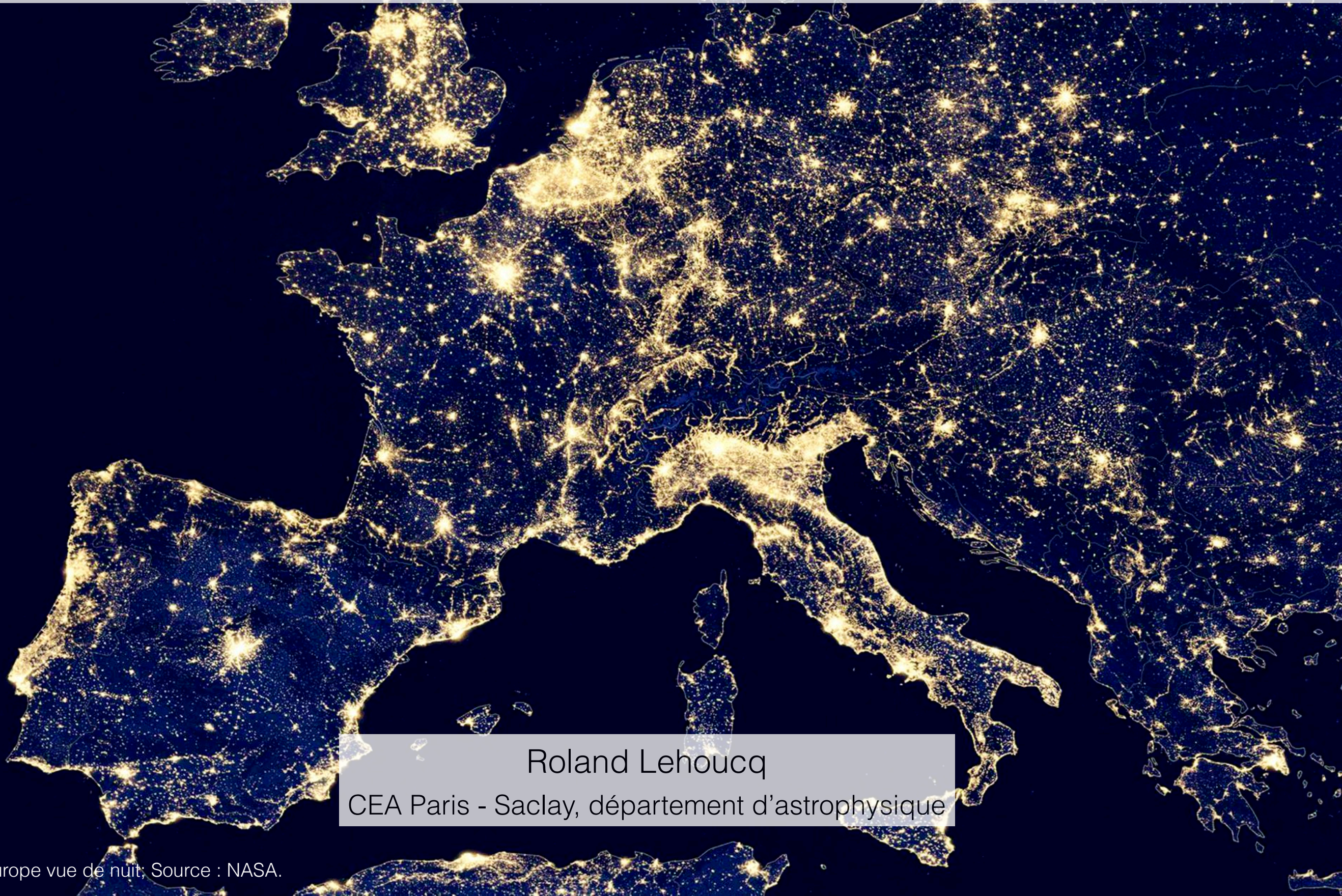


Énergie et humanité



Roland Lehoucq
CEA Paris - Saclay, département d'astrophysique

Qu'est-ce que l'énergie ?

Nous avons besoin d'énergie.

Nous allons manquer d'énergie.

Nous produisons de l'énergie.

Nous payons pour avoir de l'énergie.

Il faut économiser l'énergie.

Pour maigrir, il faut brûler de l'énergie.

Nos aliments contiennent de l'énergie (d'ailleurs c'est indiqué sur la boîte...).

Dans le langage courant, le mot « énergie » désigne aussi bien la force que la puissance, la vigueur, l'élan, le dynamisme, la volonté, la détermination, ...

En physique, l'énergie mesure la capacité
d'un système à transformer la matière.

Nous transformons la matière et vivons de ces transformations.

L'agent de ces transformations se nomme « interaction » (ou « force »).

L'énergie n'est pas une « chose » en soi,
mais une propriété de la matière en interaction.

Où intervient l'énergie ?

Modification de température



Modification de vitesse



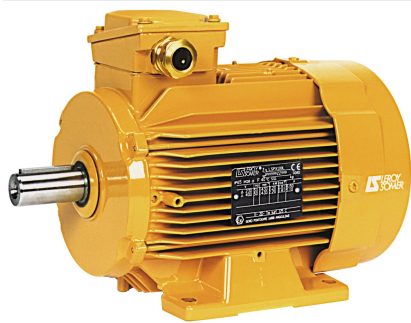
Modification de forme



Modification de luminosité



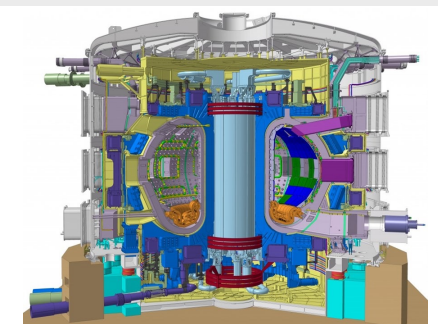
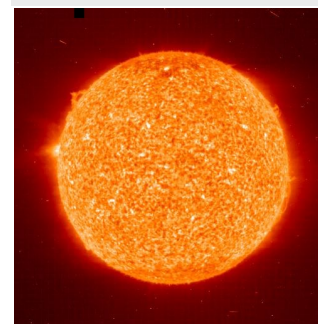
Modification de position dans un champ (électrique, magnétique, gravitationnel)



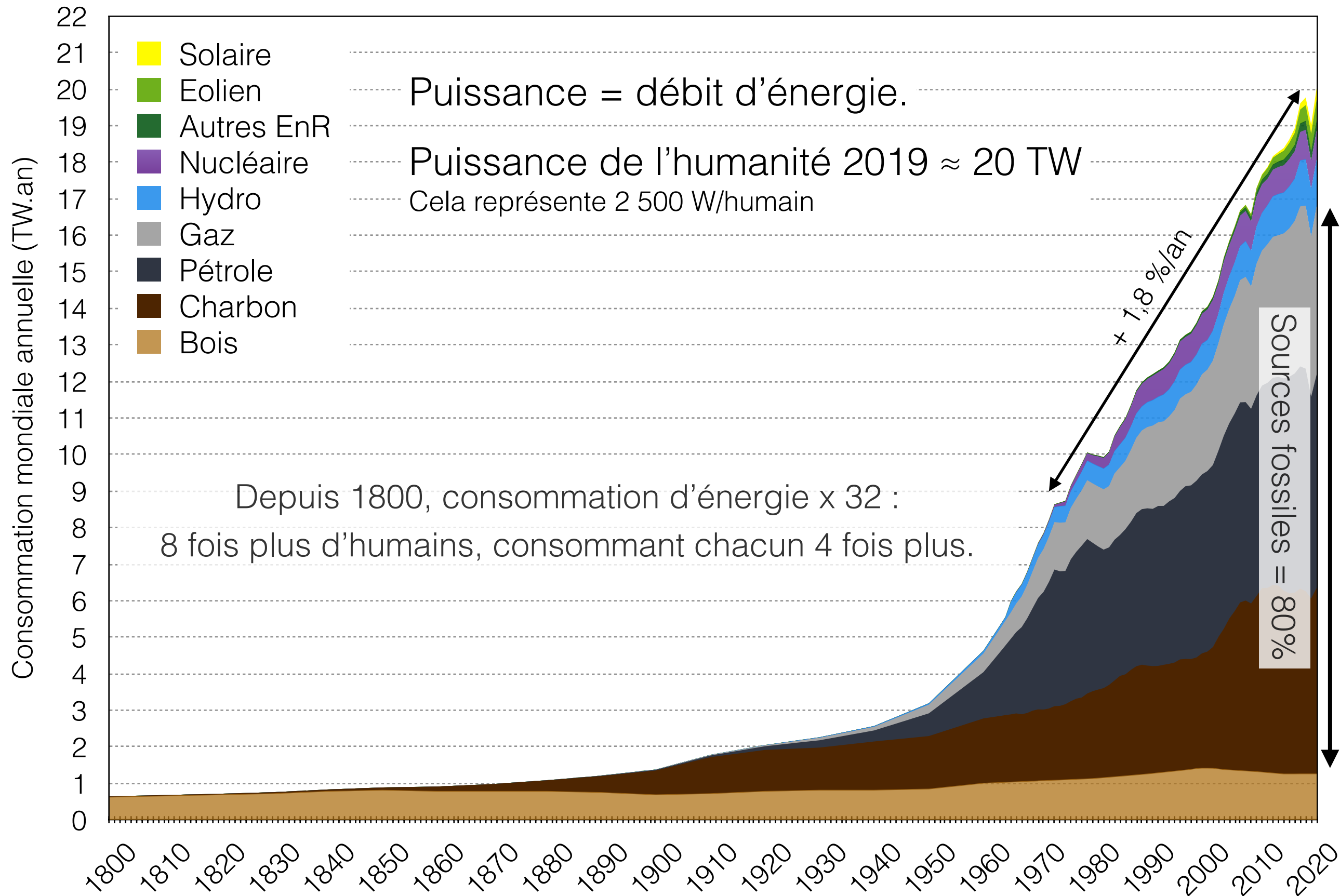
Modification de structure chimique



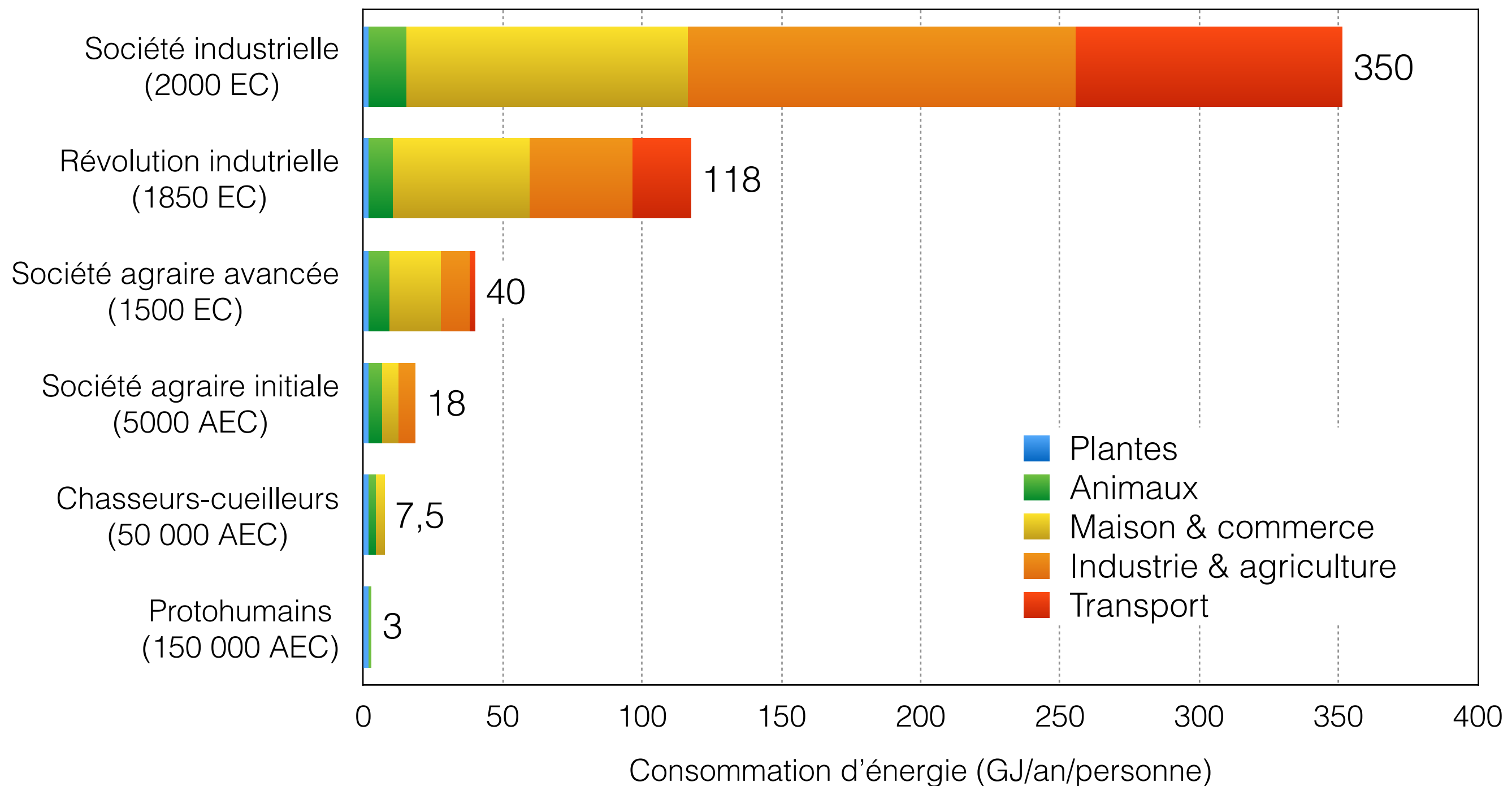
Modification de structure nucléaire



La consommation mondiale d'énergie primaire augmente



Évolution de la puissance disponible



1 GJ/an = 32 watts

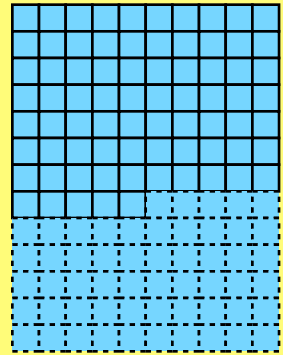
2 000 kcal/jour = 3 GJ/an

France : 10 EJ/an, soit 150 GJ/an/personne

USA : 100 EJ/an, soit 310 GJ/an/personne

Les ressources sont finies

Flux



Vents 75-130 TW



OTEC 3-11 TW



Biomasse 2-6 TW



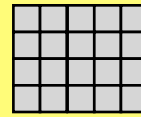
Hydraulique 3-4 TW



Géothermie 0,2-3 TW



Vagues 0,3 TW



Puissance mondiale = 20 TW
préfixe T = téra = 10^{12}

□ 1 TW = 1 TW.an/an

Puissance moyenne reçue
du Soleil 23 000 TW
(3 fois la surface de la page)

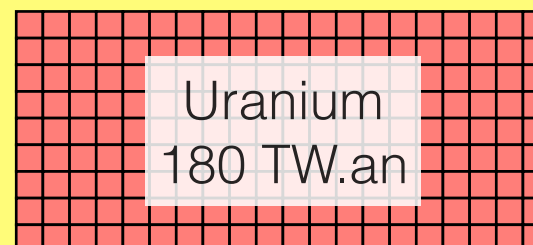
Stock



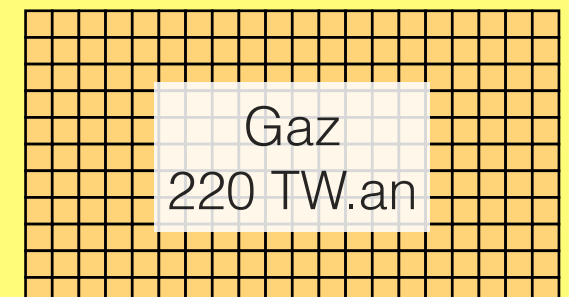
Charbon
840 TW.an



Pétrole
340 TW.an



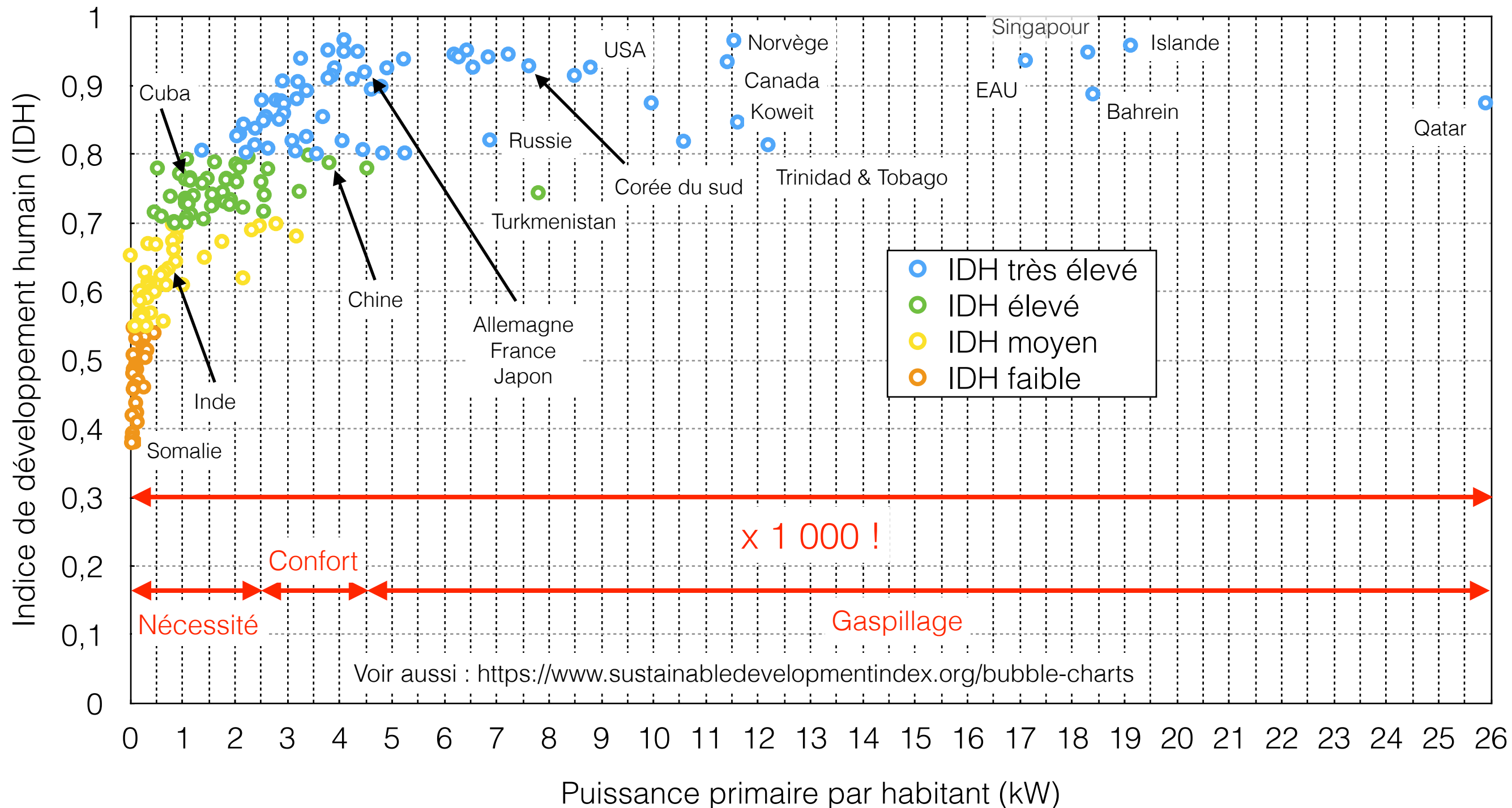
Uranium
180 TW.an



Gaz
220 TW.an

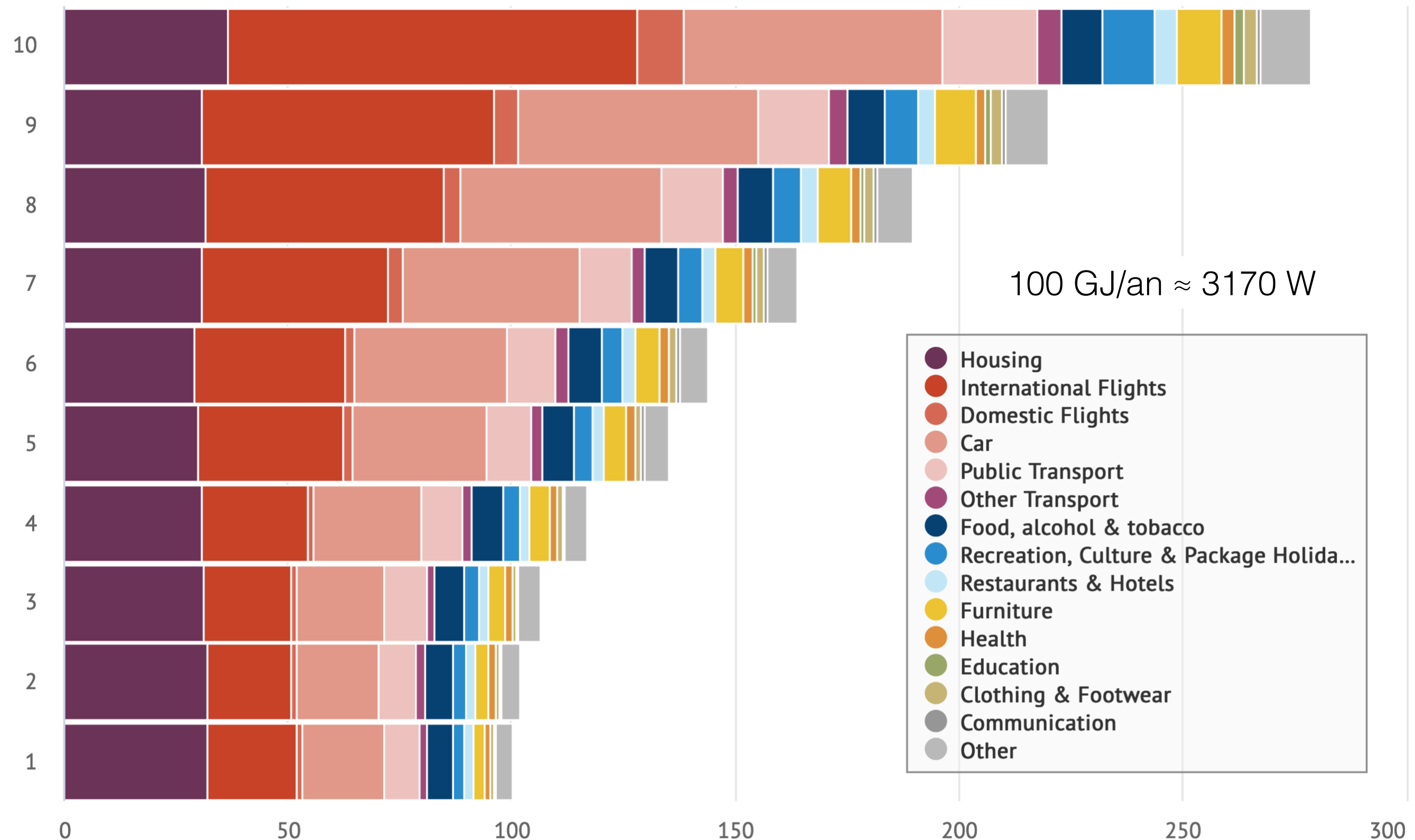
Développement et accès à l'énergie

IDH = moyenne de trois indices quantifiant l'espérance de vie à la naissance, la durée moyenne de scolarisation & le niveau de vie.



Inégalités énergétiques (UK)

Annual energy use per adult equivalent, GJ



Source : M. Baltruszewicz et al. Social outcomes of energy use in the United Kingdom.

Ecological economics 295 (2023) ; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800922003470>



Puissance : beaucoup d'humains.



Puissance : 33 chevaux et 5 humains

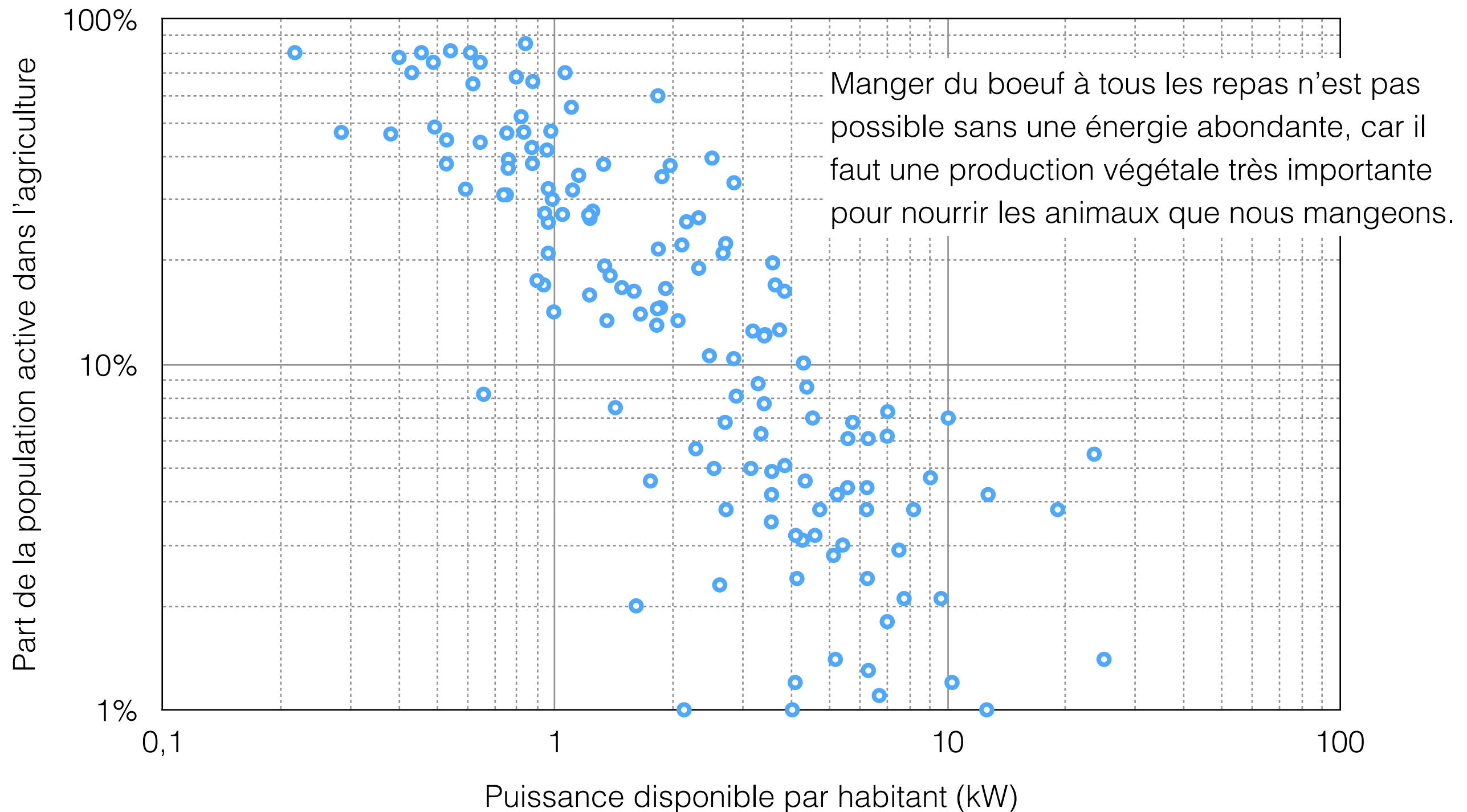
Agriculture

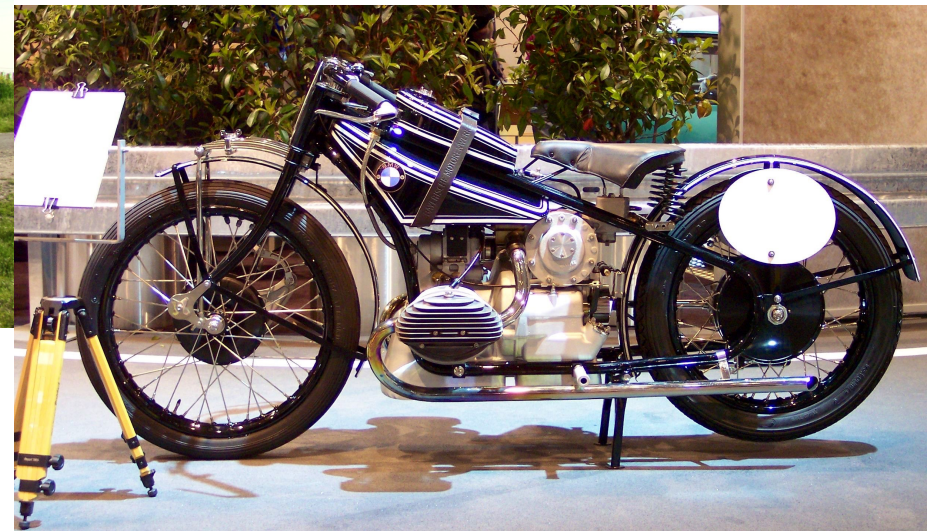


Puissance : 200 ch et 1 humain.

Disposer d'une énergie abondante permet

à l'essentiel de la population active de faire autre chose que de l'agriculture !





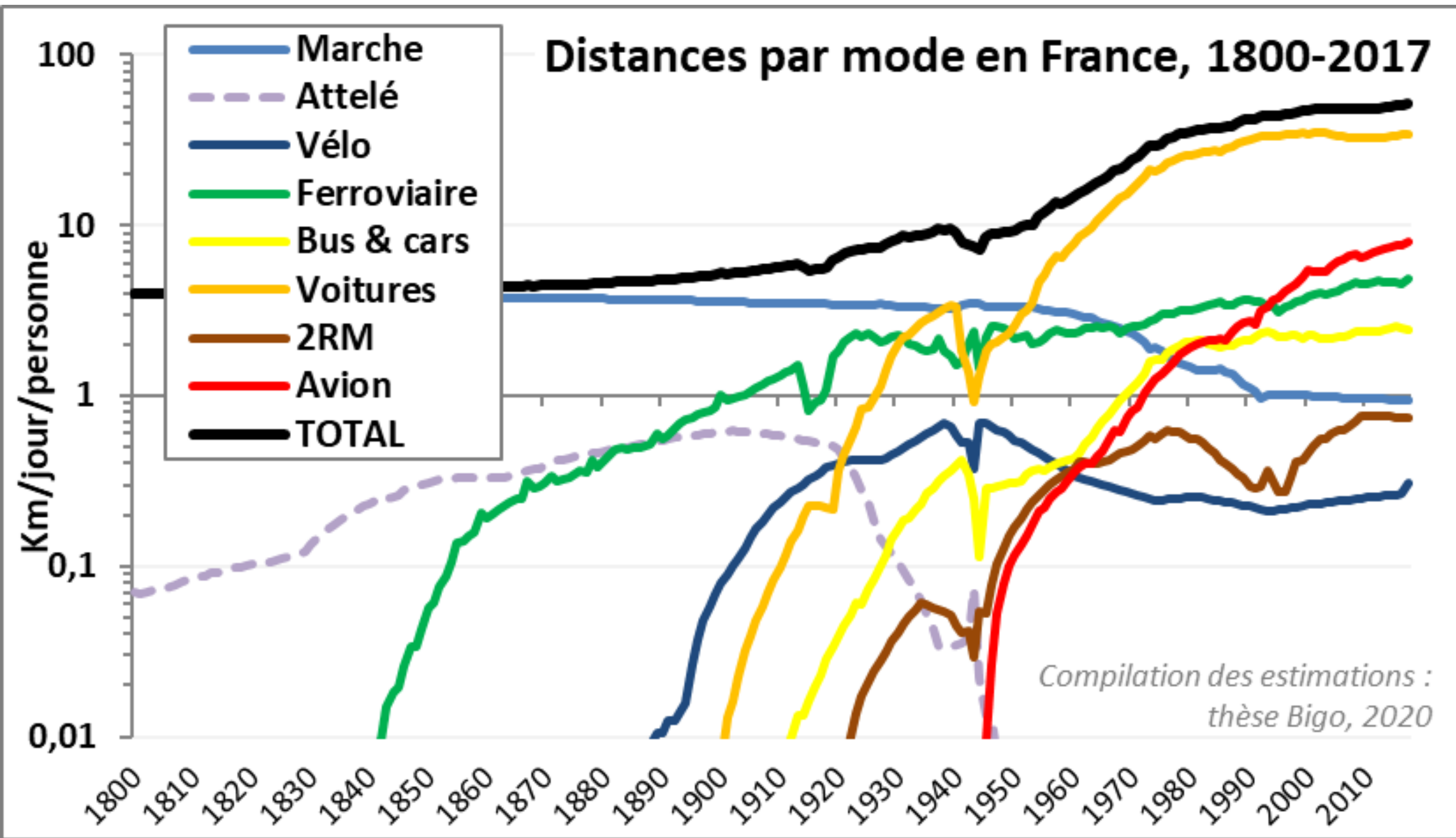
Transports



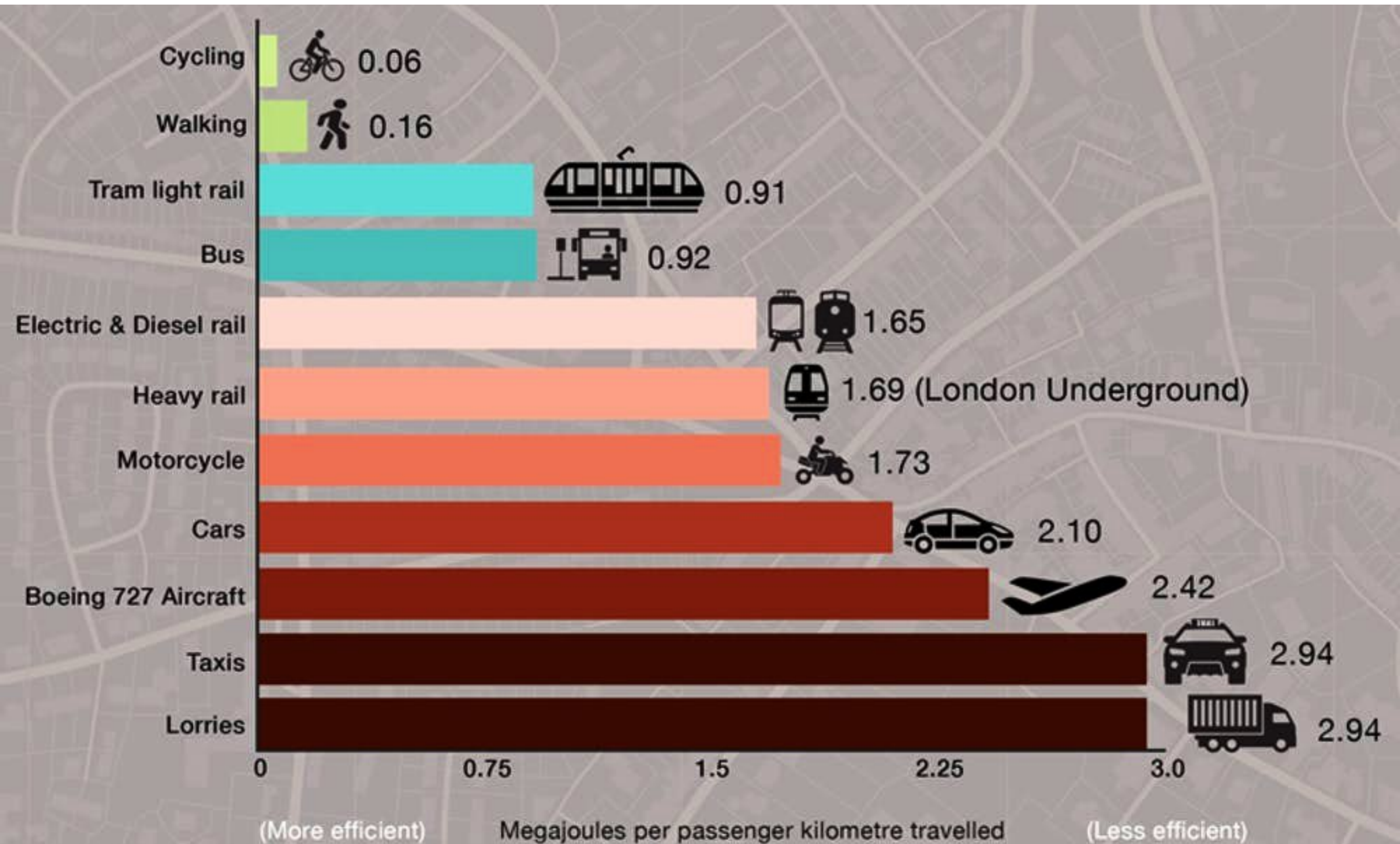


La consigne à bicyclettes de la gare de Lyon (août 1948).

Évolutions des distances parcourues par personne et par jour, en France

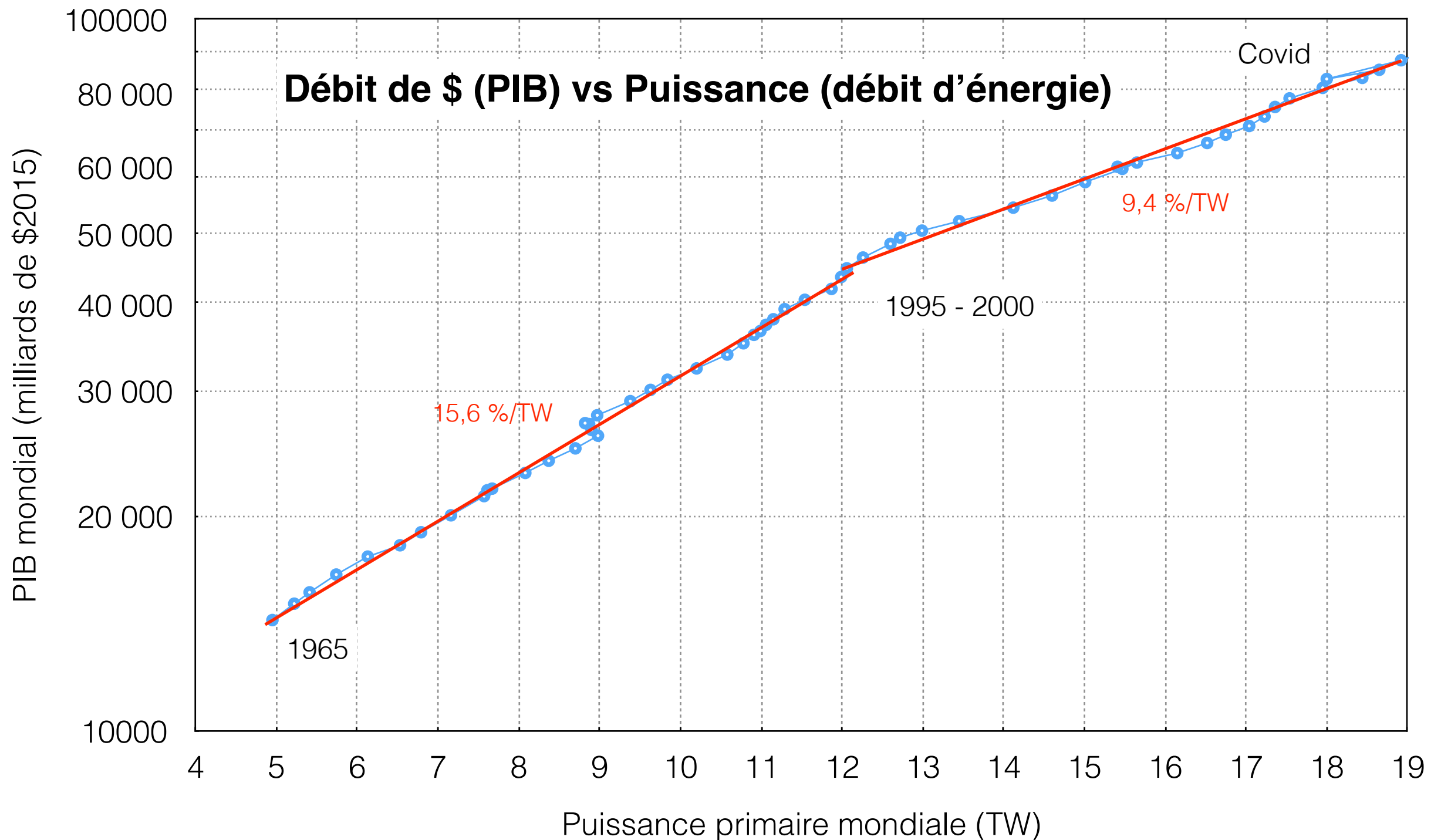


Transport et énergie



Production et énergie

Comme toute transformation s'accompagne de l'utilisation d'énergie, la « vitesse » de la production (mesurée par le PIB annuel) dépend largement de la puissance disponible.

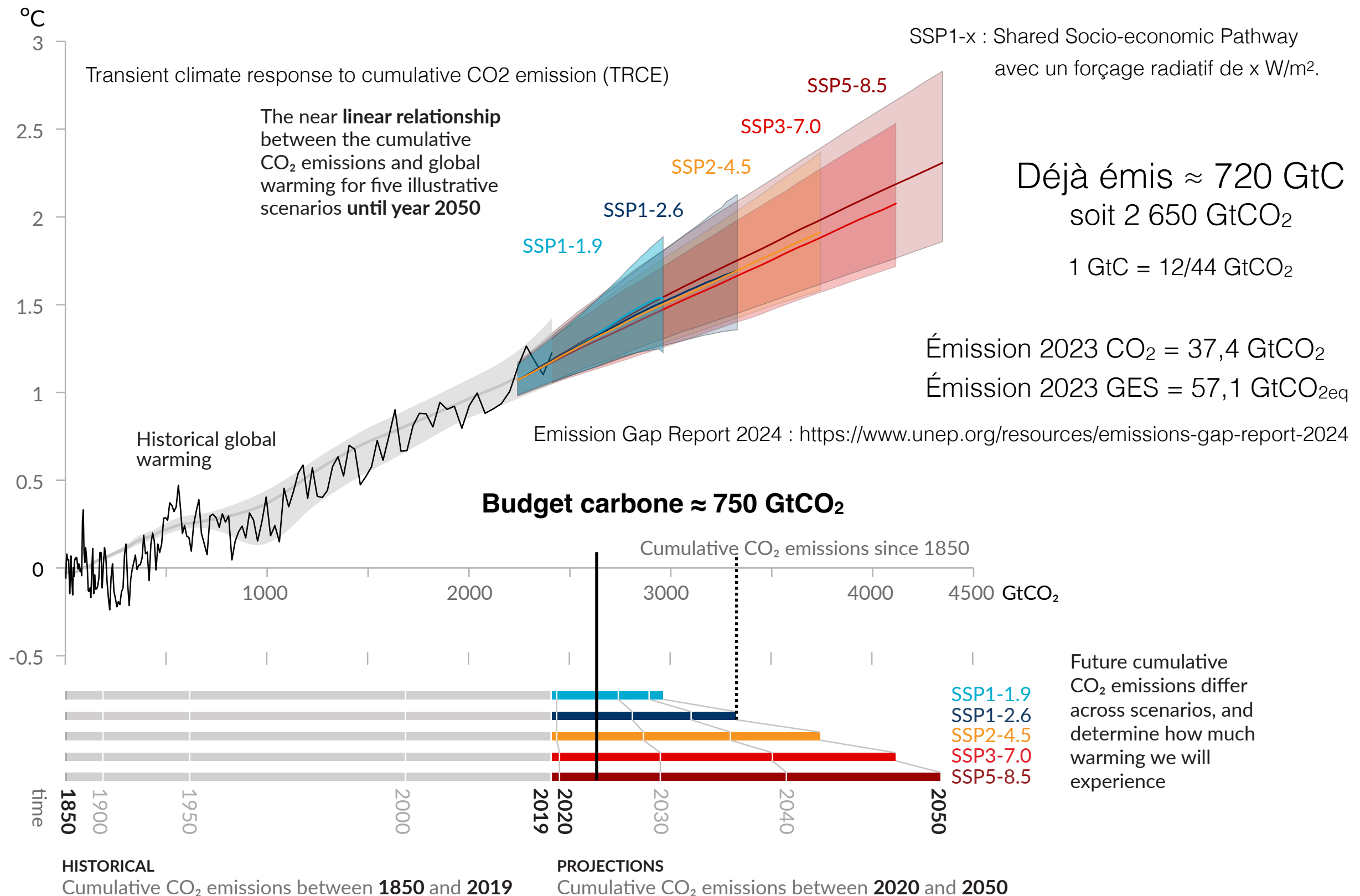


Découplage PIB - énergie ?

1. Augmentation des dépenses énergétiques : nous avons commencé par extraire ce qui était facile, les nouvelles ressources sont moins accessibles et plus rares.
2. Effet rebond : l'amélioration de l'efficacité énergétique est compensée par une augmentation des usages ou une ré-allocation de l'argent économisé.
3. Déplacement du problème : une solution technique à un problème environnemental crée d'autres problèmes (les voitures électriques mettent la pression sur le Li, le Co et le Cu, le biofuel est en compétition pour l'usage des sols).
4. L'impact des services est sous-estimé : l'économie de service ne peut exister que s'il y a une économie matérielle, elle ne la remplace pas. Elle ajoute donc une pression écologique.
5. Le potentiel du recyclage est limité : les taux de recyclage actuels sont faibles, et recycler nécessite de l'énergie et des matières premières « fraîches ».
6. Le progrès technique est insuffisant et inapproprié : il ne cible pas les facteurs de productions qui comptent le plus dans le bilan environnemental et ne réduit pas la pression sur l'environnement.
7. Déplacement des coûts : les rares cas où il semble y avoir un découplage sont tous dus à des externalisations des impacts environnementaux de pays fortement consommateurs et riches vers des pays faiblement consommateurs et pauvres.

La contrainte climatique

Global surface temperature increase since 1850-1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



Que faire d'ici 2050 ?

Relions les émissions de CO₂ à des paramètres énergétique, d'usage et de démographie.

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{énergie}} \times \frac{\text{énergie}}{\text{population}} \times \text{population}$$

Émission
de CO₂

gCO₂
tCO₂

Contenu en CO₂
de l'énergie

gCO₂/kWh

Disponibilité
de l'énergie

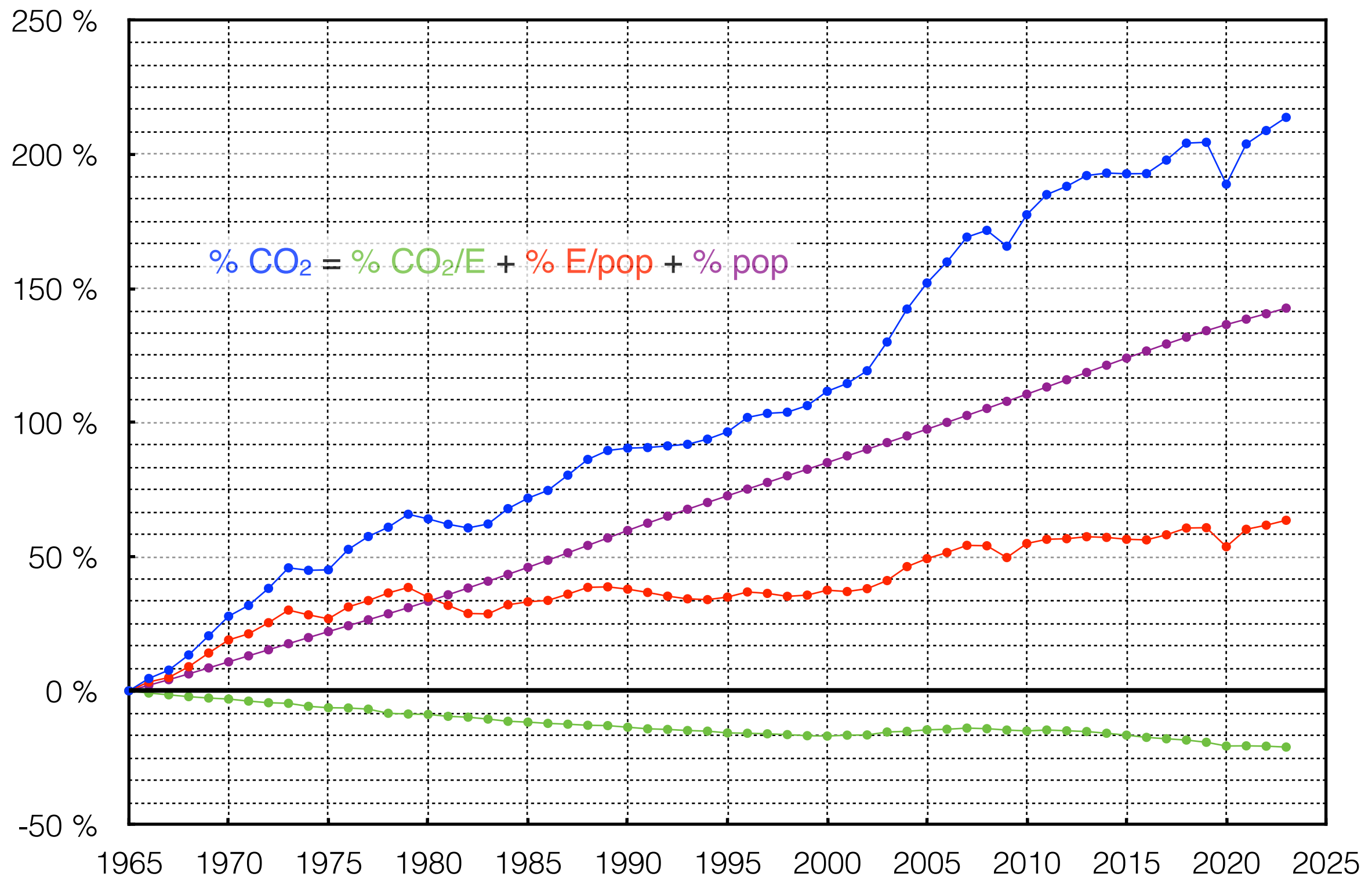
kWh/humain

Population
mondiale

humains

$$\% \text{CO}_2 = \% \frac{\text{CO}_2}{\text{énergie}} + \% \frac{\text{énergie}}{\text{population}} + \% \text{population}$$

Que faire d'ici 2050 ?



Que faire d'ici 2050 ?

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{énergie}} \times \frac{\text{énergie}}{\text{population}} \times \text{population}$$

Objectif	À faire !	Derniers 25 ans	ONU 2050
----------	-----------	-----------------	----------

x 1/4			
-------	--	--	--

	x 1/6 !		
--	---------	--	--

Baisse de 5 à 6% par an durant les 30 prochaines années...			
--	--	--	--

Passé : baisse de 6% sur les 25 dernières années...			
---	--	--	--

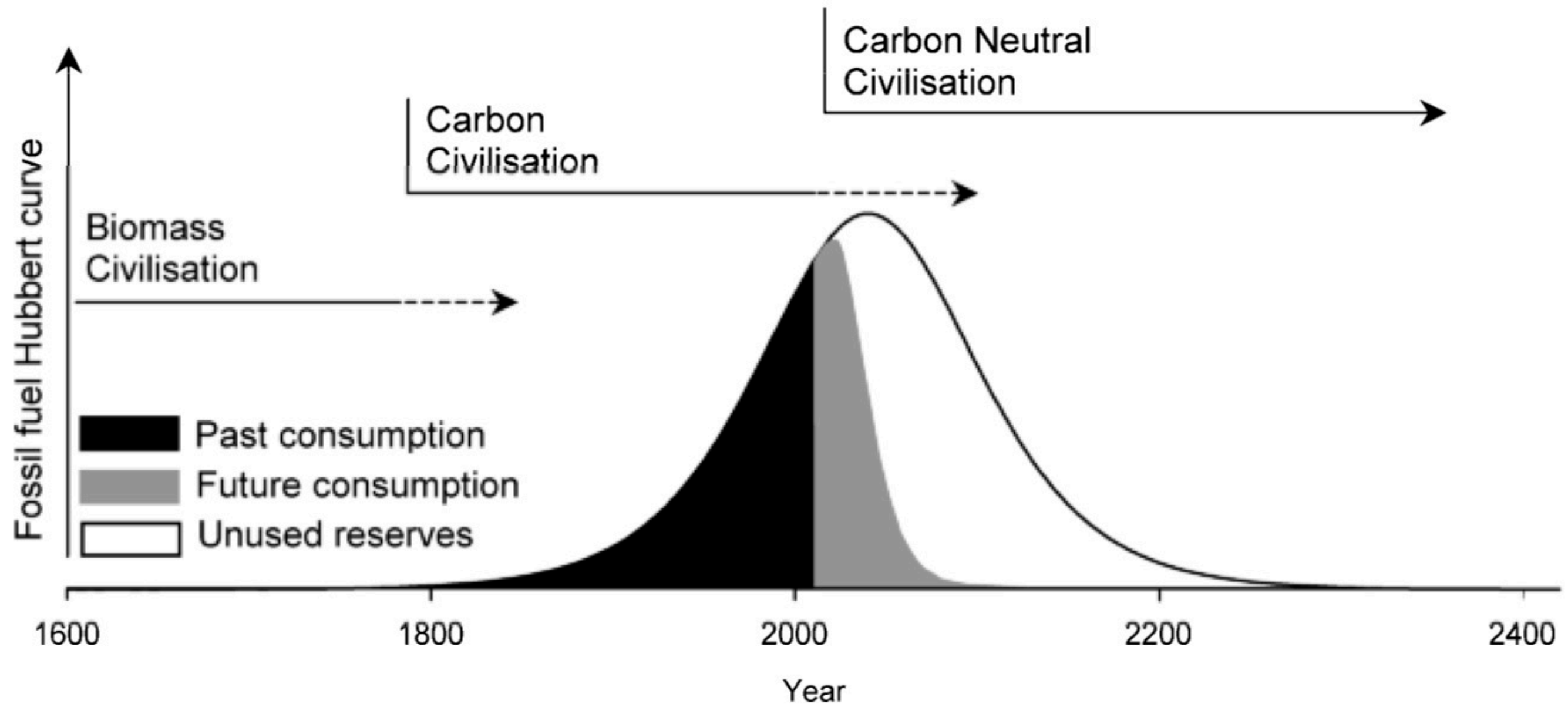
		x 1,21	
--	--	--------	--

			x 1,23
--	--	--	--------

L'énergie consommé pourrait être x 1,5			
--	--	--	--

Il faut massivement décarboner l'énergie en augmentant de 50% sa disponibilité !

Subir ou choisir ?



Transition énergétique : les défis de la défossilisation ; Reflets de la physique, n°77 (Février 2024)

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2024/01/contents/contents.html>

Transition énergétique ?

OBJECTIFS

SECURITE



Capacité de répondre de manière fiable à la demande d'énergie actuelle et future, à résister et à rebondir après un choc systémique.

Si elle manque, le système est vulnérable.



DURABILITE

Capacité d'un système énergétique à ménager les ressources, à limiter les pollutions et le changement climatique.

Si elle manque, le système est insupportable.

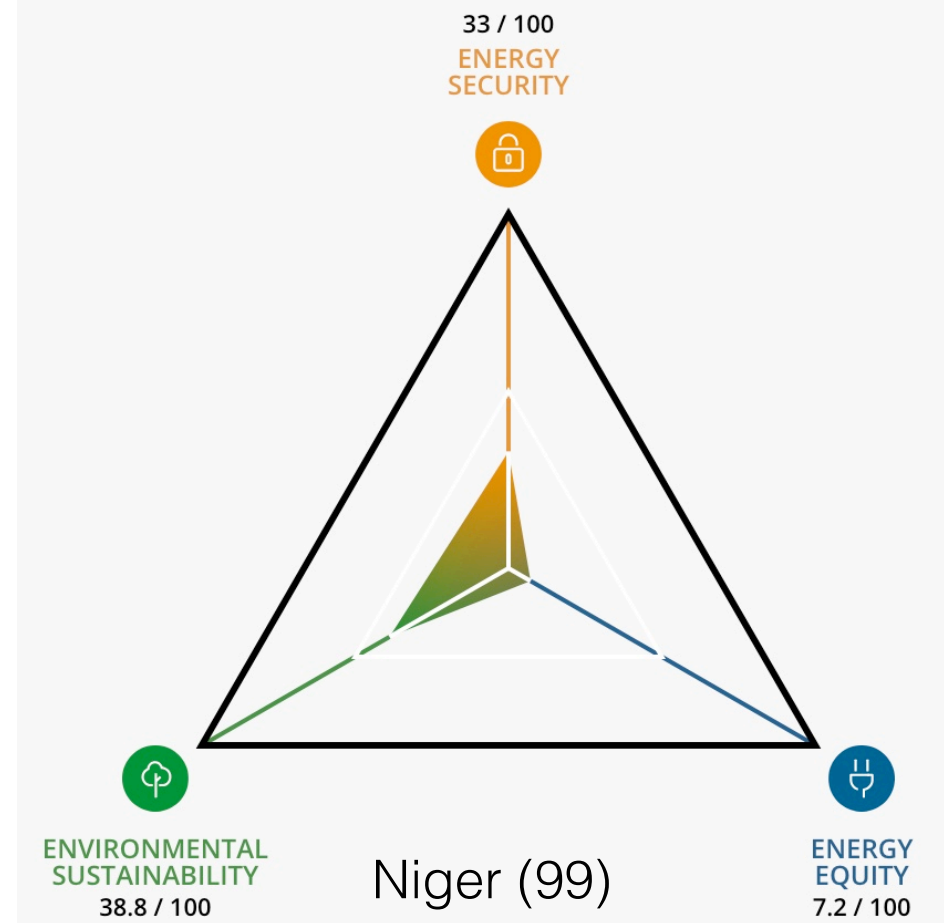
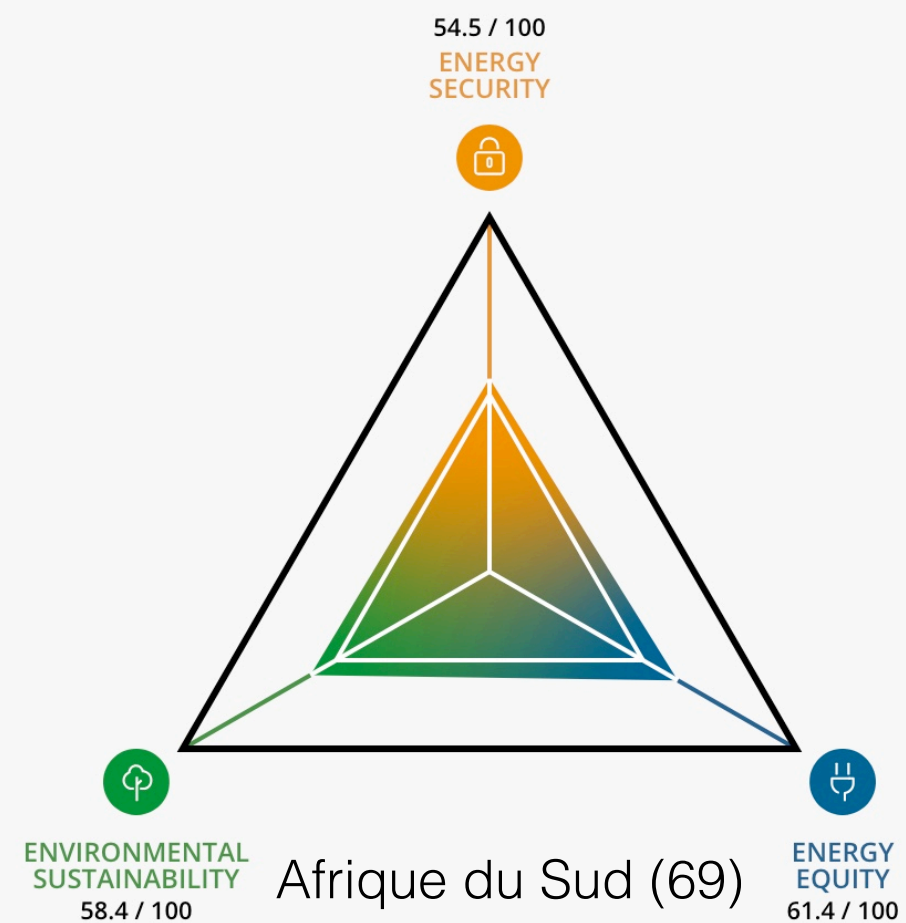
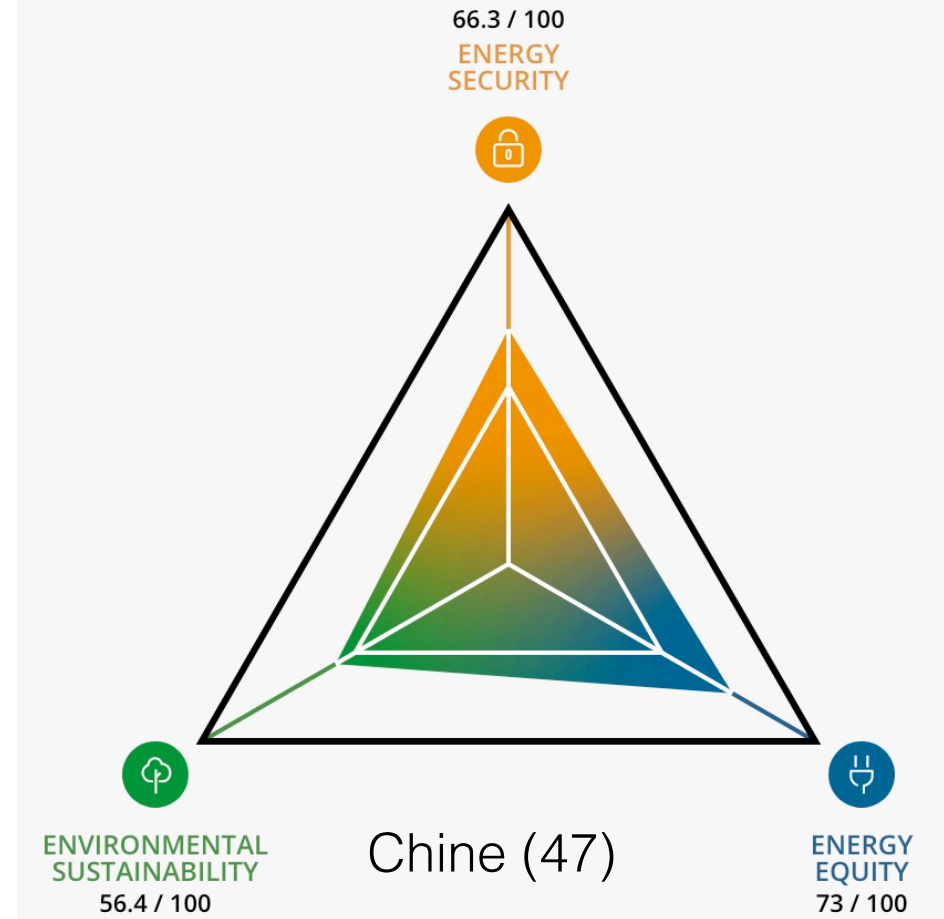
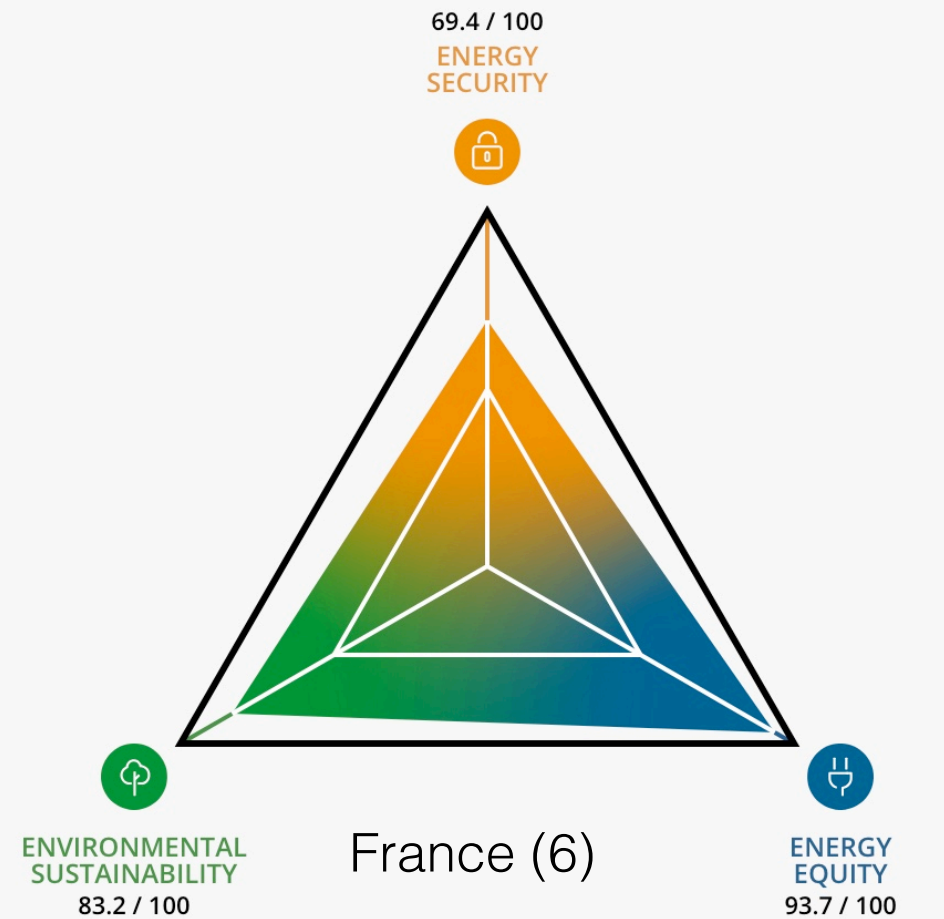


EQUITE

Capacité de fournir un accès universel à une énergie fiable et abordable pour un usage domestique et commercial.

Si elle manque, le système est inacceptable.

Trilemme énergétique d'après le World Energy Council



Transition énergétique ?

MOYENS

SOBRIETE



EFFICACITE



De quoi peut-on se passer ?
Peut-on atténuer les conséquences ?

Réduire la demande d'énergie primaire.
Attention à l'effet rebond !

Peut-on utiliser une source
ayant moins d'impact ?



SUBSTITUTION

D'après Daniel Suchet

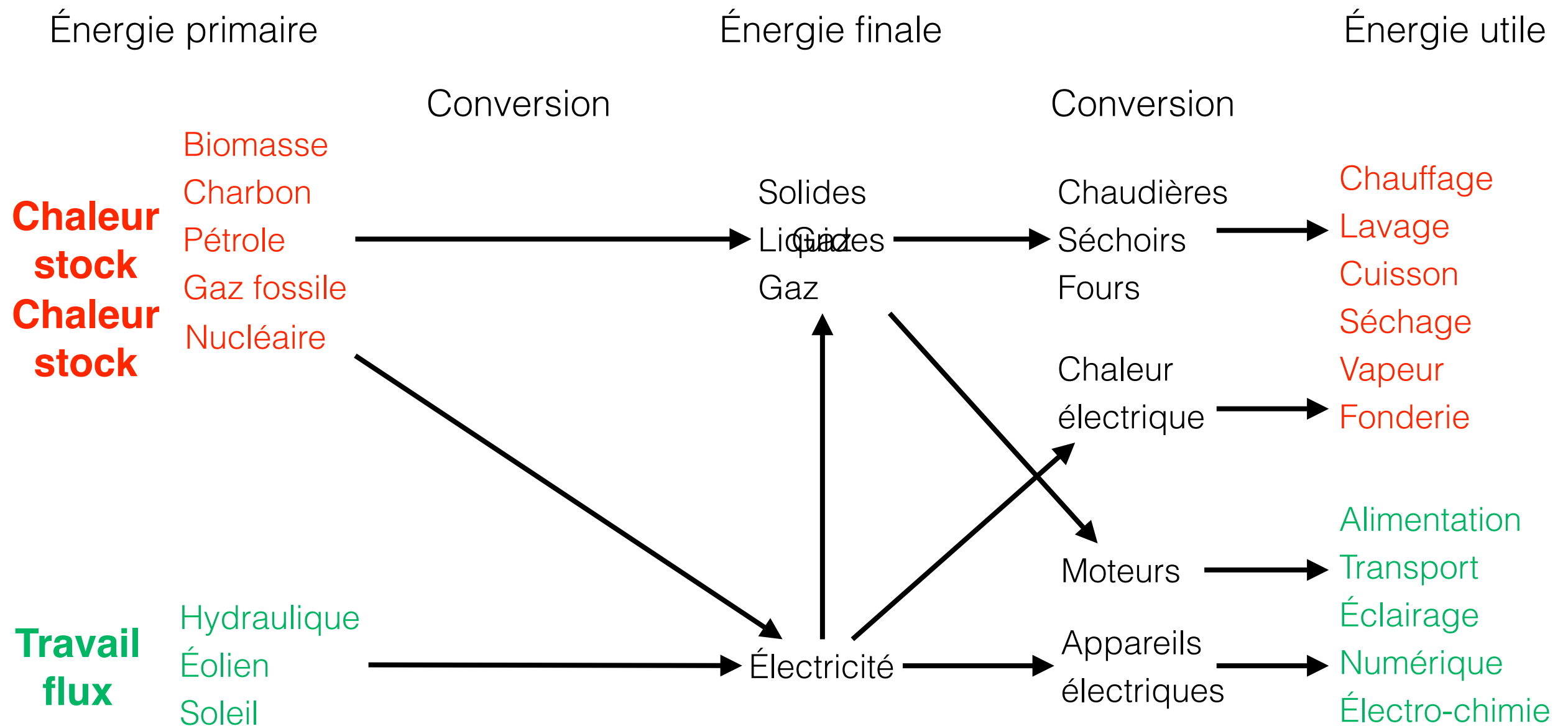


Attention aux mesures inutiles
ou contreproductives !

COMPENSATION

Soutenabilité forte (Hermann Daly, 1990) : utiliser les EnR à un rythme plus lent que leur renouvellement naturel, construire et réparer ces alternatives grâce aux énergies de stock, produire des déchets à un rythme plus lent que leur élimination naturelle.

Transition énergétique ?



Ne faudrait-il pas aussi réduire notre consommation d'énergie ?

- *Face à la puissance - Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, sous la direction de François Jarrige et Alexis Vrignon, La Découverte (2020).

- *Sans transition - Une nouvelle histoire de l'énergie*, Jean-Baptiste Fressoz, Seuil (2024)

Source : Nick Eyre, From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition, *Energy Efficiency* 14, 77-97 (2021)

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-021-09982-9>