

# L'ingénieur face aux problématiques de l'énergie

*Pascal Finaud-Guyot*

[pascal.finaud-guyot@umontpellier.fr](mailto:pascal.finaud-guyot@umontpellier.fr)

# Pourquoi ce cours?

- Ingénierie étroitement liée aux problématiques de l'énergie
  - Activités de transformation matérielle
  - Activités de conception d'activités de transformation
- Définir l'énergie et présenter un état des lieux
- Comprendre les liens entre activités d'ingénierie et énergie

# Quelques définitions

# L'énergie est ce qui compte une transformation

Modification de température

Modification de forme

Modification de vitesse

Modification de la position dans un champ magnétique,  
gravitationnel, électrique, ...

Modification de la composition chimique

Modification de la composition atomique

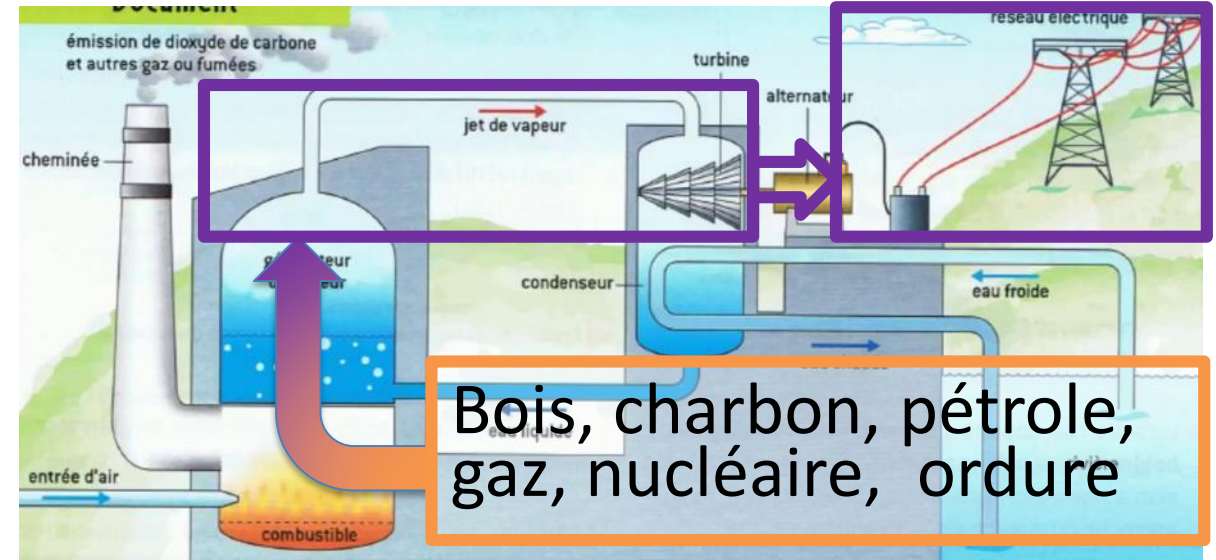


# Quelques définitions

- Energie primaire: ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés (le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium)

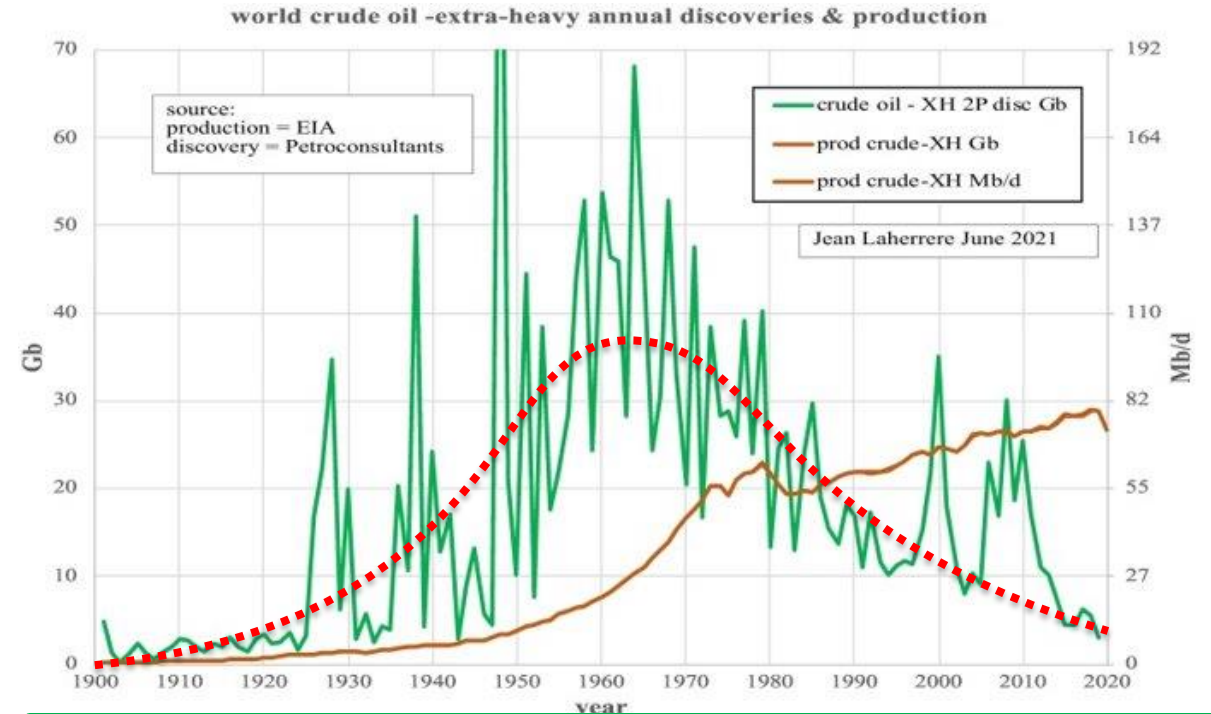
- Energie secondaire: énergie obtenue par la transformation d'une énergie primaire (ex: électricité d'origine thermique)

- Energie finale (ou disponible): énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité au foyer, etc.).



# Quelques définitions

- Energie de stock:
  - obtenue par transformation d'un stock matériel : pétrole, gaz, charbon, uranium
  - => Energie épuisable (théorème de Weierstrass des valeurs extrêmes)
- Problématiques associées
  - Comment évaluer les réserves/ressources? définition de "stock" entre géologues et politiques/économistes
  - Quel est le taux d'extraction annuel (aujourd'hui et dans le futur) ?

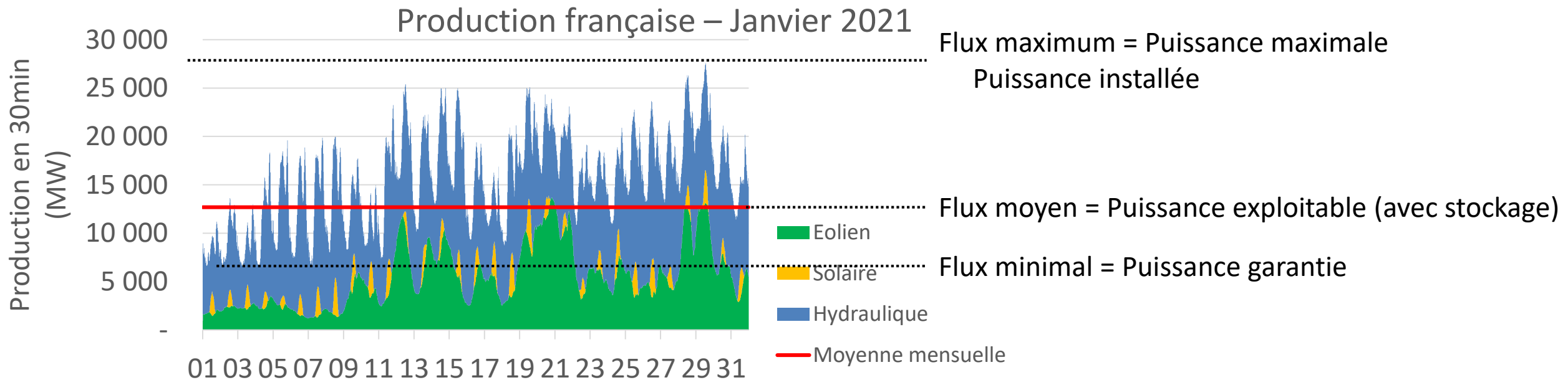


Découverte annuelle de pétrole dans le monde

<https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100174>

# Quelques définitions

- Energies de flux : solaire, éolien, hydraulique, géothermie, biomasse, marine
  - Estimation du flux annuel/instantané ? Techniquement et économiquement ?

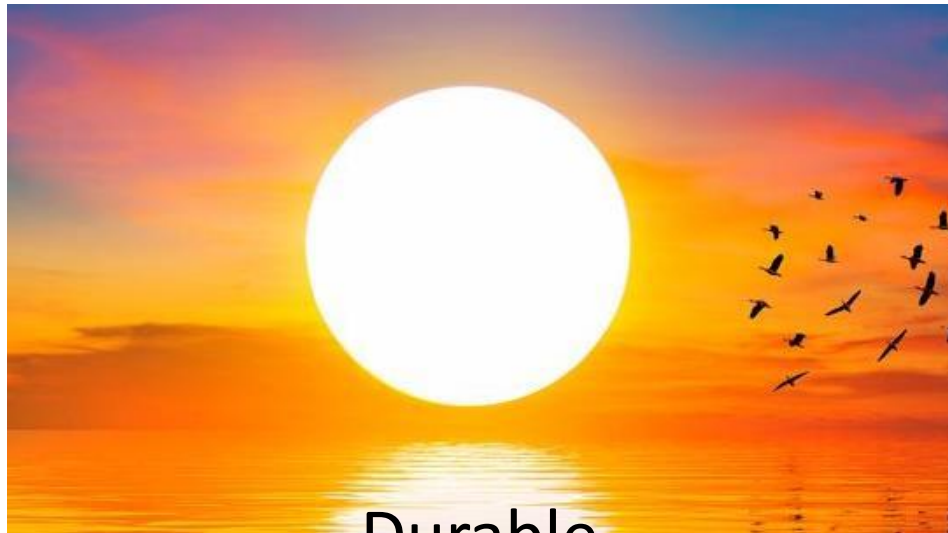




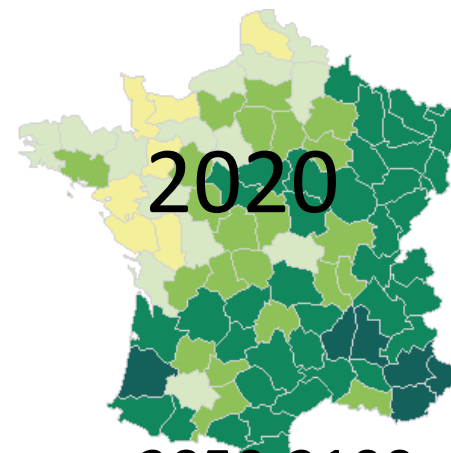
# Quelques définitions

- Energie renouvelable

- dérivée de processus naturels en perpétuel renouvellement  
solaire, éolien, hydraulique, géothermique ou végétal (bois, biocarburants, etc.)
- Renouvelable n'est pas durable...

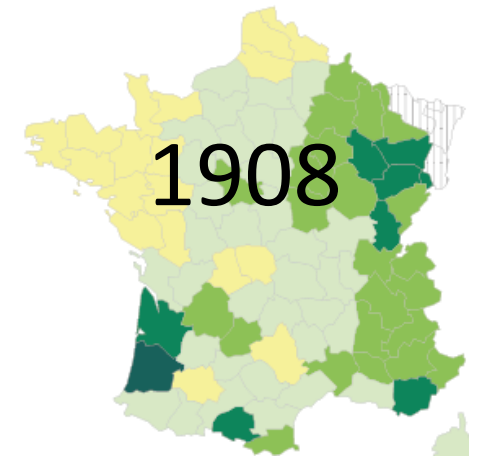


Durable



2050-2100:  
-10 à -40%

Couverture  
forestière  
française



Durable ?

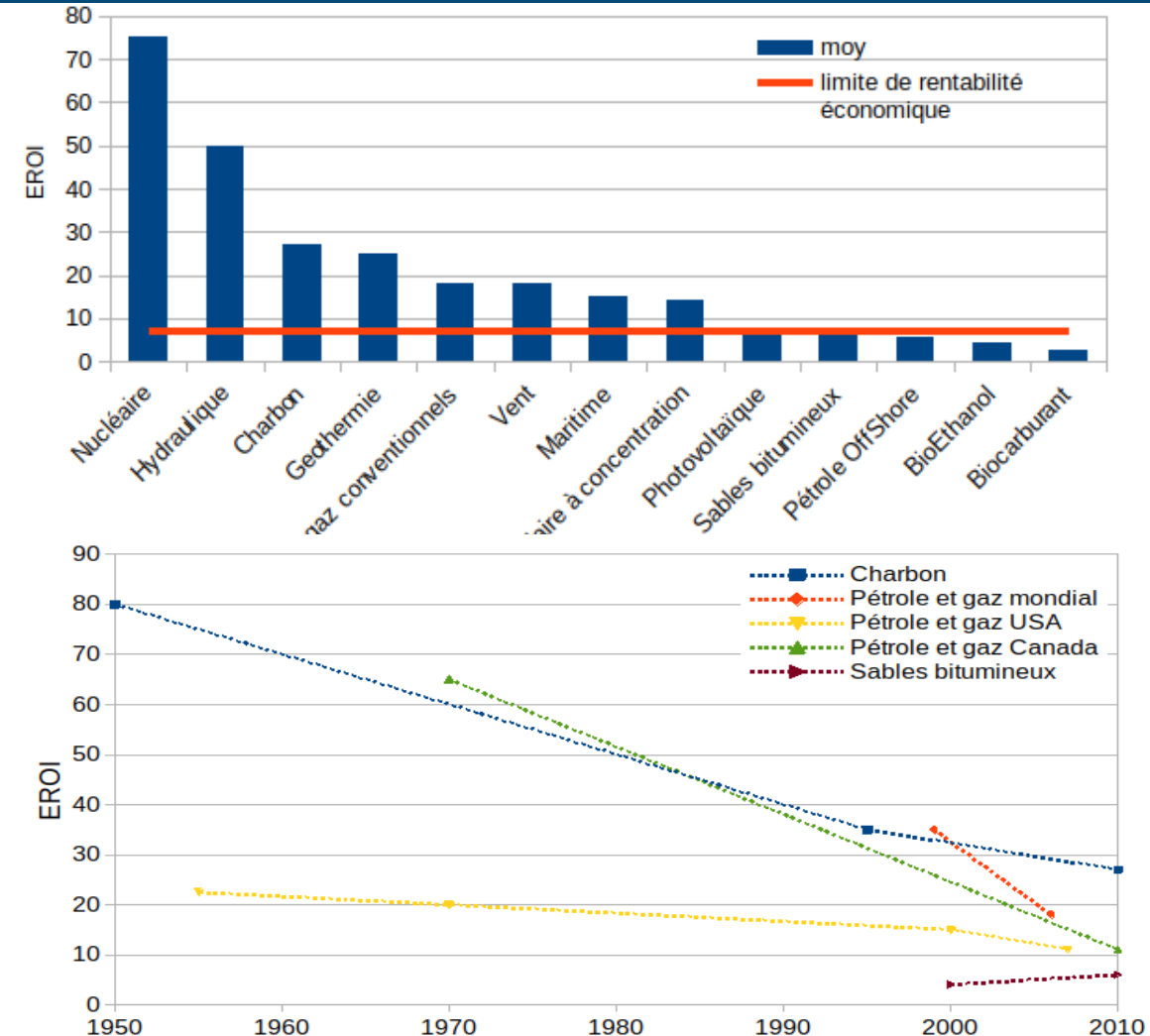


# Corollaire de ces énergies

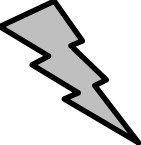
- Energie de stock:
  - ne peut être exploité indéfiniment
  - la production passe par un maximum
- Energie de flux:
  - consommation garantie = minimum du flux primaire
  - consommation exploitable = moyenne de flux primaire (en utilisant du stockage)
- Energie renouvelable : ne peut être exploitée durablement au-delà du taux de renouvellement naturel

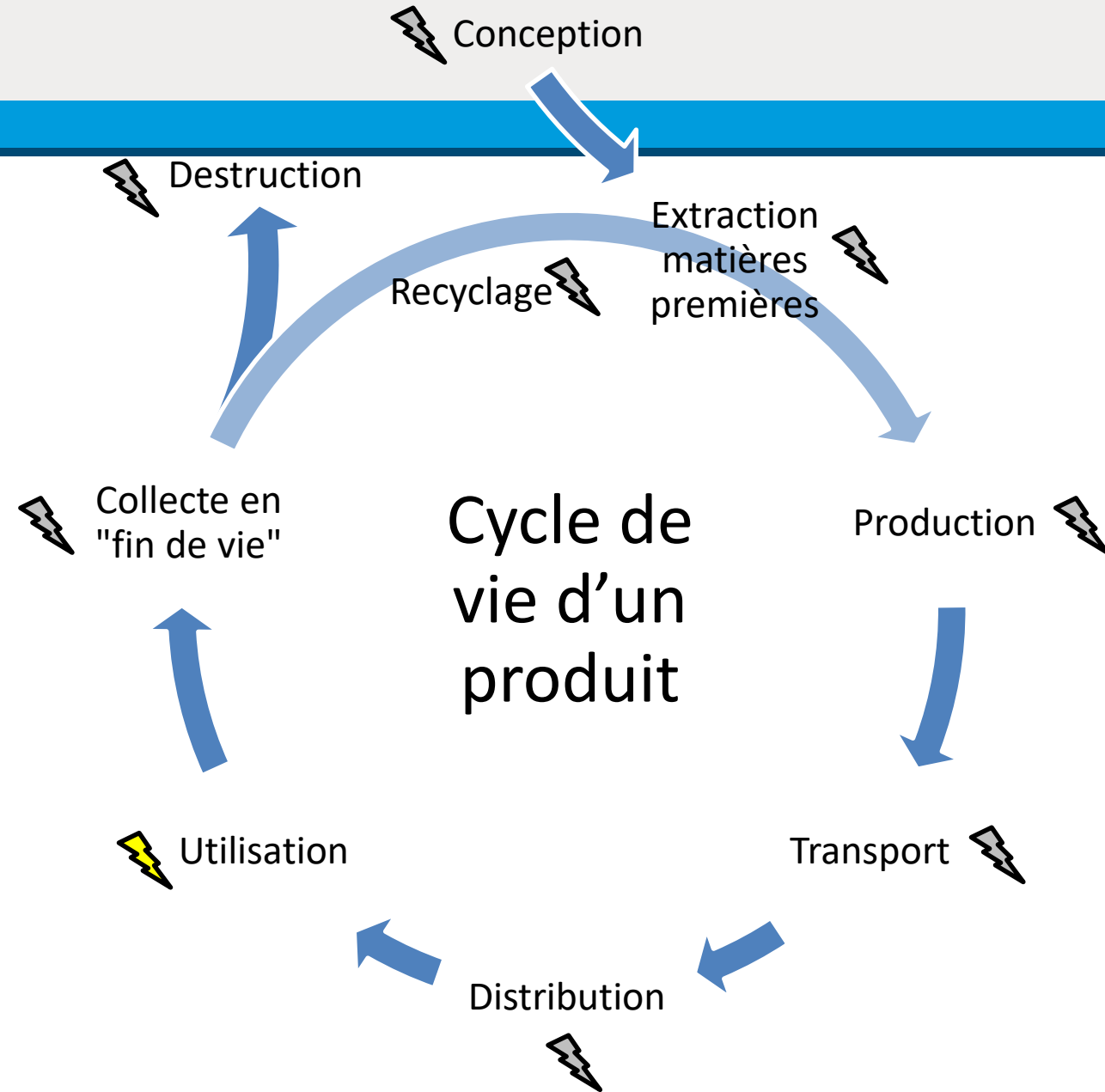
# EROI (Energy Return On Investment) = TRE (Taux de retour énergétique)

- quantité d'énergie à investir pour extraire 1 unité d'énergie donnée
- rentabilité économique  $EROI \approx 7$
- Energie de flux: nécessité d'inclure le coût du stockage de l'énergie pour une vision réaliste
- Energie de stock: diminution de l'EROI avec le temps  
difficulté pour accéder au stock malgré les progrès technologiques



# Quelques définitions

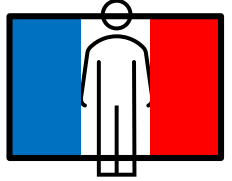
 **Energie grise (ou intrinsèque):**  
énergie consommée lors du cycle de vie d'un matériau ou d'un produit : la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'entretien et enfin le recyclage, à l'exception notable de l'utilisation



- Puissance: quantité d'énergie échangée entre 2 systèmes par unité de temps
- Un réseau (électrique) fonctionne en assurant
$$\text{Production}(x, t) = \text{Demande}(x, t) \quad \forall x, t$$
  - ⇒ A tout instant, la production opérationnelle doit couvrir la demande.
  - ⇒ Nécessité d'une flexibilité de la production

- Puissance installée : puissance théorique d'une installation de production en fonctionnement optimal
- Puissance instantanée : énergie produite pendant un court intervalle de temps, divisée par cet intervalle de temps (p.ex.  $\frac{1}{4}$  d'heure)
- Puissance moyenne : énergie totale produite dans une année, divisée par le nombre d'heures dans une année (8760)

# Les unités de l'énergie

	
Unité physique: le Joule	170 GJ / an, direct et indirect
Unités usuelles pour un français 1 kWh (3,6 MJ) 1 Litre de carburant (10kWh) 1 kCalorie ( $\approx$ environ 4500J):	50 000 kWh / an  2000 – 3000 Cal / j / pers
Unité de l'énergéticien: la Tonne Equivalent Pétrole (TEP) 1 tep = 41,8GJ = 11600kWh	alimentation:  4-5 tep / an
Unité du physicien des particules: l'électron-volt (ev) 1 ev $\approx$ 1,6.10 <sup>-19</sup> J	

# L'énergie en euros...

- Plus une énergie est diffuse et non pilotable et plus elle coûtera cher (sera difficile) à extraire.
- Toute énergie primaire est gratuite: personne n'a payé pour faire apparaître le pétrole, le gaz, le soleil ou le vent. Le "coût de l'énergie" correspond uniquement à des revenus humains. La Nature ne demande jamais rien.




# L'énergie, c'est de la physique !

*L'énergie est la grandeur qui mesure la transformation du monde*

- L'énergie est régie par la physique/chimie:
  - Loi de conservation de l'énergie: on ne peut rien faire d'autre qu'exploiter une énergie déjà existante dans l'environnement pour la transformer en une autre
  - L'énergie quantifie la transformation => il n'y a pas d'énergie propre ou sale ou verte. Choisir un type d'énergie, c'est choisir les contreparties que l'on accepte
- Et l'être humain peut écrire ce qu'il veut ici, cela n'y changera rien

# Histoire de l'énergie humanité

# L'énergie à travers le temps



-400 000 ~ -300 000	Domestication du feu
-6000	Exploitation du pétrole
-4000	Exploitation du charbon
-3500	Métallurgie du Cuivre par les Sumériens
-2700	Energie humaine: Les pyramides
-2000	Domestication des « gros animaux »
0	Domestication de l'eau: -25 en Grèce, 31 en Extrême orient
850~1270	Domestication du vent: ~62 Héron d'Alexandrie, 850 en Perse, 1270 en Europe
1855-1860	Exploitation industrielle du pétrole: 1857: 1 <sup>ère</sup> raffinerie en Roumanie, 1859: 1 <sup>er</sup> puit d'exploitation dédié (William Drake à Titusville)
1951	Production d'électricité nucléaire civile (Idaho Falls, USA)

- Energies de plus en plus concentrées
- Ere industrielle basée sur des énergies de stock (charbon, pétrole, gaz)

# Le grand remplacement

Monde historique (100% ENR)



Monde actuel riche en énergie



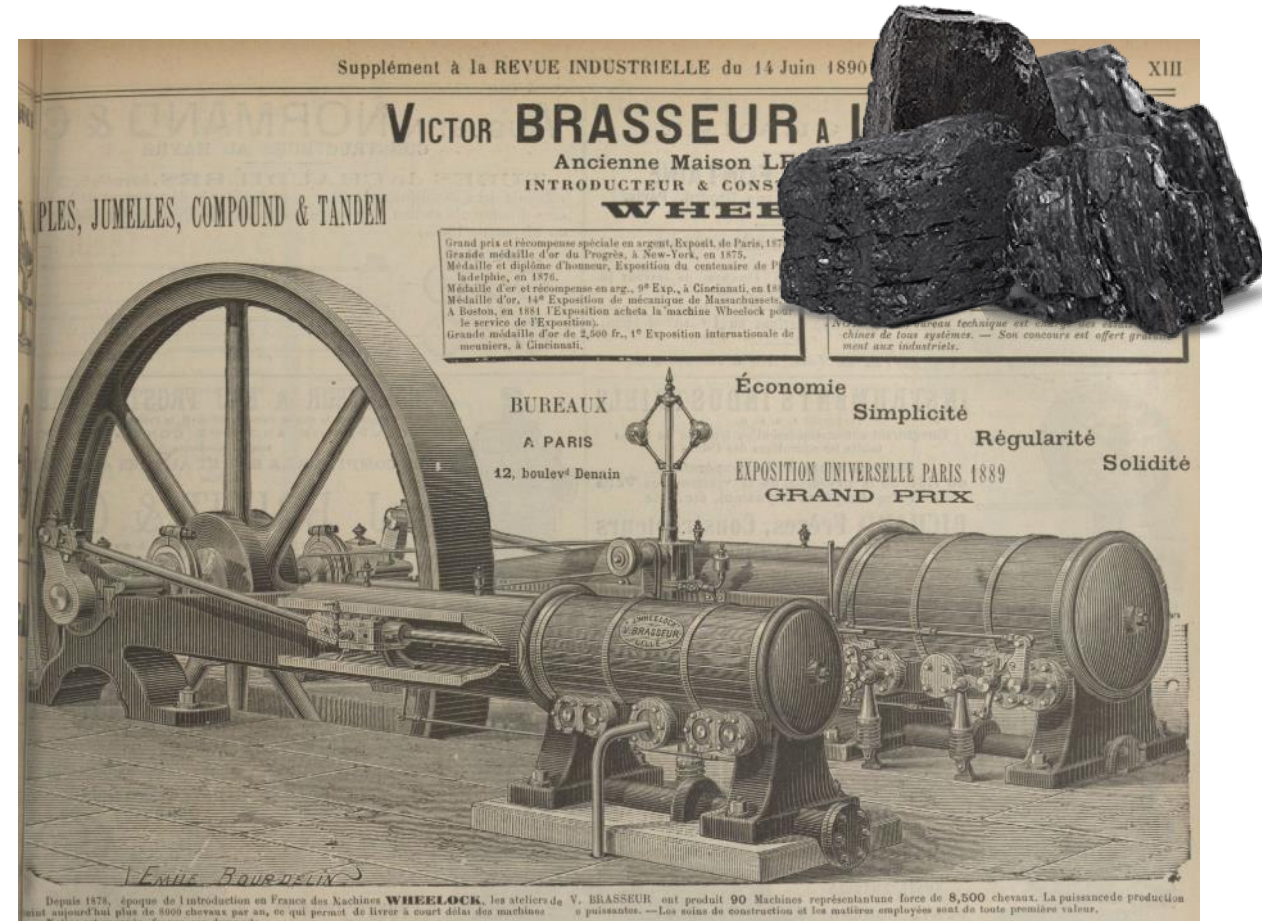


# Le grand remplacement

Monde historique (100% ENR)



Monde actuel riche en énergie





# Le grand remplacement

Monde historique (100% ENR)



Monde actuel riche en énergie





# Le grand remplacement

Monde historique (100% ENR)



Monde actuel riche en énergie



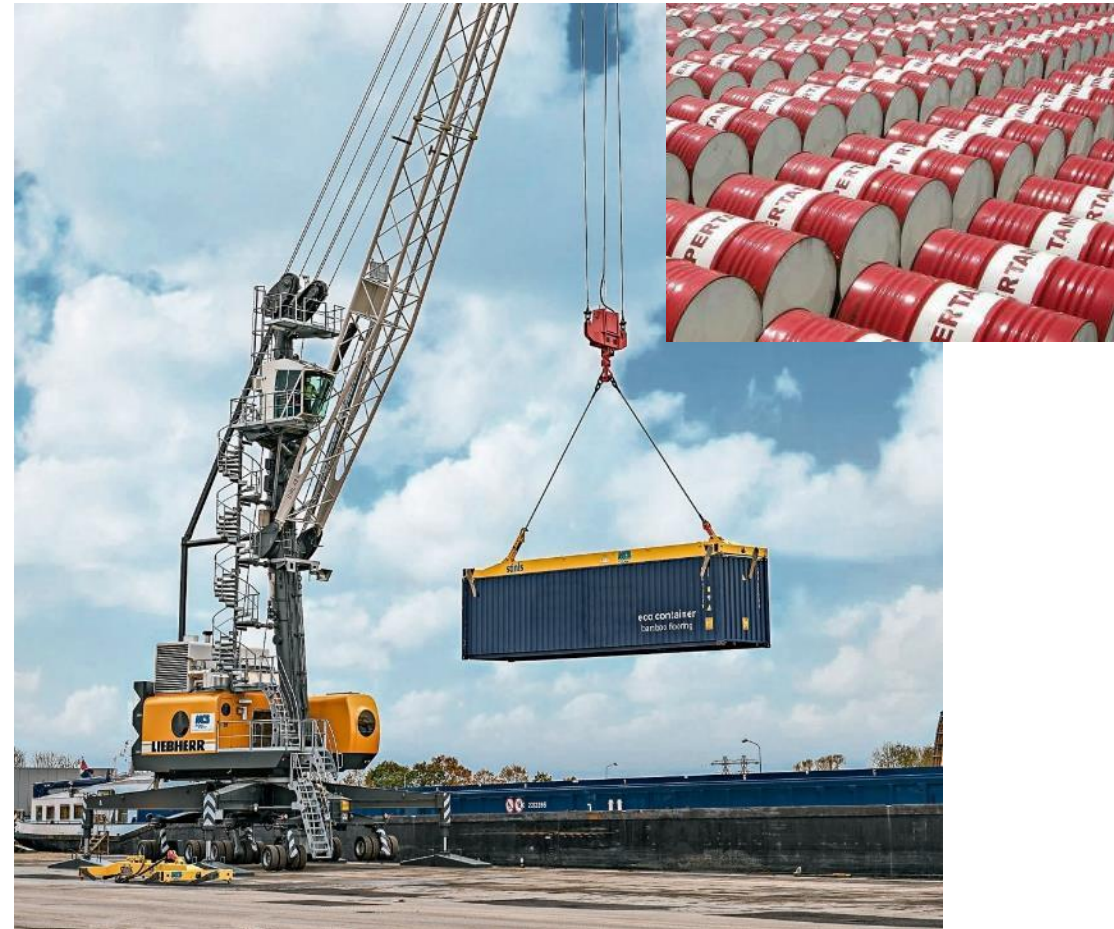


# Le grand remplacement

Monde historique (100% ENR)



Monde actuel riche en énergie





# Le grand remplacement

## Monde historique (100% ENR)



## Monde actuel riche en énergie





# Pourquoi cette évolution?

1000 m<sup>3</sup> d'air à 80km/h



=

3mL de pétrole

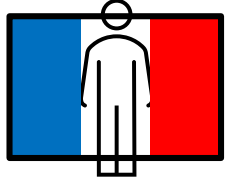


# Pourquoi cette évolution?

- Ascension sur le mont Aigoual
  - 80kg + 15kg, 9.81m/s<sup>2</sup>, 1567m
  - Énergie fournie:  $mgh = 400\text{Wh}$
  - Tous les jours de l'année
    - => 150 kWh / an
  - Même énergie que dans 15L de pétrole

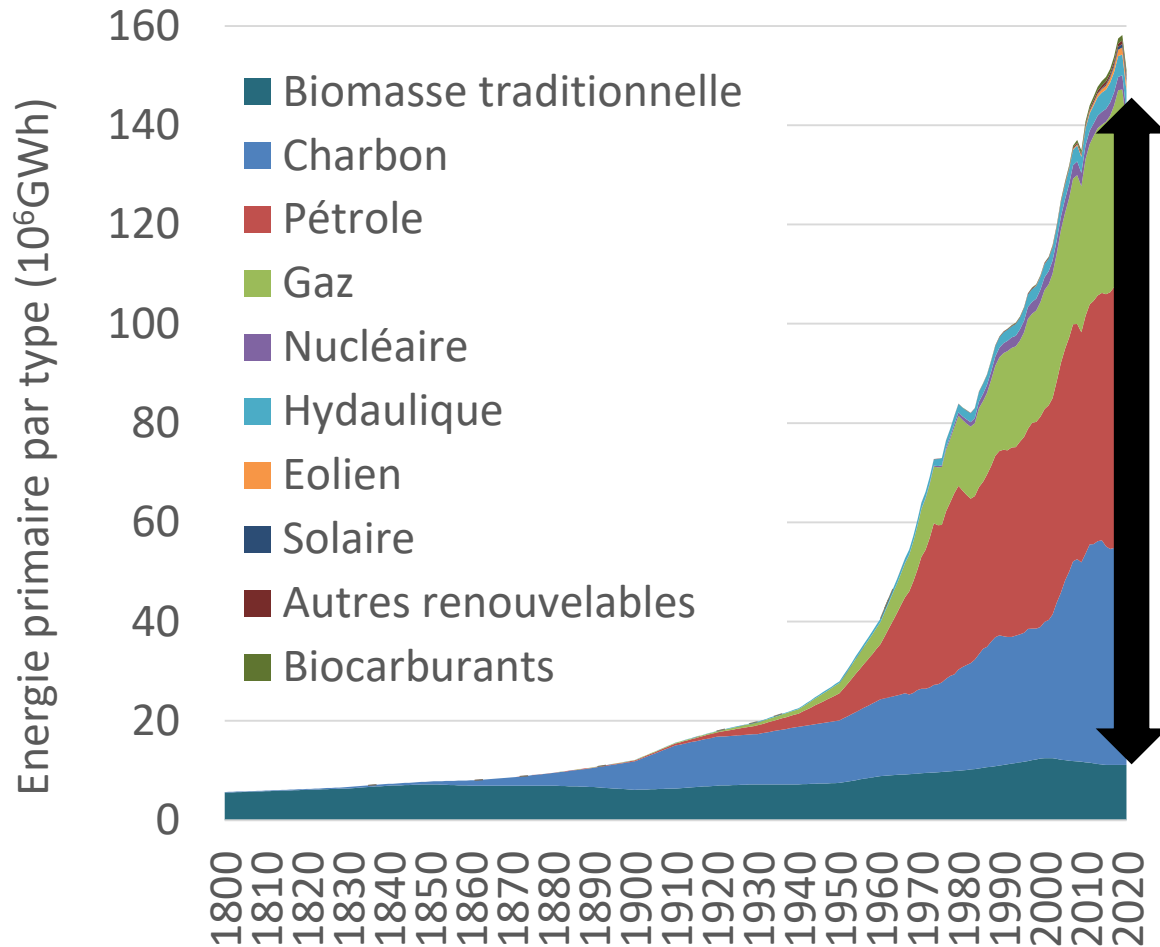


# Les unités de l'énergie

	
Unité physique: le Joule	170 GJ / an, direct et indirect
Unités usuelles pour un français 1 kWh (3,6 MJ) 1 Litre de carburant (10kWh) 1 kCalorie ( $\approx$ environ 4500J):	55 000 kWh / an alimentation: 2000 – 3000 Cal / j / pers
Unité de l'énergéticien: la Tonne Equivalent Pétrole (TEP) 1 tep = 41,8GJ = 11600kWh	4-5 tep / an
Unité de Jean-Marc Jancovici: l'équivalent esclave 1 EE = 100kWh	500 EE / an

# L'énergie à travers le monde

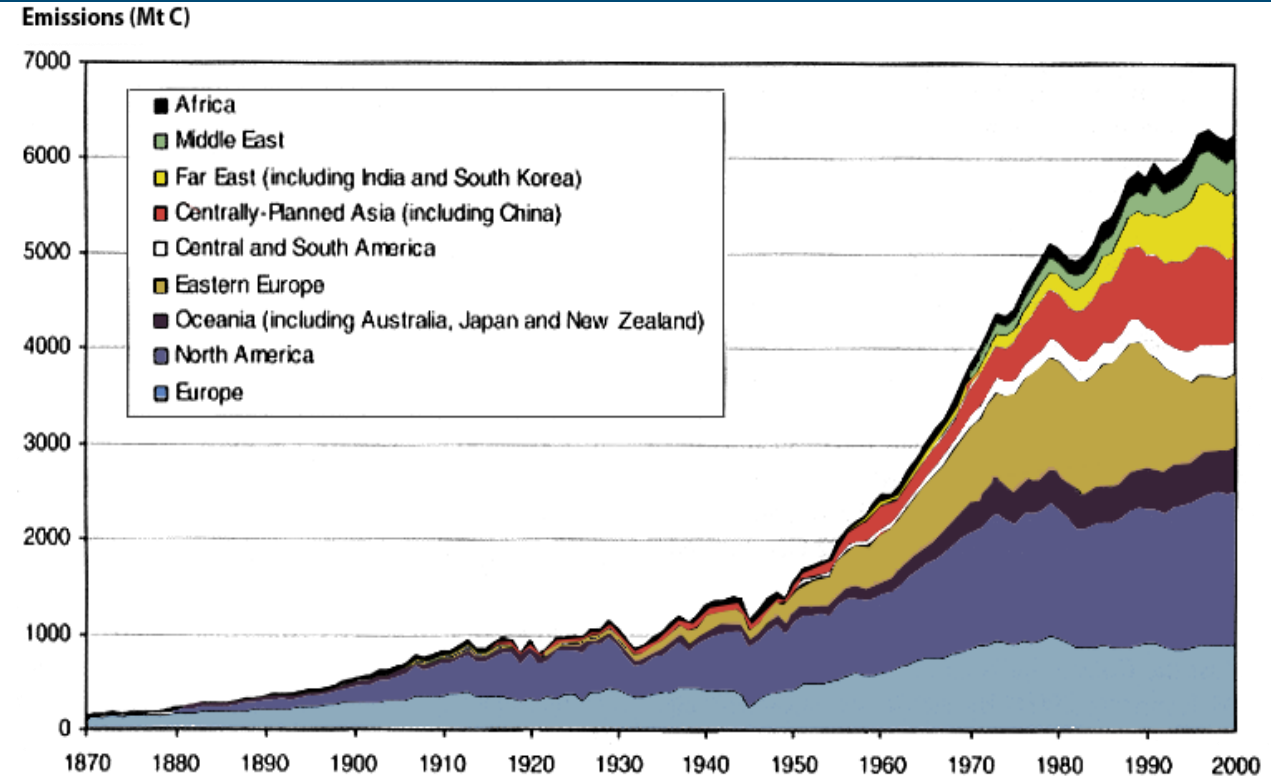
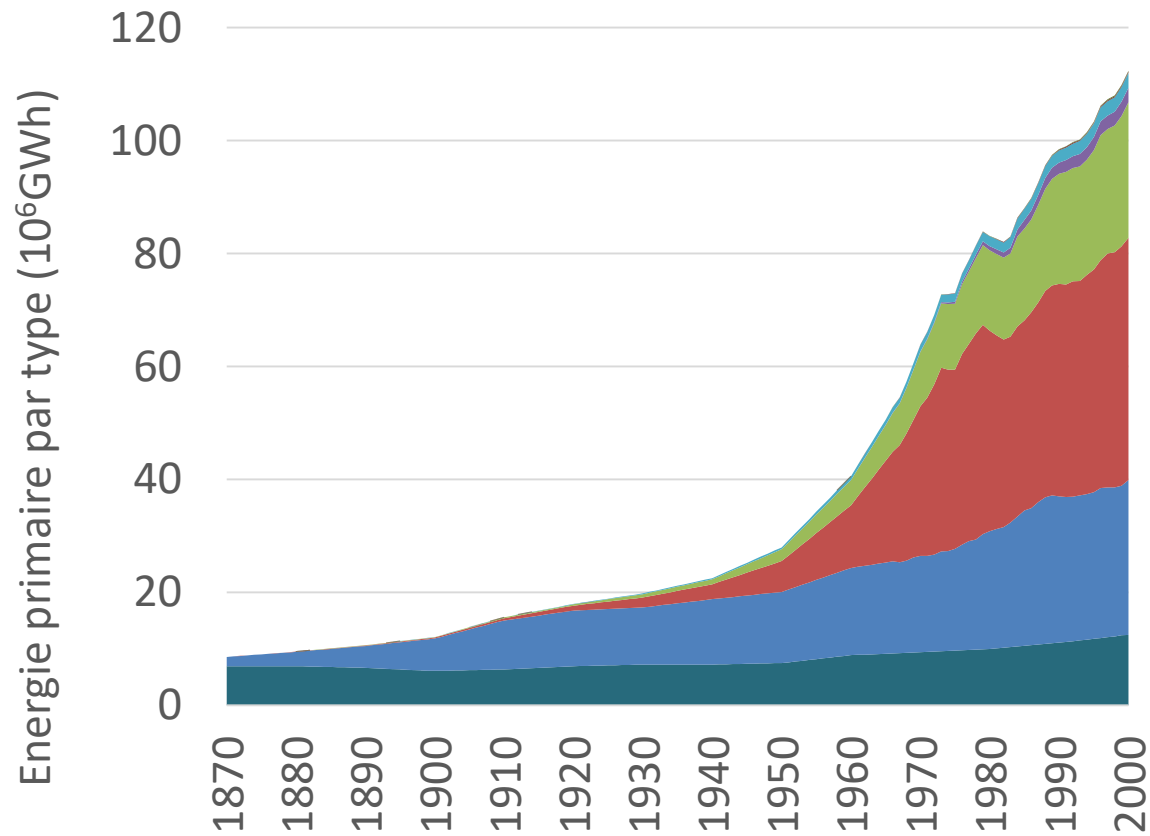
# Consommation de l'énergie mondiale



1. Augmentation « exponentielle » de la consommation d'énergie primaire
2. Aucune énergie n'a été remplacée par une énergie plus « moderne »
3. 85% des énergies sont des énergies de stock (Charbon, Pétrole, Gaz) et carbonées



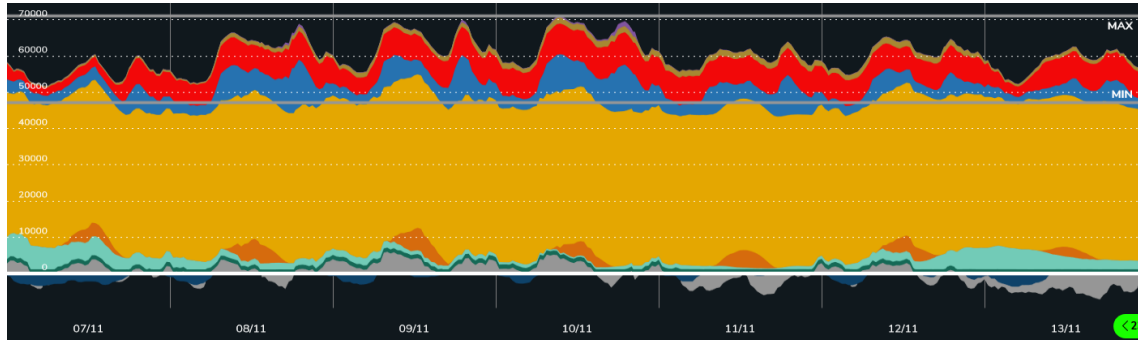
# Consommation de l'énergie vs Emissions CO2...



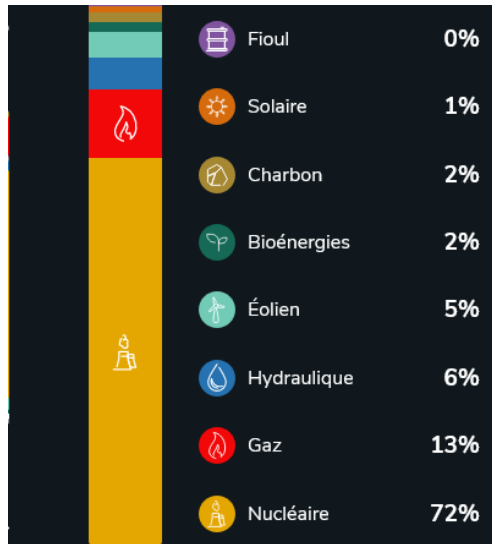
kWh = CO2

# Et en France ?

- Production électrique

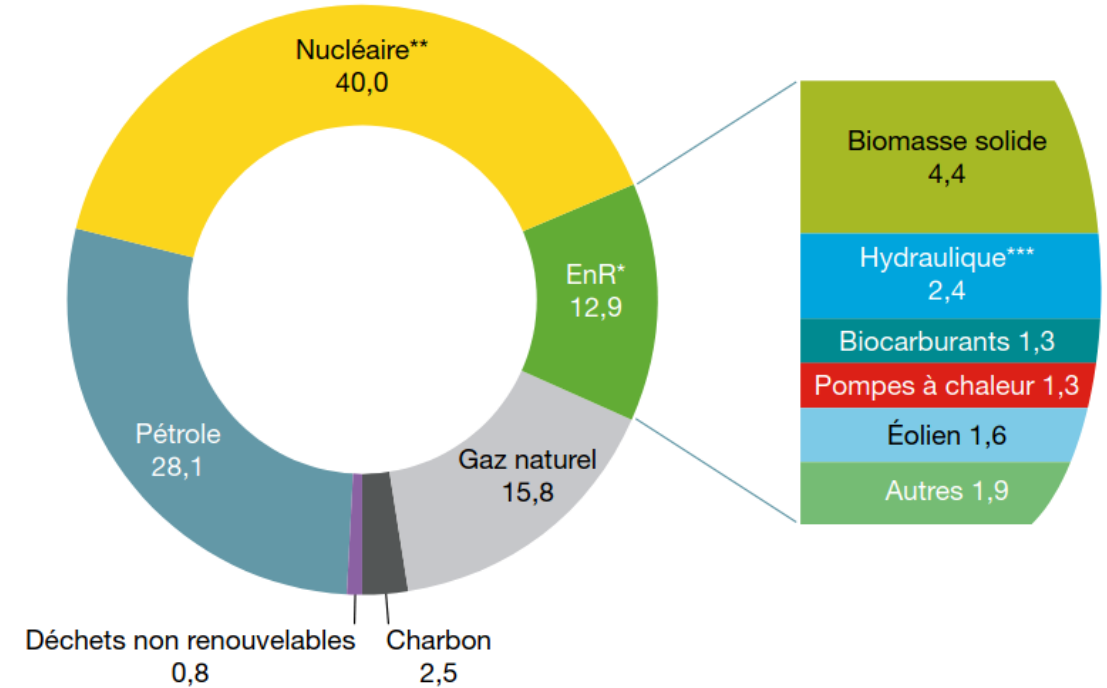


- Forte importance du nucléaire

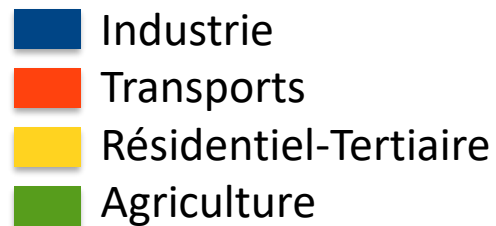
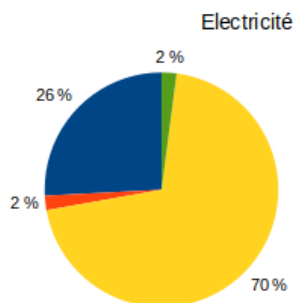
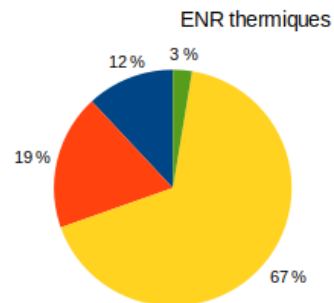
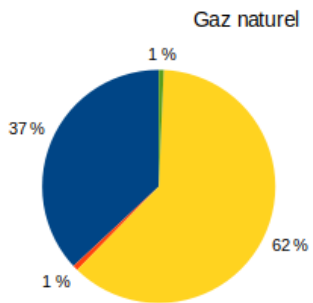
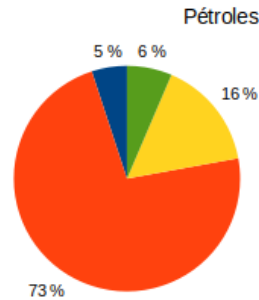
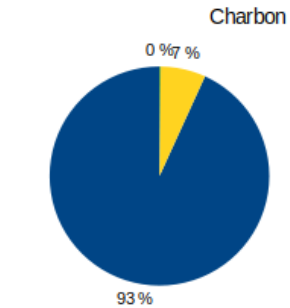


- Production globale

En % (données non corrigées des variations climatiques)



# Choisir son énergie



## • Charbon

- ~~Production d'électricité~~
- Coke dans les hauts-fourneaux
- Carbochimie => hydrocarbures

## • Pétrole

- Transports
- Chauffage domestique
- Matière première (plastiques)
- ~~Production d'électricité~~

## • Gaz naturel

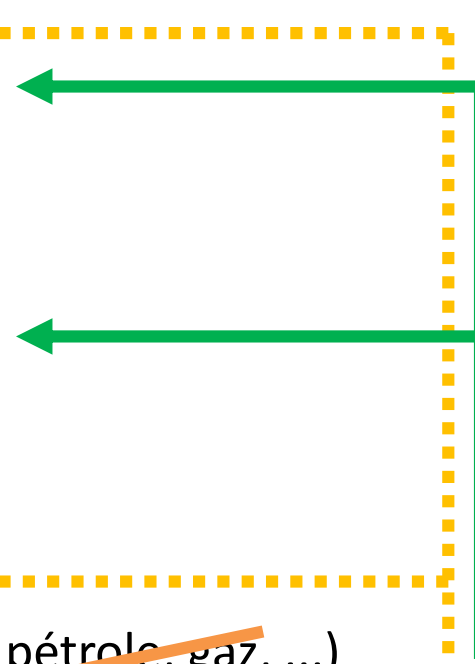
- Chauffage domestique et industriel
- Matière première (engrais)

## • ENR thermique

- Chauffage domestique (biomasse)
- Transports (biocarburant)

## • Electricité (Nucléaire, ENR électrique, ~~pétrole, gaz, ...~~)

=> Vers une énergie moins émettrice de GES



# Comparaison des énergies

	Pilotable	gCO2eq / kWh (1)	kWh / m2 (6)	Besoin en eau L / MWh (2)	Construction € / kW installé	Matériau (t/TWh) (3)	Rendement physique max.
Charbon	oui	1038	14000	1000-2000		1185	$r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$ $T_f = 0^\circ\text{C}$ $T_c = 1000^\circ\text{C}$ $r \leq 80\%$
Gaz	oui	598	14000	800-880		572	
Pétrole	oui	510 – 1170	14000				
Nucléaire	oui	1 – 220	12800	1000-2000	3000-7000 (3)	930	
Solaire thermique	non	7 – 89		200-3400			
Biogaz	oui	342					
Hydraulique	oui	40 – 70	240		750-1800 (4)	14070	
Eolien	non	8.7 - 10.9	250	20	1000-1500 (3)	10260	60%
Photovoltaïque	non	43.5 – 49	150	80	850-3000 (5)	16447	
Energie marine	non	16.3					

(1) Compilation personnelle d'après: [https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?renouvelable.htm](https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm)

(2) Calculs personnels d'après: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/ReportOnTheFirstQTR.pdf>

(3) D'après J.M. Jancovici. 2018-2019. Éléments de base sur l'énergie au XXIe siècle (Partie 7 – Les renouvelables). Cours magistraux dispensés à MINES ParisTech

(4) Estimation personnelle à partir du barrage des 3 gorges (Chine)

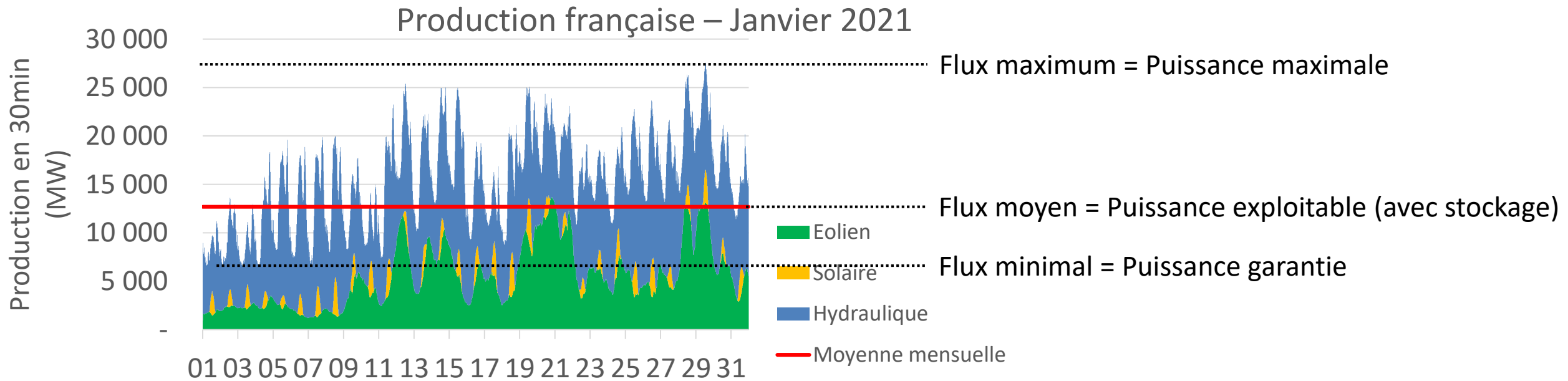
(5) <https://www.photovoltaique.info/fr/preparer-un-projet/quelles-demarches-realiser/choisir-son-modele-economique/>

(6) <https://www.greenandgreatagain.com/emprise-au-sol-toutes-les-energies-ne-se-valent-pas/>

# Stockage de l'énergie

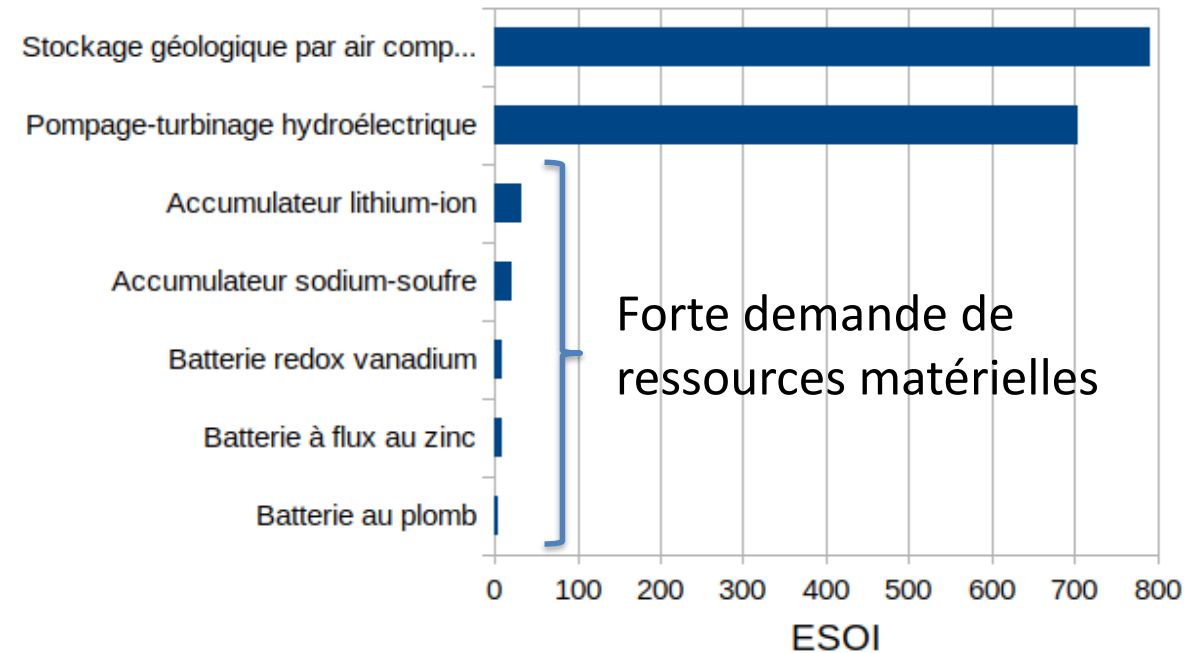
# Pourquoi stocker l'énergie ?

- Energies de flux : solaire, éolien, hydraulique  
=> fortes fluctuations journalières, saisonnières et annuelles
- 2 stratégies
  - Limiter la demande au flux disponible
  - Exploiter au maximum et stocker l'excédant d'énergie



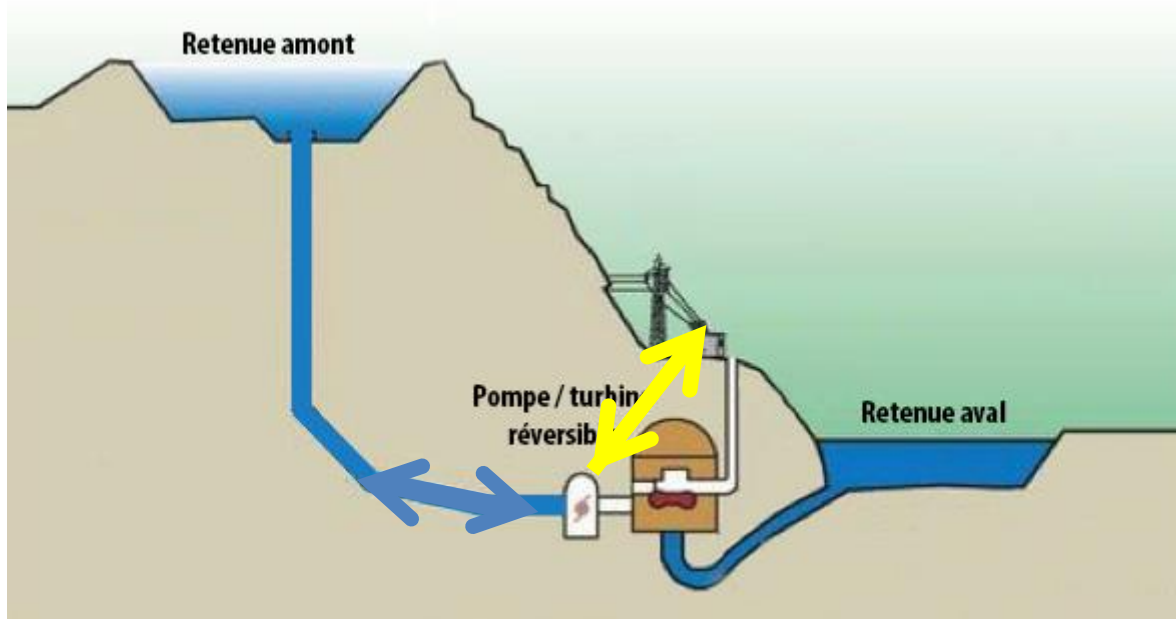
# Comment stocker de l'énergie?

- Réserve stratégique française:
  - 4 années de consommation en uranium
  - 130TWh de gaz ~ 4 mois
  - 90 jours de pétrole
- ESOI (Energy Stored On Investement)
  - quantité d'énergie stockable pendant toute la durée de vie d'un dispositif sur l'énergie requise pour le fabriquer
- Stocker 1% de la consommation française => 5TWh
  - Toutes les batteries du monde = 1TWh



- 1L d'essence 10kWh
- 1kg de batterie Lithium 0.4kWh
- 1000kg d'eau à 100m 0.27kWh

# Stockage d'énergie dans les barrages (STEP)



- Production d'électricité  
Turbinage de l'eau de la retenue amont vers la retenue aval
- Stockage d'énergie
  - Pompage de l'eau de la retenue aval vers l'amont

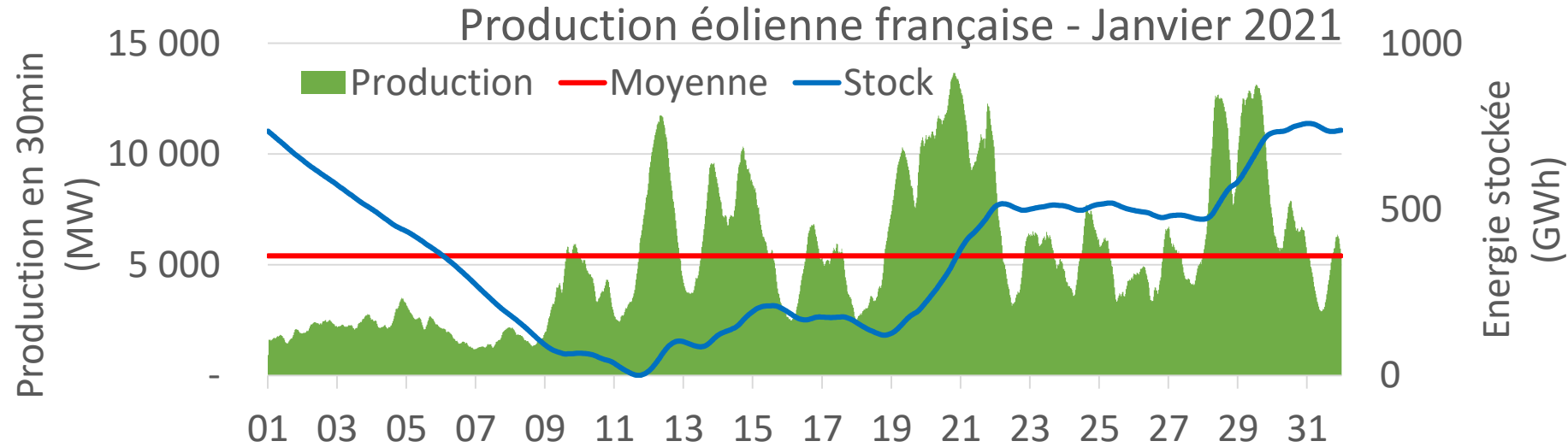


# STEP de Grand Maison



- 900m de dénivelé
- Retenue amont:  $132 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Retenue aval:  $14.3 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Energie stockable:
  - $mgh = 35GWh$
  - 30 minutes de la consommation nationale
- Rendement: 78%

# STEP, solution crédible pour l'éolien?

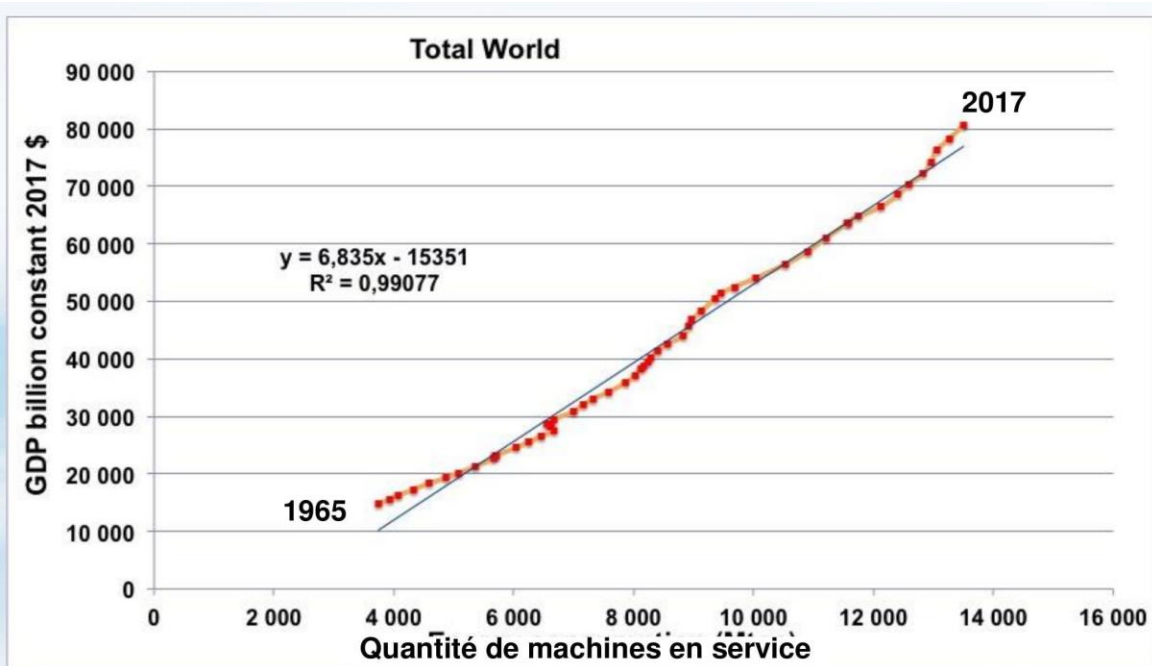


- Energie à stocker: 760GWh
- STEP de 10m de haut
- Volume d'eau:  
 $2.8 \times 10^{10} \text{m}^3$

- 2 sites d'installation possibles
  - le long des cotes métropolitaines.... 5800km
    - bande de 480m de large
  - dans la région parisienne ..... 2800km<sup>2</sup>
    - superficie de l'unité urbaine de Paris (411 communes, 11 Millions d'habitants)

# Energie et le monde qui nous entoure

# Energie et économie



Energie consommée (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde. Données primaires World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

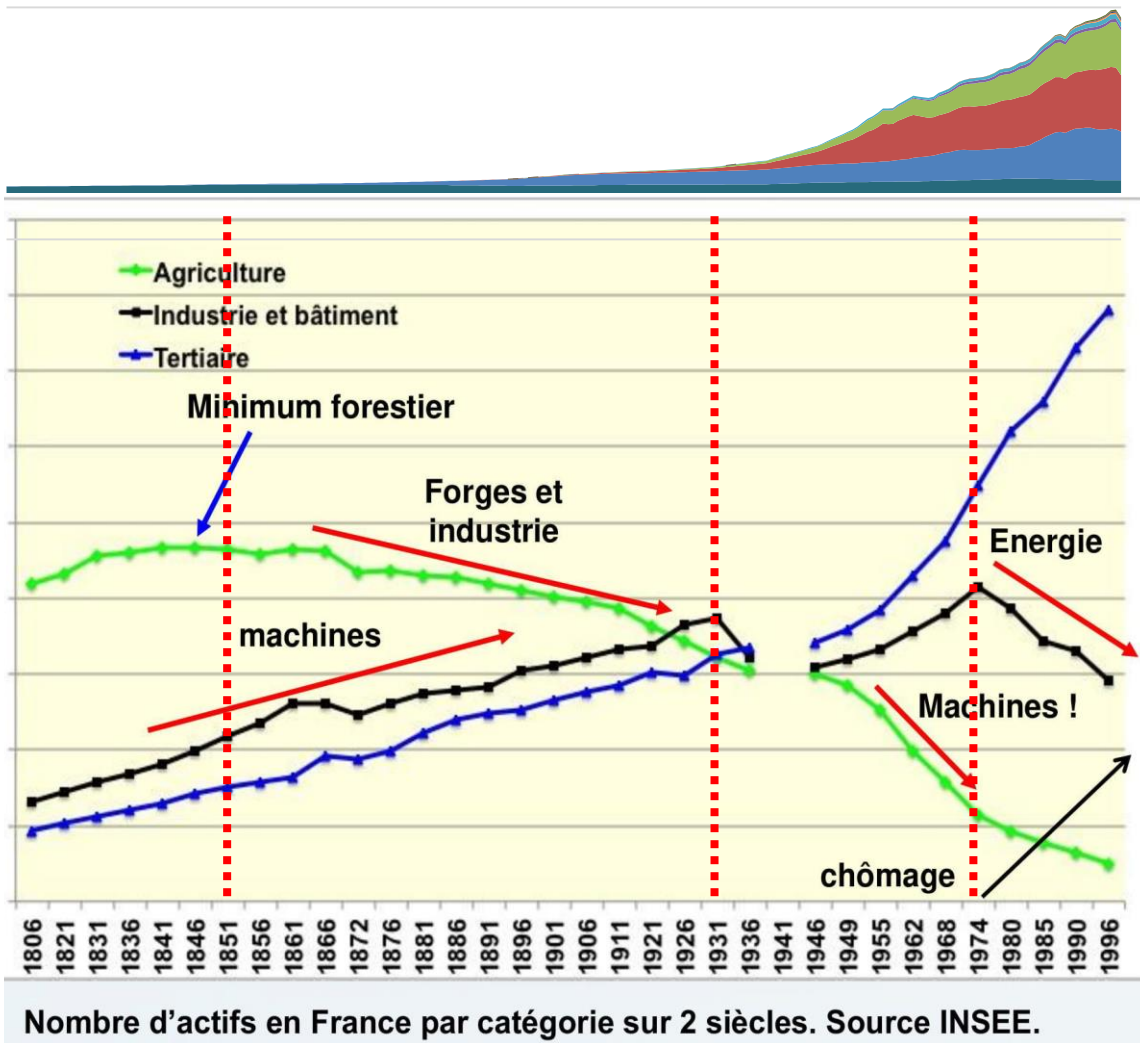
## PIB mondial vs Consommation énergétique

- Corrélation/causalité parfaite
- La feuille de route de l'entrepreneur responsable de demain

$$\text{PIB} = \text{kWh} = \text{CO}_2$$



# Energie et structure du travail

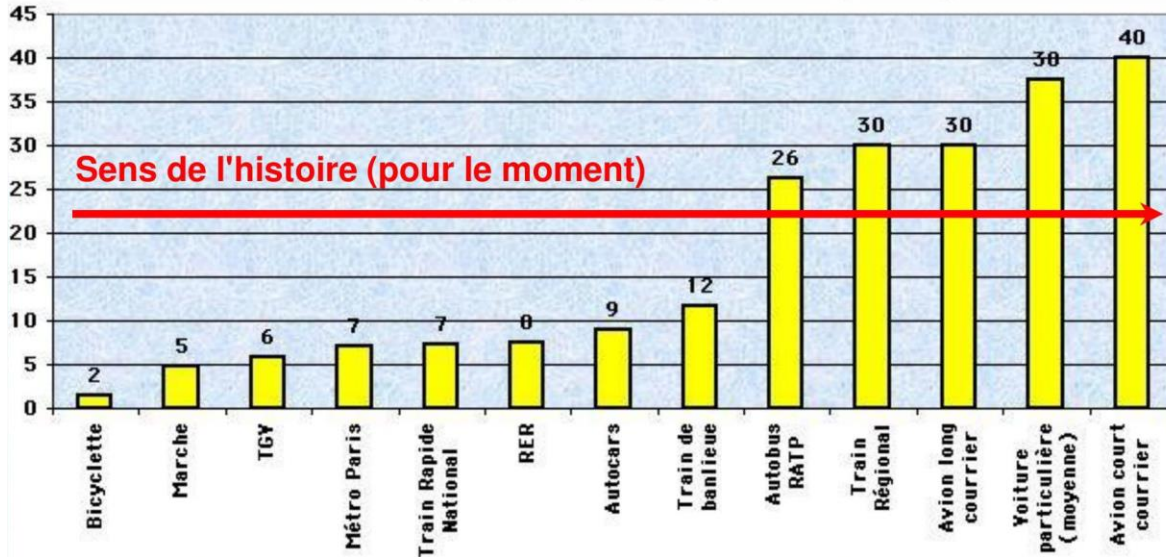


## Disponibilité en énergie vs Structure du travail

- 1800 – 1850 : augmentation de la population dans tous les secteurs
- 1850 – 1930 :
  - augmentation du nombre de machines
  - augmentation du tertiaire (compter les machines fabriquées)
  - Plus de machine => plus efficace aux champs => augmentation des rendements => diminution de la population 'agricole' et des surfaces cultivées (la forêt croit !)
- 1950 – 1975: la tendance continue mais on compte de + en + pour produire de – en – (en France)
- 1975 – ... :
  - La production est exportée, la consommation reste
  - Désindustrialisation et chômage

# Energie et transport

Consommation d'énergie par passager.km, en grammes équivalent pétrole

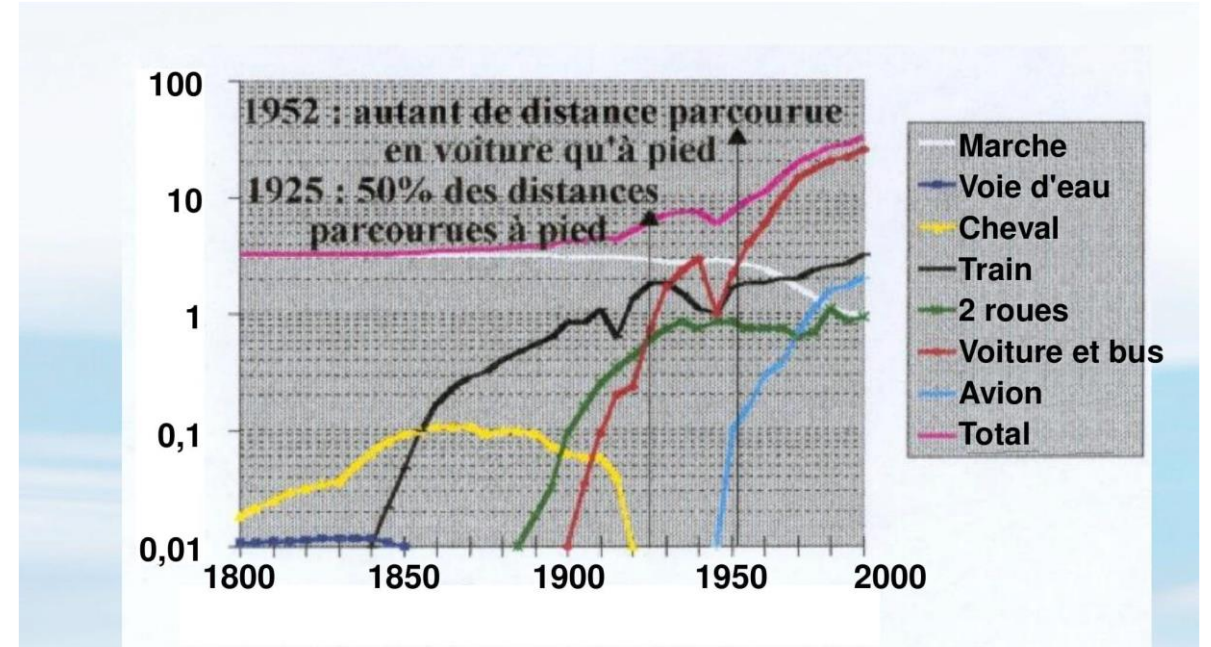


Consommation d'énergie par passager **pour un km** (la voiture tient compte du taux de remplissage moyen) en grammes équivalent pétrole. Sources diverses.

- Plus d'énergie dans les transports

- => + rapide / + gros

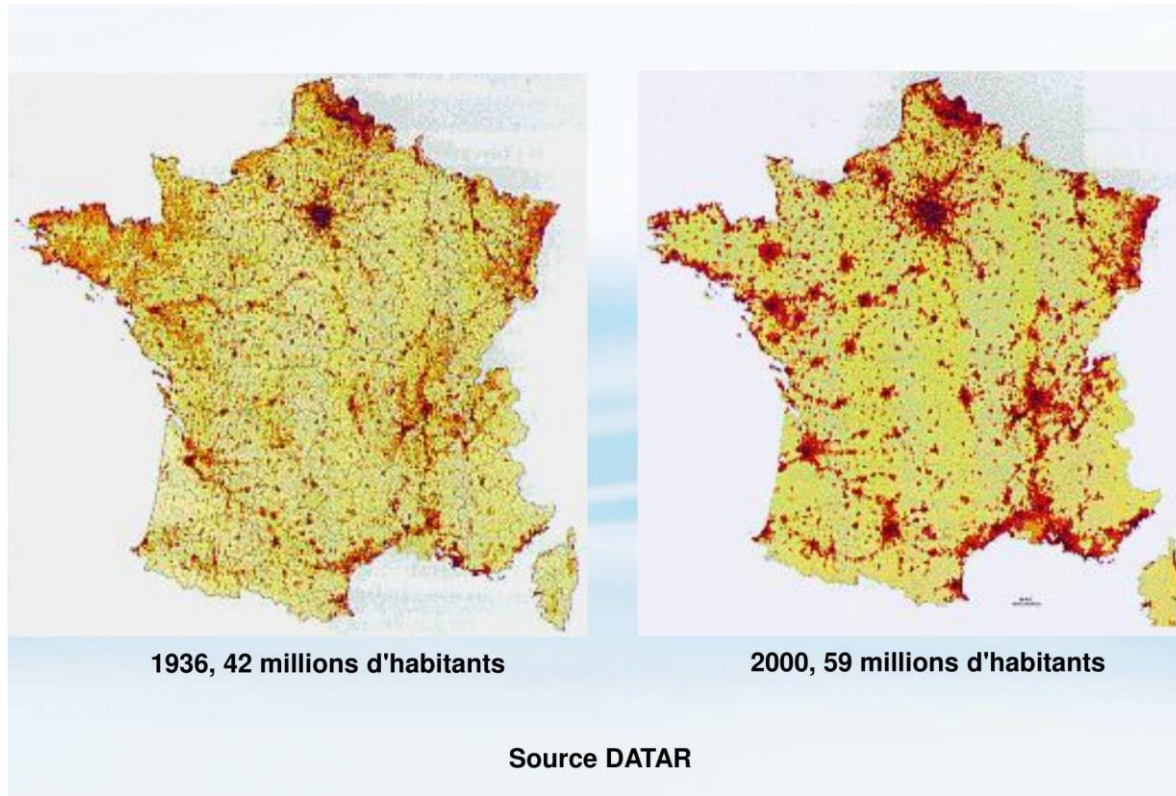
- => Modifications de modes utilisés pour aller + loin



Evolutions des distances parcourues par personne et par jour, en France, depuis 1800.

Grübler & Nakicenovic, 1991 et estimations de Francis Papon pour la marche

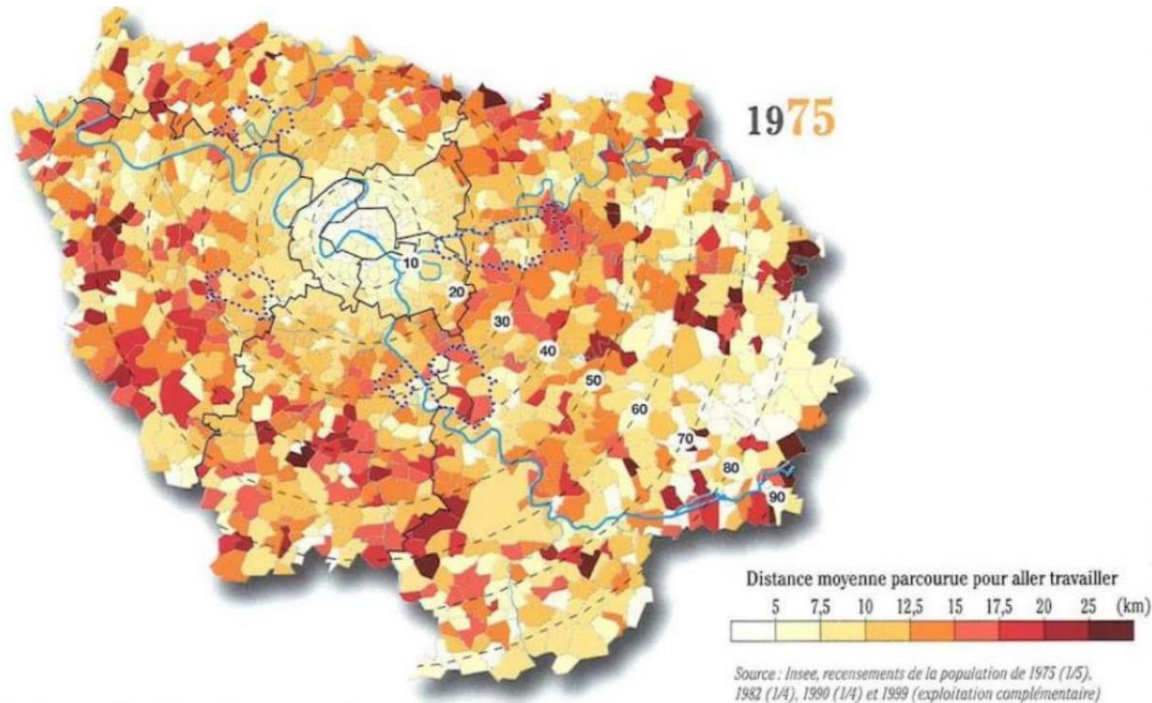
# Energie et territoire



- Plus d'énergie dans les transports
    - Regroupements autour des centres urbains
    - Eloignements des zones de production de nourriture
    - Transports de la campagne vers les villes (30% des camions transportent de la nourriture)
- => La disponibilité en énergie a conditionné l'organisation du territoire

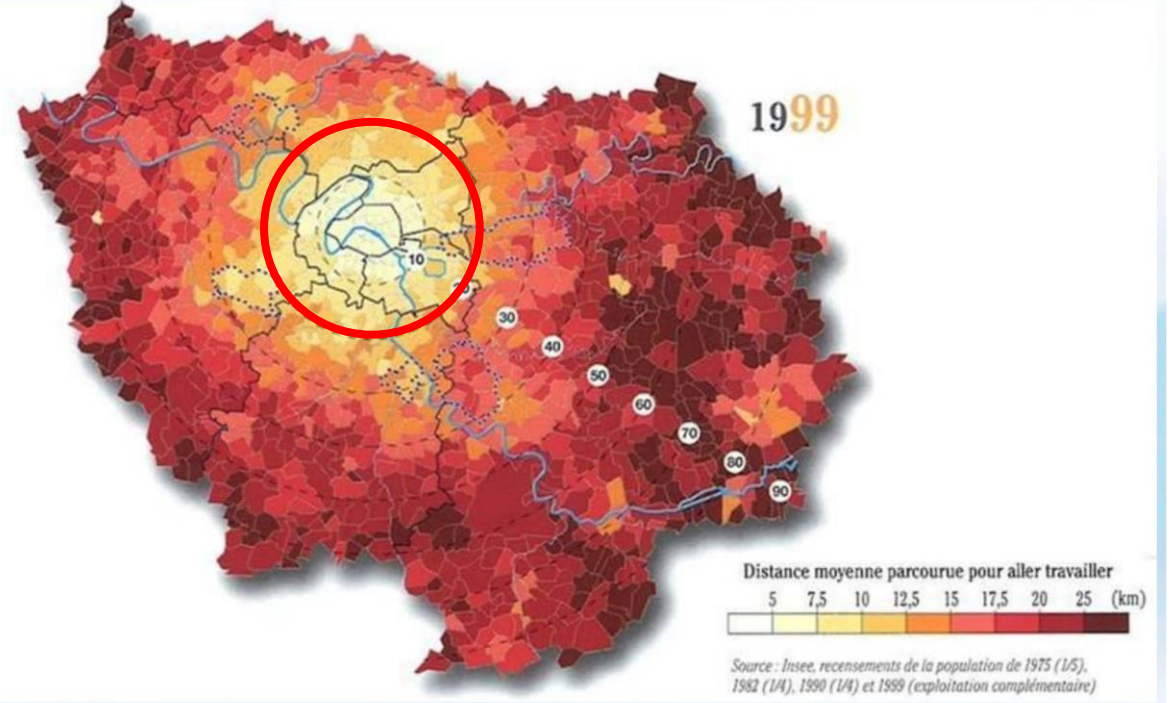


# Le Grand Paris...



Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».  
Source INSEE

- 1975: Faible distance parcourue => les gens habitent là où ils travaillent
- 1999: Tous à Paris !!!



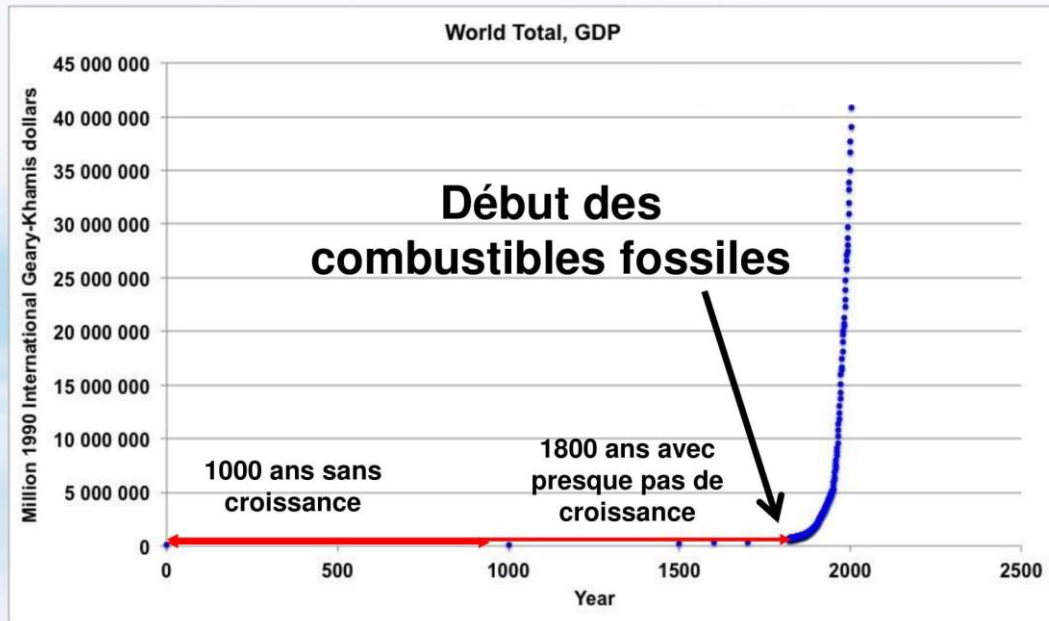
Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».  
Source INSEE

- Projet du Grand Paris
  - Réduire les CO2 des transports ?
  - Emprise = 20km...

# L'énergie dans le futur



# La croissance du PIB, jusqu'à quand?



PIB mondial reconstitué de l'an 0 à 2003. Source : Angus Maddison

- L'exploitation des énergies fossiles a permis la croissance du PIB.

$$\text{PIB} = \text{kWh} = \text{CO}_2$$

- PIB: enjeu de paix sociale
- CO<sub>2</sub>: enjeu de transition écologique
- kWh: la place de l'ingénieur de demain
  - Décorrélérer ces facteurs
  - Adoucir la transition

# Equation de Kaya

$$GES = \frac{GES}{kWh} \frac{kWh}{PIB} \frac{PIB}{POP} POP \longrightarrow \text{population} \quad +20\% \text{ d'ici } 2050$$

↓  
Emissions de GES

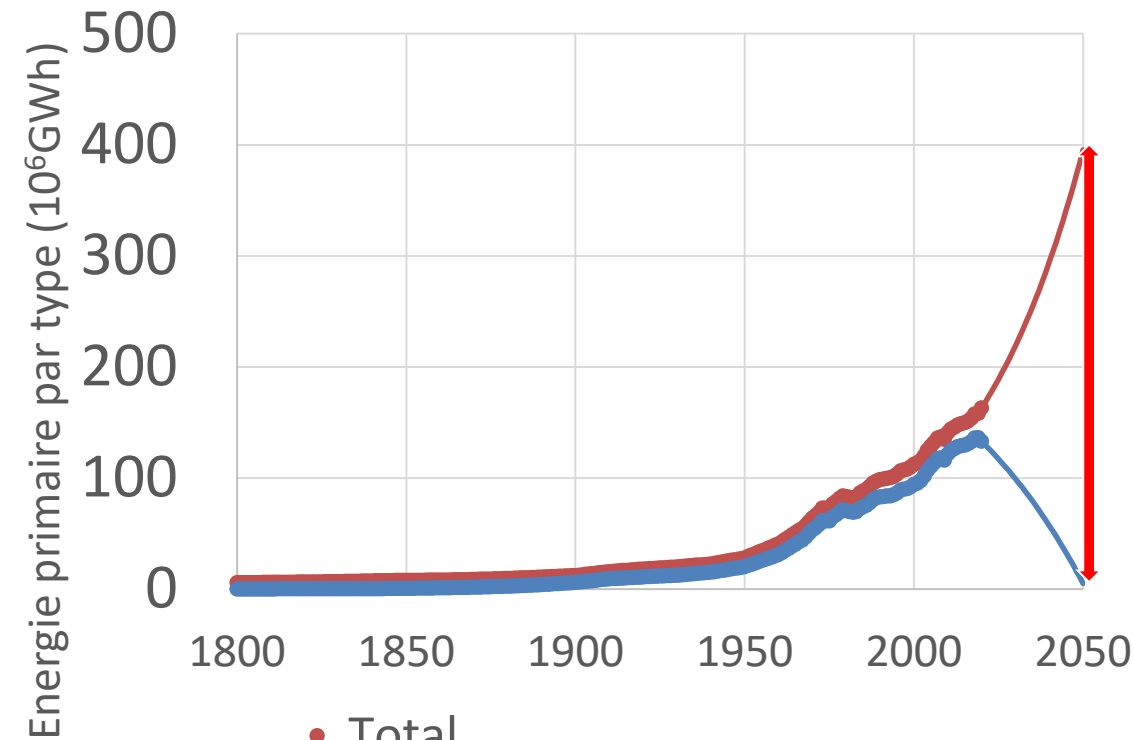
Division par 3 d'ici à 2050

Nb d'objets produits / personne  
Nb de kWh / objet produit  
Qté de GES émis / kWh produit

} => Division par 3 à 4 d'ici à 2050

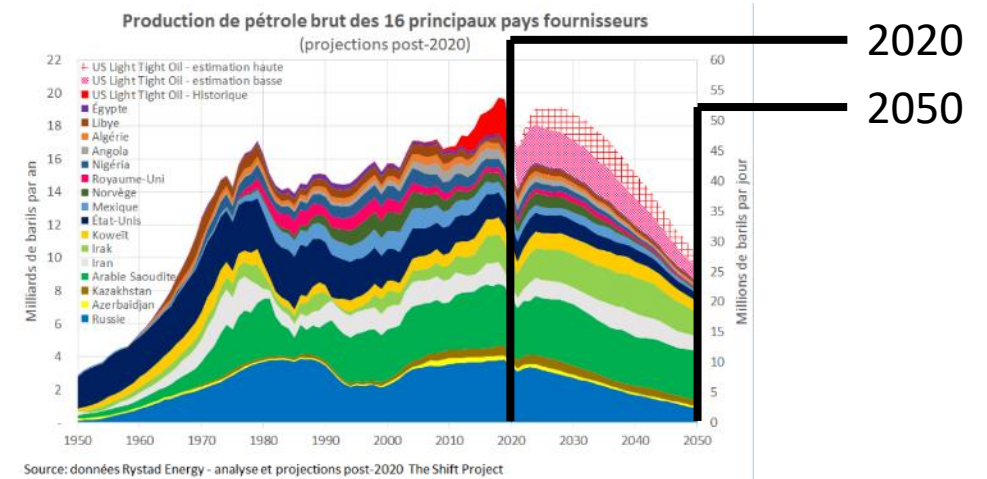
- GES / kWh: décarbonation du système énergétique
  - kWh / PIB: optimisation du système productif
  - PIB / POP: la somme de vos demandes
- } Vous (ingénieur)
- } Vous (citoyen)

# GES / kWh : Décarbonation de l'énergie



- Total
- Energies Carbonées
- projection E. carbonées
- projection E. total

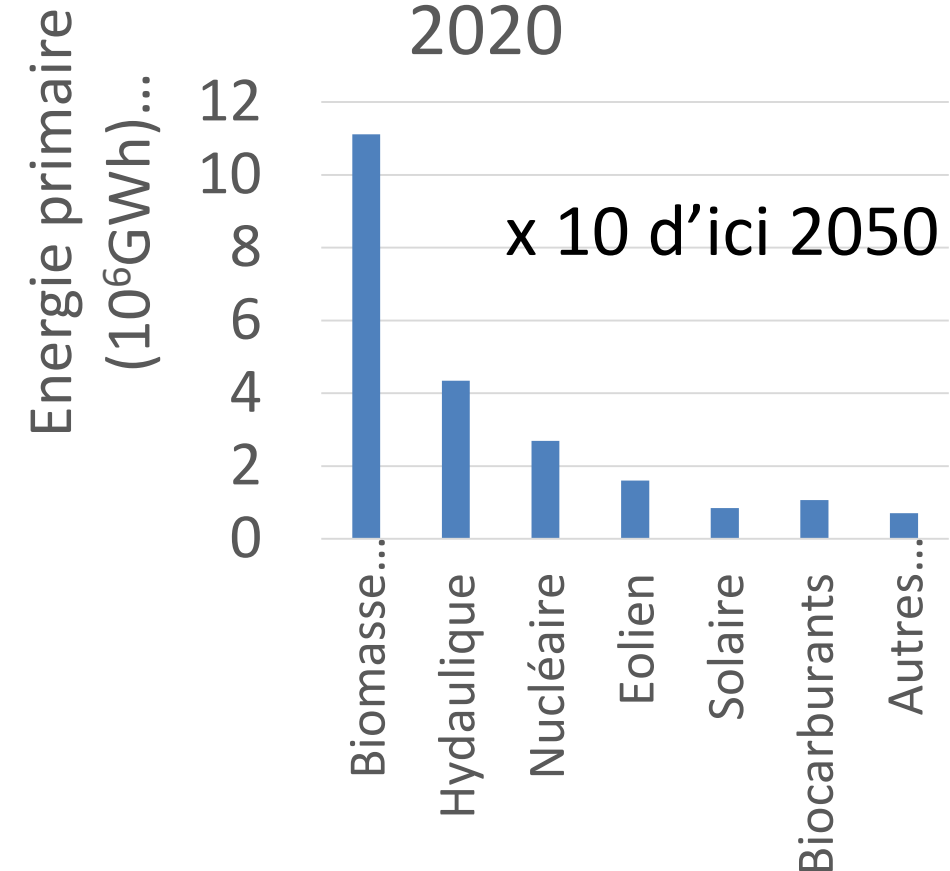
- Charbon + gaz + pétrole = 85%
- Promesses politiques
  - Neutralité carbone => 0 en 2050



- Conservation de la croissance à 3%
- => Déploiement des énergies sans GES (nucléaire et ENR): environ x10

# Energies sans GES x 10... Chiche?

## Répartition mondiale en 2020



- Biomasse => plus de forêts durablement gérées
  - Bonne nouvelle pour la biodiversité
  - Effet anticipé du climat sur les forêts françaises:  
-10% (climat actuel stabilisé) à -40% (+2°C)
- Hydraulique => plus de barrages
  - Potentiel français restant estimé: 9000 GWh/an
  - 360 x Barrages des 3 gorges (0.1 10<sup>6</sup>GWh / an)
- Nucléaire:
  - Fusion: très peu crédible d'ici 2050
  - Réacteur de 4<sup>e</sup> génération
- Eolien et solaire:
  - Disponibilité des ressources
  - Gestion de l'intermittence
- Biocarburants:
  - Concurrence avec l'agriculture alimentaire
  - 4 premières cultures céréalières (maïs, blé, riz, soja) en agrocarburant = 25% de la consommation de pétrole actuel

# Conclusion



# Et l'ingénieur dans tout ça ?

1948



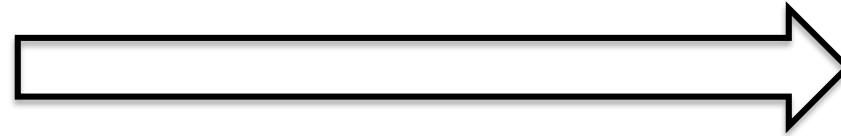
375cm<sup>3</sup>

60km/h

9 CV

500kg

4,5L / 100km



L / cm<sup>3</sup> de cylindrée: ÷ 4

L / km/h de vitesse max: ÷ 2,5

L / nb de CV: ÷ 7

L / kg de véhicule: ÷ 2

Pas d'économie d'énergie...

Innovation ?

Progrès ?

2002



1400 cm<sup>3</sup>

160km/h

70 CV

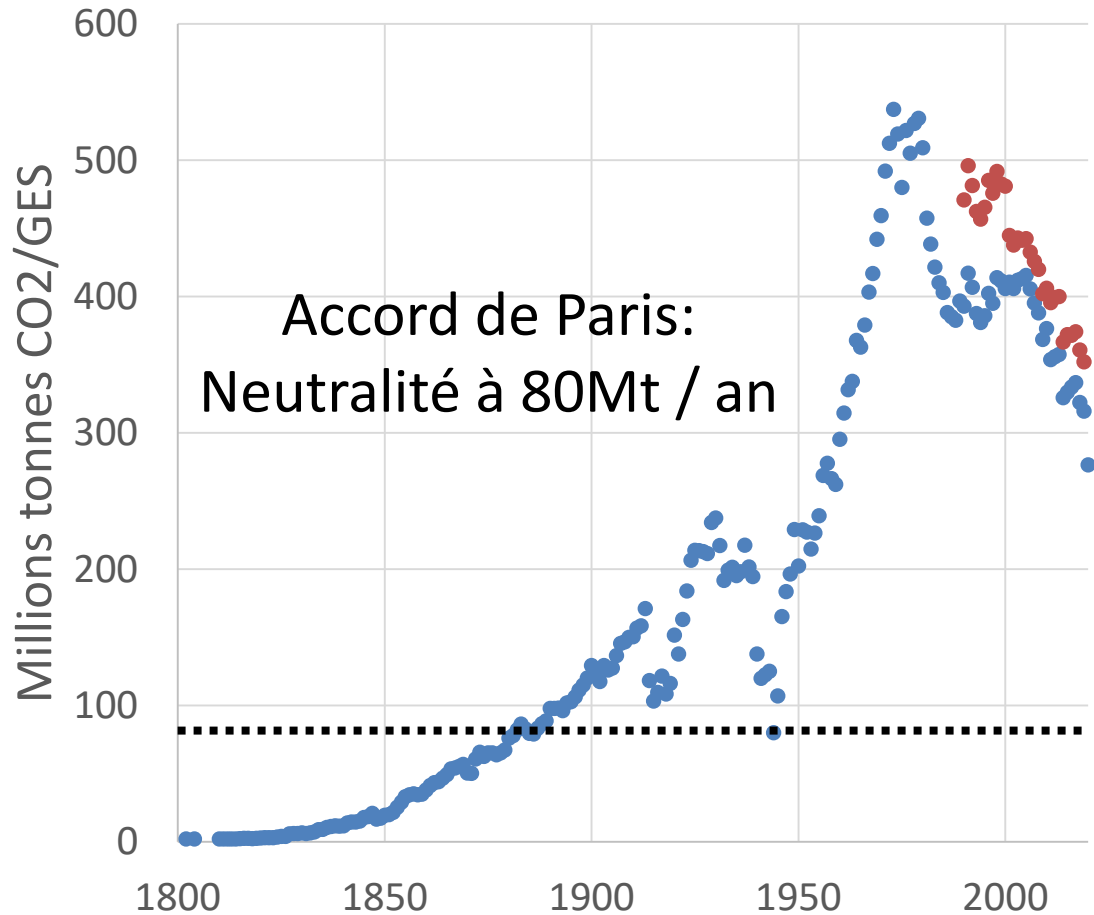
1000 kg

5 à 6 L / 100km

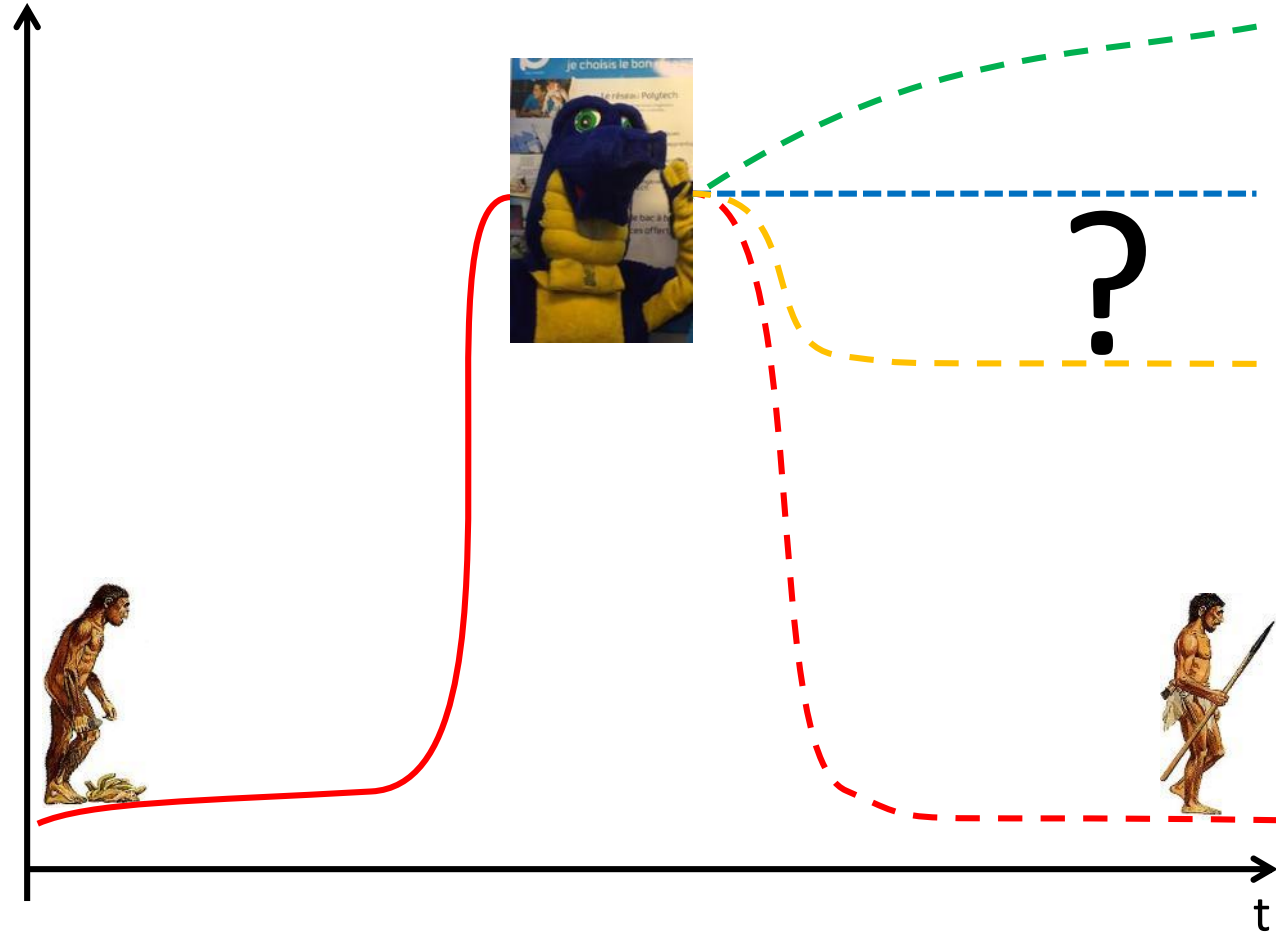
# A vous de jouer !

### Emissions directes françaises

● CO2 émis ● GES émis



### Consommation d'énergies (fossiles)



# Ce qu'il faut retenir...

