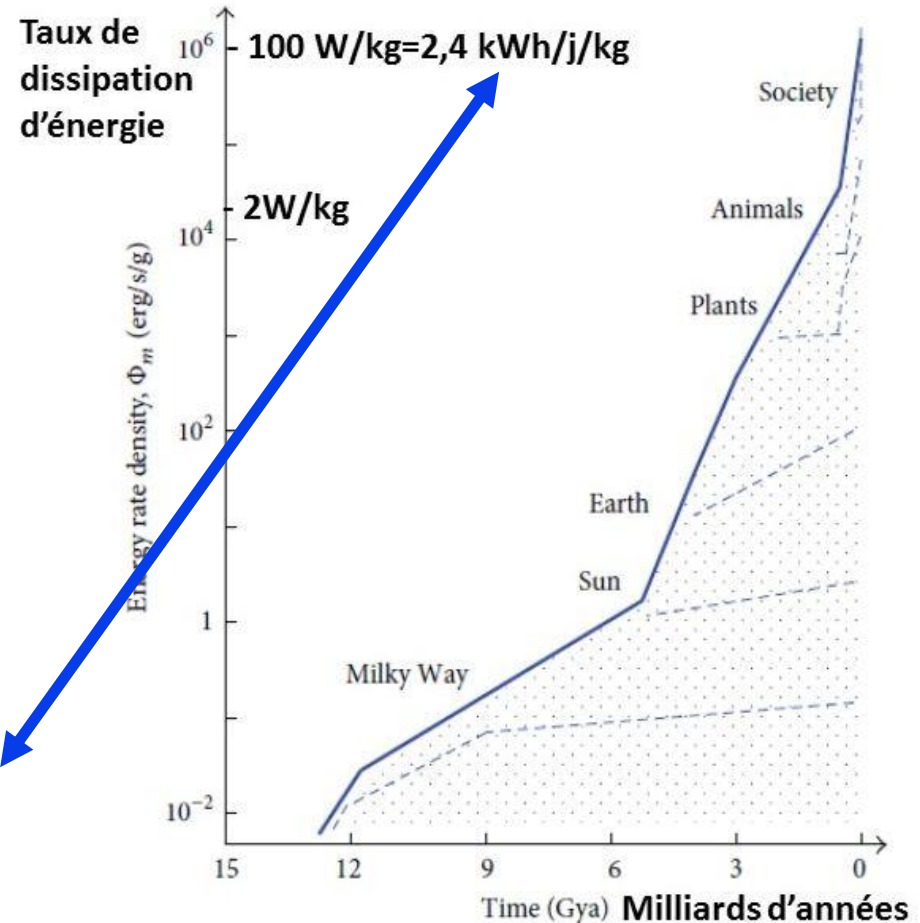
La quantité d'énergie dissipée par unité de masse mesure de l'évolution de la complexité dans notre univers.

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: 120 kWh/j/pers

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

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

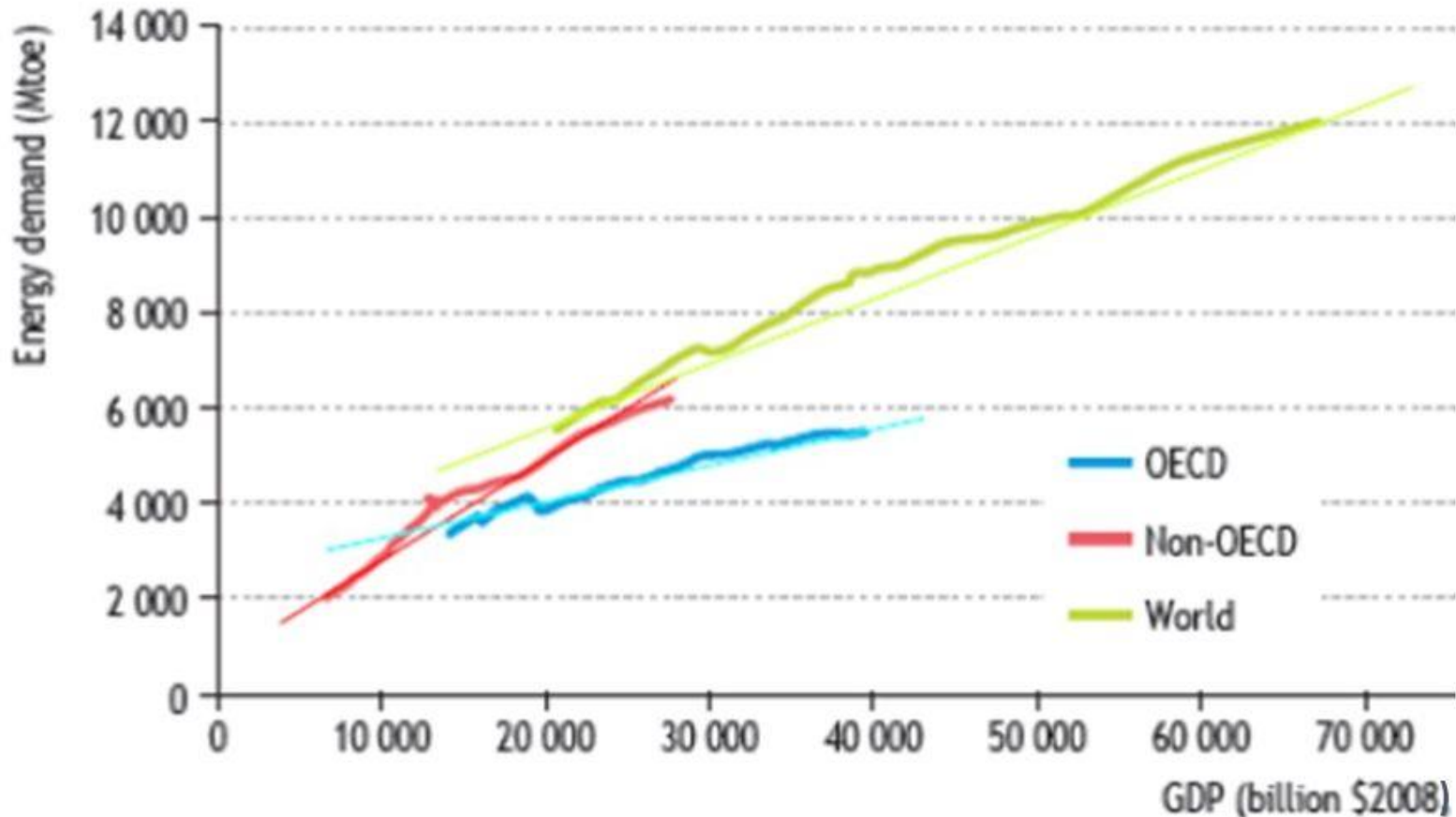


Eric J. Chaisson, The Scientific World Journal

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

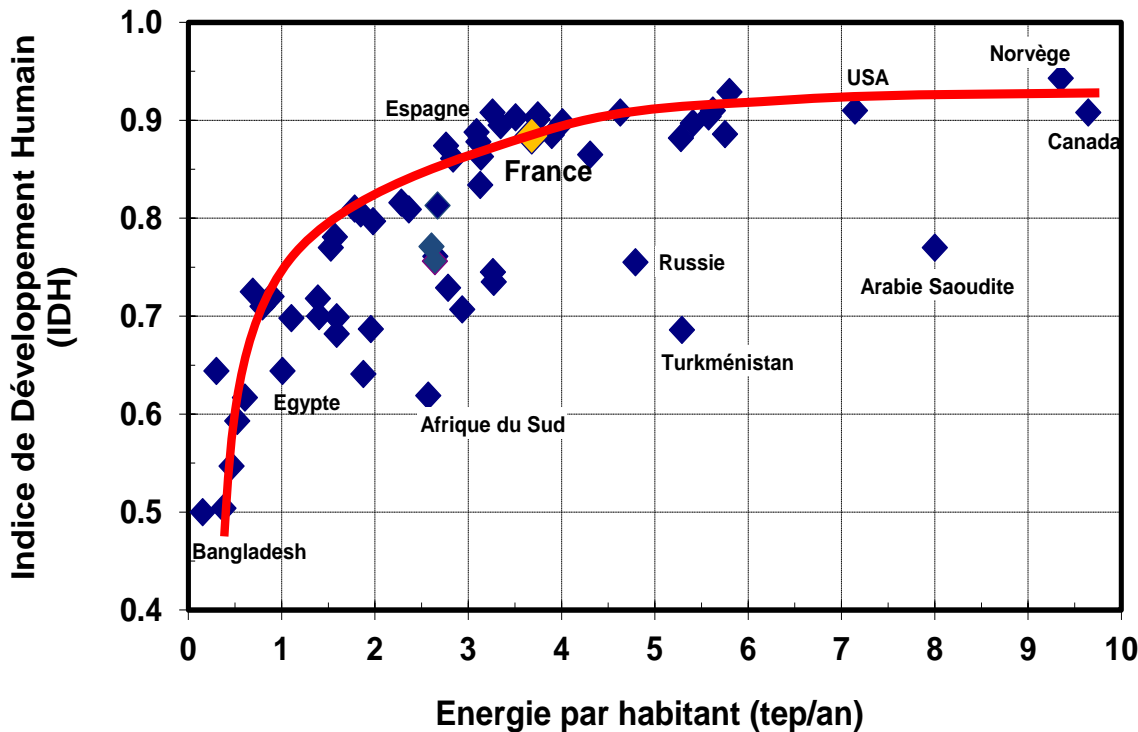
PIB et consommation d'énergie : Qu'observe t-on ?

Énergie primaire et PIB, 1971-2007



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

Indice de Développement Humain



Le IDH*, introduit par le PNUD (Programme des Nations unies pour le développement), combine trois indicateurs : santé/espérance de vie, niveau d'éducation, niveau de vie. Cf. Amartya Sen (Prix Nobel d'économie) and Mahbub ul Haq (économiste pakistanais)

Crédit : G. Bonhomme & Henri Safa

Indice de développement humain en fonction de la consommation d'énergie exprimée en tep/an (1 tep = 11.63 MWh)

- Seuil en énergie à partir de 1.5 tep/an, (~ 50 kWh/jour/hab.)
- Effet de saturation au-dessus de 4 tep/ an (130 kWh/j/hab.)

* <http://www.hdr.undp.org/en/content/human-development-index-hdi>

Economie, société et énergie

Réalité incontournable, (mais encore loin d'être reconnue par tous) → la prospérité et le développement économique dépendent étroitement de **l'énergie, des ressources minérales et de leurs transformations**

Il n'existe aucun substitut !

Croire que nous pourrions **concilier maintien** d'une société organisée et structurée du local au global, prospère, équitable, offrant une égalité d'accès à des services publics de soins, d'éducation, et **réduction drastique** de la consommation d'énergie et de ressources, est une **dangereuse illusion**.

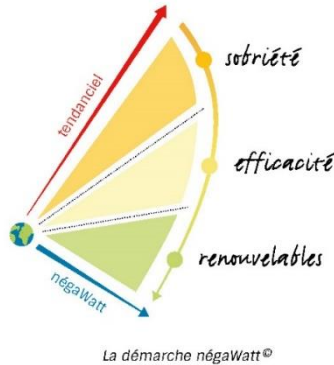
→ Il faut **admettre les limites de la sobriété ... surtout avec 8 milliards d'humains**

indépendamment de la question du système politique !

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

Ces 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*
- Grâce à la sobriété et des progrès dans l'efficacité énergétique, elles peuvent suffire !



- **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 ..., Jeremy Rifkin ("Le new deal vert mondial", 2019), ... sans oublier E.F. Schumacher ("Small is beautiful", 1974).

→ **Examinons les faits ... sans parti pris !**

Les renouvelables électrogènes : solaire PV, éolien

L'électrification de nouveaux usages est indispensable pour nous libérer de l'addiction aux combustibles fossiles, mais :

- Comment **décarboner la consommation de chaleur** ?
- Quelle incidence sur les besoins en électricité ?
- Quel est le **potentiel réellement accessible des énergies de flux ou renouvelables**, (en premier lieu le solaire photovoltaïque et l'éolien) ?
- Quelles sont les contraintes en termes de gestion de **réseau électrique** ? Quels besoins en **stockage** ?
- Quel impact sur la consommation en **ressources minérales** ?

Les Renouvelables électrogènes pour sortir des fossiles ?

- Consommation actuelle d'énergie finale en Europe (en 2019 : énergie finale 13500 TWh, électricité 3330 TWh ; 1,14 hab/ha → **40 MWh/ha/an**
 - Actualités :
 - 'énorme' projet éolien UE en mer du Nord → 150 GW, 15 à 20000 turbines, soit de quoi produire ~ 550 TWh d'électricité → 10 Mt H₂ (**350TWh**) soit consommation H₂ UE actuelle hors énergie (industrie chimique, ammoniacque, engrais, etc.)
 - Consommation UE de fossiles = **15 000 TWh ! (dont gaz 4000 TWh et ... importations russes ~ 3500 TWh !)** !!!
 - La France 'accélère' sur les renouvelables :
 - Inauguration du 1^{er} parc éolien off-shore, 80 turbines de chacune 6 MW, 480 MW, 78 km², soit de quoi produire ~ 1,75 TWh/an
 - Objectif à terme 40 GW, soit une production de ~ 140 TWh
- Question : **quid** de l'objectif 100% renouvelables ?
- Autres questions : **Pilotabilité ? Stockage ?**

100% de renouvelables en France ?

En 2019, consommation d'énergie finale 1900 TWh, soit par habitant 30 MWh/an (80 kWh/jour). Rapporté à la surface → ~ 55 MWh/ha/an

- ✓ Production éolienne : 31 TWh (17 GW terrestre, ~ 8000 turbines, 0,3%)
- ✓ Production solaire PV : 12 TWh (10 GWc)
- ✓ Biomasse : environ 160 TWh (8,5% énergie finale), solide 105 TWh, déchets 14 TWh, biocarburants 27 TWh et biogaz 15 TWh (élec 2,5TWh)

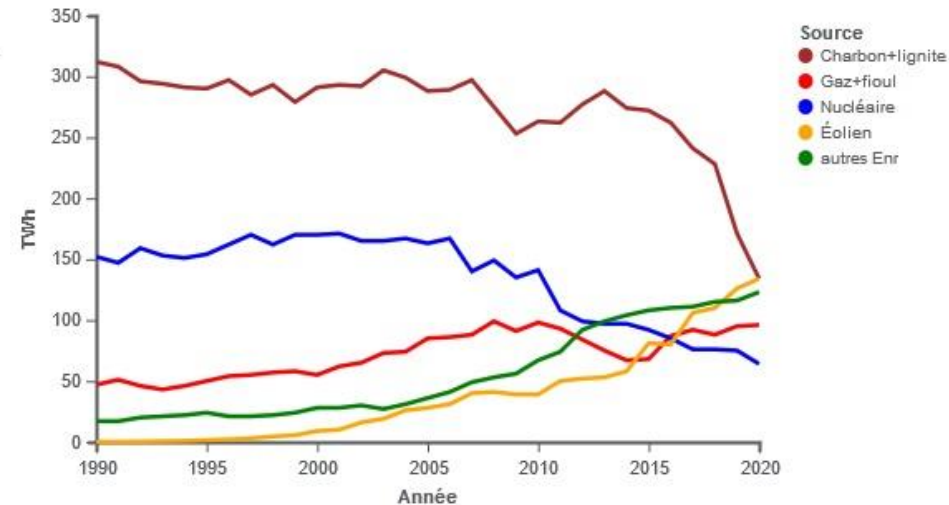
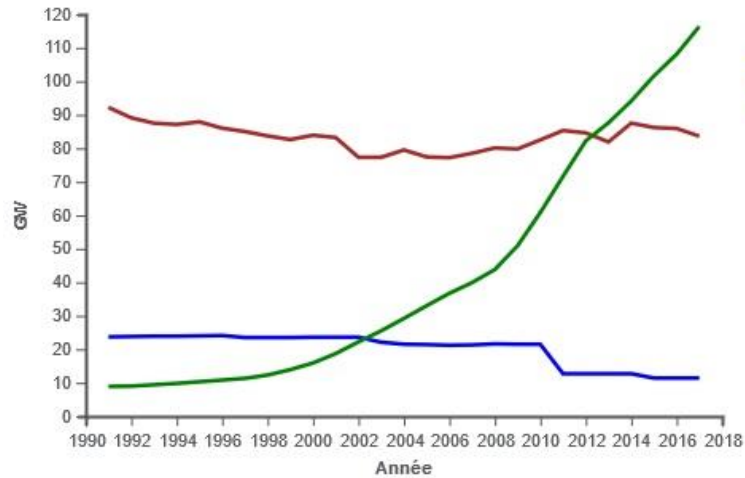
→ Objectifs 2050

- ✓ éolien terrestre (~ 10 MW/km², 200 MWh/ha) 37 GW → **75 TWh**
- ✓ **éolien en mer : 50 parcs, 40 GW → 140 TWh**
- ✓ solaire PV (10 GWc, 12 TWh en 2019), 100 GWc → 125 TWh
(potentiel max. estimé à 200 TWh pour ~ 160 GWc)
- ✓ **Total EnR électrogènes → (340 - 415 TWh) ~ 350 TWh**
(consommations finales actuelles : électr. 450 TWh, gaz nat. 400 TWh, produits pétroliers 600 TWh)
- ✓ La biomasse : x2 ?? (70% transports), biogaz 35TWh → ~ 250 TWh ?

→ Total renouvelables ~ 600 TWh ?

Gestion de l'intermittence des EnR électriques: l'exemple Allemand

Évolution des puissances installées ... et des productions depuis 1990



Forte croissance des EnR (capacité x10), nucléaire → 0, mais capacité thermique à flamme invariable ~ 90 GW :

→ l'adaptation nécessaire à la demande à tout instant → back-up indispensable (thermique à flamme ou nucléaire → double système

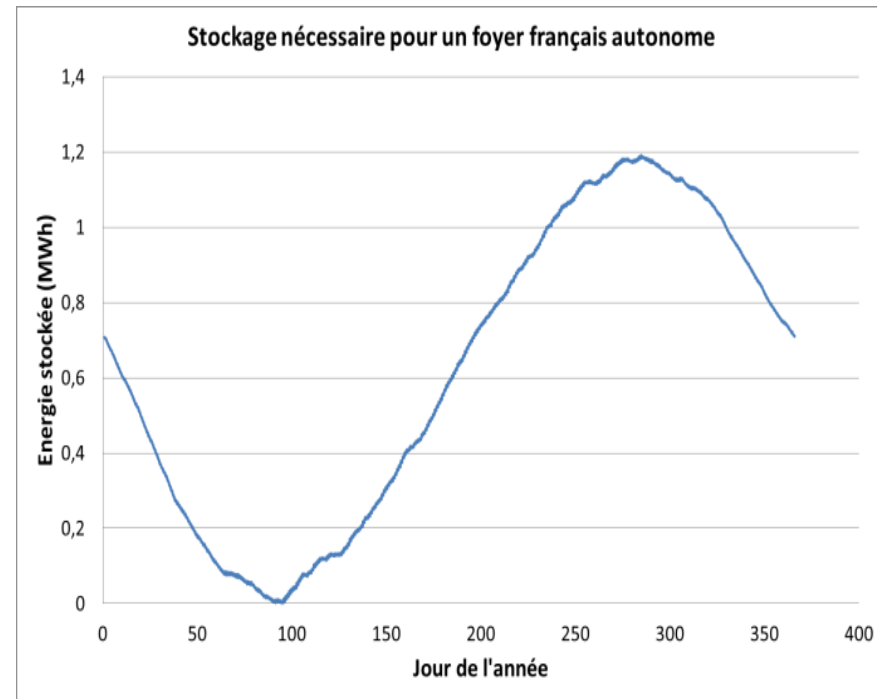
Capacité EnRi X10 ...mais Puissance pilotable invariable ~ 90 GW !

Auto-consommation ?

Example: evaluation of individual storage needs associated with photovoltaic panels

Foyer français moyen → 4,7 MWh/an électricité, (mais totale 28 MWh/an/hab)
→ Panneaux PV 3 kWc 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.

→ Pour 1 MWh de stockage il faut ~ 50 batteries de voiture (40 kWh nominal) !
10 tonnes de batteries, local, etc...



Crédit: J. Percebois & S. Pommeret

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

Le problème crucial du stockage de l'énergie électrique

- **Le réseau électrique doit être à chaque instant en équilibre entre demande et offre** (sinon variation de fréquence et risque de black-out)
- **Besoins en stockage intersaisonnier** pour 35% EnR en France ~ 15 TWh, et pour 100% EnR ~ 90 TWh (**cf. M. Fontecave & D. Grand**)
- **Les batteries ?**
 - Énergie contenue dans toutes les batteries du monde, toutes espèces confondues → 1 TWh !!!!
 - Informations sur le projet RINGO de RTE : <https://www.rte-france.com/projets/stockage-electricite-ringo#Leprojet>
~ 100 MWh de stockage de l'électricité (sur 3 sites)
- **Les STEP ?** Aujourd'hui 5 GW, 7 TWh ...
- **L'hydrogène ?**

L'hydrogène, composante essentielle de la Transition Énergétique ?

Trois objectifs affichés dans les plans hydrogène :

- Production d'hydrogène décarboné pour les usages industriels non énergétiques
- Développer les usages énergétiques de l'hydrogène
- Faciliter l'intégration des renouvelables dans le mix électrique

Quelles priorités ? (si l'on vise une réduction drastique des émissions de CO₂ et la neutralité carbone en 2050)

Objectif 3 → le vrai débat : Gaz naturel ou nucléaire !

3. Faciliter l'intégration des renouvelables dans le mix électrique

Petit exercice : Imaginons un **réseau électrique 100% EnRi**, et **trois jours** d'hiver sans vent ni soleil → il faut fournir de l'électricité au réseau avec de l'hydrogène (**stockage intersaisonnier**) soit ~ **5 TWh**.

Combien de H₂ ? Quelle puissance ?

Réponse : Cela représente une puissance de $5000 \text{ GWh} / (3 \times 24 \text{ h}) = \mathbf{70 \text{ GW}}$

→ **puissance pilotable nécessaire (RTE → Puissance de pointe moyenne = 94,3 GW)**

Avec 70 centrales à cycle combiné gaz de 1 GW, ça consommerait en gros $150\,000 \text{ t H}_2 / 0.6 = \mathbf{250\,000 \text{ tonnes de H}_2}$ (1 Mt H₂ ~ 35 TWh PCI)

convertibles en électricité (rendement de l'ordre de 60% dans un cycle combiné). **La durée de l'interruption n'intervient pas !** (débit total d'énergie cst = puissance totale).

100% EnRi chimère car **double système nécessaire avec backup pilotable**

(cf. exemple allemand) → **gaz fossile ou nucléaire !**

Coûts, enjeux et défis

- **Défi majeur = Rendre l'électrolyse compétitive pour produire l'hydrogène :**
 - les électrolyseurs doivent fonctionner à pleine charge toute l'année
 - assurer pour l'industrie une production régulière et continue
 - le système électrique doit être en mesure de délivrer l'énorme quantité d'électricité nécessaire

Conclusions sur la filière hydrogène

→ Hydrogène et 100% EnRi impossible en Europe

Intermittence, potentiel totalement insuffisant pour satisfaire la forte augmentation de production électrique

Rappel UE (2019) : énergie finale 13 500 TWh, électricité 3330 TWh, EnRi 650 TWh

• Piste la plus prometteuse → l'électrolyse à haute température couplée à des réacteurs nucléaires (→ quatrième génération à haute température) :

✓ réacteurs à sels fondus ; réacteurs VHTR refroidis à l'hélium

→ R & D indispensable

Le vrai débat: importations massives ou nucléaire !

Question à Frans Timmermans

(à la suite de son intervention à Nancy le 9 mars 2022, transmise à son cabinet le 10 mars, mais restée sans réponse ...)

Alors qu'à juste titre vous avez pointé l'impérieuse nécessité pour les européens de reconquérir leur souveraineté également dans le domaine de l'approvisionnement énergétique, **d'où tirez-vous cette conviction que les sources renouvelables nous permettront à elles seules d'atteindre à terme cet objectif ? La baisse des coûts (avérée) du kWh d'électricité issue de sources renouvelables (PV notamment) est le seul argument que vous avez avancé.**

Mais ***quid* du potentiel réellement disponible sur notre territoire européen ?**

Sera-t-il vraiment suffisant pour nous libérer du gaz naturel, du pétrole ... et du nucléaire, au-delà d'une phase que vous imaginez transitoire, et atteindre l'indispensable objectif de neutralité carbone grâce à nos seules ressources ?

....

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 :

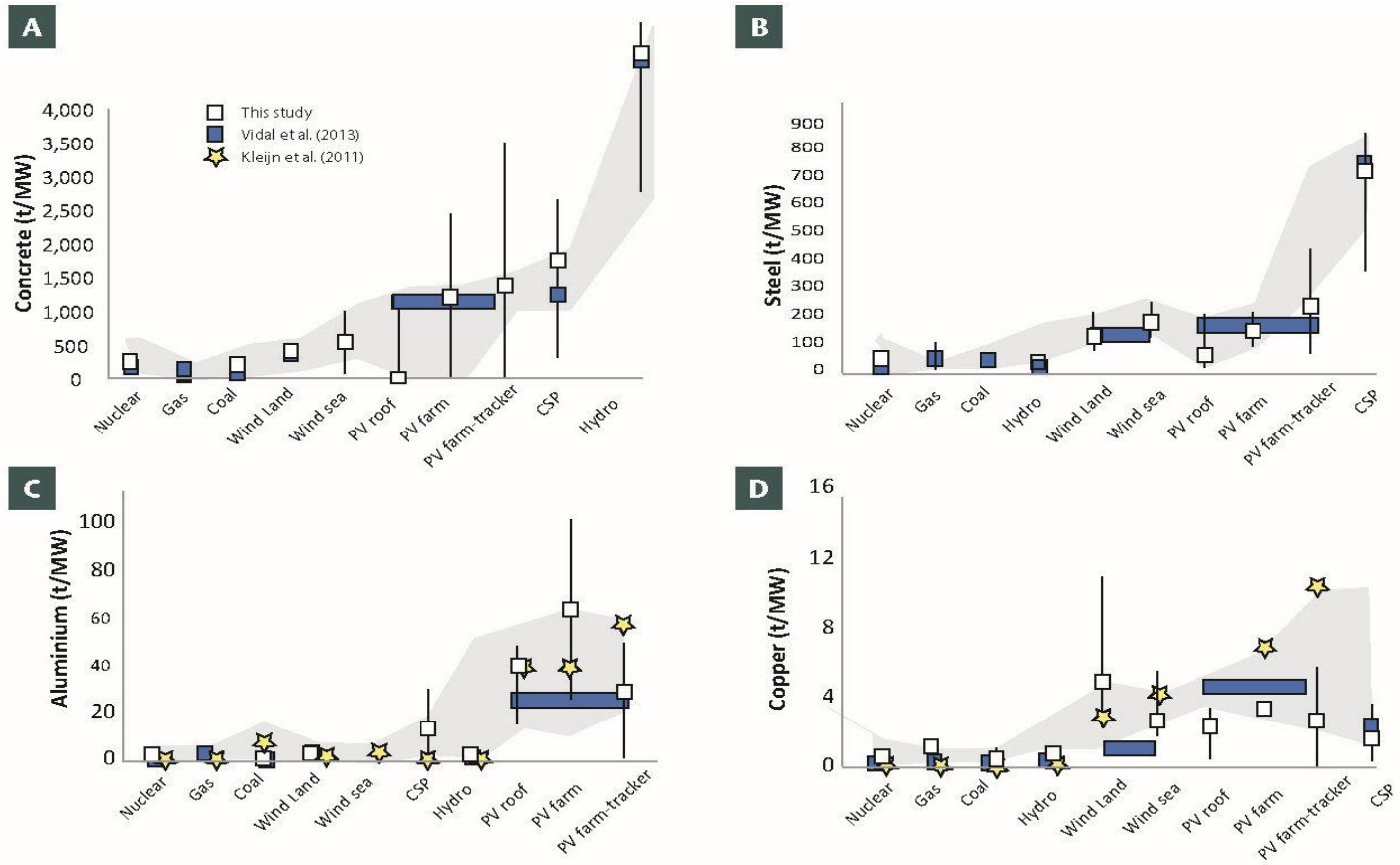
- (i) La quantité de CO₂ émise par MWh produit ;
- (ii) Les surfaces mobilisées par MWh produit et le réel potentiel accessible ;
- (iii) Le volume de déchets ultimes produits par MWh ;
- (iv) Le nombre de malades et de morts par MWh ;
- (v) Les quantités de ressources immobilisées par MW installé, et consommées par MWh ;
- (vi) Le taux de retour en énergie MWh par MWh → EROI**

le problème des ressources minérales

- Un petit exemple : Fessenheim vs. Éoliennes
 - ✓ Centrale de Fessenheim: puissance 1800 MW pour une production annuelle d'électricité correspondant à un facteur de charge de 95% --> $1800 \times 0,95 \sim 1700 \text{ MW}$ produisant environ 15 TWh
 - ✓ Pour la même production d'électricité, il faudrait avec des éoliennes de 2 MW chacune, (facteur de charge de 21%) --> $1700 / (2 \times 0,21) =$ environ **4000 éoliennes**
- Pour une seule éolienne il faut mobiliser ~ 150 t d'acier et 400 m^3 de béton, soit pour 4000 éoliennes $150 \times 4000 = 600\,000$ tonnes d'acier et 1,6 million de m^3 de béton, à comparer aux 100 000 tonnes d'acier et 300 000 m^3 de béton d'un réacteur EPR de 1600 MW (\sim cinq à six fois moins) → **Pb des ressources à mobiliser pour capter les énergies de flux**

le problème des ressources minérales

Attention!
Ramenée à l'énergie produite ... et consommée (t/MWh), les écarts sont encore plus grands !



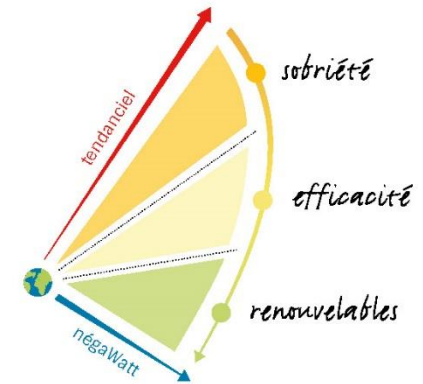
Masse de matériau brut par mégawatt (t/MW) [crédit: O. Vidal]

- **Crainte:** accaparement de toutes les ressources minérales disponibles sur la planète pour opérer leur transition énergétique vers EnR (solaire PV et éolien), peu efficaces chez nous, en privant les pays les plus pauvres de ces précieuses ressources pour leur propre développement.

Première conclusion

Accepter les limites de l'approche :
Sobriété, efficacité, renouvelables

→ **chimère !!!**



La démarche négaWatt®

→ « trilemme » du conseil mondial de l'énergie (cf. <https://www.worldenergy.org>)

1. Sécurité = capacité à répondre à la demande et aux risques de rupture d'approvisionnement
2. Équité d'accès pour tous aux ressources énergétiques
3. Durabilité = impact environnemental minimum

Le nucléaire est incontournable

Le nucléaire n'est pas le problème, (ni un mal transitoire), mais **la seule solution d'avenir** pour assurer décarbonisation, souveraineté énergétique, maintien de nos industries, voire ... réindustrialisation

Assumons les **limites du schéma sobriété-efficacité-EnR**

Reconnaissons les **incohérences de la loi TECV de 2015 !**

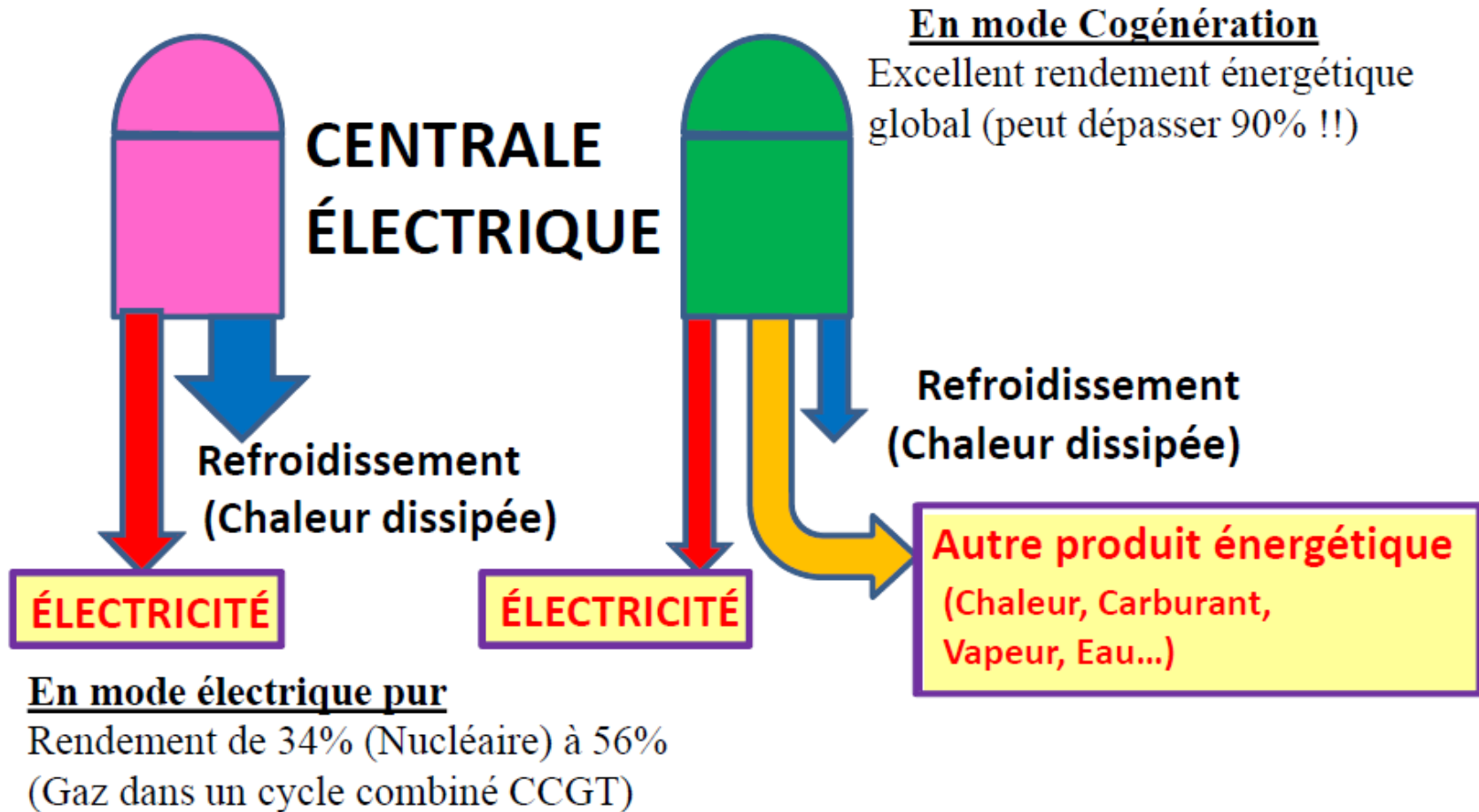
→ plus d'électricité et plus de nucléaire → **nucléaire en base** (électricité + chaleur par **cogénération** → **SMR (Small Modular Reactors au lieu de Steam Methane Reforming !)** et **EnRi là où utile et compétitif**

→ Ne pas oublier les énormes besoins en énergie et ressources pour le développement de plus de la moitié de l'humanité.

Réacteurs nucléaires de Génération IV

- **Atouts incontestables sur la gestion des matières fissiles (valorisation de l'uranium et du plutonium)**
- **Fermeture du cycle du combustible. Le parc fonctionne sans nouveau besoin en uranium naturel**
- **En France, se pose le problème de la PPE (jusqu'en 2028), alors que de gros efforts en R&D sont nécessaires**
- **Les RNR de quatrième génération faciliteraient grandement la gestion des déchets, en brûlant les plus gênants, i.e. les actinides mineurs à très longue durée de vie, ne laissant que les produits de fission.**
- **Un parc de RNR seul capable de fournir de l'énergie sur des milliers d'années**

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



Point clé: le réseau de transport ($>100\text{km}$)

Crédit: Henri Safa

Résumé

- Sans le renouvellement, puis l'extension de notre parc électronucléaire et le déploiement de réacteurs de quatrième génération il ne sera pas possible de faire face à la demande en énergie, tout en garantissant
 - ✓ Sécurité d'approvisionnement (autonomie énergétique)
 - ✓ Pilotabilité,
 - ✓ Impact minimum sur l'environnement
- De gros efforts en R&D sont encore nécessaires pour porter à la maturité industrielle les filières à neutrons rapides pertinentes

Retour sur les scénarios

- Le scénario Negawatt
- Les six scénarios RTE (mix-électrique) :
M0, M1, M23, (sortie du nucléaire) et N1, N2, N03
- Les quatre scénarios de l'ADEME
- Le scénario du PTEF du Shift Project
- Les scénarios Negatep (sauvons le climat)
- Le scénario TerraWater (Les voix du nucléaire)

Il faut lire attentivement le rapport RTE !! ... et ses 18 enseignements

- **Le rapport souligne bien la nécessité d'un développement important des énergies éolienne et solaire, mais :**
 - ✓ (Page 57) : (enseignement n°17), que "**La logique consistant à renforcer la capacité de production d'électricité bas-carbone (logique additive « renouvelables + nucléaire ») est celle qui présente le meilleur bilan climatique de court/moyen terme et donc celle qui est la plus à même de permettre l'atteinte des objectifs climatiques en 2030.**
 - A contrario, les scénarios prévoyant une substitution rapide des renouvelables au nucléaire réduisent le potentiel de production décarbonée. [...]"**

- (Enseignement n°8) **La question de la gestion de l'intermittence :**
 - ✓ **cruciale pour les scénarios à forte part de renouvelable, à cause du problème des sources pilotables indispensables à maintenir.**
 - ✓ **Quelle que soit cette part, et a fortiori avec 100% de renouvelable, la capacité pilotable reste invariable**
 - ✓ **le facteur de charge d'une source intermittente n'a aucun impact sur la puissance pilotable requise pour assurer l'approvisionnement et l'équilibre du réseau (tout écart de puissance entre production et demande entraîne en réaction une variation de fréquence autour des 50Hz, qui doit être impérativement contenue).
Cela peut seulement modifier la production annuelle, (ce qui n'est certes pas négligeable).**

- **La question du choix des scénarios pour la comparaison:**

- ✓ Avec le scénario M23 la sortie du nucléaire n'est pas effective en 2050, ce qui permet de disposer encore de 16 GW de capacité pilotable.
- ✓ Le scénario N2 n'est pas le plus ambitieux sur le plan du renouveau nucléaire.
- ✓ La comparaison la plus pertinente devrait être entre M0 et N03. Le rapport RTE indique déjà entre N2 et M23 un écart annuel de l'ordre d'une dizaine de milliards ... (dû essentiellement aux coûts induits par la gestion de la flexibilité),.
- ✓ Un point essentiel est celui des prérequis technologiques et industriels et incertitudes liées à chaque scénario bien détaillées dans **l'enseignement n°11, page 43 du rapport.**

Conclusions 1/3

- L'étroit couplage entre prospérité économique (PIB), qualité de la vie (**HDI**) et consommation d'énergie est incontestable.
- Avec une population mondiale comptant aujourd'hui 8 milliards d'humains, dont la moitié doit se contenter de 20 kWh/jour, soit le tiers de la consommation moyenne par habitant, **il est illusoire de compter sur une décroissance globale de la consommation pour atteindre la neutralité carbone.**
- 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 ~121 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 doit être donnée aux renouvelables thermiques** (Réseaux de chaleur, PACs, solaire thermique), 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, et à neutrons rapides), puis réacteurs 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 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 dystopies ... et ne les nourrissons pas !
- Des efforts majeurs en R&D sont absolument nécessaires.

Quelques liens à suivre ...

- http://www.centrale-energie.fr/spip/IMG/pdf/flash_centrales_energies_83-gerard_bonhomme-5.pdf
- <http://www.centrale-energie.fr/spip/spip.php?article379>
- https://drive.google.com/file/d/1qOnLrfTo79KnXlb_jpUINDpq2zR0-He_/view
- <https://emerites.blogspot.com/2021/05/les-articles-des-emerites-16-aout-2021.html>
- <https://theconversation.com/debat-lhydrogene-produit-par-les-seules-renouvelables-ni-possible-ni-durable-148663>
- <https://www.sfpnet.fr/avis-de-la-sfp-sur-la-programmation-pluriannuelle-de-l-energie-fevrier-2020>
- <https://www.sfpnet.fr/avis-de-la-sfp-sur-la-5eme-edition-du-plan-national-de-gestion-des-matieres-et-dechets-radioactifs-pngmdr>

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 (débit) 1 kW = 24 kWh/j
- Relations utiles :**
 - 1 baril de pétrole (159 l, ~ 0.136 tonne) → 1632 kWh, 1 l de pétrole → ~ 10kWh
 - 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]

Scénarios énergétiques et énergies renouvelables

Énergies	FR 2019	FR 2050 RTE 100%	FR 2050 Scenarior + raison.	DE 2019	DE 2045 Agora Energie Wende	UE 2019	UE 2050 Estim. et pot. EnR (EROI).	Monde 2019	Monde Scénario NZE-2050 AIE	Monde Estim. et potentiel EnRi (EROI)
Energie Finale et primaire	1800 TWh 2800 TWh	900 TWh	1400 TWh	2800 TWh 3800 TWh	1600 TWh	13500 TWh 19 000 TWh	12000 TWh	120 000 TWh 166 600 TWh	95 600 TWh 151 000 TWh h	180 000 TWh 240 000 TWh
Solaire PV	12 TWh 10 GWc	135 TWh (130 GWc)	100 TWh (90 GWc)	46,4 TWh 47,5 GWc)	355 TWh (385 GWc)	132 TWh (134 GWc)	(EROI>9) 0 ! (EROI>4) 2780 TWh	730 TWh (630 GWc)	X 20 23 500 TWh (14500 GW)	(EROI>9) 51 000 TWh
Éolien onshore	31 (17 GW)	195 TWh (95 GW)	90 TWh (45 GW)	101 TWh (53 GW)	309 TWh (145 GW)	320 TWh	880 TWh (EROI>12)	Total éolien 1430 TWh (700 GW)	X 11 24 800 TWh (8300 GW)	(EROI>12) 13 600
Éolien offshore	0	220 TWh (60 GW)	90 TWh (25 GW)	24,7 (8 GW)	252 TWh (70 GW)	60 TWh (12 GW)	2420 TWh (40 GW)			(EROI>12) 13 900
Total EnRi	43 TWh	550 TWh (285 GW)	280 TWh (160 GW)	172 TWh	825 TWh (555 GW)	512 TWh (250 GW)	3300 TWh (EROI>12)	2160 TWh	62 000 TWh (22800 GW)	Pot.max estimé 78 500 TWh 15 000 TWh
Biomasse	7,7 TWh	40 TWh	20 TWh	44 TWh	50 TWh	140 TWh		500 TWh	27800 TWh	
Hydraulique	60 TWh	60 TWh	60 TWh		21 TWh	380 TWh		4300 TWh	8500 TWh	
Total EnR	51 TWh	650 TWh (320 GW)	360 TWh	216 TWh	890 TWh	1000 TWh	<6000 TWh	~7000 TWh	90 000 TWh	22 000 TWh
Nucléaire	380 TWh (61,3 GW)	0 TWh	???	75 TWh (11,4 GW)	0 TWh	750 TWh (110 GW)	???	2700 TWh	5500 TWh (812 GW)	???
Electricité	480 TWh	650 TWh + 40 (H2)	730 TWh +550 (H2)	570 TWh	1000 TWh + 550 (H2)	3330 TWh	6000 TWh+ 2500 (H2)	27 000 TWh	71 200 TWh	73 000 TWh
Total Cons. Fossiles Biomasse	1200 TWh 166 TWh		400 TWh	3100 TWh		15000 TWh (élec. 1200) 1600 TWh	4000 TWh	135 000 TWh (81% éner. primaire) 15 000 TWh	33 200 TWh (22%) et 528 Mt H2 equiv	

**Sans
décroissance
drastique et
irréaliste de la
consommation
d'énergie
finale, il est
impossible de
se contenter
des seules
renouvelables.**

*** Consom. Primaire et électrique moyennes mondiales : 2019 : 60 kWh/j/hab et 10 kWh/j/hab. pour 7,35 milliards
2050 : 66kWh/j/hab. et 20 kWh/j/hab. pour 10 milliards**

E. Dupont, R. Koppelaar, H. Jeanmart, "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints", Applied Energy 257 (2020) 113968. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>)

E. Dupont, R. Koppelaar, H. Jeanmart, "Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints", Applied Energy 209 (2018) 322-338. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>)

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

Fortes Déclarations !

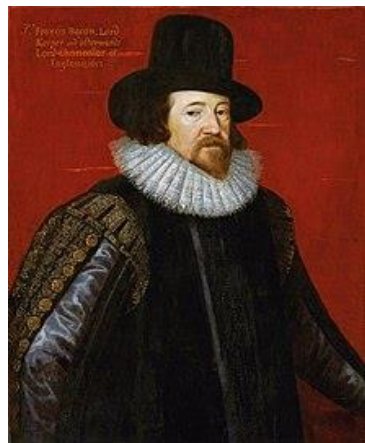
- „Mit Energieeffizienz, Erneuerbaren Energien und dem konsequenten Einstieg in die Kreislaufwirtschaft können wir fossile Energieimporte dauerhaft ersetzen und bezahlbare Energiepreise sichern“, **sagt Simon Müller, Direktor Deutschland von Agora Energiewende.**
(<https://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/article/49859/agora-energiewende-wie-deutschland-gestarkt-aus-der-fossilen-energiekrise-kommt>)
- « **Le Monde** » (31/10/2022) : **Amory Lovins**, scientifique (?) : « Vladimir Poutine vient de faire exploser l'ère des énergies fossiles ». « **Solar is soft, nuclear is hard in the lexicon of Amory Lovins.** (Friends of the Earth's 1976, <https://rmi.org/insight/energy-strategy-the-road-not-taken/>).
- ... repris par **Corine Lepage** (tribune du 18/11/2022 : « **Le nucléaire est l'une des énergies les plus coûteuses** »),
« A terme, les scénarios de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ou de RTE, fondés exclusivement sur les énergies renouvelables à partir de 2050, devraient être les choix les plus rationnels à effectuer. »



„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* »

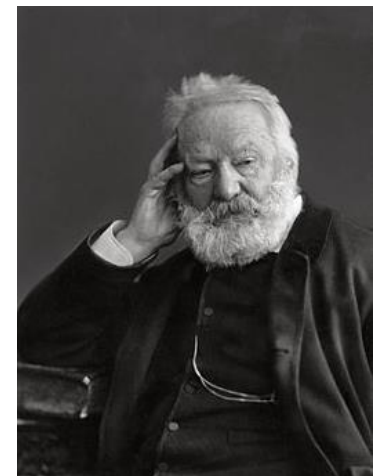


“On ne commande la nature qu'en lui obéissant.” **Francis Bacon** (1561-1626) “*Natura non nisi parendo vincitur*”

“...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”.

« *Quel est le plus grand péril de la situation actuelle ?*

L'ignorance, l'ignorance plus encore que la misère... C'est à la faveur de l'ignorance que certaines doctrines fatales passent de l'esprit impitoyable des théoriciens dans le cerveau confus des multitudes... Le jour où l'ignorance disparaîtrait, les sophismes s'évanouiraient ». **Victor Hugo** (Discours devant l'Assemblée nationale - 11 novembre 1848)



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 !