



Physique pour tous 2023-2024

Cours 5: **Physique du climat 2** *La physique des solutions au réchauffement climatique*

Baptiste Coquinot



Objectif fondamental:

Comprendre les avantages, défauts, potentiels et limites des différentes solutions technologiques proposées pour remplacer les principales sources d'émission carbone.

Contexte:

La semaine dernière on a expliqué le fonctionnement du climat et le réchauffement climatique. On a vu les 5 grands secteurs d'émission carbone: production d'électricité, agriculture, industrie, transports et chauffage.

On ne discutera assez peu les questions industrielles qui sont assez techniques et les questions agricoles qui nécessitent aussi de la biologie. En revanche, on regardera en détail les 3 autres secteurs pour en comprendre les enjeux.

Plan du cours:

1. Agriculture & Industrie (en bref)
2. Production d'électricité
3. Stockage d'énergie
4. Energies renouvelables
5. Energie nucléaire
6. Transports
7. Chauffage

Remarque sur les unités (rappel)

Pré-fixes:

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} = 1\ 000 \text{ W}$$

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W} = 1\ 000\ 000 \text{ W}$$

$$1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W} = 1\ 000\ 000\ 000 \text{ W}$$

$$1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000 \text{ W}$$

Energie (= accumulation de puissance):

Unité de base: J

Définition: $1 \text{ J} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$

Puissance (= flux d'énergie):

Unité de base: W

Définition: $1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s}$ (donc une puissance de 1 W pendant 1s c'est une énergie de 1 J)

Variante pour l'énergie: le kWh

Définition: $1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW pendant } 1 \text{ h} = 1 \text{ kW pendant } 3600 \text{ s} = 3600 \text{ kJ} = 3,6 \text{ MJ}$

Variante pour la puissance: le kWh/an

Définition: $1 \text{ kWh}/\text{an} = 1 \text{ kWh sur } 1 \text{ an} = 1 \text{ kWh sur } 8760 \text{ h} = \frac{1}{8760} \text{ kWh sur } 1 \text{ h} = \frac{1}{8760} \text{ kW}$

Ainsi, $1 \text{ GWh}/\text{an} \approx 114 \text{ W}$

Quelques ordres de grandeur (rappel)

Empreinte carbone d'un pays

Définition: émission carbone tenant compte des importations et exportations.

Empreinte carbone d'un produit (= en cycle de vie)

Définition: émission carbone en prenant en compte la fabrication et le recyclage

Puissance d'un homme: 100 W = 2000 kCa/jour

Puissance d'un réacteur nucléaire: 1 GW = 10^{12} W

Objection d'émission carbone pour atteindre la neutralité: 2 tCO₂eq/an/personne

En France

Consommation d'énergie: 300 GW

Par personne: 5000 W/personne

Empreinte carbone: 10 tCO₂eq/an/personne

Il faut baisser de 80%

Dans le monde

Consommation d'énergie: 12 000 GW

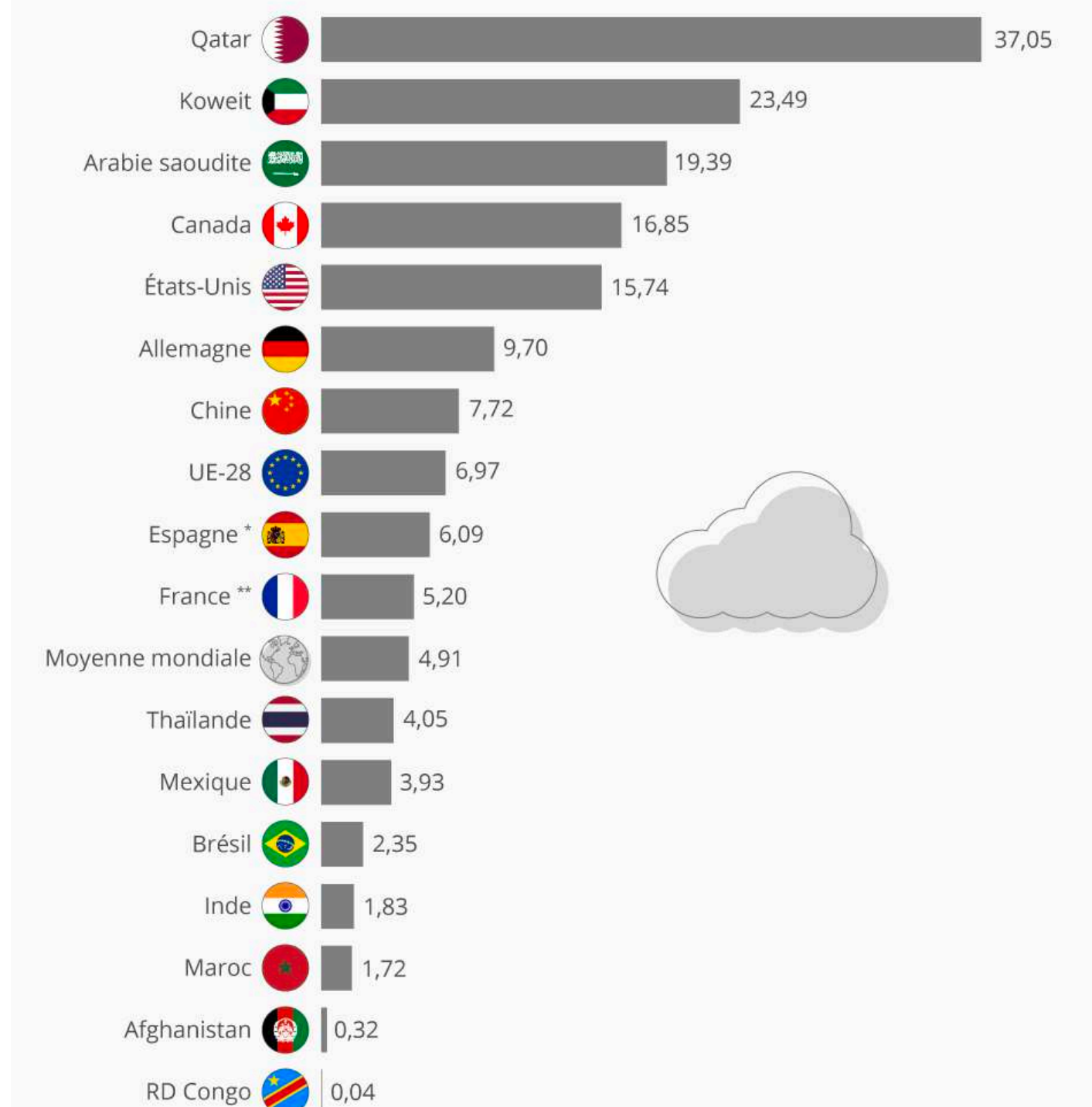
Par personne: 1500 W/personne

Empreinte carbone: 5 tCO₂eq/an/personne

Il faut baisser de 40%

Les émissions de CO₂ par habitant à travers le monde

Émissions de CO₂ par habitant dans une sélection de pays en 2017 (en tonnes)



CC BY ND
@Statista_FR

* incluant Andorre.
** France métropolitaine incluant Monaco.
Source : Commission européenne

statista

Détail des émissions par secteur (rappel)

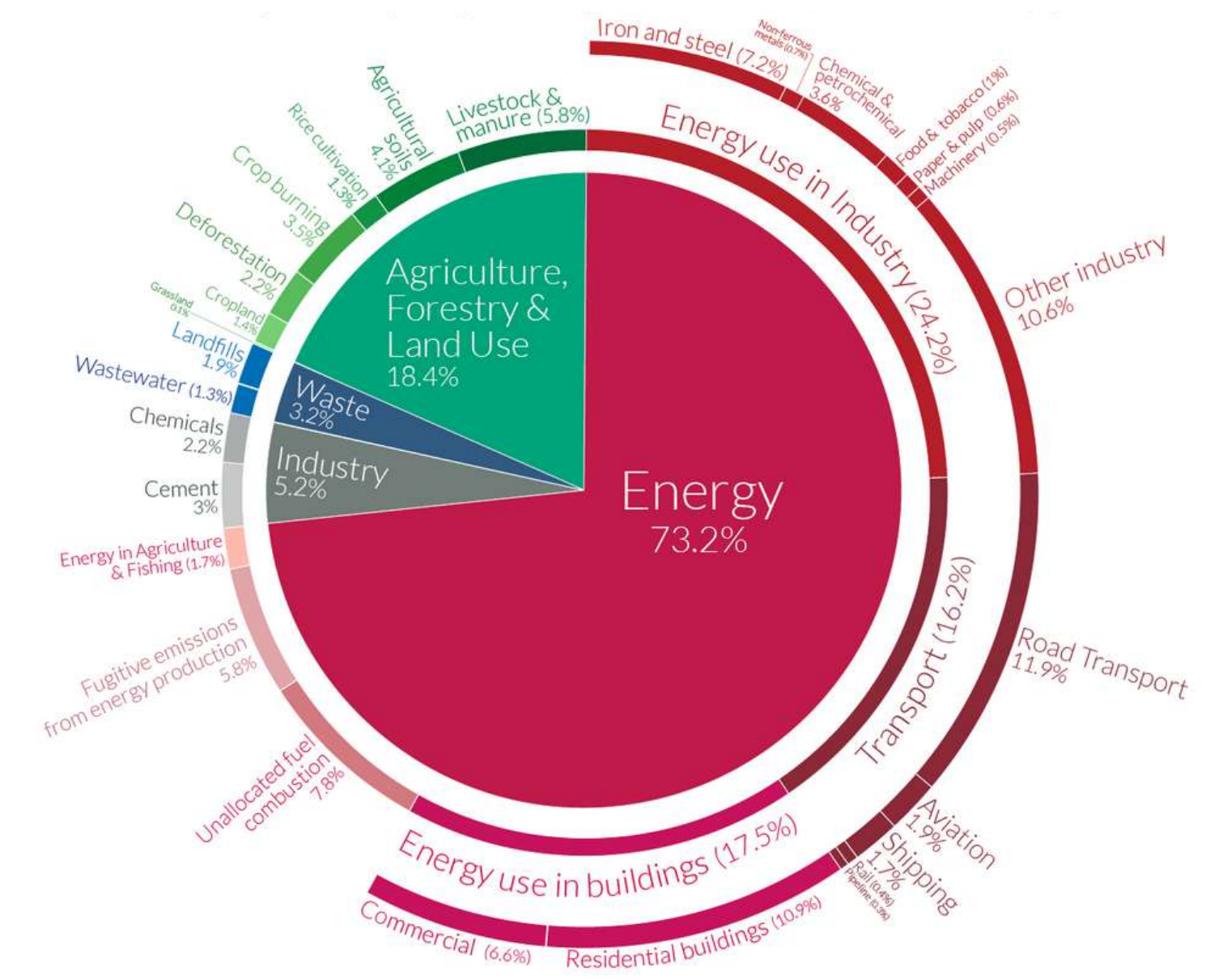
Les 3/4 des émissions de CO₂eq dans le monde viennent de la combustion d'énergie. C'est cette partie que nous allons étudier plus en détail grâce à la physique. Le reste vient essentiellement de la gestion des terres et de l'agriculture, qui seront plutôt étudiés par les biologistes.

Les principaux domaines d'émission sont les suivants :

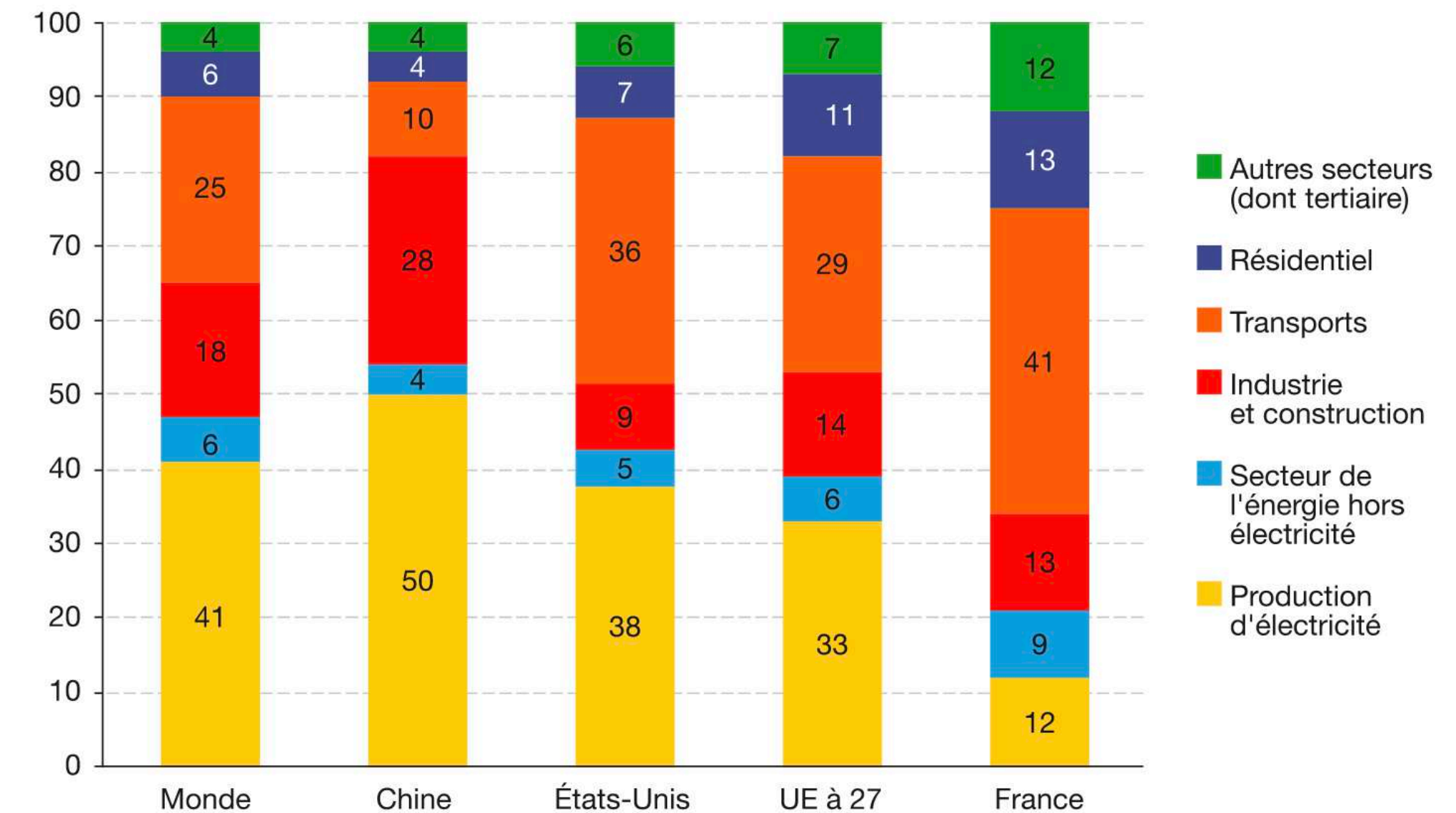
- **Production d'électricité**: 40% dans le monde, 10% en France
- **Industrie** (au sens large): 20% dans le monde, 15% en France
- **Transports** (essentiellement routier): 25% dans le monde, 40% en France
- **Résidentiel & Tertiaire** (le chauffage): 10% dans le monde, 25% en France

Quelques remarques:

- Dans le monde le premier poste est de loin la production d'électricité. En France celle-ci est assez décarbonée grâce au nucléaire, d'où sa contribution plus faible.
- Les transports sont essentiellement l'effet des voitures thermiques individuelles (pour 45%) et des camions (pour 30%). L'avion et les transports de marchandises représentent tous deux 10% des émissions des transports.
- En France, le premier poste d'émission, ce sont donc les véhicules thermiques.



ORIGINE DES ÉMISSIONS DE CO₂ DUES À LA COMBUSTION D'ÉNERGIE EN 2018
En %



Source : AIE, 2020



Première partie:

Agriculture &
Industrie (en bref)

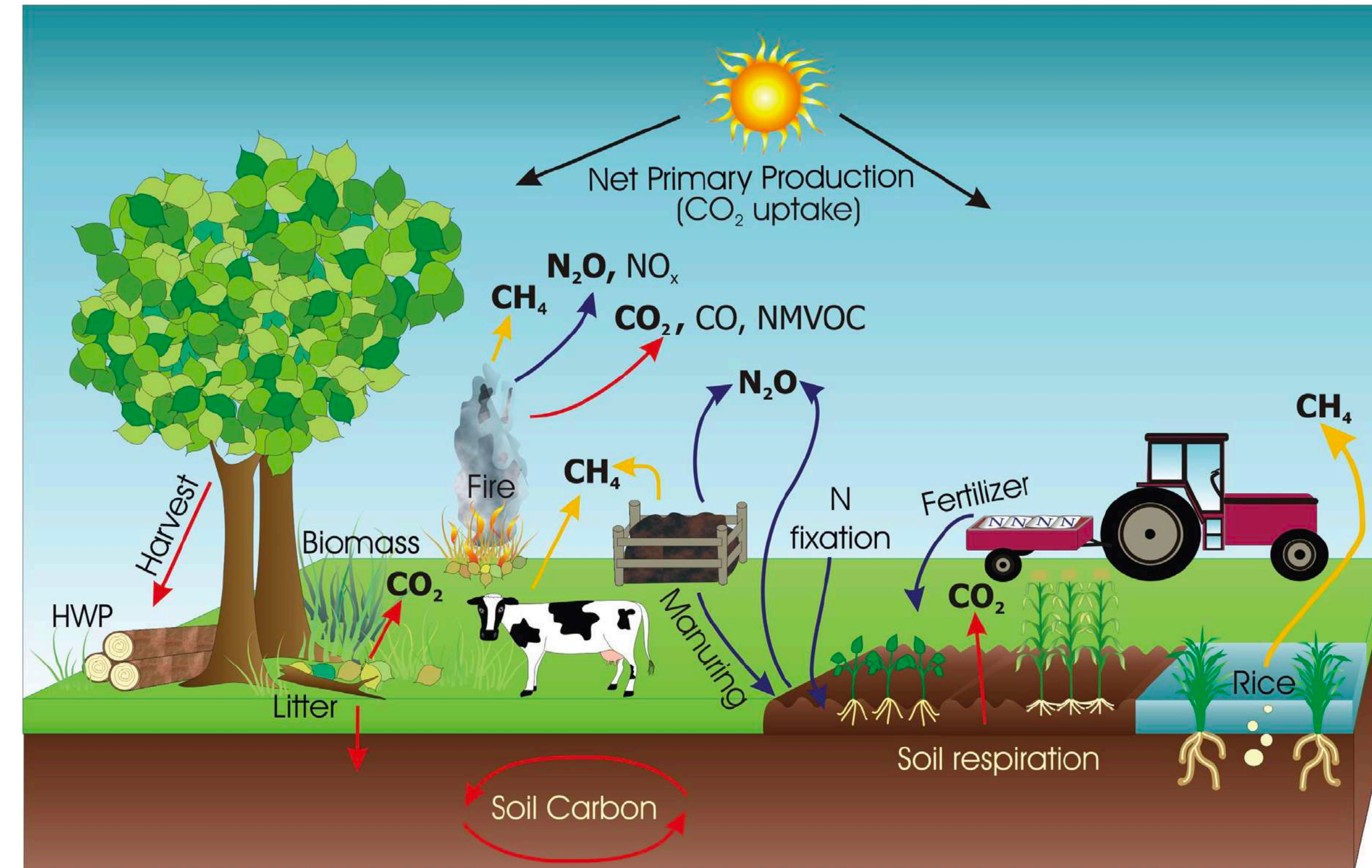
L'agriculture: émissions

C'est environ 20% des émissions mondiales.

Trois principales sources:

- La gestion des sols ("land use change"): une forêt capte du CO_2 et le stocke dans le sol, un champ beaucoup moins.
- Les engrais: ils contiennent de l'azote qui finit dans l'atmosphère sous forme de N_2O , un gaz à effet de serre.
- La digestion du bétail: elle produit du méthane qui est un puissant gaz à effet de serre. La digestion des vaches en particulier est très émettrice.

Toutes ces questions se mélangent avec d'autres problèmes environnementaux (biodiversité, pollution de l'eau ou des sols, ...) que l'on ne discutera pas ici.



L'agriculture: solutions

Ces impacts peuvent être attaqué au niveau agricole. On a envie d'utiliser moins d'engrais mais aussi moins d'espace. On veut aussi stocker plus de carbone dans le sol. Ce sont des systèmes complexes étudiés par les biologistes pour lesquels il n'y a pas de solution simple: l'agriculture " biologique" n'a pas forcément un meilleur bilan carbone. Néanmoins, certaines solutions apparaissent, comme la perméaculture (qui est l'opposée de la monoculture).

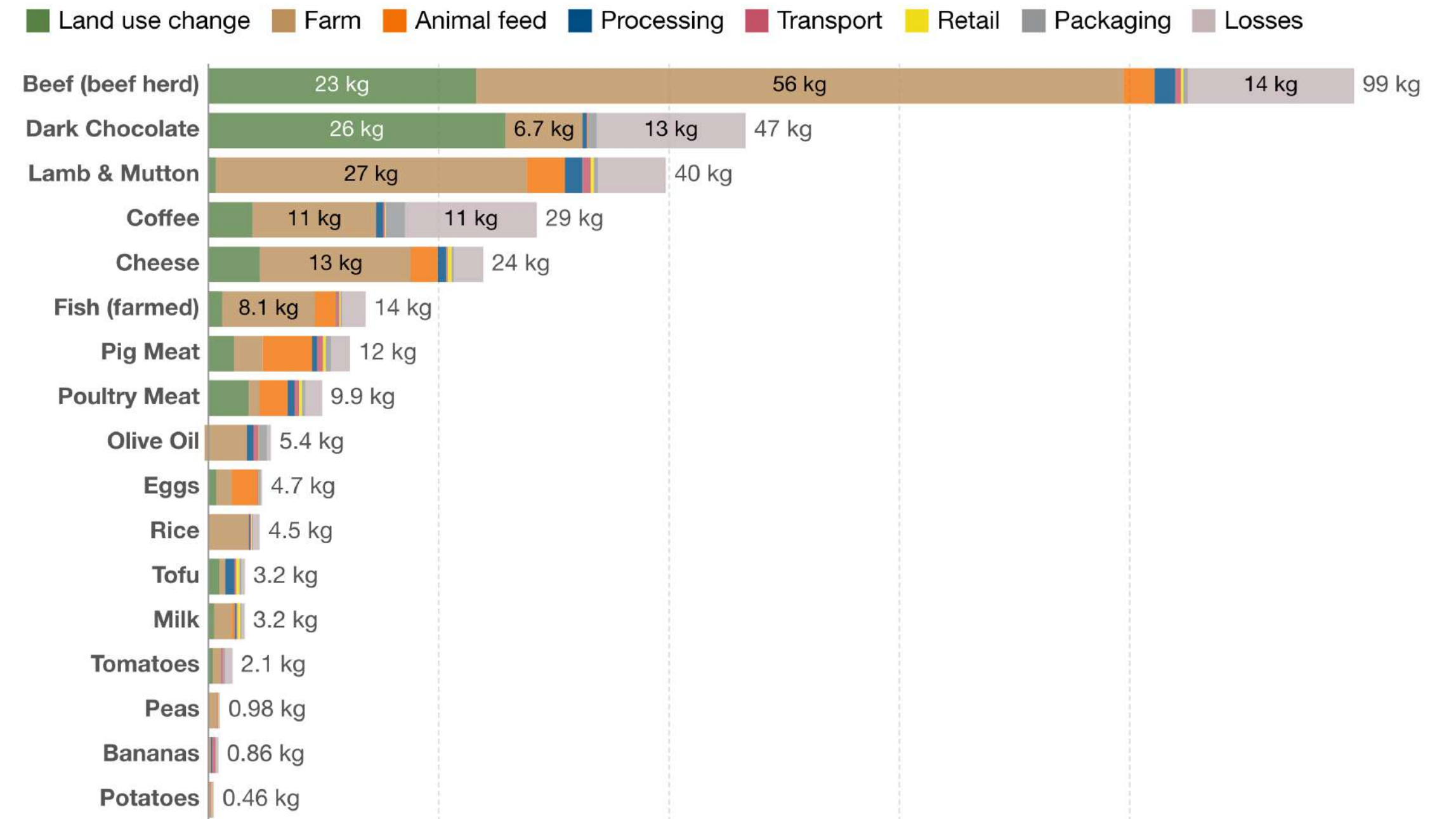
Ces impacts peuvent aussi être attaqué au niveau de l'alimentation. On peut observer l'impact carbone des différents aliments (à droite par kg). Un régime alimentaire bas-carbone est avant tout un régime alimentaire sans boeuf, puis sans viande rouge, sans produits laitiers et sans chocolat ou café.

- Ce n'est pas forcément un régime local: moins vaut manger du poisson péché en Alaska que du boeuf élevé dans la région.
- Ce n'est pas forcément un régime végétarien: mieux vaut manger du poulet ou du poisson ou du fromage.

Food: greenhouse gas emissions across the supply chain

Our World
in Data

Greenhouse gas emissions¹ are measured in carbon dioxide-equivalents (CO₂eq)² per kilogram of food.



Source: Joseph Poore and Thomas Nemecek (2018).

OurWorldInData.org/environmental-impacts-of-food • CC BY

1. Greenhouse gas emissions: A greenhouse gas (GHG) is a gas that causes the atmosphere to warm by absorbing and emitting radiant energy. Greenhouse gases absorb radiation that is radiated by Earth, preventing this heat from escaping to space. Carbon dioxide (CO₂) is the most well-known greenhouse gas, but there are others including methane, nitrous oxide, and in fact, water vapor. Human-made emissions of greenhouse gases from fossil fuels, industry, and agriculture are the leading cause of global climate change. Greenhouse gas emissions measure the total amount of all greenhouse gases that are emitted. These are often quantified in carbon dioxide-equivalents (CO₂eq) which take account of the amount of warming that each molecule of different gases creates.

2. **Carbon dioxide-equivalents (CO₂eq):** Carbon dioxide is the most important greenhouse gas, but not the only one. To capture all greenhouse gas emissions, researchers express them in 'carbon dioxide-equivalents' (CO₂eq). This takes all greenhouse gases into account, not just CO₂. To express all greenhouse gases in carbon dioxide-equivalents (CO₂eq), each one is weighted by its global warming potential (GWP) value. GWP measures the amount of warming a gas creates compared to CO₂. CO₂ is given a GWP value of one. If a gas had a GWP of 10 then one kilogram of that gas would generate ten times the warming effect as one kilogram of CO₂. Carbon dioxide-equivalents are calculated for each gas by multiplying the mass of emissions of a specific greenhouse gas by its GWP factor. This warming can be stated over different timescales. To calculate CO₂eq over 100 years, we'd multiply each gas by its GWP over a 100-year timescale (GWP100). Total greenhouse gas emissions – measured in CO₂eq – are then calculated by summing each gas' CO₂eq value.

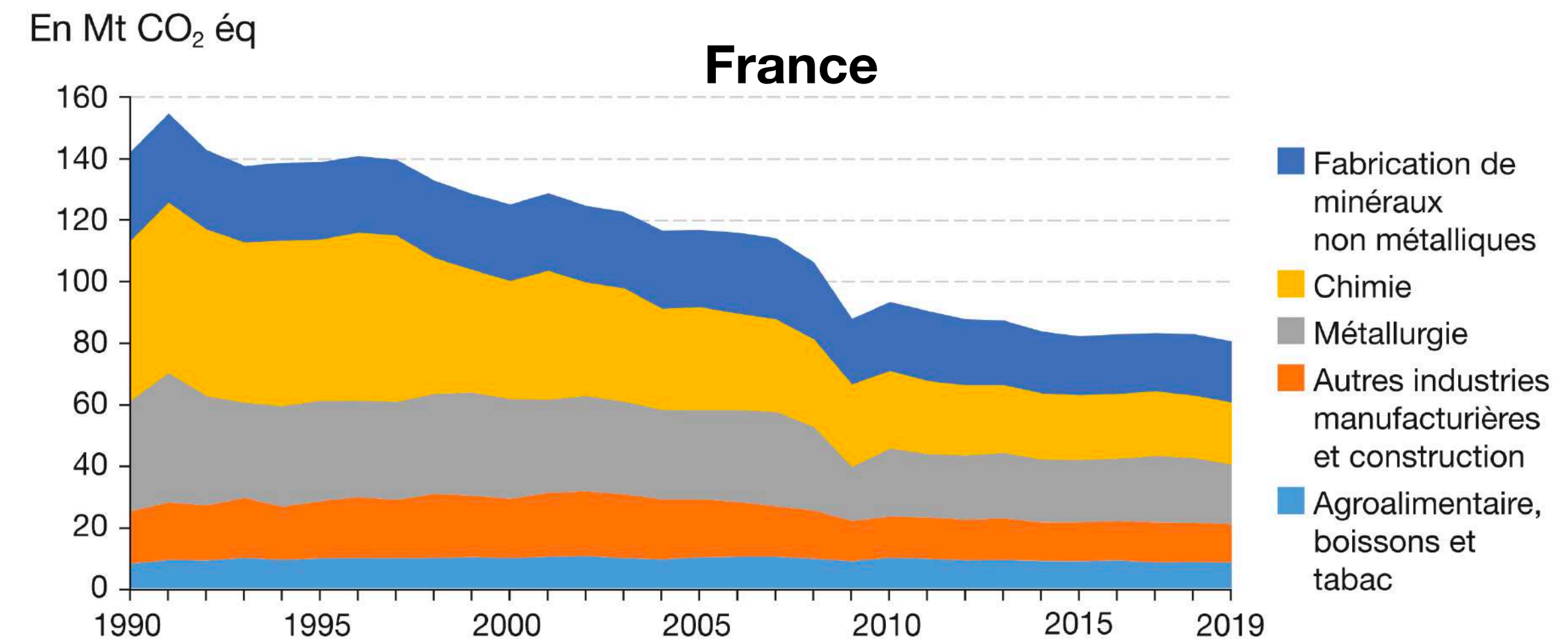
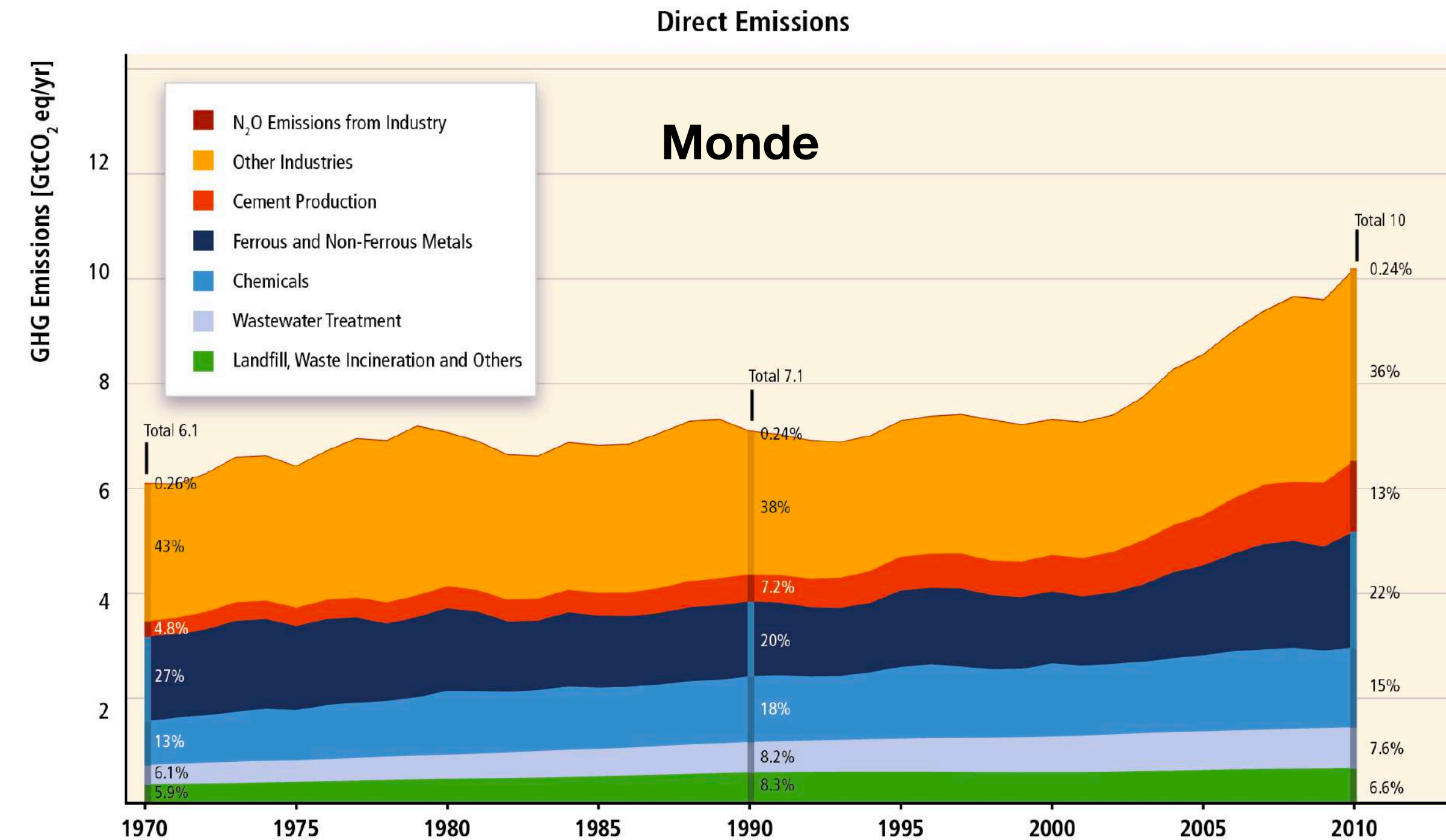
Industrie

C'est environ 25% des émissions mondiales.

Globalement les émissions de l'industrie sont en baisse. Mais la production est en hausse, ce qui compense...

Ces impacts peuvent être attaqués au niveau industriel. On peut améliorer et décarboner les productions industrielles, ce qui est en cours, en particulier en Europe grâce aux normes de l'UE. En particulier, on a envie de remplacer l'utilisation de gaz et pétrole et de décarboner l'utilisation d'hydrogène, nous en reparlerons. Il y a aussi beaucoup à gagner dans les procédés industriels, mais nous n'allons pas rentrer dans les questions techniques.

Ces impacts peuvent aussi être attaqués au niveau de la consommation. Pour cela il faut consommer moins et mieux. Parmi les principales industries émettrices, citons-en deux. L'industrie de l'habillement qui fonctionne grâce à la "fast fashion": les vêtements durent beaucoup moins longtemps qu'avant. L'industrie de l'électronique qui fonctionne grâce à de nouveaux modèles technologiques qui sont vite dépassés ou en panne. Globalement, il vaut mieux consommer ce qui est produit en Europe et essayer de ré-industrialiser le continent: les normes et le bilan carbone de l'électricité permettent une industrie beaucoup plus écologique qu'en Asie.





Deuxième partie:

Production d'électricité

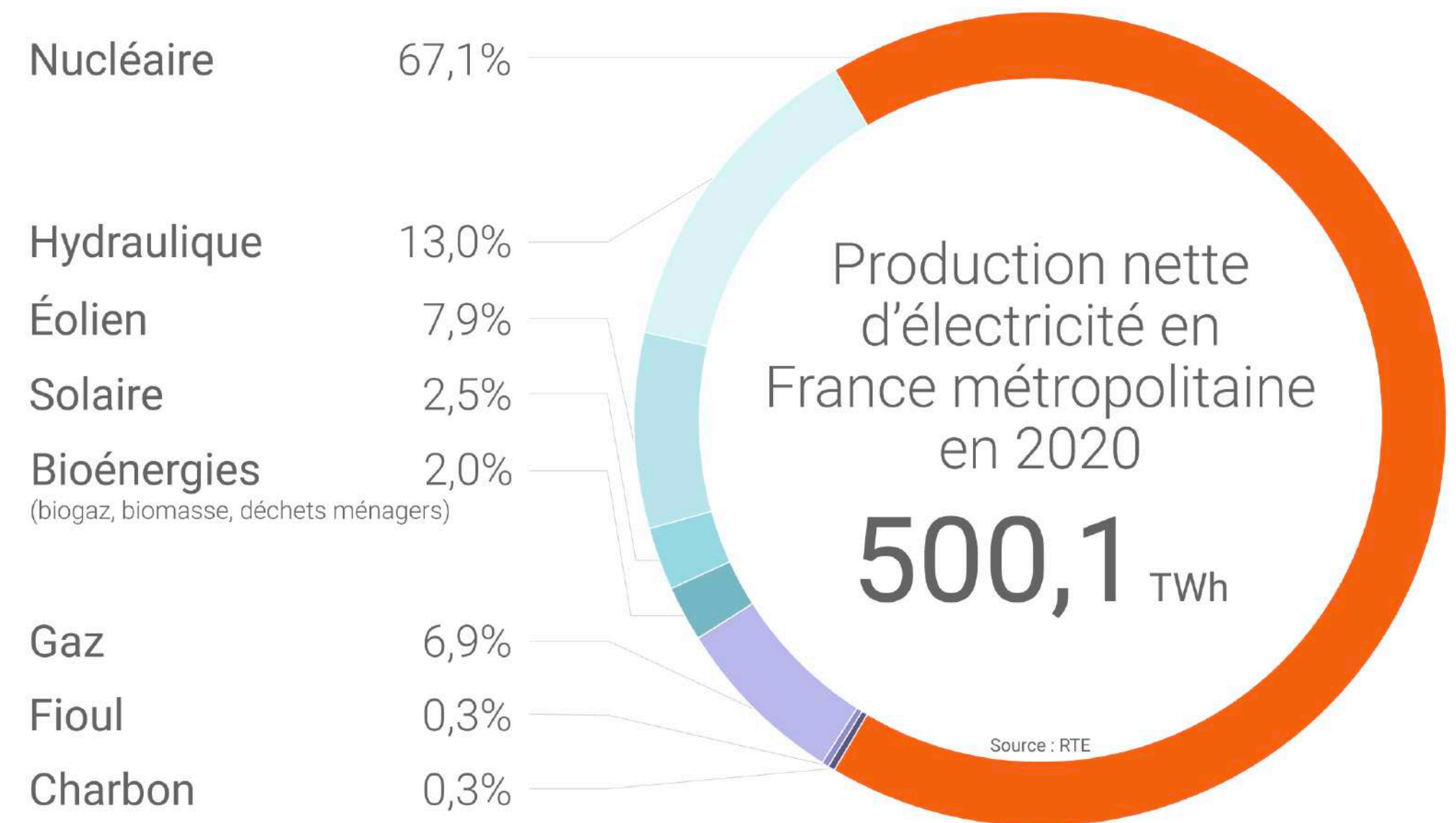
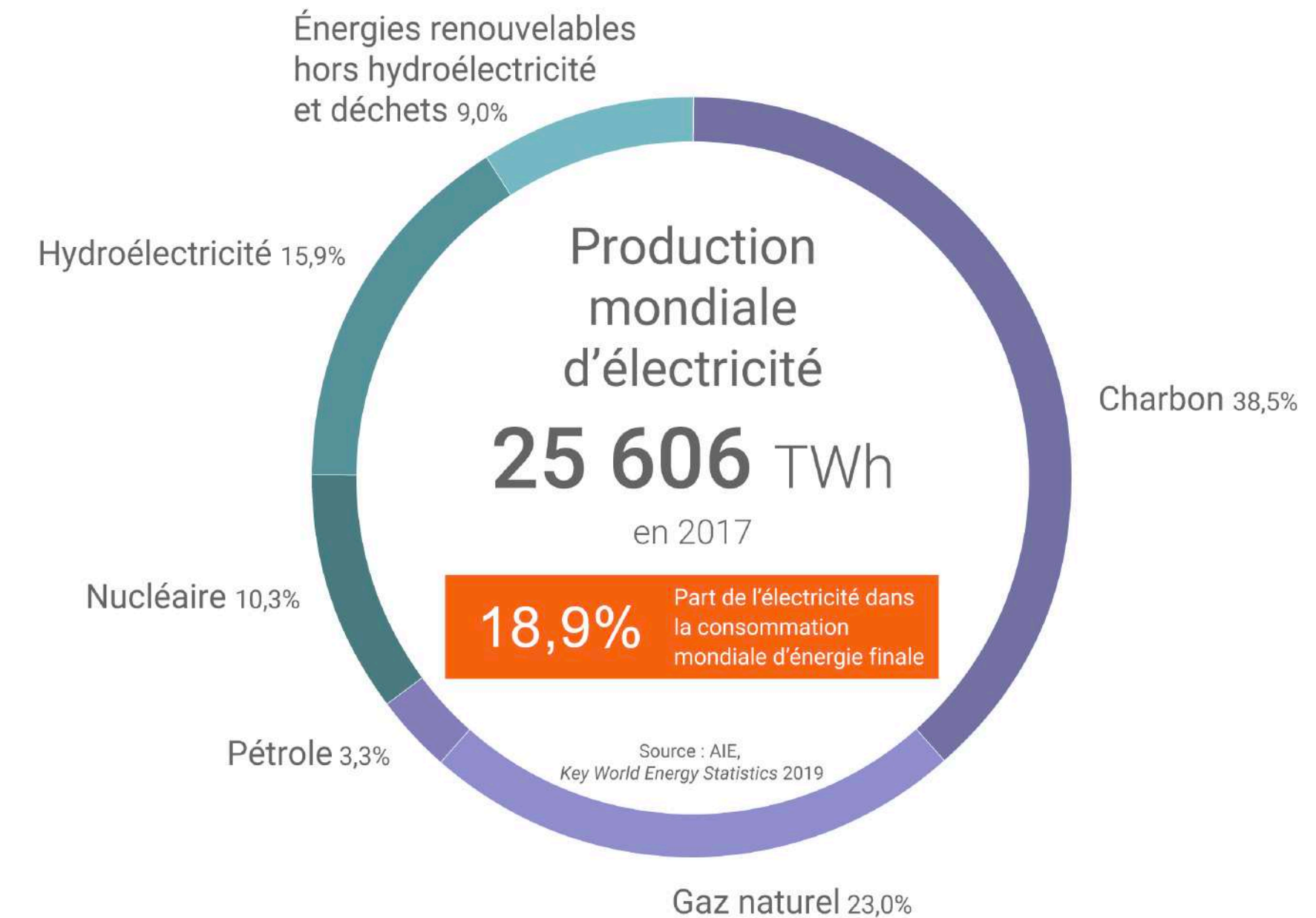
Production électrique

La production d'électricité, c'est 40% des émissions dans le monde, 10% en France.

Quelques remarques:

- Dans le monde, l'électricité est principalement produit avec du charbon et du gaz fossile (pour 60%).
- En France, l'électricité est principalement produite par le nucléaire (pour 70%).
- L'hydroélectricité représente environ 15% de la production en France et dans le monde.
- Les renouvelables intermittents (solaire & éolien) sont en croissance et représente 10% de la production en France et dans le monde.

La production d'électricité est le corps de la transition énergétique, car comme on va le voir, la décarbonations des autres secteurs passera par leur électrification: il va donc falloir produire beaucoup plus d'électricité.



Part de l'électricité et indépendance énergétique

Attention: même si l'électricité est souvent au coeur des débats et que l'on souhaite électrifier une bonne partie des usages dans la transition énergétique, elle reste aujourd'hui une minorité de l'énergie finale consommée. En France, ce n'est qu'environ 30% de l'énergie finale (cf. à droite).

La **transition énergétique**, c'est de décarboner l'énergie. En bonne partie, c'est remplacer les hydrocarbures utilisés aujourd'hui directement (dans les transports, pour le chauffage, ...) par de l'électricité produite de façon propre. En France, l'objectif sur l'électricité c'est d'augmenter la production qui est déjà essentiellement décarbonée, pas de remplacer les productions actuelles d'électricité.

L'**indépendance énergétique**, c'est de ne pas (ou peu) dépendre des importations de produits énergétiques. Aujourd'hui, la France est très dépendante: le gros de l'énergie consommée est du pétrole et du gaz fossile importés. Cela a un coût et on ne dispose que de peu de réserves en cas de crise:

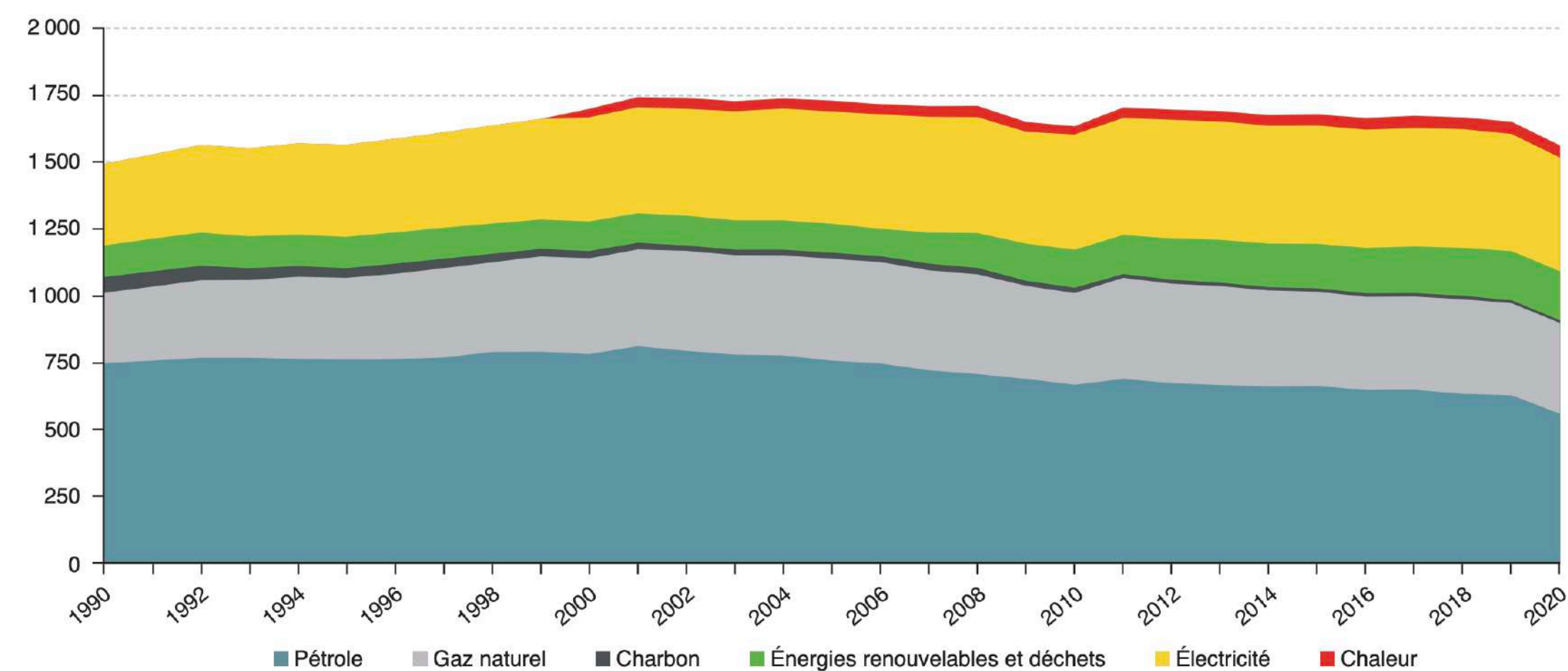
- L'importation de pétrole (et dérivées) coûte environ 30 milliards €/an. Les stocks sont de quelques semaines.
- L'importation de gaz fossile (et dérivées) coûte environ 5 milliards €/an. Les stocks sont de quelques mois.

De plus, cela est sensible à la géopolitique (crises pétrolières, guerre en Ukraine, ...). A l'inverse, les énergies renouvelables et nucléaires permettent de produire de l'énergie sans l'importer. Leur coût vient essentiellement de la construction des centrales et sont assez indépendant de la géopolitique:

- L'uranium a un coût mineur et les stocks sont de 10 à 20 ans.
- Les panneaux solaires et éoliennes ont une durée de vie de l'ordre de 20 ans.

Figure 4.1.4 : consommation finale à usage énergétique par forme d'énergie

En TWh (données corrigées des variations climatiques)



Note : la chaleur n'est isolée que depuis 2000.

Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

Source : calculs SDES

Quelles est la meilleure source d'électricité?

D'un point de vu écologique comme du point de vu de la sécurité, les meilleures sources d'énergie sont claires:

- **L'énergie solaire & éolienne (EnR)**
- **L'énergie hydroélectrique**
- **L'énergie nucléaire**

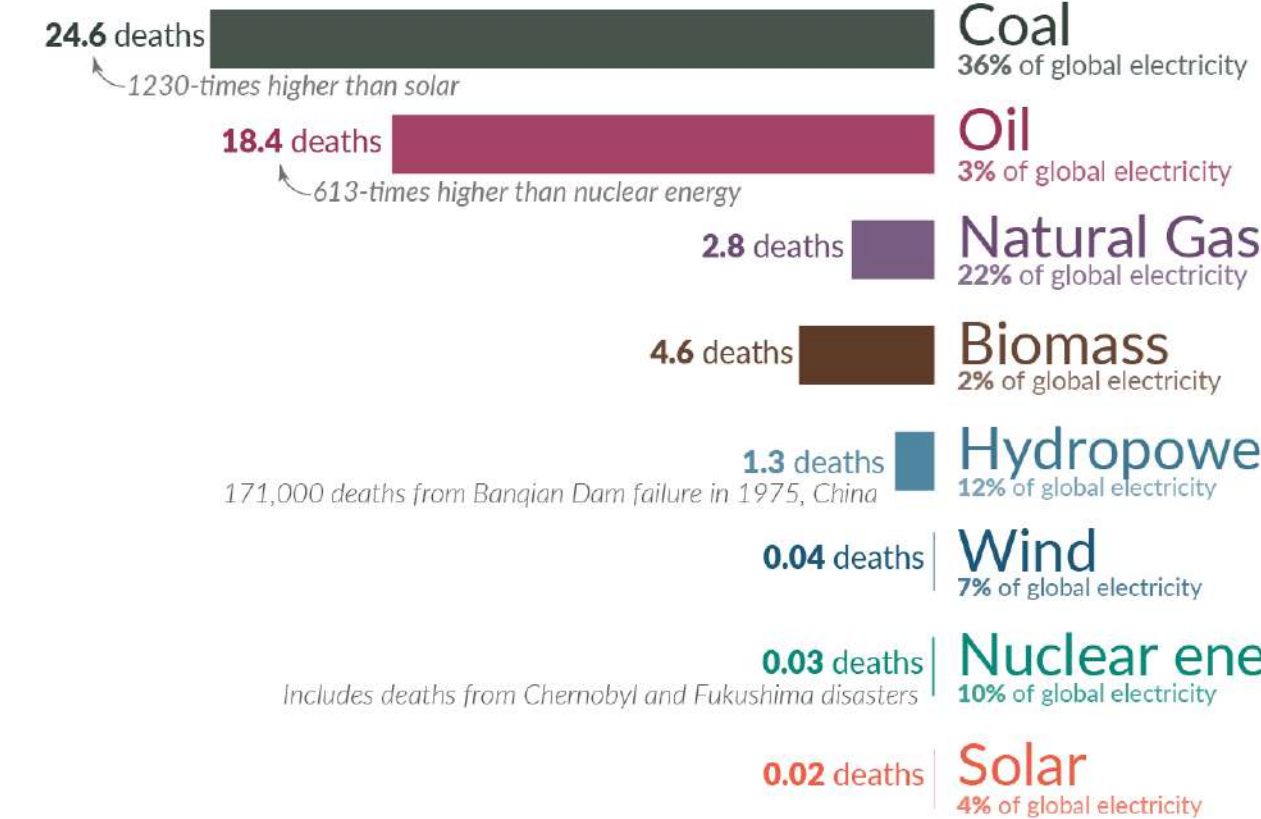
Notons que **le nucléaire est bien une énergie écologique et sûre** d'après toutes les métriques possibles: il y a un consensus scientifique sur le sujet. Pourtant, le grand public paraît très mal informé à ce sujet et beaucoup de fausses informations circulent: 70% des français pensent que le nucléaire émet des gaz à effet de serre (alors que c'est faux), et beaucoup surestiment l'impact des accidents nucléaires (bien moins graves et nombreux que des accidents de barrages hydroélectriques par exemple). Il y a un grand écart entre le consensus scientifique et le débat public...

Ces énergies sont dites décarbonées. Nous allons détailler leur fonctionnement, avantages et limites.

What are the **safest** and **cleanest** sources of energy?

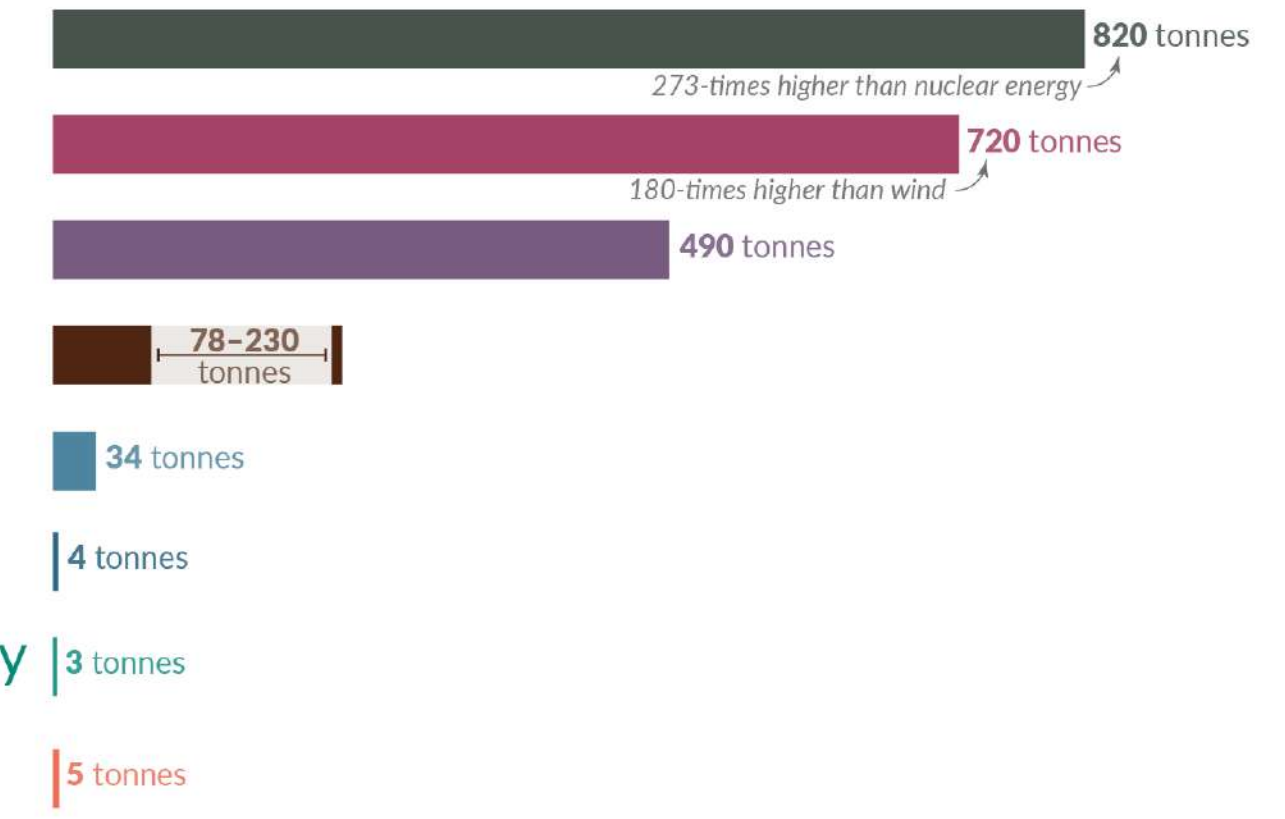
Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of electricity production.
1 terawatt-hour is the annual electricity consumption of 150,000 people in the EU.



Greenhouse gas emissions

Measured in emissions of CO₂-equivalents per gigawatt-hour of electricity over the lifecycle of the power plant.
1 gigawatt-hour is the annual electricity consumption of 150 people in the EU.



Death rates from fossil fuels and biomass are based on state-of-the-art plants with pollution controls in Europe, and are based on older models of the impacts of air pollution on health. This means these death rates are likely to be very conservative. For further discussion, see our article: [OurWorldinData.org/safest-sources-of-energy](https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy). Electricity shares are given for 2021. Data sources: Markandya & Wilkinson (2007); UNSCEAR (2008; 2018); Sovacool et al. (2016); IPCC AR5 (2014); Pehl et al. (2017); Ember Energy (2021).

[OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org) - Research and data to make progress against the world's largest problems.

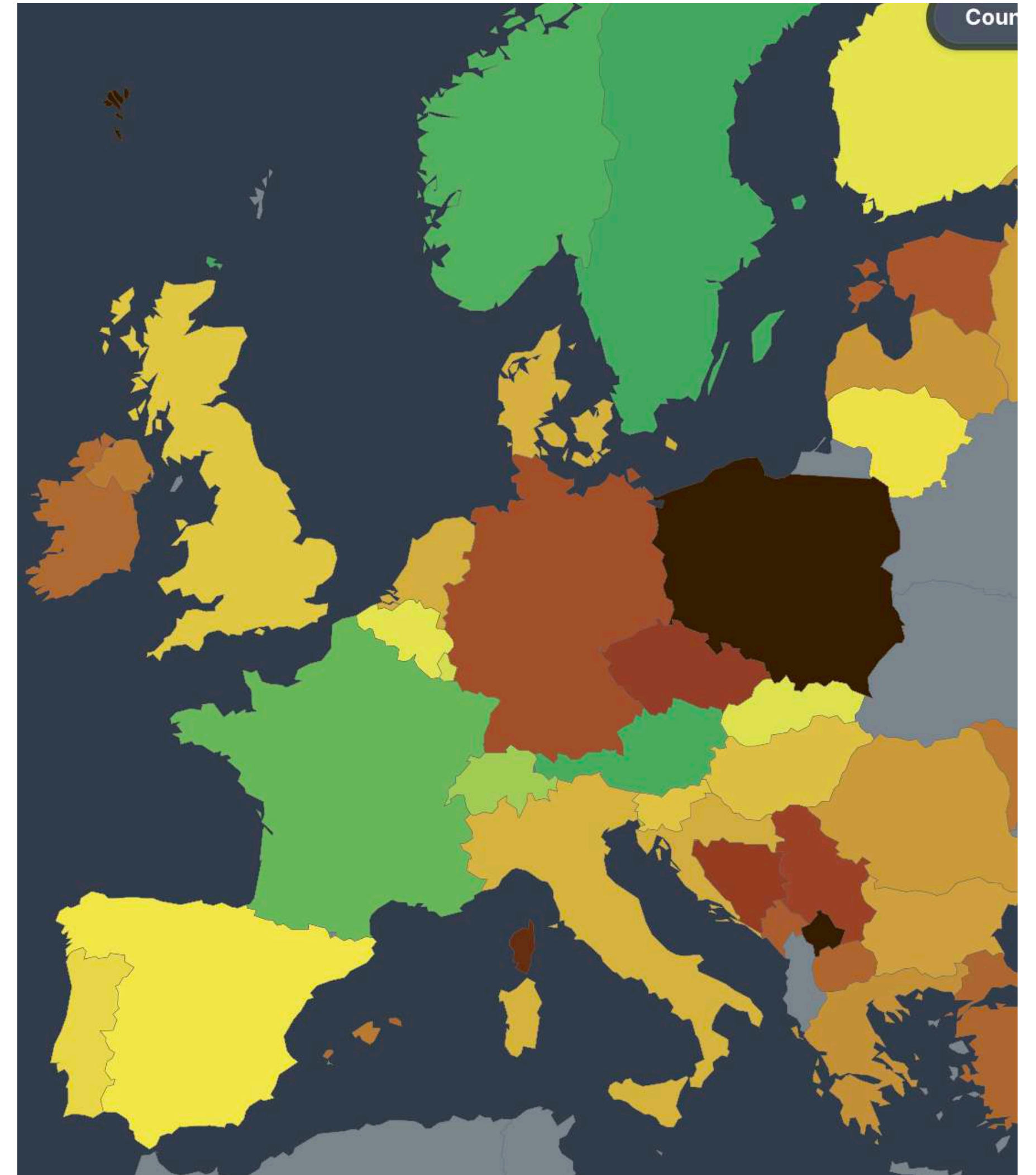
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Comparaison de l'impact carbone des mix électriques

Selon les pays, le mix électrique est plus ou moins décarboné, menant à une empreinte carbone de l'électricité très variable.

- En France, l'électricité est très verte, avec une empreinte de l'ordre de 50 gCO₂eq/kWh
- En Allemagne, l'électricité est bien plus sale, avec une empreinte de l'ordre de 400 gCO₂eq/kWh

A droite, le graphe montre l'impact carbone de l'électricité par pays (en vert c'est propre, en marron c'est polluant). Attention, ce graphe est une photo prise au moment où je préparais ce cours, ça peut varier.



Consommation électrique et perspectives

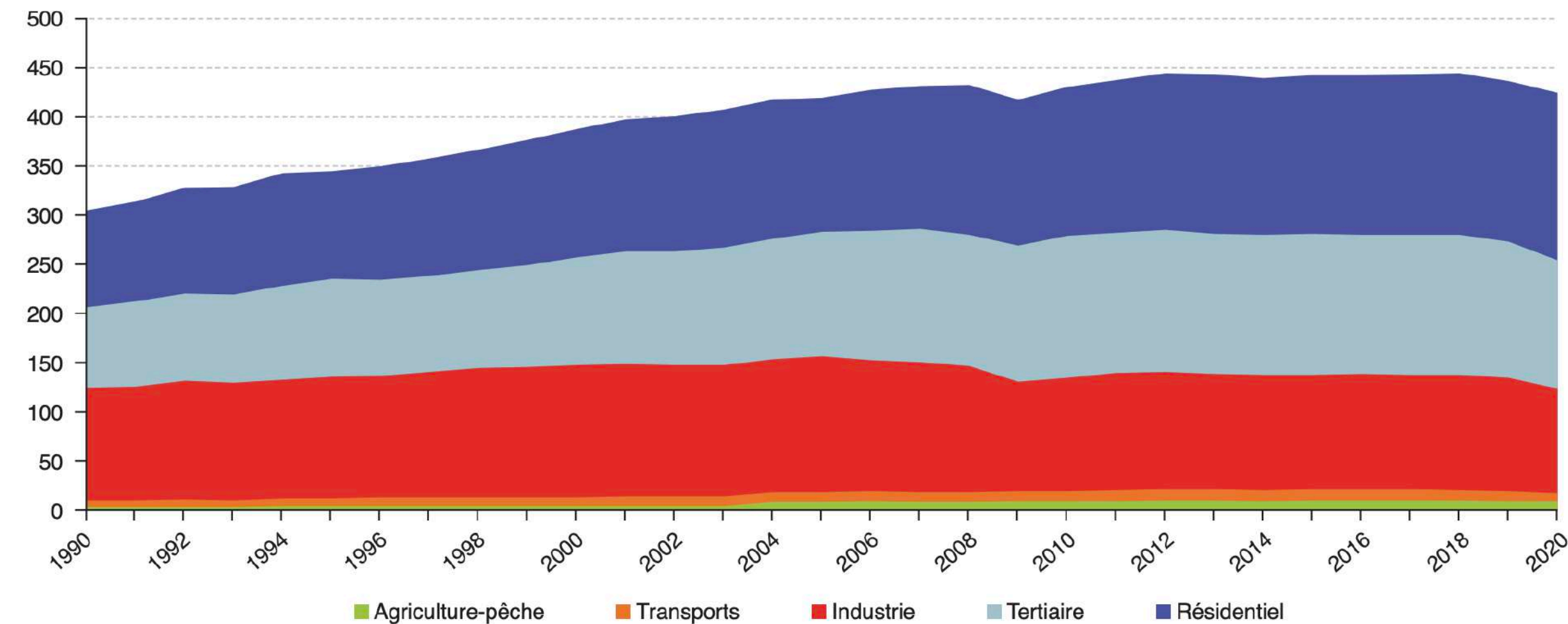
En France, la consommation électrique est principalement due au chauffage (pour 60%). Cela signifie que l'on consomme beaucoup plus d'électricité en hiver qu'en été.

Actuellement, la France est le premier exportateur d'électricité en Europe, mais manque d'électricité en hiver. La consommation d'électricité devrait augmenter dans les prochaines décennies.

Dans son rapport *Futurs énergétiques pour 2050*, RTE (le gestionnaire du réseau électrique) propose plusieurs scénarios pour la production d'électricité. En voici les principaux points:

- On aura besoin de produire plus d'électricité. Nos centrales nucléaires qui produisent le gros de notre électricité vont progressivement arriver en fin de vie d'ici 2050.
- Nous avons besoin de construire de nouveaux réacteurs nucléaires et rapidement, parce que c'est long et que EDF n'a plus la capacité industrielle de construire autant de réacteur en parallèle que dans les années 70-80.
- Nous avons besoin de construire des EnR en quantité et rapidement pour assurer la production électrique parce que l'on aura pas assez de réacteurs nucléaires et pas assez rapidement: il faut compléter.

Figure 4.6.5 : évolution de la consommation finale d'électricité
En TWh (données corrigées des variations climatiques)



Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.
Source : calculs SDES, d'après données locales de consommation d'électricité



Troisième partie:

Stockage d'énergie

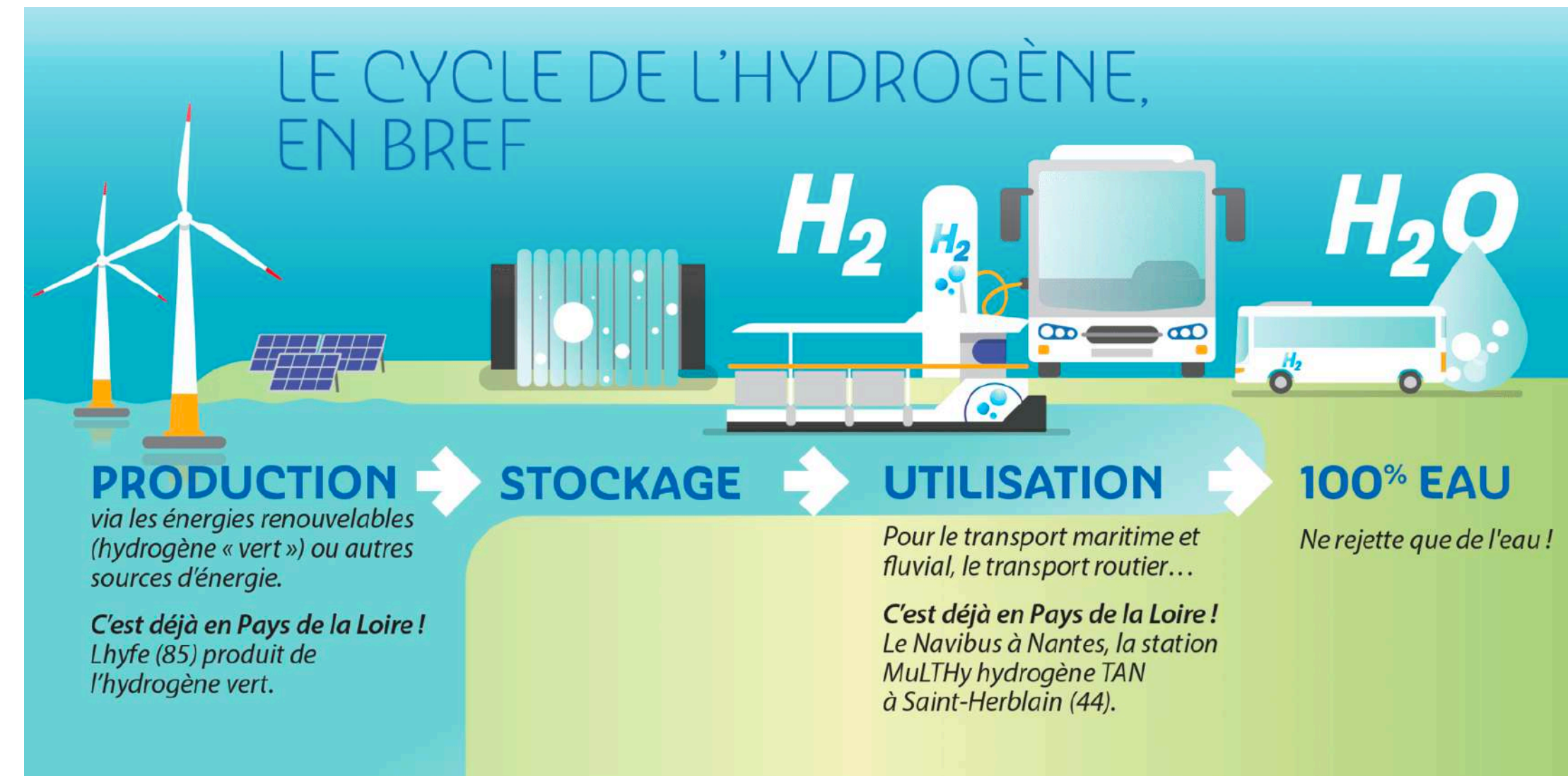
Stocker de l'énergie

Stocker de l'énergie est très compliqué. Les hydrocarbures ont l'avantage de stocker beaucoup d'énergie pour peu d'espace et peu de poids. Il n'y a que peu d'options comparables.

Pour stocker de l'énergie sans hydrocarbures, il existe aujourd'hui deux technologies:

- Les batteries Lithium-ion
- L'hydrogène (H₂)

Décrivons leur fonctionnement.



Batterie Lithium-ion

Une batterie Lithium-ion c'est une pile qui utilise les ions Lithium pour transporter les charges électriques entre une anode en graphite et un cathode en Cobalt. C'est ce qui ce fait de mieux en terme de batterie.

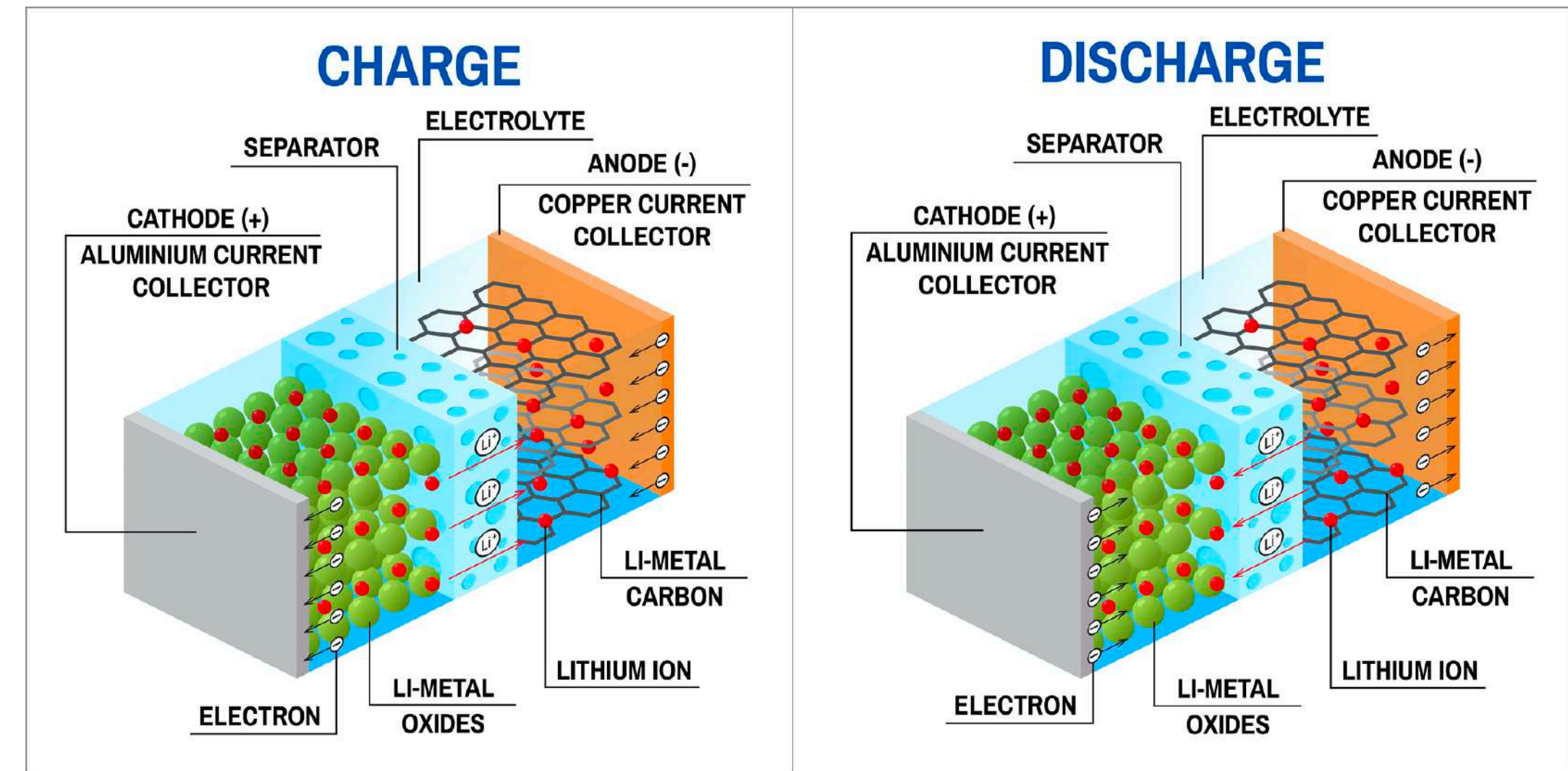
Limites:

- Peut stocker de l'énergie en quantité.
- Bonne durée de vie (10 à 20 ans).
- Se recycle très bien.

Limites:

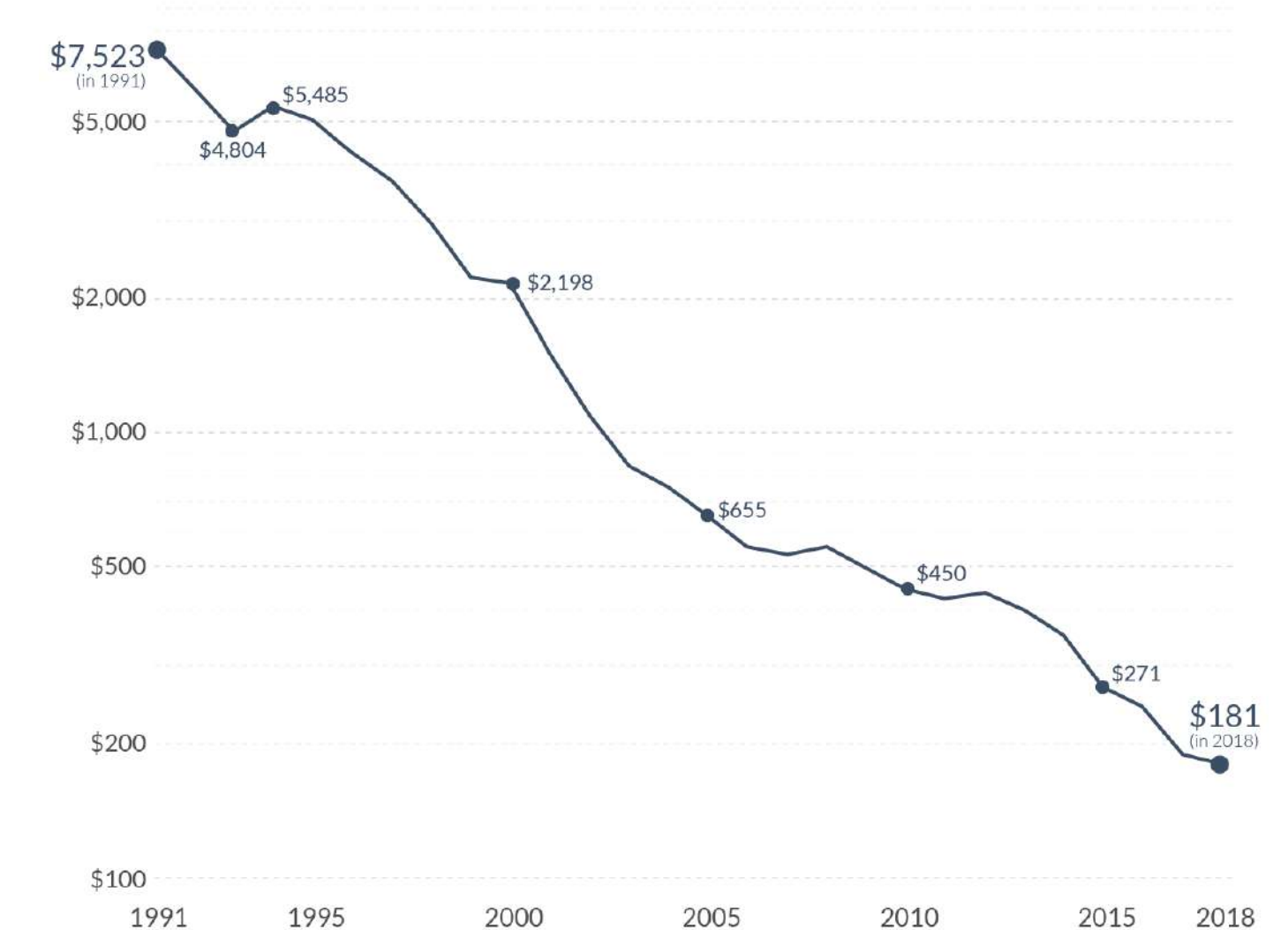
- C'est lourd: 250 Wh/kg. Pour 50 kWh (une voiture) ça fait 200 kg.
- C'est cher: 180\$/kWh en 2018. Pour 50 kWh ça fait 9000€.
- Il y a besoin de beaucoup de Lithium et le Cobalt est un métal rare.
- Le bilan écologique d'une batterie est assez mauvais, principalement à cause du coût d'extraction des métaux.

Pour baisser le coût environnemental des batteries, il faut les recycler au maximum et quand possible extraire les métaux en Europe où les normes environnementales sont meilleures. Par exemple, les projets de mines de Lithium en France permettrait d'avoir du Lithium beaucoup plus écologique. Il y a un consensus scientifique sur le fait de soutenir ces initiatives pour la réussite de la transition écologique.



The price of lithium-ion batteries fell by 97%

Price of lithium-ion battery cells per kWh (logarithmic axis)



Prices are adjusted for inflation and given in 2018 US-\$ per kilowatt-hour (kWh).
Source: Micah Ziegler and Jessika Trancik (2021). Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline.
OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems. Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Hydrogène

L'hydrogène (en fait du di-hydrogène H_2) n'est pas une source d'énergie primaire: il faut le produire. Son intérêt n'est donc que de stocker de l'énergie.

Il y a 2 principales façons de produire de l'hydrogène:

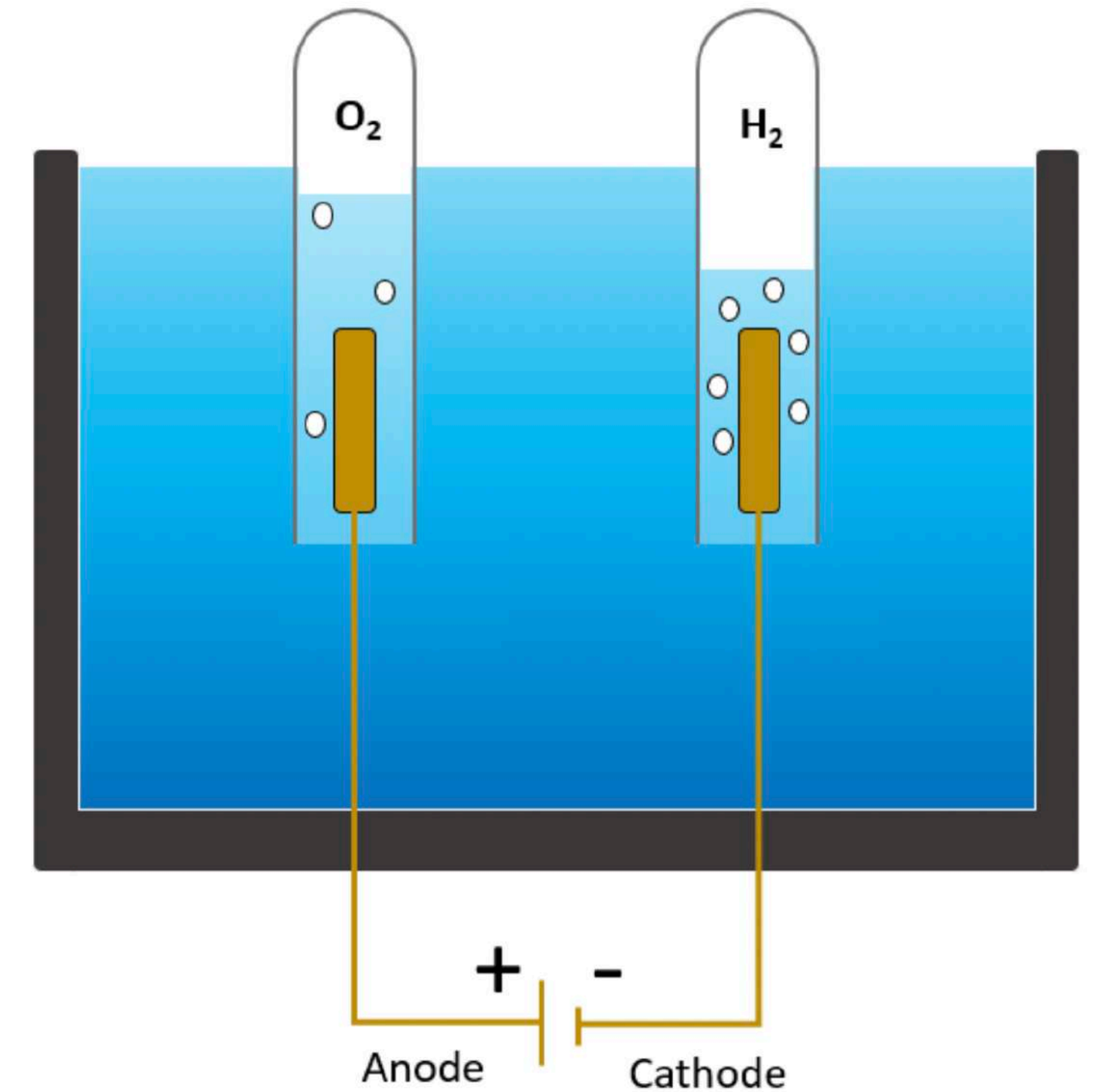
- En brûlant des hydrocarbures (principalement du gaz fossile), c'est 80% de la production actuelle. Mais cela émet beaucoup de gaz à effet de serre.
- Par hydrolyse de l'eau, ce qui consomme de l'électricité, c'est moins de 1% de la production actuelle. Le rendement est de 60% ce qui est moyen.

A l'heure actuelle en Europe l'hydrogène est un dérivé des hydrocarbures, cela n'a rien d'écologique. Pire, avec l'empreinte carbone actuelle de l'électricité européenne, produire de l'hydrogène par hydrolyse aurait une empreinte carbone encore pire qu'avec des hydrocarbure. C'est dû au rendement moyen de l'hydrolyse.

On peut utiliser l'hydrogène de 2 façons:

- En brûlant l'hydrogène, ce qui est surtout utile pour l'industrie.
- En le re-convertissant en électricité. Mais le rendement électricité puis hydrogène (stockage) puis électricité a un rendement d'environ 30%. On perd donc les deux tiers de l'électricité par cette méthode de stockage...

L'hydrogène est déjà utilisé par l'industrie en quantité. Décarboner l'hydrogène que l'on utilise déjà demandera une grande quantité d'électricité propre. C'est là l'objectif avant d'inventer de nouveaux usages à l'hydrogène.





Quatrième partie:

Energies renouvelables

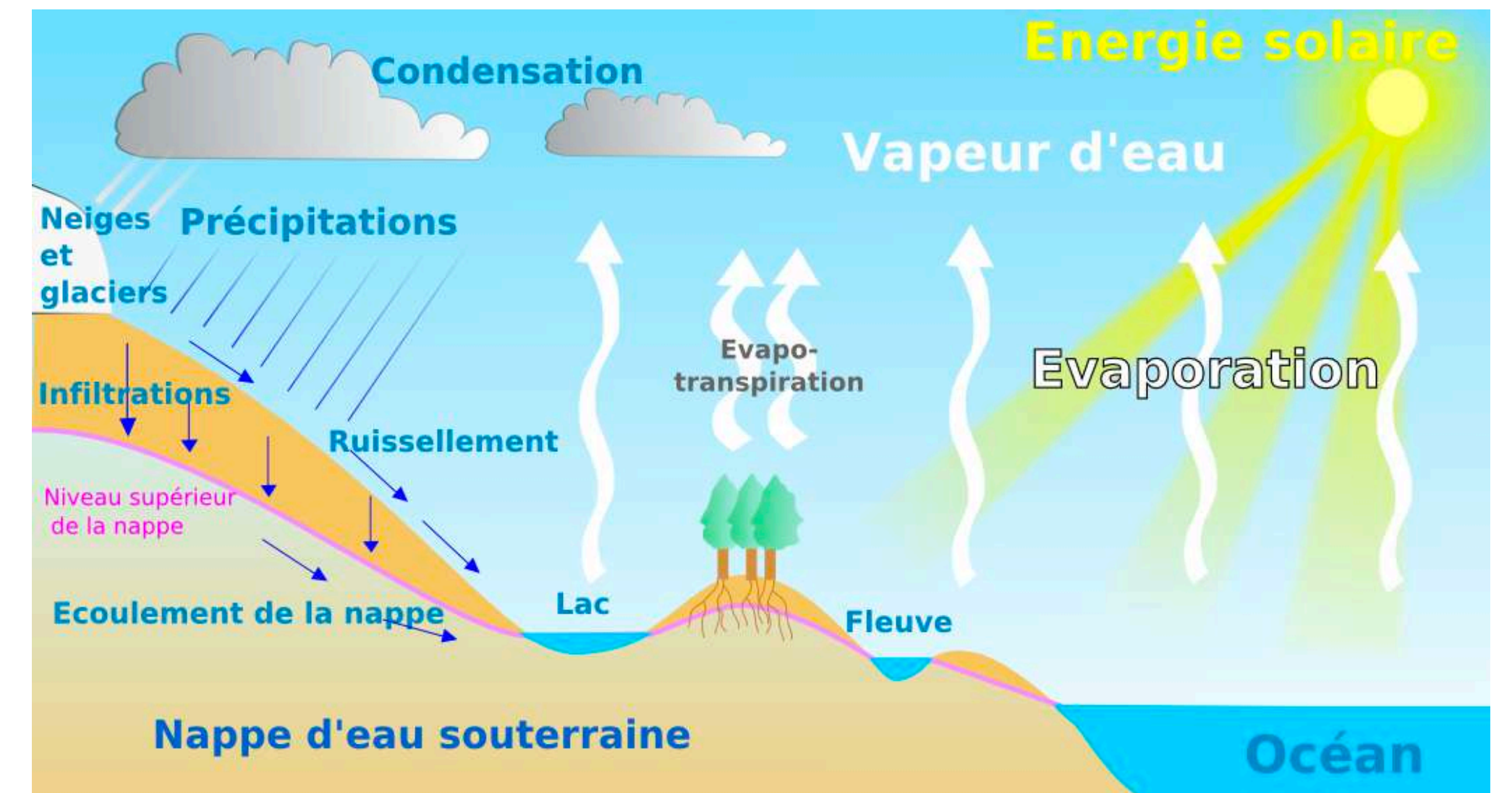
Energie hydroélectrique

C'est 15% de la production d'électricité.

Principe: On récupère l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau qui coule des montagnes aux mers. C'est la récupération d'une partie de l'énergie du cycle de l'eau: cette énergie vient indirectement du Soleil qui a fait évaporer l'eau au départ du cycle. Pour ce faire, on fait tourner une turbine qui produit de l'électricité avec un dynamo (comme sur un vélo mais en mieux).

Avantage: énergie bas-carbone et régulière: on ouvre le barrage quand on veut et donc on produit quand on veut.

Limite: On est déjà quasiment au maximum de ce qui est récupérable. Si on estime l'entièreté de l'énergie potentielle disponible dans le cycle, on en récupère déjà une bonne partie. Il n'y a donc à peu près rien à attendre de plus de cette source d'énergie que ce que l'on utilise déjà.



Energie éolienne

C'est entre 5 et 10% de la production d'électricité.

Principe: On récupère l'énergie cinétique du vent. On utilise le vent pour faire tourner les pâles et on convertis ça en électricité avec un dynamo. C'est la version moderne du moulin à vent. Etant donné que les vents sont générés par la distribution du rayonnement solaire, l'énergie éolienne est indirectement une énergie solaire.

Avantage: énergie bas-carbone.

Limite:

- L'éolien a besoin de beaucoup de place car si deux éoliennes sont trop proches, la première "vole" le vent de la seconde. Il faut donc les espacer sur de grands espaces.
- Il y a souvent des oppositions locales car certains estiment qu'elles détruisent les paysages.
- La production d'électricité est intermittente: on ne peut pas choisir quand elles produisent ou non.
- Les dynamos des éoliennes utilisent des terres rares.

Technologie: La production d'une éolienne est en carré de sa taille, il vaut donc mieux construire de grandes éoliennes.

On peut construire des éoliennes sur terre ou en mer. En mer, il faut une zone peu profonde pour créer un pilier. La technologie des éoliennes flottante est encore en développement. Le vent est plus constant en mer et il y a moins de conflits d'usage.



Energie solaire

C'est moins de 5% de la production d'électricité.

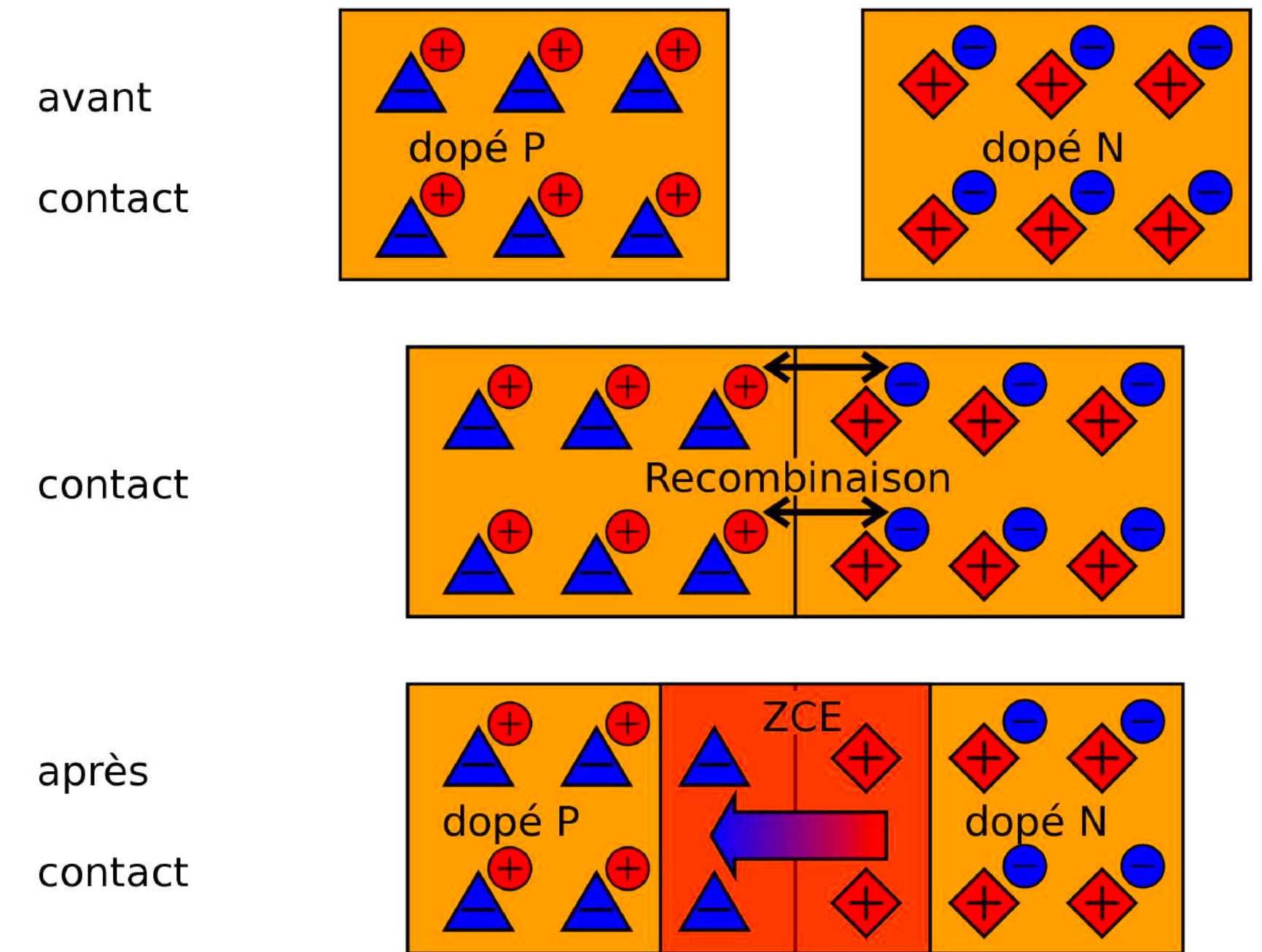
Principe: On récupère l'énergie du rayonnement solaire qui est d'environ 300 W/m^2 . Le potentiel est donc grand.

Avantage: énergie bas-carbone.

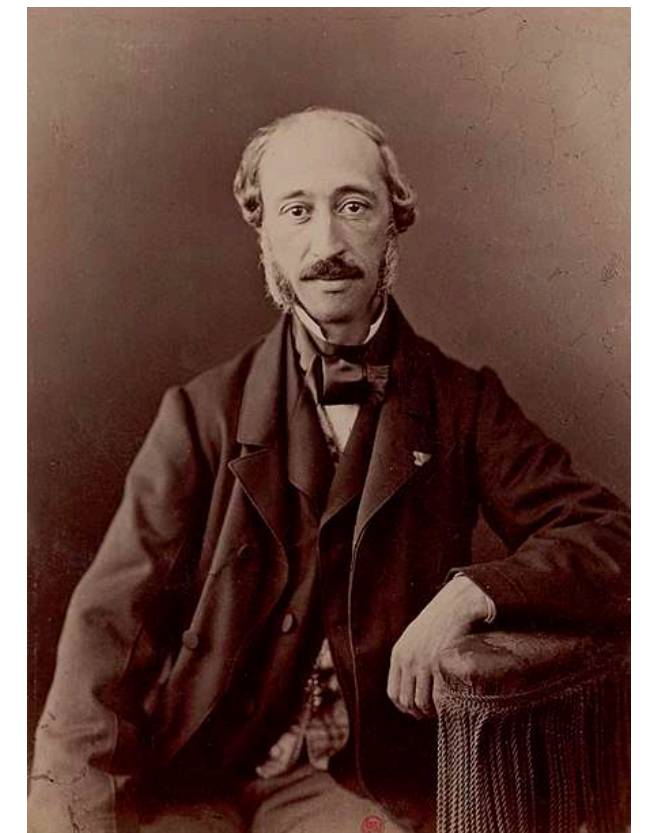
Limite:

- Le solaire a besoin de beaucoup de place où il récupère le rayonnement solaire. Il y a donc des conflits d'usage avec l'agriculture.
- La production d'électricité est intermittente: on ne peut pas choisir quand elles produisent ou non. Notamment, le solaire ne fonctionne pas la nuit.

Technologie: Un panneau solaire fonctionne grâce à des cellules photovoltaïques. Le principe est que l'on a une jonction PN: d'un côté des charges plus sont mobiles, de l'autre des charges moins sont mobiles. A la jonction, cela engendre un champ électrique. Lorsqu'un photon apporte de la lumière, il excite un électron qui se déplace, et celui-ci est poussé par le champ électrique. On obtient alors un courant électrique. Cet effet a été découvert par Edmond Becquerel.



Edmond Becquerel
1820-1891



Coût et gestion de l'intermittence

D'un point de vue financier, le prix du solaire et de l'éolien c'est effondré, si bien qu'ils deviennent compétitifs.

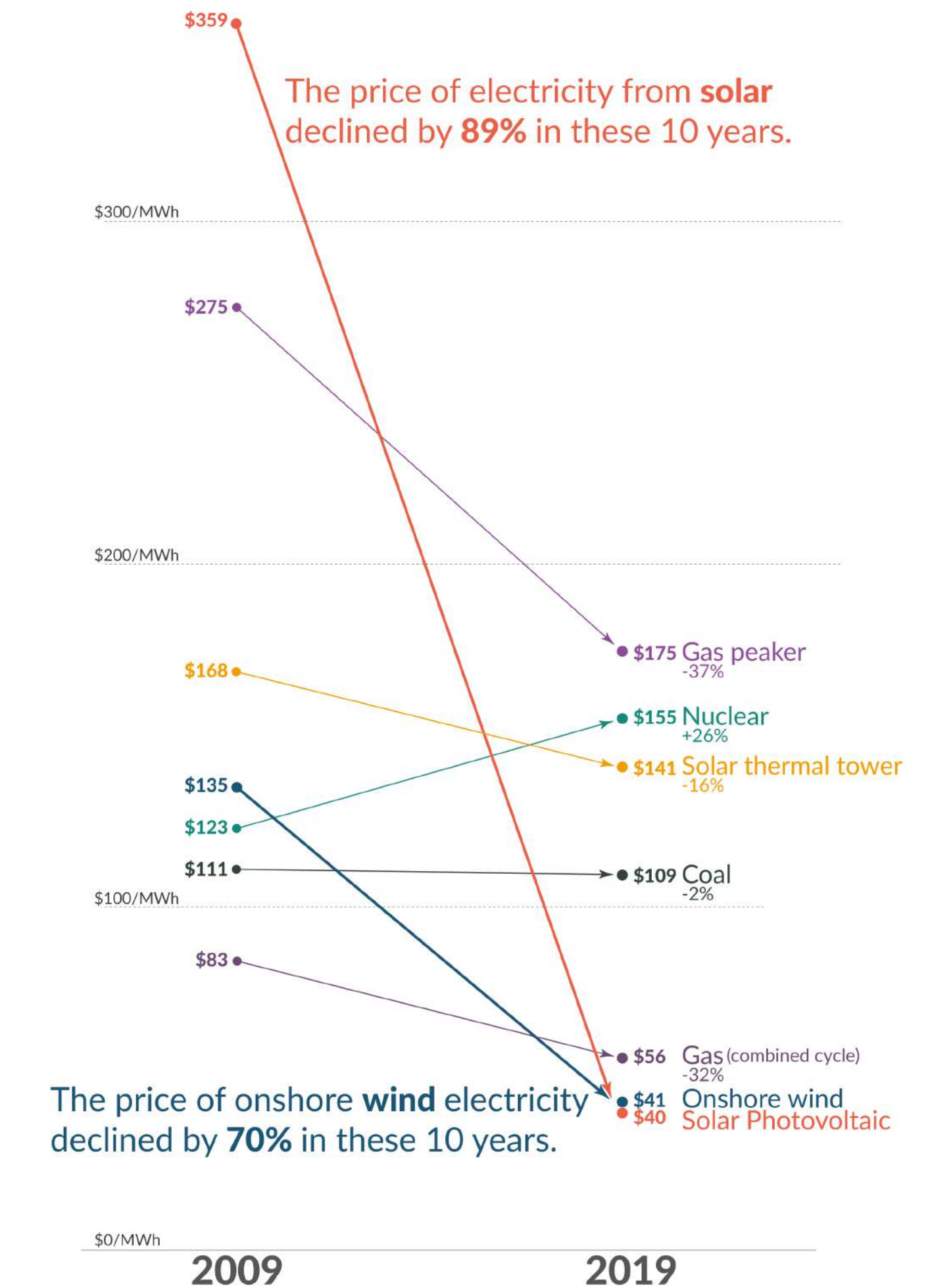
Les énergies solaire et éolienne sont intermittente. Comment compenser pour avoir de l'électricité en continu?

Première méthode: compenser avec d'autres sources d'énergie. On peut utiliser d'autres sources d'énergie, dites pilotables, pour compléter quand nécessaire. En pratique, on utilise l'hydraulique et le gaz fossile. Le premier est déjà limité en capacité. Le second est polluant. Cette solution ne fonctionne donc pas si on veut avoir plus d'éolien et de solaire et un mix énergétique décarboné. En pratique aujourd'hui, les pays avec beaucoup de solaire et éolien comme l'Allemagne reposent sur le gaz fossile: résultat leur électricité est très polluante.

Deuxième méthode: stocker de l'électricité. C'est très compliqué, on en sait quasiment pas stocker l'électricité. Seuls deux technologies sont imaginées. Les batteries, comme pour les voitures électriques, ont un coût écologique de construction qui est important. A grande échelle ce n'est donc pas souhaitable. L'hydrogène dans un cycle "power-to-power": électricité en hydrogène puis hydrogène en électricité. C'est cette méthode qui est imaginée dans les scénarios "100% renouvelables". Mais on l'a vu, l'hydrogène n'est pas près d'être vert et le "power-to-gas" n'a aujourd'hui un rendement que de 30%, ce qui est très mauvais. Cette méthode est donc très spéculative. De plus, le stockage coute très cher, ce qui n'est pas pris en compte dans les prix affichés du solaire et de l'éolien, qui sont donc largement sous-estimé. D'après RTE (le gestionnaire du réseau électrique), les prévisions sont claires: plus on aura de renouvelable intermittent, plus le stockage sera complexe, et plus l'électricité coutera cher.

The price of electricity from new power plants
Electricity prices are expressed in 'levelized costs of energy' (LCOE). LCOE captures the cost of building the power plant itself as well as the ongoing costs for fuel and operating the power plant over its lifetime.

Our World
in Data



Data: Lazard Levelized Cost of Energy Analysis, Version 13.0
OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems. Licensed under CC-BY by the author Max Roser.



Cinquième partie:

Energie nucléaire

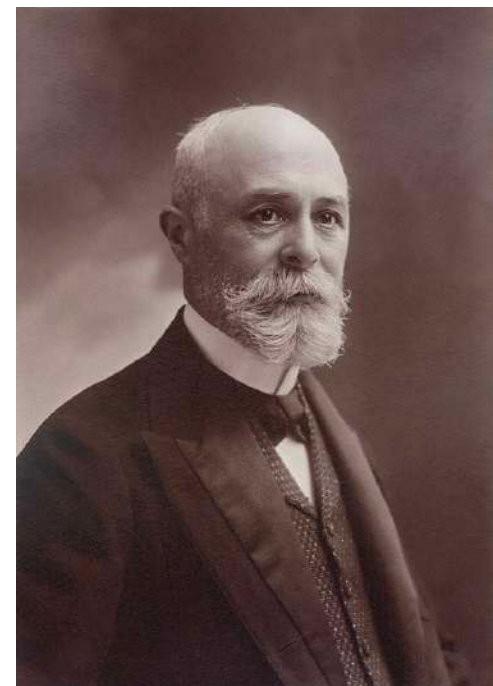
Radioactivité

Les noyaux des atomes sont constitués de **neutrons** et de **protons**. Le nom d'un atome dépend de son nombre de protons. Selon leur nombre, l'atome est plus ou moins stable.

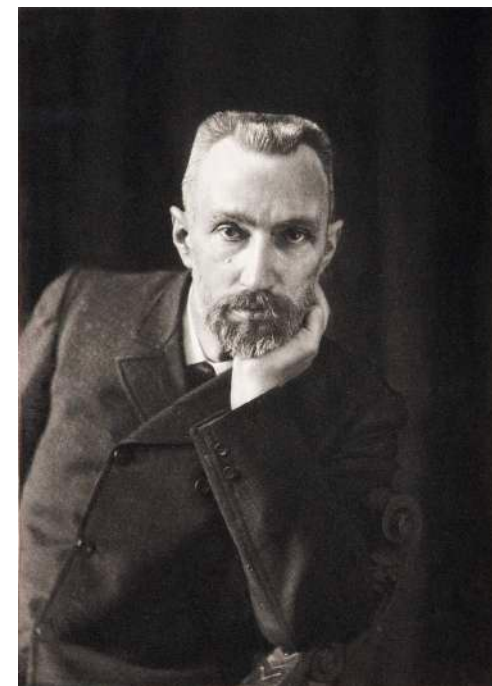
- Pour chaque nombre de protons, il y a un nombre de neutrons optimal: s'il a un nombre différent de neutrons, on parle d'**isotope**.
- Les atomes les plus stables ont un nombre moyen de protons (un dizaine). Les atomes plus petits peuvent donc fusionner, c'est la **fusion nucléaire**. Les atomes plus gros peuvent se couper, c'est la **fission nucléaire**.

Des isotopes peuvent émettre des particules ou bien rayonner de la lumière très énergétique (des rayons gamma, de la lumière de grande fréquence) pour trouver un état plus stable. C'est la **radioactivité**, découverte par Henri Becquerel et étudiée par Pierre et Marie Curie.

Lorsqu'un matériau constitué d'atomes instables, on dit qu'il est radioactif. Sa radioactivité, c'est (généralement) les rayons gamma qu'il émet, qui peuvent être dangereux. Les rayons gamma existent partout dans la nature, c'est une question de quantité. La radioactivité décroît exponentiellement avec le temps, mais ce temps peut être long.



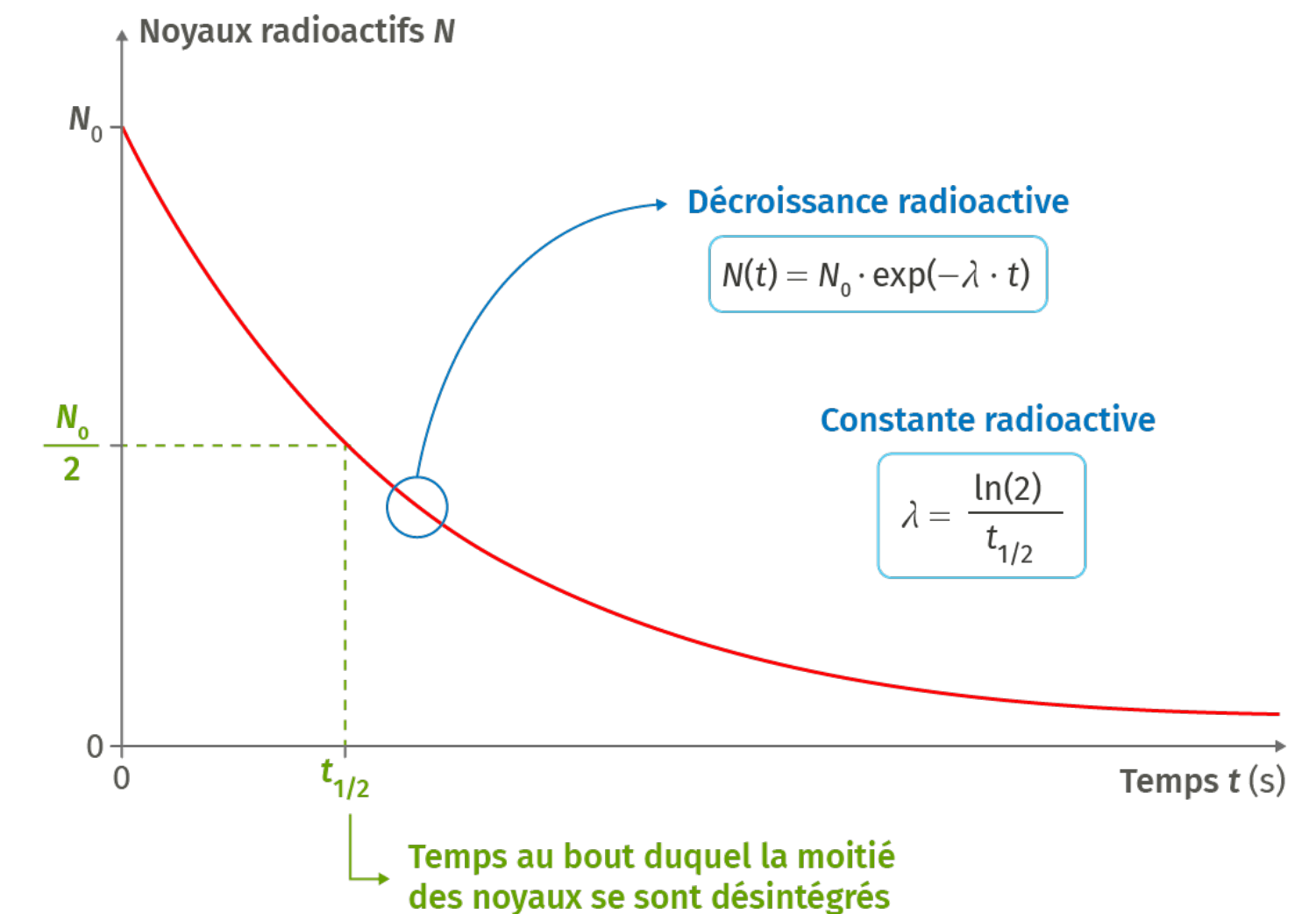
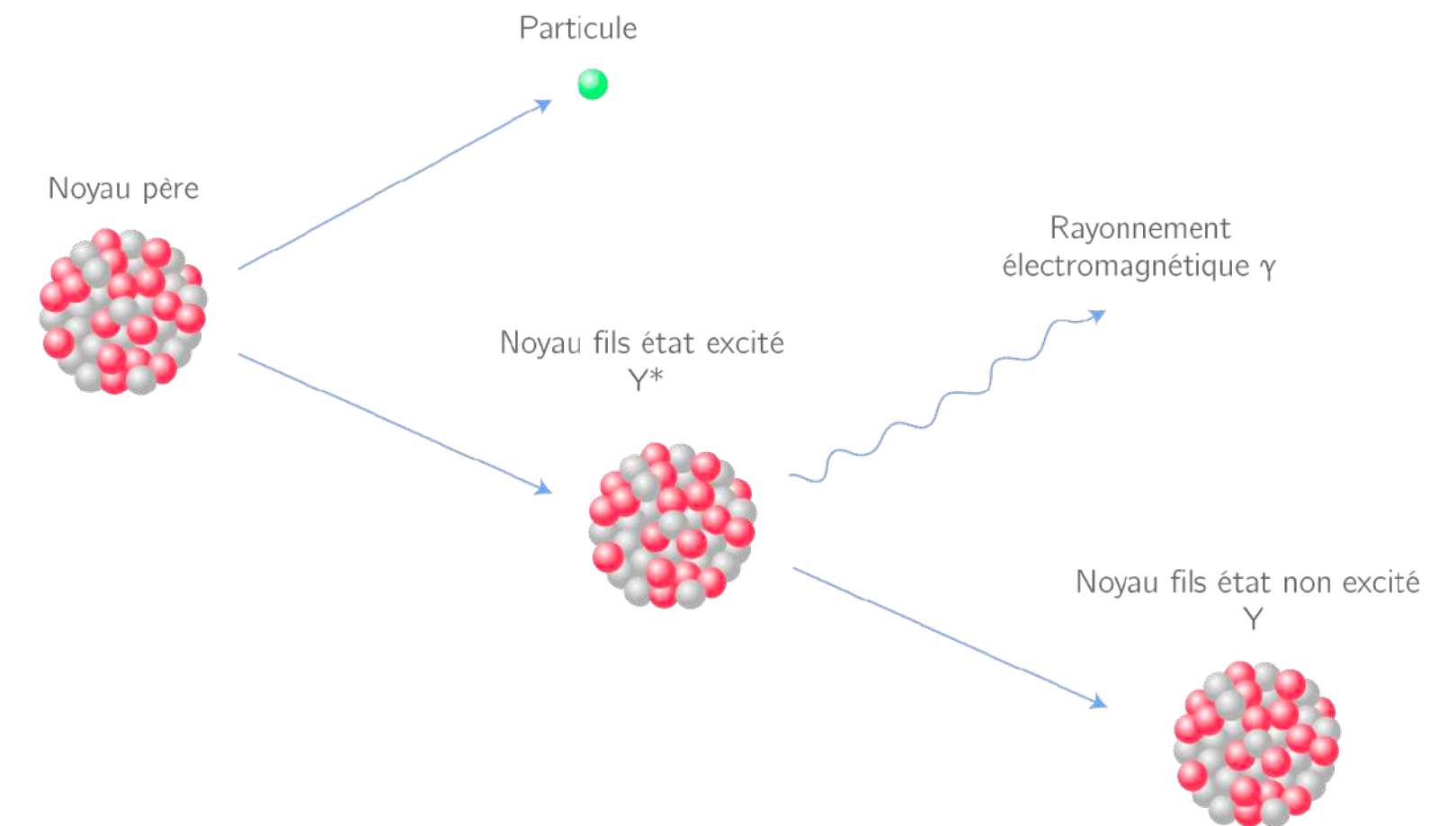
Henri Becquerel
1852-1908



Pierre Curie
1859-1906



Marie Curie
1867-1934



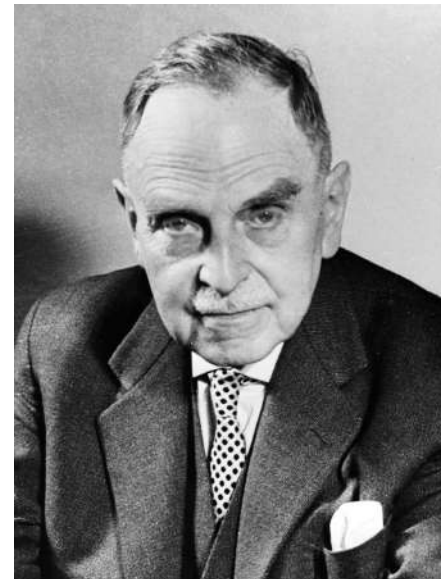
Fission nucléaire et réacteur

La fission nucléaire a été découverte en 1939 par Otto Hahn et Lise Meitner. En bombardant un atome lourd (comme l'uranium) par un neutron, il se casse en deux, ce qui libère de l'énergie. De plus, cela libère des protons qui peuvent bombarder de nouveaux atomes: c'est une réaction en chaîne. Sans contrôle et avec assez d'énergie de départ, cela forme une bombe nucléaire. Avec moins d'énergie de départ, la réaction en chaîne ne peut pas continuer par elle-même: on peut la contrôler.

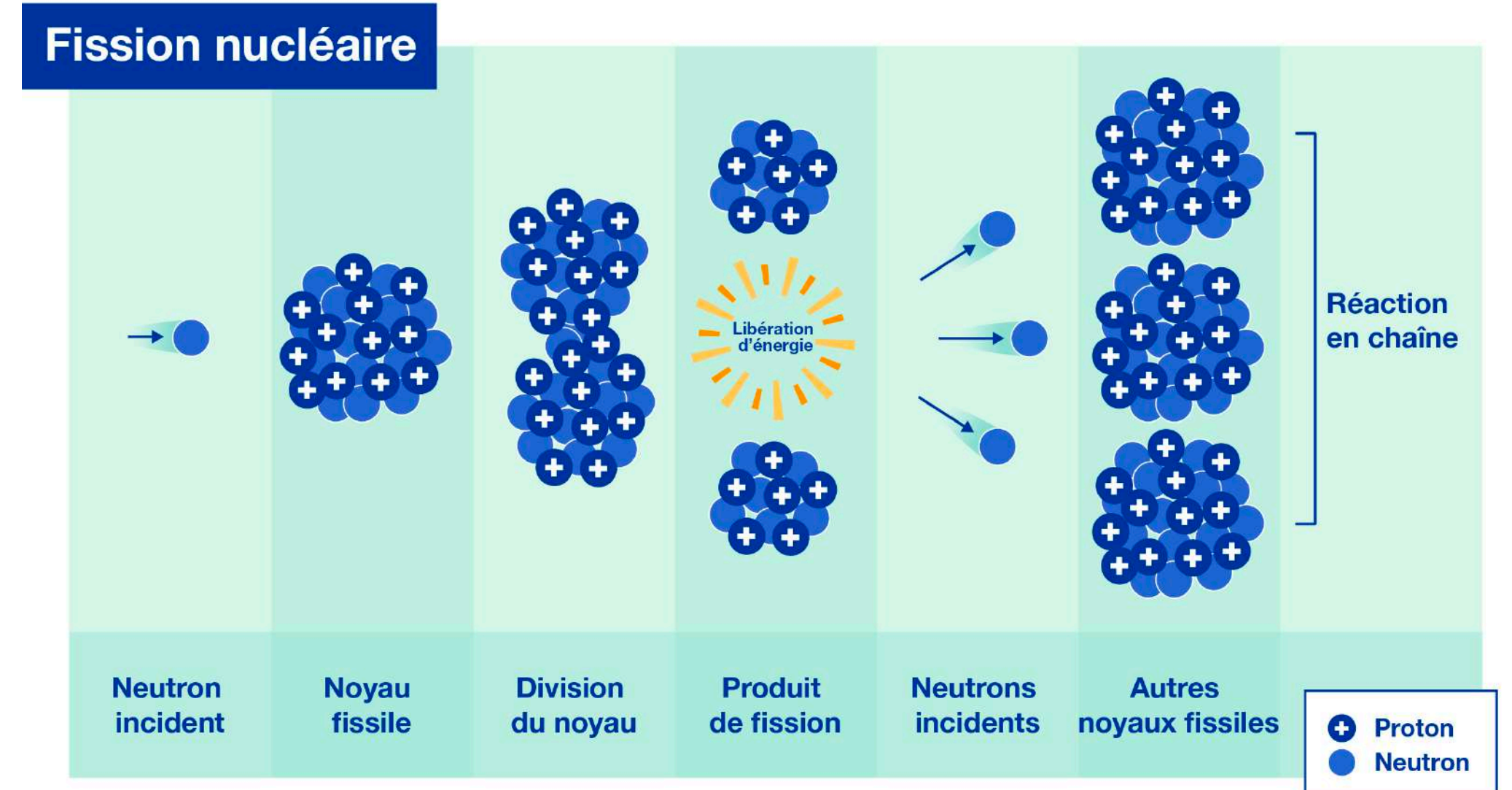
Un réacteur nucléaire est une machine thermique. La fission a lieu dans le réacteur qui est protégé par une cuve et produit de la chaleur. Celle-ci est transportée par le circuit secondaire, qui n'est pas en contact avec la fission. En particulier, il n'y a pas de radioactivité en dehors du réacteur. Enfin cette chaleur est utilisée pour faire évaporer de l'eau dans une tour de refroidissement qui fera tourner des turbines en s'évacuant. C'est ça la partie visible de la centrale nucléaire: c'est une tour en béton et de la vapeur d'eau.

La tour de refroidissement n'est vraiment utile que pour produire de l'électricité. Un manque d'eau à utiliser en cas de sécheresse ou une attaque quelconque contre une tour a pour seul effet d'arrêter la production d'électricité. Cela ne pose aucun risque de sécurité pour le réacteur.

Otto Hahn
1879-1968

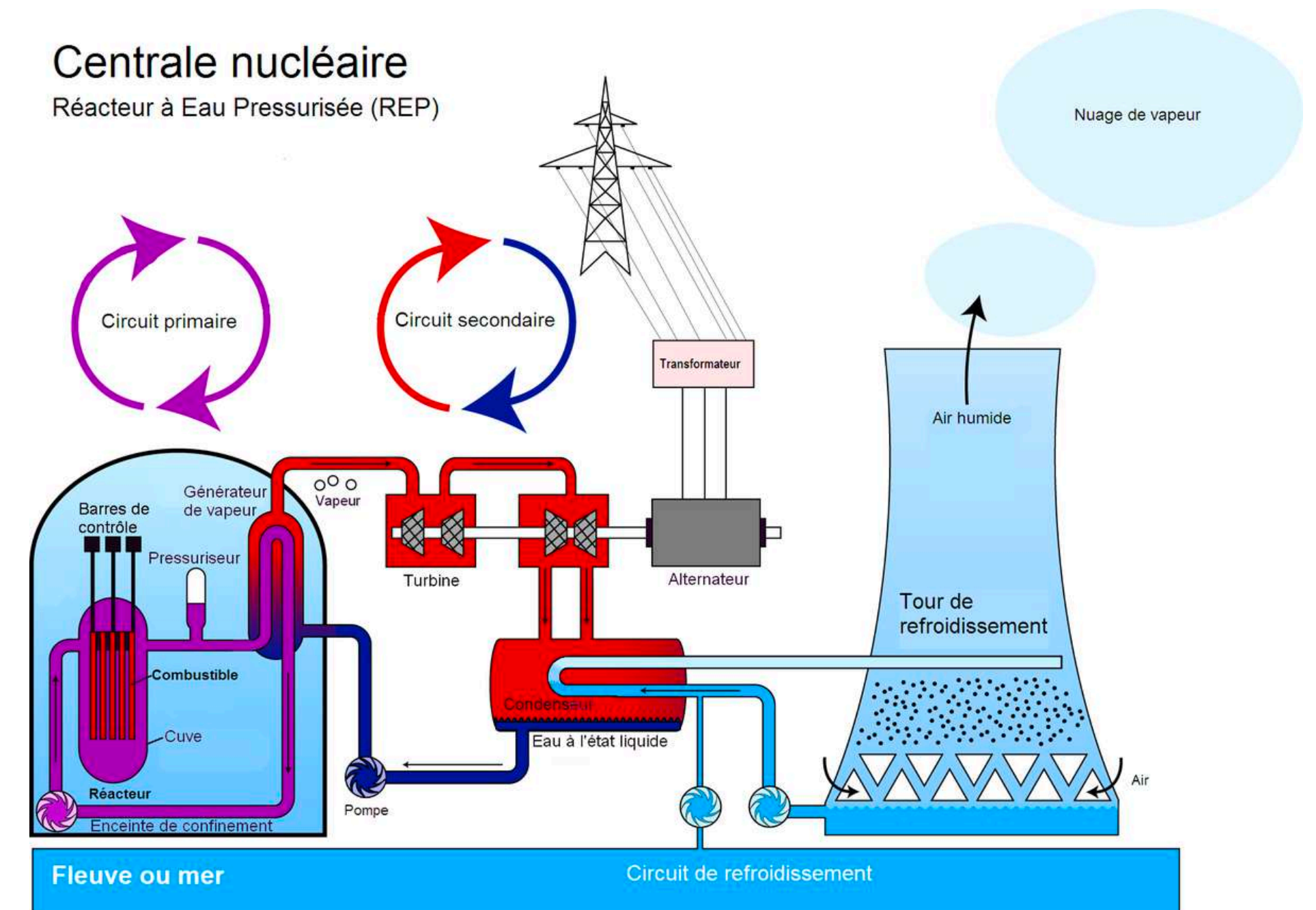


Lise Meitner
1878-1968



Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



Avantages et limites

Avantages:

- **Très efficace**, l'énergie nucléaire est très concentré, il faut peu d'espace et de ressources.
- Production **pilotable**: on produit de l'électricité quand on veut.
- **Ecologique**: aucune émission de gaz à effet de serre, pas de pollution de l'air ou de l'eau, énergie qui a le moins d'impact sur la biodiversité.
- **Sûr**: malgré quelques incidents très médiatisés, ils sont très rares et moins grave qu'on ne le croit
A Tchernobyl, il y a eu environ 4000 personnes exposées à des radiations dangereuses. A Fukushima, il n'y en a eu aucune. C'est à comparer par exemple au 170 000 morts de l'effondrement du barrage de Banqiao en 1975, la pire catastrophe liée à la production d'énergie.
- **Longue durée de vie**: les réacteurs que l'on a actuellement n'ont pas de durée de vie définie car les pièces sont remplacés au fur et à mesure. le seul vieillissement est celui de la cuve, et aucune cuve n'est jamais arrivé en fin de vie. Tout ce que l'on peut dire c'est que a durée de vie d'un réacteur est d'au moins 50 ans.

Limites:

- L'uranium est une **ressource limitées**. Au rythme actuel, il y a des réserves connues pour environ 100 ans. L'énergie nucléaire ne peut donc pas être une solution à l'échelle mondiale.
Notons qu'il existe d'autres technologies de réacteurs nucléaires en développement, réutilisant soit les déchets nucléaires (4ème génération) ou bien d'autres ressources que l'uranium.
- Le nucléaire produit des **déchets radioactifs** qu'il convient de gérer. Néanmoins, il sont en faible quantité. Notons que ces déchets ne sont problématiques que pour une temps limite (quelques décennies pour les matériaux très radioactifs, quelques siècles pour les matériaux moyennement radioactifs). C'est globalement un problème bien moins grave que la gestion des déchets plastiques.
La totalité des déchets radioactifs de la France tiennent dans une piscine longue comme un terrain de football. Le plan actuel est de tous les enfuir dans des couches profondes: la géologie nous dit qu'il n'y bougeront pas avant de n'être plus radioactif.
- **Construire** un réacteur nucléaire **est long** et couteux. Il faut normalement environ 10 ans de construction et le réacteur ne devient rentable qu'après environ 20-30 ans. Néanmoins, compté sur sa durée de vie, le nucléaire reste l'énergie la moins cher.
- Les centrales fluviales utilisent de **l'eau** pour le refroidissement, alors qu'il en manque en période de sécheresse. Les centrales en bord de mer n'ont pas ce problème en revanche.



Sixième partie:

Transports

Emission des transports

Les transports c'est 25% des émissions mondiales et 40% en France. Le gros des émissions sont liés au transport routier. C'est la voiture individuel qui est en cause.

Premier angle d'attaque: réduire la place de la voiture. La voiture est aujourd'hui omniprésente en France, y compris pour les trajets courts.

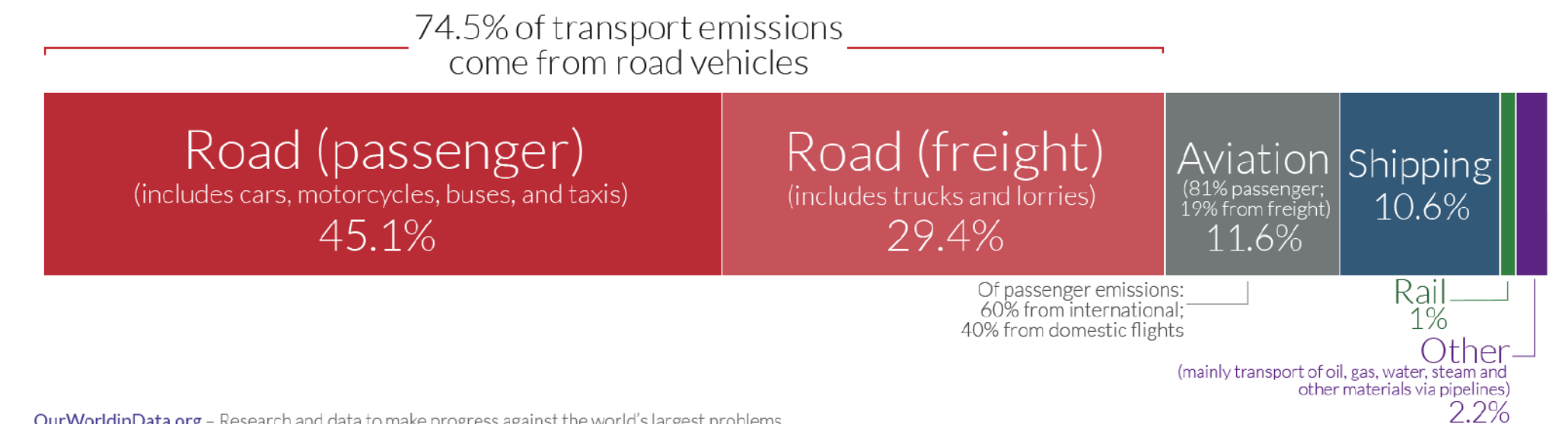
- A court-terme: de nombreux déplacements en voiture peuvent rapidement être remplacés par le vélo, le train ou les transports en commun.
- A long-terme: c'est l'urbanisme qu'il faut revoir. Le modèle de pavillon rend la voiture nécessaire engendrant un cercle vicieux qui empêche de sortir du tout-voiture. Pour moins dépendre de la voiture, il faut repenser l'urbanisme pour augmenter la densité.

Deuxième angle d'attaque: remplacer les voitures thermiques par des voitures électriques. Les voitures à hydrogène écologiques ne sont pas crédible à moyen-terme. La meilleure option aujourd'hui c'est la voiture électrique à batterie Lithium-ion.

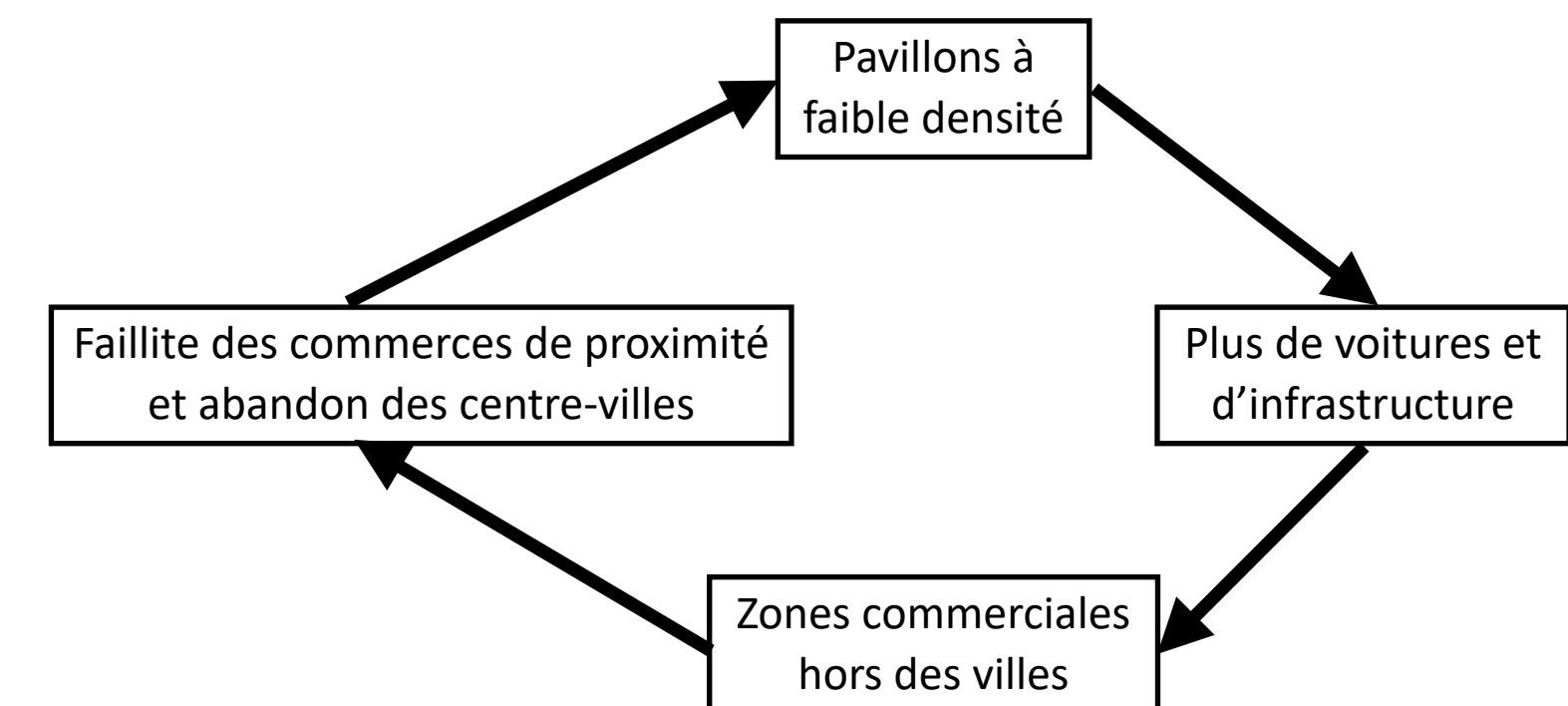
Global CO₂ emissions from transport

This is based on global transport emissions in 2018, which totalled 8 billion tonnes CO₂. Transport accounts for 24% of CO₂ emissions from energy.

Our World
in Data



OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.
Data Source: Our World in Data based on International Energy Agency (IEA) and the International Council on Clean Transportation (ICCT). Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.



Comparaison voiture thermique vs. électrique

- Dans une voiture thermique, le coût écologique est à l'usage: on brûle du pétrole.
- Dans une voiture électrique, il y a un coût de construction de la batterie, puis un coût plus faible d'usage dépendant du mix électrique local.

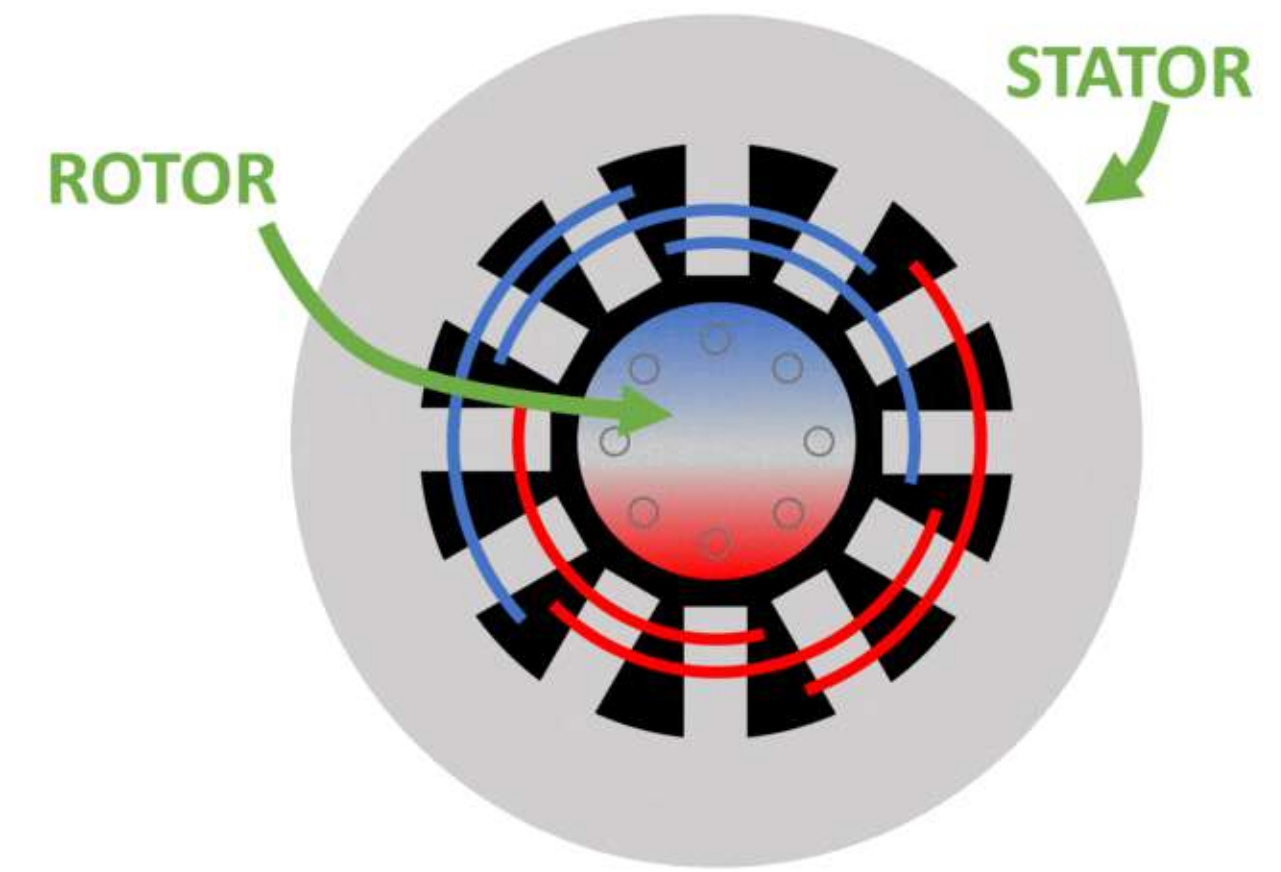
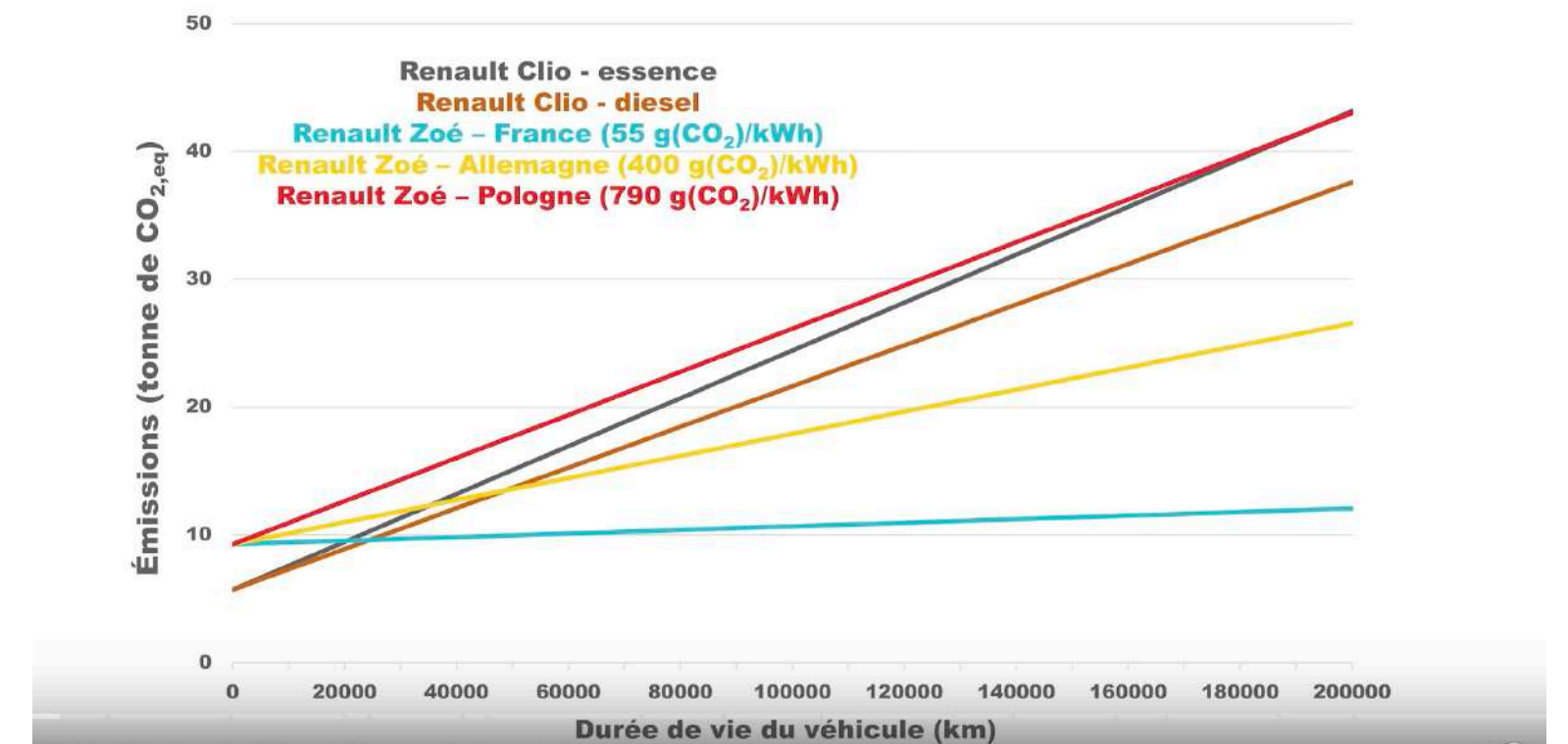
En France, une voiture électrique a un bilan carbone en cycle de vie 75% plus faible que celui d'une voiture thermique.

- Un moteur thermique est une machine thermodynamique qui a un faible rendement: 30%. C'est pour cela qu'on l'appelle thermique: il produit essentiellement de la chaleur.
- Un moteur électrique fonctionne grâce à l'induction magnétique. C'est en quelque sorte l'inverse d'une dynamo. Son rendement est grand: 90%.

Une voiture électrique consomme donc 3 fois moins d'énergie qu'une voiture thermique.

Convertir tout le parc automobile français en voitures électriques nécessitent de produire 10 GW d'électricité en plus, soit environ 10 réacteurs nucléaires. C'est une hausse de 20% de la production électrique.

Total des émissions de CO₂ en fonction de la durée de vie du véhicule





Septième partie:

Chauffage

Emissions du chauffage

Le chauffage (résidentiel et tertiaire), c'est 10% des émissions dans le monde, 25% en France.

Dans le résidentiel, 70% de l'énergie consommée est pour le chauffage. Dans le tertiaire, c'est 40%. On va se concentrer sur cette question.

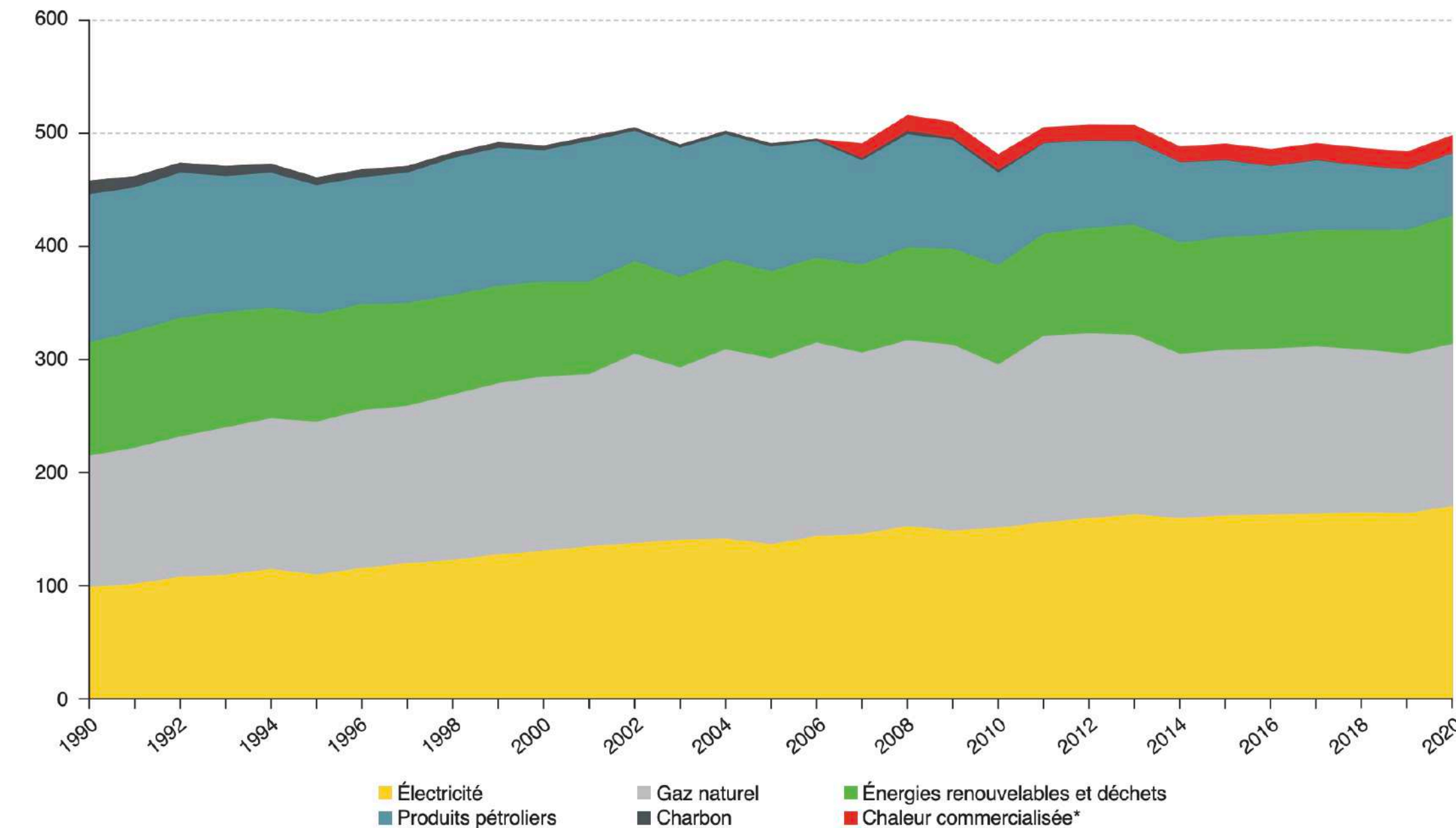
Il y a aujourd'hui 2 principaux modes de chauffage (voir à droite):

- Les chaudières à gaz: on brûle du gaz fossile (en gris): 35% des chauffages.
- Les radiateurs électriques: on convertit de l'électricité en chaleur (en jaune): 30% des chauffages.

Le chauffage à gaz représente le gros des émissions du secteur: c'est lui qu'il faut supprimer. Néanmoins, les chauffages électriques consomment déjà plus d'électricité que l'on en a en hiver. On est donc coincé avec ces deux types de chauffage. Il reste nous reste deux options

- Baisser la consommation d'énergie en isolant mieux les bâtiments et/ou baissant la température à laquelle chauffer.
- Développer d'autres types de chauffage.

Figure 5.3.1 : consommation finale énergétique dans le secteur résidentiel
En TWh (données corrigées des variations climatiques)



* Données disponibles à partir de 2007 uniquement.
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.
Source : calculs SDES

Technologies alternatives de chauffage

Les **réseaux de chaleur**: il s'agit, plutôt que de produire de la chaleur dans chaque logement, de collectiviser la production de chaleur puis de distribuer cette chaleur par un réseau, comme les réseaux d'eau ou de gaz. Il ne s'agit pas d'une source de chaleur en elle-même, elle ne fait que décaler la production. Mais cela à l'avantage de permettre une production plus performante parce que collectivisée. Cela permet aussi de valoriser l'incinération des déchets et les pertes de chaleur d'autres usages (industrie, métro, ...). Aujourd'hui, c'est 3% de l'énergie du secteur.

La **géothermie**: c'est utiliser la chaleur venant du sol. Celle-ci produit de la radioactivité du centre de la Terre qui libère de la chaleur. C'est donc la seule source d'énergie renouvelable qui ne vient pas du Soleil. Pour utiliser efficacement la géothermie, il faut aller le plus profond possible: c'est donc avant tout intéressant à l'échelle d'une centrale, soit pour produire de l'électricité, soit pour alimenter un réseau de chaleur.

Les **pompes à chaleur**: on utilise de l'électricité pour transférer de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur. On en avait déjà dans le cours de thermodynamique: son efficacité peut dépasser 1, ce qui signifie que pour 1 J d'électricité on peut transférer plus que 1 J de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur. En pratique, l'efficacité est de l'ordre de 4. C'est donc 4 fois mieux qu'un radiateur électrique, dont l'efficacité est exactement de 1 (on convertit 1 J d'électricité en 1 J de chaleur). Ainsi, si on changeait toutes les chaudières de France pour des pompes à chaleur, on pourrait supprimer le gaz tout en baissant la consommation totale d'électricité! Une pompe à chaleur est d'autant plus efficace que la différence de température est faible. On peut donc utiliser l'air extérieur, mais c'est encore mieux d'utiliser le sol qui est chauffé par géothermie quand c'est possible.





Questions!

Quelques références pour aller plus loin:

Tous les rapports du GIEC (IPCC)

<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

Futurs énergétiques 2050 (RTE)

<https://rte-futursenergetiques2050.com/>

Bilan énergétique de la France pour 2020 (Ministère de l'Écologie)

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2020/>

Vulgarisation scientifique: Le Réveilleur

<https://lereveilleur.com/>

Association écologiste scientifiquement pertinente:
The Shift Project

<https://theshiftproject.org/>

Influenceur écologiste scientifiquement pertinent:

Jean-Marc Jancovici

<https://jancovici.com/>

Livre: *L'énergie durable — Pas que du vent !* (MacKay)

http://www.inference.org.uk/sustainable/book/translate/french/sewtha_20111001_lowres.pdf

Prochain cours:
Physique statistique
(avec Lior)