

Renoncer aux combustibles fossiles, une nécessité, mais quel défi !

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

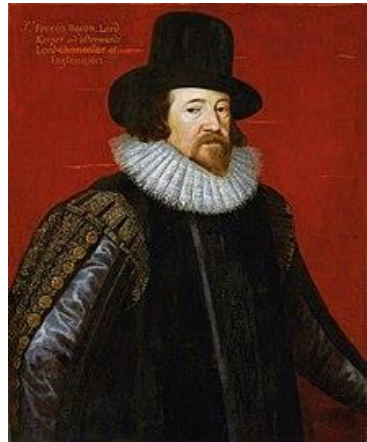
- Atteindre l'objectif de la neutralité carbone en 2050 imposera une réduction drastique de notre consommation de combustibles fossiles, qui représentent pourtant aujourd'hui notre source d'énergie principale.
- L'électrification de nouveaux usages, jointe au déploiement de sources d'électricité bas-carbone, la réduction de la consommation par des gains en efficacité énergétique, et la mise en œuvre de mesures de sobriété, sont les leviers envisagés dans les différents scénarios.
- Mais face à l'énormité du défi et à ses dimensions planétaires, au rôle essentiel de l'énergie dans l'économie et le développement des sociétés humaines, un examen objectif et lucide des contraintes et des limites physiques de ces leviers est indispensable.
- Les sources renouvelables seules ne suffiront pas, et le recours à l'énergie nucléaire s'avère absolument indispensable si l'on veut relever le défi du siècle.
- Il faut pour cela relever le défi du nucléaire durable, qui permettra à la fois de répondre à la question de l'épuisement des ressources et à celle des déchets.



„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* », **30 mai 1878**

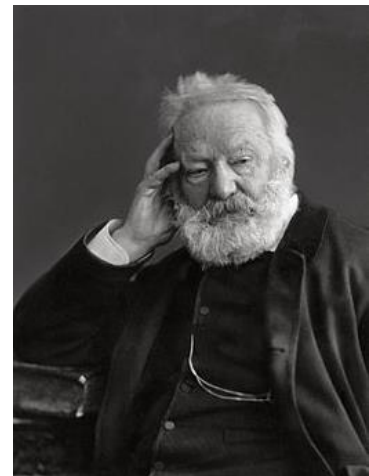


“On ne commande la nature qu'en lui obéissant.” **Francis Bacon** (1561-1626) “*Natura non nisi parendo vincitur*”

“...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 ?*

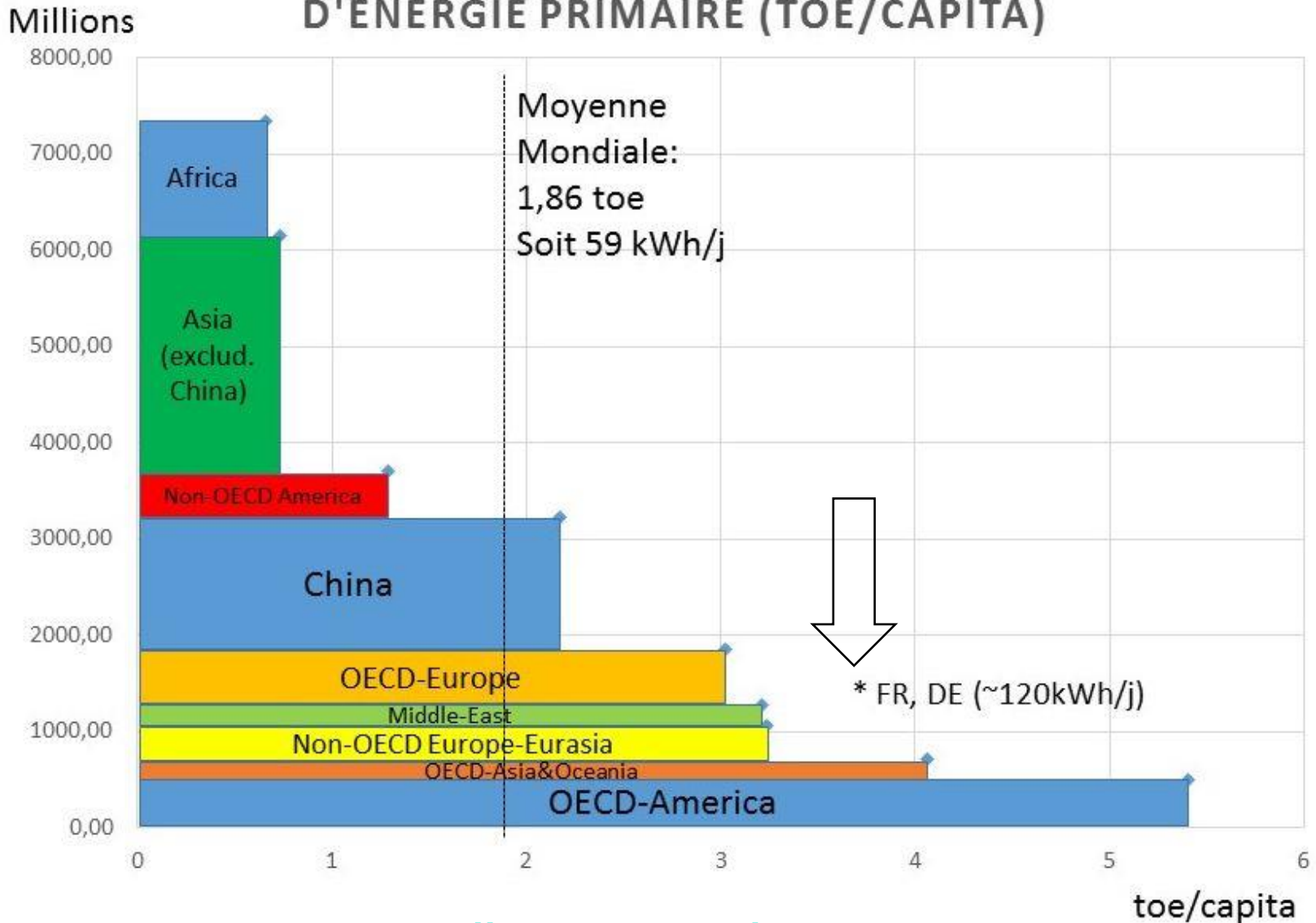
L'ignorance, l'ignorance plus encore que la misère... C'est à la faveur de l'ignorance que certaines doctrines fatales passent de l'esprit impitoyable des théoriciens dans le cerveau confus des multitudes... Le jour où l'ignorance disparaîtrait, les sophismes s'évanouiraient ». **Victor Hugo** (Discours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



L'indispensable questionnement

- **Les besoins en énergie, l'état des lieux**
 - ✓ Quelles ressources ? Quels usages ? Évolution historique ?
 - ✓ Sommes-nous condamnés à autant consommer ? Seuil ?
- **Les scénarios énergétiques, que prévoient-ils, quels leviers ?**
- **Sobriété? Efficacité énergétique ?**
- **L'électrification des usages ?**
 - ✓ Le potentiel des renouvelables électrogènes
 - ✓ Les contraintes liées au réseau électrique, gestion de l'intermittence, le problème du stockage
 - ✓ Le problème des ressources minérales
 - ✓ **Quid de la défossilisation de la chaleur (e.g. industrie) ?**
 - ✓ **Le nucléaire comme solution durable ?**

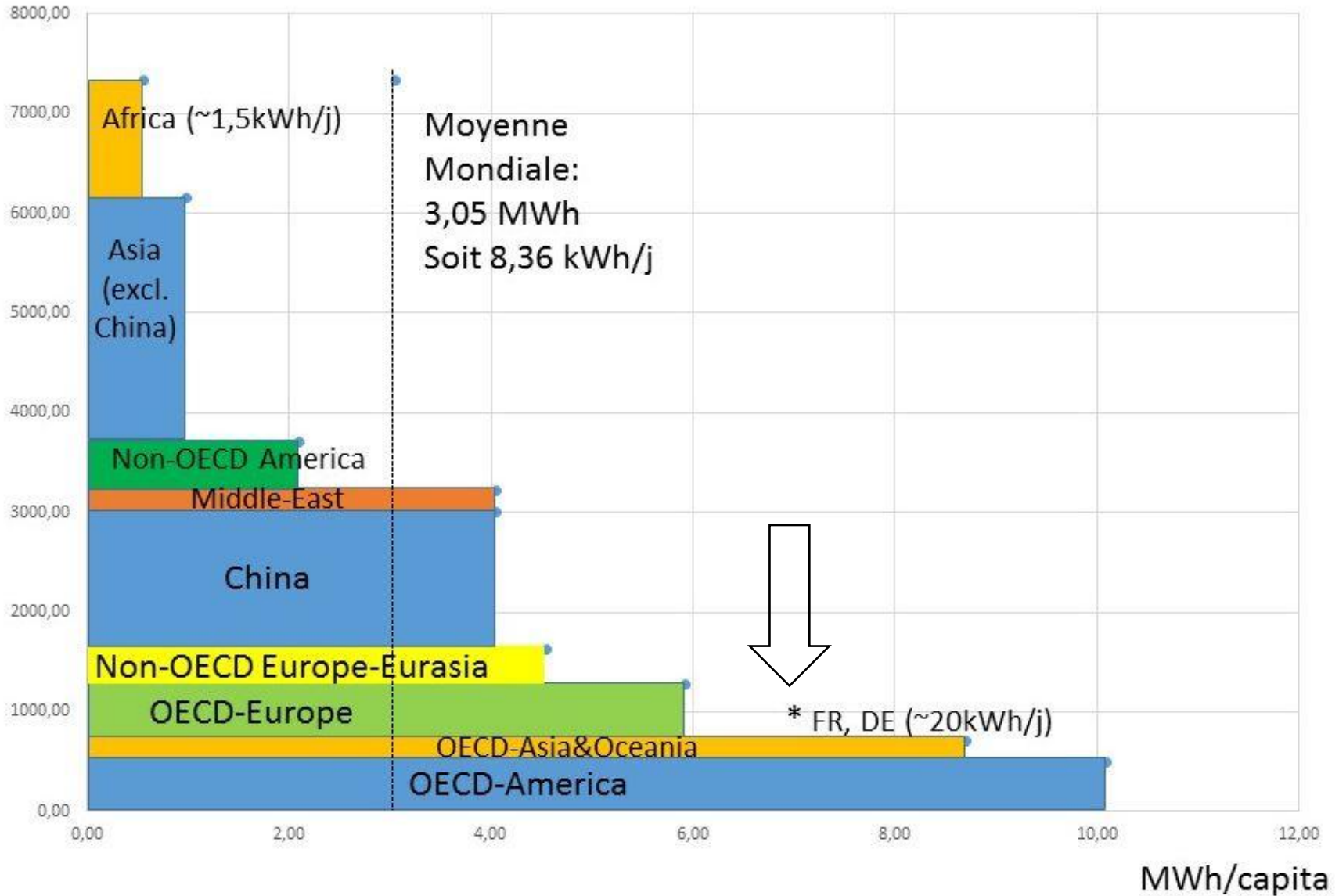
RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE L'USAGE D'ÉNERGIE PRIMAIRE (TOE/CAPITA)



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

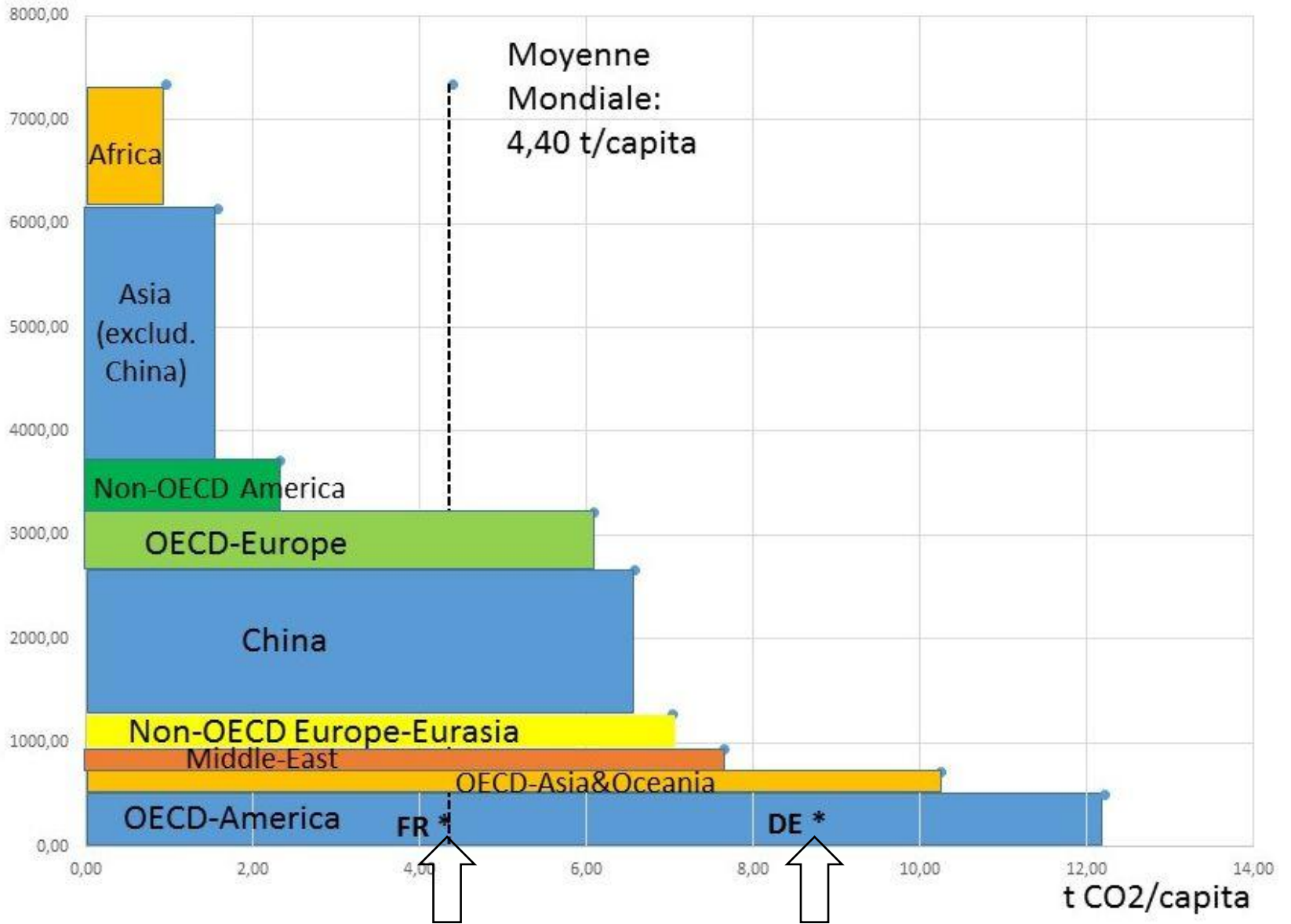
Millions

Consommation annuelle d'électricité (MWh/capita)



Millions

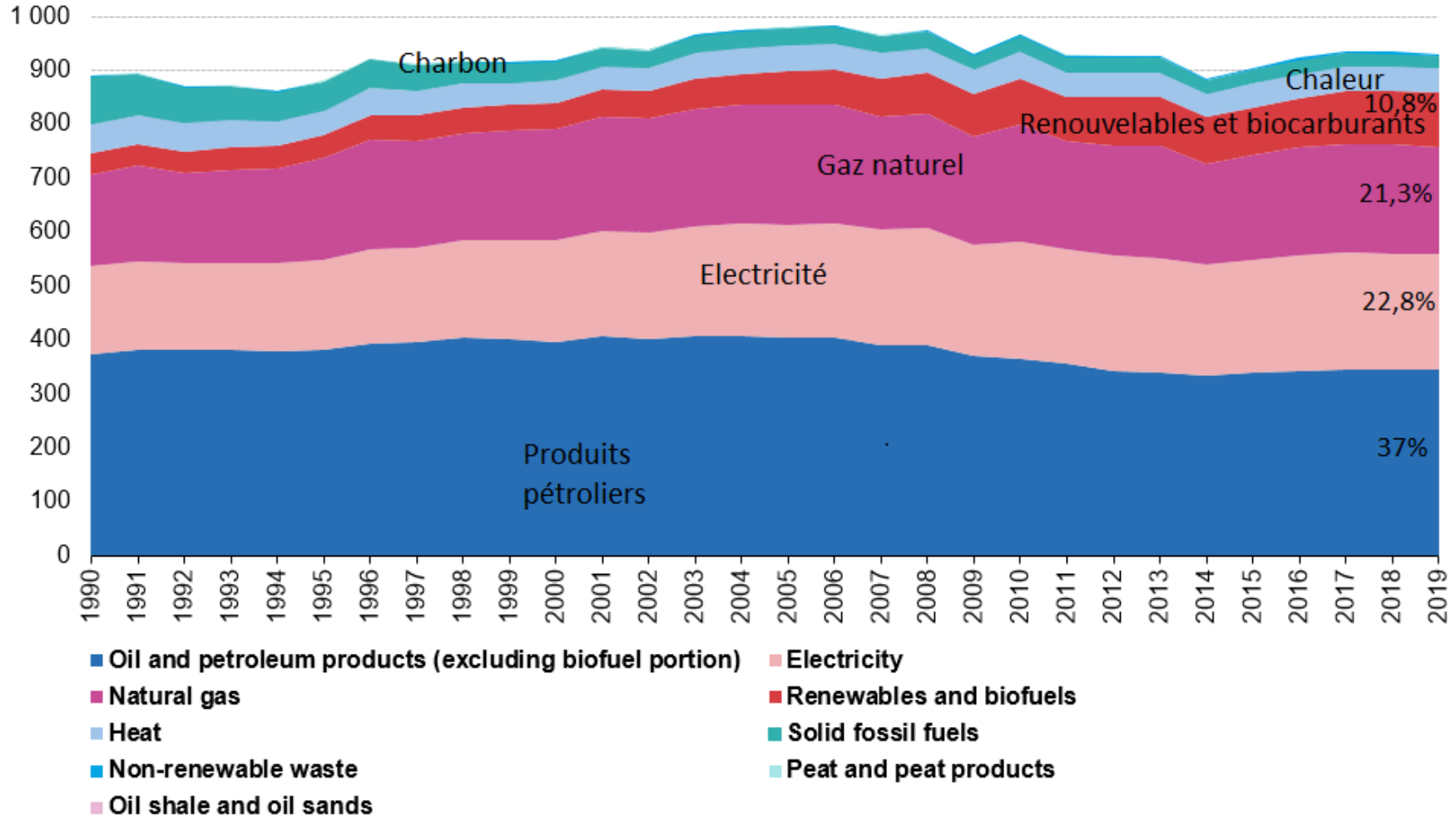
CO2 Emissions (t CO2/capita)



Consommation d'énergie finale (UE)

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

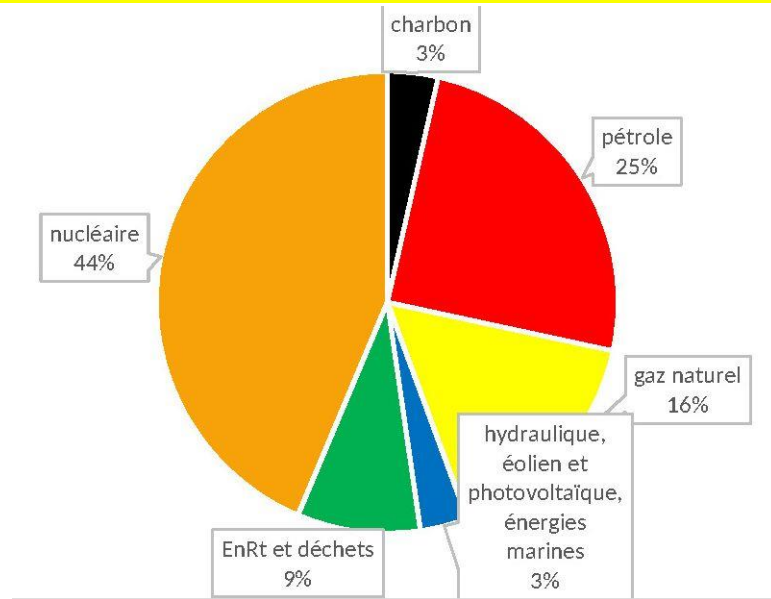
2019: Total 13 500 TWh
électricité > 3 000 TWh



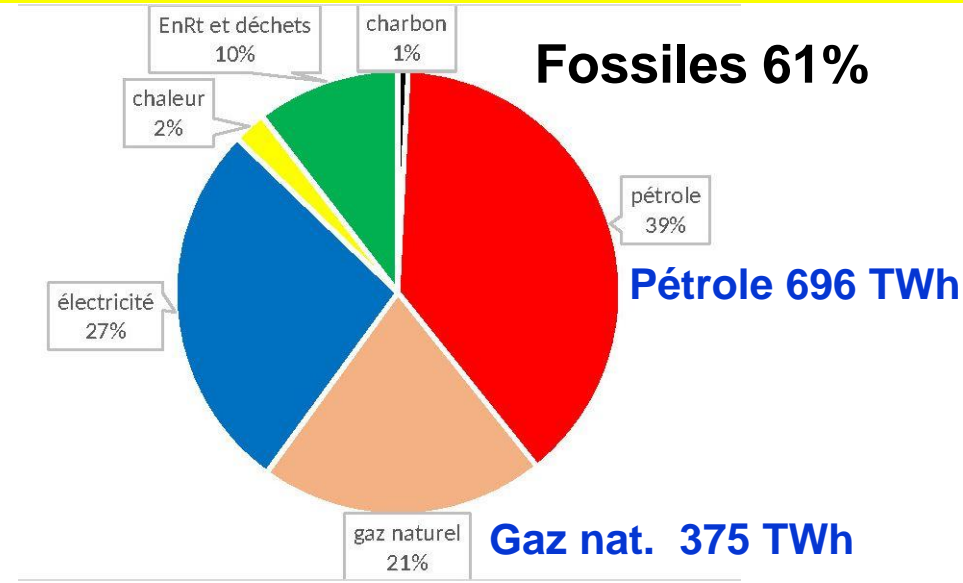
Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_c)

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, ...)

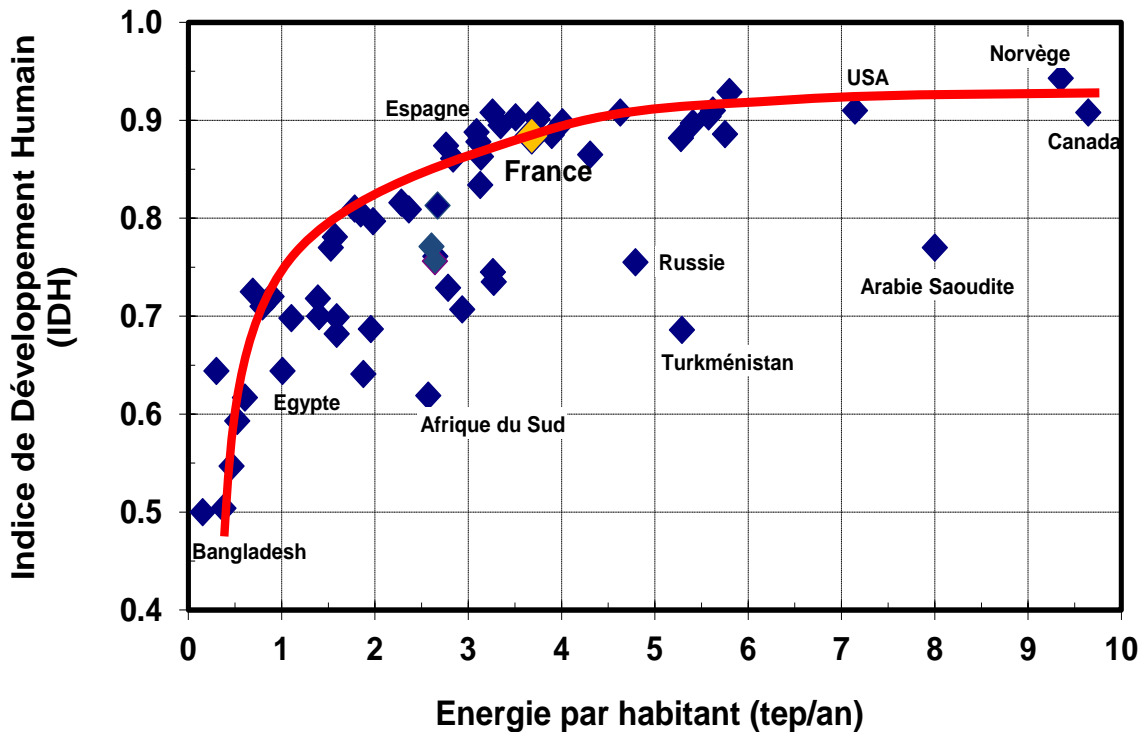
Premiers constats

- **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 **défossiliser 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.
- **Pourquoi alors une telle focalisation sur l'électricité ?**

Pourquoi consommer autant d'énergie ?

- Pas de survie ni des individus, ni des sociétés humaines sans apport en nourriture/énergie ! → Loi d'airain de la nature (cf. lois de la thermodynamique).
- L'évolution a correspondu à des sauts dans la capacité à transformer la matière, grâce tout d'abord à la maîtrise du feu, puis à l'invention de l'agriculture, et enfin à l'utilisation des ressources fossiles.
 - Groupes de chasseurs-cueilleurs (domestication du feu) ~ 6 kWh/j (2 kWh de nourriture et 1 kg de bois par jour et par individu) ;
 - Invention de l'agriculture → saut d'un facteur **1000** dans la quantité moyenne de ressources (du kWh/ha/an à celle du **MWh/ha/an (ex. colza~1550 litres de biofuel, soit 15,5 MWh/ha)** → croissance démographique et augmentation de la consommation par tête.
 - Sociétés agraires ~14 kWh/j, puis à 30 kWh/j (moyen-âge européen)
 - Révolution industrielle > 100 kWh/jour dans nos sociétés développées.

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**.

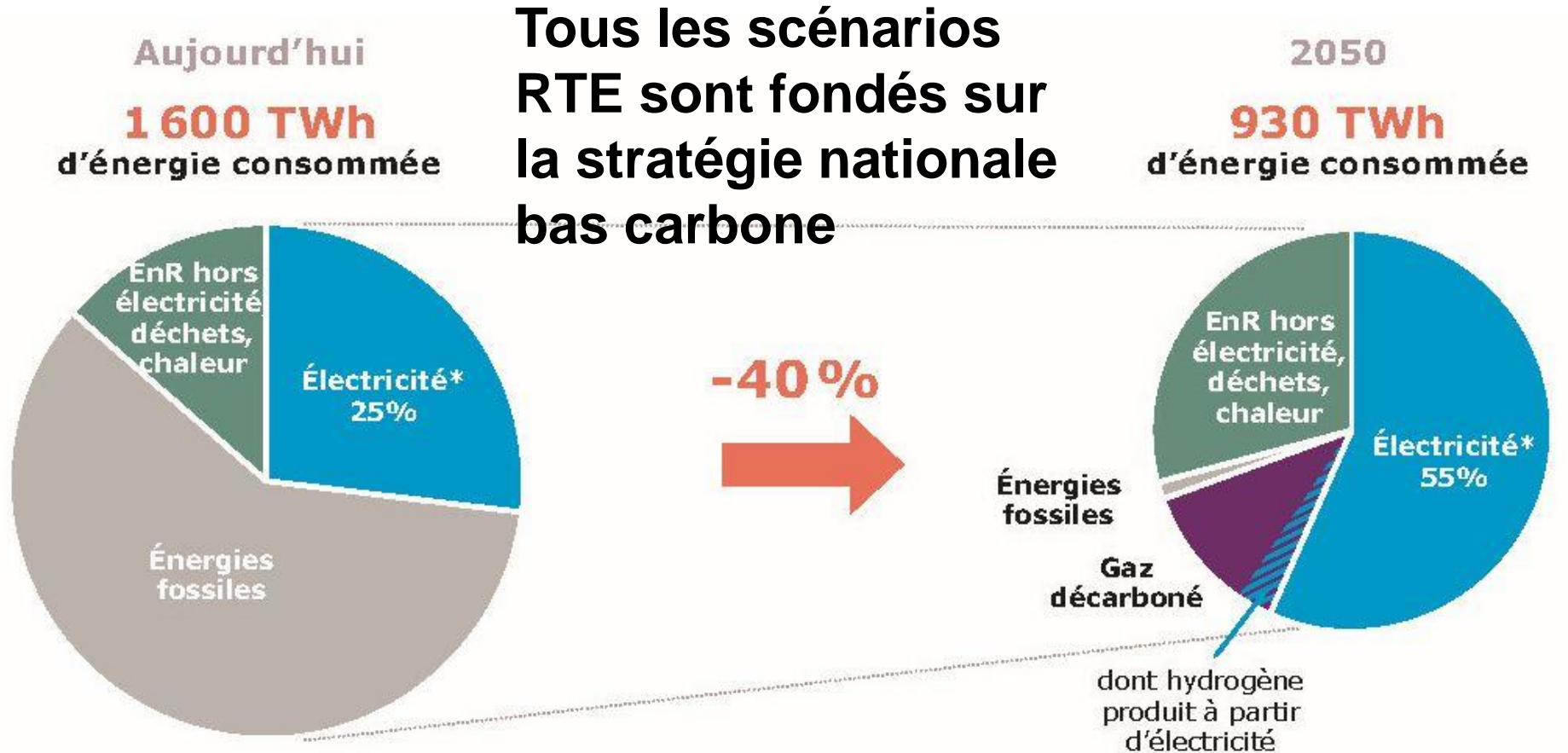
→ Il faut **admettre les limites de la sobriété ... surtout avec 8 milliards d'humains**

indépendante de la question du système politique !

Hypothèses et leviers

- **Objectif : neutralité carbone en 2050 (Stratégie nationale bas carbone, Green new Deal) →**
 - ✓ **Baisser les émissions nettes de 55% entre 1990 et 2030 → Baisse drastique de la consommation de fossiles**
- **Leviers: →**
 - ✓ **Électrification massive (électricité décarbonée) :**
 - **Renouvelables, temporalité, objectifs ?**
 - **Nucléaire, temporalité, objectifs ?**
 - ✓ **Baisse de la consommation finale d'énergie :**
 - **Efficacité énergétique, quelles limites ?**
 - **Sobriété : part de l'individuel ? Du collectif ?**
 - ✓ ***Quid* de la défossilisation de la chaleur ?**

Les scénarios RTE: Energie finale et SNBC



* 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

Réduire la consommation de fossiles ?

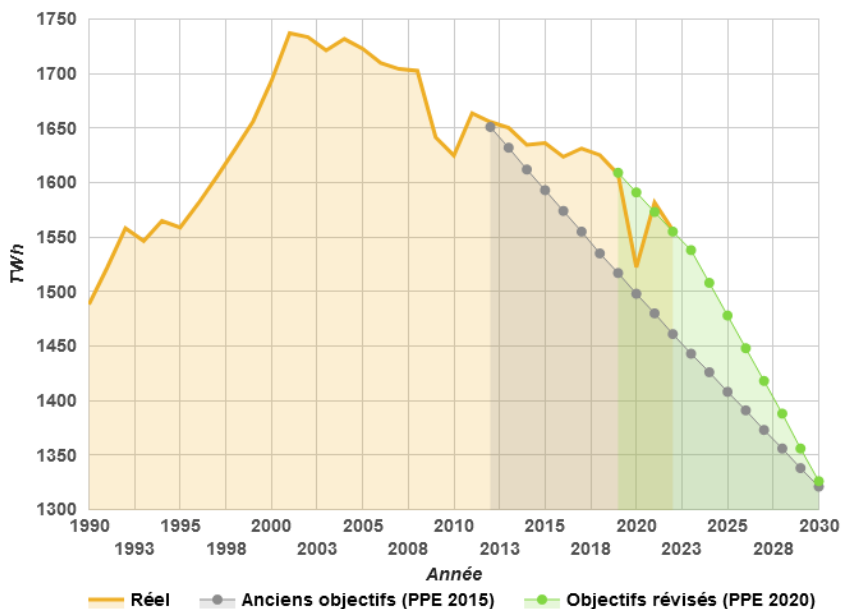
- **Sobriété et efficacité énergétiques nécessaires, car d'ici 2050 :**
 - ✓ Il faut **diviser par 5** la consommation en fluides et gaz fossiles
 - ✓ Mais disponibilité limitée* en :
 - électricité: 55 Mtep (645 TWh, dont nucl. 325 et hydro + EnR 320) contre 44 (511 TWh) en 2020
 - biomasse: 20 Mtep (230 TWh) contre 14 (160 TWh) aujourd'hui

⇒ Il **faudrait réduire la consommation d'énergie finale** de 146 Mtep (1700TWh) à 84 Mtep (977 TWh), soit pratiquement une **division par un facteur 2 !**
- **Sobriété et efficacité, poids variable selon les secteurs car :**
 - ✓ Aujourd'hui, énergie finale: **chaleur 45% (dont résid. 50%, tertiaire 20%, industrie 30%), fournie à 60% par combustibles fossiles et 20% biomasse**
 - par usage: bâtiment 43%, mobilité et transports 29%, industrie 17%, agriculture 3%, usages non énergétiques des ressources 9%

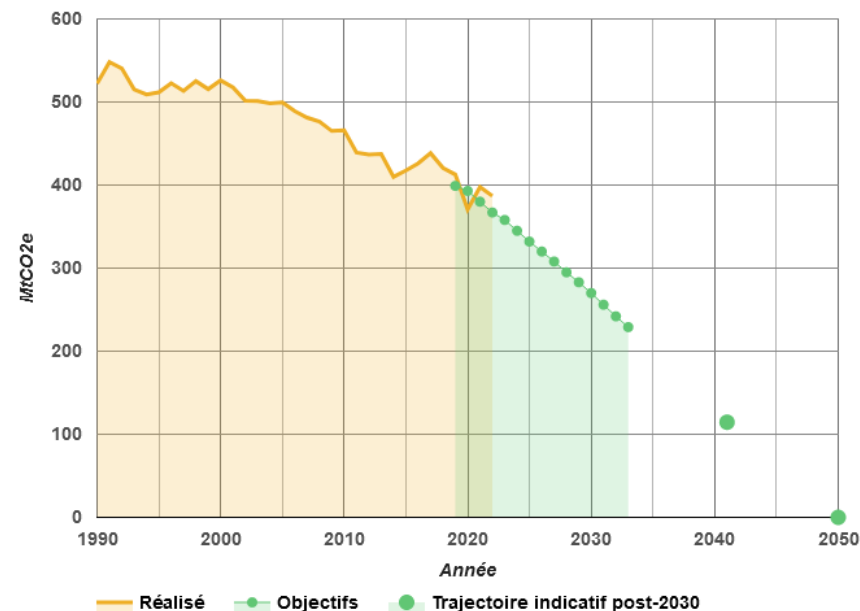
⇒* -Transports: **division par 5** de la consommation (de 50 à 10 Mtep)
- Résidentiel/tertiaire: **division par 2**, 59 Mtep (690TWh) à 33 (380)
- Industrie: diminution de 30% (?)

*PTEF du Shift Project, (cf. Note-evaluation-energie-climat-PTEF-v1.1.pdf)

Scénarios, la confrontation avec la réalité



Évolution de la consommation en énergie finale (France)



Évolution des émissions de GSE (France)

Suffirait-il de réactualiser la pente pour atteindre l'objectif ?

Sobriété vs. Efficacité énergétique

Estimation du poids de la responsabilité individuelle (crédit G. Sapy)

Pour les consommations énergétiques (en énergie finale) :

Secteur	Résidentiel	Transports	Tertiaire	Industrie	Agriculture	Total
Part de l'énergie consommée (1)	≈ 29 %	≈ 32 %	≈ 17 %	≈ 19 %	≈ 3 %	100 %
Part des décisions individuelles	≈ 100 %	≈ 55 % (1)	≈ 50 % (2)	≈ 0 %	≈ 0 %	-
Poids relatif des décisions individuelles dans le Total	29 %	17,6 %	8,5 %	0	0	≈ 55 %

(1) Selon Chiffres clés 2019

(2) Hypothèse, les consommations tertiaires étant en grande partie soumises à des décisions individuelles

Exemple d'impact des décisions individuelles :

- la température des logements: baisse de 21°C à 19°C pour tous les logements → ~ -14% (7% de réduction des pertes thermiques pour 1°C), pour le secteur, mais $0,14 \times 0,29 = 4,1\%$ pour le total ... et non renouvelable chaque année. Pour le tertiaire ~ 1,2%, soit total **5,3%**

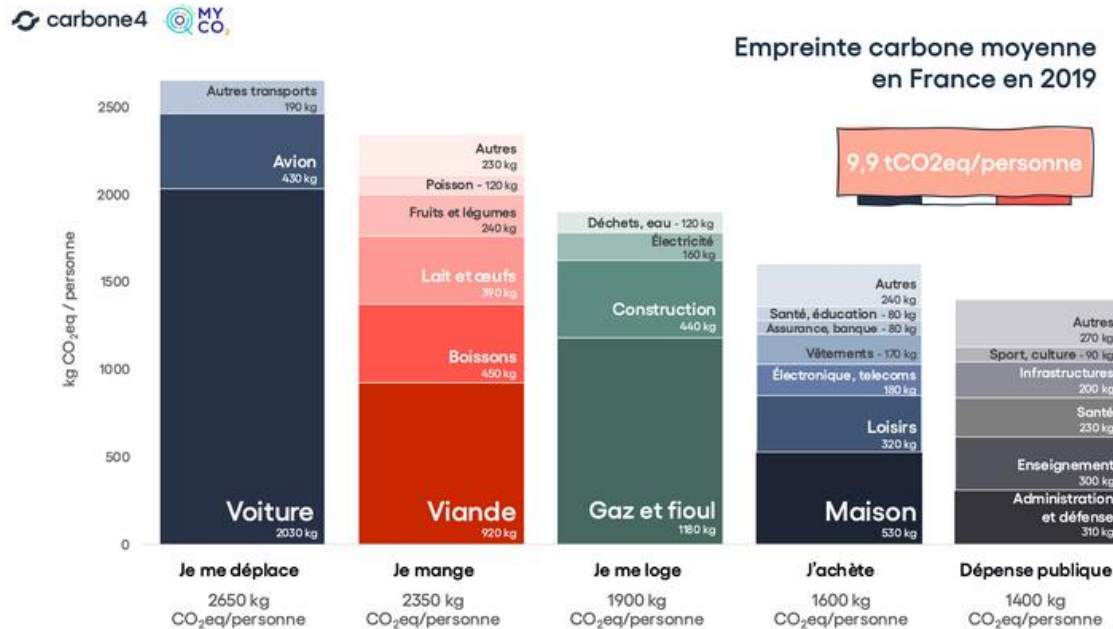
→ **Pour aller plus loin il faut le levier de l'efficacité énergétique**

avec, par isolation, 40% de réduction des pertes → **15%** au total

→ Sobriété (5%) + efficacité (15%) → ~ 20% d'économie

Sobriété vs. Efficacité énergétique

Estimation du poids de la responsabilité individuelle dans l'empreinte carbone



Risque de relativisation du poids de la combustion des fossiles ?

Gaz inclus : CO₂ (hors UTCATF France), CH₄, N₂O, HFC, SF₆, PFC, H₂O (trainées de condensation).

Source : MyCO₂ par Carbone 4 d'après le ministère de la Transition écologique, le Haut Conseil pour le Climat, le CITEPA, Agribalysse V3 et INCA 3.

Questions : - prise en compte de l'énergie grise (importations) dans les bilans ? - répartition consommation individuelle et consommation collective (infrastructures, état, services, ...) ?

➔ Limites de l'impact de la sobriété comportementale ~ 25%

➔ Substitution de capital aux énergies fossiles indispensable, sinon risque d'appauvrissement collectif

Les EnR électriques pour défossiliser ?

- Consommation actuelle d'énergie en Europe: E_f 13 500 TWh, (dont électricité 3330 TWh) ; avec une densité de population de 1,14 hab/ha correspond à **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** (**350 TWh PCI**), soit la consommation d'hydrogène actuelle de l'UE (industrie chimique, engrais, etc.) à comparer à :

Consommation UE de fossiles = 15 000 TWh ! (dont 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 ?**

– **Sans oublier les points annexes : Pilotabilité ? Stockage ?**

Quel potentiel 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)
- ✓ Hydraulique : 60 TWh
- ✓ 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

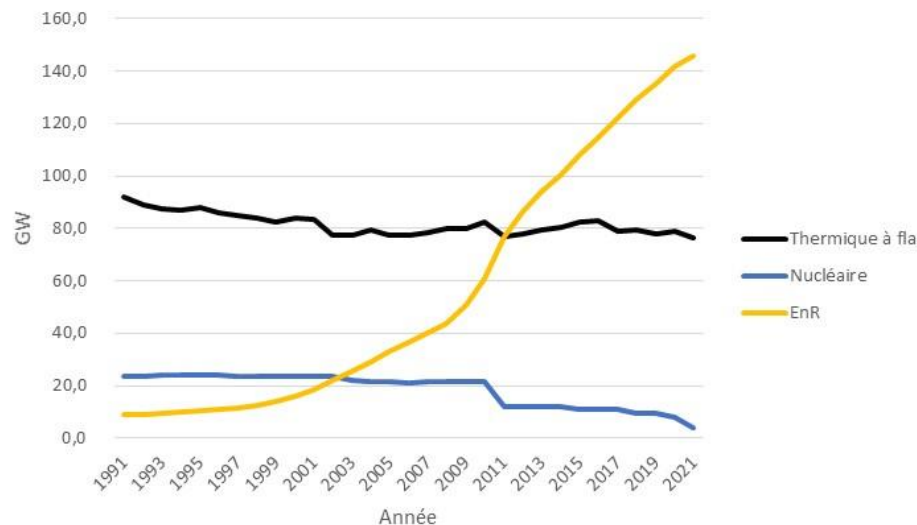
- ✓ éolien terrestre (~ 10 MW/km², 200 MWh/ha) 37 GW → **75 TWh**
- ✓ **éolien en mer : 50 parcs, 40 GW → 140 TWh**
- ✓ solaire PV (10 GWc, 12 TWh en 2019), 100 GWc → 125 TWh
(potentiel max. estimé à 200 TWh pour ~ 160 GWc)
- ✓ **Total EnR électrogènes → (340 - 415 TWh) ~ 350 TWh** (consommations finales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

→ Total renouvelables ~ 600 TWh ?

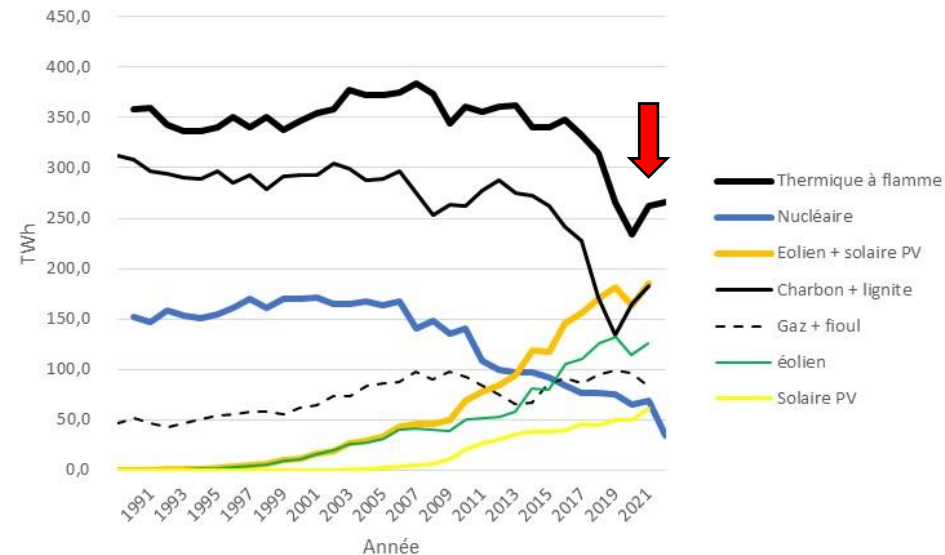
Gestion de l'intermittence des EnR électriques: l'exemple Allemand

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

Evolution des puissances installées



Evolution des productions annuelles



Forte croissance des EnR (capacité x10), nucléaire → 0, mais capacité thermique à flamme (pilotable) 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 !

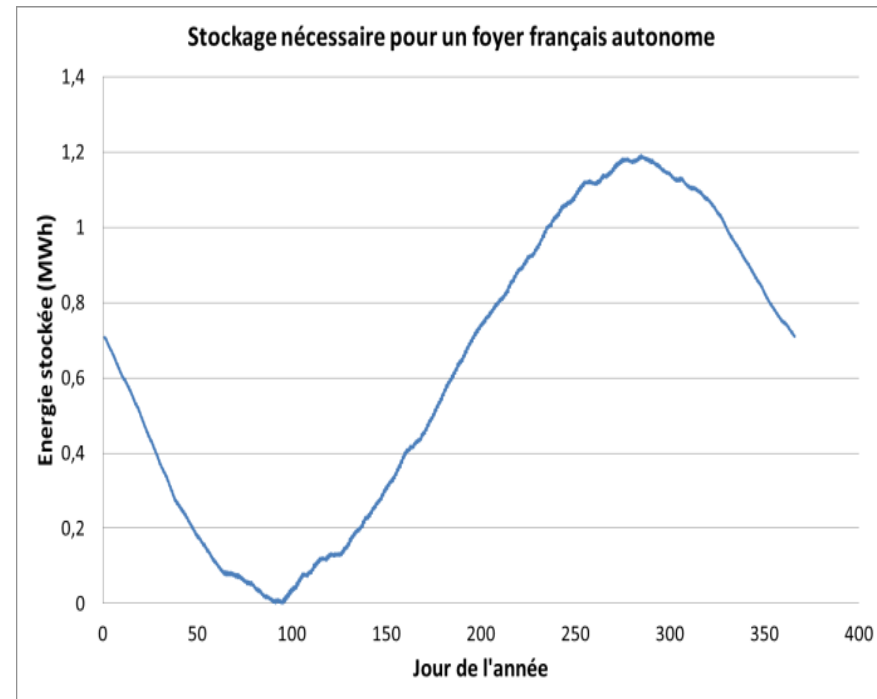
Auto-consommation ?

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

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)!

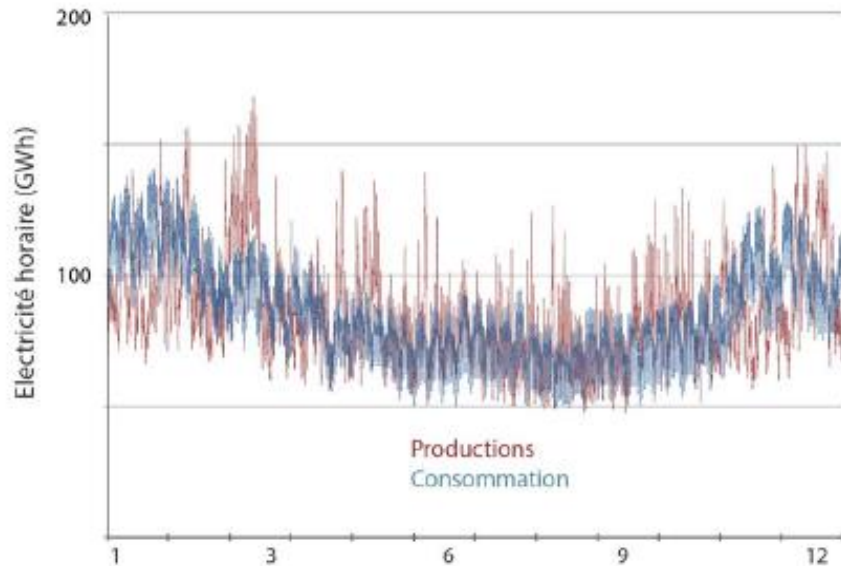
10 tonnes de batteries, local, etc...



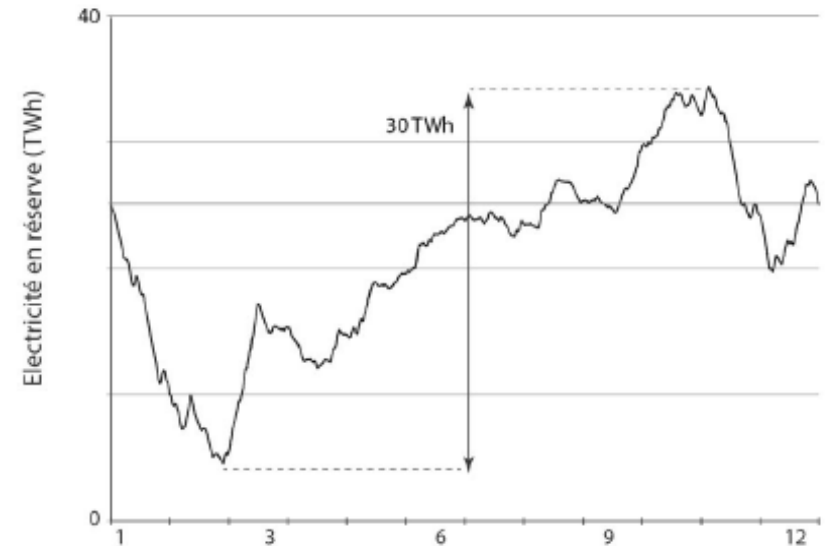
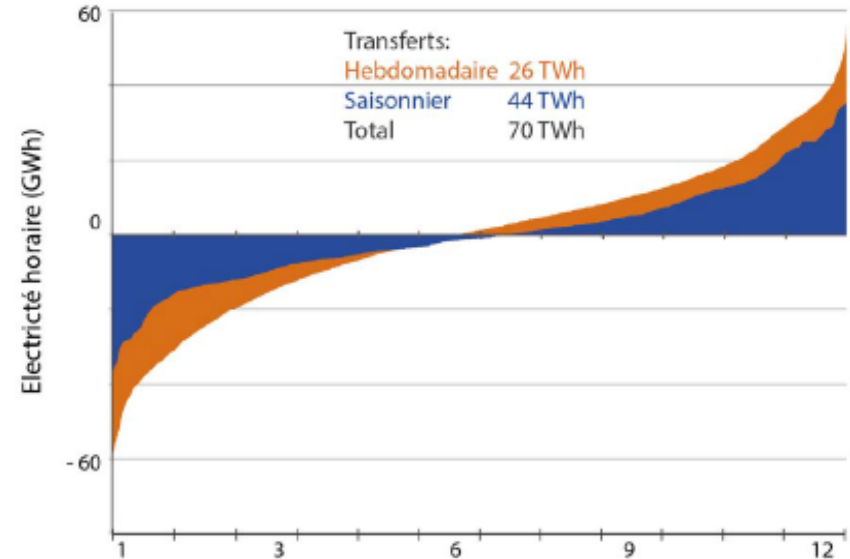
Crédit: J. Percebois & S. Pommeret

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

Scénario 2050 à 50% ENR et 50% Nucléaire



Séries chronologiques de la consommation (bleu) et de la somme des productions décarbonées (rouge) pour l'année type du scénario 50% ENR.



(crédit: Marc Fontecave & Dominique Grand, 2021)

- **Stockage nécessaire pour 50%**
 - ✓ Volume total 70 TWh
 - Échelle hebdomadaire 26 TWh
 - Echelle intersaison 44 TWh
 - **Volume de la réserve 30 TWh**
 - ✓ Entrée 60 GW
 - ✓ Sortie 55 GW

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 ? Inadaptées pour le stockage saisonnier**
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 ?**

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

Electrolyseurs alimentés par EnR projet CarlHYng en Lorraine

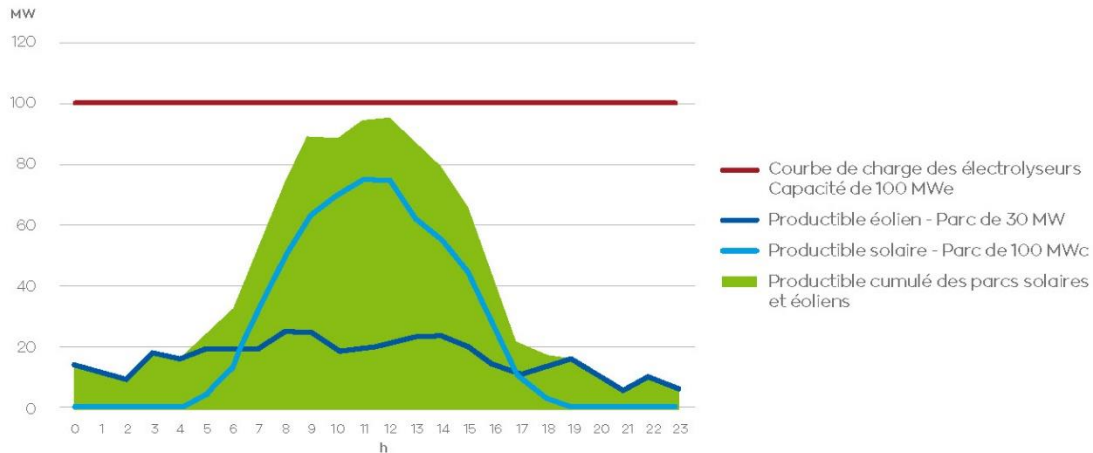


Figure 23 - Couverture des besoins d'un électrolyseur de 100 MWe* par un parc solaire de 100 MWc et un parc éolien de 30 MW sur un jour donné



Figure 24 - Couverture des besoins d'un électrolyseur de 100 MWe par des PPAs* et le reste complété par le réseau électrique français sur un jour donné

À cause de leur intermittence les sources renouvelables (solaire PV + éolien) ne peuvent alimenter seules les électrolyseurs pour permettre leur fonctionnement optimal (charge maximale en régime permanent). Il faut les alimenter à partir du réseau en électricité bas carbone.

Les baisses du coût du photovoltaïque et de l'éolien, (prix de revient du MWh), ne garantissent pas que le 100% EnR est possible !

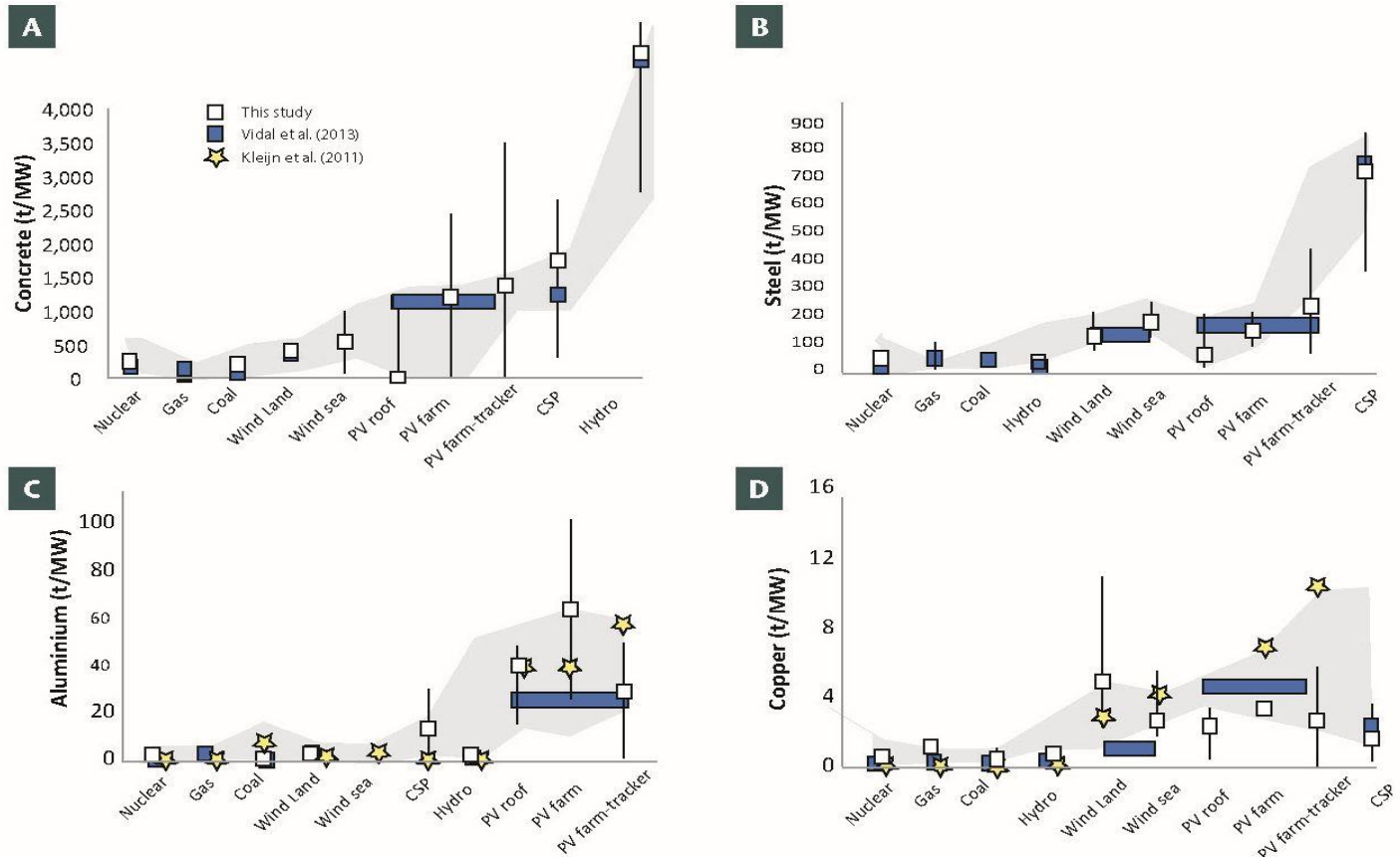
→ Il faut utiliser des critères objectifs !

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

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.

le problème des ressources minérales

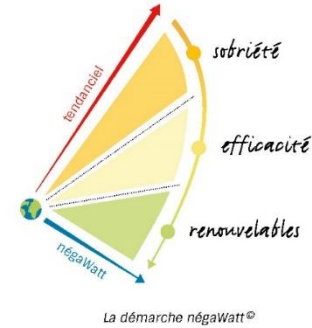
L'approvisionnement pourra-t'il satisfaire la demande ?

- Le scénario NZE-2050 de l'AIE prévoit une capacité installée mondiale de 14 500 GWc pour le solaire PV, (de quoi produire 23 500 TWh/an → capacité actuelle fois 20
- → Estimation rapide des besoins que cela induirait en ressources minérales à mobiliser :
 - ✓ 36 milliards de tonnes de béton (deux fois la consommation mondiale annuelle)
 - ✓ 2,9 milliards de tonnes d'acier, (deux fois la consommation mondiale annuelle)
 - ✓ 0,29 milliards de tonnes d'aluminium, (six fois la consommation mondiale actuelle)
 - ✓ 58 millions de tonnes de cuivre, (soit 3,5 fois la consommation mondiale **cumulée** actuelle)

Constat

Sobriété, efficacité, EnR

→ ne suffiront pas à garantir les conditions nécessaires posées par le



« 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

Sans recours à des importations massives, le recours au nucléaire est incontournable !!

Révision des scénarios RTE : Futurs énergétiques 2050, 2023-2035: première étape vers la neutralité carbone

Les leviers identifiés pour atteindre les objectifs climatiques et de souveraineté énergétique à l'horizon 2035

Des besoins d'électricité qui augmentent

dans tous les secteurs pour assurer
la sortie des énergies fossiles
et réindustrialiser la France



Transport



Tertiaire



Résidentiel



Industrie



Quatre leviers essentiels pour couvrir ces besoins

Quelques degrés de liberté subsistent dans les choix politiques
et les solutions mais les marges de manœuvre restent limitées

Efficacité énergétique

Amélioration de la performance
des procédés, équipements
et bâtiments



**-75 TWh minimum,
-100 si possible**

Sobriété

Baisse de la consommation reposant
sur une évolution des modes de vie
(à l'échelle individuelle et collective)



**-25 TWh minimum,
-60 si possible**



Nucléaire

Prolongation de l'exploitation des
réacteurs et maximisation du productible



**360 TWh minimum,
400 si possible**

Renouvelables

Accélération du rythme
de développement



**270 TWh minimum,
320 si possible**

Conclusions et perspectives

Le nucléaire (durable) est incontournable

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

Reconnaissons (avec RTE !) les **limites du schéma sobriété-efficacité-EnR** en le changeant pour **sobriété-efficacité-EnR+Nucléaire**

→ plus d'électricité et plus de nucléaire → **nucléaire en base** (électricité + chaleur par **cogénération** → **SMR** et **EnRi** là où **utile et compétitif** sans oublier les **EnRs thermiques**.

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

Les pistes pour un nucléaire durable

- Seul le déploiement massif de réacteurs de quatrième génération permettra de faire face à la demande en énergie, en garantissant
 - ✓ Sécurité d'approvisionnement (autonomie énergétique pour plusieurs milliers d'années)
 - ✓ Pilotabilité,
 - ✓ Impact minimum sur l'environnement (les déchets les plus dangereux sont brûlés)
- De gros efforts en R&D sont encore nécessaire pour porter à la maturité industrielle les **filières à neutrons rapides** pertinentes
- **Nécessité absolue de démarrer ces filières avant épuisement des ressources (limitées) en uranium fissile 235 !**

Le nucléaire actuel est-il soutenable ?

- Combustible (ressource primaire) = U 235, 0,7% de U naturel, car seul capable d'entretenir une réaction en chaîne → **noyau fissile**
- Réserves limitées ~ 100 ans pour le parc mondial (444 réacteurs pour 4% de la consommation !)
- Les réacteurs actuels fissionnent U 235 avec des neutrons lents (thermiques) → probabilité de fission 200 fois celle avec neutrons rapides issus de la fission, mais
 - ✓ Ne consomme que 1% du potentiel énergétique de U naturel et
 - ✓ favorise les phénomènes de captures neutroniques → transuraniens → déchets HA VL
- Fermeture du cycle impossible ; le MOX et le multi-recyclage n'apportent pas de solutions, encore plus d'actinides mineurs sont générés (déchets HAVL)

Les réacteurs à neutrons rapides

- Les neutrons rapides peuvent fissionner U 238 et tous les noyaux transuraniens → noyaux fissibles ou fertiles
- **Peuvent permettre de récupérer 100% du contenu énergétique**
- Valorisation de l'Uranium naturel et du plutonium
- Peuvent brûler tous les transuraniens → **réduction drastique de la radiotoxicité et de la durée de vie des déchets**
- La fission provoquée par un neutron rapide libère au moins 3 neutrons (2,4 en moyenne pour un neutron thermique) → production possible de plus de noyaux fissiles (par transmutation de noyaux fertiles) que détruit par fission ou capture → **“surgénération”**
- → **nucléaire durable**, au sens de *sustainable*

Les filières à neutrons rapides

- Filière RNR, caloporteur sodium) : la France pionnière avec Rapsodie (mise en service 1957), Phénix 250 MW (1973) et Superphénix 1200 MW (1976), puis 2010 lancement Astrid 600 Mwe, quatrième génération... abandonnée en 2019
- Autres filières possibles : (cf. Forum Gen IV) – haute température refroidissement helium ; - sels fondus (thorium ou uranium)
- Autres avantages : - température plus élevée → rendement > 40% au lieu de 35% pour les REP → électrogènes et/ou calogènes (gros intérêt pour défossiliser les procédés industriels) – réduction notable des besoins en eau, -20%, voire 100% pour filières sels fondus et HTR helium.
- Inconvénient: nécessitent au démarrage une charge en U très enrichi (~ 15%) ou Pu (production d'un REP sur 50 ans) pour atteindre la **criticité**

Le projet HEXANA

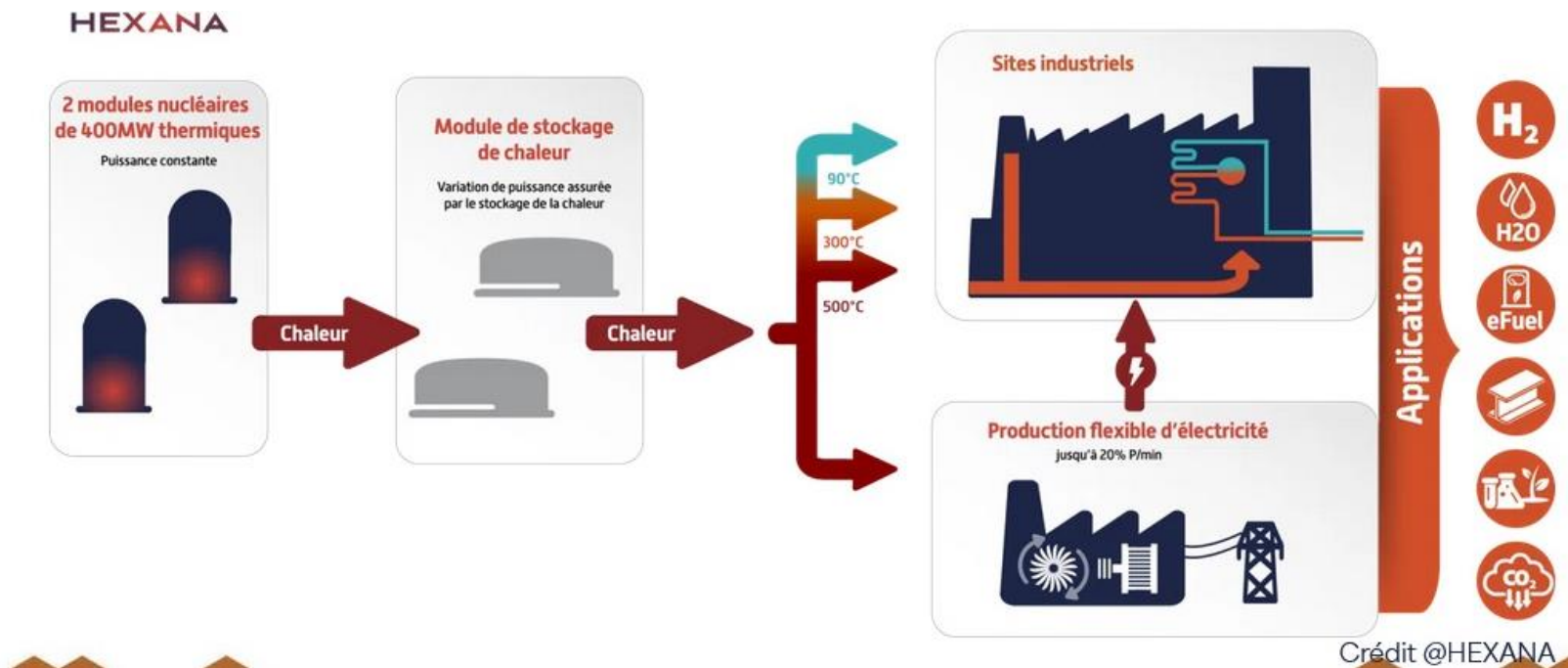
HEXANA *spin-off* du CEA entreprise labellisée France 2030 .

Système énergétique innovant, associant deux petits réacteurs modulaires à neutrons rapides refroidis au sodium et un stockage thermique couplé aux besoins industriels.

Puissance de 800 MWth (ou 300 MWe) pour :

- chaleur à haute température pour industries énergivores
- production d'électricité flexible en substitution des centrales thermiques fossiles.

<https://www.youtube.com/watch?v=mj1bRxHNAnE>



Le projet de la startup NAAREA

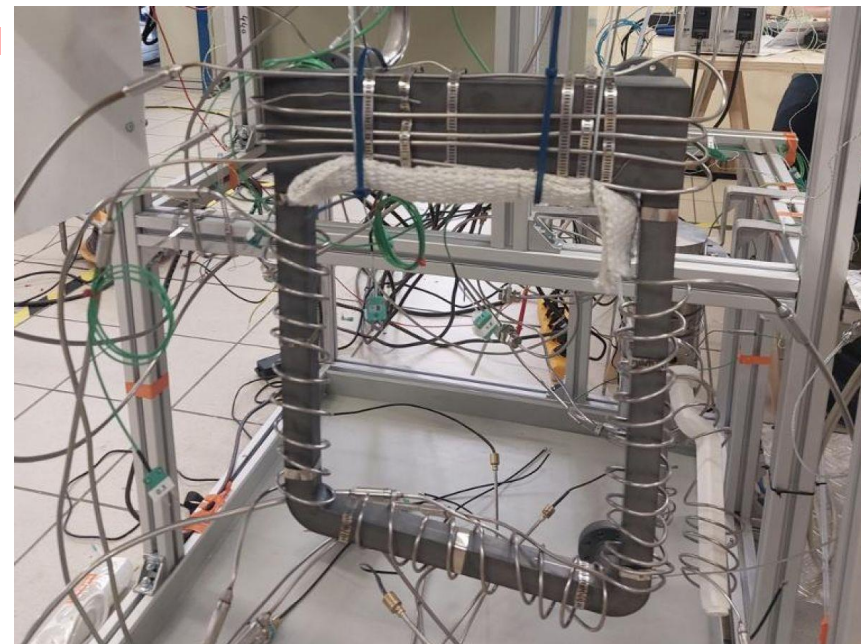
NAAREA entreprise labellisée France 2030 et French Tech 2030.
XAMR® (eXtrasmall Advanced Modular Reactor), un micro-générateur nucléaire à sels fondus et neutrons rapides, 40 MWe ou 80 MWth, à partir de combustibles nucléaires usagés actuellement entreposés et d'uranium appauvri.

- **Mi-2023 : finalisation du premier jumeau numérique ;**
- 2027 : mise en service d'un prototype ; cuve céramique revêtement graphène fabrication additive.
- D'ici 2030 : construction de l'usine de fabrication et production en grande série

Température : 700°C

Pression atmosphérique

Pas d'eau pour le refroidissement



<https://www.naarea.fr/fr/>

<https://www.youtube.com/watch?v=K6pW5UArDPA>

1^{ère} boucle à sels fondus en carbure de silicium

Réacteurs nucléaires Génération IV

- Atouts incontestables sur la gestion des matières fissiles (valorisation de l'uranium et du plutonium)
- Change le paradigme du nucléaire : l'aval du cycle devient stratégique. Le parc fonctionne sans nouveau besoin en uranium naturel
- Gros efforts en R&D nécessaires: en France, plan de reliance 2030, plusieurs projets soutenus, portés par des startups
- **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**

Conclusions 1/3

- L'étroit couplage entre développement social, 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**. Sobriété et efficacité énergétiques seront indispensables, mais insuffisantes.
- 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 d'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, où l'électricité est déjà décarbonée, le premier enjeu est le maintien et le développement des moyens de production en combinant nucléaire, EnR et hydraulique, pour faire face à la croissance de la demande en électricité. Le second est la défossilisation des usages de la chaleur (bâtiments et industrie).
- **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 défossilisation 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 développe des solutions, énergétiquement rentables, durables et acceptables pour la société, en particulier en développant de nouvelles sources d'électricité nucléaire, (**réacteurs dits de Génération IV**, à sels fondus, à neutrons rapides), puis réacteurs à **Fusion**, alors l'effondrement n'est peut-être pas inéluctable...

Quelques liens à suivre ...

- <https://www.anales.org/ri/2023/resumes/aout/19-ri-resum-FR-AN-aout-2023.html#19FR>
- <https://www.anales.org/re/2023/resumes/juillet/06-re-resum-FR-AN-juillet-2023.html#06FR>
- 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>