

“ Les problèmes auxquels nous sommes confrontés ne peuvent pas être résolus avec les habitudes de pensée qui sont à l'origine de leur apparition. ” Albert Einstein



Y a-t-il des questions / remarques au sujet de l'exposé de la dernière fois ?



Les sujets proposés la dernière fois :

- 1. Répondre à la question suivante :
quels sont mes critères pour juger une énergie ?**
- 2. Faire son propre bilan carbone avec “ nosgestesclimat.fr ” de l’ADEME
(en 20 mn on découvre quelque chose d’essentiel)**
- 3. Proposer des citations qui vous inspirent**

Exposé n°2 : Les sources d'énergie à notre disposition

Plan de l'exposé

1. Rappels et introduction
2. Production et consommation d'énergie (données globales)
3. Quelques notions indispensables sur les énergies
4. Panorama des énergies
5. Les énergies fossiles
6. On (re)pose le problème
7. Par quoi remplacer les énergies fossiles ?
8. Les énergies à bas carbone
9. Le solaire
10. L'hydroélectricité
11. La photosynthèse et la biomasse
12. La géothermie
13. L'éolien
14. Le nucléaire
15. Parlons matériaux
- Conclusion provisoire

1. Rappels et introduction

“Notre avenir énergétique se décide maintenant” concertation nationale en cours

<https://concertation-strategie-energie-climat.gouv.fr/>



- 1- Comment adapter notre consommation pour atteindre l'objectif de neutralité carbone ?
- 2- Comment satisfaire nos besoins en électricité, et plus largement en énergie, tout en assurant la sortie de notre dépendance aux énergies fossiles ?
- 3- Comment planifier, mettre en œuvre et financer notre transition énergétique ?

Question triviale mais point de vigilance tout de même

Quand on compare des quantités (tonnes, volumes, kWh etc.) entre différents pays faut-il le faire en valeurs absolues ou en valeurs relatives ?

Autrement dit, comment comparer quoi que ce soit entre la Chine et la France, par exemple, ou entre le Luxembourg et l'Espagne etc. ?

Qui pollue le plus en CO2 la France (65 millions d'hab) ou la Chine (1400 millions d'hab) ? La Chine évidemment, mais par habitant qu'en est-il ?

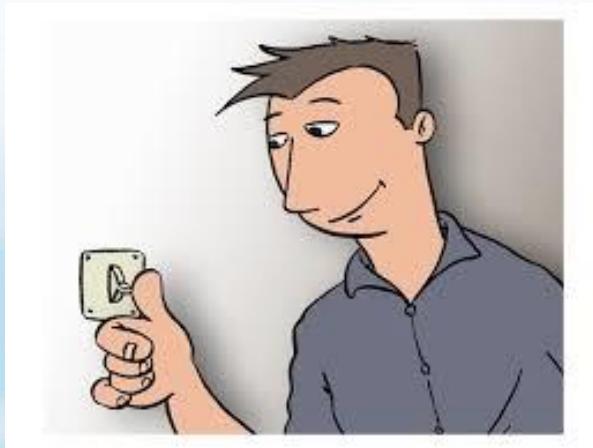
Attention : si les périmètres ne sont pas identiques il faut utiliser des ratios, par exemple : tCO2eq/hab.an
idem pour les énergies : gCO2/kWh

Rarissime !

Autre point trivial : se comparer à meilleur que soi ou se comparer à moins bon que soi ?

Très fréquent car cela rassure et justifie l'inaction !

Ce geste et cet objet si banals (pour nous) peuvent nous entraîner très, très loin dans notre réflexion !



On ne se pose
même pas la
question : hop et
voilà !

Le système électrique
doit à tout moment être
en mesure **d'assurer**
l'équilibre entre la
consommation et la
production.

économique,
technologique,
historique,
philosophique,
religieuse...

Autre
exposé



Avertissement : ce qui est important ce sont les ordres de grandeur, sans les bons ordres de grandeur on se perd dans des discussions stériles

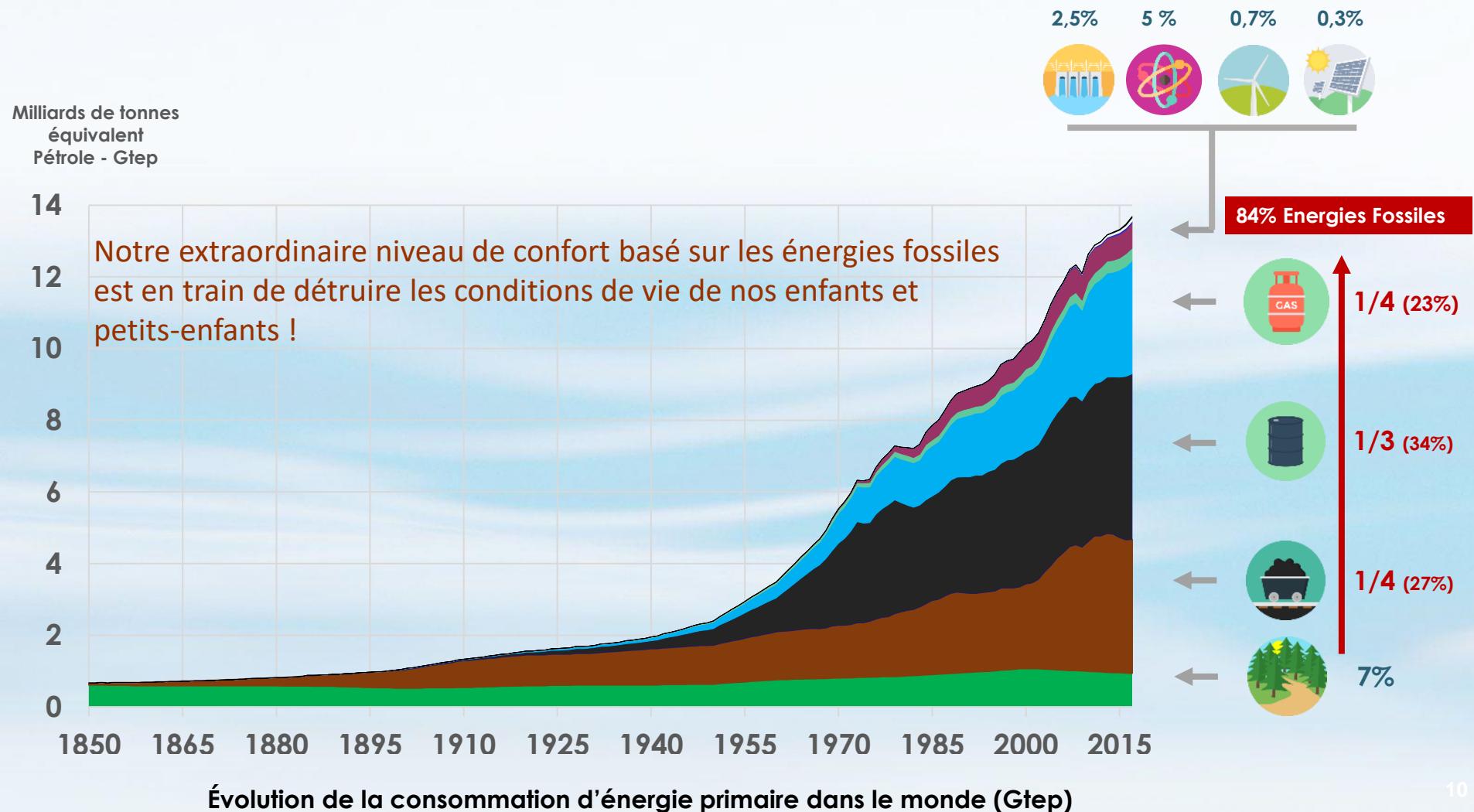
Les chiffres donnés au cours de ces exposés sont souvent approximatifs et n'ont d'autre but que de donner des ordres de grandeur

Il faut toujours revenir aux sources publiées pour, si possible, éviter les erreurs d'interprétation (ADEME, RTE, Haut Conseil pour le Climat etc.)



Drouillet

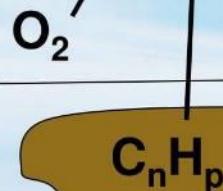
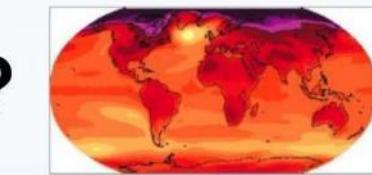
Rappel : consommation mondiale d'énergies primaires, LE graphique essentiel



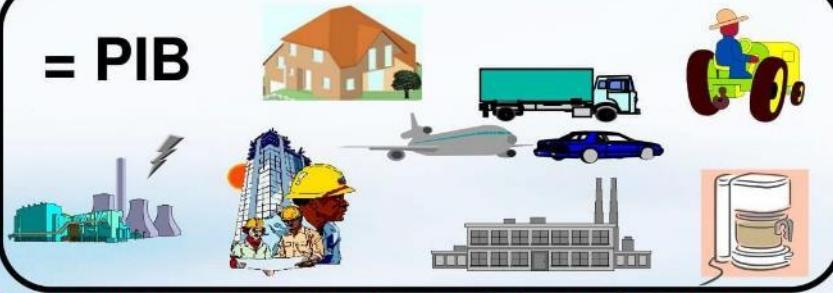
Un graphique percutant à la mode "Jancovici"

Boum ?

Minerais, sols,
ressources
vivantes...
(gratuits aussi)

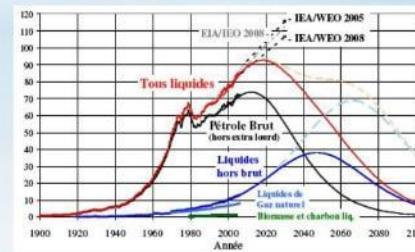


= PIB

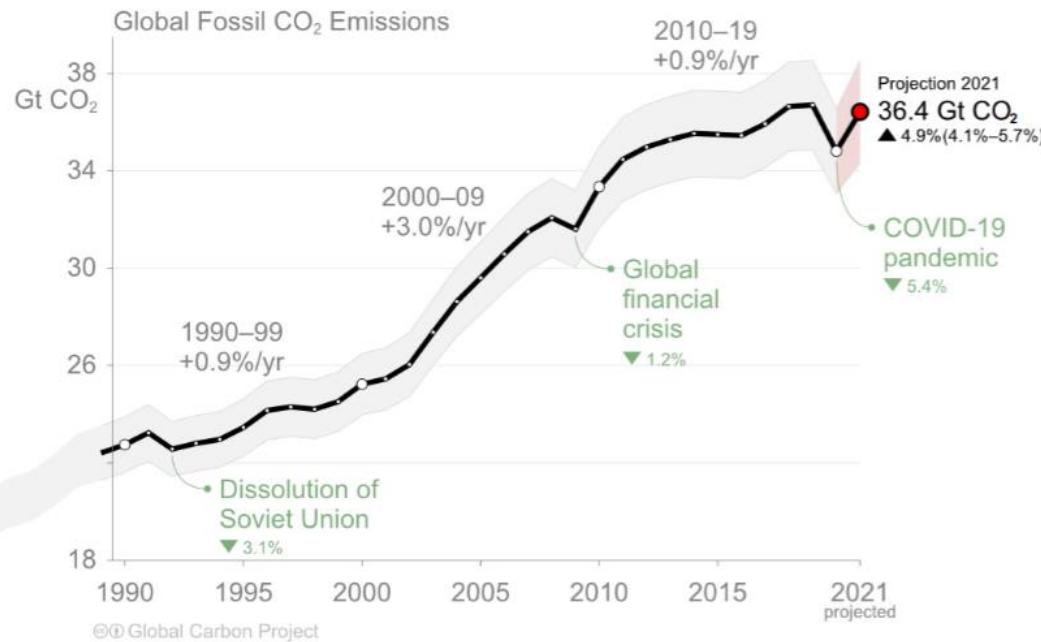


Structure actuelle des métiers, loisirs et
vacances, études longues, santé,
retraites, mondialisation, concentration
urbaine et banlieues étaillées...

Crac ?



Émissions mondiales pour la période 1990-2021. Global Carbon Project

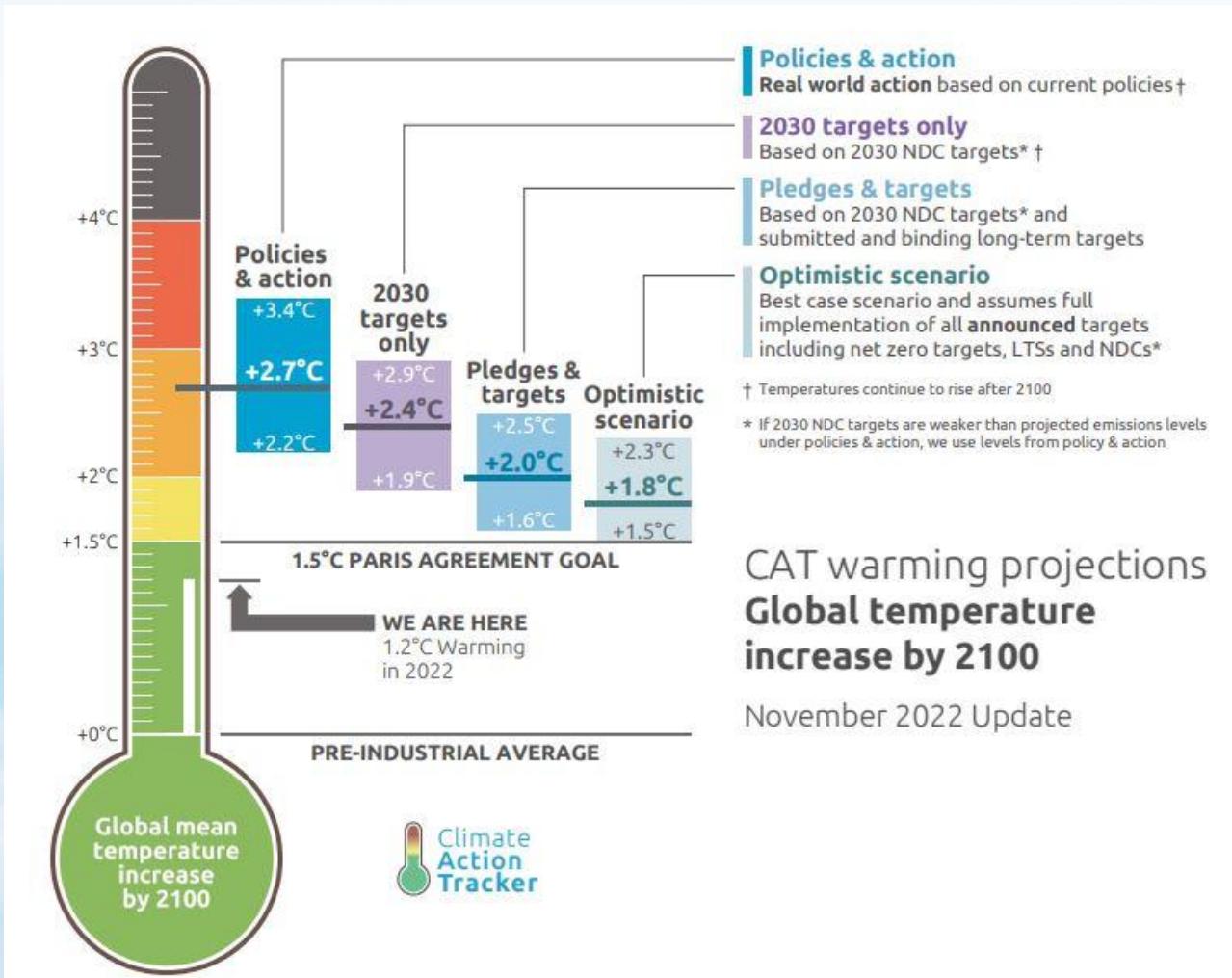


Non seulement on augmente la quantité de CO₂ atmosphérique mais on l'augmente de plus en plus vite.

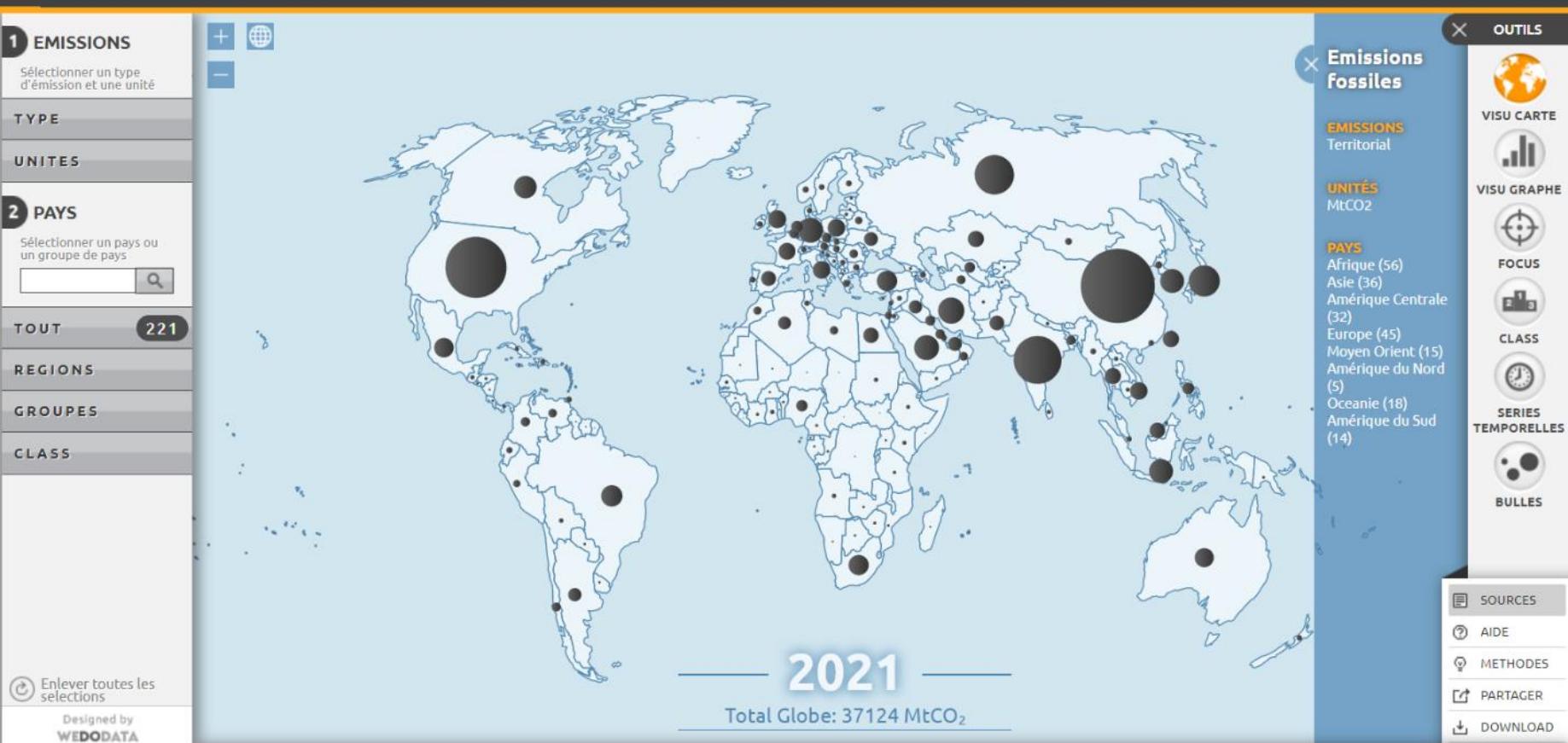
Avant de fantasmer sur des solutions technologies ou sur la possibilité de retirer du carbone de l'atmosphère, il faudrait déjà arrêter d'augmenter chaque année ce qu'on y ajoute.

Les seules inflexions observées ont été dues à des crises majeures.
De COP en COP l'impuissance des États les contraints à des promesses sans cesse renouvelées et jamais tenues !

Ordre de grandeur : ~40 GtCO₂/an,
c.-à-d. 40 milliards de tonnes par an,
ou ~100 millions de tonnes par jour,
ou ~5 tonnes/hab.an



Un excellent outil : Global Carbon Project – Carte interactive des émissions de CO₂



<http://www.globalcarbonatlas.org/fr/CO2-emissions>

Notion d'empreinte carbone

Empreinte carbone (ou émissions de la consommation) : émissions directes de la population française et émissions indirectes, liées à la production et au transport des biens et services qu'elle consomme, que ceux-ci soient produits en France ou à l'étranger.

On doit donc tenir compte des importations (en +) mais aussi des exportations (en -).

A ne pas confondre avec les émissions territoriales : émissions émises par nos activités sur notre territoire

Les émissions nationales ne couvrent pas l'entièr responsabilité de la France. C'est pour cela que l'on utilise également le concept d'« empreinte carbone ».

En 2017, la France a consommé **421 MtCO₂e** à travers ses importations...

Émissions nationales :

$$328 + 137 = 465 \text{ MtCO}_2\text{e}$$

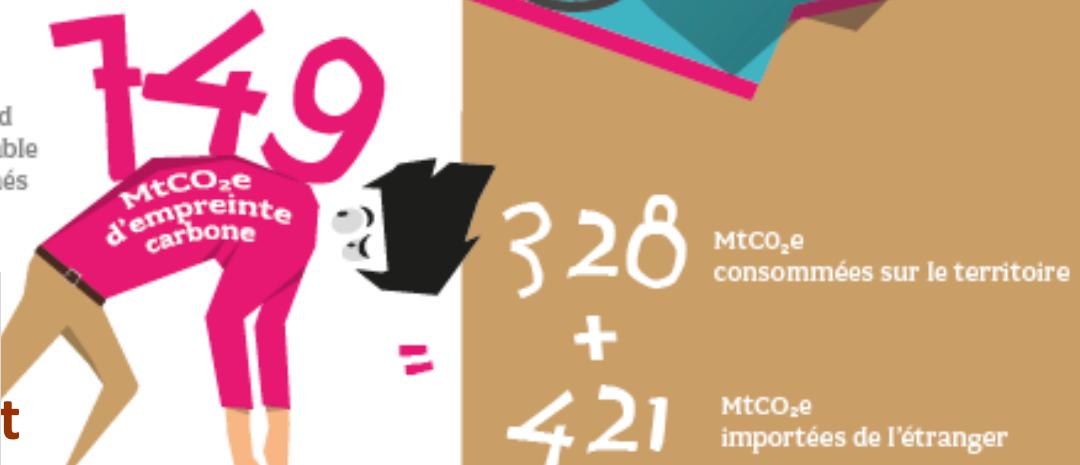
... et a exporté
137 MtCO₂e
« made in France »

La même année, elle a produit
328 MtCO₂e consommées sur le territoire..

À retenir : l'empreinte carbone d'un français c'est ~ 10 tCO₂e/an ou 30kgCO₂e/j

L'empreinte carbone de la France est de **749 MtCO₂e**. Elle correspond aux émissions associées à l'ensemble des produits et services consommés en France. Elle dépasse **11 tCO₂e** par Français.

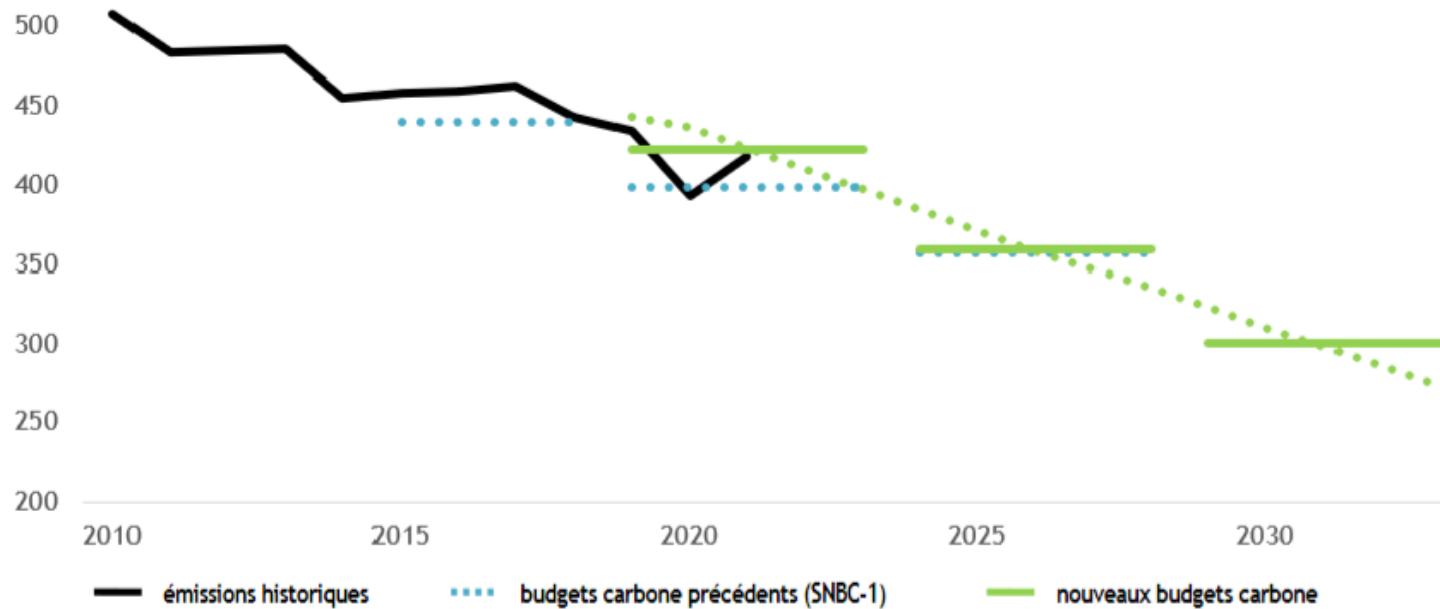
Plus de 50% de notre empreinte provient de nos achats à l'étranger
Made in China = made in charbon



Néanmoins la France est sur la bonne pente, ouf !

Où en sont les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux budgets carbone ?

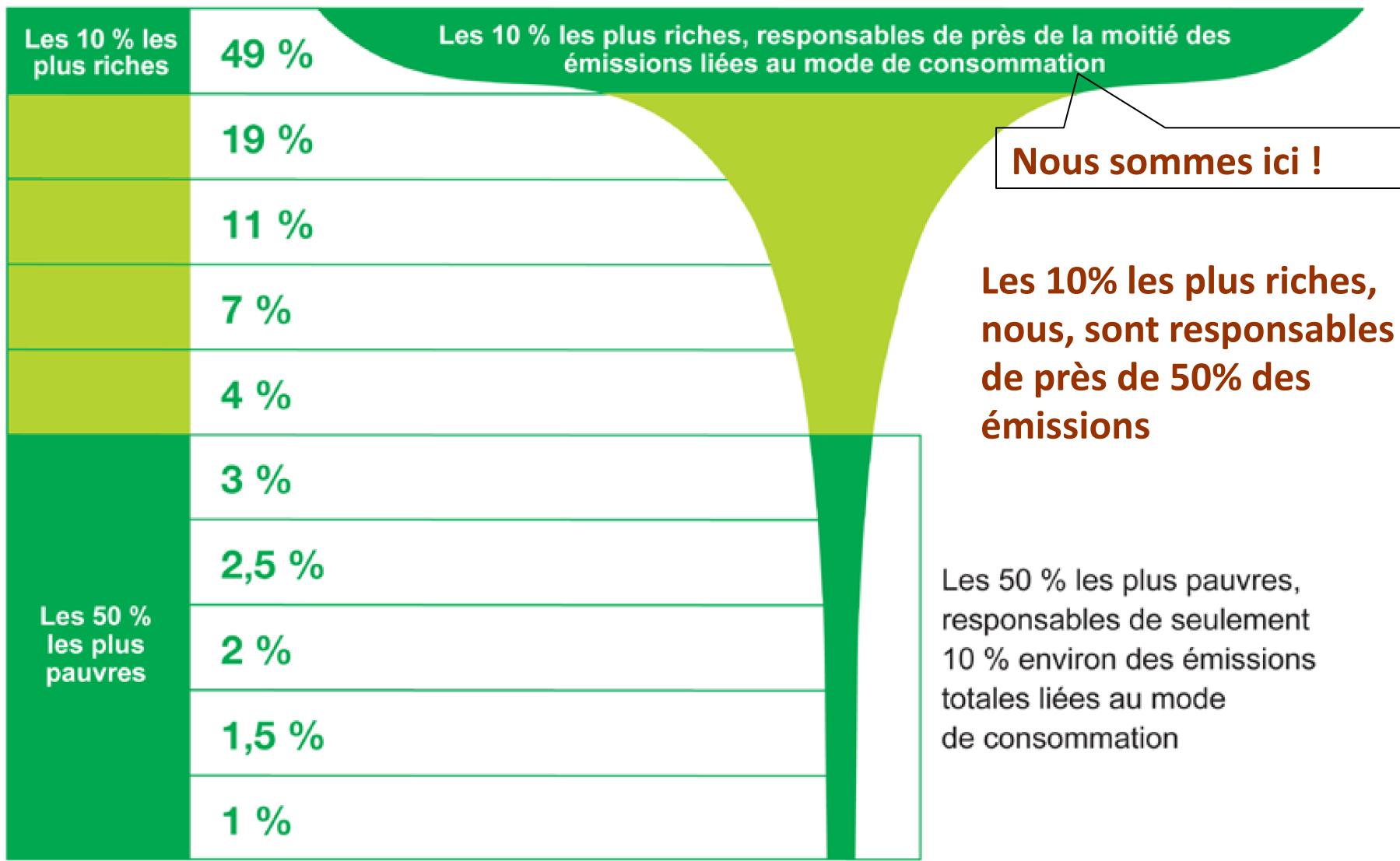
en MtCO₂e - périmètre France métropolitaine + Outre-mer inclus dans l'UE



Sur les années futures, la SNBC-2 ambitionne la poursuite de la réduction des émissions pour atteindre zéro émission nette en 2050, avec un rythme de réduction annuelle progressif, entre **-3%/an et -4%/an** sur la période 2022-2030

La référence sur ce sujet : [le Haut Conseil pour le Climat](#)

Pourcentage des émissions de CO₂ dans la population mondiale



2. Production et consommation d'énergie

Rappel : distinction entre énergies primaires et énergies finales



Cadeaux de la
Nature



2657 TWh en
2020



Transformations et pertes



Payées par l'usager

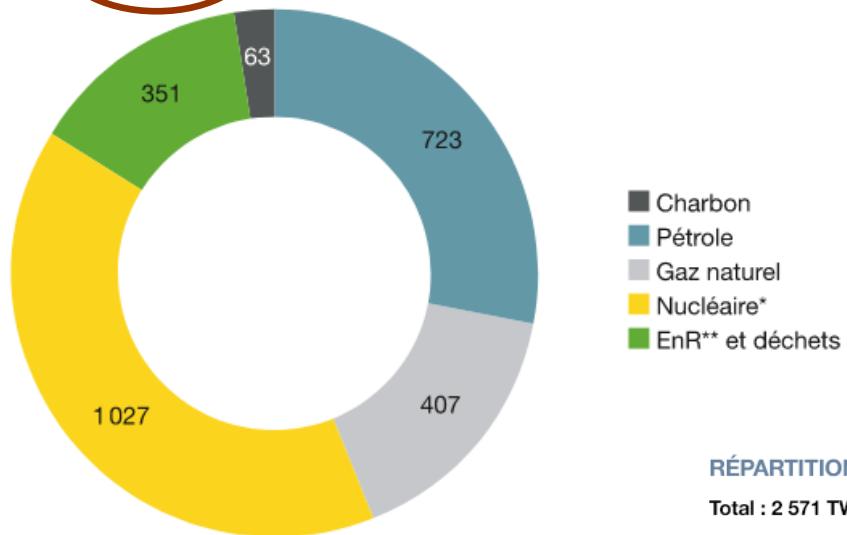


1633 TWh en
2020

20

CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE

TOTAL en 2020 : 2 571 TWh (données non corrigées des variations climatiques)



* Déduction faite du solde exportateur d'électricité.

** EnR : énergies renouvelables.

Mais > 50% d'énergie bas carbone ce qui nous place dans le peloton de tête

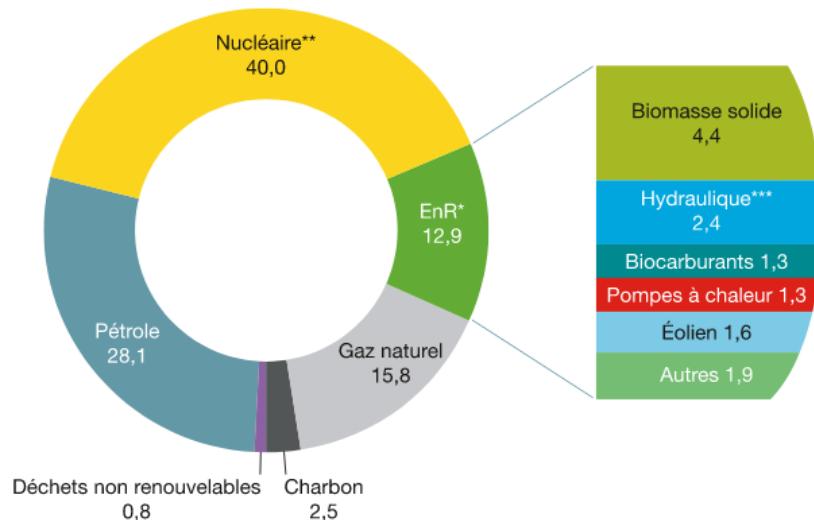
Mais les nouvelles ENR sont encore marginales

Les énergies fossiles ~46% du total

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE

Total : 2 571 TWh en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)

En % (données non corrigées des variations climatiques)



* EnR : énergies renouvelables.

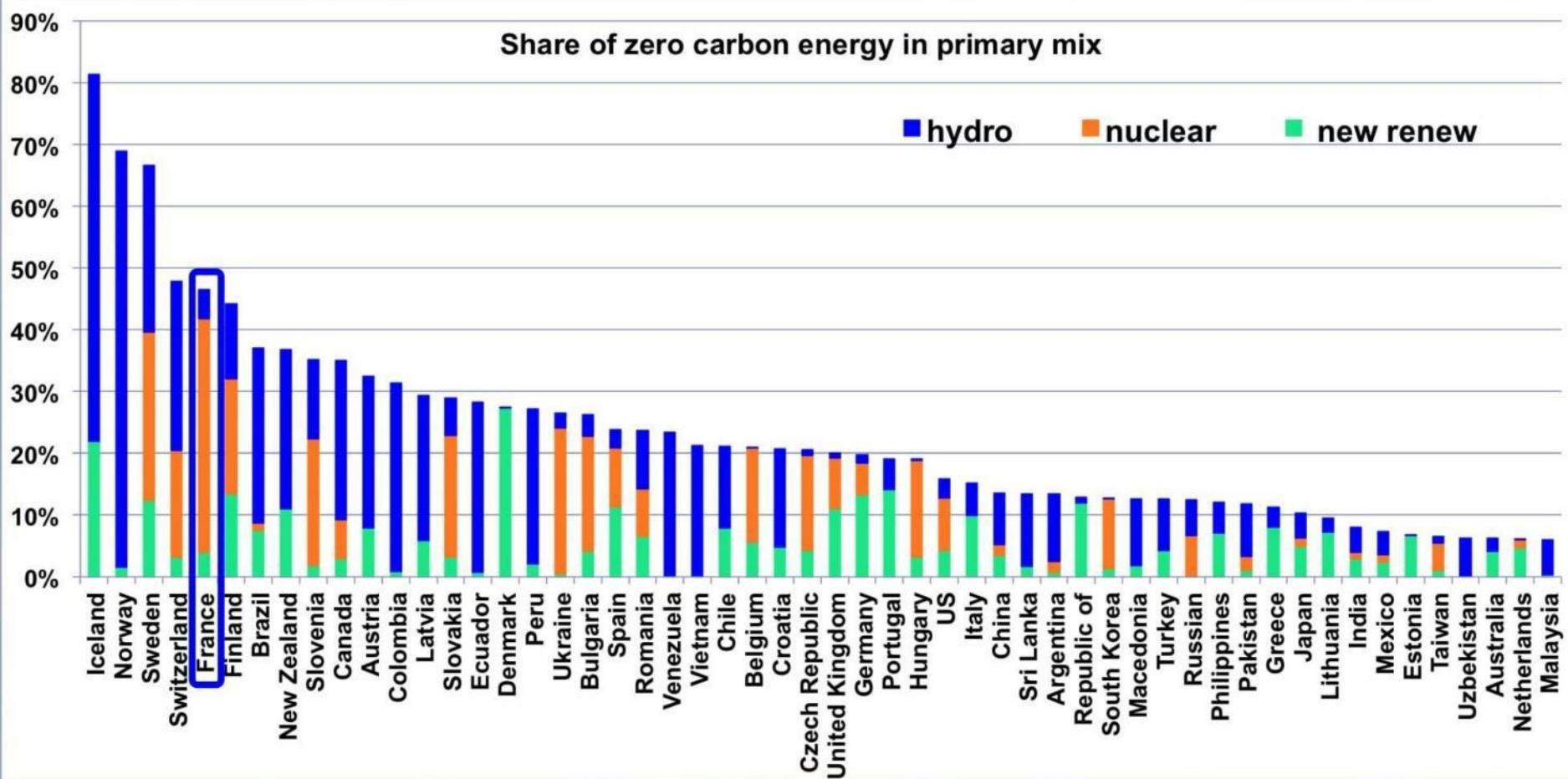
** Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale comparée à la production nucléaire.

*** Hydraulique hors pompages.

Champ : France entière (y compris DROM).

Source : SDES, Bilan énergétique de la France.

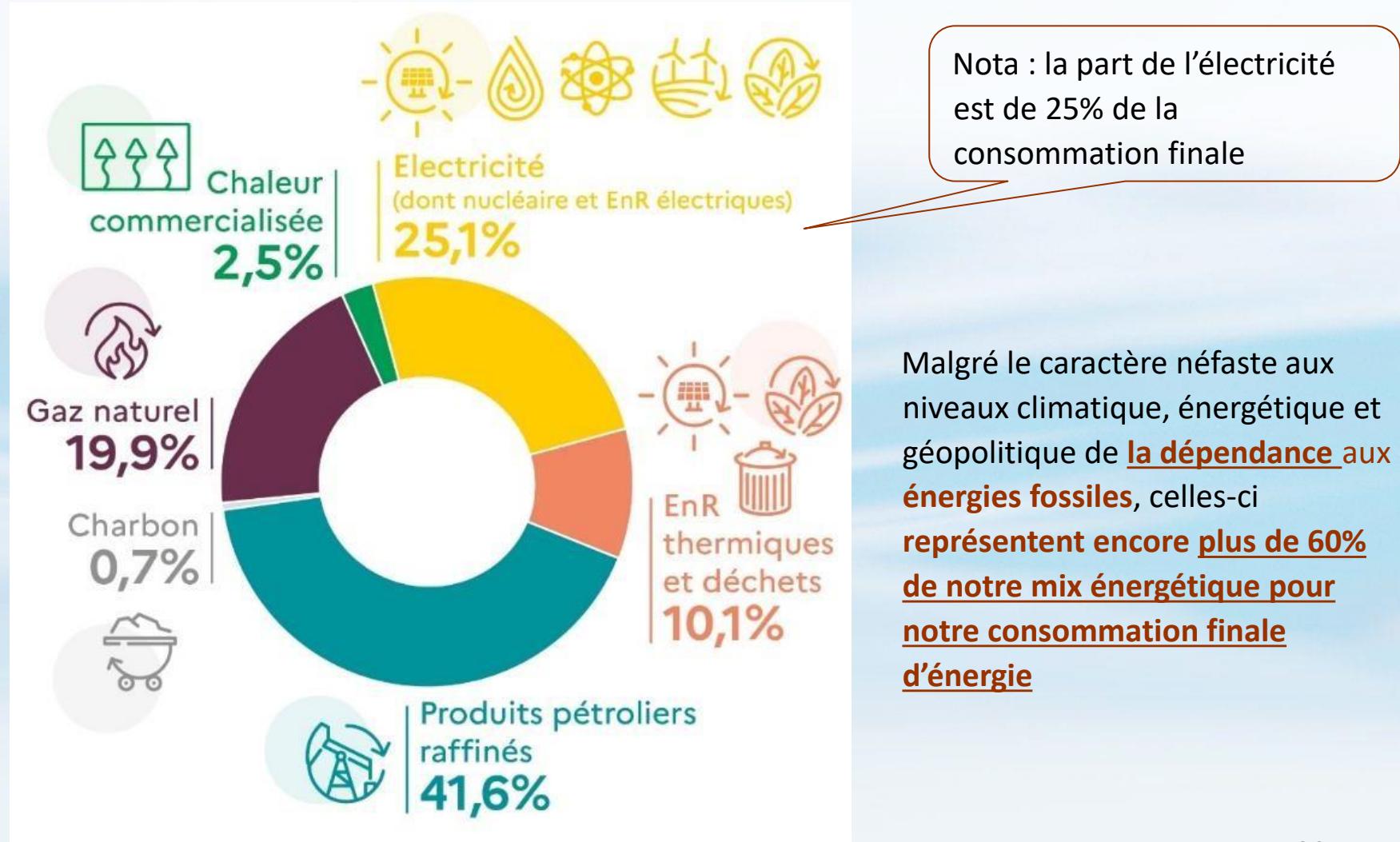
La France est bien dans le peloton de tête des énergies bas carbone dans son mix énergétique



Part de l'énergie primaire « bas carbone » par pays en 2017. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review

Mix énergétique de la France en 2020 en consommation finale d'énergie

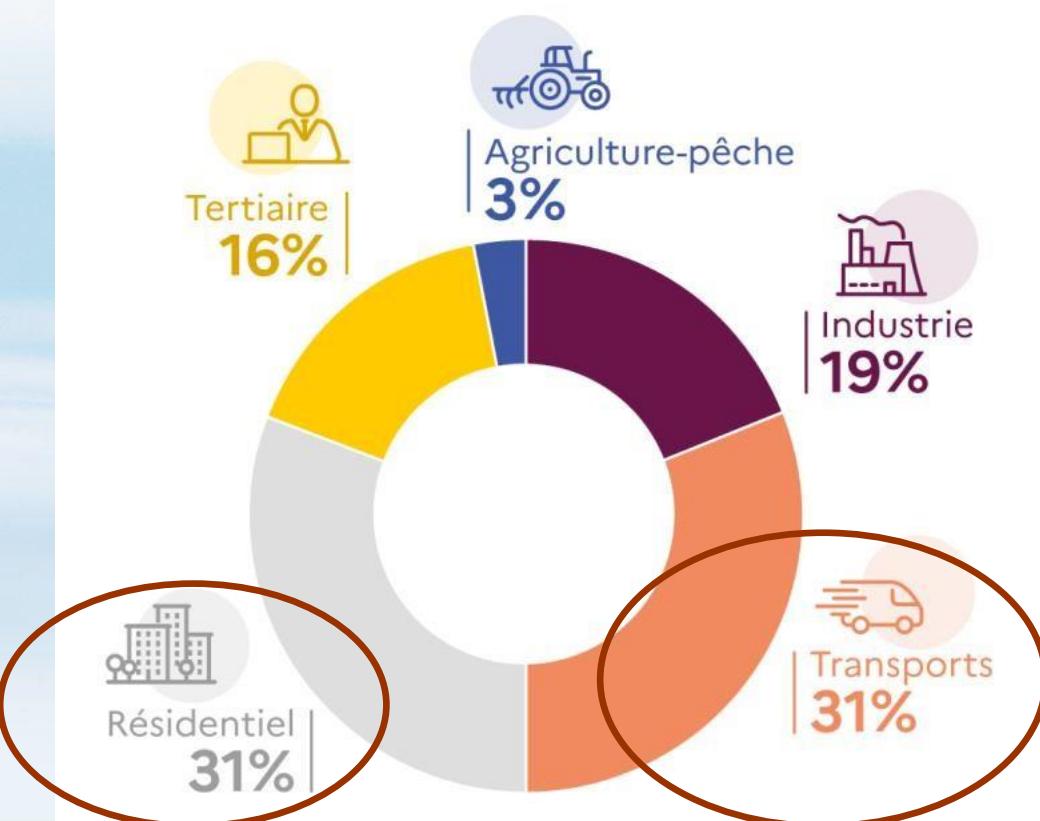
(Source : D'après SDES Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021)



Part de la consommation finale d'énergie 2021

France entière par secteur (Source : D'après SDES Bilan énergétique de la France en 2021 - Données provisoires)

PART DE LA CONSOMMATION FINALE
D'ÉNERGIE PAR SECTEUR EN 2021



Selon les secteurs, la part de chaque énergie peut varier très sensiblement. À titre d'exemple :

- dans les transports, les produits pétroliers représentent 91% de la consommation finale d'énergie ;
- dans l'industrie, le gaz naturel et l'électricité représentent respectivement 37% et 36% ;
- dans le résidentiel, l'électricité représente 34% d'énergie, devant le gaz naturel (29%), les énergies renouvelables thermiques et les déchets (24%) et les produits pétroliers (10%) ;
- dans le tertiaire, l'électricité représente 51% devant le gaz naturel (28%) et les produits pétroliers (12%).

3. Quelques notions indispensables sur les énergies

Toutes les sources d'énergie ne se valent pas !

Sources d'énergie très carbonées

Gaz Charbon Pétrole



Énergies fossiles

Facile à transporter et stocker

Très dense en énergie

Beaucoup d'émission de CO₂

Uranium



Hydro



Éolien et solaire



Biomasse

Énergies fossiles

Peu d'émission de CO₂

Très dense en énergie

Déchets nucléaires

Facile à stocker

Zones limitées

Illimitée

Peu concentrée en énergie

Intermittent

Renouvelable

Concurrence d'affectation des sols

Sources d'énergie non renouvelables

Sources d'énergie renouvelables

Ces énergies ne sont équivalentes ni en potentiel, ni en rendement, ni en coût, ni en usages, ni en pollution, ni etc.

Quels critères choisiriez-vous pour les comparer entre elles ?



Liste de critères (non exhaustive)

Critères quantitatifs

CO2/kWh

Quantités disponibles (finies ou renouvelables)
Surface occupée / kWh

Matériaux

Impacts sur la biodiversité

Critères économiques

Investissements
Coût de production
Le facteur de charge

Critères subjectifs

Visions du monde

Peur

Responsabilité vis-à-vis des générations futures

Beauté

Nuisance

Critères de politique intérieure

Croissance ou décroissance

Emploi, PIB, économie

Éducation et formations

Dangers

Élections

Critères qualitatifs

Impacts sur les paysages
Les ODD (Objectifs du Développement Durable de l'ONU)

Critères technologiques

Facilité d'exploitation

Densité énergétique

Disponibilité

Pilotable

Accessibilité et mise en oeuvre

Transformation en vecteur énergétique
Stockage

Critères sociologiques

Acceptabilité

Inégalités énergétiques

Risques sociaux

Critères de géopolitique

Pays producteurs alliés ou potentiellement ennemis ?

Dépendance

Mondialisation

Réserves



Critères environnementaux

Extraction

Pollution

biodiversité



Pour comparer l'impact des énergies sur le climat LE critère à regarder c'est : la quantité de gaz à effet de serre émise (sur tout le cycle de vie) par kWh produit CO₂/kWh

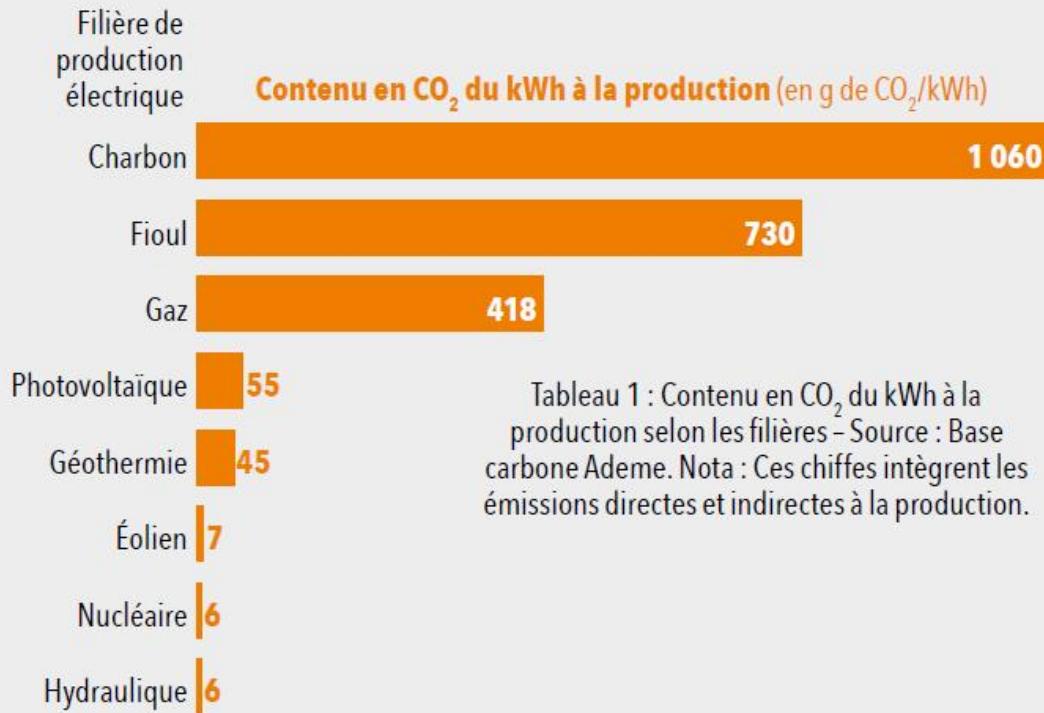
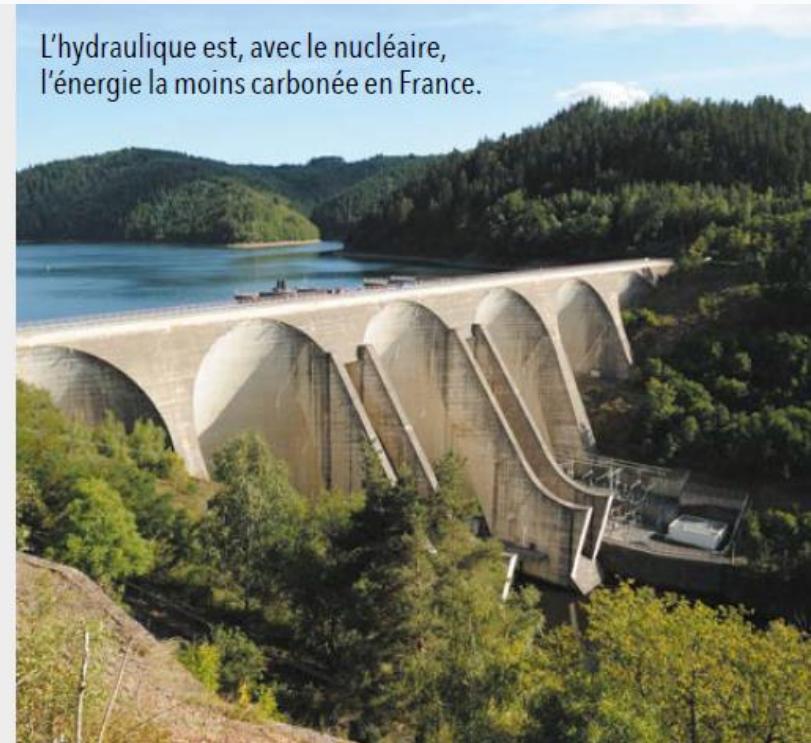
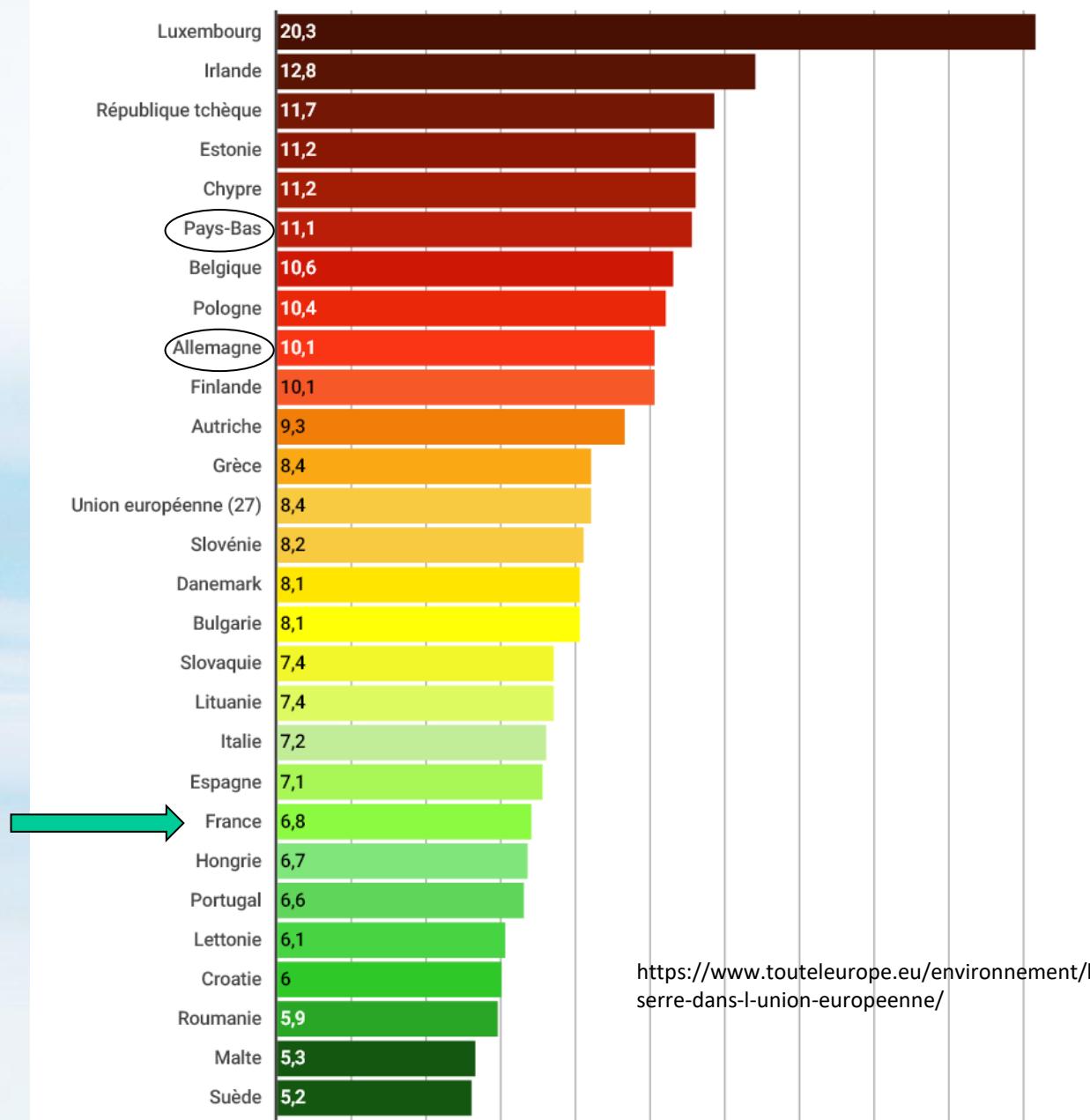


Tableau 1 : Contenu en CO₂ du kWh à la production selon les filières – Source : Base carbone Ademe. Nota : Ces chiffres intègrent les émissions directes et indirectes à la production.



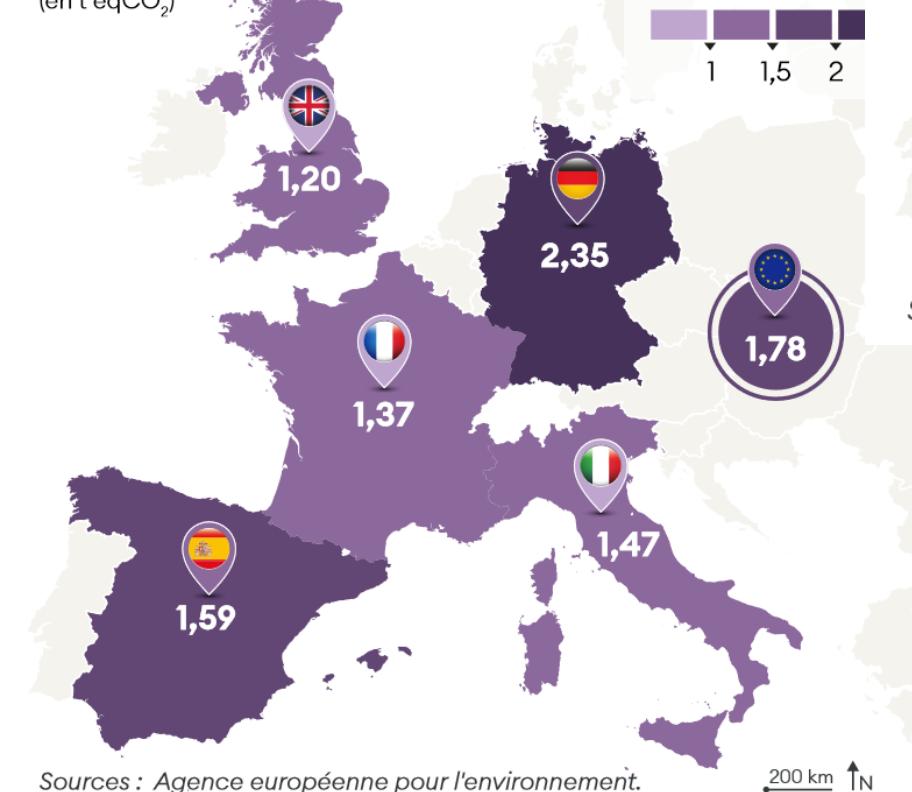
Nous y reviendrons encore...

Emissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (2019, en tCO2e/habitant)

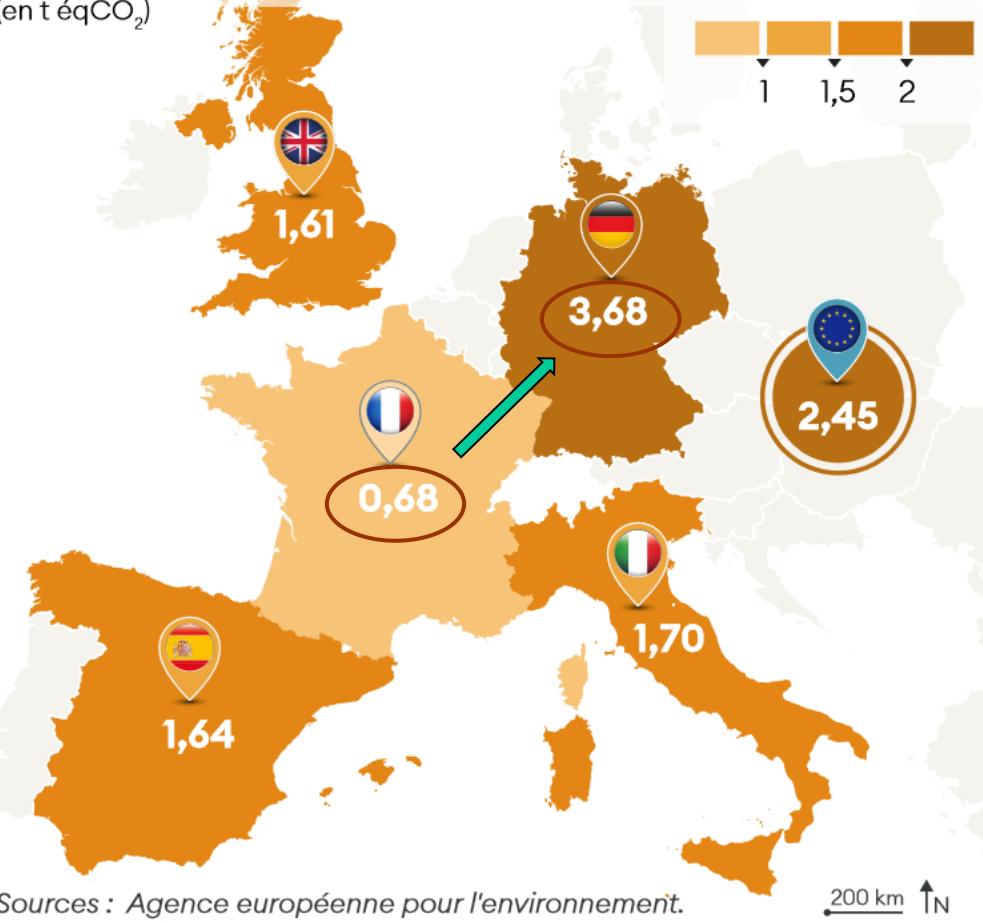


<https://www.touteurope.eu/environnement/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-l-union-europeenne/>

Émissions de GES de l'industrie par habitant en 2018
(en t éqCO₂)



Émissions de GES de l'énergie par habitant en 2018
(en t éqCO₂)



Ça se passe de commentaire !

Énergies de stocks ou énergies de flux ?



Stock : une fois découvert
on l'utilise comme on veut

Stock : **disponible** à la demande mais **épuisable**
(pic puis décroissance plus ou moins rapide)



Flux : **c'est quand il veut !**

Flux : **inépuisable** mais **intermittent et aléatoire** !

Notion de densité énergétique : c'est l'énergie par unité de volume ou de masse

Plus la densité énergétique d'une source d'énergie est élevée, plus la quantité d'énergie stockée par unité de volume ou de masse est importante

Le pétrole est la source d'énergie fossile qui a la plus forte densité énergétique

À volume comparable, il contient bien plus d'énergie que toute autre énergie fossile

Question : quelle est la source d'énergie qui a une densité un million de fois supérieure à celle des énergies fossiles ?

Les énergies de stocks ont une densité énergétique élevée, voire très élevée. C'est ce qui fait leur énorme avantage technique sur les énergies de flux qui sont diffuses et intermittentes : c'est ça le problème pour leur développement



Exemple : quelle est l'énergie la plus pratique à utiliser ?



Pour fournir 1 kWh, on peut utiliser...



Productions variables pas encore stockables...



50m² de panneaux solaires pendant 1h*



Une éolienne de 5 m de diamètre pendant 1h*

A travers un barrage de 50 m de haut...

8 000 L d'eau



Dans une centrale thermique

Bois
1 bûche



Gaz
1,5L**



Energies fossiles
Charbon
Un petit tas



Pétrole
33cl



Uranium
Une pincée



*Sous conditions climatiques moyennes en France - **A 200 bar

Le résultat est sans appel : **rien n'est actuellement aussi pratique que les combustibles fossiles, pétrole en tête**

Une centrale au charbon de 1 GW consomme ~9000 tonnes de charbon par jour.
Une centrale nucléaire de 1 GW consomme par jour ? 3 kg d'uranium

Notion de densité surfacique de puissance (W/m²)

C'est la puissance produite ou consommée par unité de surface de l'entité concernée

L'estimation requiert de prendre en compte tous les facteurs associés à l'extraction, les installations etc.

Ce paramètre permet de représenter l'extension spatiale d'une ressource

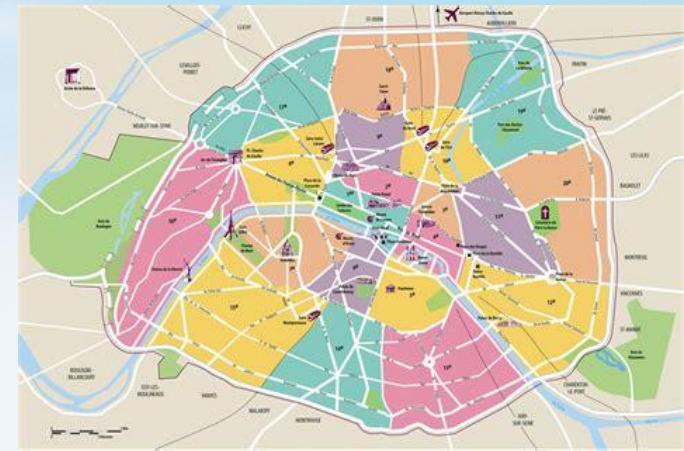
Les densités de puissance surfaciques peuvent varier de 1 à 1000 suivant les technologies

Exemple pour la ville de Paris :

densité de puissance consommée ~45 W/m²

Avec du photovoltaïque à ~10 W/m² il faudrait une surface de 4,5 fois celle de Paris couverte de panneaux pour subvenir aux besoins (même raisonnement pour des éoliennes)

Ce genre de calcul mériterait d'être davantage explicité et expliqué...



Empreinte au sol

Empreinte au sol	Nombre de km ² nécessaires pour produire 1 TWh par an	W/m ² ^{Note 3}
Biomasse	500	0,23
Solaire thermodynamique	15	7,61
Solaire photovoltaïque	10	11,4
Hydroélectricité (grands barrages)	10	11,4
Géothermie	2,5	45,6
Éolien (« empreinte »)	1,0	114,1
Charbon(mine à ciel ouvert)	5,0	876,9
Charbon (mine souterraine)	0,2	570,4
Gaz naturel	0,2	570,4
Nucléaire	0,1	1140,8

Éolien « espacement » : ~47 km²



Le facteur de charge d'un moyen de production d'énergie :



c'est le rapport entre l'énergie effectivement produite pendant une période donnée à l'énergie possible à pleine puissance pour la même période

Pour le nucléaire il est par exemple de 93% aux USA et de 70% en France en moyenne annuelle. La différence vient du fait que les réacteurs français produisant la majorité de l'électricité du pays, leur puissance est modulée pour s'adapter à la demande, c'est le suivi de charge.

Pour l'éolien, le facteur de charge est de 25% en France.

Les énergies renouvelables ont un facteur de charge qui se situe en moyenne autour de 15% pour les installations solaires photovoltaïques et de 25% pour les parcs éoliens en France.

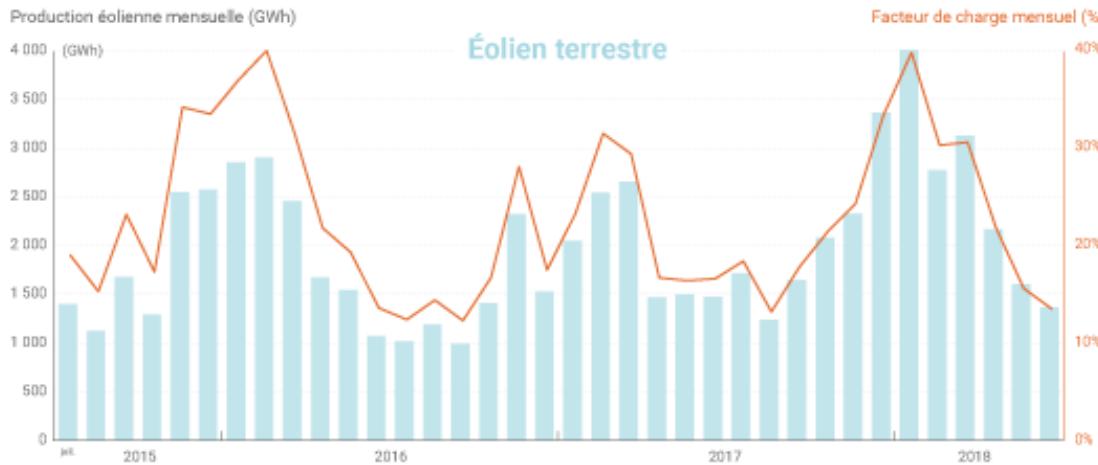


Le facteur de charge varie d'une unité de production à une autre, notamment en fonction :

- de la source d'énergie (ex : intermittente ou non) ;
- du niveau d'utilisation de l'unité de production (ex : arrêt forcé ou production limitée si la demande d'électricité est trop faible ou en cas de maintenance) ;
- de sa localisation (ex : ensoleillement de la zone pour les panneaux solaires, vitesse du vent pour les éoliennes).

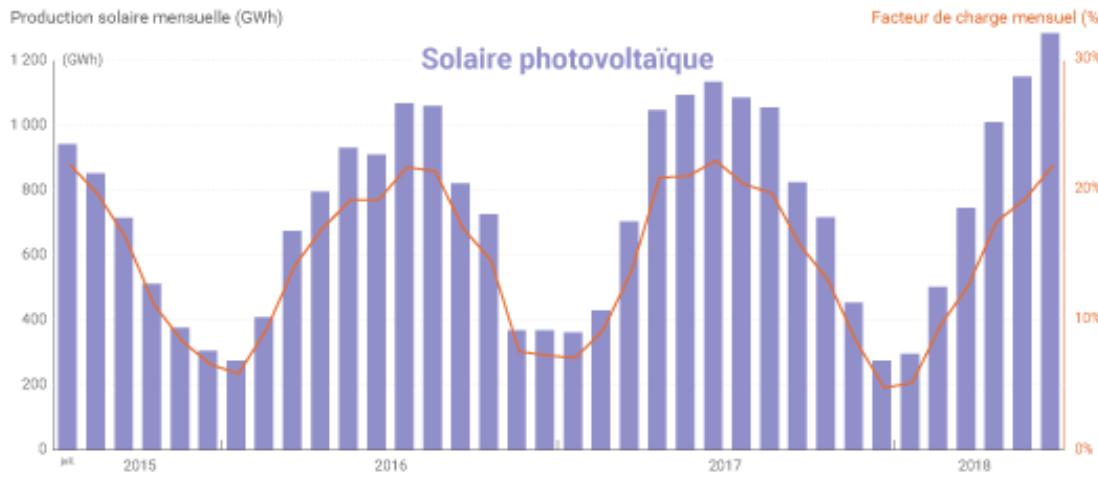
Pour l'éolien, le facteur de charge est de 25% en France.

France métropolitaine Production d'électricité d'origine éolienne et photovoltaïque



Avec de telles variabilités et des facteurs de charge aussi faibles il faudra prévoir d'autres types d'installations et/ou de très grandes capacités de stockage

15% pour les installations solaires photovoltaïques



Notion de TRE (taux de retour énergétique)

Le taux de retour énergétique c'est le ratio de l'énergie utilisable rapportée à la quantité d'énergie investie.

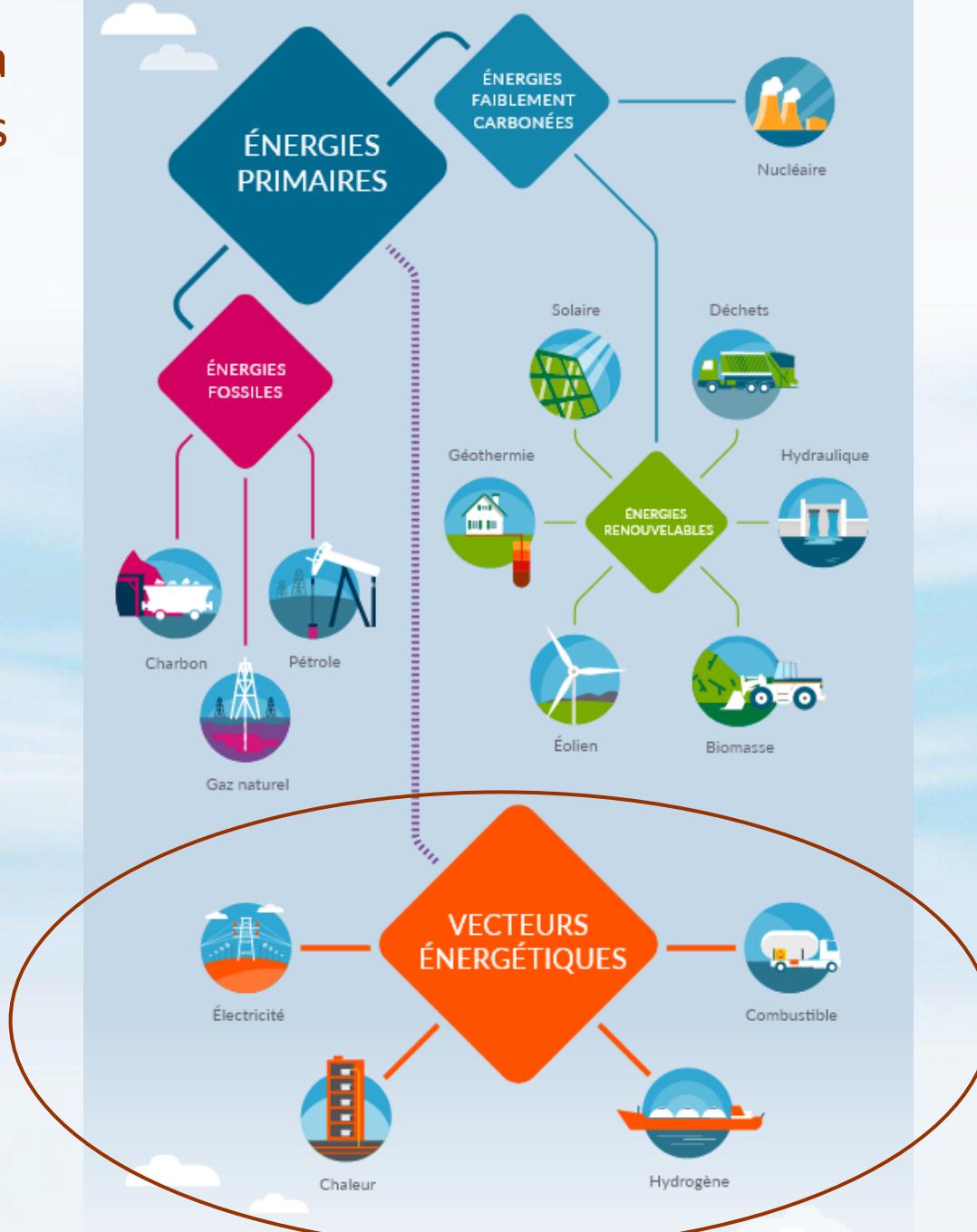
$$TRE = \frac{\text{énergie utilisable}}{\text{énergie dépensée}}$$

Coût de production ou coût du système : à bien distinguer

Le coût de production d'un kWh à la sortie d'un moyen de production est important mais bien plus important est le coût du kWh à la borne de l'utilisateur, c'est le coût de l'ensemble du système pour disposer de cette énergie 24h/24h...

4. Panorama des énergies

Les énergies en un coup d'œil



Il faut bien distinguer les vecteurs énergétiques des énergies primaires 39

Quelles sources pour quels produits énergétiques finaux ?

	Chaleur directe	Électricité	Combustible	Carburant
Énergies de flux				
Solaire passif et capteurs	•			
Solaire thermodynamique	•	•		
Solaire photovoltaïque		•		
Hydraulique		•		
Éolien		•		
Énergie de la houle		•		
Énergie marémotrice		•		
Énergie thermique des mers		•		
Biomasse		•	•	•
Biométhane		•	•	•
Géothermie et PAC	•	•		
Énergies de stock				
Nucléaire		•		
Charbon		•	•	
Pétrole		•	•	•
Gaz naturel		•	•	•

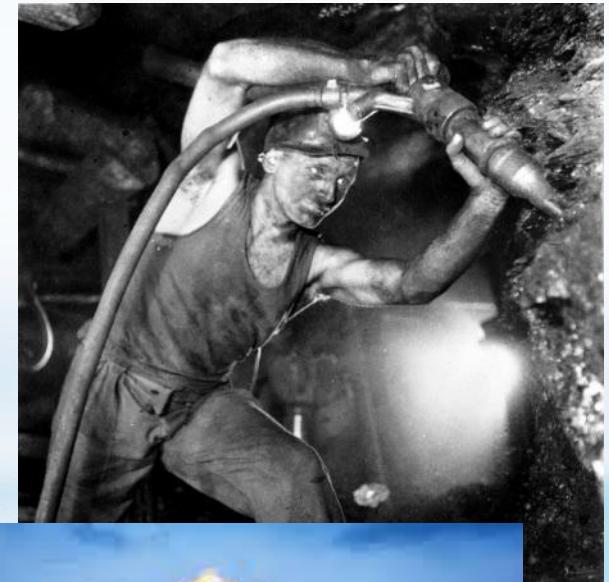


5. Pétrole, charbon, gaz

Merci les énergies fossiles !

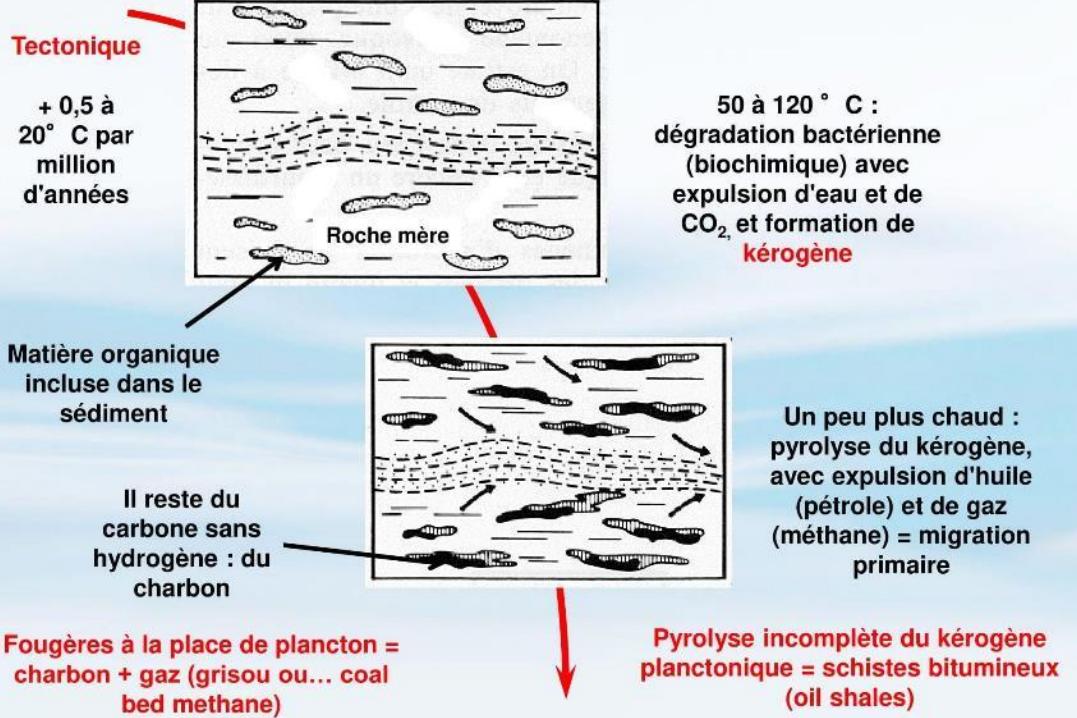
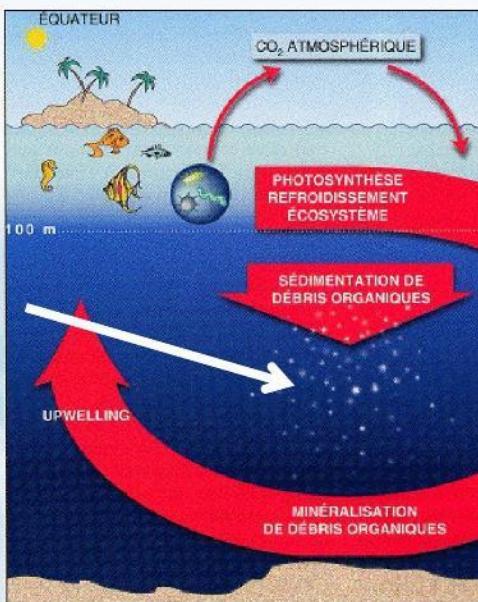
Pourquoi ? Elles ont permis l'abondance énergétique laquelle nous a permis d'accomplir d'immenses progrès

Mais, mais, maiselle sont devenues les fossoyeurs du climat !



Le pétrole (histoire géologique fascinante)

C'est quoi, le pétrole ? Des vieux planctons (300 millions d'années)



Vivement conseillé : le cours de JM Jancovici à l'École des mines sur Youtube

Du pétrole partout, absolument partout !



Notre dépendance aux énergies fossiles



35 milliards de barils (1 baril = 159 l) de pétrole par an !

Autant dire que le pétrole est omniprésent dans notre vie,
à la fois comme source d'énergie et comme matière première

Le pétrole a beaucoup d'avantages :

il est liquide, énergétiquement dense, facile à transporter et à stocker, et simple à utiliser, même avec peu d'infrastructures.

98% du transport planétaire est fait avec du pétrole. L'électricité est marginale. Le gaz est marginal. C'est vraiment le pétrole qui domine de la tête et des épaules dans les transports.

Ce qui veut dire aussi une chose capitale : *le pétrole est l'énergie de la mondialisation.* Il n'y a pas de mondialisation sans pétrole. Et symétriquement, pour qu'il y ait de la mondialisation, il faut du pétrole.



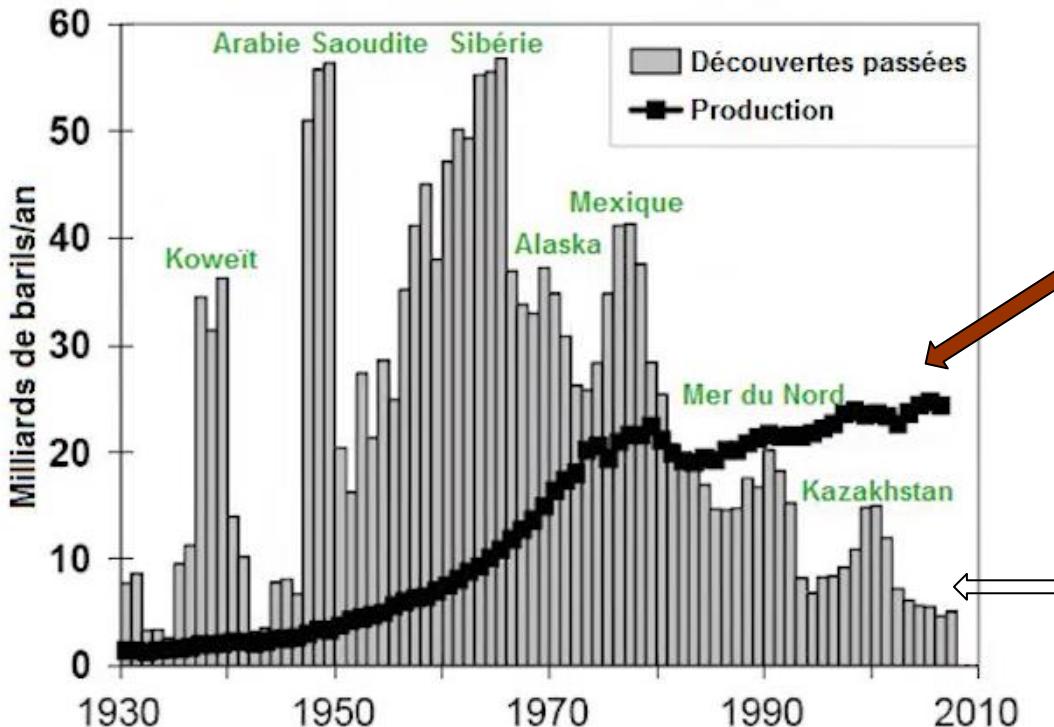
Du puits à la pompe, quels sont les paramètres clés ?

- 1) les réserves
- 2) les capacités et les rendements de production
- 3) les besoins des consommateurs
- 4) les propriétaires des réserves

Découvertes de pétrole conventionnel

Ré-évaluations attribuées à l'année de découverte

Lissage par moyenne glissante sur 3 ans



On aurait actuellement découvert presque toutes les ressources

Nous consommons de plus en plus de pétrole tout en en découvrant de moins en moins. On remarque même qu'on en consomme plus qu'on n'en découvre depuis les années 80. Bref, nous vivons uniquement sur les découvertes passées.

La technologie évolue et permet de trouver de plus en plus facilement le pétrole. Pourtant, l'Humanité en découvre de moins en moins... comme si elle avait bientôt découvert tout ce qu'il y a à découvrir.

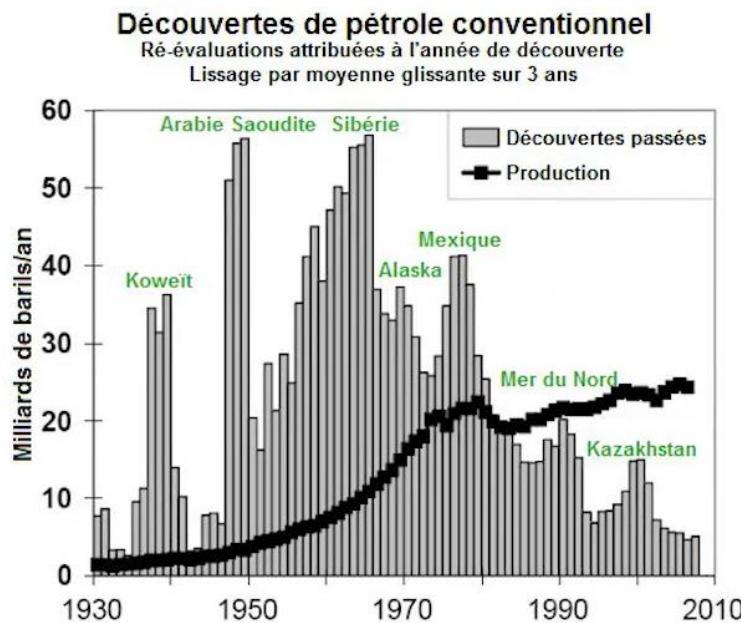
Nota : certaines évaluations des réserves sont fiables et publiées d'autres non (secret etc.) et donc estimées ce qui laisse place à de nombreuses conjectures

Difficile à croire mais **l'Humanité va devoir apprendre à diminuer la consommation de la ressource dont elle est le plus dépendante !**

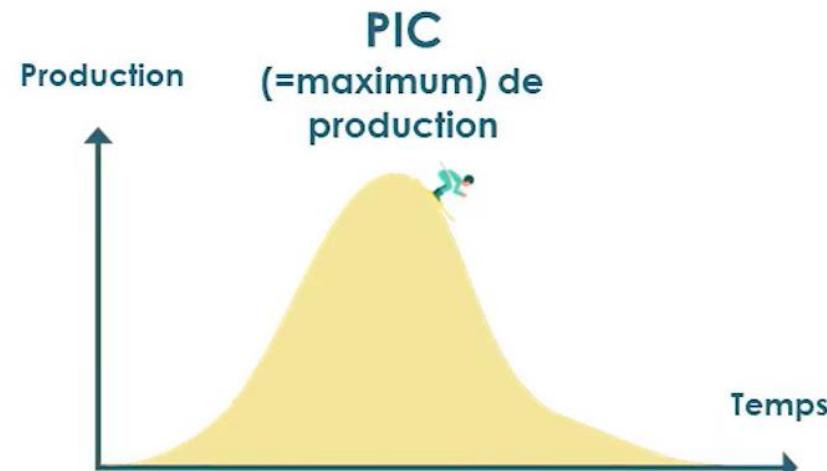


AVENIR CLIMATIQUE
PARLONS CLIMAT AVEC ENERGIE !

Les réserves de pétrole : ça commence à piquer...



On aurait actuellement découvert presque toutes les ressources

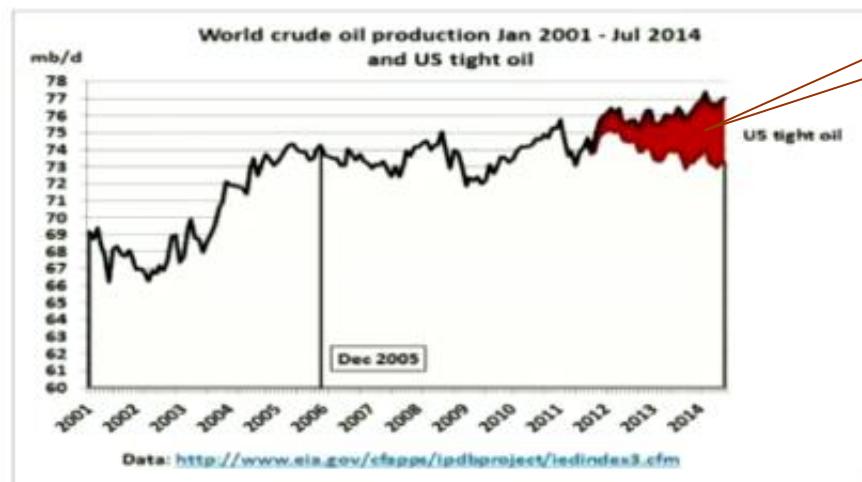


On se rapproche du pic global de production

Source : Association for the Study of Peak Oil (ASPO)

Les découvertes de pétrole et de gaz contenus dans des gisements dits « conventionnels », c'est-à-dire des roches poreuses imprégnées et pas des roches-mères, déclinent depuis maintenant plus de cinquante ans.

Source : U.S. Energy Information
Administration, 2016



Pétroles non
conventionnels

Nos sociétés industrielles se sont construites sur des ressources énergétiques avec un très bon taux de retour énergétique. Le pétrole est passé en dessous de 20 récemment mais était beaucoup plus élevé pendant la majeure partie de son exploitation.

Une des grosses limites des pétroles non conventionnels c'est leur très faible taux de retour énergétique.

Un haut taux de retour énergétique est très important pour le maintien de nos sociétés industrielles.

Pour extraire des sources d'énergie, on a besoin d'énergie



Le robinet : Le pétrole est de plus en plus difficile à extraire



De 1900....



.... À aujourd'hui



On utilise du pétrole de plus en plus difficile à extraire



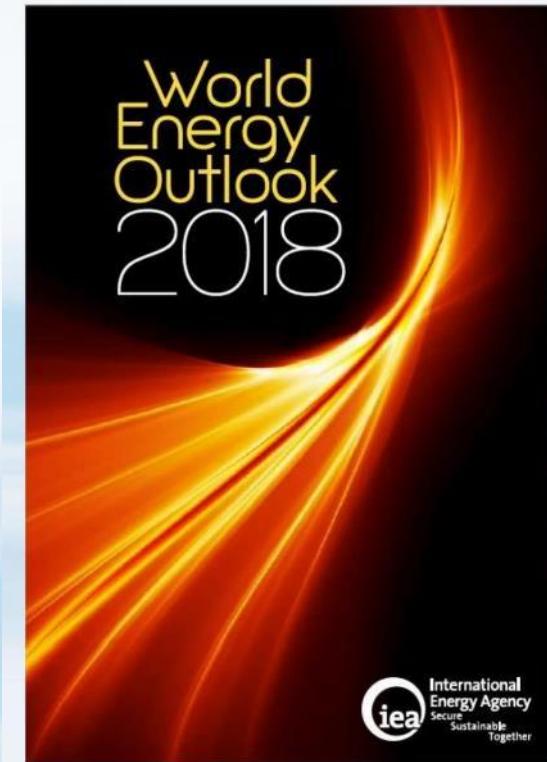
$$1 \text{ 🛢} = 100 \text{ 🛢}$$

Pétrole conventionnel

$$1 \text{ 🛢} = 3 \text{ 🛢}$$

Pétroles non conventionnels
(offshore profond, sables bitumineux, ...)

Le taux de retour énergétique (TRE) permet de mesurer le prix "physique" de l'énergie. Il calcule le rapport entre l'énergie que l'on récupère et l'énergie qu'il a fallu investir pour aller chercher cette énergie.



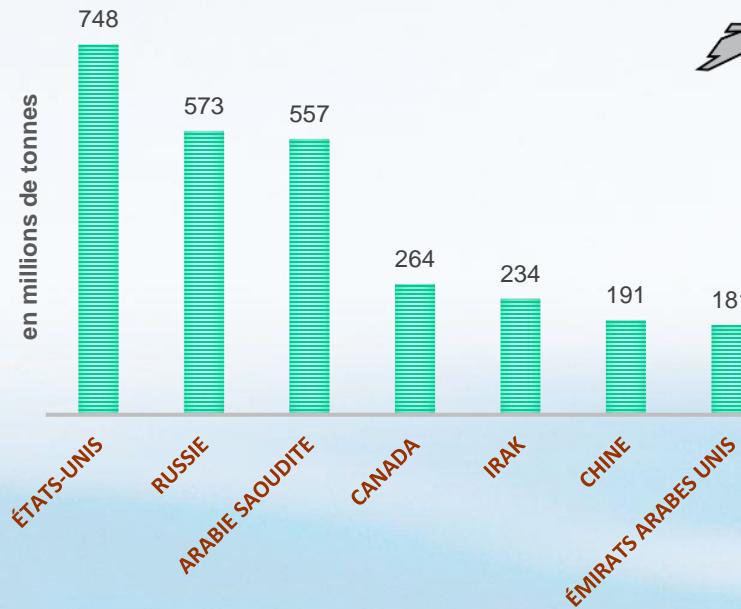
« Global conventional crude oil production peaked in 2008 at 69.5 mb/d and has since fallen by around 2.5 mb/d »

The risk of a supply crunch looms largest in oil. The average level of new conventional crude oil project approvals over the last three years is only half the amount necessary to balance the market out to 2025 (...). US tight oil is unlikely to pick up the slack on its own. (...) US tight oil (...) would need to more than triple in order to offset a continued absence of new conventional projects.

« En 2018, cela fait dix ans que la production de pétrole conventionnel, dans le monde, est passée par son maximum. Et depuis, elle est en déclin. »



QUI PRODUIT LE PETROLE ?



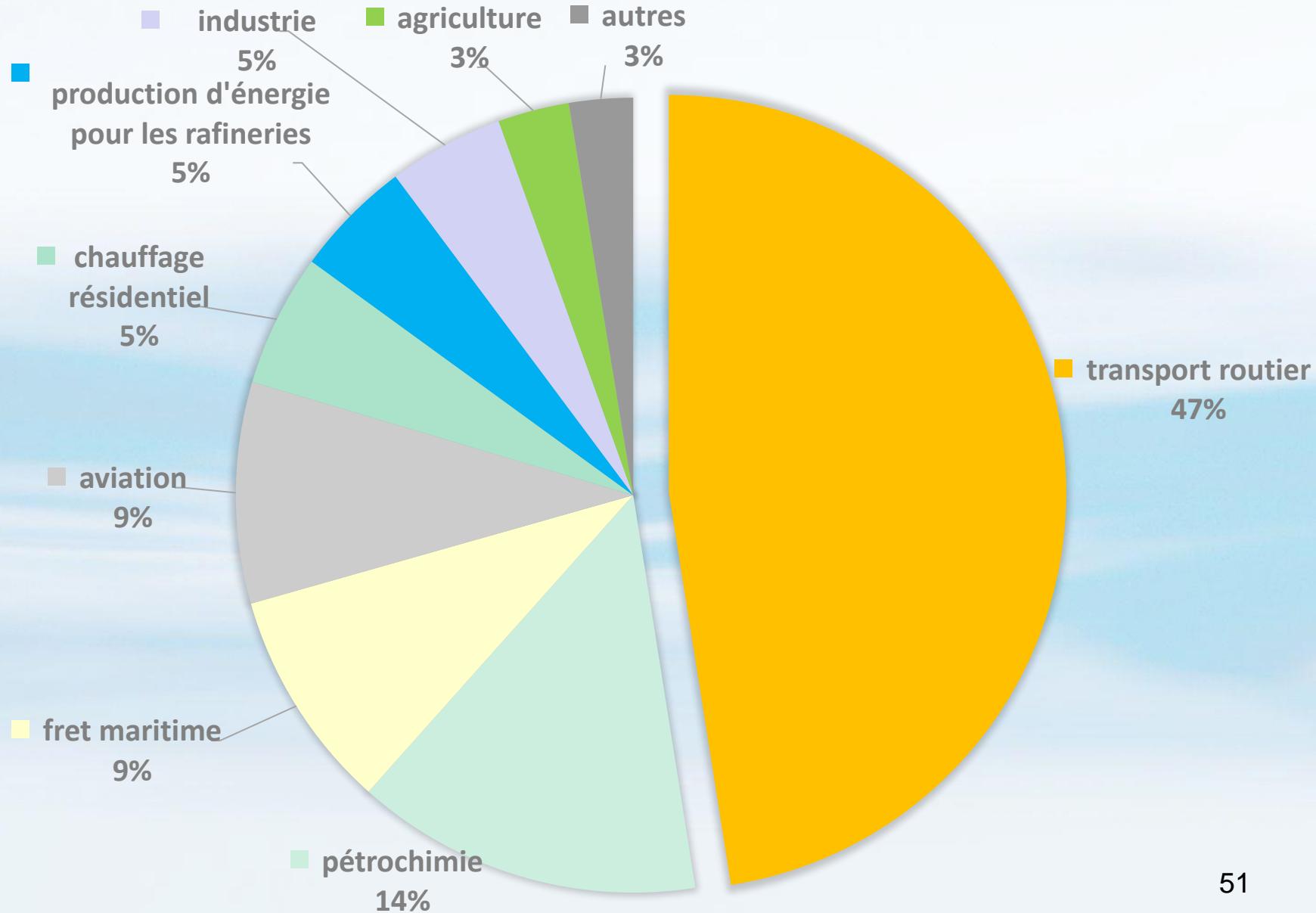
"Le pétrole fournit un tiers de l'énergie primaire mondiale...mais est nécessaire à l'extraction et au transport de la presque totalité de l'énergie primaire" Arthur Keller



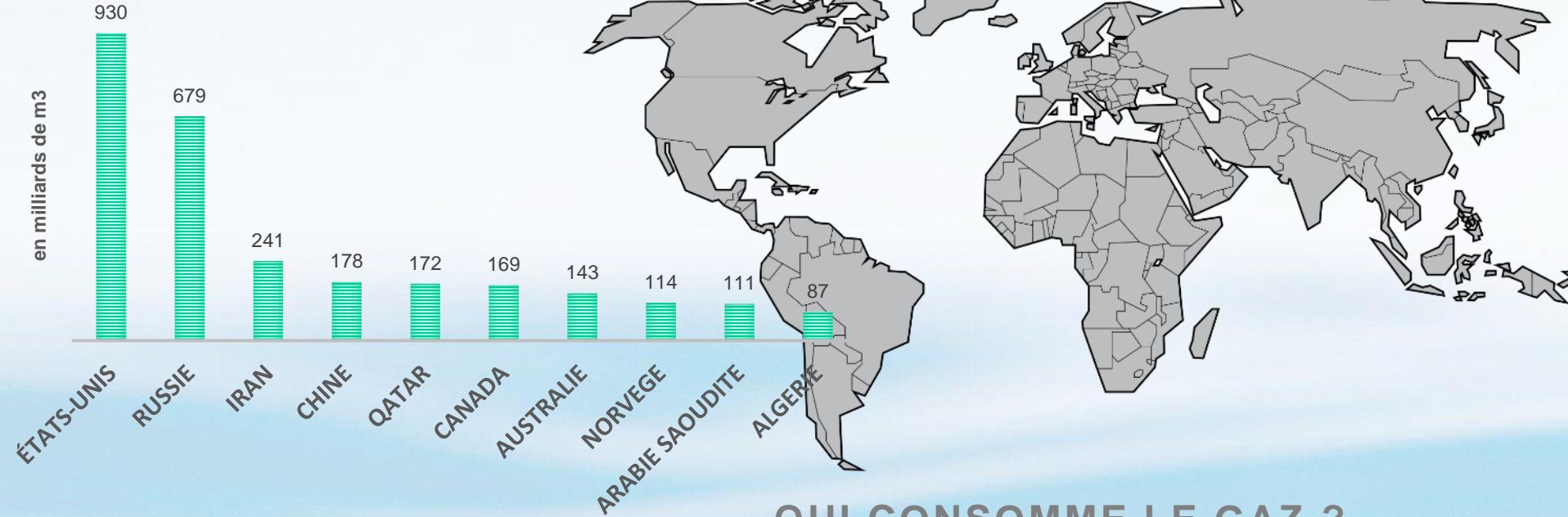
QUI CONSOMME LE PETROLE ?



À QUOI SERT LE PÉTROLE EN EUROPE ?



QUI PRODUIT LE GAZ ?

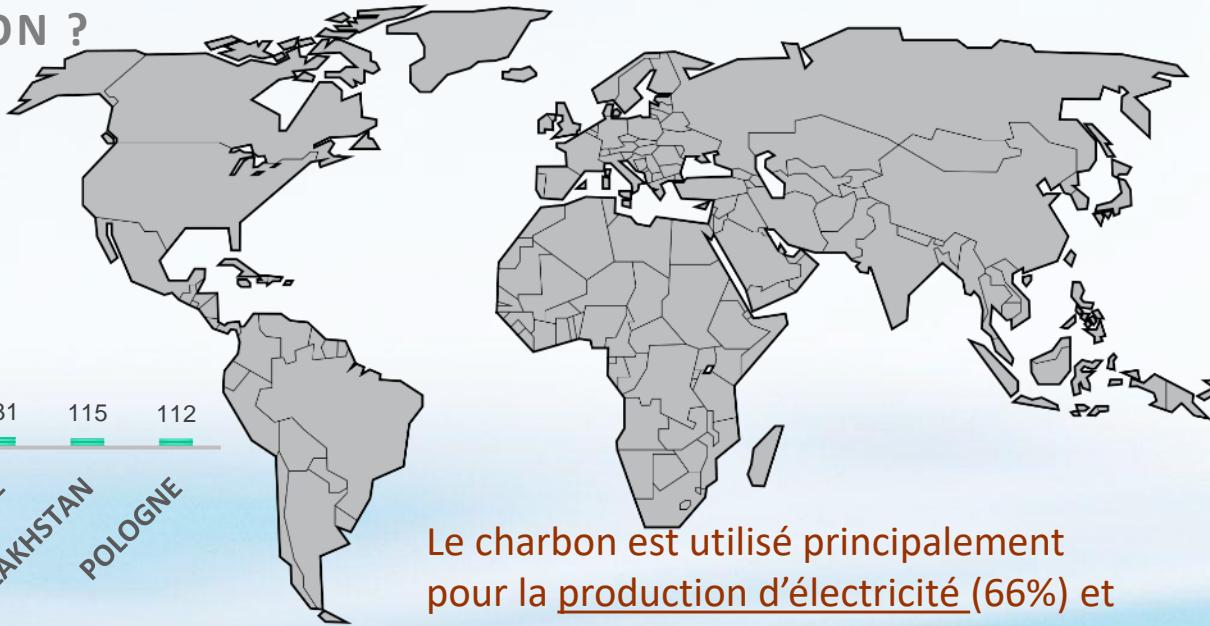


QUI CONSUMME LE GAZ ?

En France, c'est le chauffage qui domine de très loin. On a à peu près 60% du gaz qu'on consomme qui est utilisé dans le chauffage. Mais en gros, dans le monde, c'est : électricité, l'industrie, le chauffage.



QUI PRODUIT LE CHARBON ?



Le charbon est utilisé principalement pour la production d'électricité (66%) et pour la production d'acier (12%).

QUI CONSOMME LE CHARBON ?

Entre 2008 et 2016, la Chine a installé chaque année entre 40 et 60 GW de capacité électrique au charbon – soit l'équivalent de la puissance totale du parc nucléaire français chaque année !

Made in China = made in charbon

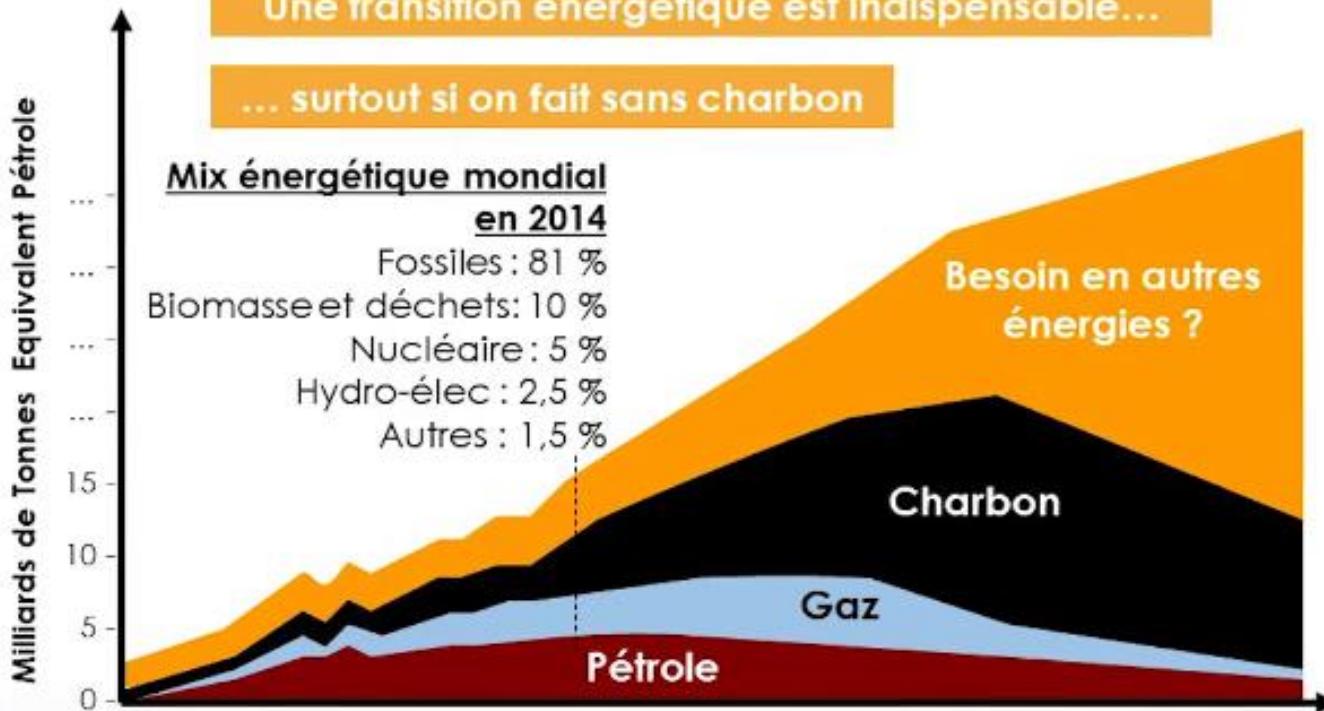


Les réserves : ça commence à piquer...

Les 3 énergies fossiles connaîtront un pic

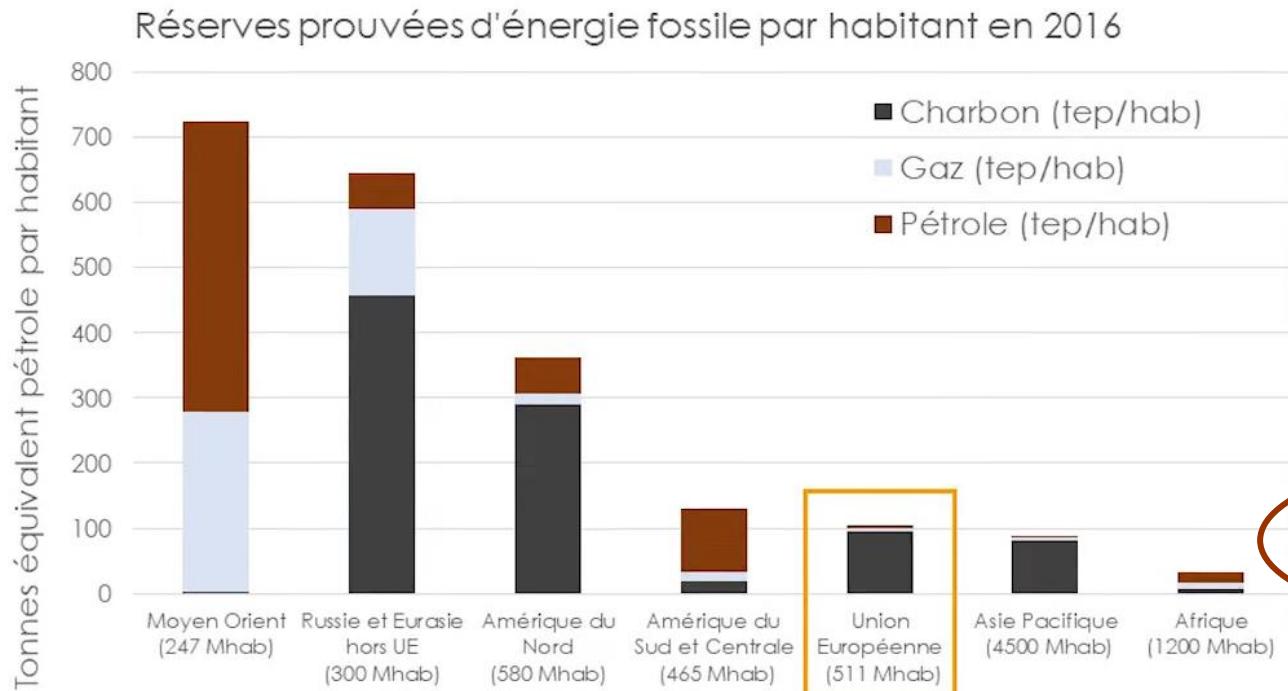
Une transition énergétique est indispensable...

... surtout si on fait sans charbon



Source : Avenir Climatique

Le propriétaire : Qui possède les réserves fossiles prouvées ?



Posséder des ressources énergétiques est un pouvoir d'influence sur les pays sans ressources

L'Europe a le plus à perdre d'une transition énergétique ratée

Source : Avenir Climatique à partir des données BP Statistical Review

Les énergies fossiles qui ont permis notre monde resteront encore longtemps un enjeu stratégique primordial

Et l'Homme devint hyper mobile

En France, on compte environ **40 millions de véhicules particuliers**, et la distance moyenne parcourue annuellement est de 13 000 km, ce qui représente un total de **546 milliards de km** pour une consommation de **26 milliards de litres en 2020...**



Le nombre de kilomètres-passagers parcourus en avion est passé de 40 milliards en 1950 à près de **9000 milliards** en 2019 soit **une multiplication par 225** en près de 70 ans seulement



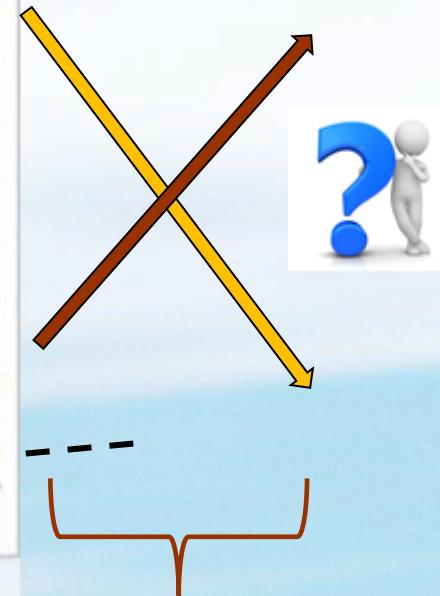
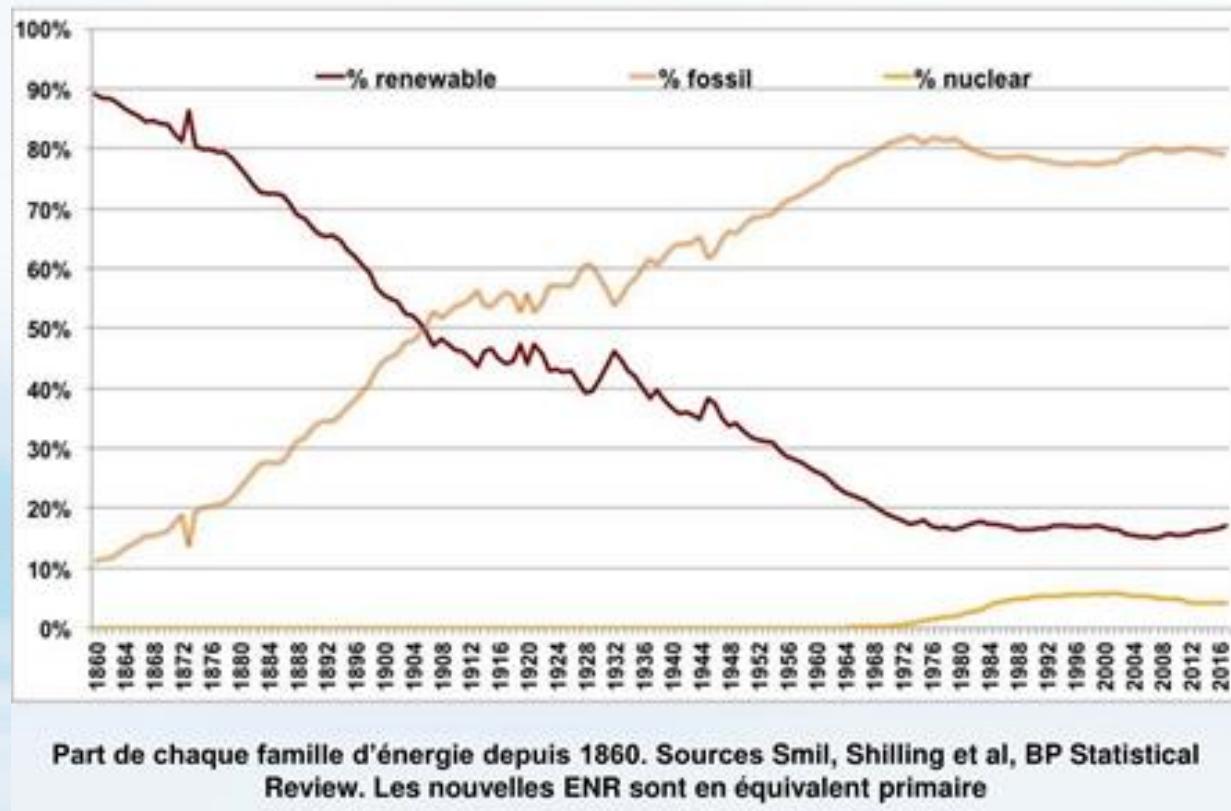
Le pétrole est également l'élément de base pour **la production de plastique** (370 millions de tonnes en 2019).



99% des matières plastiques et une grande partie des matières textiles (nylons, polyesters) sont issues de la pétrochimie, autant d'applications qui rendent **notre sevrage au pétrole très compliqué**

L'humanité brûle les énergies fossiles un million de fois plus vite qu'elles se sont formées... L'exploitation de ces combustibles a permis de passer d'un système limité par le flux d'énergies renouvelables à un système limité par les stocks disponibles et par notre capacité à les extraire

On (re)pose le problème



Il s'agit donc de substituer en l'espace de 30 ans des énergies de stock (fossiles) par des énergies de flux (revenir au mix énergétique d'il y a 150 ans, mais avec les technologies d'aujourd'hui)

Ce sera le sujet de l'exposé de la prochaine fois

7. Par quoi remplacer les énergies fossiles ?

Schéma
purement
didactique



Sur l'électricité la France est un pays bas carbone mais sur le reste des usages la France est un pays fossile comme les autres

Nota :

Le pétrole devrait être placé beaucoup plus haut

Le nucléaire beaucoup plus à droite et nettement plus bas

L'éolien et le solaire plus à gauche et un peu plus haut

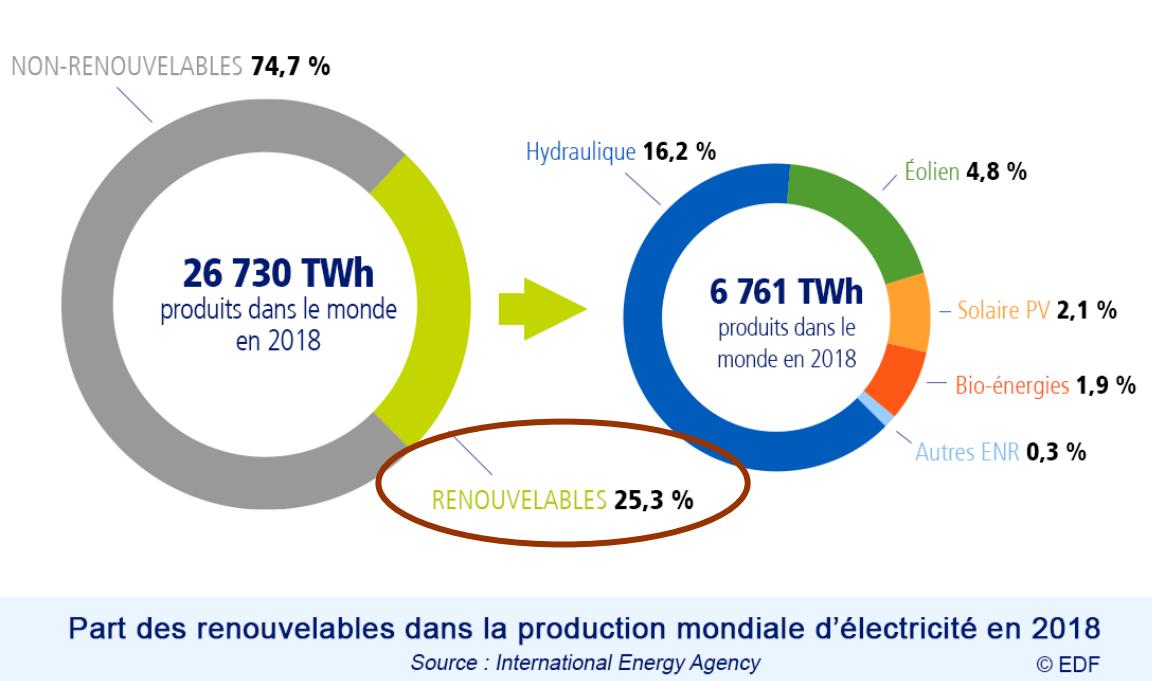
8. Les énergies bas carbone à notre disposition



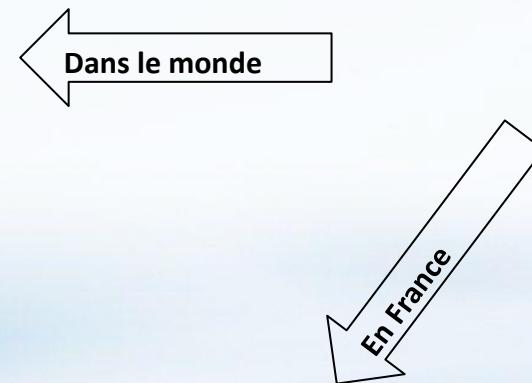
Flux énergétiques très faibles, relativement facile à déployer mais réseau électrique actuel peu adapté

Densité énergétique extrêmement élevée,
aujourd'hui très difficile à déployer mais réseau disponible en l'état

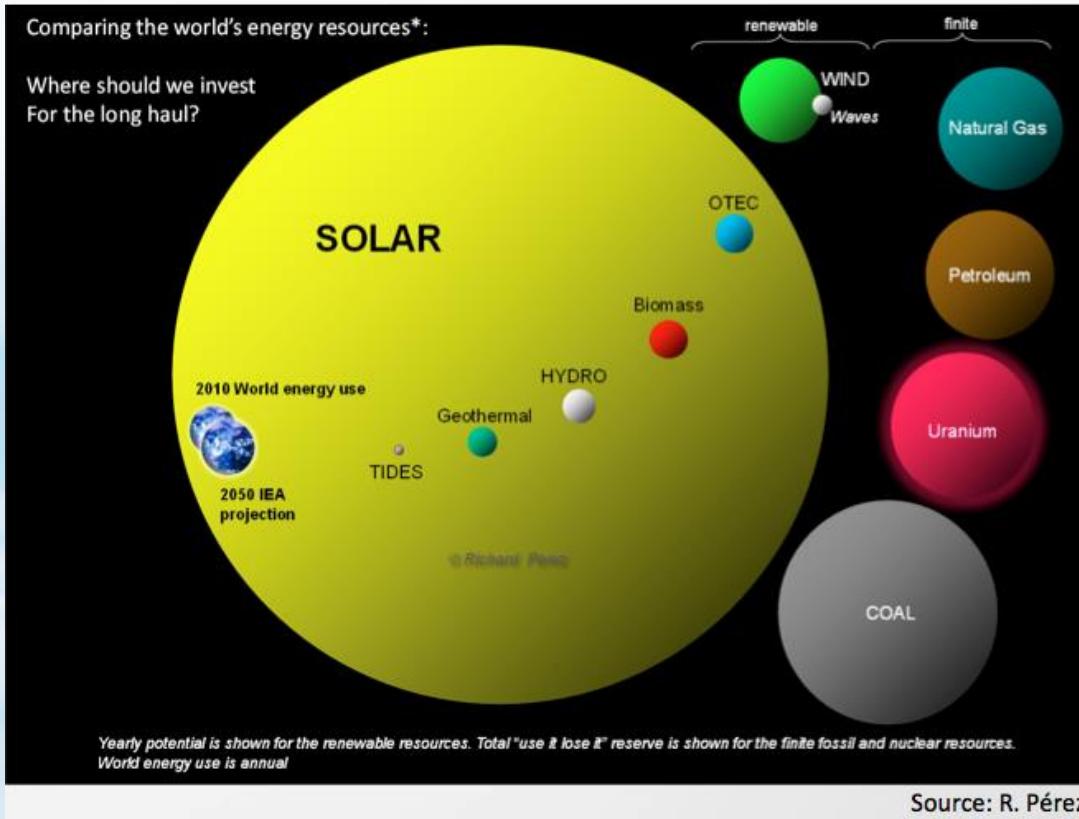




Part des ENR dans l'électricité



9. L'énergie solaire



Comparaison
imagée des
ressources
énergétiques en
volume de
sphères

En une demi-heure, le soleil nous envoie la quantité d'énergie consommée par l'humanité en un an, c'est énorme. On a le temps de voir venir.
Mais est-ce si simple ?

EXPLOITATION DE LA RESSOURCE SOLAIRE

Les voies principales de conversion

Conversion directe en énergie thermique

- Capteur thermique (par ex. pour la production d'eau chaude sanitaire)



Crédits : DOE/NREL

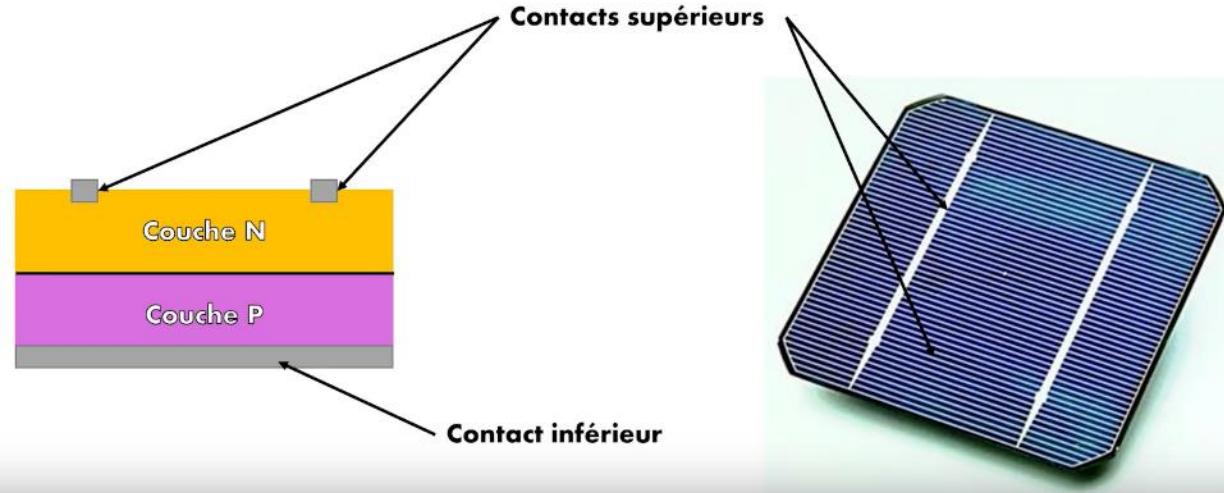
Conversion directe en énergie électrique

- Capteur photovoltaïque



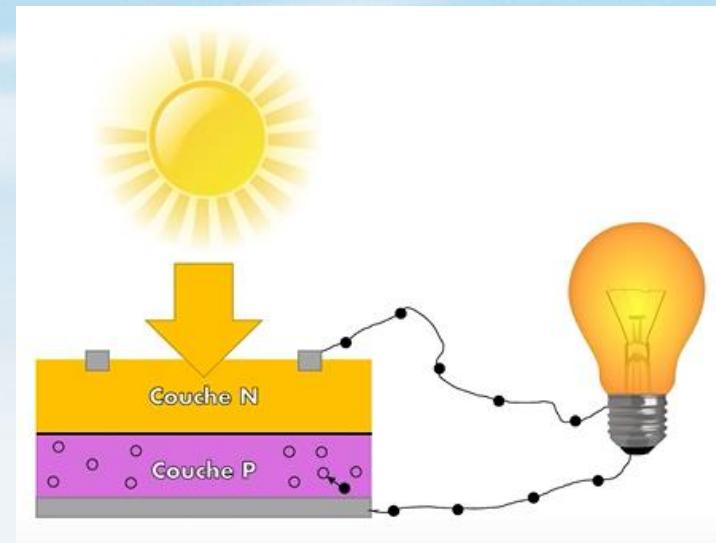
Crédits : DOE/NREL

Les panneaux photovoltaïques en silicium



Extraordinaire
découverte !

Quand on illumine cette cellule, les charges négatives s'accumulent dans la couche N et les charges positives dans la couche P. Il "suffit" de mettre les deux en contact pour obtenir un courant électrique





Si on prend l'exemple d'une centrale nucléaire qui produit 8 TWh/an, il faudrait un parc photovoltaïque avec les mêmes caractéristiques que celui de Bordeaux mais d'environ 60 km² pour la remplacer.

L'essentiel des surfaces photovoltaïques qui ont été développées en France, aujourd'hui, sont des grandes surfaces photovoltaïques. L'énergie solaire photovoltaïque en France, comme dans beaucoup d'autres pays, ce n'est pas une énergie de particuliers : c'est une énergie d'industriels comme les autres.

Le solaire et l'éolien offrent une bonne complémentarité à l'échelle saisonnière. Et il faut noter également que dans des conditions anticycloniques, il n'y a pas de vent... Mais il n'y a pas de nuage non plus et donc il y a du soleil ! Et.... inversement !

Les panneaux photovoltaïques ont un des facteurs de charge les plus bas de tous les moyens de production d'électricité

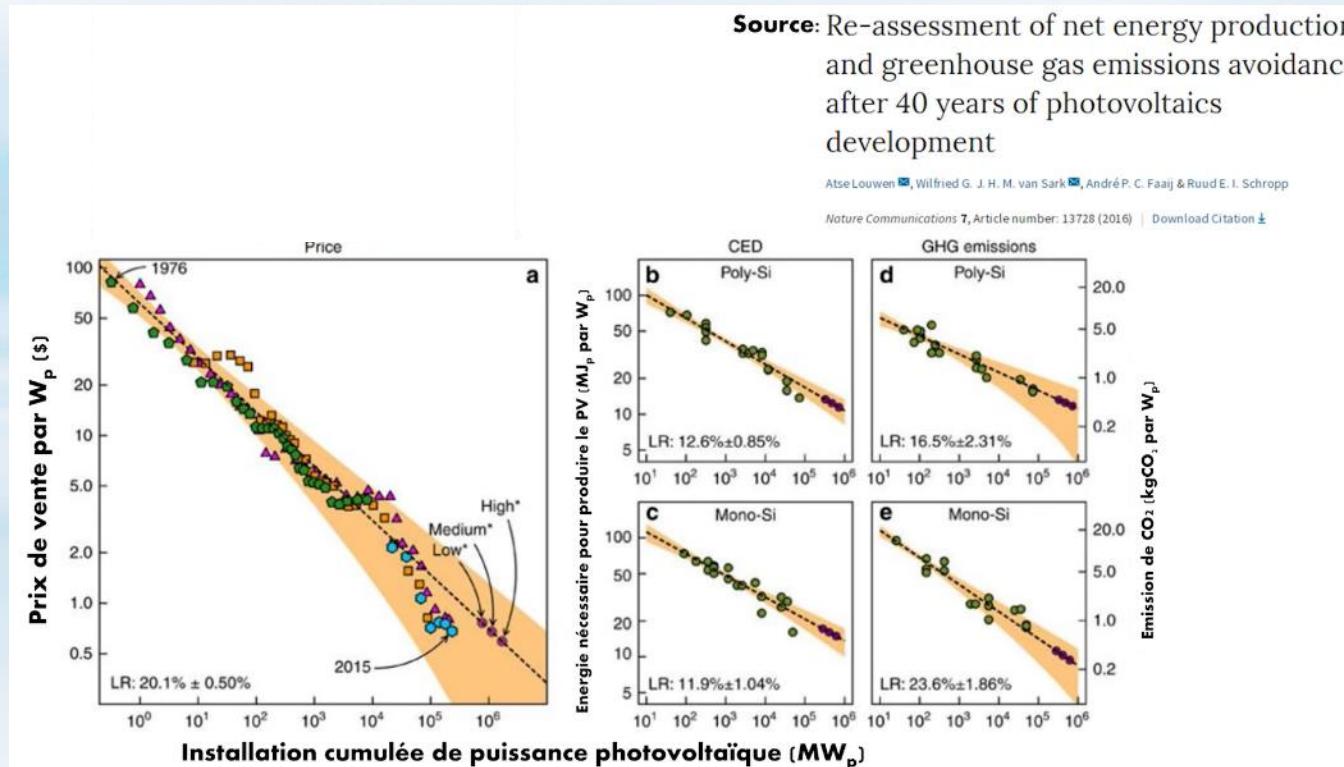
L'éolien c'est autour de 25% en France et pour le nucléaire autour de 75%. Le solaire, en France, tombe à 13%.

En gros il faut installer 2 MW de puissance photovoltaïque pour fournir autant d'électricité sur une année qu'un MW d'éolien et plus de 5 MW de solaire pour fournir autant d'électricité qu'un MW de nucléaire.

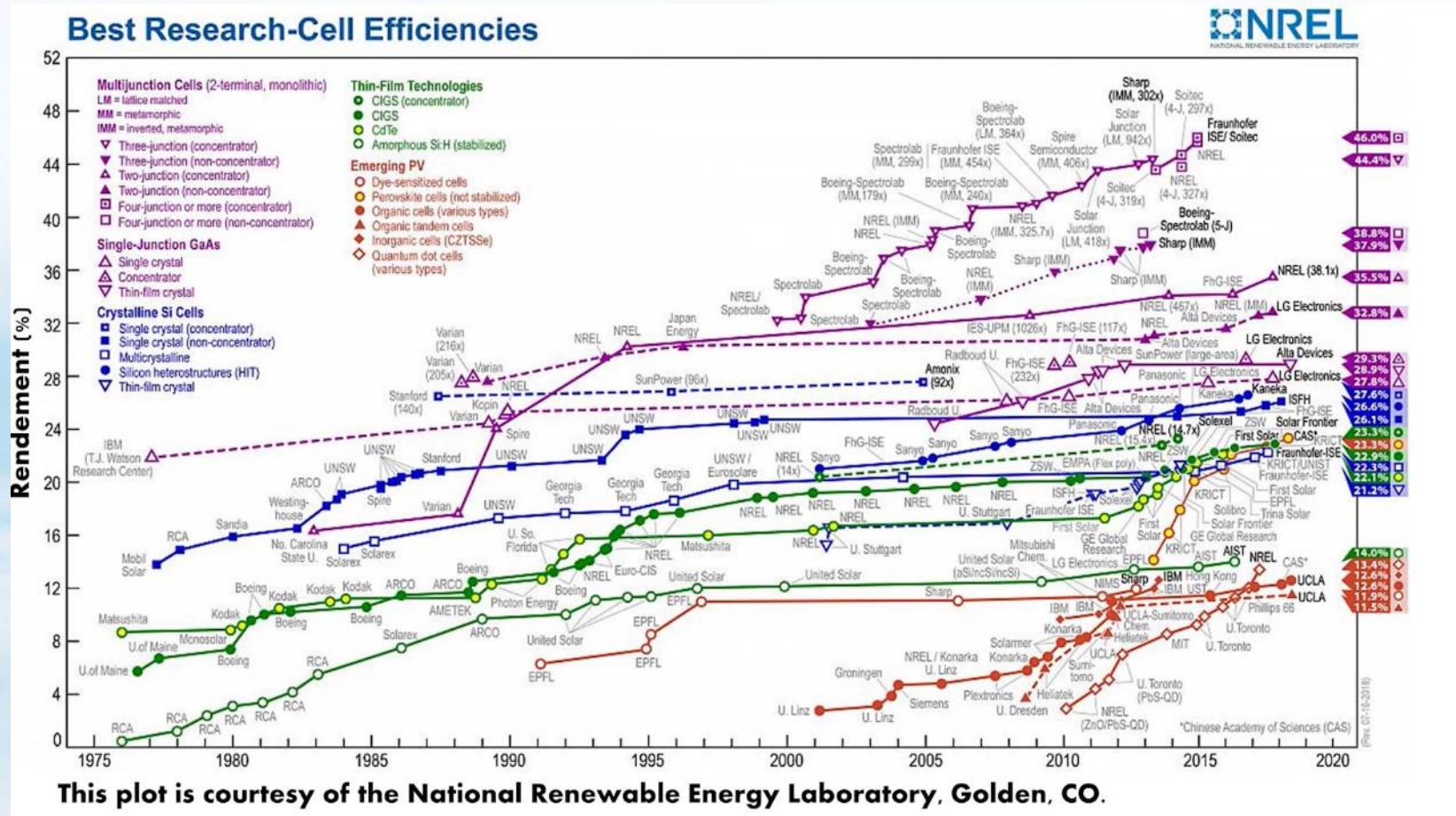
On ne peut pas se contenter de regarder la puissance installée. Il faut prendre en compte les facteurs de charge pour avoir une idée de l'électricité produite quand on compare plusieurs filières.



Il y a plusieurs tendances lourdes avec le photovoltaïque. Plus on produit de panneaux photovoltaïques, plus le prix des panneaux baisse, plus l'énergie nécessaire pour produire les panneaux baisse et donc plus les émissions de CO₂ pour produire ces panneaux baissent. L'empreinte écologique des panneaux photovoltaïques va probablement continuer de s'améliorer avec son développement.

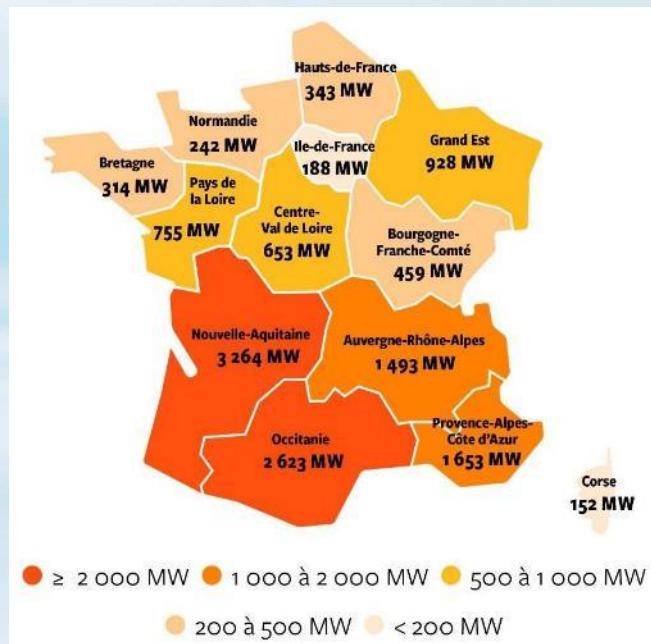


Les rendements des cellules augmentent en laboratoire (beaucoup, beaucoup de recherches)



La puissance du parc photovoltaïque en métropole atteint **13,1 GW** fin 2021.

Le rythme de développement du photovoltaïque a atteint un **niveau record en 2021**, avec près de **2,7 GW** nouvellement installés. Ce rythme est plus que trois fois plus élevé que celui observé sur les cinq années précédentes



La production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque s'est élevée à **14,3 TWh** au cours de l'année **2021**, en hausse de **13%** par rapport à **2020**. Elle représente environ **3%** de la consommation électrique française.

Le facteur de charge annuel moyen s'est établi à **13,7% en 2021** (avec un facteur de charge mensuel allant de 5,5% en décembre à 20,3% en février).

Puissance photovoltaïque installée par région fin 2021 (Source : Panorama de l'électricité renouvelable au 31 décembre 2021 Agence Ore-Enedis-RTE-SER)

Une étude réalisée par l'ADEME a permis d'identifier près de 850 sites en friche pouvant accueillir des projets photovoltaïques, pour une puissance de 8,2 GW environ.

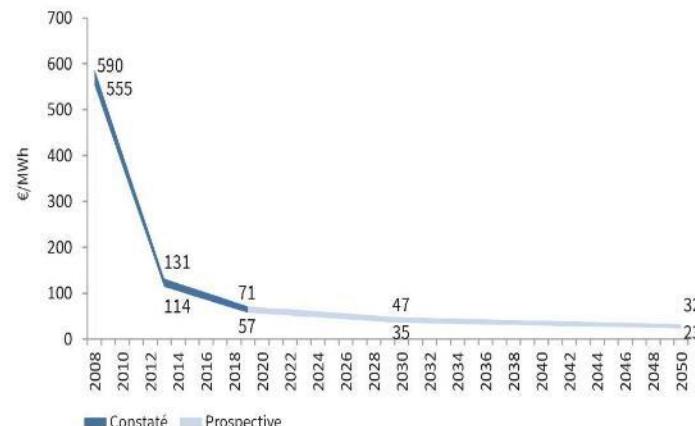
Les grands parkings extérieurs (plus de 2 500 m²) pourraient représenter un potentiel d'environ **7 à 11 GW** s'ils s'équipaient d'ombrières photovoltaïques sur au moins la moitié de leur surface.

En ce qui concerne le photovoltaïque sur bâtiment, le **potentiel technique réel nécessite d'évaluer non seulement les surfaces de toitures disponibles, mais également leur exposition et leur inclinaison.**

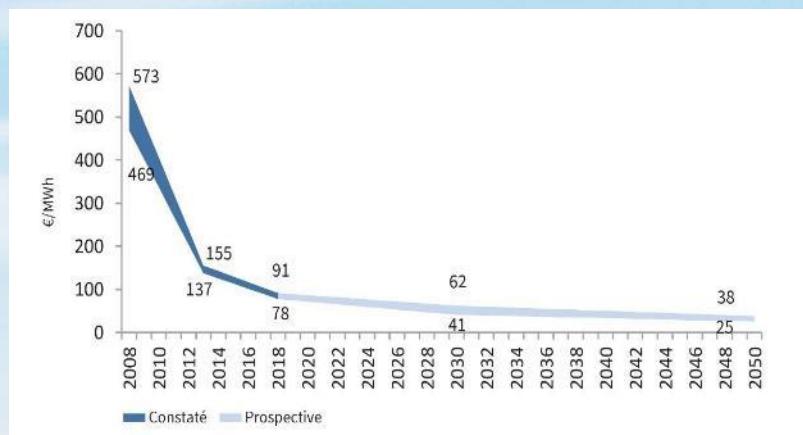
L'actuelle programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE2) prévoit un **objectif de puissance cumulée de 20,1 GW en 2023 et entre 35,1 et 44 GW en 2028.** L'objectif 2023 ne devrait pas être atteint.



Le coût de production des installations photovoltaïques a fortement diminué ces dernières années.



*Évolution du coût moyen de production (LCOE) des centrales photovoltaïques au sol en France
(Source : Étude ADEME « Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France », données 2019)*



Évolution du coût moyen de production (LCOE) des installations photovoltaïques sur grandes toitures en France (Source : Étude ADEME « Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France », données 2019)

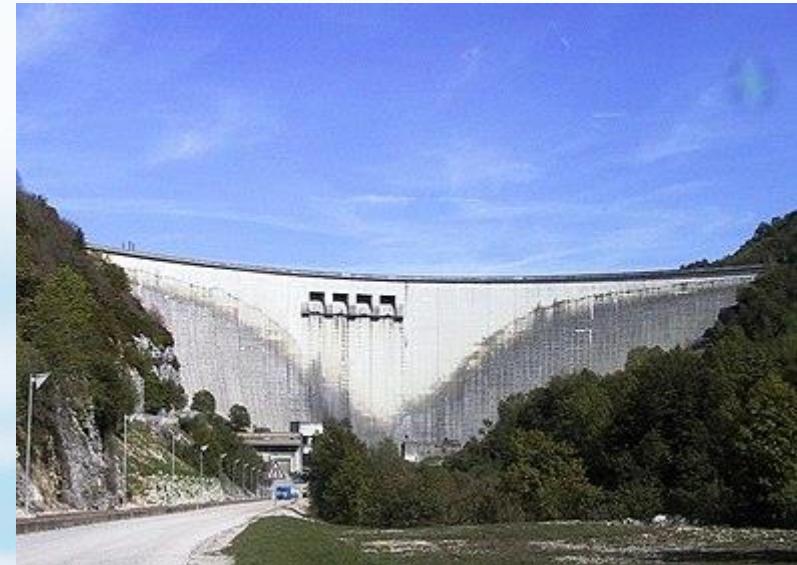
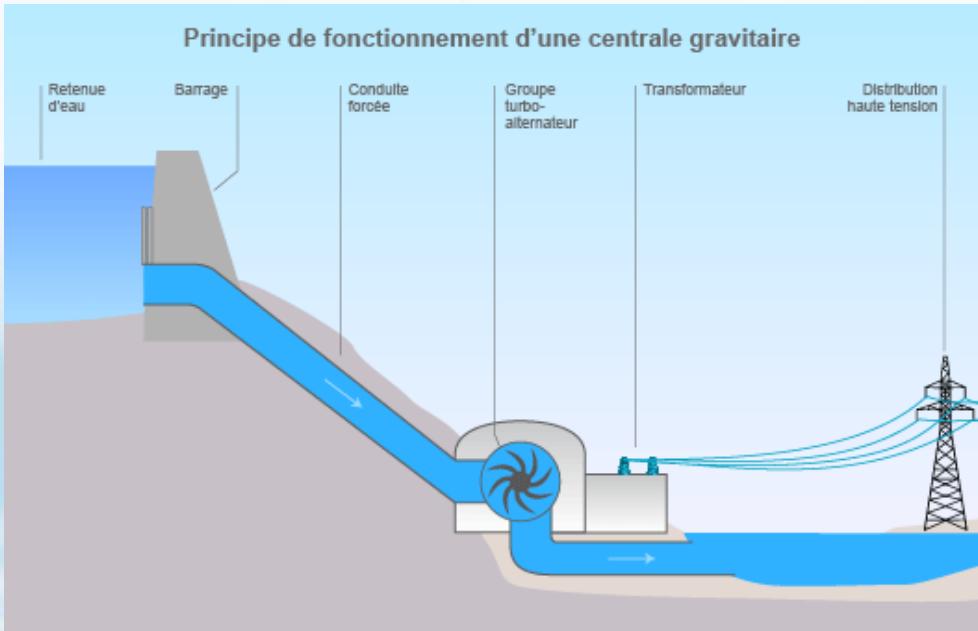
Le taux de retour énergétique des panneaux photovoltaïques est tout à fait correct, l'énergie utilisée pour les produire et les installer est amortie en quelques années d'utilisation. Par contre un taux de retour énergétique autour de 8-10 peut vite diminuer dans des régions avec un moins bon ensoleillement ou si l'installation de photovoltaïque implique d'importants moyens de stockage et le renforcement du réseau de distribution.

Les panneaux photovoltaïques à base de silicium sont composés pour la majorité de matériaux recyclable même s'il est encore difficile de se prononcer sur le recyclage puisque la majorité des panneaux photovoltaïques n'ont pas atteint leur fin de vie. Les filières de recyclage devront se mettre en place.

Pour déployer une technologie à grande échelle, l'acceptabilité du public est une variable importante et le photovoltaïque a une bonne image, bien meilleure que celle du nucléaire ou même de l'éolien. C'est aussi un de ses avantages.

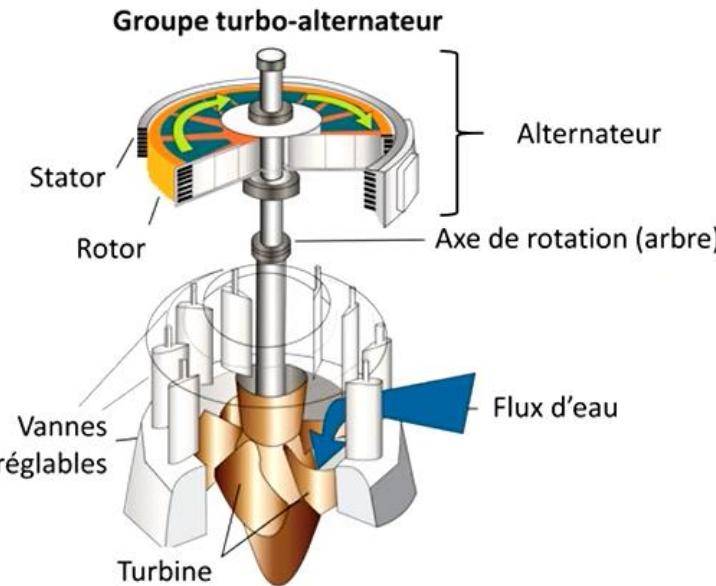
Les coûts continuent de chuter et la puissance installée connaît une croissance exponentielle. Il est difficile de savoir combien de temps cette tendance se poursuivra mais les panneaux photovoltaïques pourraient fournir un cinquième de l'électricité mondiale en 2050. La principale limite est l'intermittence et donc la nécessité d'avoir des moyens de stockage et une grille électrique capable de gérer tout ça.

10. L'hydroélectricité



Barrage de Vouglans

La puissance électrique est proportionnelle, en fonction de l'installation, à la hauteur de chute et au débit turbiné.

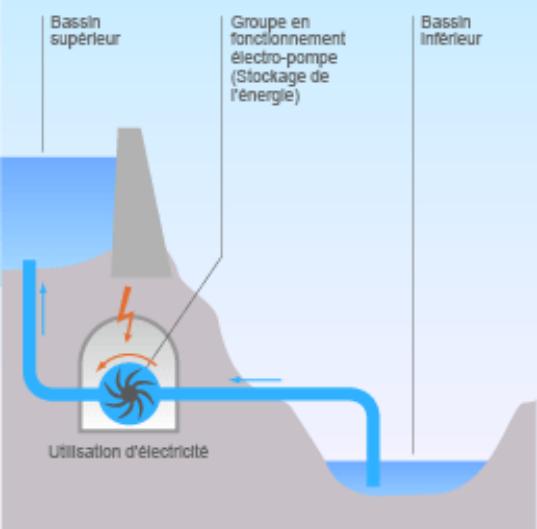


La France dispose d'une filière industrielle solide, composée de nombreuses entreprises de toutes tailles, intervenant notamment dans l'électronique, le génie civil, les automatismes, la fabrication de turbines et de conduites forcées. La filière française exporte largement son savoir-faire à l'étranger.

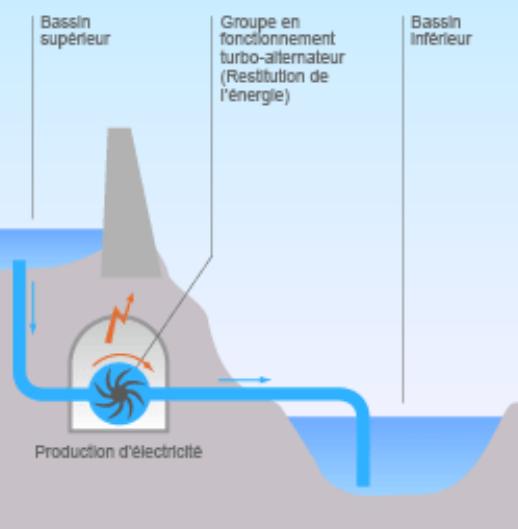
Le **coût de l'hydroélectricité est très variable** en fonction des différents types d'installations. Il peut s'étendre de 30 €/MWh à 90 €/MWh entre les grandes installations au fil de l'eau et celles de lac. Le coût de la petite hydroélectricité est en moyenne plus élevé et plus dispersé, il s'étend de 37 €/MWh à plus de 200 €/MWh pour les installations neuves.
Commission de régulation de l'énergie, Janvier 2020, Coûts et rentabilités de la petite hydroélectricité en métropole continentale

Principe de fonctionnement d'une centrale STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)

Phase de stockage d'énergie



Phase de restitution d'énergie



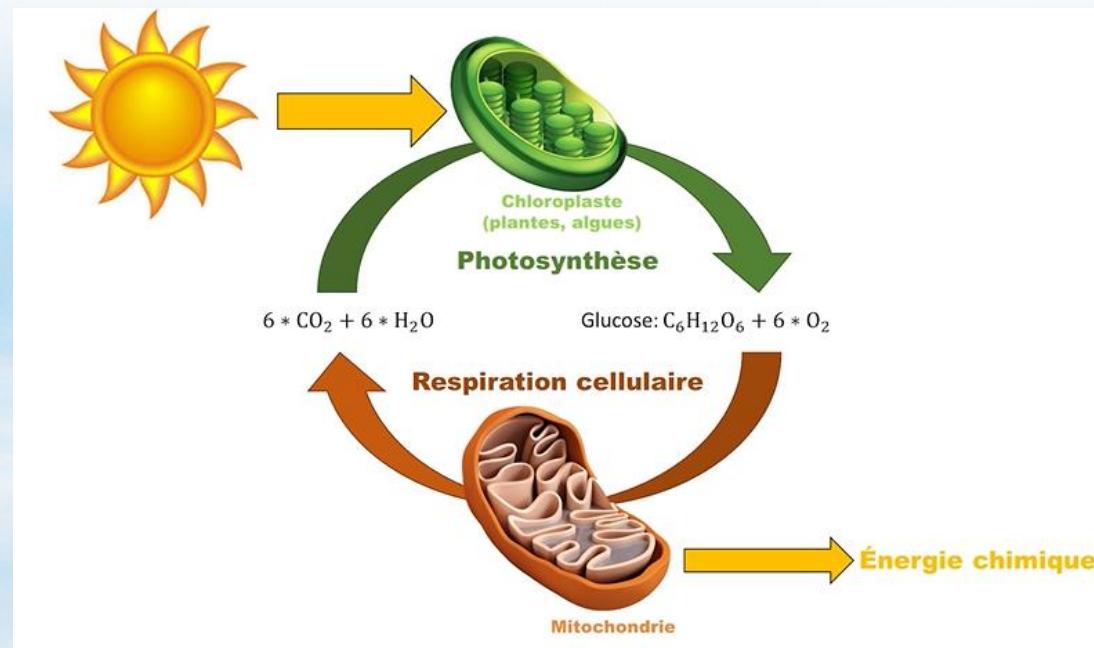
Grâce aux centrales de lac et aux STEP, la filière hydroélectrique est **particulièrement importante pour le système électrique, notamment en termes d'équilibre et de sécurisation du réseau**. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et les barrages hydroélectriques constituent actuellement le moyen de stockage à grande échelle le plus important en France (environ 5 GW de STEP et 13 GW d'hydraulique avec réservoir).

Il existe également des **stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)** qui sont des centrales hydroélectriques fonctionnant entre deux retenues d'eau d'altitudes différentes et permettent de stocker de l'électricité à grande échelle : ces installations pompent des volumes d'eau pendant les périodes de moindre consommation d'électricité vers le réservoir supérieur et les turbinent pendant les pics de consommation électrique.

l'hydroélectricité se distingue aujourd'hui par une **empreinte carbone particulièrement faible (6 g CO₂eq/kWh)**, nettement inférieur à celle de centrales thermiques fossiles, et la plus basse des énergies bas carbone.

11. La photosynthèse et la biomasse

Une des plus grande merveille de la Nature



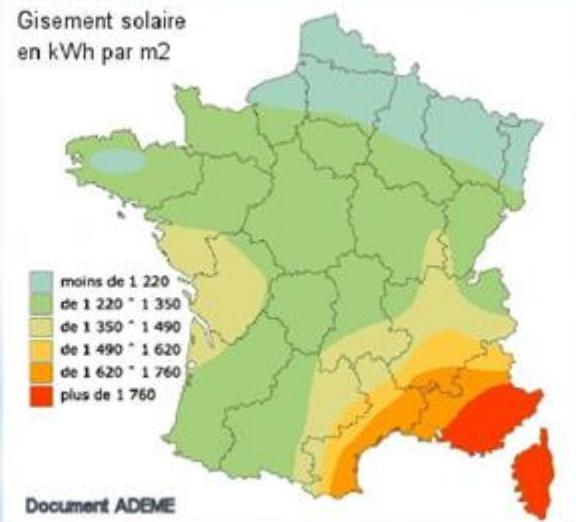
La photosynthèse, seule manière de réduire le carbone oxydé

Quel potentiel ?

Insolation moyenne en France : 1200 à 1700 kWh/m².an

0,5% de rendement là-dessus

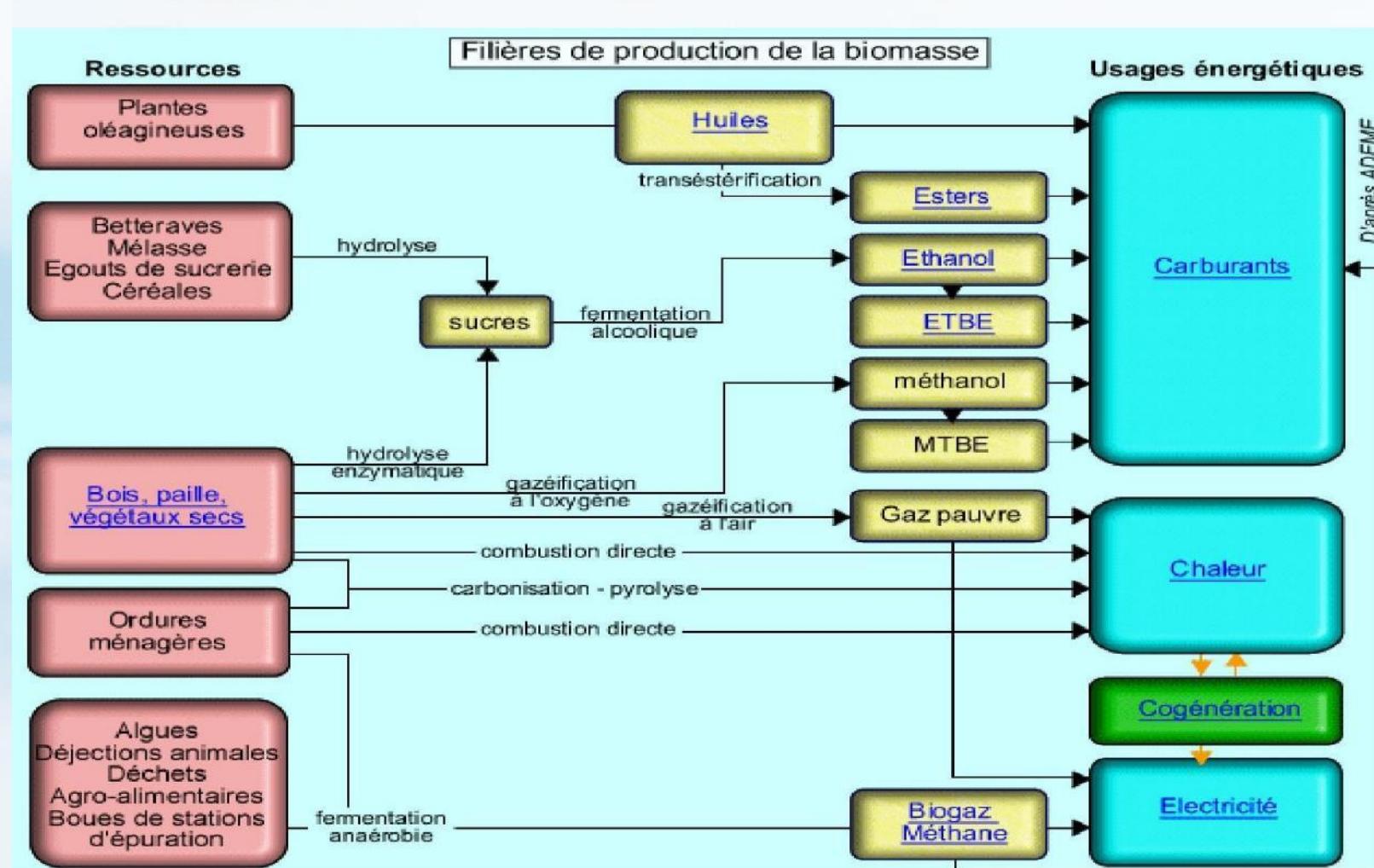
Photosynthèse = 1 500 (kWh/m².an) x 10 000 (m² par ha) x 0,5% (rendement) ÷ 11 600 (kWh par tep) = 6,5 tep brut (soit environ 13 à 15 t de matière sèche par hectare et par an).



Le rendement de la photosynthèse est très faible... moins de 1%

I'énergie qui va être contenue dans le glucose que la plante va synthétiser à partir de l'énergie solaire, c'est moins de 1% de l'énergie solaire reçue par la plante au cours de l'année.

La biomasse peut être **convertie en différents vecteurs énergétiques** (biocarburants, biogaz, combustibles solides), **pour ensuite être utilisées pour différents usages** (transport, chaleur industrielle, chauffage collectif, production d'électricité...).



Qu'est-ce que le biogaz ?

Le biogaz est un gaz renouvelable produit à partir de la biomasse. **Il s'agit de la seule technologie aujourd'hui mature pour décarboner le gaz naturel fossile** (environ 450TWh de consommation primaire en France). Le caractère fini de la ressource en biomasse et les différents usages de celles-ci ne permettent pas d'envisager une substitution de l'ensemble du gaz fossile actuellement consommé par du biogaz.

L'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050 nécessitera donc à la fois **un développement de la production de gaz décarboné et une baisse de la consommation de gaz.**

Le biogaz est une énergie renouvelable encore peu développée, mais qui a connu une forte évolution au cours des dernières années.

Actuellement, le biogaz est principalement produit par méthanisation, à savoir la dégradation par des micro-organismes de la matière organique.

La méthanisation implique l'**utilisation de matière organique pouvant être dégradée facilement par des micro-organismes**. Les matières (intrants) pouvant être utilisées dans un méthaniseur comprennent les déchets ménagers, les déchets organiques de l'industrie agro-alimentaire, les effluents d'élevages, les déchets végétaux, les produits agricoles et les matières résultat du traitement des eaux usées.

enjeux de disponibilité et d'allocation de la biomasse

enjeux environnementaux et
économiques liés à l'utilisation
de la biomasse

Établir les projections les plus réalistes possibles en matière de disponibilité et de consommation de biomasse

Encadrer et contrôler la gestion des éventuels conflits d'usage et de mise en œuvre de la réglementation veillant à la durabilité de la biomasse

12. La géothermie

C'est l'ensemble des **phénomènes thermiques internes du globe terrestre** ainsi que leur étude scientifique et l'ensemble des applications techniques de ces phénomènes, considérés comme une source d'énergie

On exploite la chaleur produite accumulée et stockée dans certaines parties du sous-sol (des sortes de "réservoirs de chaleur").



Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage urbain

La géothermie profonde consiste à exploiter **une ressource en sous-sol présentant une température suffisamment élevée pour produire de l'électricité**, en complément de la chaleur. À l'heure actuelle, le territoire métropolitain compte une **seule centrale de production d'électricité d'origine géothermique** en service, en Alsace, d'une puissance de 1,7 MW.

Cette filière présente en métropole **des coûts de production nettement supérieurs à ceux des autres filières renouvelables**, compris entre 173 €/MWh à 336 €/MWh. Les perspectives de réduction des coûts n'apparaissent pas suffisantes pour maintenir un soutien financier à cette filière via complément de rémunération. **Le soutien à la géothermie a ainsi été orienté vers la chaleur.**

Axe de développement majeur : la chaleur renouvelable

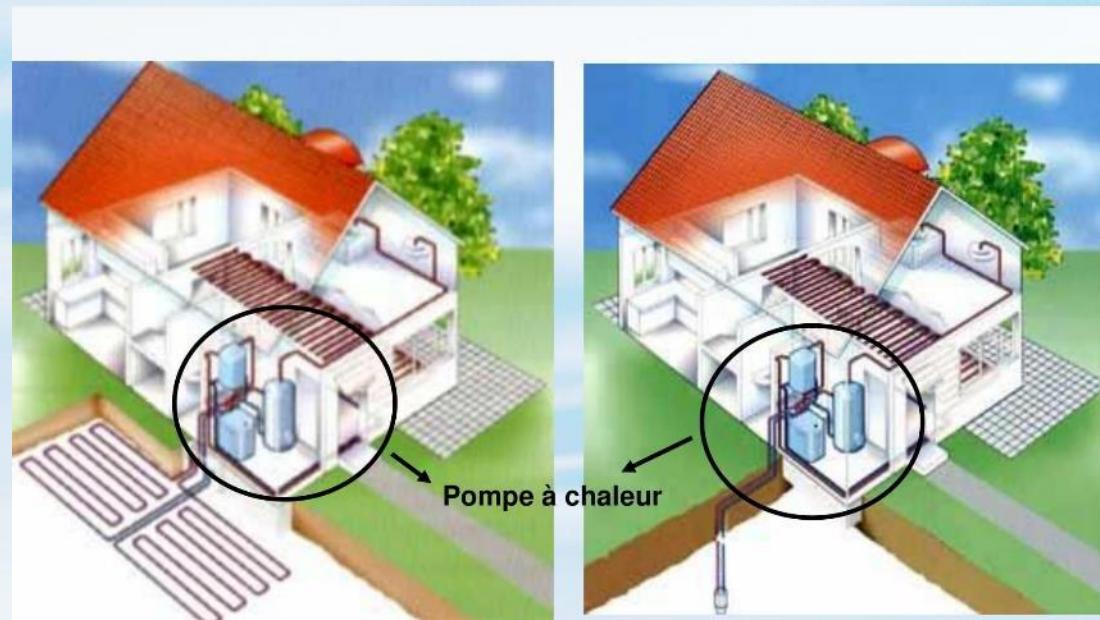
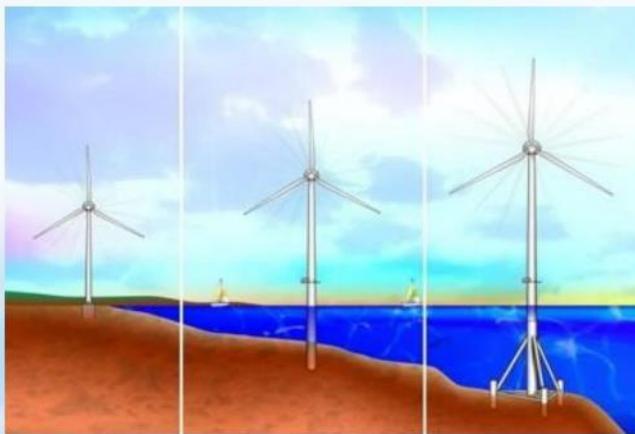


Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage individuel

13. L'éolien





1985 : Ø 15 m 1995 : Ø 70 m 2005 : Ø 110 m
 $P = 50 \text{ kW}$ $P = 1500 \text{ kW}$ $P = 4000 \text{ kW}$

Puissance qui varie comme le cube de la vitesse

$$P = \frac{1}{2} \cdot \text{masse} \cdot \text{vitesse}^2 \cdot \frac{1}{\text{temps}}$$

$$\text{masse} = \text{volume} \cdot \text{densité}$$

$$\text{volume} = \text{section} \cdot \text{vitesse} \cdot \text{temps}$$

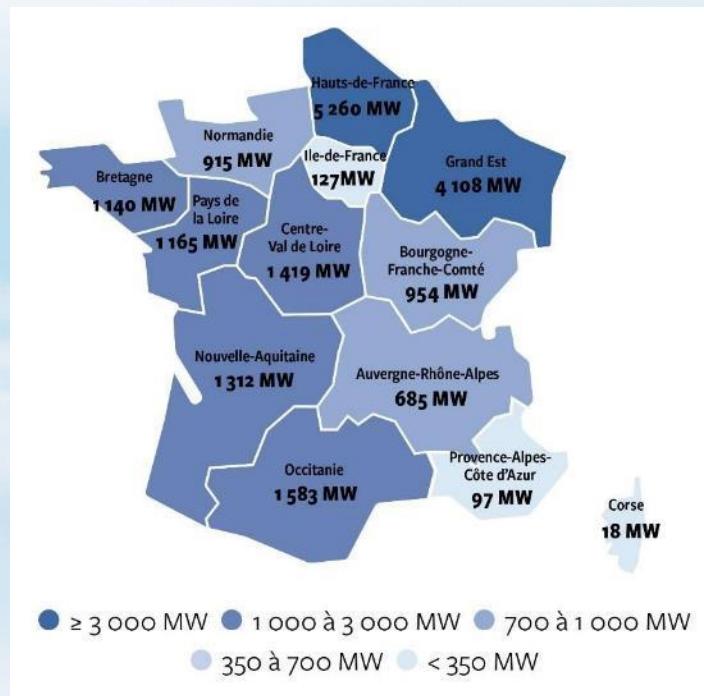
En 2021, Vesta détient le record de l'éolienne en mer avec un modèle à 15 MW dont le rotor fait 236m !



La puissance délivrée par une turbine est proportionnelle à la surface balayée (carré du diamètre), à la densité du fluide qui la traverse, et au cube de la vitesse de ce fluide. L'air ayant une densité 1000 fois plus faible que l'eau, il en ressort que pour fournir la même puissance, le diamètre d'une turbine à air doit être environ $1000^{1/2}$, soit ~30 fois plus grand que celui d'une turbine hydraulique pour des vitesses de fluide comparables, d'où des éoliennes de 100 mètres de diamètre pour produire 3 MW alors qu'une turbine hydraulique de 3 mètres y suffit.

Les éoliennes terrestres installées en France ont une **puissance comprise entre 1,8 et 3 MW** (les nouvelles installations ont plutôt des puissances comprises entre 3 et 5 GW)

Les parcs éoliens terrestres français ont une puissance moyenne de 10 MW.

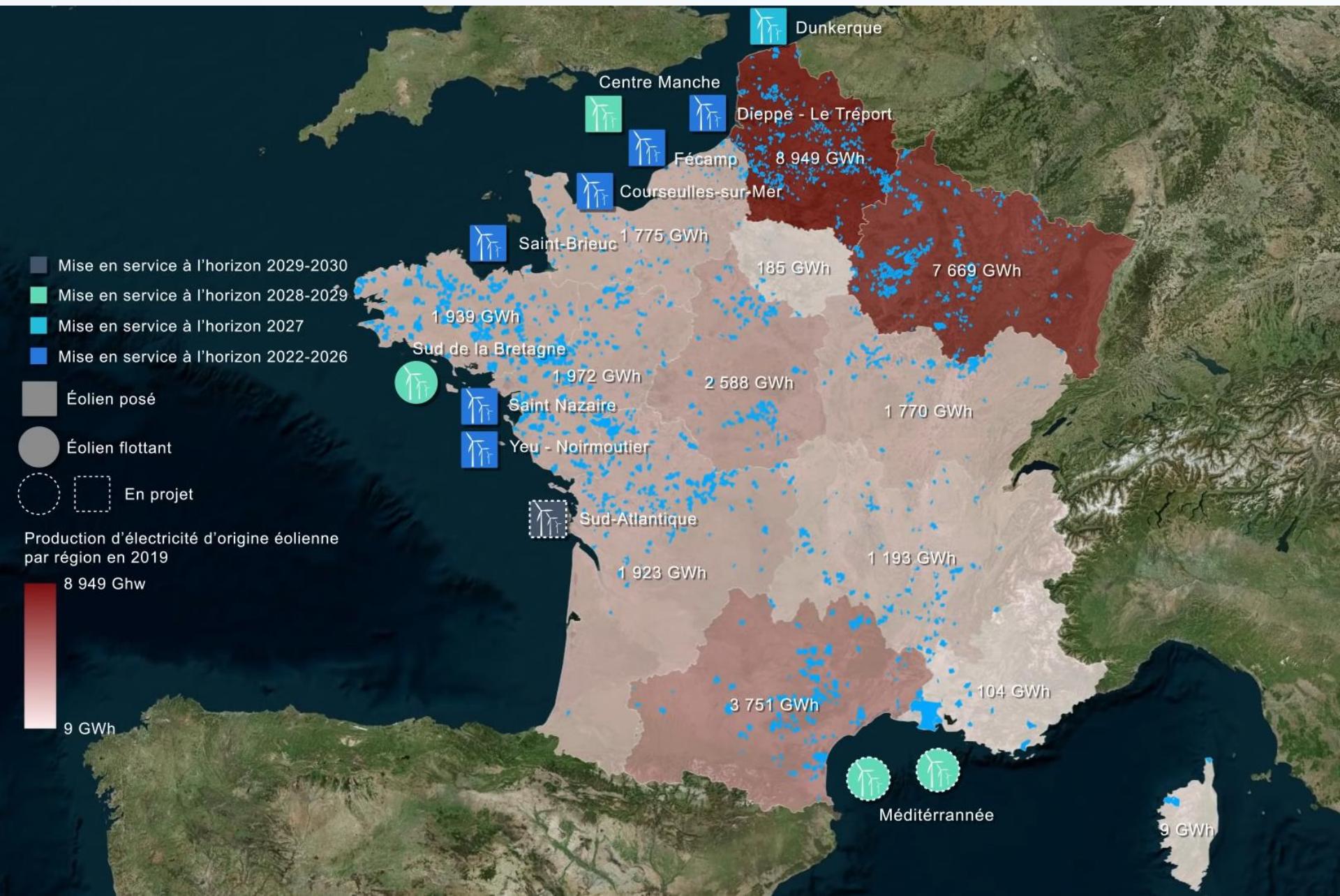


Le facteur de charge éolien annuel moyen s'est établi à 22,6% en 2021 (avec un facteur de charge mensuel allant de 9.9% en juin à 34.9% en février).

Actuellement, la **puissance éolienne installée est de 18,9 GW**, soit un peu plus d'un GW supplémentaire installé par an au cours des dernières années. Toutes les régions sont concernées par le développement de l'éolien, avec une concentration importante dans le Nord-Est et l'Ouest. **On recense plus de 1550 parcs comptant quasiment 9000 éoliennes.**

Puissance éolienne terrestre installée par région fin 2021 (Source : Panorama de l'électricité renouvelable au 31 décembre 2021 Agence Ore-Enedis-RTE-SER)

L'éolien en mer



14. Le nucléaire

Un exposé est prévu pour traiter spécifiquement du nucléaire en France : le 9 mars 2023 à 16h30

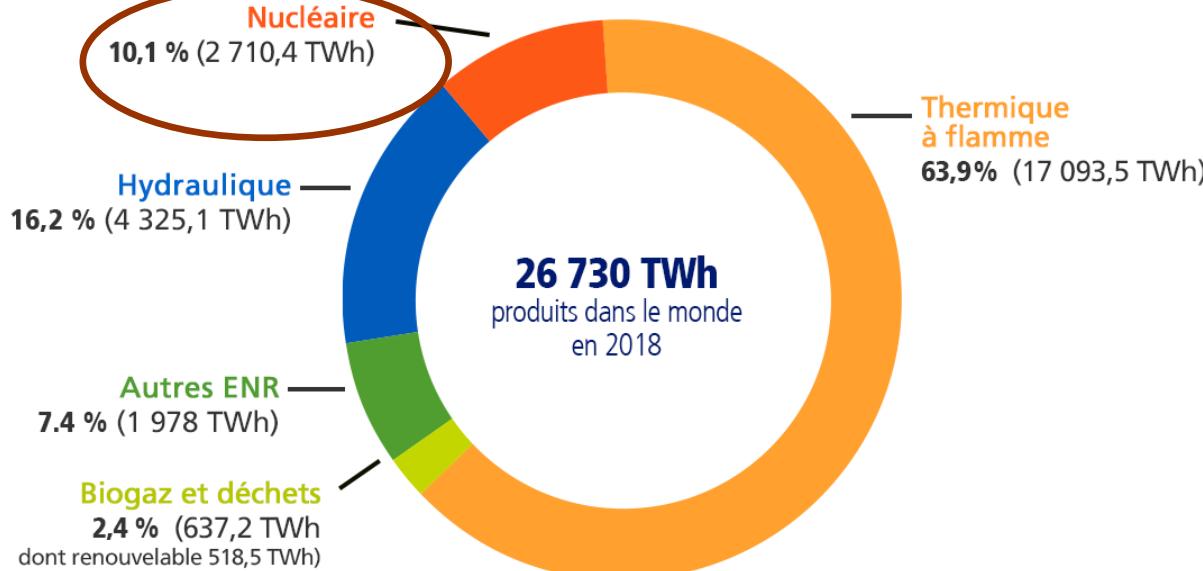
Une consultation nationale (absolument remarquable) est en cours : "Nouveaux réacteurs nucléaires et projet Penly"



L'électronucléaire nécessitant un très haut niveau de technologie et une capacité de financement importante, elle est aujourd'hui essentiellement développée dans les pays industrialisés

Le nucléaire est une énergie abondante dès aujourd'hui, qui produit très peu de gaz à effet de serre, mais qui nécessite néanmoins le recours à une technologie innovante pour être durable sur le long terme

Nota important : attention aux généralisations hâtives, il y a nucléaire et nucléaire. Les réacteurs français n'ont pas grand-chose à voir avec ceux de Tchernobyl !

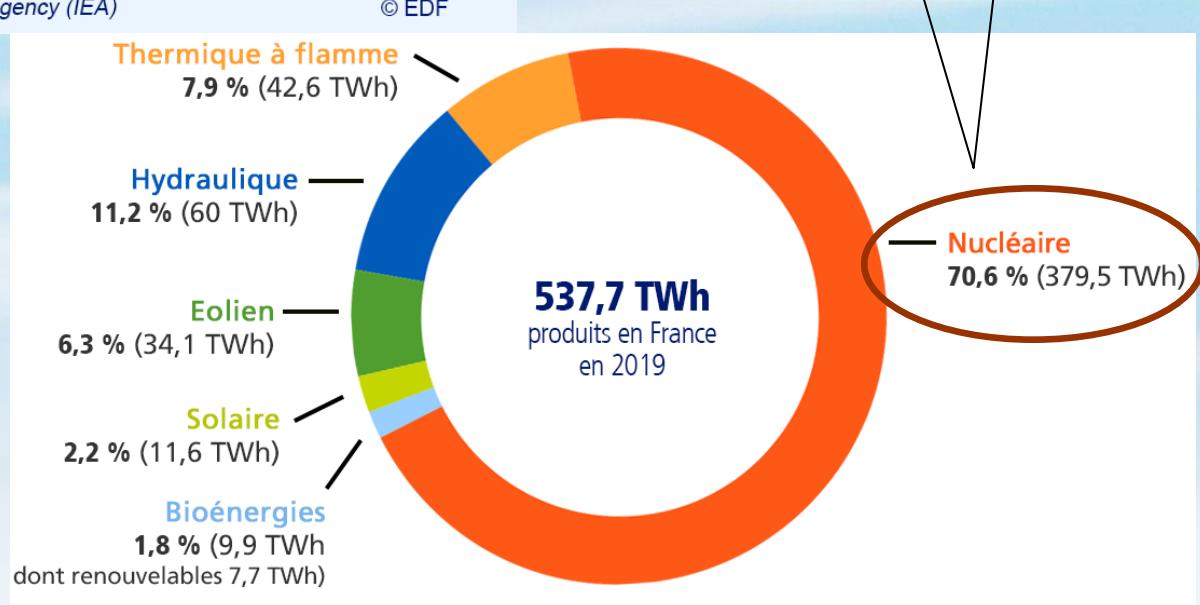


La production mondiale d'électricité en 2018

Source : International Energy Agency (IEA)

© EDF

La France a une situation à part



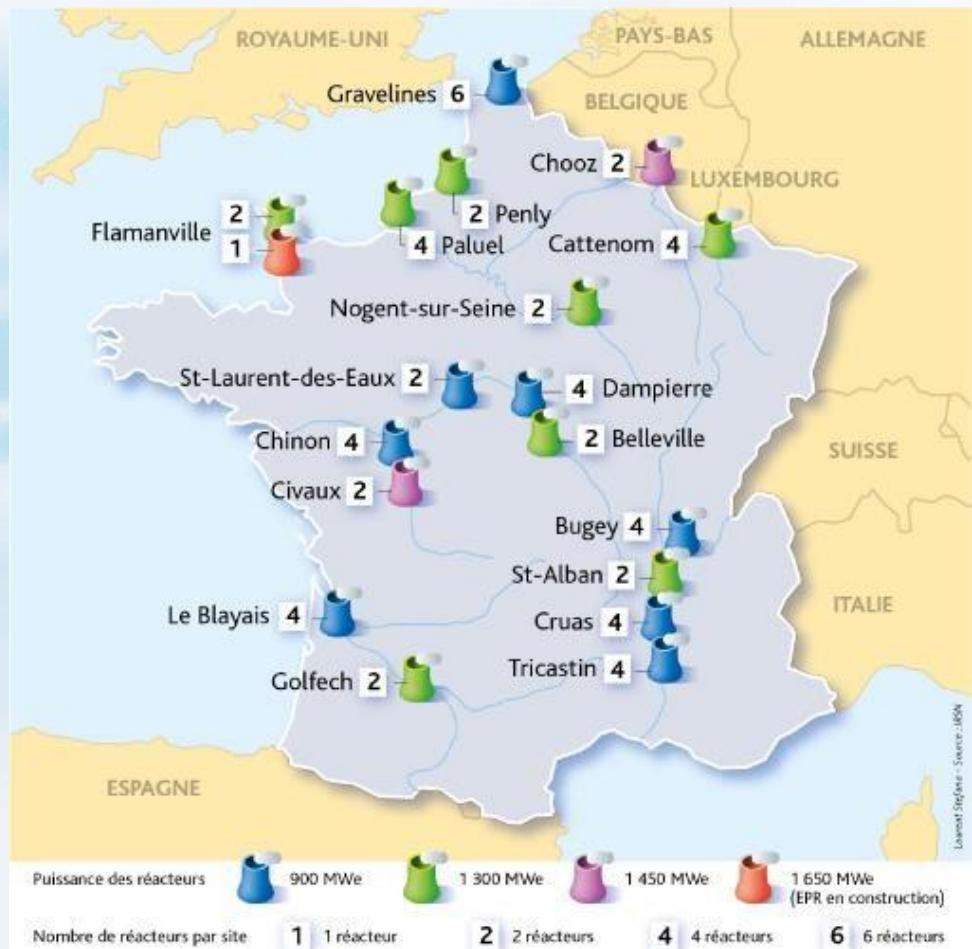
La production française d'électricité en 2019

Source RTE - bilan électrique 2019

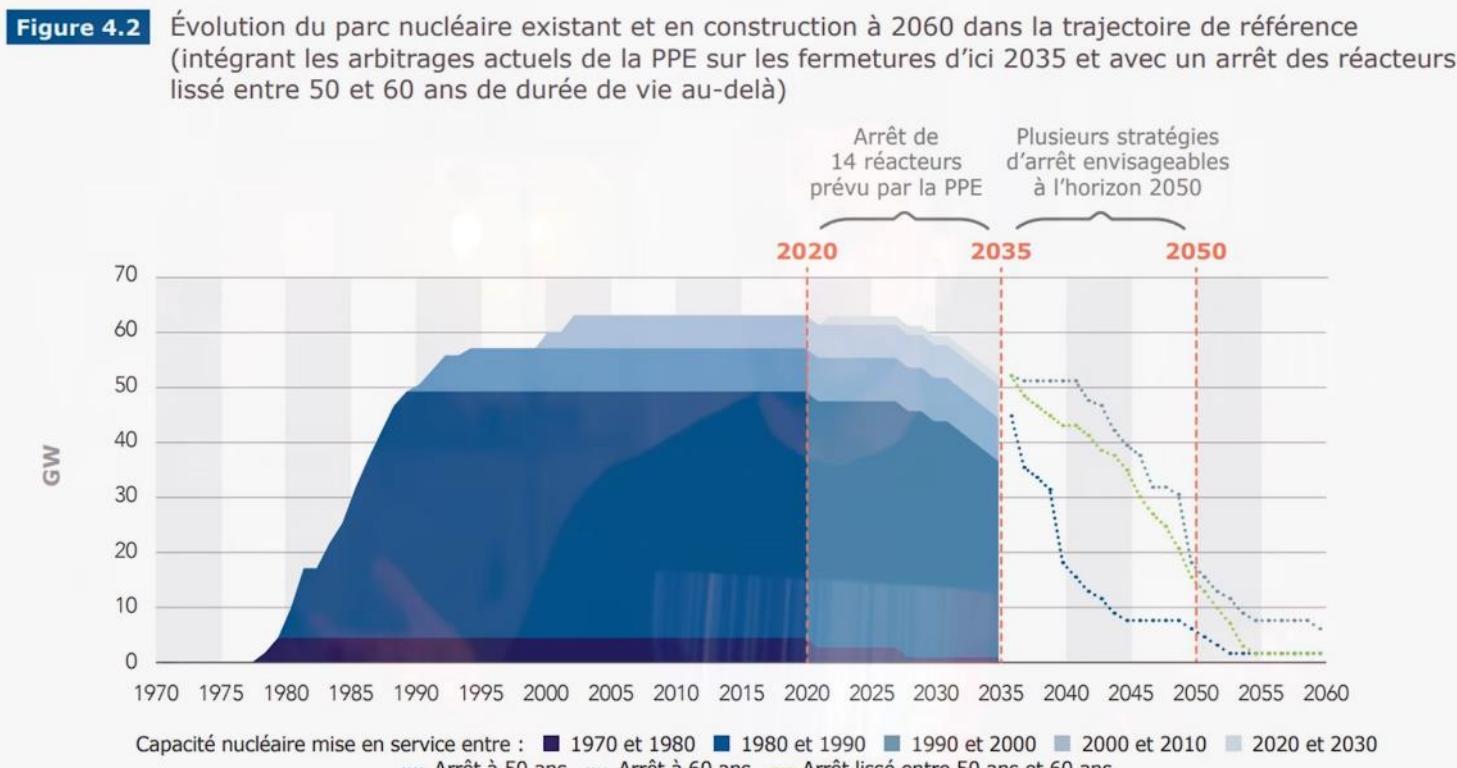
© EDF

En 2022, le parc nucléaire français comporte **56 réacteurs de production d'électricité** en fonctionnement **répartis sur 18 centrales**, constituant une puissance installée de **61,3 GW**. Ces réacteurs reposent tous sur une même technologie, dite « à eau sous pression », et se répartissent en différents paliers standardisés, de puissance unitaire comprise entre 900 MW et 1650 MW.

Le réacteur Flamanville 3 en construction, de type EPR, atteindra une puissance d'environ 1650 MW ; sa mise en service est prévue en 2023, avec un chargement du combustible prévu d'ici la fin du premier semestre 2023.



Les 52 plus anciens réacteurs ont été mis en service au cours d'une période de 15 années environ. La gestion dans le temps de leurs arrêts définitifs constitue ainsi un enjeu afin d'éviter un risque « d'effet falaise », c'est-à-dire la fermeture d'un grand nombre de réacteurs sur une période relativement courte, et prévoir le cas échéant, le renouvellement de la capacité de production correspondante dans des conditions industriellement现实的es.



Chapitre 4, *Futurs énergétiques 2050*, RTE (2021)

Il est bien trop tard pour pouvoir compenser entièrement cet effet falaise par de nouveaux réacteurs avant 2050 ! (errances gouvernementales successives)

Densité énergétique extrêmement élevée

Facteur de charge pouvant atteindre 90%

Pilotable

Taux de retour énergétique très élevé

Pas d'impact sur le climat (gCO₂/kWh le plus faible)

Ressources eu U limitée mais possibilité de multiplier par 100 avec d'autres types de réacteurs (R&D Astrid arrêté par E. Macron)

Emprise au sol faible

Consommation matériaux faible au kWh produit

Investissements très lourds qui nécessitent des politiques cohérentes et une remise à niveau du tissu industriel et des compétences (en cours)

Gestion des déchets

Sûreté

Acceptabilité sociale incertaine et fluctuante

Très clivant en France

etc.

15. Parlons matériaux (tonnes / TWh)

Table 10.4 Range of materials requirements (fuel excluded) for various electricity generation technologies⁵²

Materials (ton/TWh)	Generator only				Upstream energy collection plus generator			
	Coal	NGCC	Nuclear PWR	Biomass	Hydro	Wind	Solar PV (silicon)	Geothermal HT binary
Aluminum	3	1	0	6	0	35	680	100
Cement	0	0	0	0	0	0	3,700	750
Concrete	870	400	760	760	14,000	8,000	350	1,100
Copper	1	0	3	0	1	23	850	2
Glass	0	0	0	0	0	92	2,700	0
Iron	1	1	5	4	0	120	0	9
Lead	0	0	2	0	0	0	0	0
Plastic	0	0	0	0	0	190	210	0
Silicon	0	0	0	0	0	0	57	0
Steel	310	170	160	310	67	1,800	7,900	3,300

Key: NGCC = natural gas combined cycle; PWR = pressurized water reactor; PV = photovoltaic; HT = high temperature

Consommation de métal ou minérais par MWh pour divers modes
Source des données : Quadrennial Technology Review, Concepts in Integrated
Analysis September 2015

Il y a un facteur multiplicateur très important en ce qui concerne les matériaux qui sont utilisés par MWh produits. Or, ces matériaux sont aujourd’hui produits avec des énergies fossiles.

Bouclage économique et énergétique ou non ?

Aujourd'hui : sans bouclage, du pétrole aux panneaux/éoliennes



demain : sans pétrole mais
avec bouclage ???

Ceci est un très sérieux
problème des scénarios
prospectifs 100% ENR



L'hydrogène décarboné (vecteur énergétique et non une source)

L'hydrogène est utilisé dans l'industrie pétrolière et chimique : 900 000 tonnes par an.

Il s'agit, en grande majorité, d'hydrogène carboné, produit par « vaporeformage » du gaz naturel. Cette production engendre de l'ordre de 9 millions de tonnes de CO₂ par an. Il s'agit, pour l'essentiel, d'un usage de l'hydrogène pour ses propriétés chimiques, et non d'un usage énergétique.

L'hydrogène décarboné peut être produit **par électrolyse de l'eau, à partir d'électricité bas-carbone ou renouvelable**. C'est la solution technique privilégiée par la Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné annoncée en septembre 2020.

Le développement de l'hydrogène décarboné est destiné à répondre à :

- un **premier enjeu, immédiat, de décarbonation de l'industrie et de la mobilité lourde** ;
- un **deuxième enjeu, plus lointain, de contribuer à l'équilibre du système électrique**.

La **décarbonation de l'industrie** (secteurs de la sidérurgie, de la production d'engrais, du raffinage ou bien encore de la cimenterie qui sont parmi les plus gros émetteurs de CO₂) et de la **mobilité lourde** sont **les deux axes prioritaires des usages directs de l'hydrogène décarboné des 10 prochaines années**.

Conclusion pour cet exposé

Les énergies bas carbone regroupent des réalités très diverses (vent, solaire, nucléaire...)

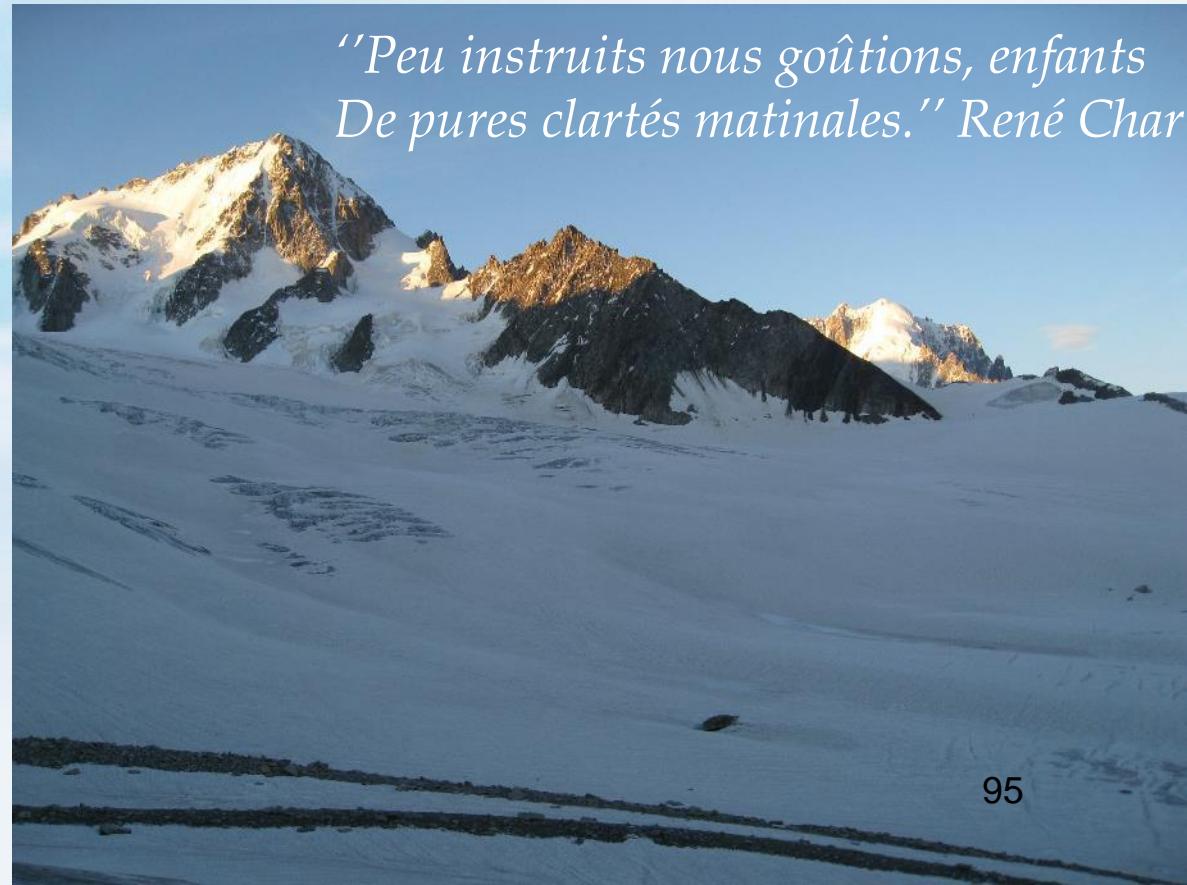
Les énergies renouvelables sont très dépendantes des conditions géographiques locales (montagnes, flux, niveau technologique...)

Les énergies éoliennes et solaires sont par nature intermittentes et incontrôlables, ce qui pose problème pour la production électrique, et exige une association à des générateurs pilotables en puissance suffisante ou/et à des stockages indirects d'énergie électrique

Donc, il est vraisemblable que l'avenir qui va s'écrire (et dont on parlera la prochaine fois) sera fait d'un mélange de sobriété, d'économies d'énergie (et donc pour partie de contraction économique), de nucléaire, et d'énergies renouvelables dans des proportions qui dépendront des contextes géographiques, politiques, sociaux et culturels de chaque pays

La prochaine fois nous aborderons la question de comment atteindre la neutralité carbone en 2050

Vous pouvez essayer de répondre pour vous-mêmes à cette interrogation majeure en imaginant notre futur



*"Peu instruits nous goûtions, enfants
De pures clartés matinales." René Char*