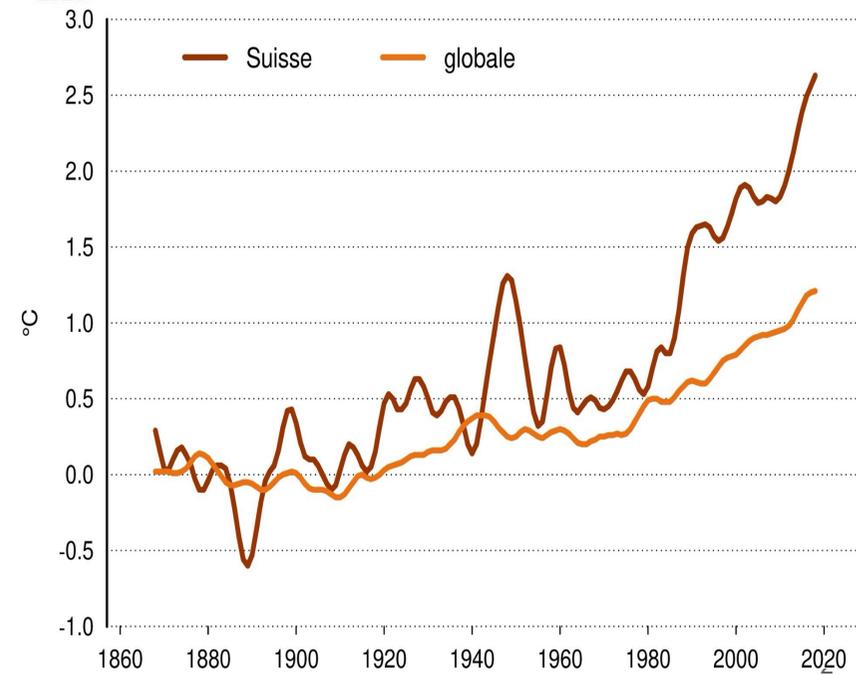
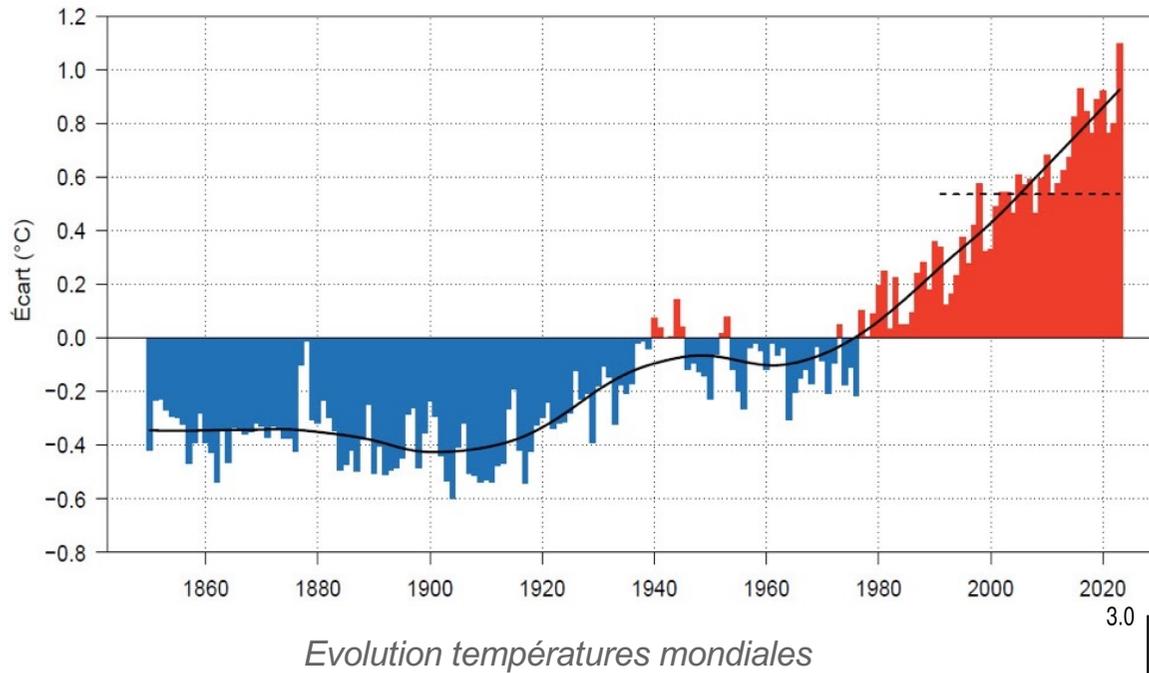




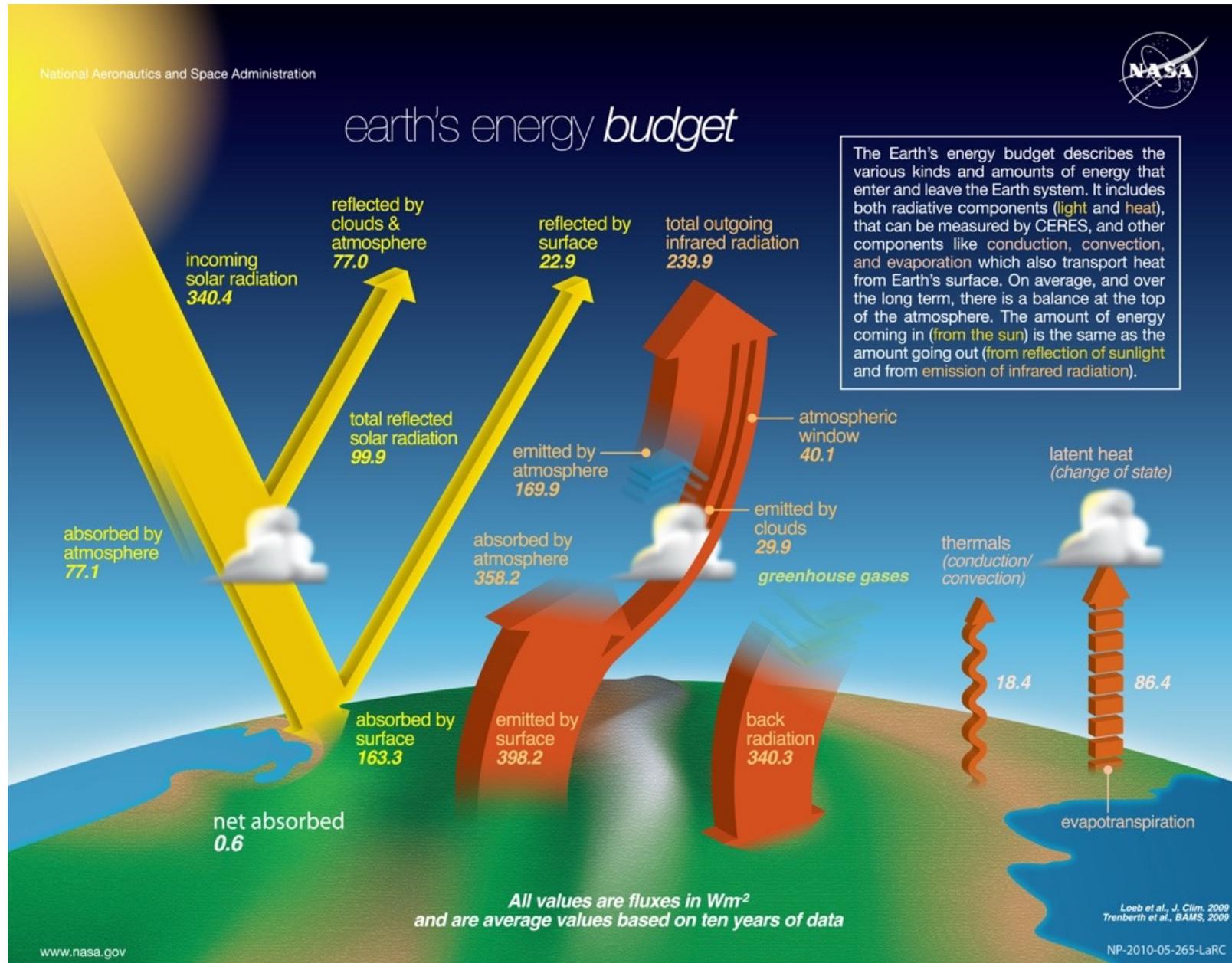
Limitation des ressources et transition énergétique

Bertrand Daout
3 octobre 2025
bertrand.daout@bluewin.ch

■ Le contexte environnemental



■ Pour rappel: effet de serre



■ Pour rappel: effet de serre

Principaux gaz à effet de serre anthropiques:

<i>Nom</i>	<i>Formule</i>	<i>Contribution à l'effet de serre additionnel (hors [H₂O])</i>	<i>Équivalent CO₂</i>	<i>Durée de vie</i>
Dioxyde de carbone	CO ₂	76.7 %	1 ×	100 ans
Méthane	CH ₄	14.3 %	20 ×	12 ans
Protoxyde d'azote	N ₂ O	7.9 %	200 ×	5 000 ans
Hexafluorure de soufre	SF ₆	1.1 %	22 600 ×	50 000 ans

Notes:

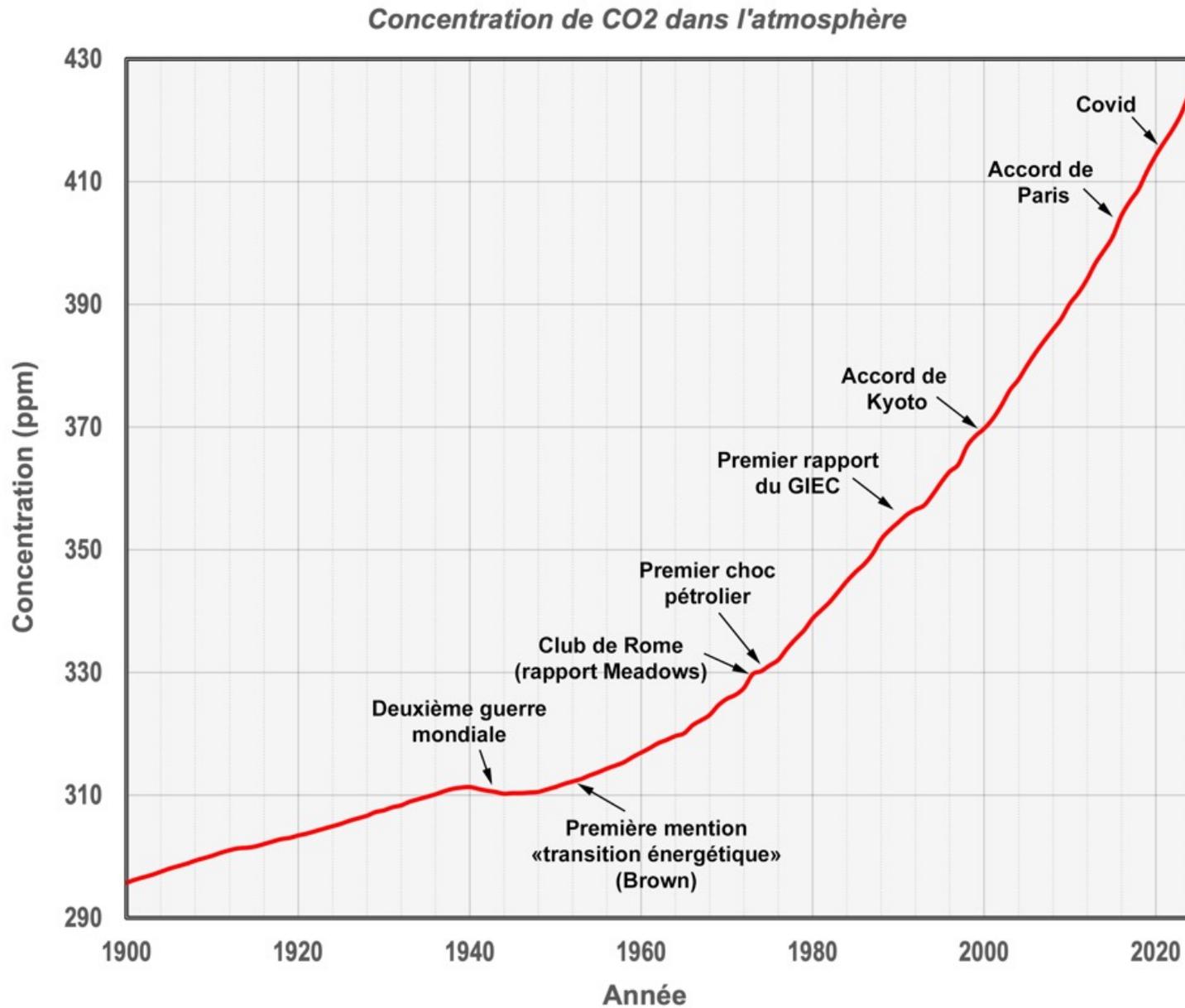
- *Durée de vie: on devrait parler plutôt de demi-vie (50 % restants)*
- *Pour le CO₂, il reste encore un excédent de 25 % après 1000 ans*

Transition énergétique

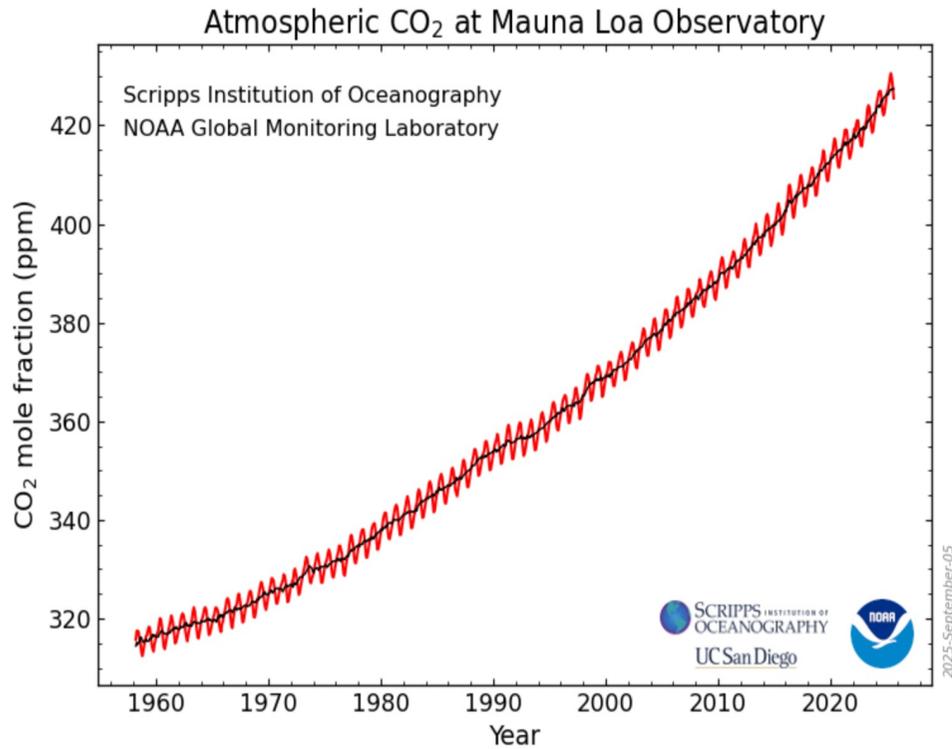
Vraiment ?

Quand a-t-elle commencé ? ?

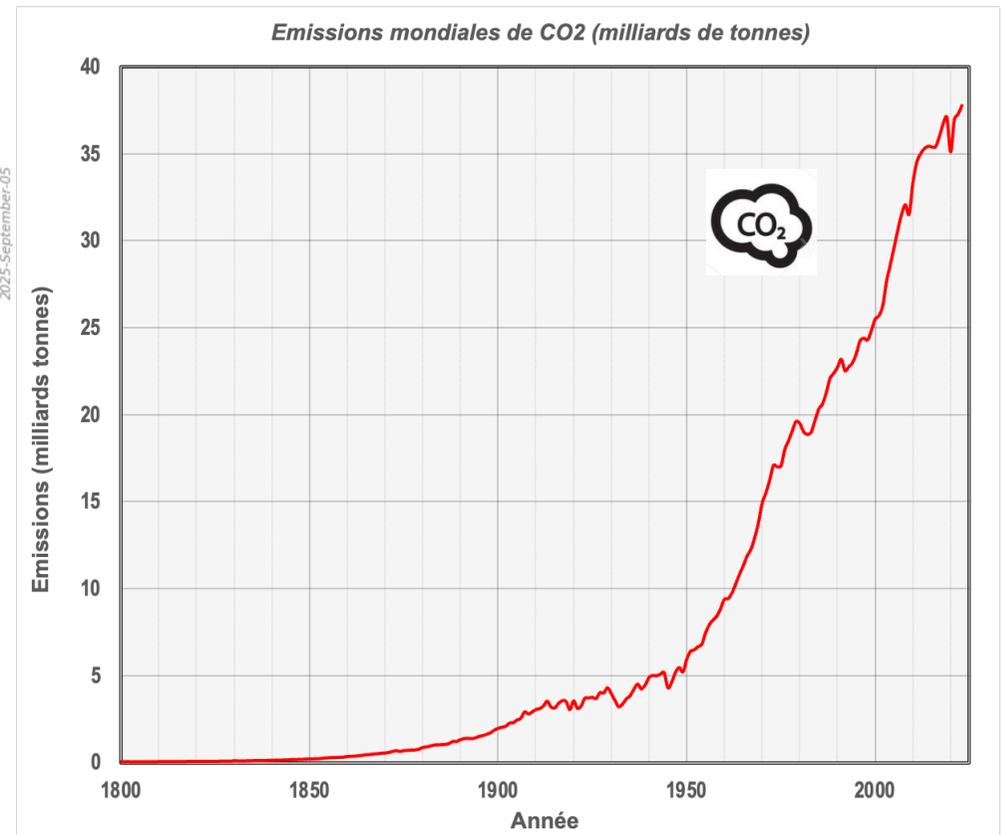
■ Transition énergétique ?



■ Concentration dans l'atmosphère



→ Dans 1'000 ans, l'excès de concentration de CO₂ sera encore de 25 % (si on arrête toute émission) !

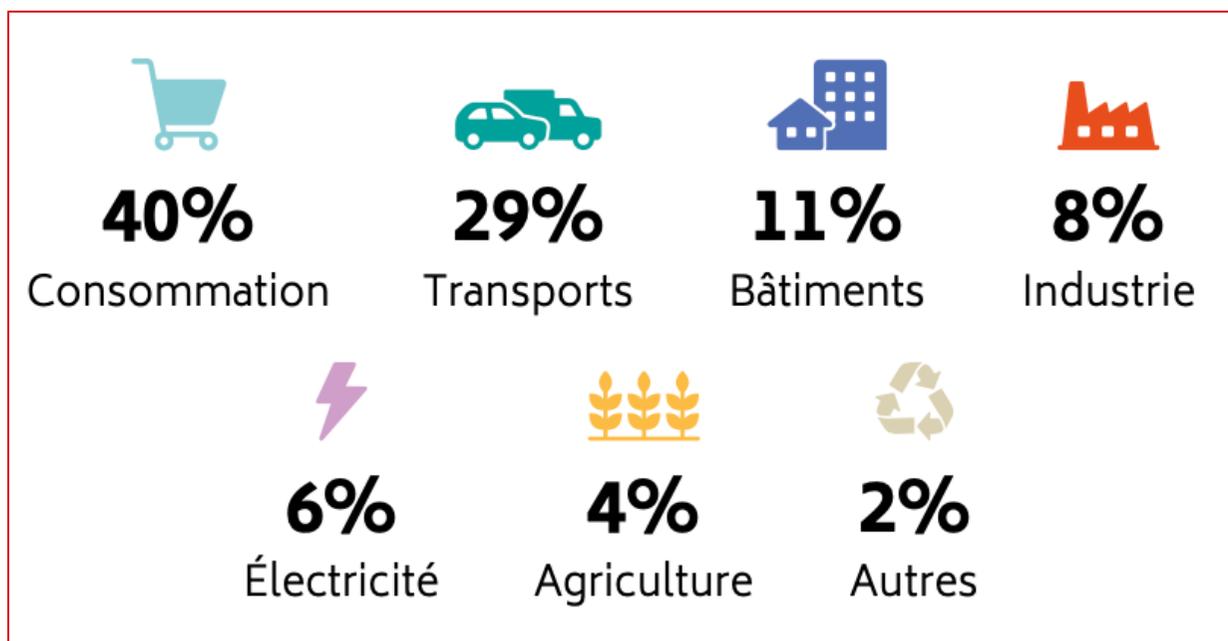
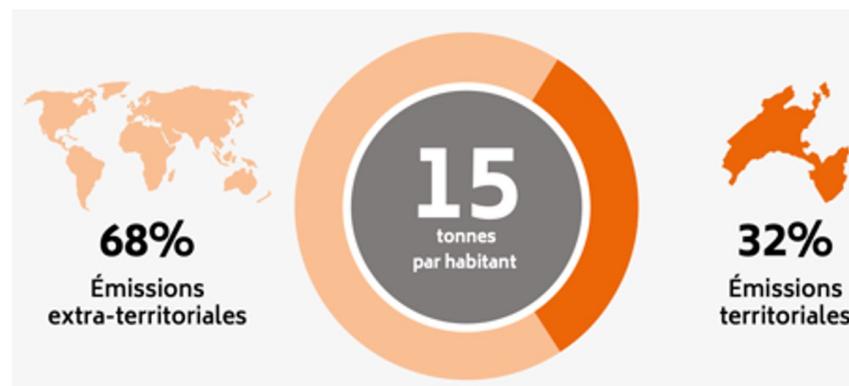


<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

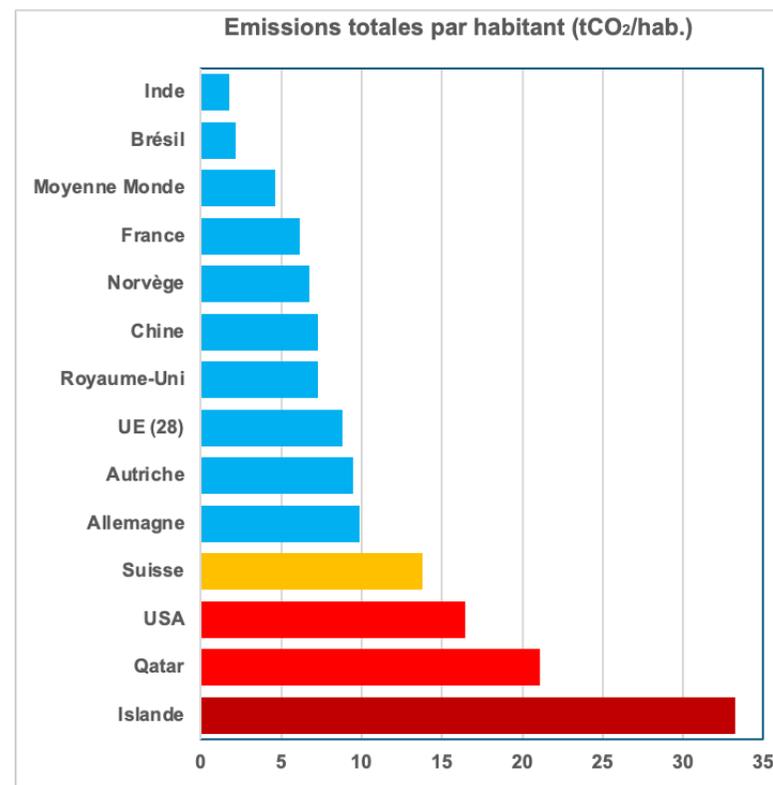
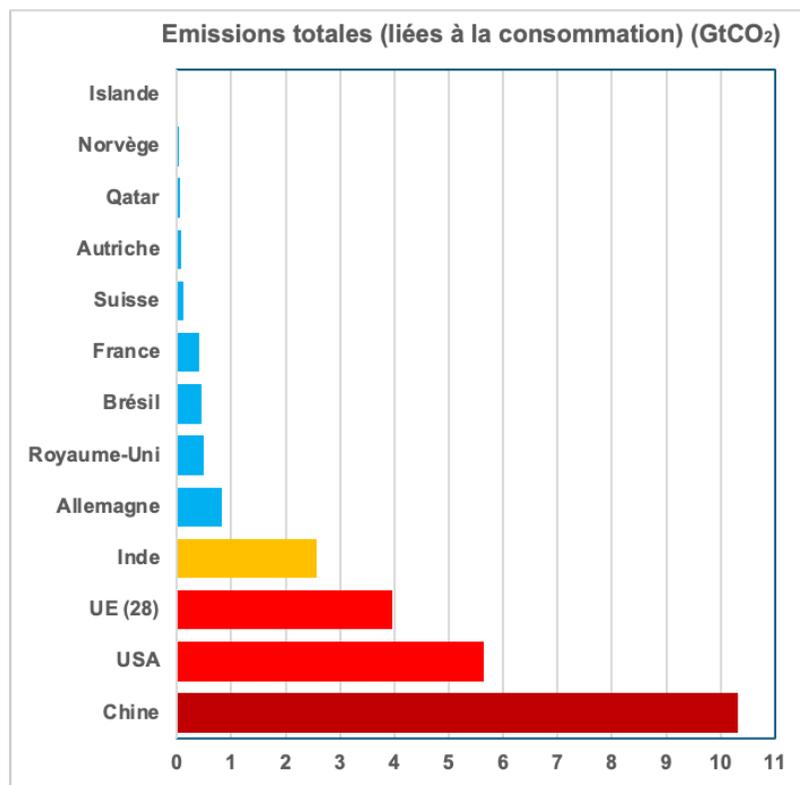
[https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?country=-OWID_WRL / Global Carbon Budget \(2024\)](https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?country=-OWID_WRL/Global%20Carbon%20Budget%20(2024))

■ Les sources de CO₂

Pour le canton de Vaud (2019):



■ Chine ou Suisse ?



Note: Les éléments suivants ne sont pas pris en compte:

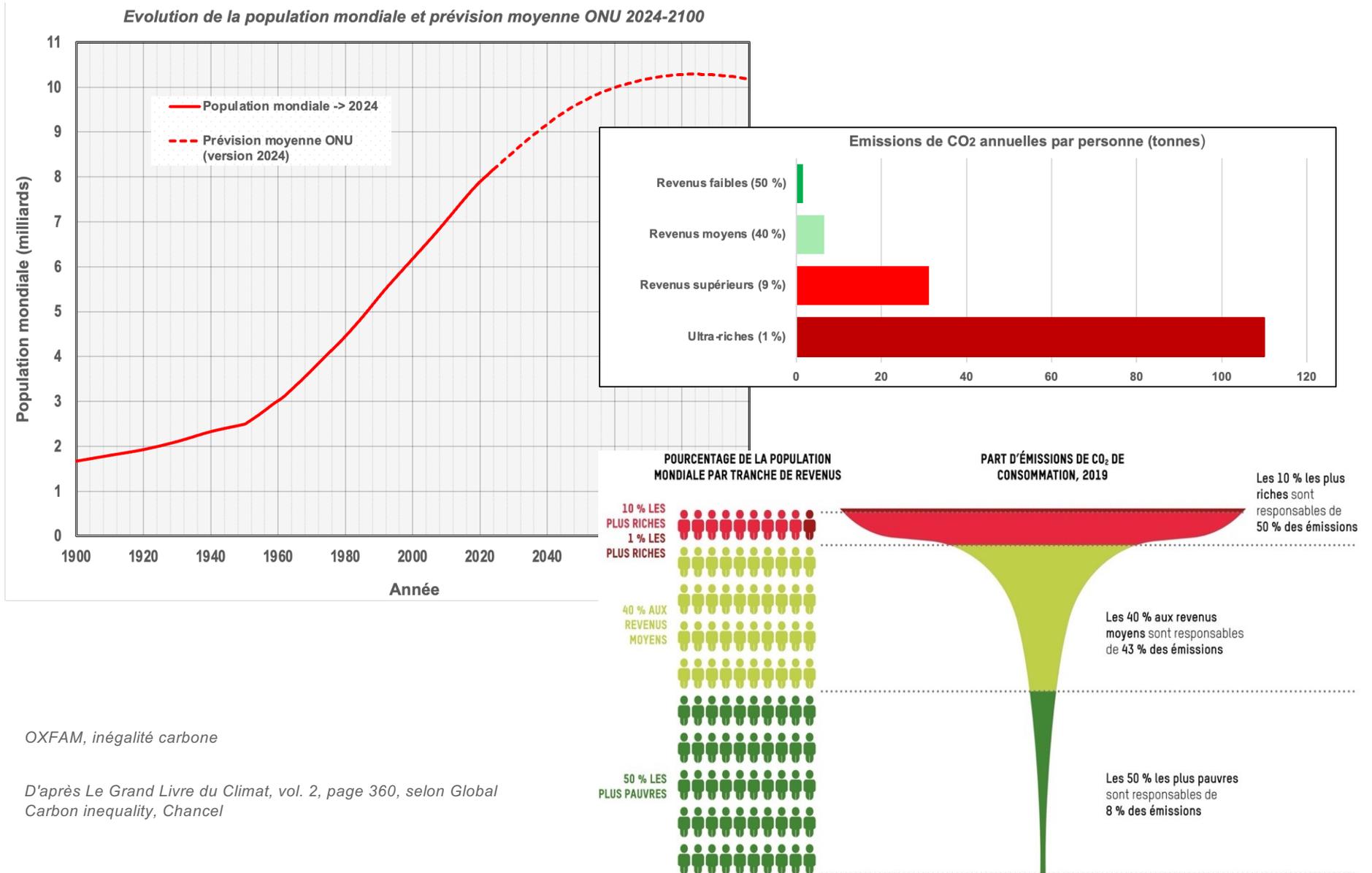
- Aviation internationale : 425 millions de tonnes
- Transport maritime international : 595 millions de tonnes
- Transport international : 1'020 millions de tonnes.

→ Conclusions:

- La Chine émet beaucoup de CO₂, mais ils sont nombreux.
- Un habitant de la Chine émet env. 2 fois moins de CO₂ qu'un Suisse et 4.5 fois moins qu'un Islandais!

■ Surpopulation mondiale ?

De qui vient le problème: les riches ou les pauvres?

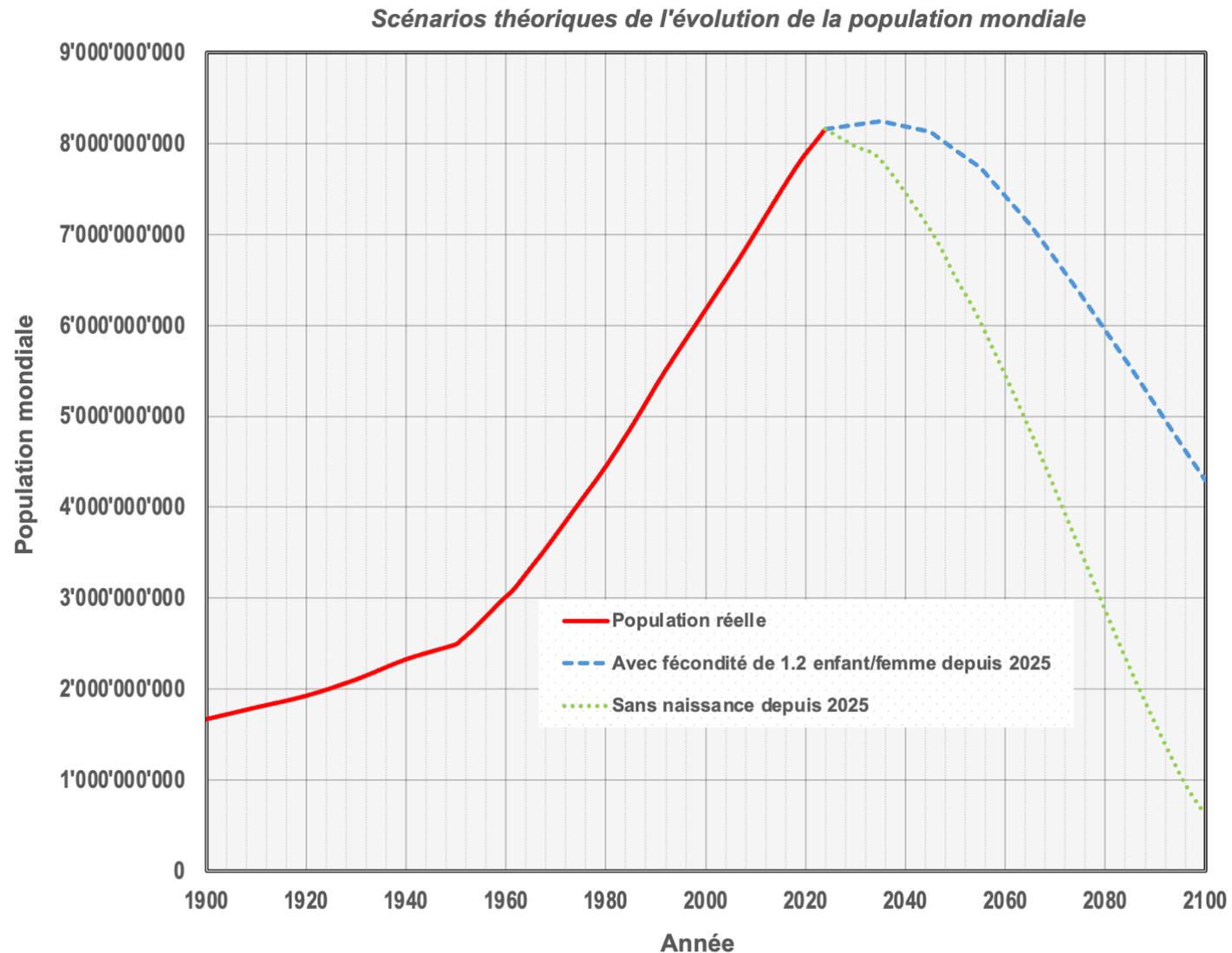


OXFAM, *inégalité carbone*

D'après Le Grand Livre du Climat, vol. 2, page 360, selon Global Carbon inequality, Chancel

■ Surpopulation mondiale ?

Calcul théorique de l'évolution de la population mondiale avec le modèle de Leslie (modèle matriciel discret qui représente l'évolution d'une population par classes d'âge)



■ Surpopulation mondiale ?

Quel nombre d'enfants par famille est nécessaire?



- On peut montrer qu'environ 4 à 6 enfants par famille sont nécessaires pour la survie d'une famille d'agriculteurs (pays en voie de développement).
- Peu à voir avec l'éducation des filles
- Développement → remplacement des enfants par des machines
→ augmentation des émissions de CO₂

La transition énergétique

Depuis combien de temps on en parle?

■ Transition énergétique ?

- Première mention de la notion "transition énergétique": Harrison Brown du Met Lab, 1951

Il disait en 1955 dans une conférence:

"sept milliards d'humains pourraient vivre «à l'américaine» durant des milliers d'années grâce à 17 000 surgénérateurs brûlant l'uranium contenu dans le granit ou celui dissous dans l'eau des océans. La Terre pourrait même subvenir aux besoins de 200 milliards d'humains, mais elle ressemblerait alors à "une vache morte couverte d'une masse grouillante d'asticots".

- William Nordhaus en 1973:

"Trop réduire l'utilisation des produits fossiles freinerait le progrès technologique. L'utilisation future des surgénérateurs viendrait vers les années 2000, suppléer aux produits fossiles qui seraient alors épuisés à cette période. Les surgénérateurs produiraient alors toute l'énergie à partir d'hydrogène et d'électricité sur une base infinie".

■ Transition énergétique ?

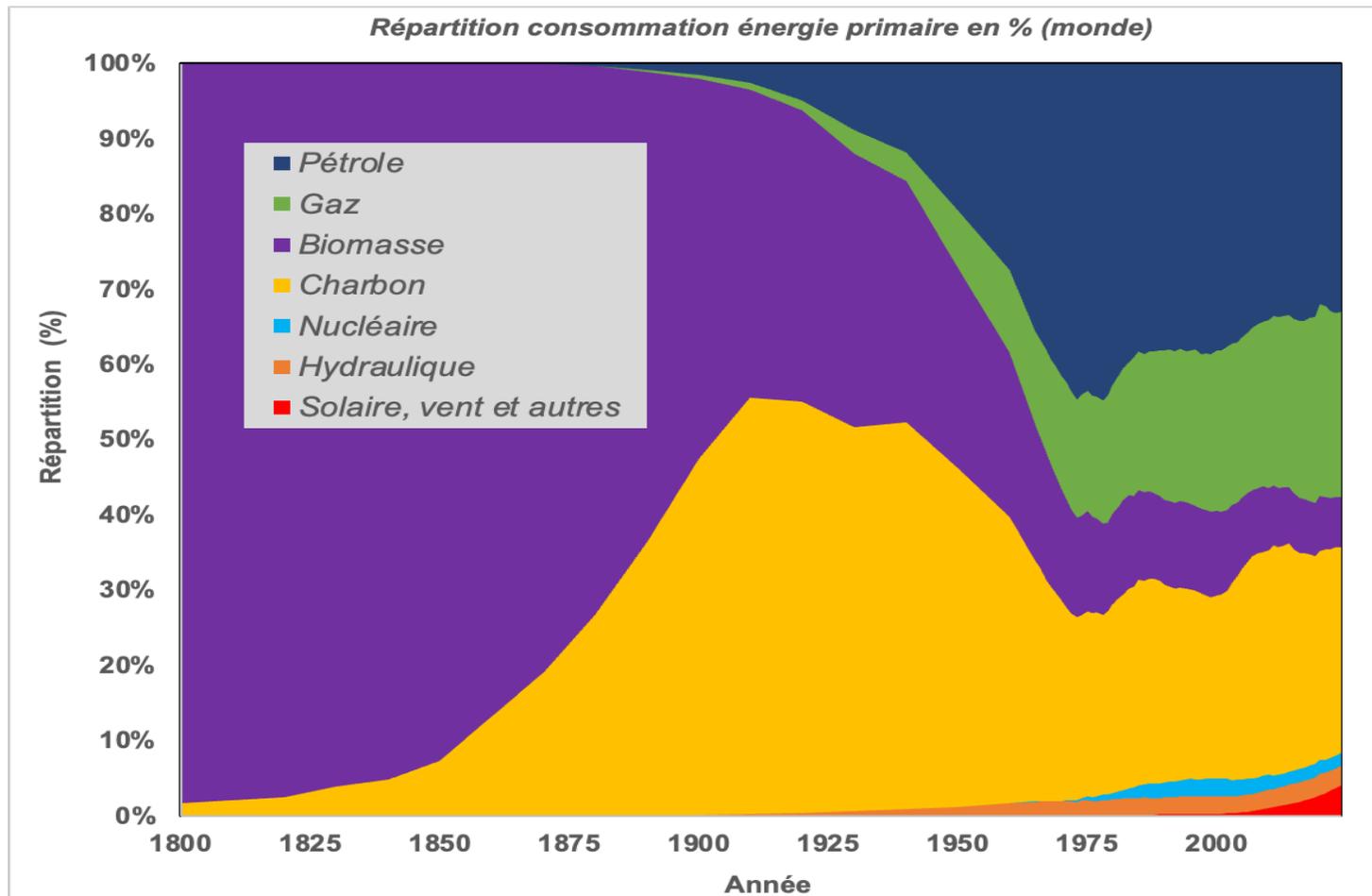
- George W. Bush à la COP 7 à Marrakech en 2001:

"The American way of life is not negotiable": le mode de vie américain n'est pas négociable.

- Mitt Romney (sénateur Utah) en 2023:

"... retirer des voies voitures pour mettre des pistes cyclables, c'est, à mon avis, le comble de la stupidité".

■ Transition énergétique ?

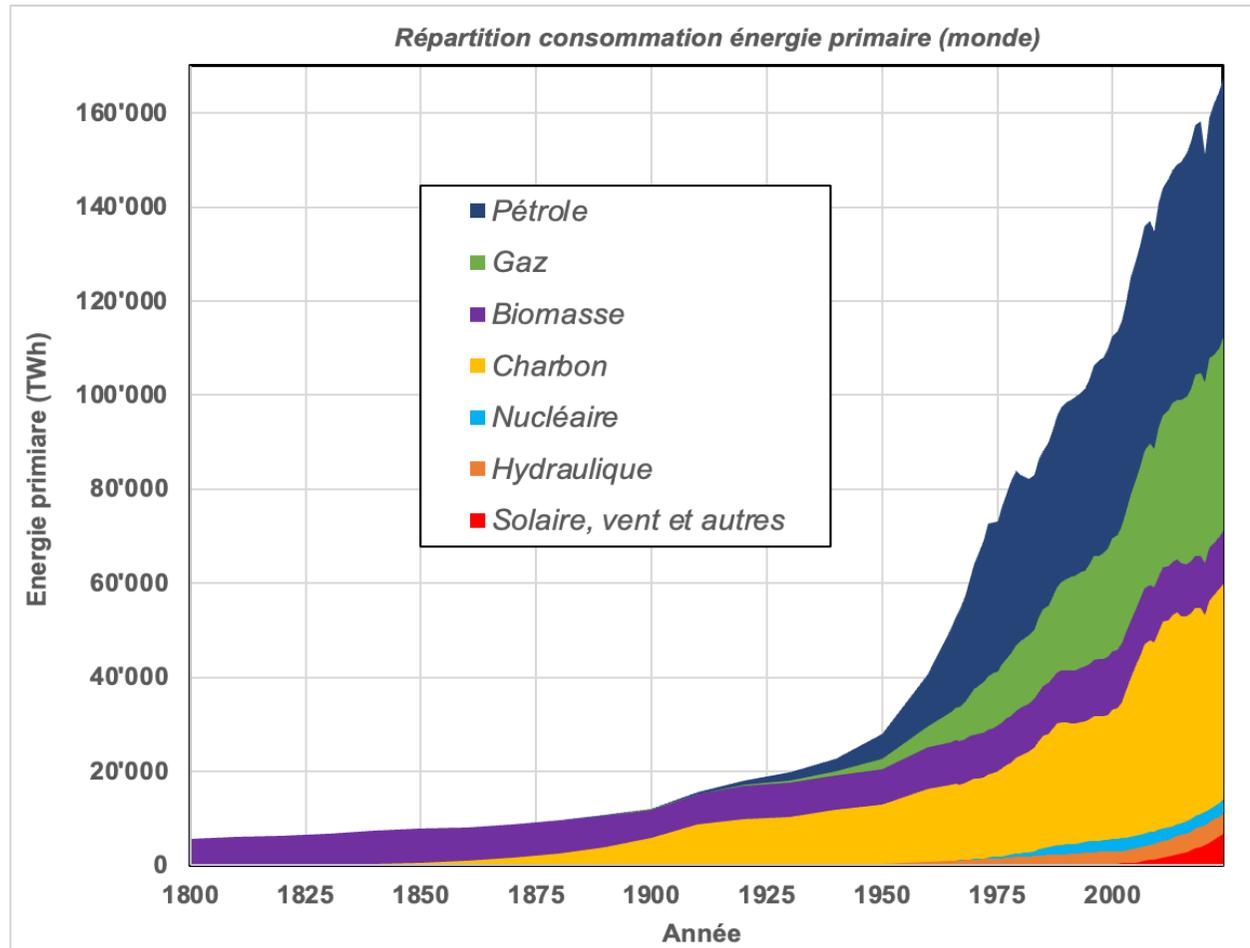


Ce qui semble en ressortir:

- le charbon a remplacé le bois et a permis de sauvegarder les forêts
- le pétrole a fait diminuer la consommation de charbon
- le nucléaire a commencé à remplacer les énergies fossiles
- le renouvelable nous sauvera tous...

■ Transition énergétique ?

En valeur absolue, c'est plus parlant:



On peut en tirer la conclusion correcte que:

- il n'y a pas encore eu de transition énergétique
- il n'y a pas remplacement mais addition des sources d'énergie (et symbiose)

■ Addition et symbiose

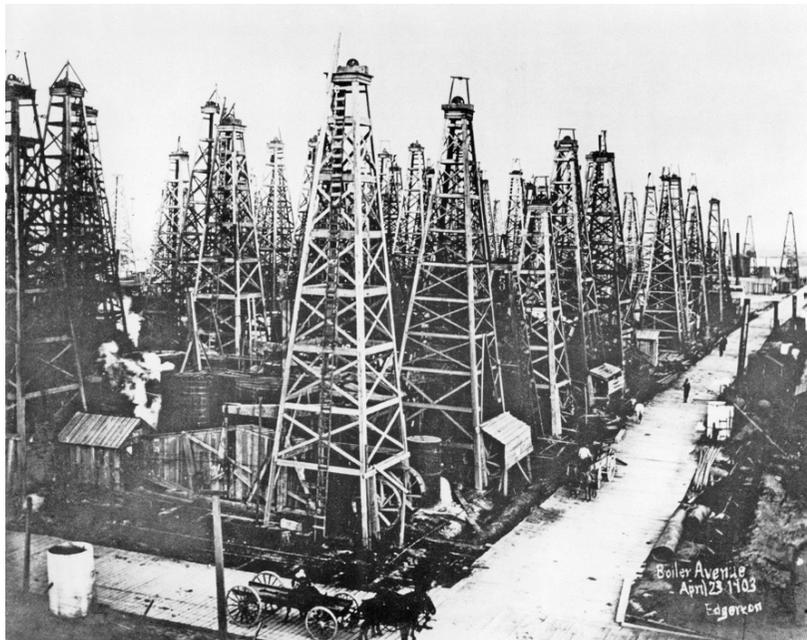
Prenons quelques exemples:

- Le charbon a été massivement extrait pour remplacer le bois et diminuer la déforestation fin 19^{ème}. Mais on a utilisé d'énormes quantités de bois pour l'étalement dans les mines souterraines (les mises de charbon étaient essentiellement souterraines à l'époque).
- On a appelé les trains "chemin de fer", alors que la construction des lignes utilisait énormément de bois.
- Idem pour les puits de pétrole.
- La construction des barrages a utilisé des quantités colossales de béton (et donc de fer, pour les barrages voute).
- Les centrales atomiques ont nécessité de grandes quantités d'acier, et donc de charbon
- De même pour les automobiles qui contiennent du charbon dans leur carrosserie.
- etc.

■ Addition et symbiose



*Stock de bois de la Standard Oil Company
(1903, Belhaven, USA)*

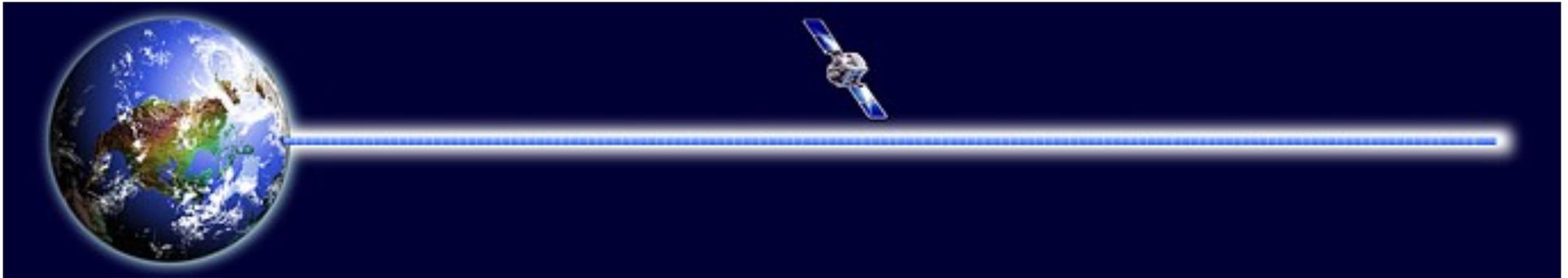


*Champ de derricks nommé la" boite d'allumettes"
(1903, Texas, USA)*

■ Le pétrole : quand va-t'on s'arrêter ?

Pour rappel:

- 1 baril = 156 litres
- Consommation mondiale de pétrole: environ 100 millions de barils/jour
- Donc 5'475 milliards de litres par année.
- Plus de 50 % de ce pétrole est brûlé dans les moteurs des véhicules.



Colonne de barils correspondant à la consommation journalière

L'énergie,

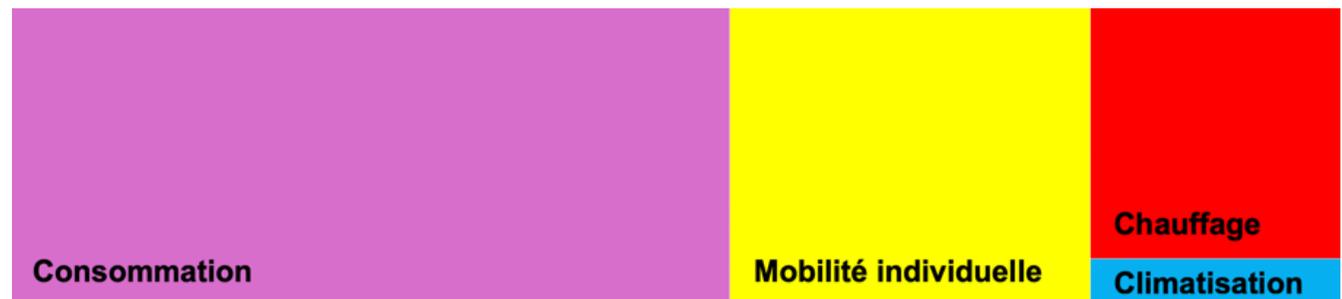
À quoi ça sert ?

■ L'énergie: à quoi ça sert ?

En gros l'énergie ça sert à:

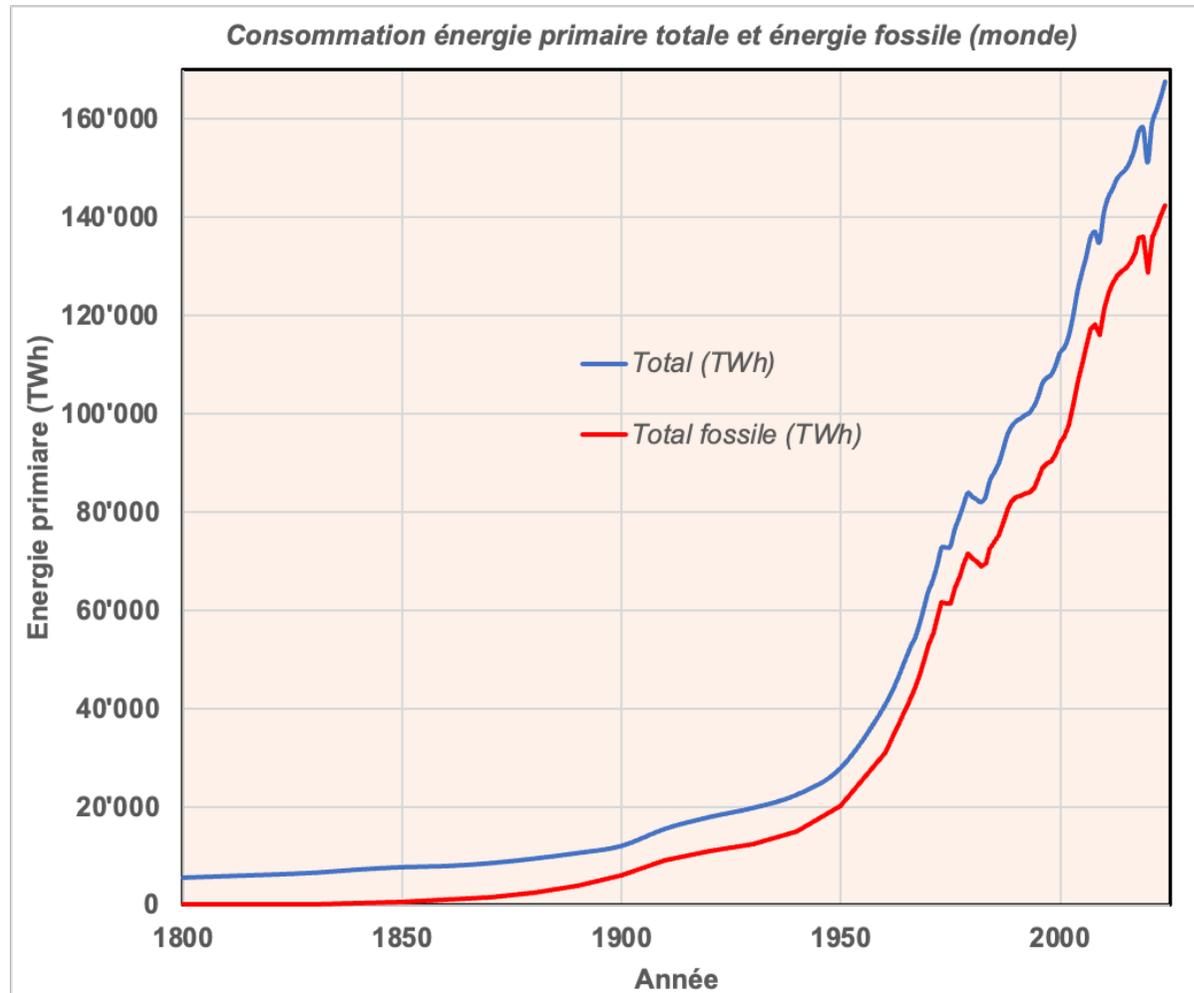
1. se chauffer (ou se refroidir, suivant la région où on se trouve).
2. se déplacer
3. fabriquer des choses.

Secteur	Proportion (%)
Mobilité individuelle	27
Chauffage	16
Climatisation	3
Consommation	54



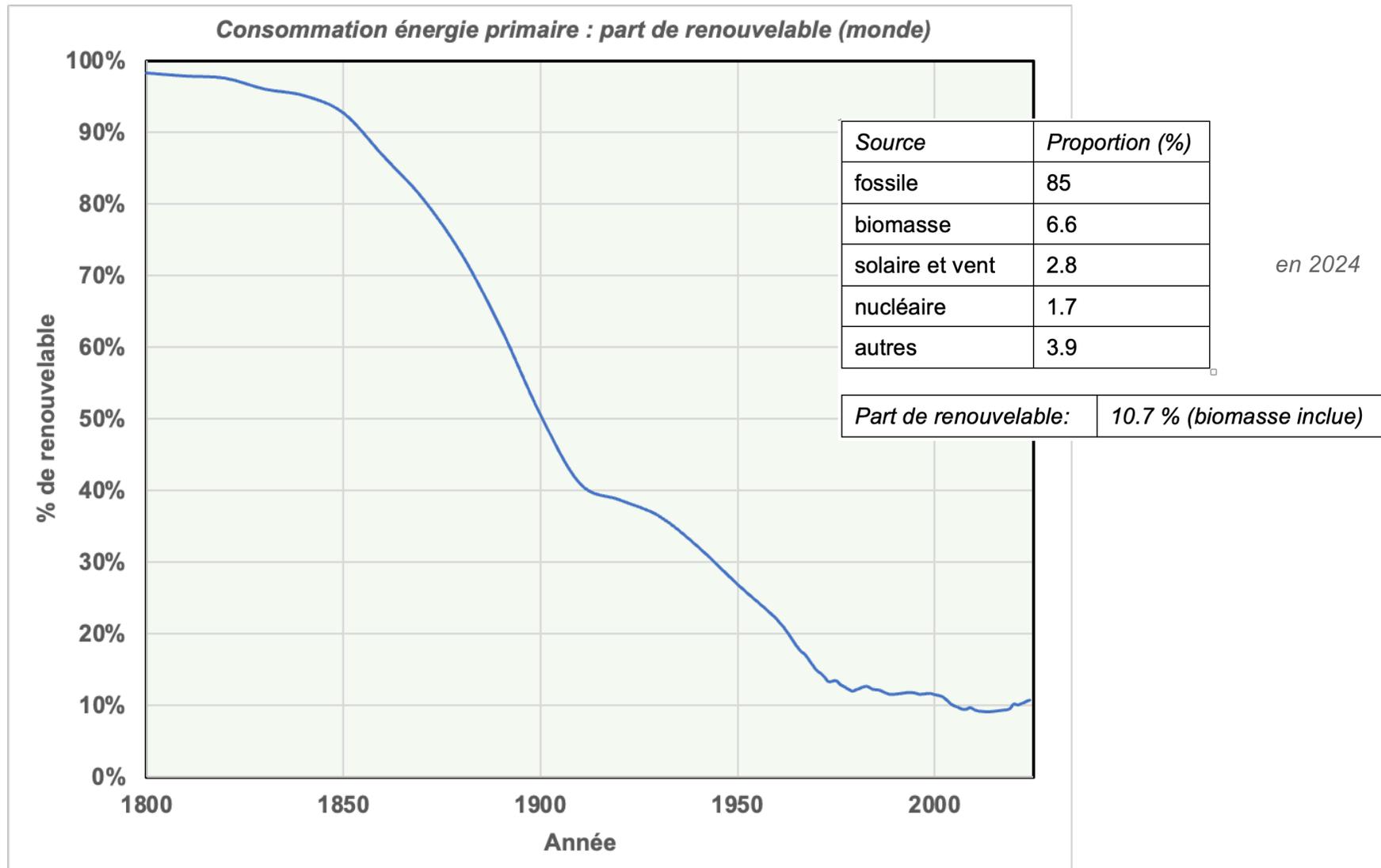
■ Parlons un peu d'énergie

Presque tout vient des sources fossiles, toujours et encore...



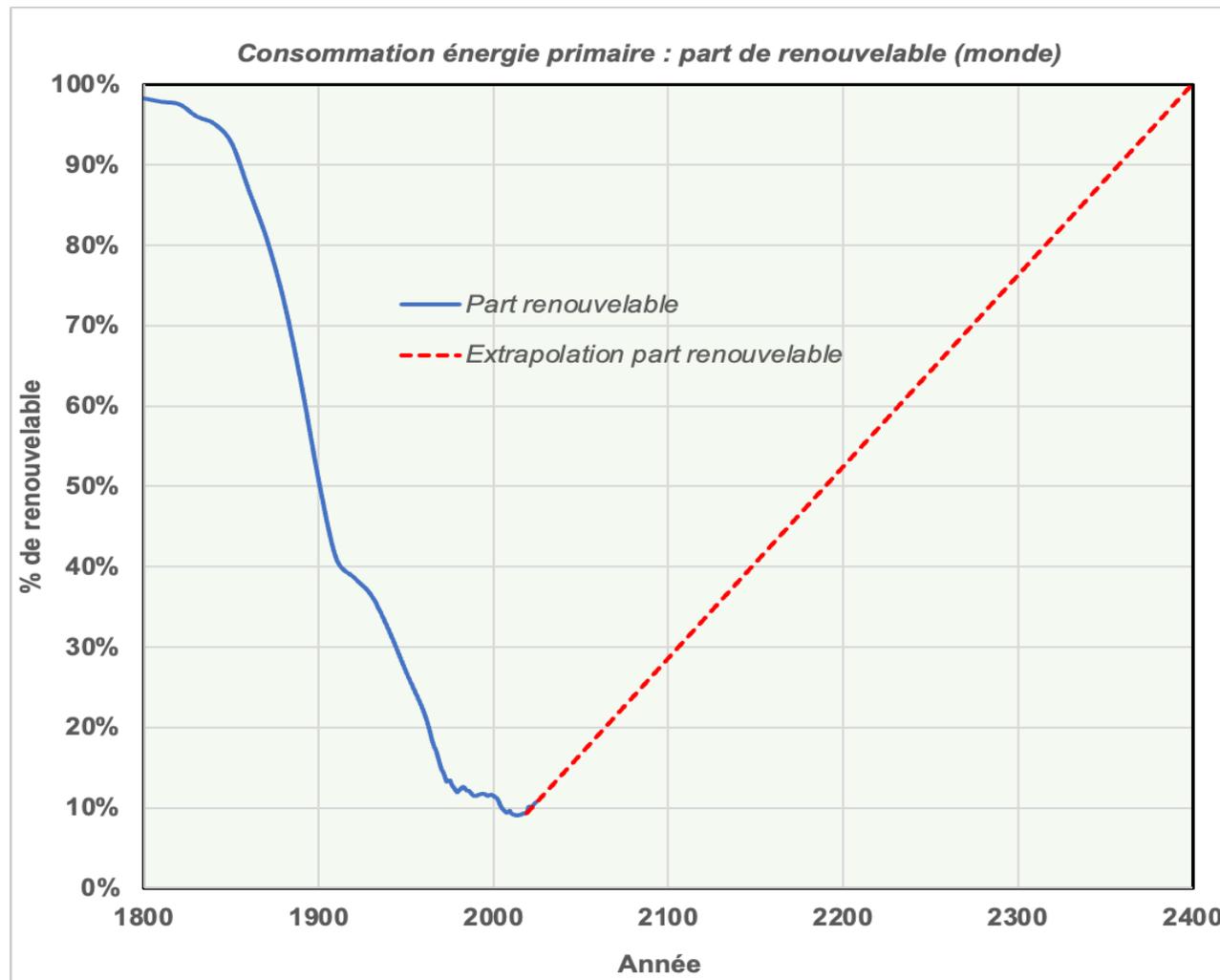
■ Parlons un peu d'énergie

Et le renouvelable ?



■ Parlons un peu d'énergie

Neutralité carbone ? Oui, mais quand ?

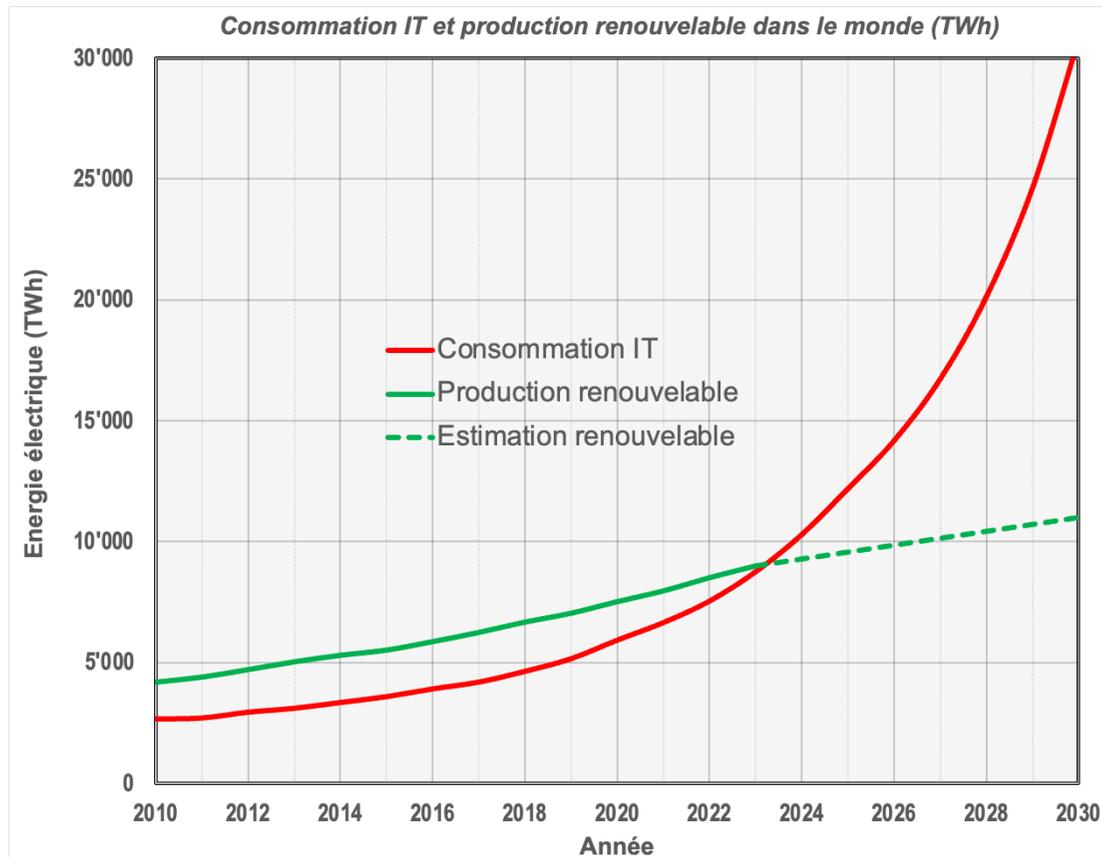


→ Calculé avec la pente de croissance actuelle de 0.2 % par an

■ Parlons un peu d'énergie

Electricité? Neutre en carbone? Quand?

→ Ne pas oublier le numérique, ChatGPT, bitcoins, vidéo, etc



Machine couramment utilisée pour le minage: Antminer S19 Pro

D'après les prévisions de l'étude Andrae (2015) et des valeurs plus récentes:
2023 = année où la consommation du numérique a dépassé les renouvelables !

■ Parlons un peu d'énergie

Les subventions, en valeur mondiale (2022)

❑ 7'000 milliards de \$: subventions pour le fossile

❑ 1'700 milliards de \$: subventions pour le renouvelable

selon FMI et IEA

<https://www.imf.org/fr/Blogs/Articles/2023/08/24/fossil-fuel-subsidies-surged-to-record-7-trillion>

■ Energie: quelques données utiles (pour 2022)

➤ Energie totale

Facteur de conversion de l'énergie (intensité carbone moyenne):

$$\rightarrow I_{cm} = 220 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$$

➤ Electricité

$$\rightarrow I_{cm} = 473 \text{ gCO}_2 \text{ par kWh}$$

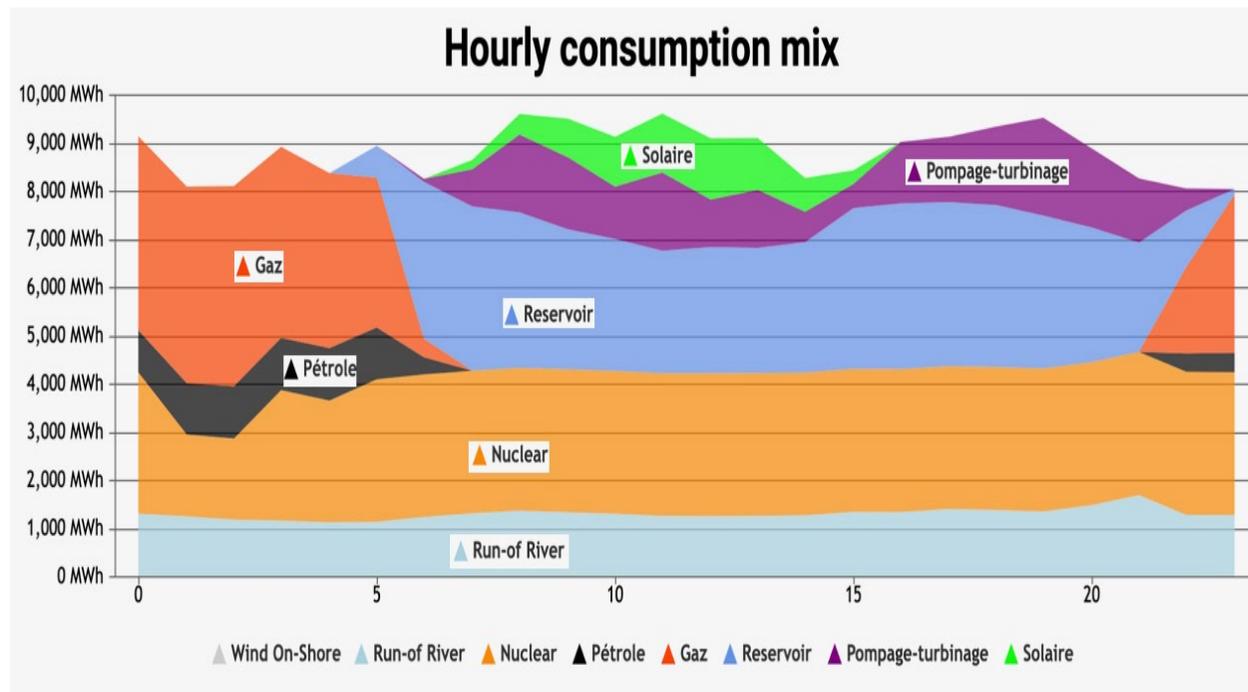
<i>Pays</i>	<i>Intensité carbone mix production (gCO₂/kWh) (2024)</i>	<i>Intensité carbone mix consommation finale (gCO₂/kWh)</i>
Monde	473	473 (2024)
UE (28)	290	447 (2017)
USA	384	370 (2024)
Chine	560	530 (2022)
France	44	53 (2023)
Allemagne	344	380 (2022)
Suisse	37	128 (2017)

Turkménistan: 1'306 gCO₂/kWh !

■ Electricité: mix de consommation

→ Attention: utilisez à la vraie valeur du mix (Suisse)

- Production, avec les certificats : 37 gCO₂ par kWh
- Vraie valeur physique : **128 gCO₂ par kWh**



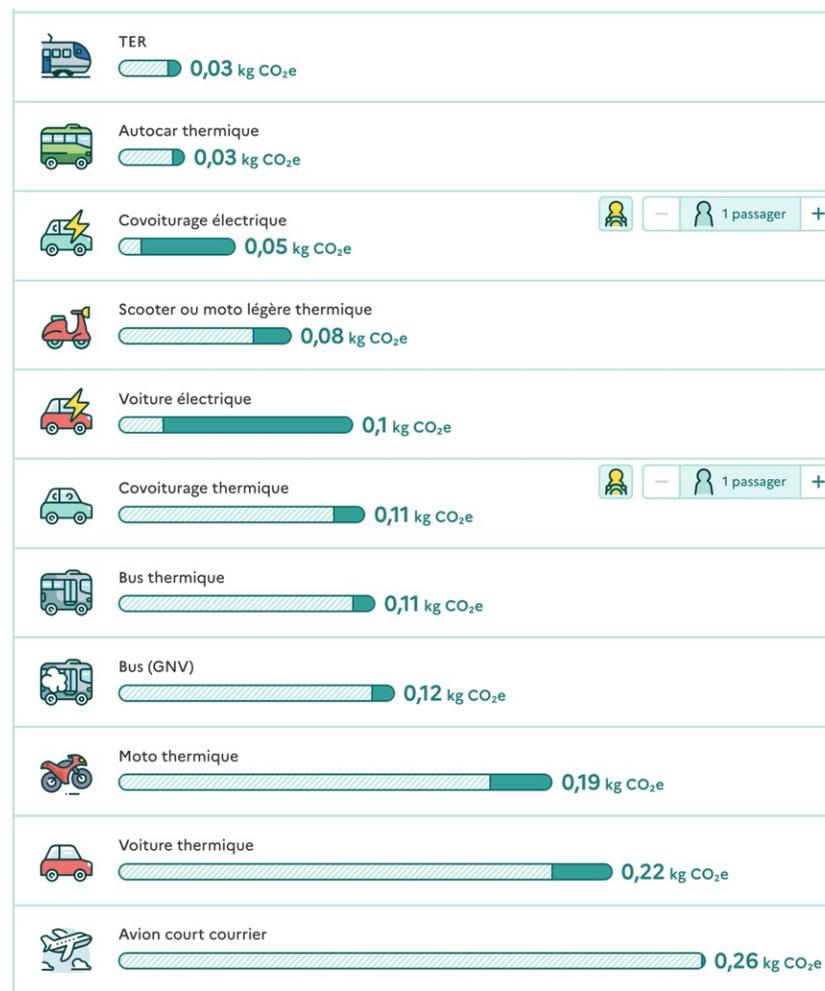
*mix de consommation
suisse
le 17 janvier 2025*

Utilisation de l'énergie:

La mobilité

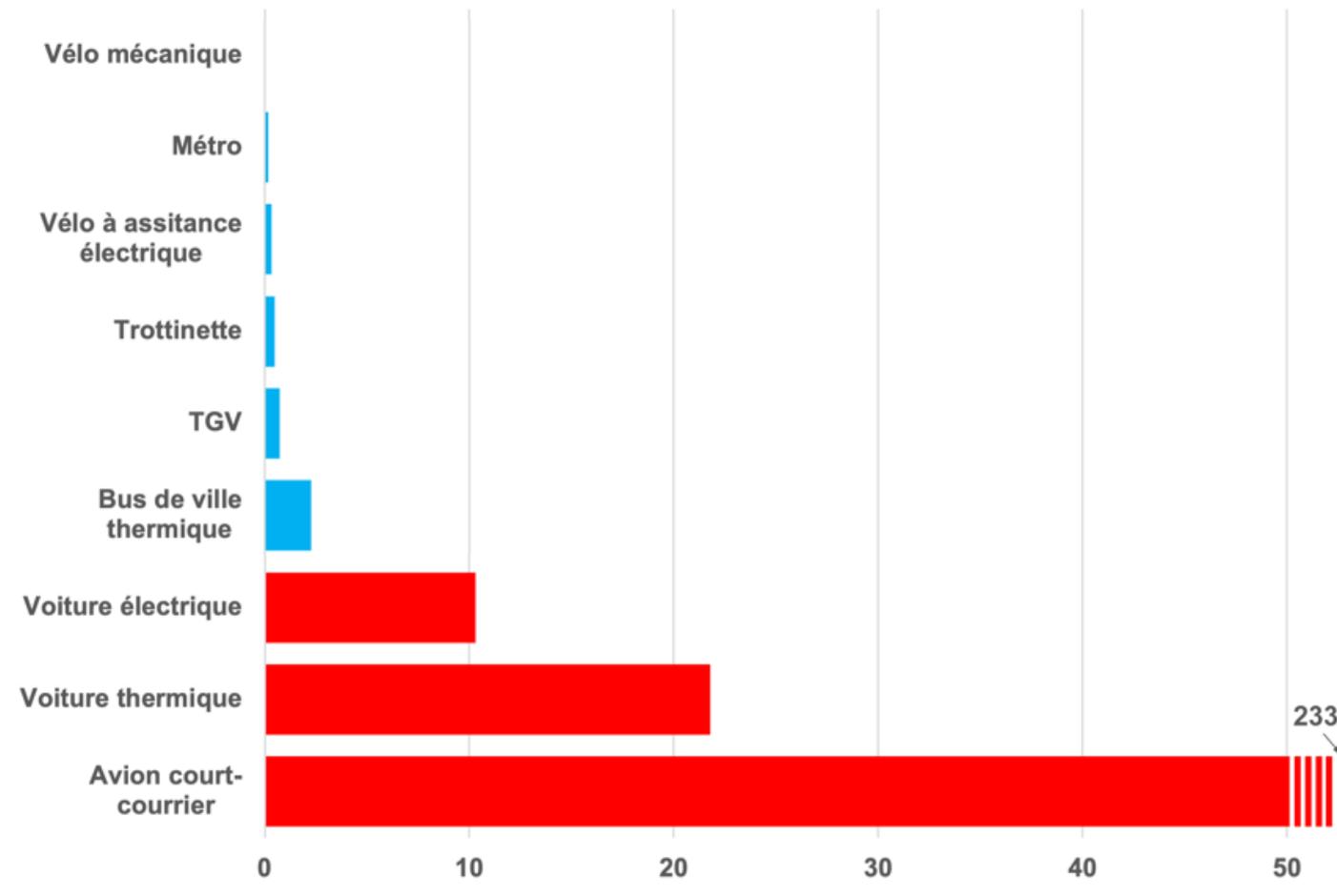
■ La mobilité

Comparaison des différents moyens de transport (par km)



■ La mobilité

Comparaison des différents moyens de transport (par heure d'utilisation)



→ En Suisse, plus de la moitié des déplacements sont effectués pour les loisirs

■ Le chauffage

<i>Nom</i>	<i>Facteur d'émission (kgCO₂/kg)</i>	<i>Facteur d'émission (kgCO₂/litre)</i>	<i>Facteur d'émission (kgCO₂/m³)</i>	<i>Densité kg/l ou kg/m³</i>	<i>PCI (kWh/kg)</i>	<i>Facteur d'émission (kgCO₂/kWh)</i>
Charbon (lignite)	3.15				5.5	0.57
Gaz naturel	2.14		1.71	0.8	10.1	0.21
Essence	2.94	2.18		0.74	11.39	0.26
Diesel ou FOD	3.19	2.68		0.84	11.86	0.27
Kérosène/Jet fuel	3.06	2.42		0.79	11.9	0.26
Dihydrogène (gris)	9.17		0.16	0.09	33.3	0.28
Dihydrogène (bleu)	1.83		0.16	0.09	33.3	0.055
Dihydrogène (vert)	0.83		0.16	0.09	33.3	0.025
Bois (avec compensation)	1.8				4	0.45
Granulé de bois (sans compensation)	0.18				4.8	0.038

Note:

- Hydrogène "gris" : par vaporeformage du méthane, sans captage
- Hydrogène "bleu" : par vaporeformage avec captage et stockage du CO₂ (CCS)
- Hydrogène "vert" : par électrolyse avec électricité renouvelable
- Bois: combustion du bois, sans compensation. Valeur dépendant de l'essence et du taux d'humidité.
- Le granulé de bois considère qu'on compense les émissions par une croissance complète et raisonnée d'un arbre.
- PCI: Pouvoir Calorique Inférieur
- Attention: sans extraction, transport, raffinage ni distribution. Cela ajoute en moyenne 15 – 25 % d'émissions supplémentaires. Dans ce tableau on ne considère que l'énergie brute de la matière.

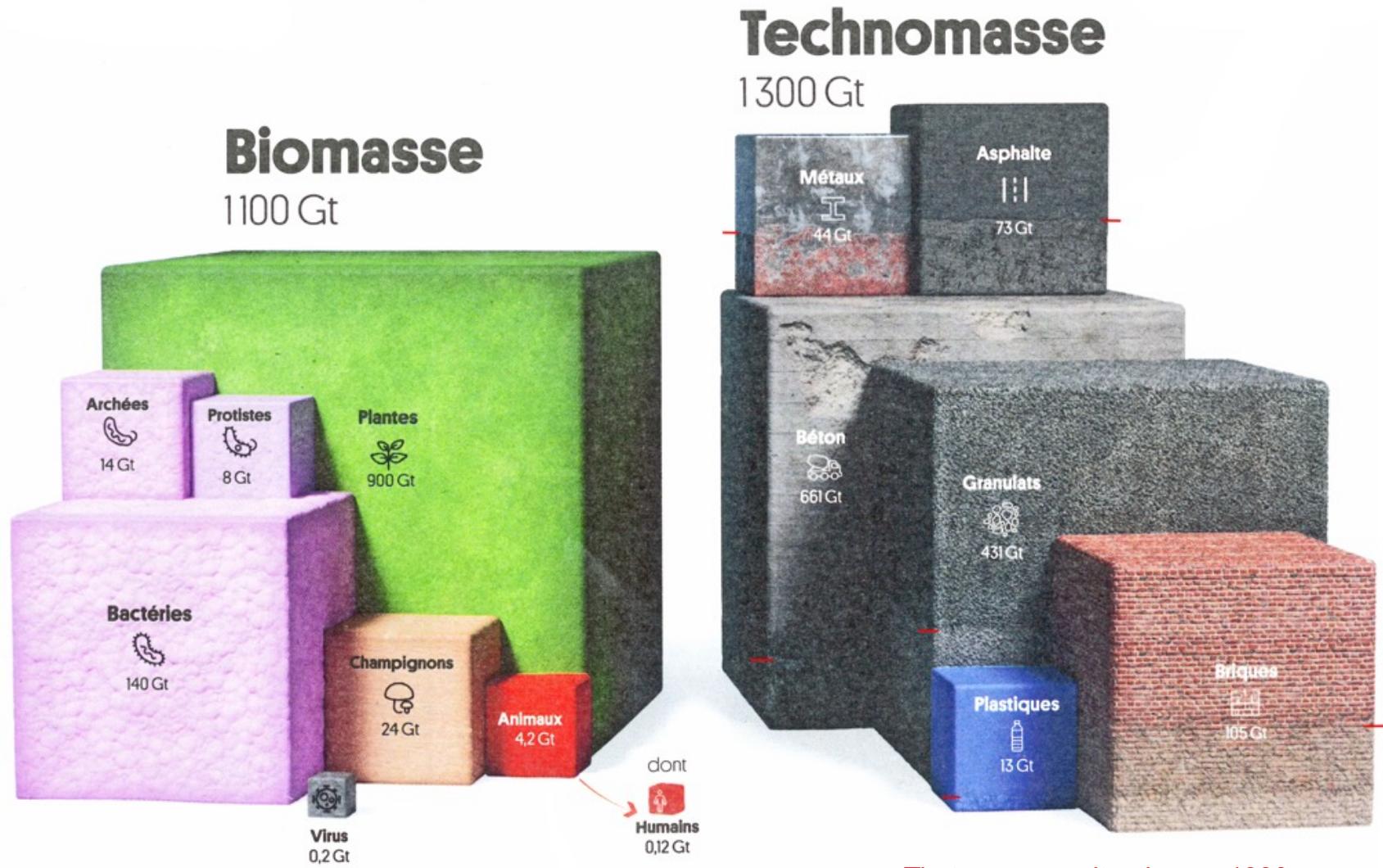
Les ressources



Dessin de Markus Grolik, Allemagne / Cartoon Movement / Courrier International février 2025

■ Biomasse et technomasse

Masse des règnes biologiques - principaux matériaux utilisés dans les structures construites par l'homme



Tirets rouges: situation en 1990

■ Déchets

- ❑ On estime à **2'000 Gt** la masse totale de matière consommée et accumulée par les humains en 2024.
- ❑ Donc 250 tonnes par habitant !
- ❑ La part réutilisée est de seulement **7.2 %** (5 % selon d'autres sources).
- ❑ Entre 2018 et 2023, la quantité a augmenté de 500 Gt et le taux de réutilisation est descendu de 9.1 à 7.2 % !

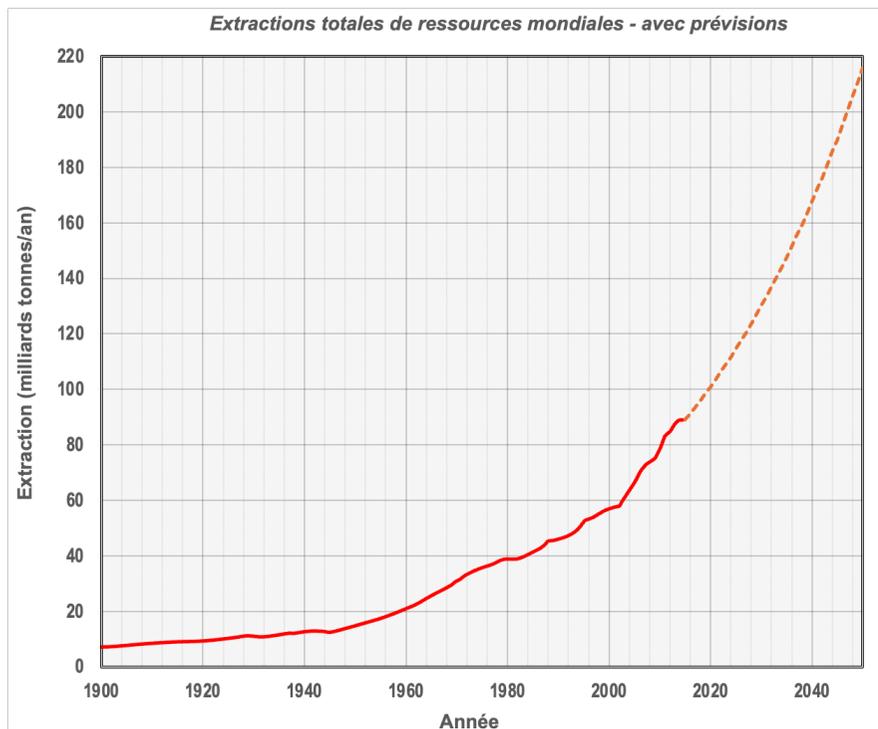
■ Extractions et mines

Mine de lignite de Garzweiler (D) pendant une manifestation d'opposition



■ Extractions et déchets

Les extractions mondiales et les déchets associés



Type	Quantité annuelle (Gt)	Déchets associés (Gt)
Minéraux non métalliques (sable, gravier, etc)	54.6	9.1
Minerais et autres	9.0	90
Combustibles fossiles	17.4	8.7
Autre biomasse	7.4	-
Nourriture et aliments	17.4	-
Totaux (arrondis)	106	108



■ Extractions et déchets

→ Quantité globale annuelle de déchets produits par toutes les extractions minières du monde: **108 Gt**

≡ 20'000 pyramides de Gizeh



*Env. 100 tonnes/an/hab.
(avec correction pour la Suisse)*

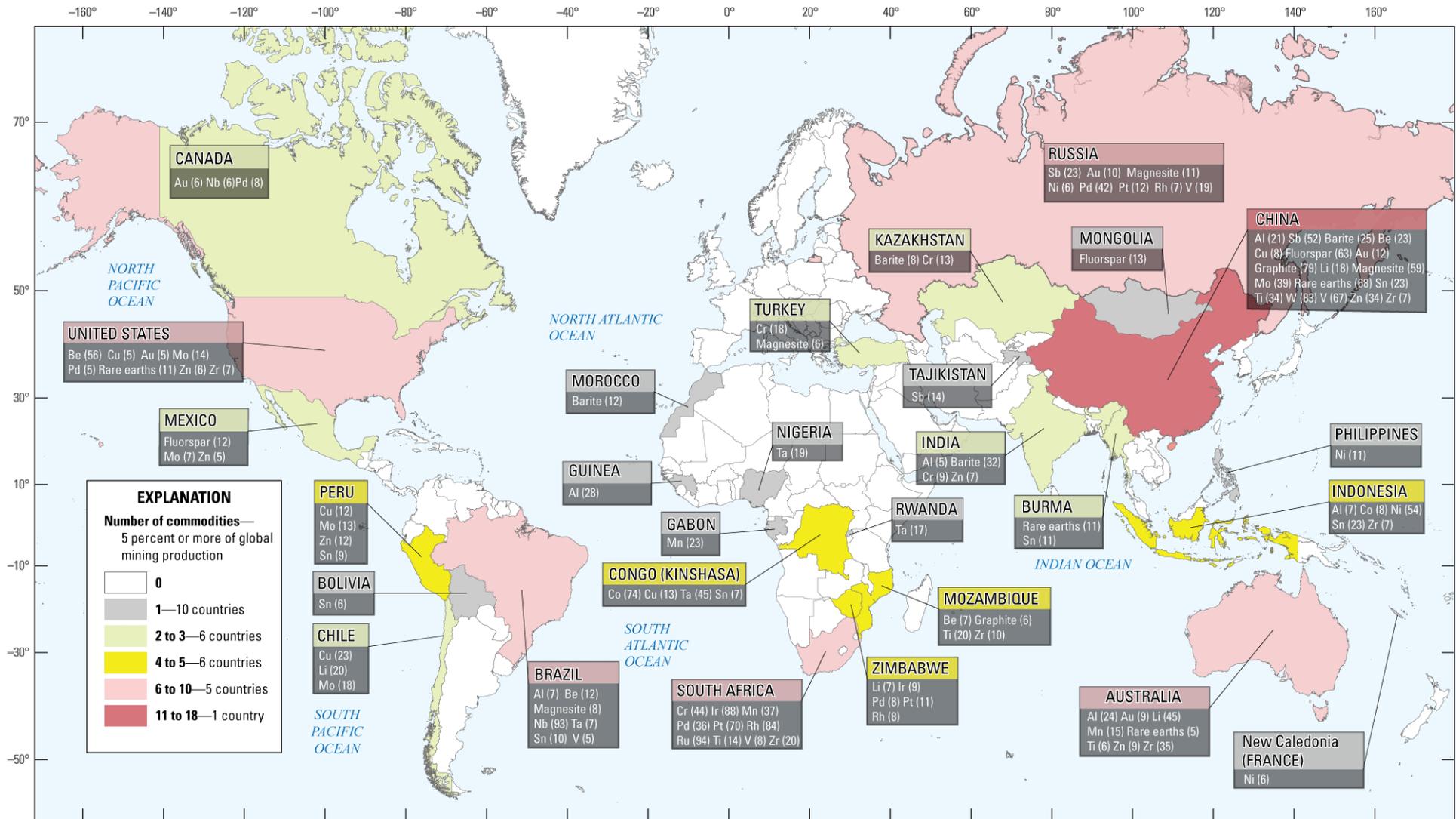
■ Extractions et déchets

→ Principales matières génératrices de déchets (2023):

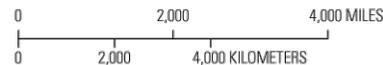
<i>Matière extraite</i>	<i>Production annuelle</i>	<i>Teneur moyenne</i>	<i>Déchets générés (stériles + résidus)</i>	<i>Remarques</i>
Charbon	~8 Gt	40–90 % récupérable	20–40 Gt	Ratio stériles/charbon très variable selon les bassins (2–10:1). Plus gros contributeur mondial.
Minerai de fer	~2.6 Gt (minerai)	30–60 % Fe	3–5 Gt	Extraction massive, teneurs intermédiaires.
Or	~3'000 t Au (~2–3 Gt minerai)	1–2 ppm	2–3 Gt	Cas extrême : teneur ultra faible, donc déchets colossaux pour une toute petite production.
Cuivre	~22 Mt Cu métal (~2 Gt minerai)	0.5–1 %	~2 Gt	Teneurs faibles ⇒ volumes énormes de roches déplacées.
Bauxite (aluminium)	~390 Mt	30–60 % Al_2O_3	0.5–1 Gt	Génère aussi des boues rouges très problématiques.
Phosphates	~220 Mt	15–30 % P_2O_5	0.5–1 Gt	Déchets riches en radionucléides naturels.
Nickel	~3.3 Mt Ni métal (~250 Mt minerai)	1–2 %	0.2–0.3 Gt	Déchets concentrés, impacts environnementaux élevés.
Autres			55 – 80 Gt	
TOTAL			108 Gt	

■ Extractions et mines

Principaux pays miniers (> 5 % de part mondiale)



Mercator Auxiliary Sphere projection
 World Geodetic System 1984 datum



■ Extractions et mines

Pollution, conflits et oppositions



Exemple de lixivat de déchets polluants d'une mine de cuivre Levikhinski (Russie)

■ Extractions et mines

Cartes des litiges juridiques liés à des mines:



■ Extractions et mines

Empreinte carbone globale:

Calcul d'après les chiffres suivants globaux, pour 2023:

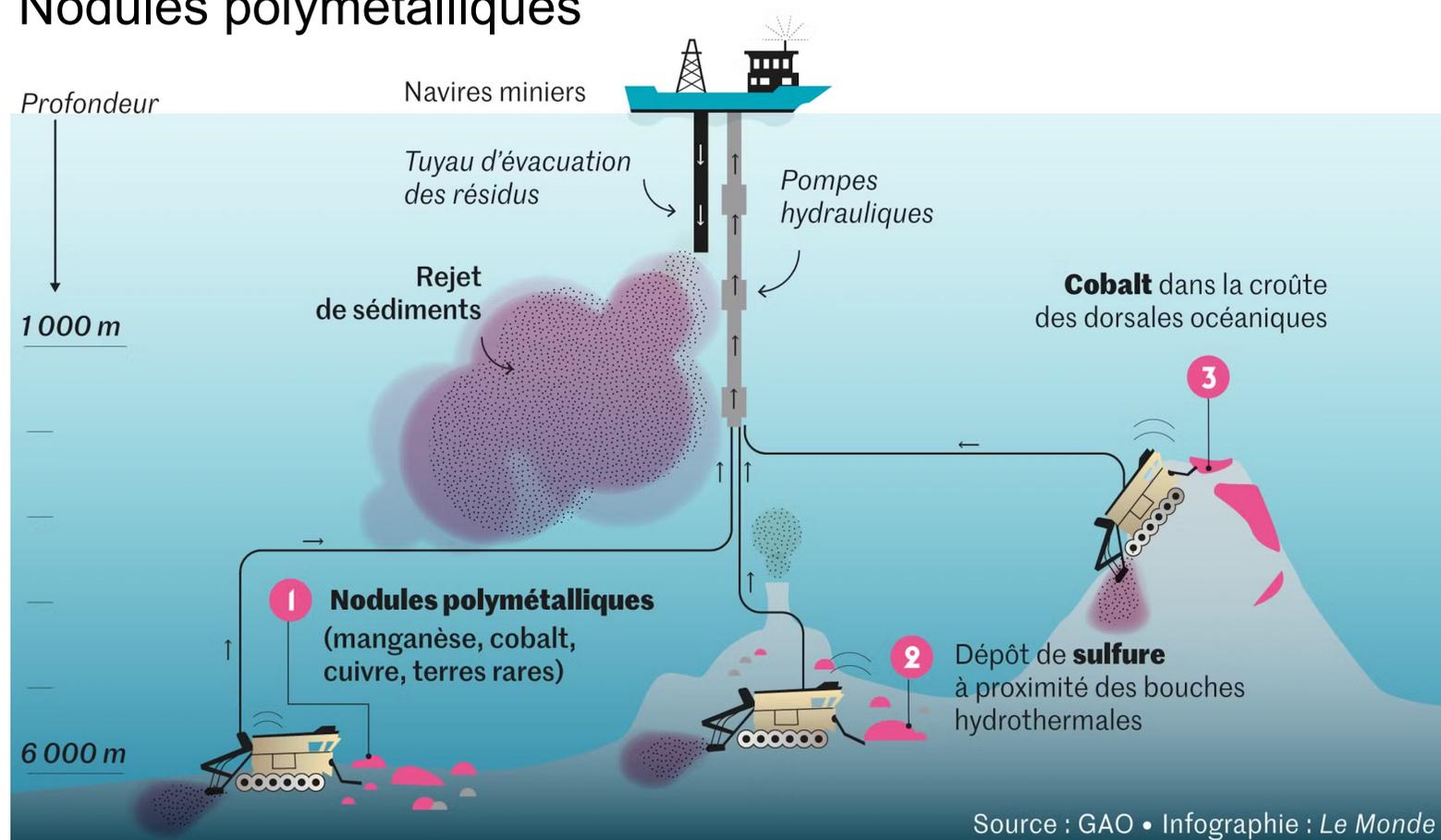
- Masse totale de matière extraites et utilisées: **214 Gt/an**
- Émissions totales de CO₂: **38 Gt/an**

→ Empreinte carbone = **178 g eCo₂ par kg** de matière.

*Attention: valable seulement en sortie de mine.
L'empreinte augmente ensuite suivant les transformations successives.*

■ Nouvelles techniques d'extraction

Nodules polymétalliques



<https://reporterre.net/La-ruée-miniére-sur-les-oceans-s-amorce-au-prix-probable-de-l-environnement>

■ Nouvelles techniques d'extraction

Nodules polymétalliques

Calcul simplifié des émissions pour seulement pour remonter le minerai du fond:

...

$$\rightarrow E_{pp} = m \cdot g \cdot h = 59 \text{ kJ/kg}$$

En tenant compte de:

- Richesse (teneur) des nodules: 1 – 1.5 % pour le cuivre et pour le nickel
- 1 kWh = 3.6×10^6 J
- Émissions du diesel utilisé: 0.27 kgCO₂/kg
- Rendement des moteurs diesel de l'installation: 30 %

Donc l'équivalent d'émissions de CO₂ seulement pour remonter le nickel ou le cuivre des nodules:

$$\rightarrow E_{CO_2} = \mathbf{1.2 \text{ kg eCO}_2/\text{kg}}$$

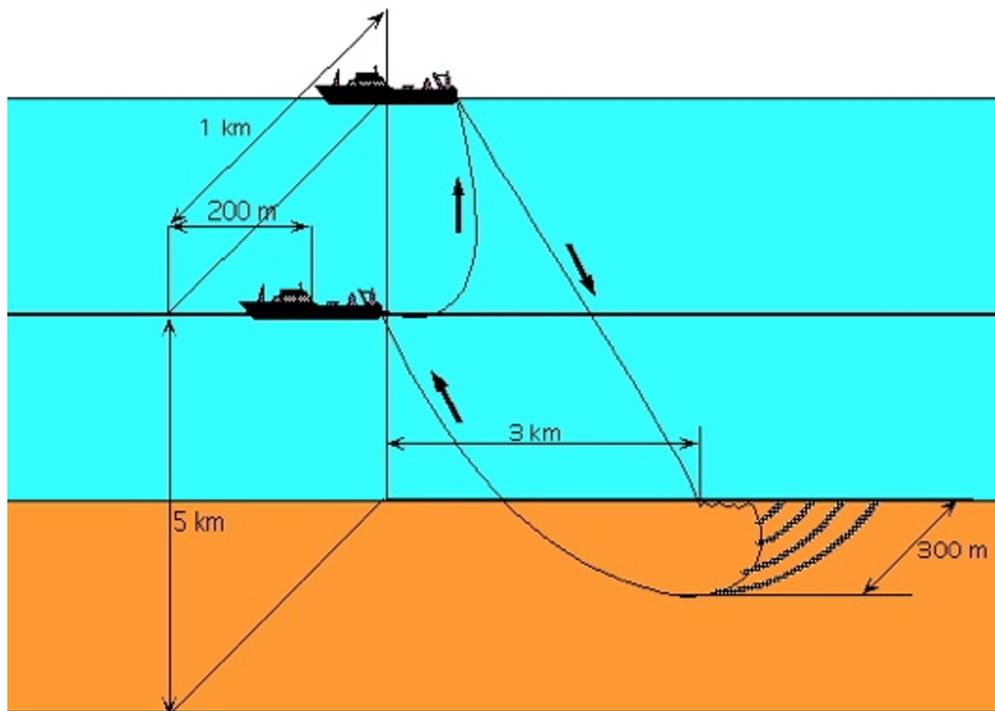
Ne pas oublier les quantités de minerais convoitées dans le futur (pour ordre de grandeur):

→ plusieurs centaines de Mt de matières par année !

■ Nouvelles techniques d'extraction

Nodules polymétalliques

Autres méthodes d'extraction envisagées:

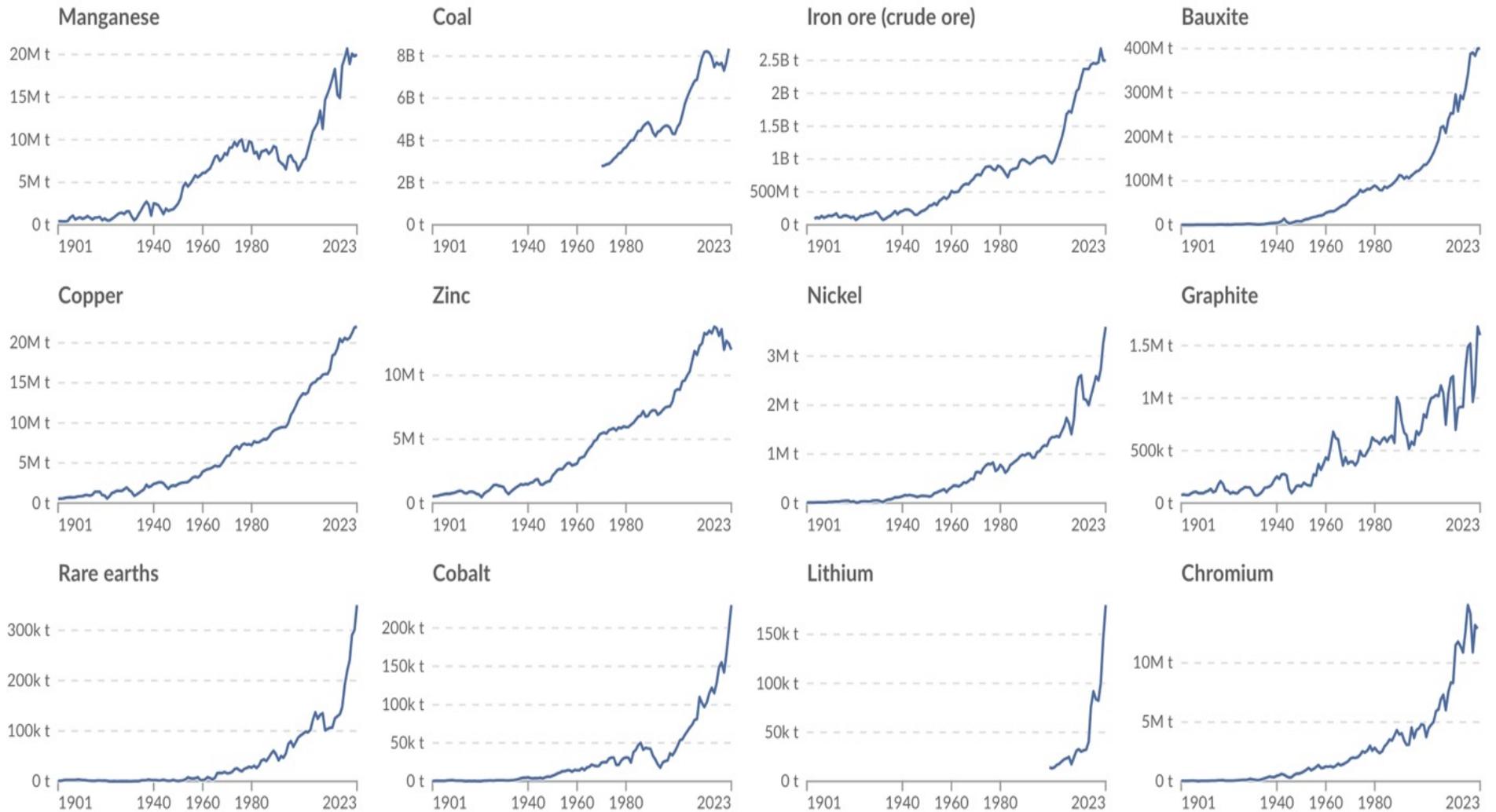


Système par godets à 2 navires



Système de navettes autonomes

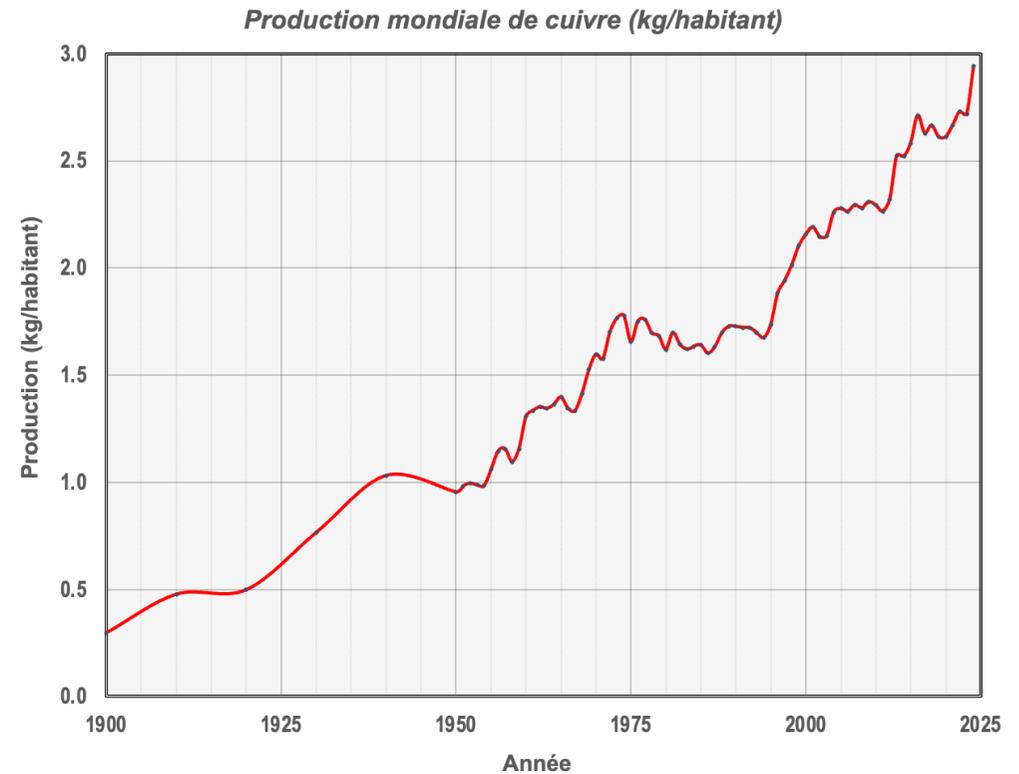
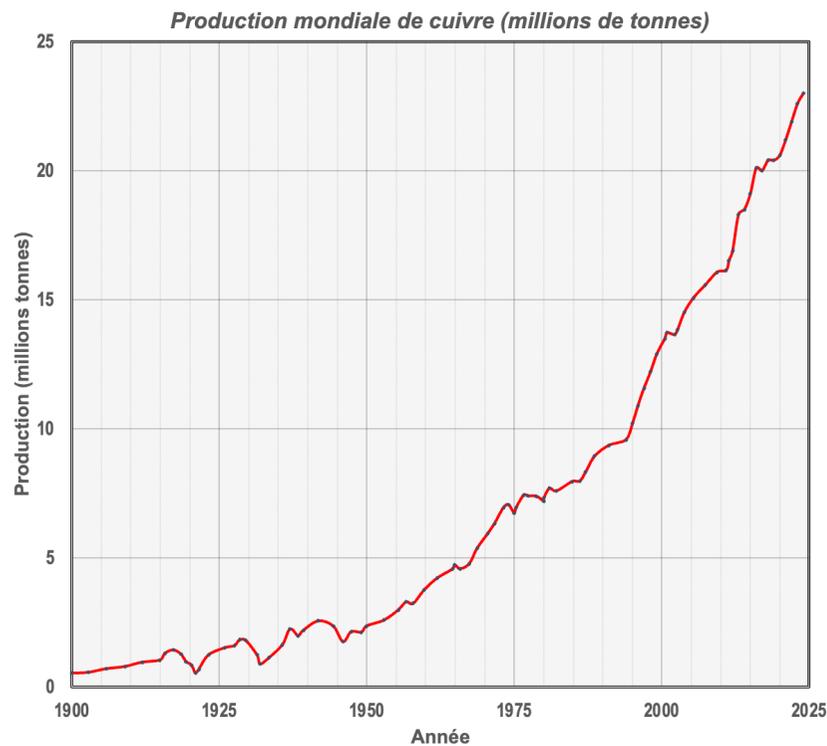
■ Extraction des matériaux principaux



<https://ourworldindata.org/grapher/global-mine-production-minerals?>

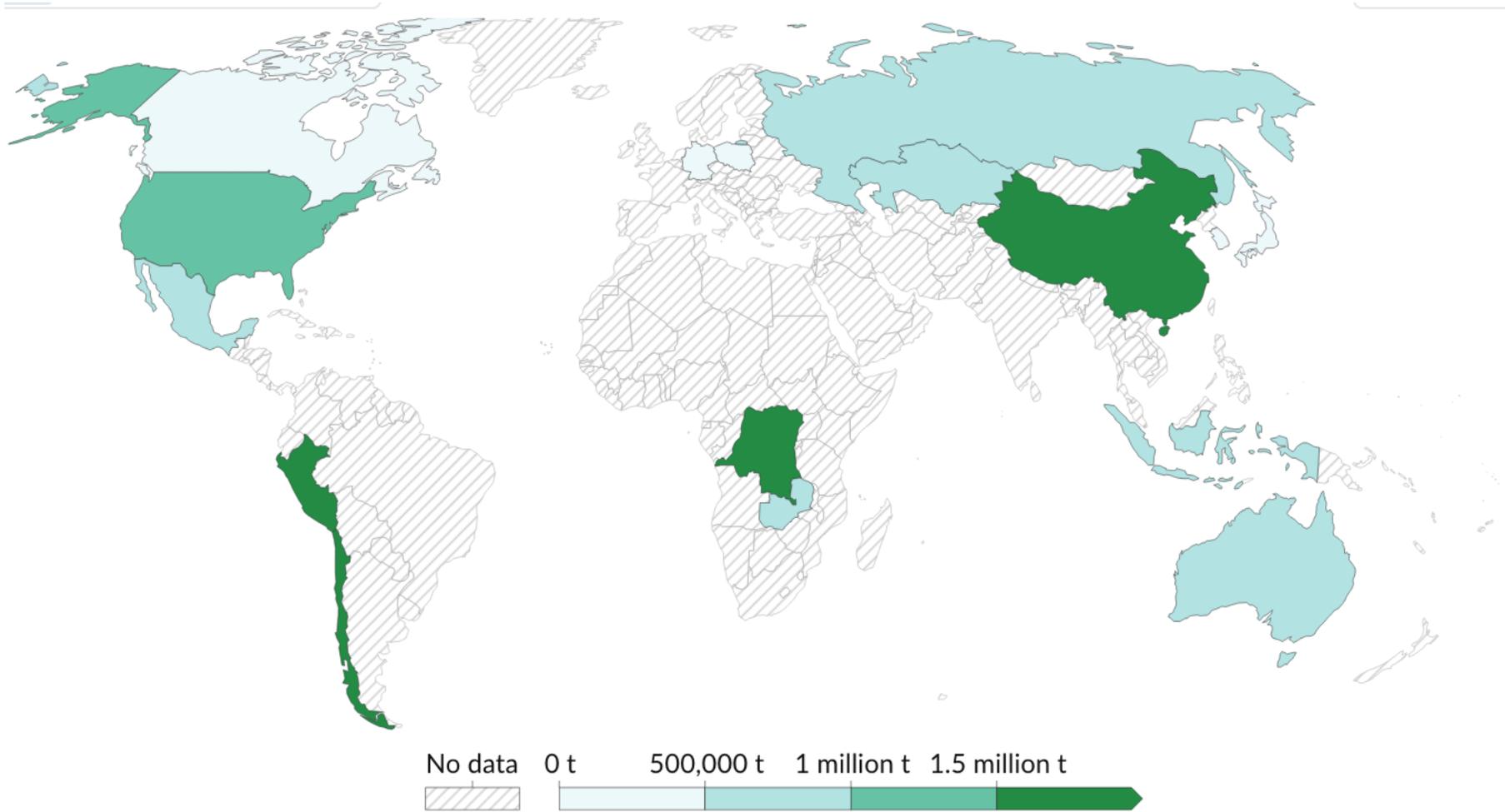
■ Exemple: le cuivre

- Production mondiale de cuivre métal (2023): **22 millions de tonnes.**
- Augmentation prévue extraction pour 2035: 50 millions de tonnes/an
- Environ 6 % de tout le cuivre utilisé actuellement pour les véhicules électriques, y compris les infrastructures de recharge



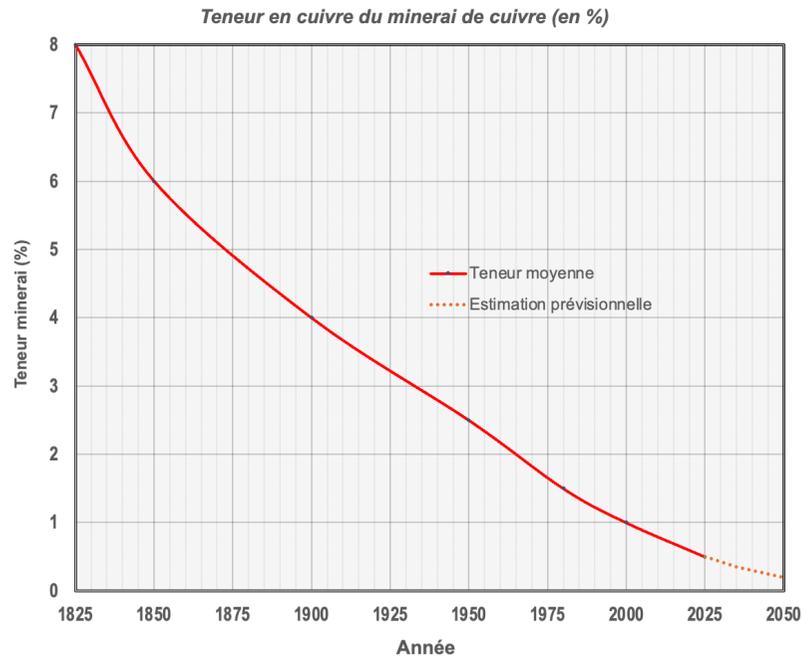
■ Exemple: le cuivre

Cartes des principaux pays producteurs :



■ Exemple: le cuivre

Problématique de la baisse de la teneur du minerai



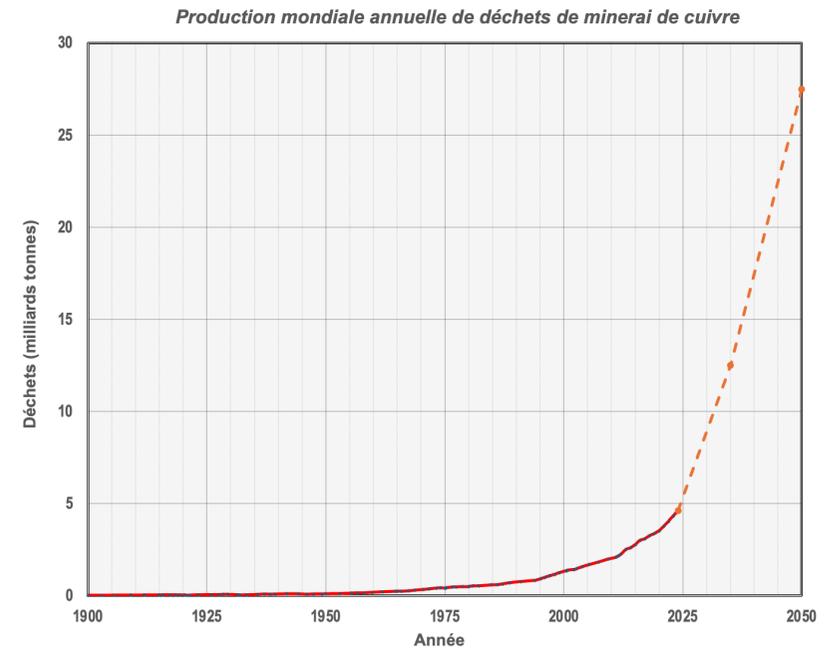
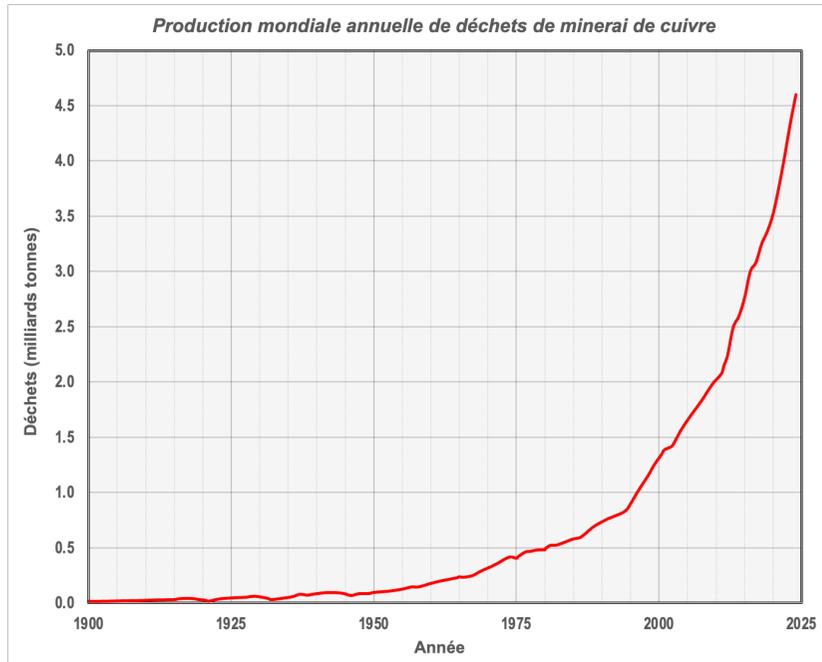
Mine de cuivre de Rio Tinto (Esp.) arrêtée en 2001. Teneur: 0.33 %

- Teneur diminuée
 - plus difficile à extraire
 - demande plus d'énergie
 - plus d'émissions de CO₂
 - plus de déchets

■ Exemple: le cuivre

Les déchets liés à l'extraction:

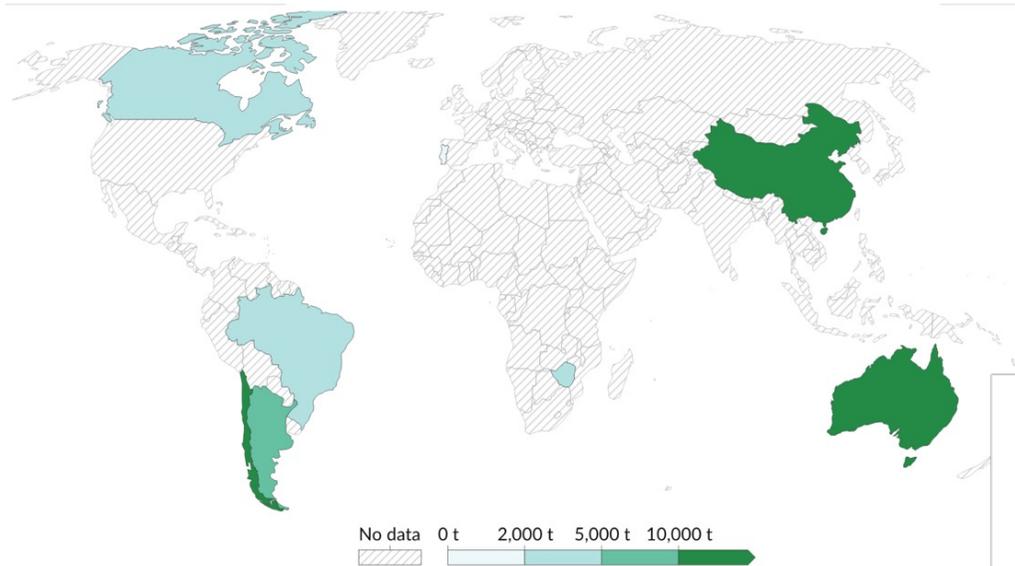
Multiplication par 6 prévue pour 2050:



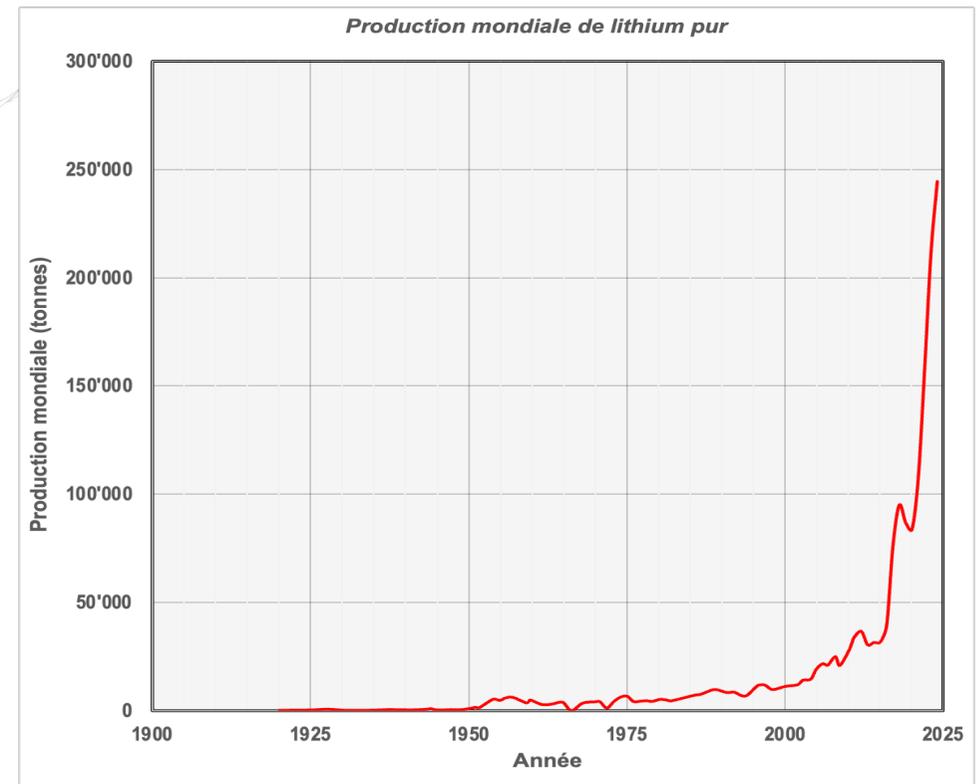
Déchets par année
≡ 1'000 pyramides de Gizeh



■ Exemple: le lithium

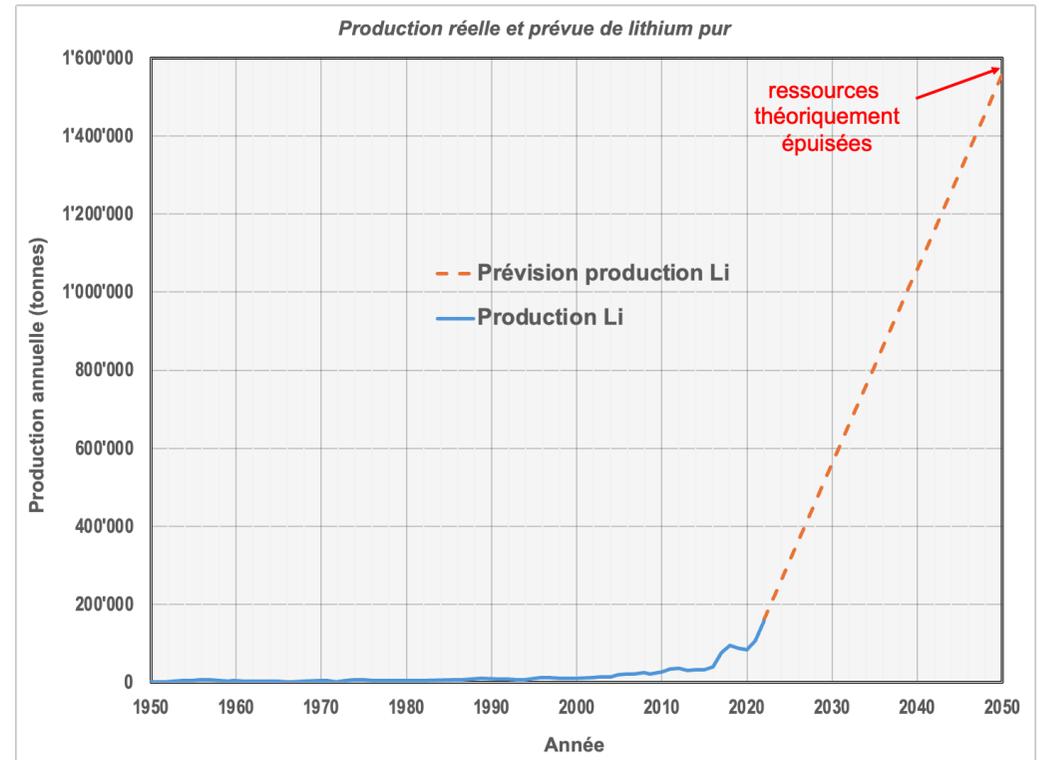
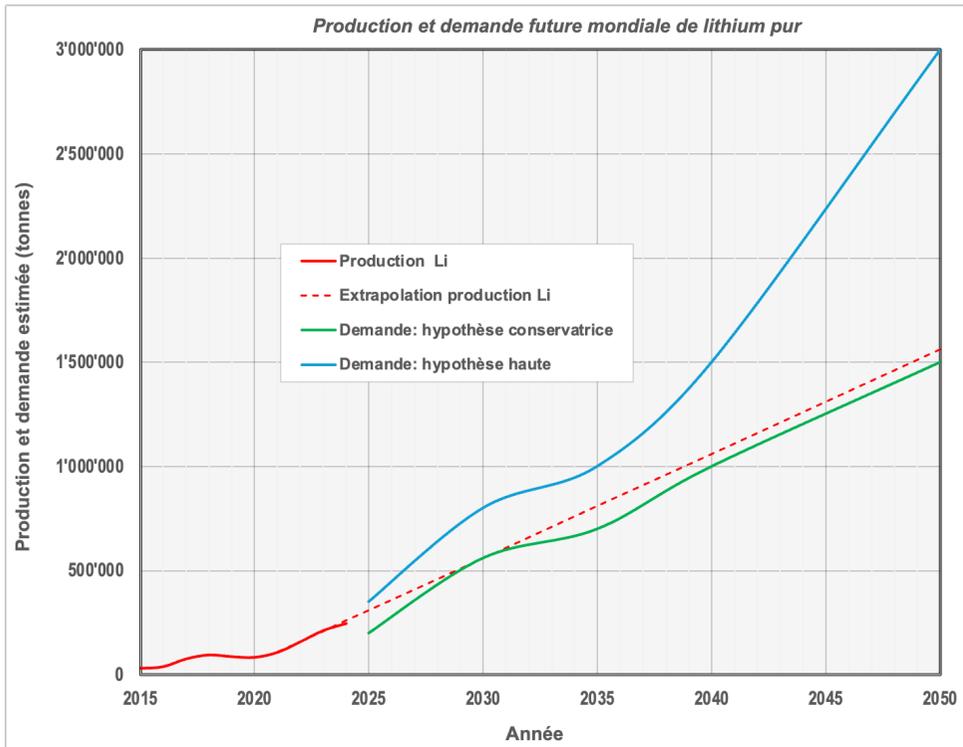


- 2 types d'extraction:
- salars (évaporation)
 - spodumène (mines)



■ Exemple: le lithium

Les prévisions:

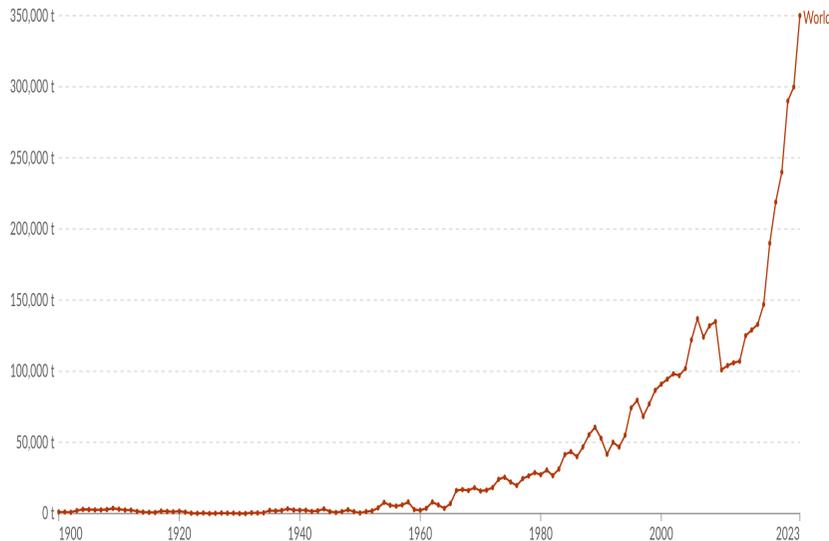
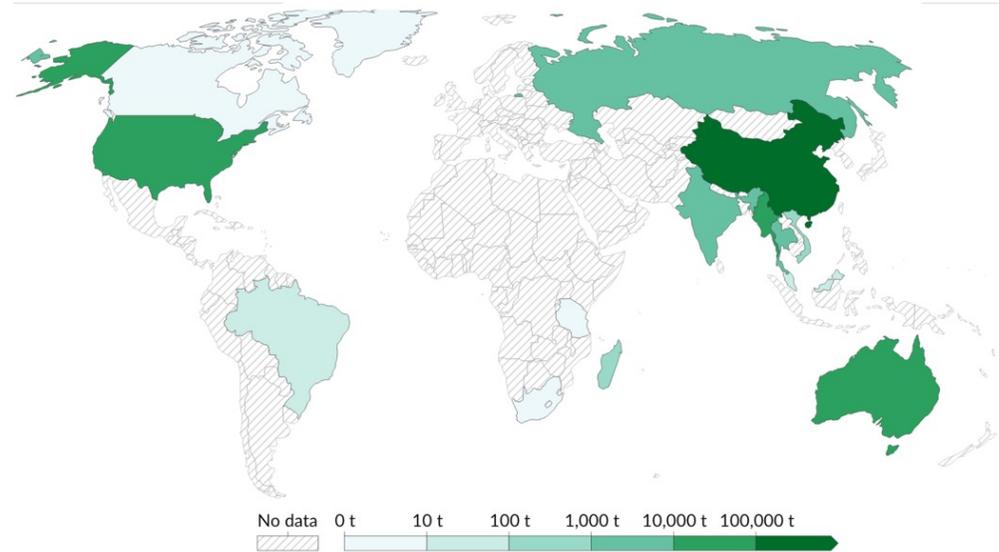


Exemple: terres rares

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	*Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

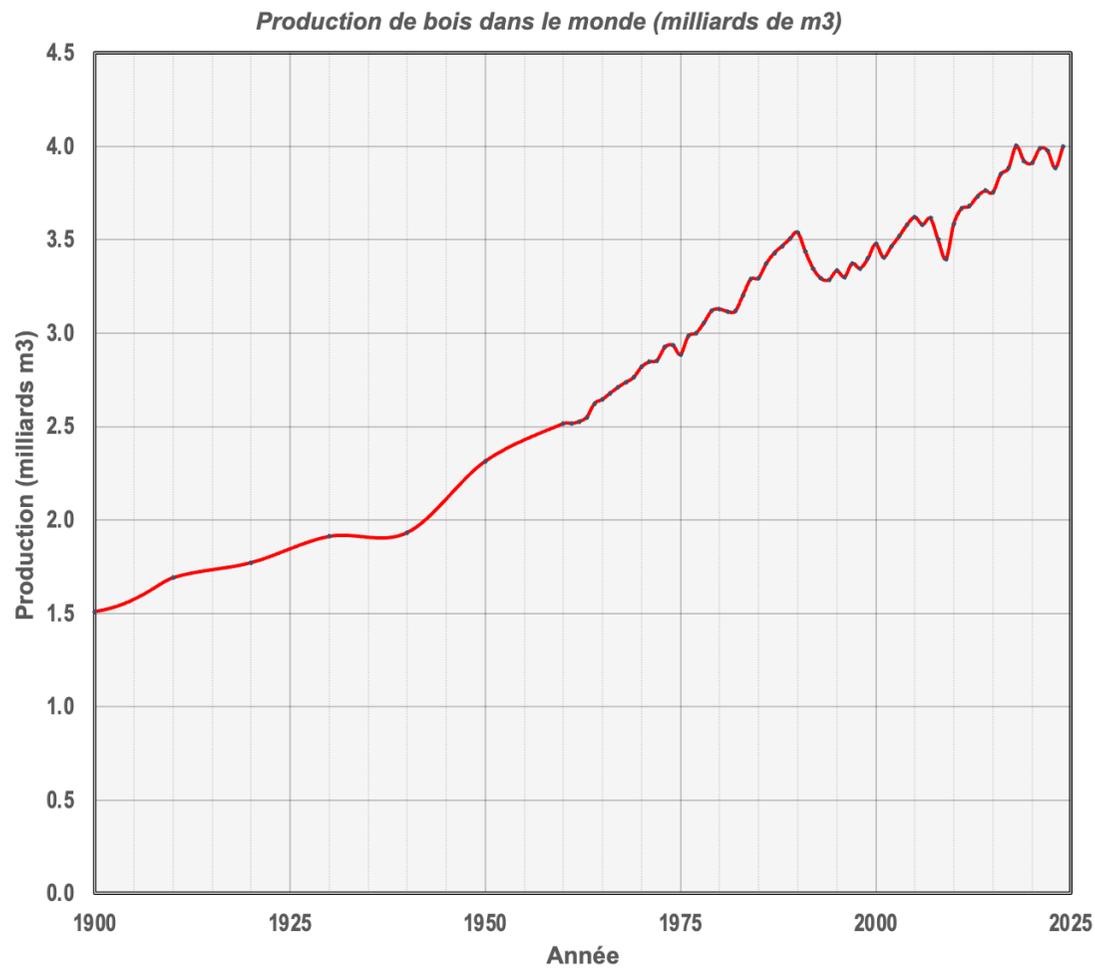
↓

*La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
*Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No



Bande dessinée Utop'IA, Hergi, Centre LEARN, EPFL

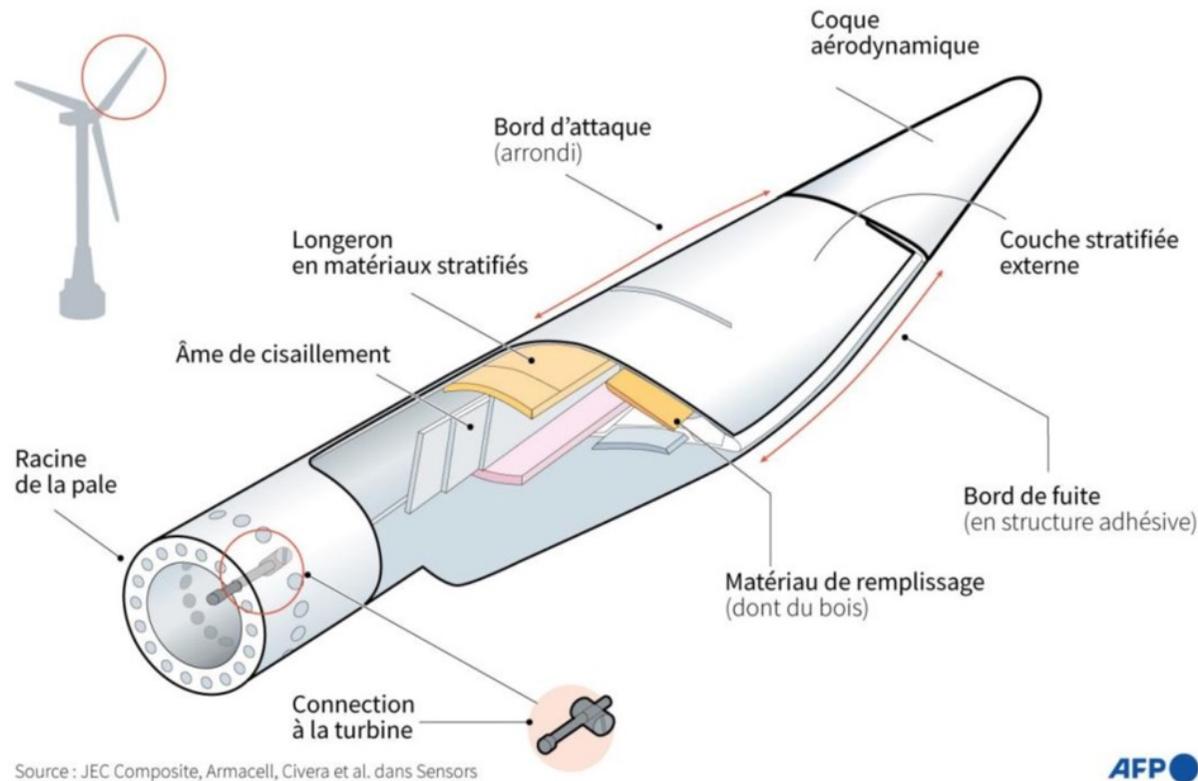
■ Exemple: le bois



→ *Un peu moins de la moitié de la production de bois finit en carton et papier*

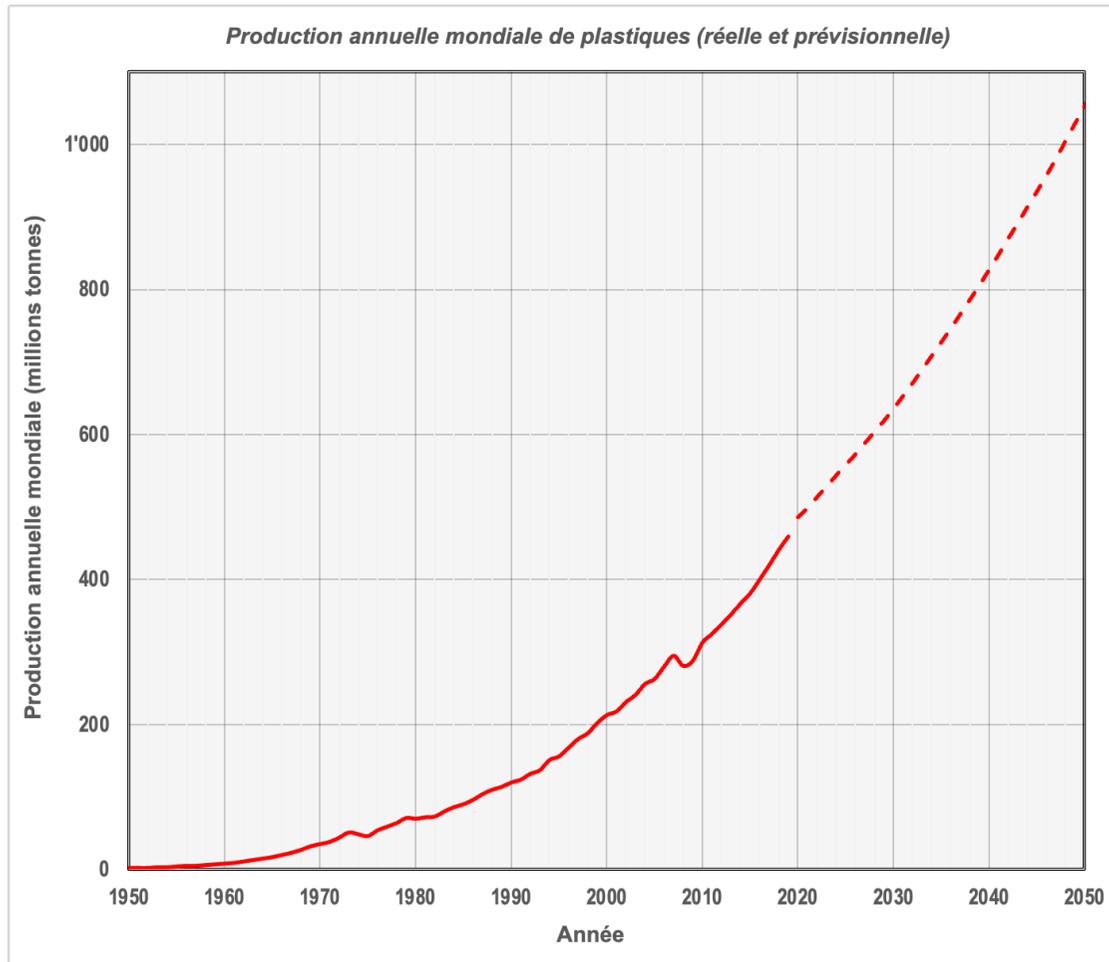
■ Exemple: le bois

Cas de pénurie de ressource:



➔ *Vers 2019, le bois utilisé dans les éoliennes devient limité car surexploité. Il a été remplacé partiellement par des matières synthétiques!*

■ Exemple: le plastique



- Production 2022: 460 millions de t/an
- 90 % d'hydrocarbures
- Seulement 9 % recyclés
- Croissance prévue → 2050: x 3

<https://ourworldindata.org/grapher/global-plastics-production#explore-the-data>
<https://ourworldindata.org/grapher/global-plastic-production-projections>

■ Exemple: le plastique



Ile de la Passion (Clipperton)



Sur la plage ...

■ Exemple: le plastique

Utilisation de plastique en Suisse, par année (2024):

- ❑ 1 milliard de kg (92 kg par habitant par année !)
- ❑ 82 % incinérés en Suisse
- ❑ 10 % exportés
- ❑ 3.6 % recyclés (PET: 3.4 % sur le total et autres plstiques:0.3 %)
- ❑ 2 % brulés en cimenterie
- ❑ 2 % perdus dans la nature (par exemple 9'000 tonnes de pneus, 1.1 %)

→ Donc moins de 5 % est réellement (et assurément) recyclé ou réutilisé

→ Attention: la plupart des plastiques ne sont pas recyclables

■ Recyclage: définitions

- ❑ Recyclable: ce qui peut être recyclé (mais ne l'est souvent pas)
- ❑ Recyclé: réutilisé, en général pour une autre application, avec dégradation de la matière
- ❑ Valorisé: qui utilisé dans une application qui rapporte de l'argent (par exemple: incinération)
- ❑ Réutilisé: plastique qui sera utilisé dans la même application qu'à l'origine (bouteilles consignées par exemple). Peu de dégradation de la matière
- ❑ Conservé. Garder l'objet le plus longtemps possible
- ❑ Pas acheté: la meilleure solution !

Résumé des matières principales

Ressource	Usage principal	Pays dominants (production/ raffinage)	Production annuelle mondiale (Mt)	Croissance annuelle production (%)	Réserve prouvées (Mt)	Année début tensions	Empreinte eCO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Risque principal
Cuivre	Réseaux électriques, moteurs, électronique	Chili, Pérou, Chine	22	7.3 (<2035) 0.6 (>2035)	870	2035	4 - 6	Demande explosive dès 2030
Nickel	Batteries (NMC), inoxydable	Indonésie, Philippines, Russie	3.6	4.7(actuel) 3.5 (prév.)	100	2030 - 2040	5 - 15	Dépendance Asie, impact environnemental fort
Cobalt	Batteries lithium-ion	RDC (>70%), Chine (raffinage)	0.27	10.4	12	2030	28 (métal pur)	Concentration géopolitique, travail artisanal
Lithium	Batteries (VE, stockage)	Australie, Chili, Chine	0.21	9.6	28	2035	1 - 3 (salars) 3 - 5 (roche)	Raffinage concentré en Chine
Manganèse	Batteries (LMFP), aciers spéciaux	Afrique du Sud, Australie, Brésil	20	5.9	500	?	1 - 6	Assez abondant mais mal réparti
Graphite	Anodes batteries lithium-ion	Chine (>80%)	1.6	13	280	2030	20 - 30	Forte dépendance chinoise
Terres rares (Nd, Pr, Dy, Tb)	Aimants permanents (éoliennes, VE), électronique	Chine (>70%), Australie	0.37	?	peu clair	2030 - 2035	variables	Concentration quasi-monopole Chine
Gallium	Semi-conducteurs, LED, électronique	Chine (>95%)	610 tonnes			déjà 2023		Risque d'embargo (déjà en 2023) Contrôle géopolitique
Germanium	Fibres optiques, capteurs infrarouges	Chine, Russie, Canada	140 tonnes			déjà 2023		Fort contrôle chinois Quotas chinois
Indium	Ecrans tactiles, photovoltaïque (CIGS)	Chine, Corée du Sud	?			?		Sous-produit du zinc, rare
Platine / Palladium / Rhodium	Catalyseurs, hydrogène (pile à combustible, électrolyse)	Afrique du Sud, Russie	?			dès 2030, si H ₂ décolle		Risques géopolitiques, rareté
Vanadium	Batteries à flux, aciers spéciaux	Chine, Russie, Afrique du Sud	0.1			2035 - 2040		Dépendance Chine
Titane	Aéronautique, spatial, militaire	Chine, Russie	8.6 (ilmenite)			2035 - 2040		Dépendance Russie/Chine Tensions géopolitiques
Tungstène	Alliages haute résistance, outils industriels	Chine (>80%)	0.078			?		Forte concentration Risque géopolitique
Pétrole			33 Gbarils		1600 Gbarils		Fioul: 3.19	Ratio réserve/production: 40 - 50 ans
Gaz			115 Gm ³		?		2.14	Ratio réserve/production: 50 - 60 ans
Charbon			8.35 Gt				3.15	Ratio réserve/production: 100 - 200 ans

Notes:

- En général et sauf indication contraire, la croissance indiquée correspond à celle des décades précédentes. Lorsqu'une prévision pour 2035 ou 2050 est donnée, on se rend compte qu'en général elle poursuit (voir accentue légèrement) la croissance réelle de ces dernières années.
- Une croissance annuelle de 7.2 % signifie un doublement en 10 ans.

■ Batterie de voiture - pénuries futures ?

Voir aussi la présentation Ecube de mai 2024 par Bernard Dugas: "Des batteries sur le réseau électrique; l'effet boule de neige enfin utile?"

Constitution de plusieurs types de batteries pour voiture électrique:

HOW BATTERY CHEMISTRIES DIFFER, BY MINERAL CONTENT FOR A 60KWH LITHIUM-ION BATTERY

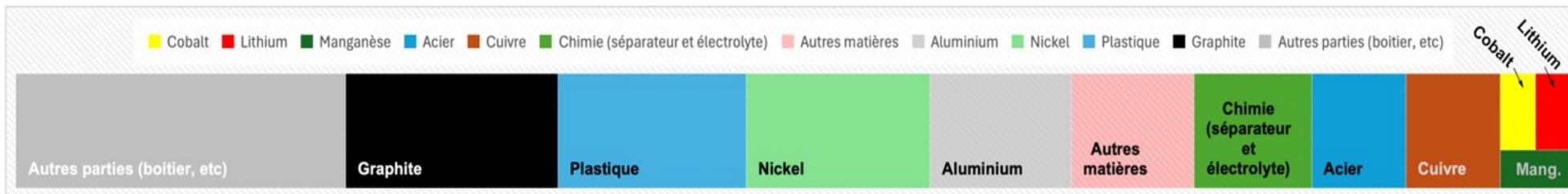
The name of the battery chemistry typically indicates the composition of the cathode.

	NMC811 Nickel (80%) Manganese (10%) Cobalt (10%)	NMC523 Nickel (50%) Manganese (20%) Cobalt (30%)	NMC622 Nickel (60%) Manganese (20%) Cobalt (20%)	NCA+ Nickel Cobalt Aluminum Oxide	LFP Lithium iron phosphate
 LITHIUM	5KG	7KG	6KG	6KG	6KG
 COBALT	5KG	11KG	11KG	2KG	0KG
 NICKEL	39KG	28KG	32KG	43KG	0KG
 MANGANESE	5KG	16KG	10KG	0KG	0KG
 GRAPHITE	45KG	53KG	50KG	44KG	66KG
 ALUMINUM	30KG	35KG	33KG	30KG	44KG
 COPPER	20KG	20KG	19KG	17KG	26KG
 STEEL	20KG	20KG	19KG	17KG	26KG
 IRON	0KG	0KG	0KG	0KG	41KG

ELEMENTS 

■ Exemple de pénurie future

Composition d'une batterie lithium-ion NMC811de 60 kWh bruts:



Matière	Quantité (kg)
Cobalt	5
Lithium	5
Manganèse	5
Acier	20
Cuivre	20
Chimie (séparateur et électrolyte)	25
Autres matières	26
Aluminium	30
Nickel	39
Plastique	40
Graphite	45
Autres parties (boitier, etc)	70
Total	330

■ Exemple de pénurie future

Calcul simplifié pour ordre de grandeur:
conséquence de la conversion de toutes les voitures à l'électricité:

Données nécessaires au calcul:

- 1.4 milliards de voitures automobiles (sans camions, 2024)
- env. 0.4 milliards de camions, autobus et véhicules de transport
- 28 milliards de kg de lithium: réserves prouvées exploitables de lithium Li pur
- 85 % de la production totale de lithium est utilisée pour les batteries de voiture (sans les autres véhicules)
- 5.65 kg: lithium pur contenu dans une batterie standard de 50 kWh
- Batterie de 50 kWh pour une voiture et 400 kWh pour un véhicule de marchandises.

→ Résultat: **24 milliards de kg** de lithium Li sont nécessaires pour cette conversion.

■ Exemple de pénurie future

Calcul répété pour d'autres matières de la batterie

Matière	Nombre de voitures pouvant être converties en 2024 (millions)	Toutes les voitures seront converties en:	Année épuisement des ressources
Graphite	36 (2.6 %)	2036	2046
Lithium	37 (2.6 %)	2037	2052
Nickel	92 (6.6 %)	2034	2041
Cuivre	192 (13.7 %)	2030	2048

Notes:

- *Calcul simplifié: utilisation des toutes les ressources disponibles (sans partage avec les autres demandeurs!)*
- *Sans les autres moyens de transport (bus, marchandises, bateaux, vélos, etc)*

Pour référence: les ventes mondiales de voitures électriques en 2024 (selon IEA) ont été de:

- *Véhicules entièrement électriques (BEV) : 10 millions*
- *Véhicules hybrides rechargeables (PHEV) : 7 millions*
- *Total véhicules électriques : **17 millions***

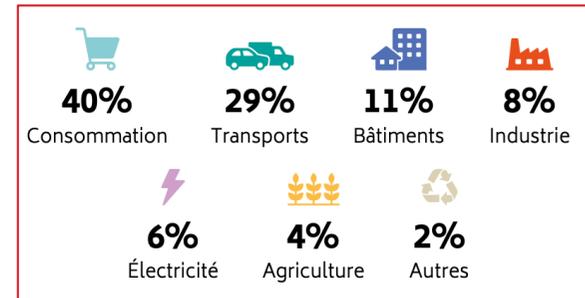
▶ Conclusions

■ Conclusions ?

L'économiste Kenneth boulding disait:

*"pour croire qu'une croissance matérielle infinie
est possible sur une planète finie,
il faut être fou ou économiste"*

■ Conclusions pour l'ingénieur (et les autres)



- ❑ Sobriété
- ❑ Réduire sa consommation d'objets inutiles
- ❑ Réfléchir à sa mobilité
- ❑ Isoler les bâtiments
- ❑ Recherche et industrie: toujours faire l'évaluation de l'empreinte CO₂ et de l'empreinte matériel pour un nouveau processus à créer
- ❑ Toujours se baser sur le mix mondial dans ses raisonnements et pas systématiquement sur un 100% renouvelable
- ❑ Ne pas tomber dans le piège de la technocratie, mais poursuivre les recherches scientifiques sérieuses.

▶ Merci de votre attention

▶ Questions ?

*Bertrand Daout
Chemin de la Montagne 6
1077 Servion
bertrand.daout@bluewin.ch*