

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

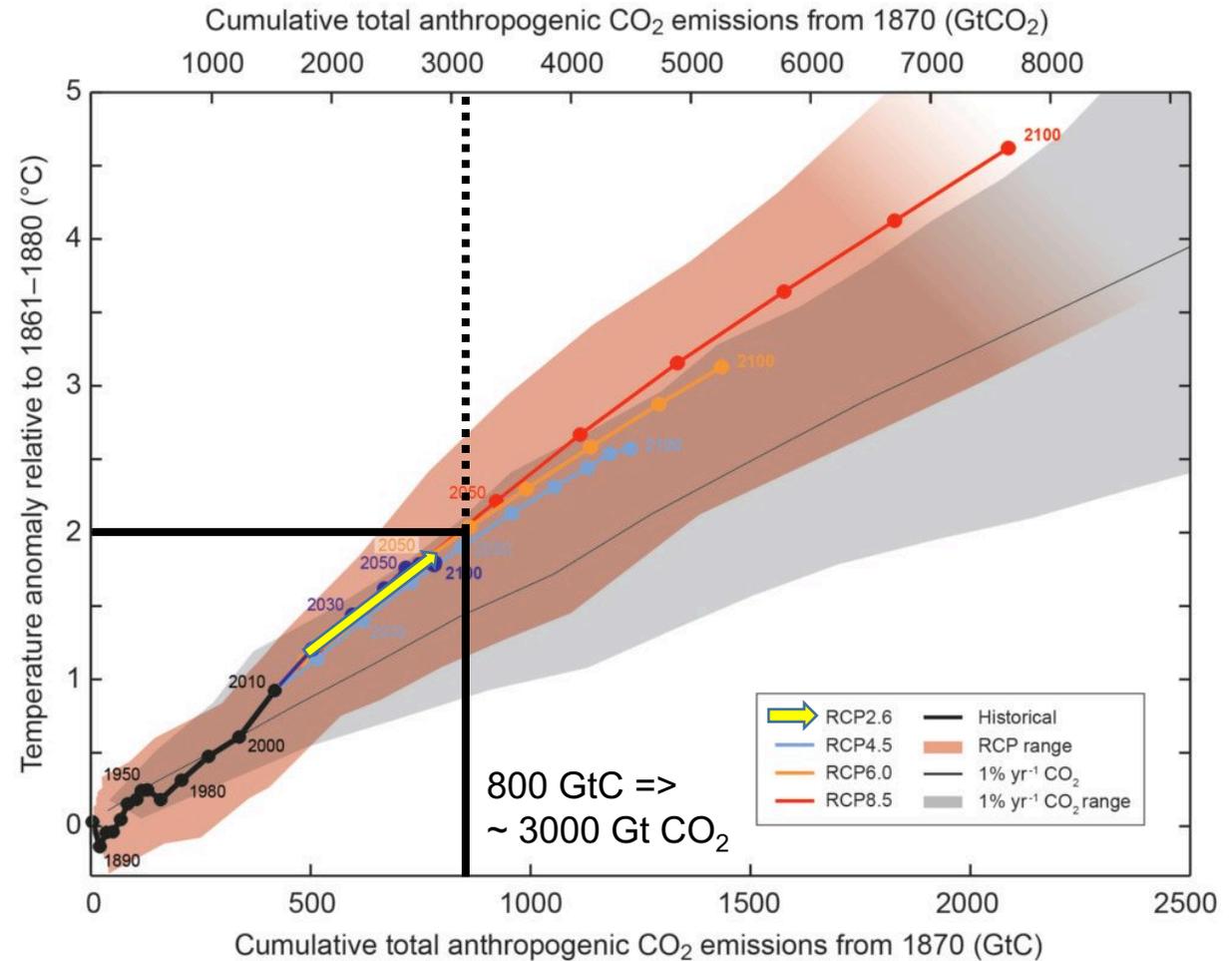
**Objectifs :**

- Comprendre à quelles réductions de GES correspond le scénario RCP 2.6 du GIEC
- Connaître l'équation de Kaya et être capable d'identifier quels facteurs influencent les émissions de CO<sub>2</sub>
- Comprendre les avantages et les inconvénients des différentes sources d'énergies décarbonées

**Énergie capsule 5**  
*Introduction*

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

### À quelles évolutions des émissions de GES correspond le scénario +2° (RCP 2.6 du GIEC) ?



Pour limiter le réchauffement à moins de 2°C (RCP2.6 du GIEC) les émissions cumulées de CO<sub>2</sub> depuis 1870 doivent rester inférieures à ~ 3000 Gt CO<sub>2</sub>.

**En 2021 => 2270 Gt CO<sub>2</sub>**; à ce rythme là (+37 Gt en 2019) il ne nous reste plus que 20 ans pour atteindre les 3000 Gt !

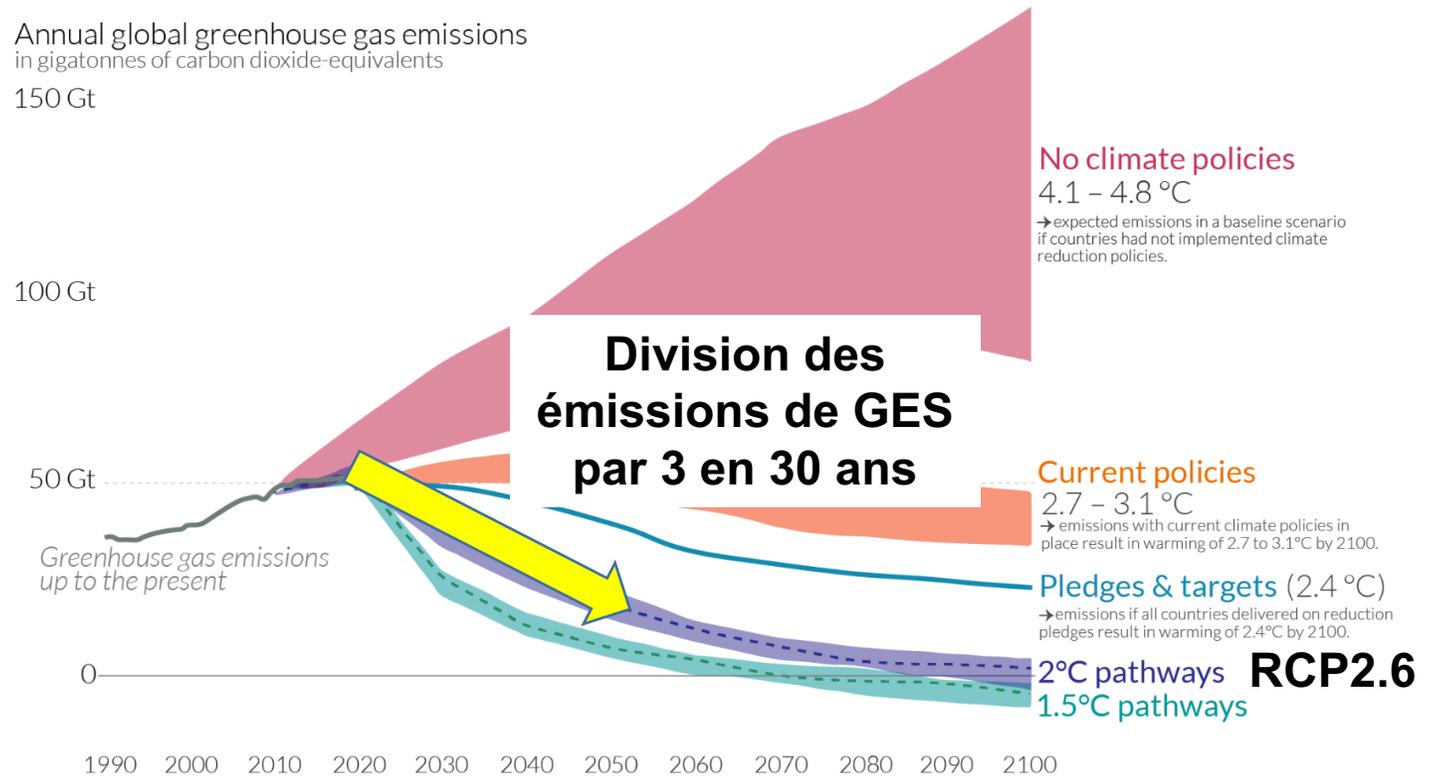
### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## À quelles évolutions des émissions de GES correspond le scénario +2° (RCP 2.6 du GIEC 2021) ?

### Global greenhouse gas emissions and warming scenarios

- Each pathway comes with uncertainty, marked by the shading from low to high emissions under each scenario.
- Warming refers to the expected global temperature rise by 2100, relative to pre-industrial temperatures.

Annual global greenhouse gas emissions  
in gigatonnes of carbon dioxide-equivalents



Data source: Climate Action Tracker (based on national policies and pledges as of May 2021).  
OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Last updated: July 2021.  
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie & Max Roser.

Le scénario RCP 2.6 = **réduction des émissions de l'ordre de 45 % d'ici 2030 et à une division par 3 d'ici 2050 (soit 2 teqCO<sub>2</sub>/habitant).**

Aujourd'hui, l'empreinte GES d'un français moyen est de **10 teqCO<sub>2</sub>/an**  
=> Il doit donc diviser ses émissions par 5.

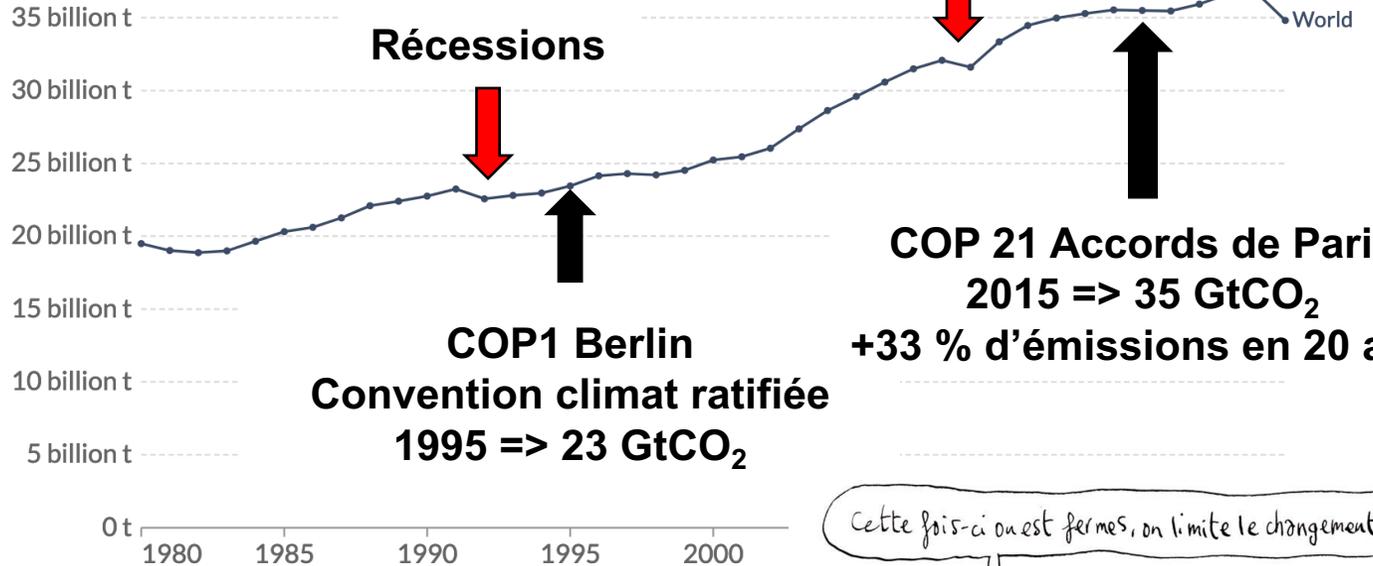
### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## Des COP (conférences des états signataires de la convention des Nations Unies sur le CC) tous les ans depuis 1995

#### Annual CO<sub>2</sub> emissions

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from the burning of fossil fuels for energy and transport, not included.

LINEAR LOG + Add country Relative change



Source: Global Carbon Project  
Note: CO<sub>2</sub> emissions are measured on a production basis, meaning they do not adjust for

**Pour le moment c'est toujours le scénario « Business as usual »**



Les dirigeants de la planète toujours plus déterminés

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## Les engagements de la COP 26 pas vraiment à la hauteur...

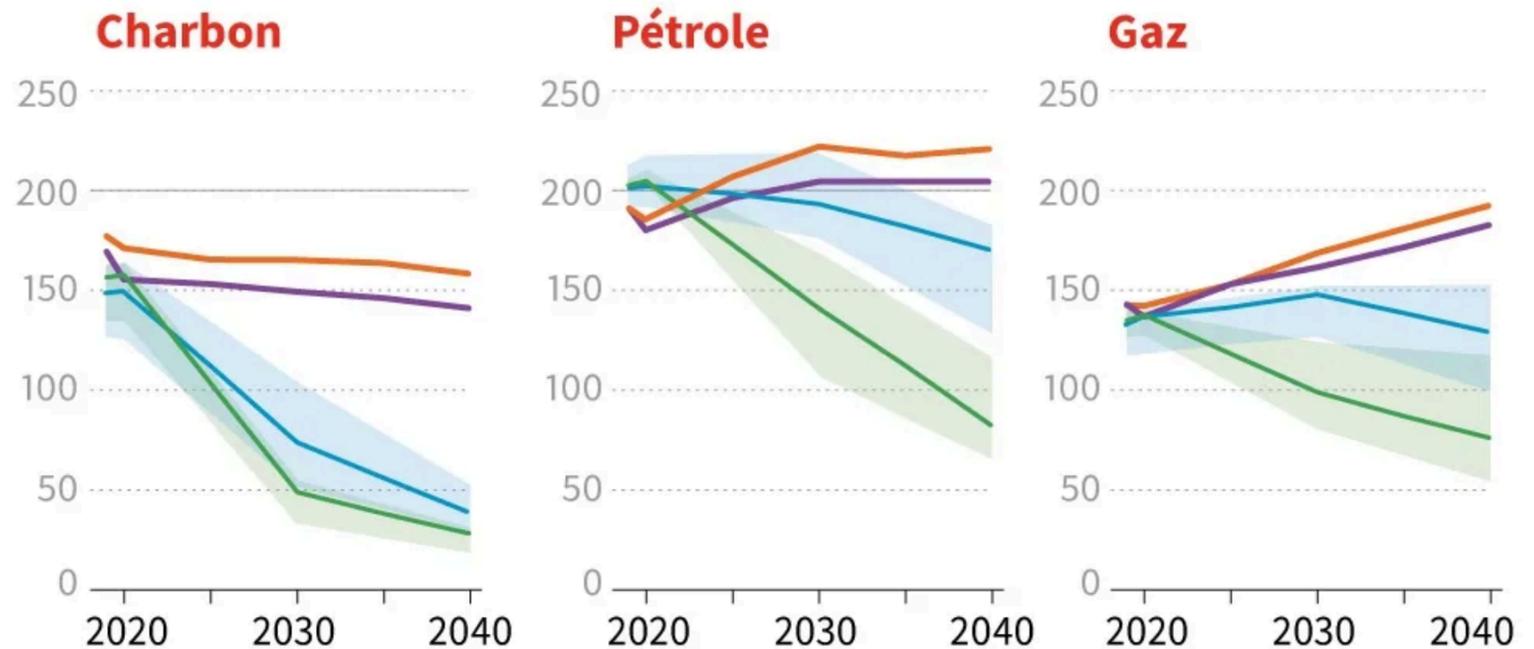
# PRODUCTION D'ÉNERGIES FOSSILES COP 26

— Prévisions mondiales — Engagements des pays (octobre 2021)

Scénarios compatibles avec un réchauffement :

— limité à 2°C — limité à 1,5°C

En exajoules par an

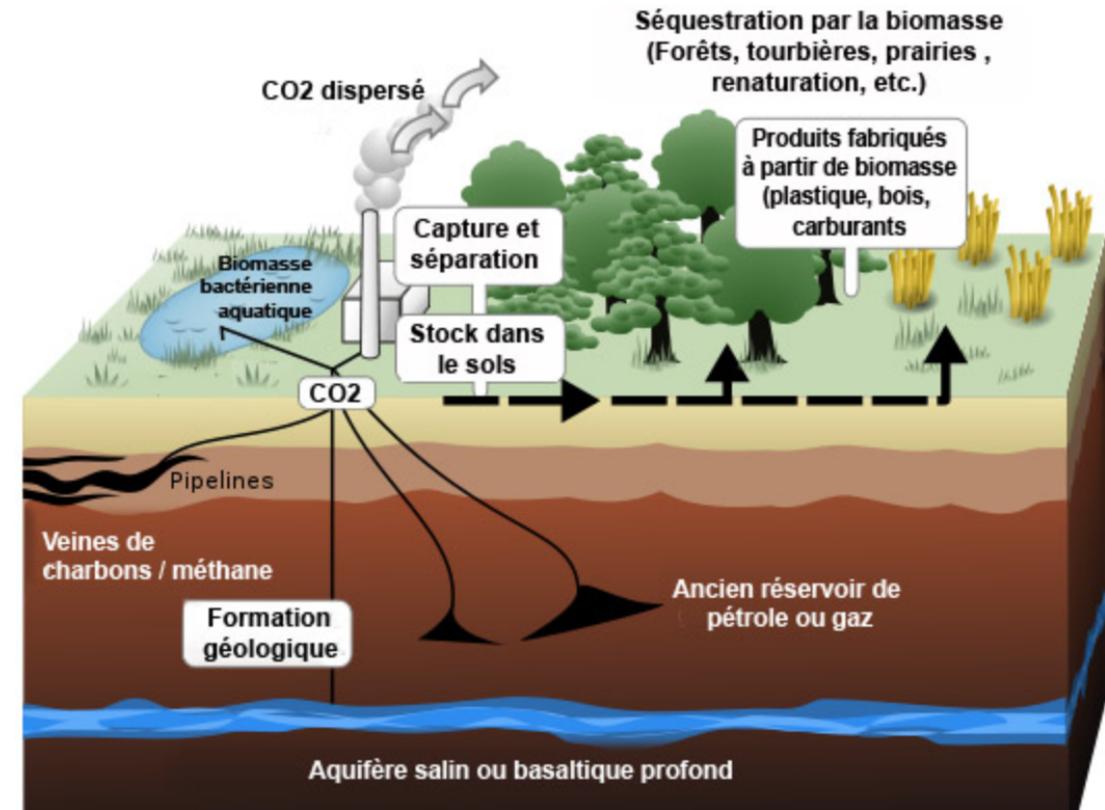


**Mais alors comment faire diminuer le CO<sub>2</sub> atmosphérique?**

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

Pour faire baisser la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pourquoi ne pas le capturer et le séquestrer ?

Deux possibilités :



En vidéo :  
<https://www.youtube.com/watch?v=AQIqQEhVi1M>

- **À la source** (ex. à la sortie de la cheminée de l'usine) => possible mais complexe et dépend du lieu où se trouve la source d'émission

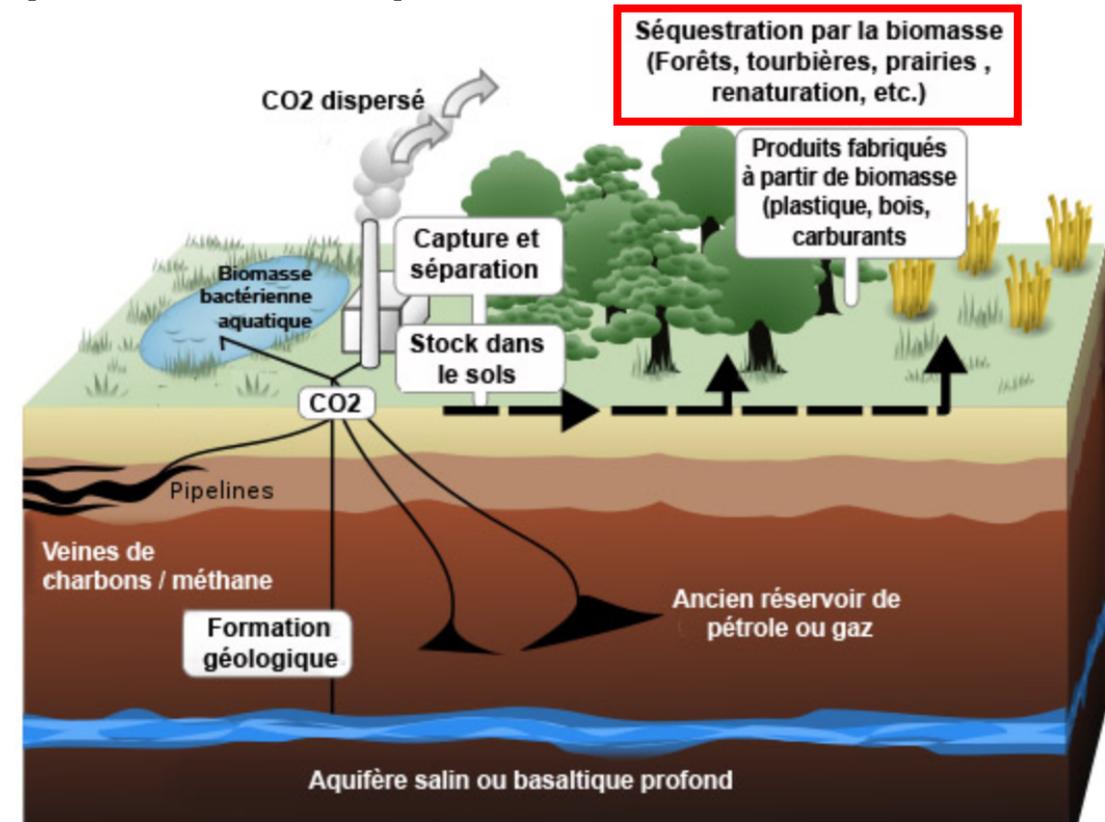
- **Dans l'atmosphère** => Capturer le CO<sub>2</sub> atmosphérique est très complexe car sa concentration atmosphérique est très faible (420 ppm = 0,042 %)...

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

Pour faire baisser la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pourquoi ne pas le capturer et le séquestrer ?

Deux possibilités :

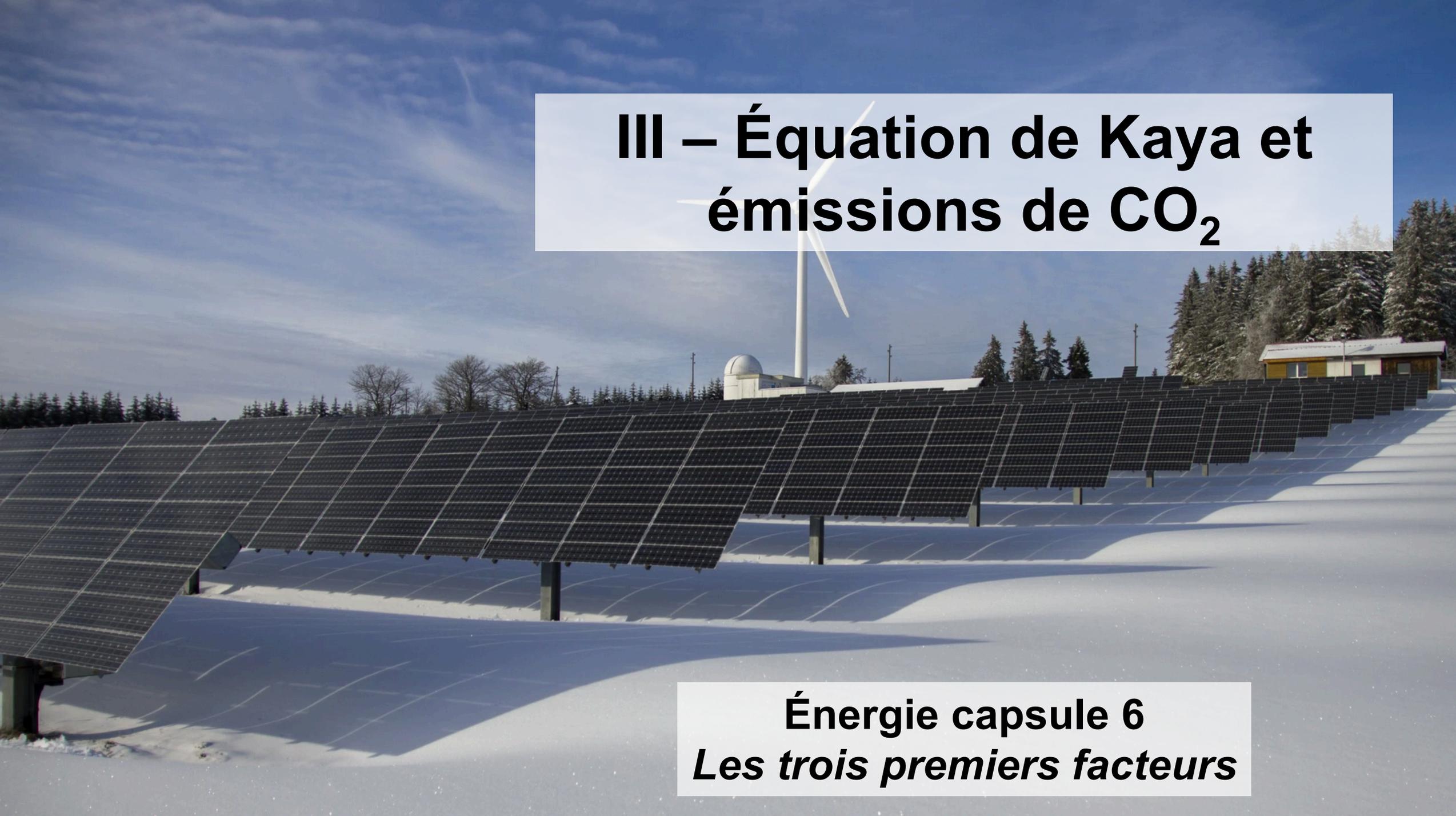
En vidéo :  
<https://www.youtube.com/watch?v=AQIqQEhVi1M>



- **Dans l'atmosphère =>** augmentation du couvert forestier ou végétal (= + de photosynthèse)

Une forêt en pleine croissance peut capter entre 10 et 37 tCO<sub>2</sub>/an/hectare. Mais problèmes du temps de croissance de la végétation + surface au sol.

**Si on ne peut pas vraiment faire diminuer le CO<sub>2</sub> atmosphérique, alors il faut réduire fortement nos émissions! Comment faire?**



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

**Énergie capsule 6**  
***Les trois premiers facteurs***

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## Quels facteurs influencent les émissions de CO<sub>2</sub> ?



# L'équation de Kaya

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


Yoichi Kaya

À diviser par  
3 en 30 ans

$$\boxed{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

$$\boxed{\text{Émissions de CO}_2} = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 1<sup>er</sup> facteur : la population

Taux de croissance et projection de la population mondiale

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie × Intensité énergétique de l'économie × Production par personne × Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

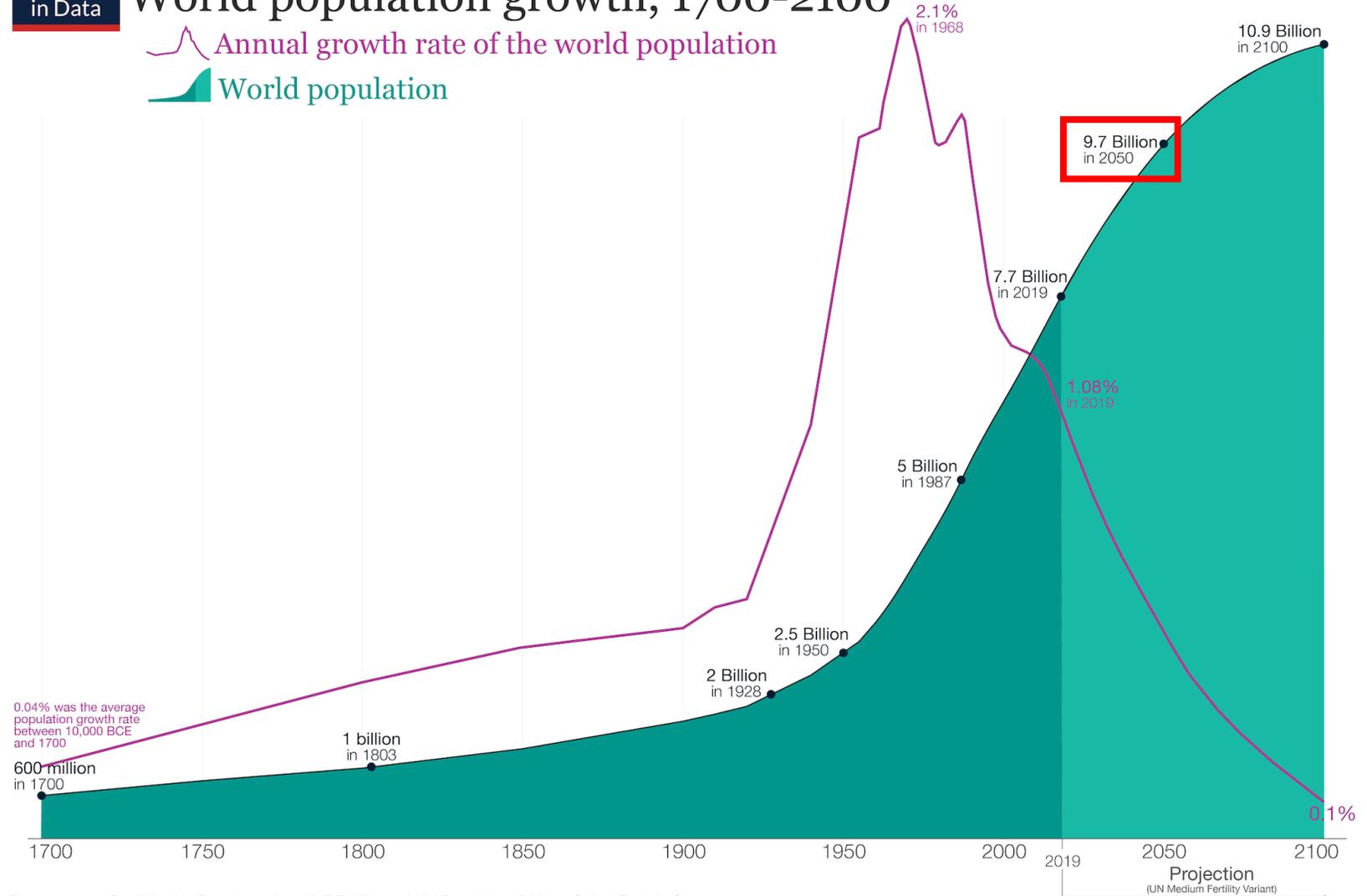
L'équation de Kaya

Our World in Data

### World population growth, 1700-2100

Annual growth rate of the world population

World population



Data sources: Our World in Data based on HYDE, UN, and UN Population Division [2019 Revision]  
This is a visualization from [OurWorldinData.org](https://www.ourworldindata.org), where you find data and research on how the world is changing.

Licensed under CC-BY by the author Max Roser.

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 1<sup>er</sup> facteur : la population

On ne peut pas vraiment agir sur le facteur population...

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie × Intensité énergétique de l'économie × Production par personne × Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

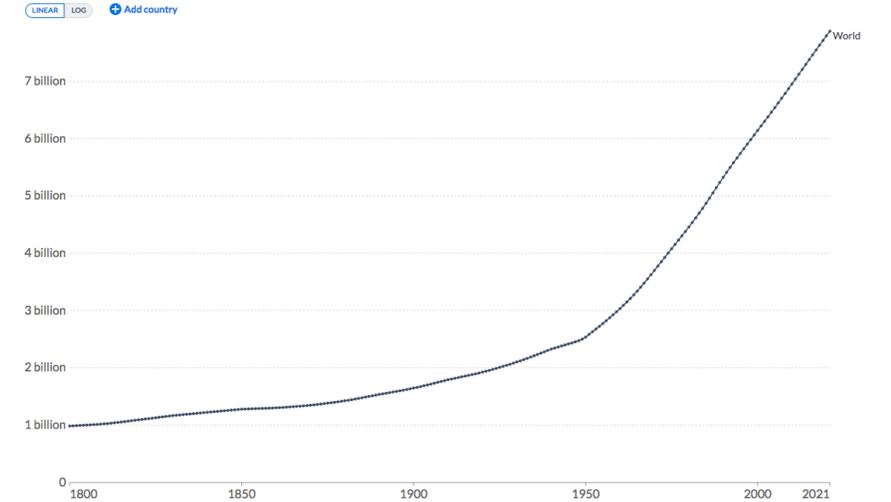
L'équation de Kaya

**Historiquement, à l'échelle mondiale, rien ne semble infléchir la croissance de la population**

**Plus localement, guerres, famines, maladies et migrations infléchissent « légèrement » les courbes de population**

**S'il semble impossible de faire diminuer la population mondiale, il est en revanche possible de ralentir son augmentation !**

Population, 1800 to 2021



Population, 1800 to 2021



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 1<sup>er</sup> facteur : la population

On ne peut pas vraiment agir sur le facteur population... mais on peut faire diminuer le taux de fécondité, pour ça, il faut des développements sociaux !

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

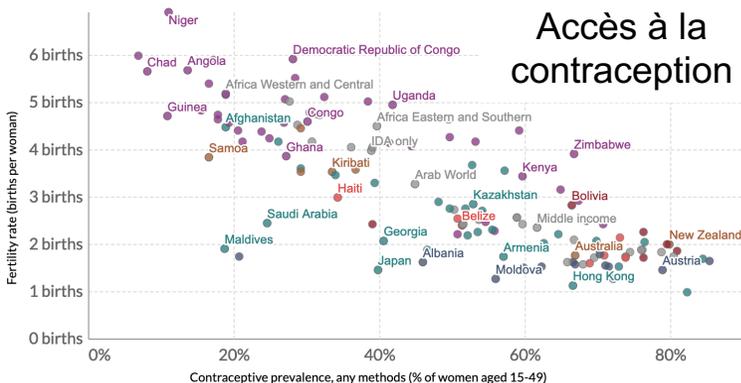
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### Fertility rate vs. contraceptive prevalence, 2020

Fertility rate is defined as the average number of births per woman during her reproductive years. Contraceptive prevalence is the percentage of women who are practicing, or whose sexual partners are practicing, any form of contraception. It is usually measured for women aged 15-49 who are married or in union.

Select countries Average annual change Hide countries < 1 million people

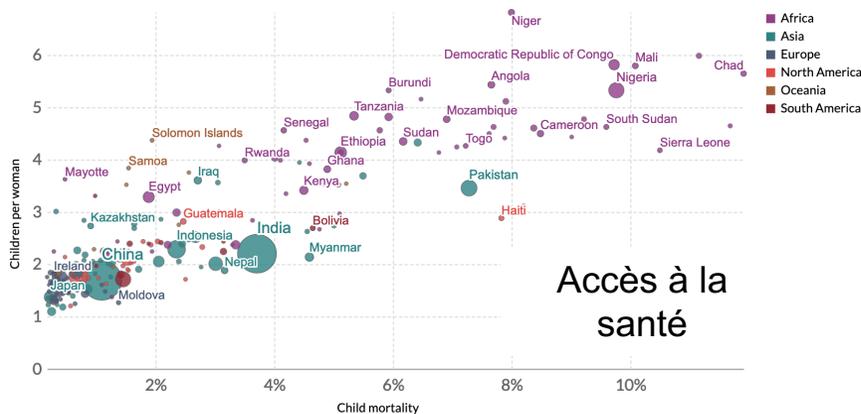


Source: Data compiled from multiple sources by World Bank

### Average number of children vs child mortality, 2019

Child mortality measures the share of children that die before their fifth birthday.

Y: LINEAR Y: LOG X: LINEAR X: LOG Select countries Average annual change Hide countries < 1 million people

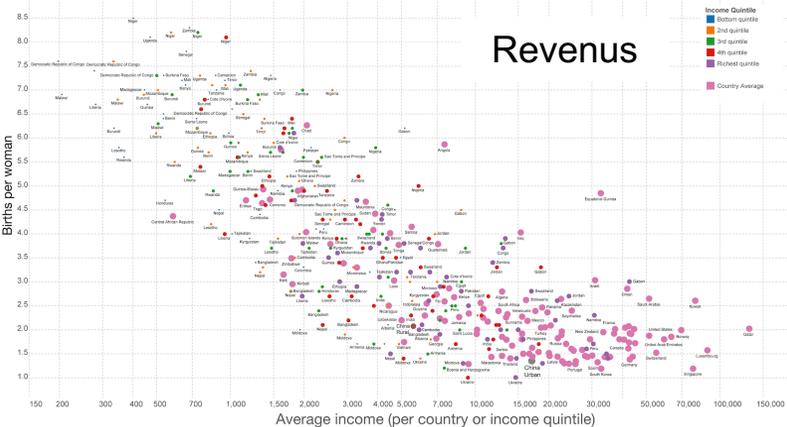


Source: UN Population Division (2019 Revision)

Our World in Data

### Births per woman by income level, 2013

Pink bubbles show country averages for income (GDP per capita, PPP adjusted) and for the total fertility rate. For all other countries the fertility rate is shown for each wealth quintile within the country. It is plotted against the average income per corresponding quintile in the same country.



CC BY

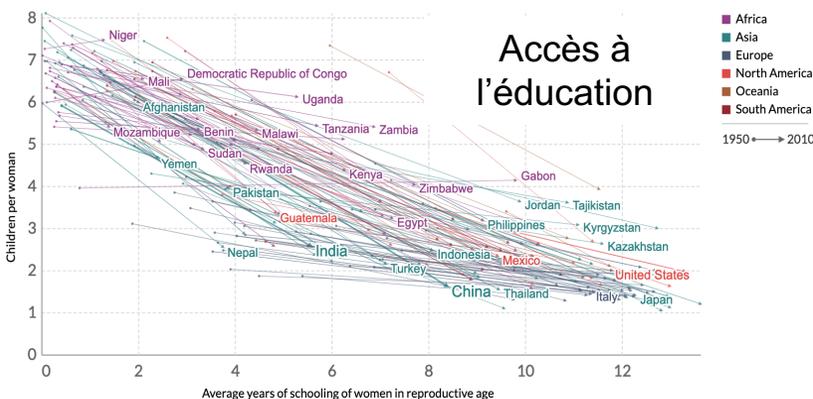
Data sources: World Bank for all income measures. Fertility rates: national averages from WDI. Fertility by wealth quintile from the DHS (via the WHO) - except for China for which data was added from various research papers. Most data are from 2013 - none of the data refer to a year earlier than 2005. Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

Our World in Data

### Women's educational attainment vs. number of children per woman

Shown on the x-axis is the average number of years of schooling of women in the reproductive age (15 to 49 years). On the y-axis you find the 'total fertility rate' - the number of live births per woman in reproductive age.

Select countries Average annual change Hide countries < 1 million people



Source: United Nations - Population Division (2019 Revision), Our World In Data (2017)

OurWorldInData.org/fertility-rate • CC BY

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 1<sup>er</sup> facteur : la population

### L'indice de développement humain

=> indice statistique composite visant à évaluer le taux de développement humain des pays du monde. (inclus : PIB/hab., espérance de vie, niveau d'éducation...)

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

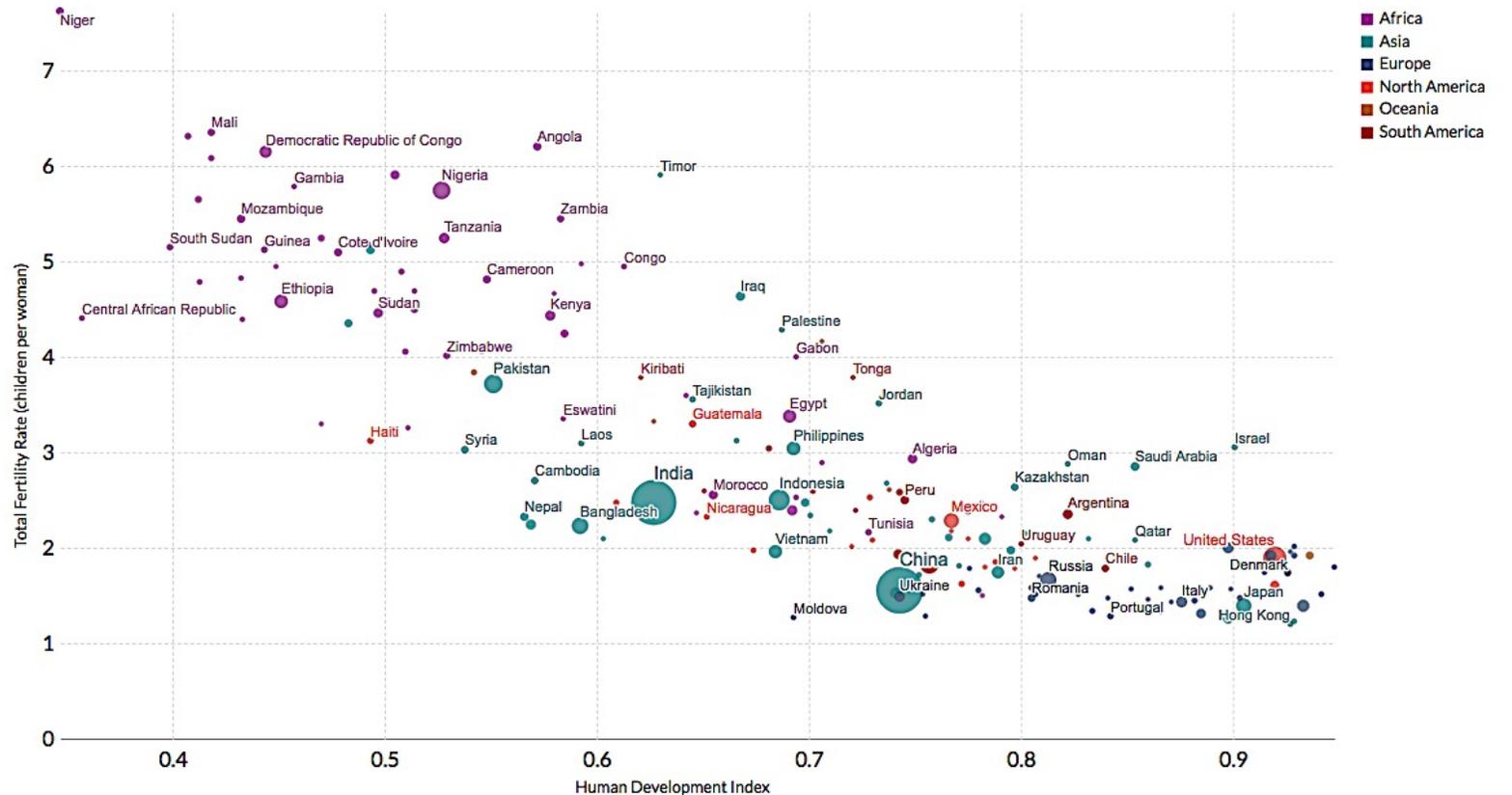
L'équation de Kaya

### The relationship between fertility and HDI through time, 2015

The Human Development Index measures human development by combining indicators of a country's health conditions, living standard and education level (weighted equally).



Select countries Average annual change Hide countries < 1 million people



Source: UN Population Division (Fertility) (2015 revision), United Nations Development Programme, Human Development Report 2020

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 2<sup>ème</sup> facteur : la production/personne

La production par personne est exprimée en \$/habitant = PIB mondial.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

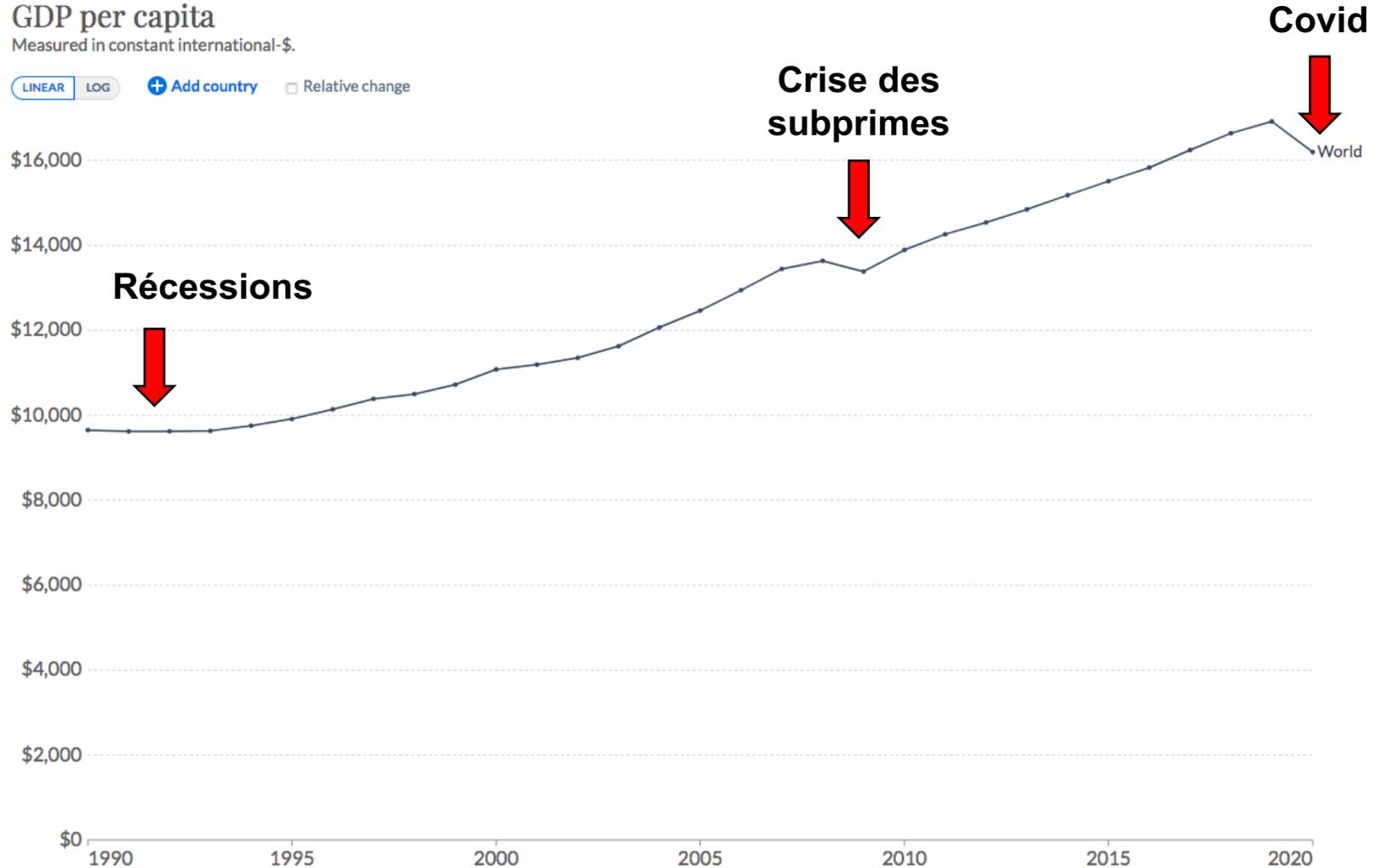
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### GDP per capita

Measured in constant international-\$.

LINEAR  LOG   Relative change



Source: Data compiled from multiple sources by World Bank

OurWorldInData.org/economic-growth • CC BY

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 2<sup>ème</sup> facteur : la production/personne

L'économie mondiale recherche un taux de croissance annuel de 2 %.

**2 % de croissance sur 30 ans = PIB x2**

**=> consommation énergétique x2!**

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

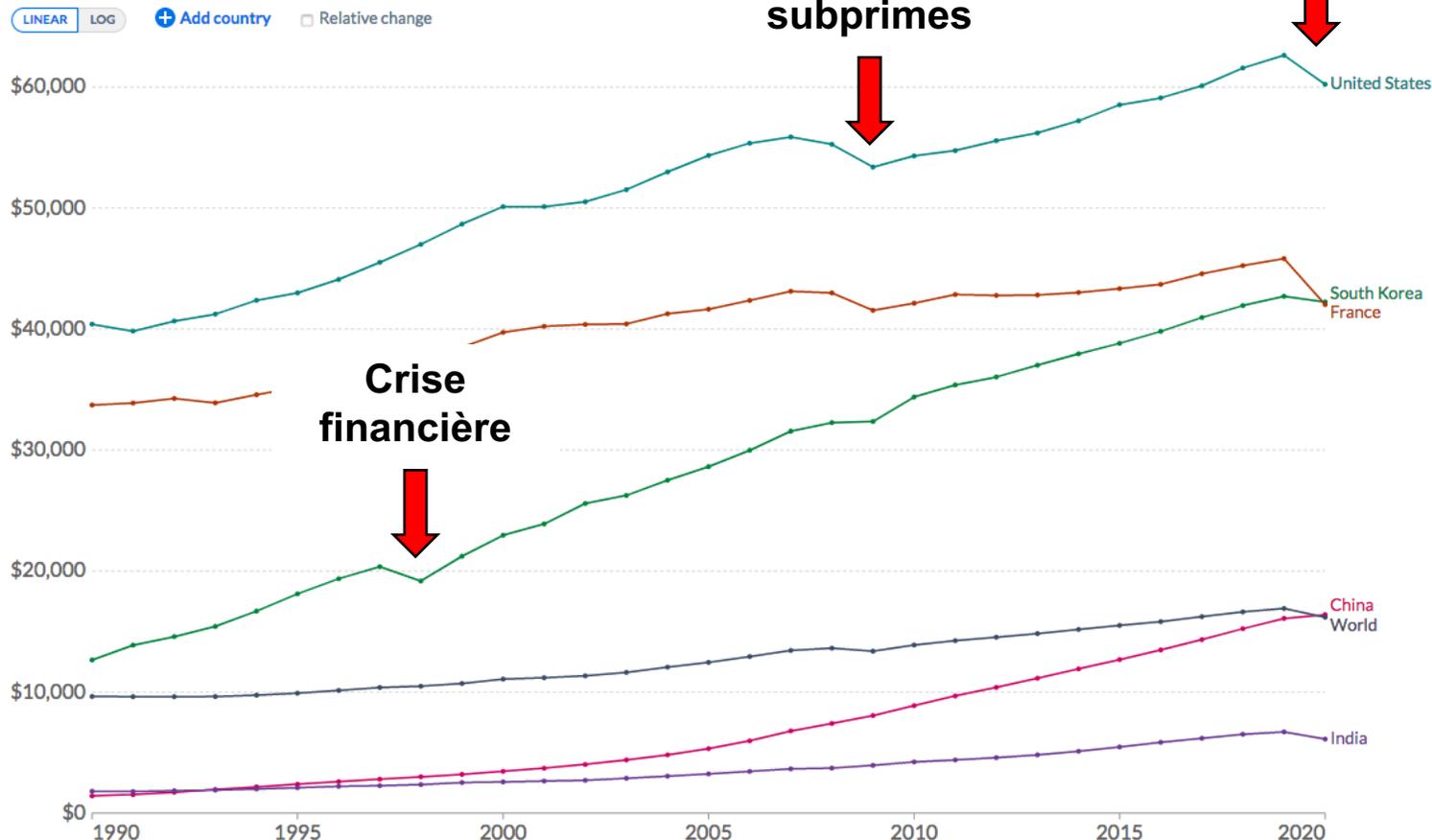
Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### GDP per capita

Measured in constant international-\$.  
LINEAR LOG + Add country Relative change



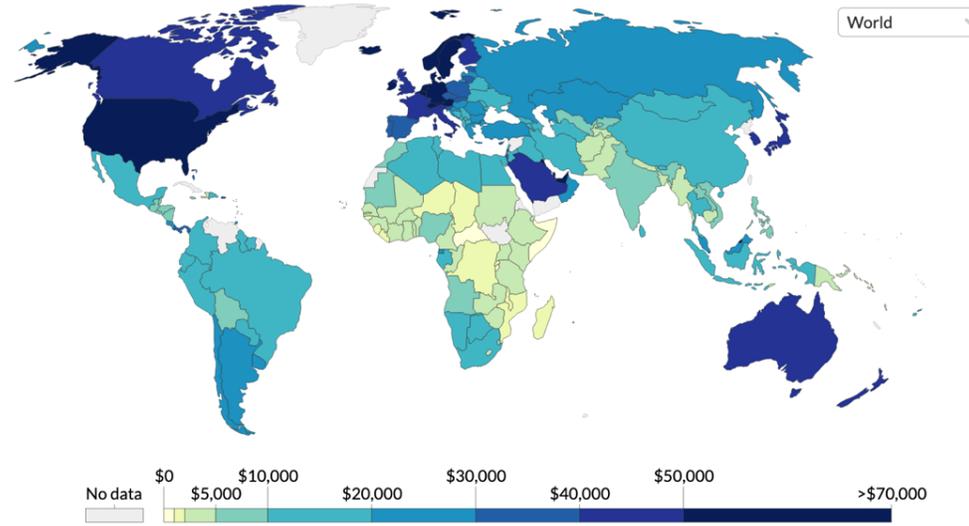
Source: Data compiled from multiple sources by World Bank

OurWorldInData.org/economic-growth • CC BY

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 2<sup>ème</sup> facteur : la production/personne

GDP per capita, 2017  
Measured in constant international-\$.

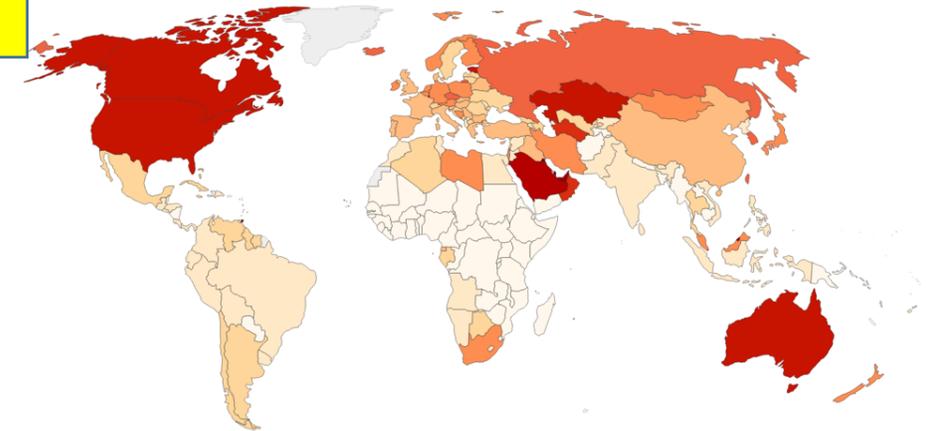


Source: Data compiled from multiple sources by World Bank

OurWorldInData.org/economic-growth • CC BY

## CO<sub>2</sub> emissions per capita, 2017

Average carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions per capita measured in tonnes per year.



Source: OWID based on CDIAC; Global Carbon Project; Gapminder & UN  
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

**Si population constante et PIB/pers x2 en 30 ans  
=> il faut diviser par 6 les émissions en jouant sur les 2 facteurs restants.**

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP}$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

PIB/habitant  
≈>  
CO<sub>2</sub>/habitant

Our World in Data

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 3<sup>ème</sup> facteur : l'intensité énergétique de l'économie

En kWh/\$. Améliorer l'intensité énergétique => **consommer moins d'énergie tout en conservant le même service**. L'intensité énergétique renvoie donc à **l'efficacité énergétique**.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### Energy intensity

Energy intensity is measured as primary energy consumption per unit of gross domestic product. This is measured in kilowatt-hours per 2011\$ (PPP).

Our World in Data

+ Add country

2.5 kWh

2 kWh

1.5 kWh

1 kWh

0.5 kWh

0 kWh

1965 1970 1980 1990 2000 2010 2016

En 50 ans, l'efficacité énergétique a permis une diminution de 45 % du nombre de kWh/\$

Quelques exemples :

- Isolation des bâtiments
- Amélioration des procédés industriels
- Amélioration de l'efficacité des équipements...

**A ce rythme là, il paraît difficile que l'efficacité énergétique permette de diviser les émissions par 3 en 30 ans...**

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 3<sup>ème</sup> facteur : l'intensité énergétique de l'économie

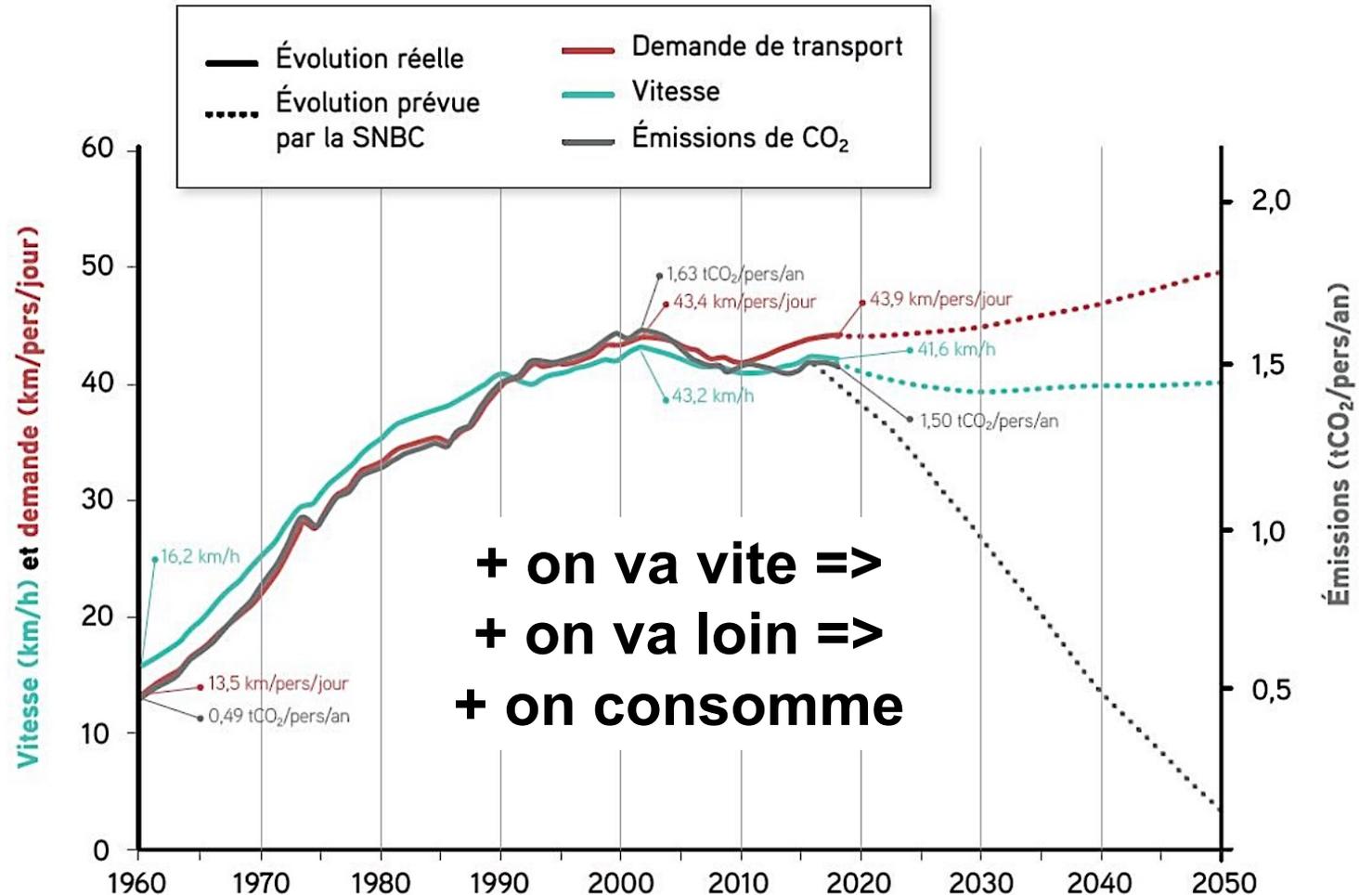
**Paradoxe de Jevons** (effet rebond) : quand un objet gagne en efficacité énergétique, son prix d'utilisation baisse, il est donc plus utilisé...

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya



**+ on va vite =>  
+ on va loin =>  
+ on consomme**



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

**Énergie capsule 7**  
*Le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie*

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

Jouer sur la quantité de CO<sub>2</sub>/kWh =>

**utiliser des sources dé-carbonées d'énergie.**

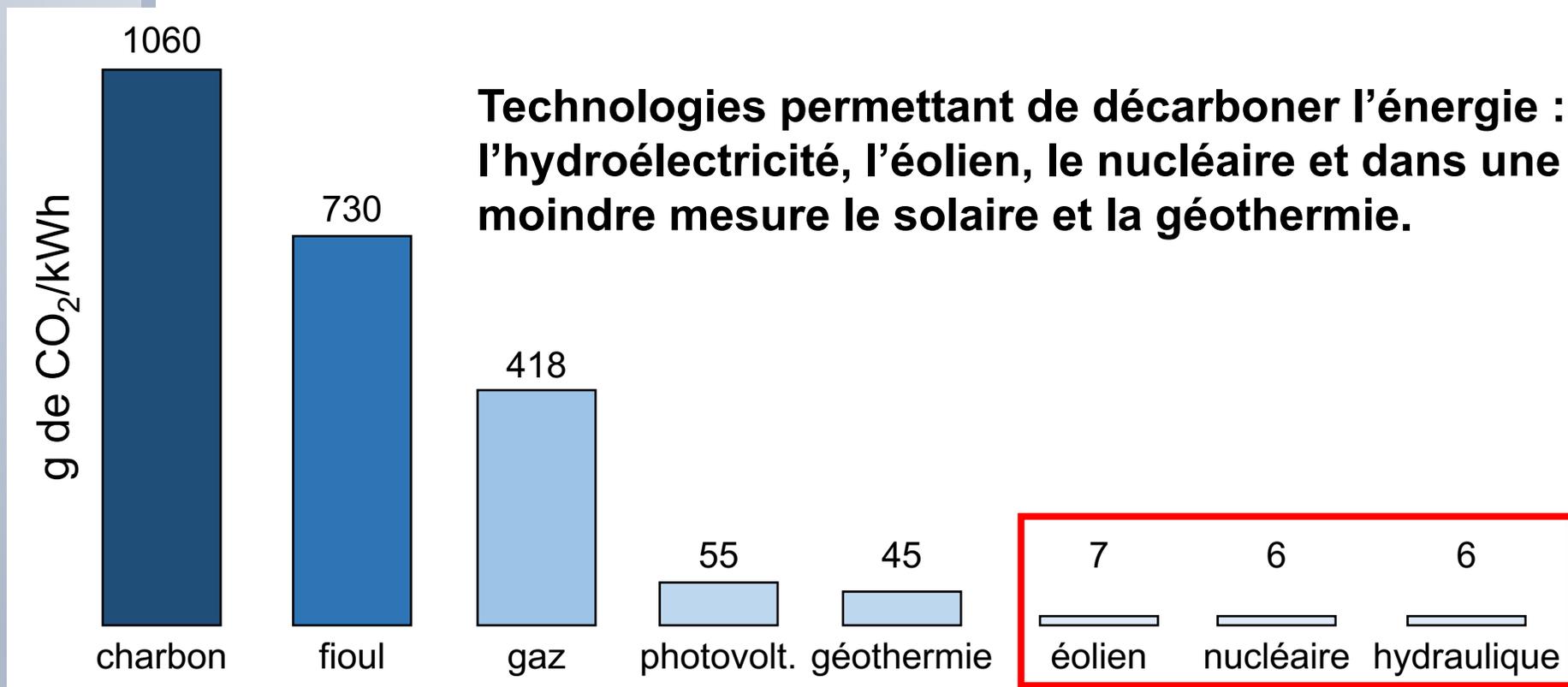
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### Quelles sources d'énergies émettent le moins de gaz à effet de serre?



**Technologies permettant de décarboner l'énergie : l'hydroélectricité, l'éolien, le nucléaire et dans une moindre mesure le solaire et la géothermie.**

Contenu en CO<sub>2</sub> du kWh à la production (source Ademe)

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie × Intensité énergétique de l'économie × Production par personne × Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

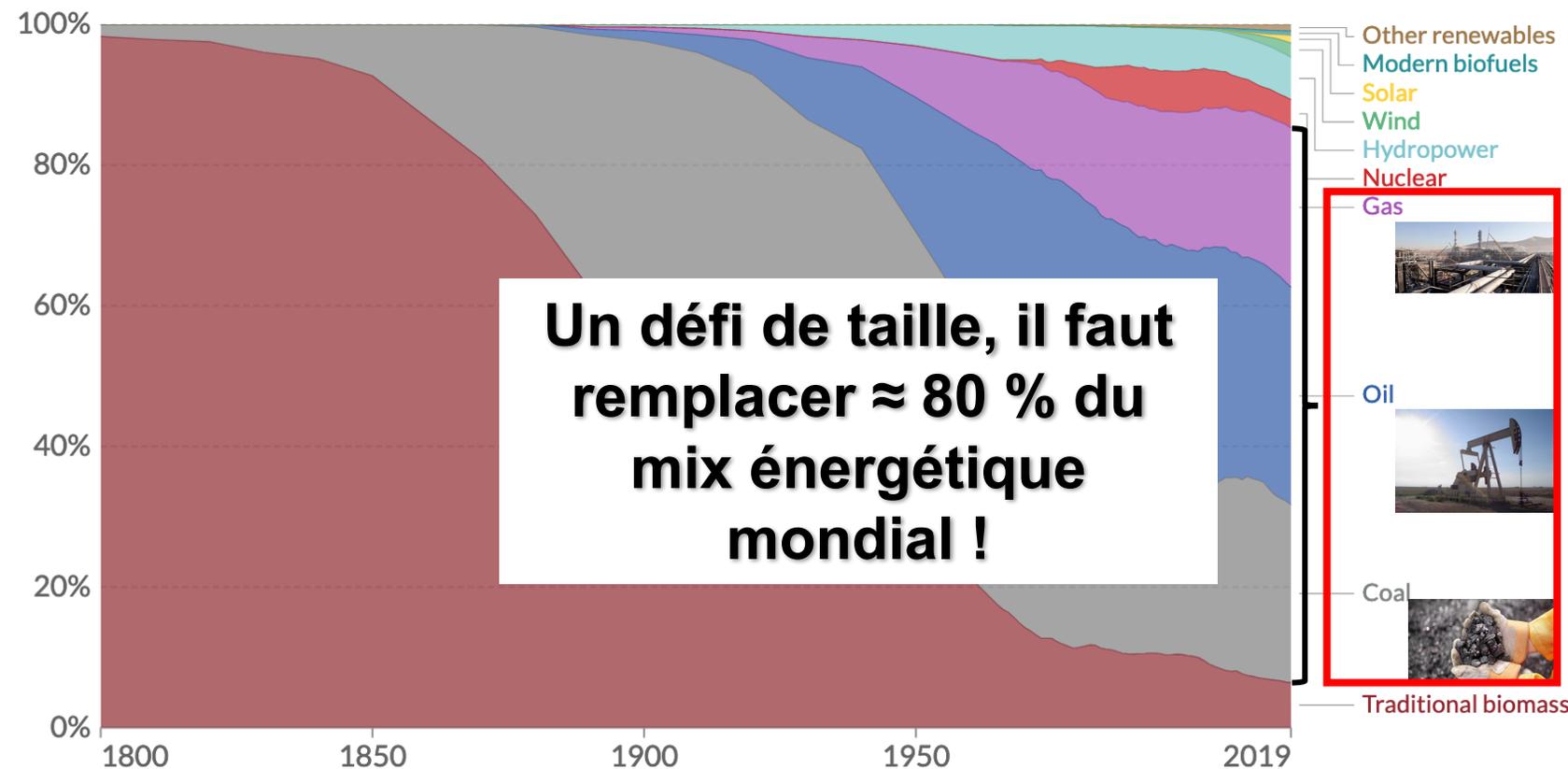


## Répartition (%) du mix énergétique mondial en énergie primaire

### Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.

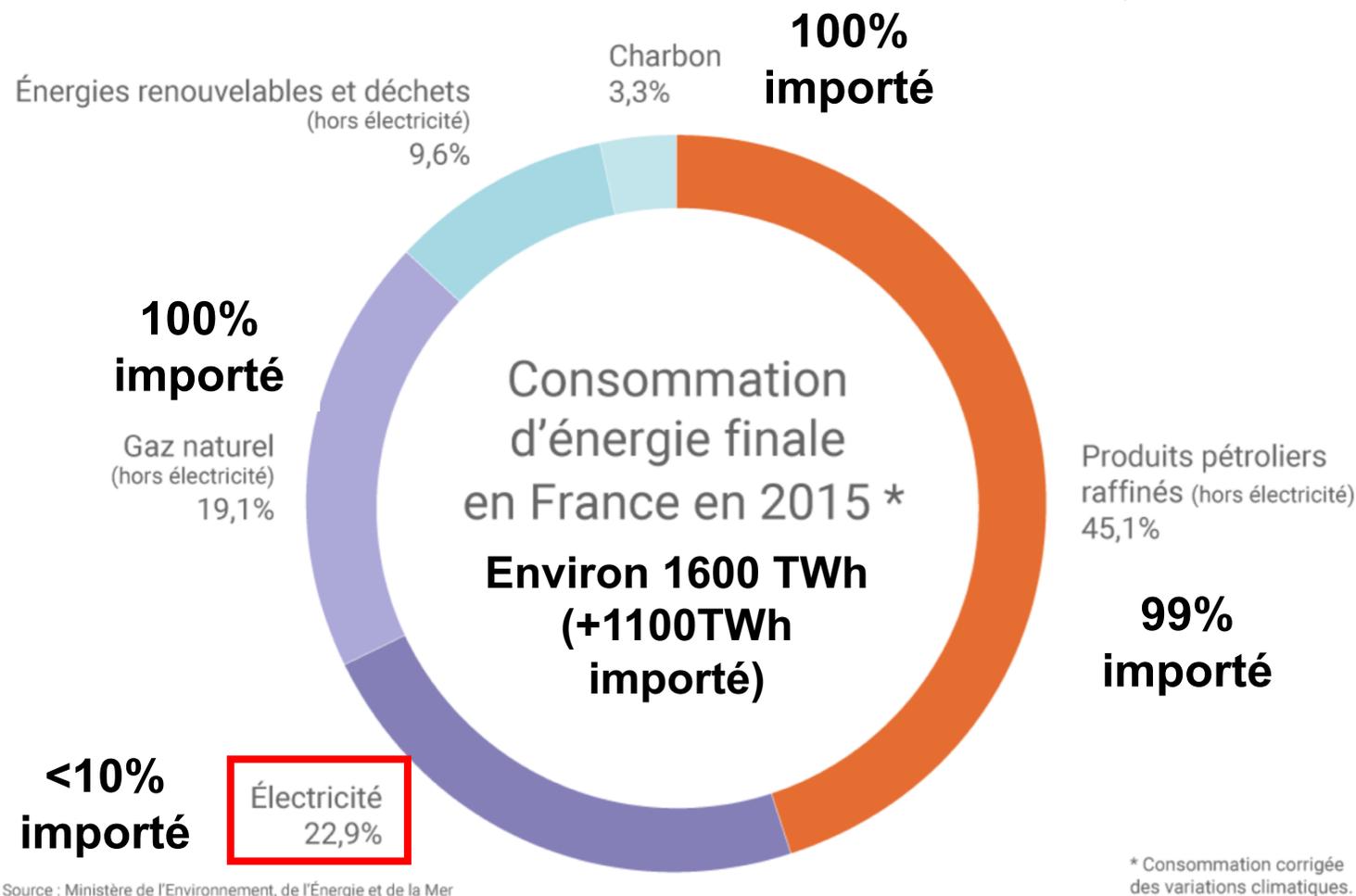
Relative



### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

#### Formes d'énergies dans la consommation finale en France



$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

Source : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

**En France, l'électricité ne représente que 23 % de l'énergie utilisée**

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

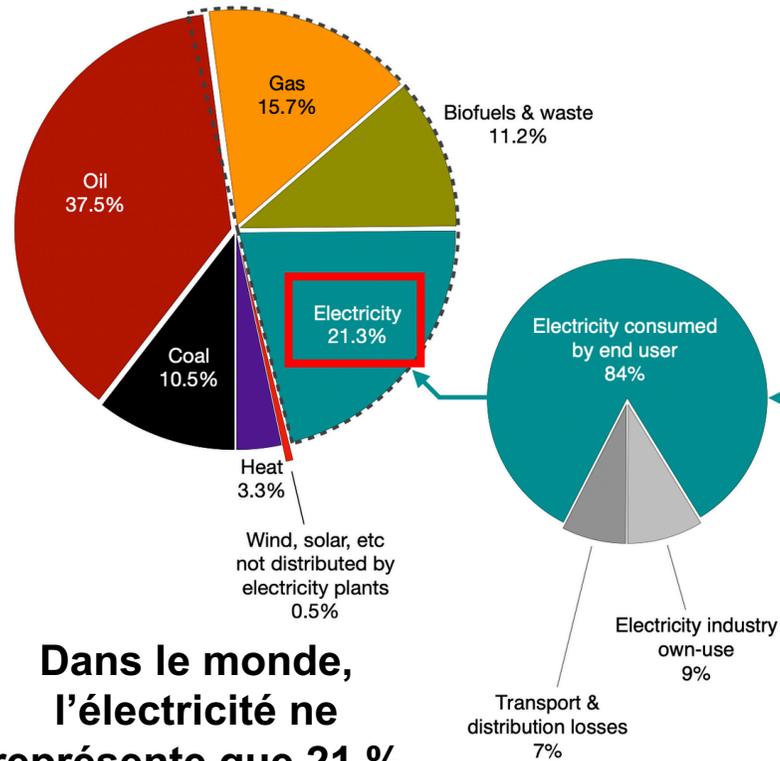
Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

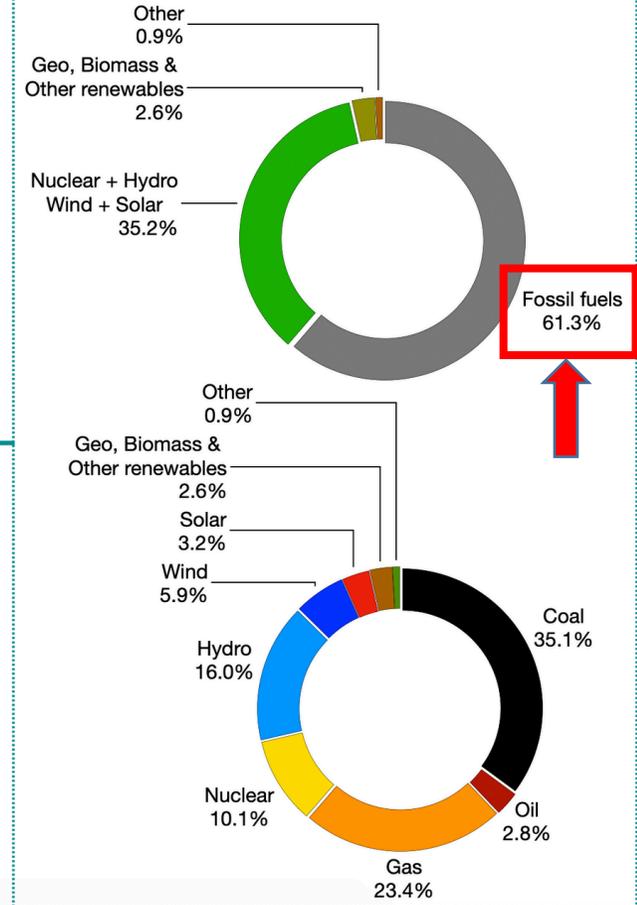
## Formes d'énergies dans la consommation finale dans le monde

World total final consumption (TFC), by share of fuel, 2018. Data: IEA(2020).



**Dans le monde, l'électricité ne représente que 21 % de l'énergie utilisée !**

World electricity generation, 2020. Data: bp(2021).



**Décarboner uniquement l'énergie électrique ne permet pas de décarboner l'ensemble de l'énergie consommée !**

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Formes d'énergies dans la consommation finale dans le monde par secteurs

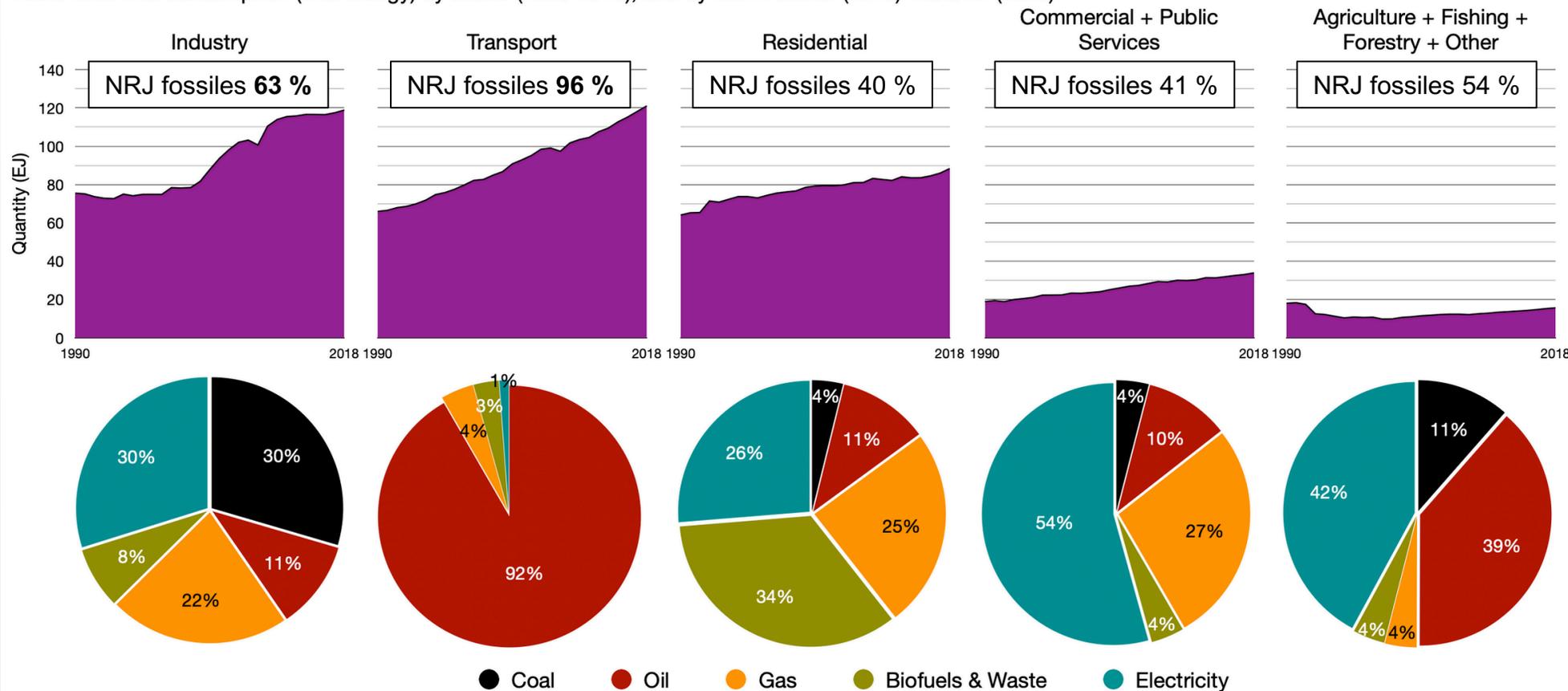
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

World total final consumption (final energy) by sector (1990-2018), and by fuel in sector (2018). Data IEA(2020).



Certains secteurs (**transport, industrie...**) sont très dépendants des énergies fossiles. Le **passage à l'électricité** n'est pas impossible mais va poser des problèmes de ressources (batteries...) et de production.

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \text{PIB} \times \text{POP}$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

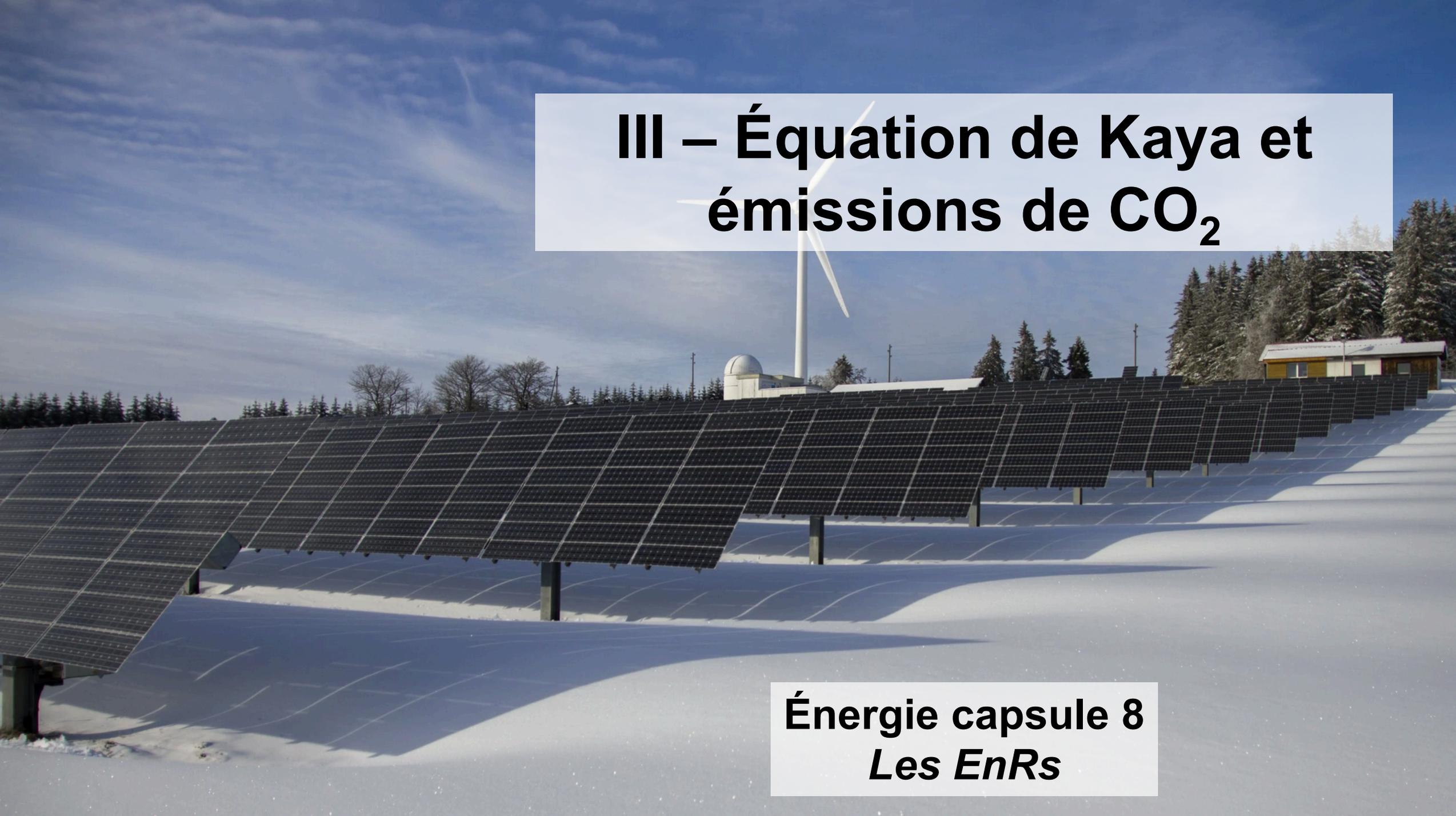
**Analysons les deux solutions possibles pour décarboner l'énergie et diviser par 3 les émissions de GES : les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire.**



EnRs



Nucléaire



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

Énergie capsule 8  
*Les EnRs*

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

En 2019, les **énergies renouvelables** représentent **16 % de l'énergie consommée dans le monde** :

- 6 % sont de la **biomasse**
- 6 % sont de l'énergie **hydraulique**
- Les 4 % restants correspondent majoritairement à l'énergie **éolienne**, à l'énergie **solaire** (+ géothermie, hydrogène...)



$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \text{PIB} \times \text{POP}$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

### L'équation de Kaya



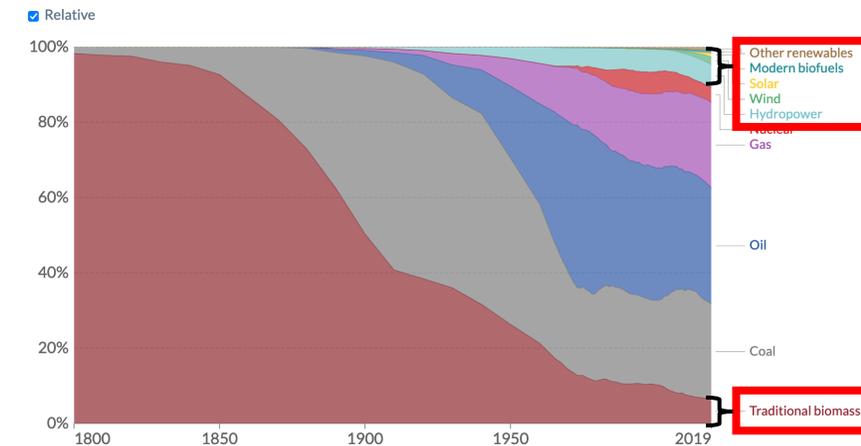
2 %



1 %

### Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### La biomasse

La biomasse (majoritairement du bois) a un potentiel limité à la surface utilisable.

Dans certains pays, comme la France, la forêt est en expansion, il y a donc un potentiel (limité) de production.

**Mais nous avons besoin d'un boisement en expansion pour séquestrer un maximum de carbone.**

Le biogaz (du méthane !) et les biocarburants nécessitent des cultures dédiées pour prendre de l'ampleur mais...

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times PIB \times POP$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### L'hydraulique

L'énergie hydraulique est très décarbonée mais son potentiel est en grande partie déjà exploité en Europe. Il peut encore croître dans le reste du monde.

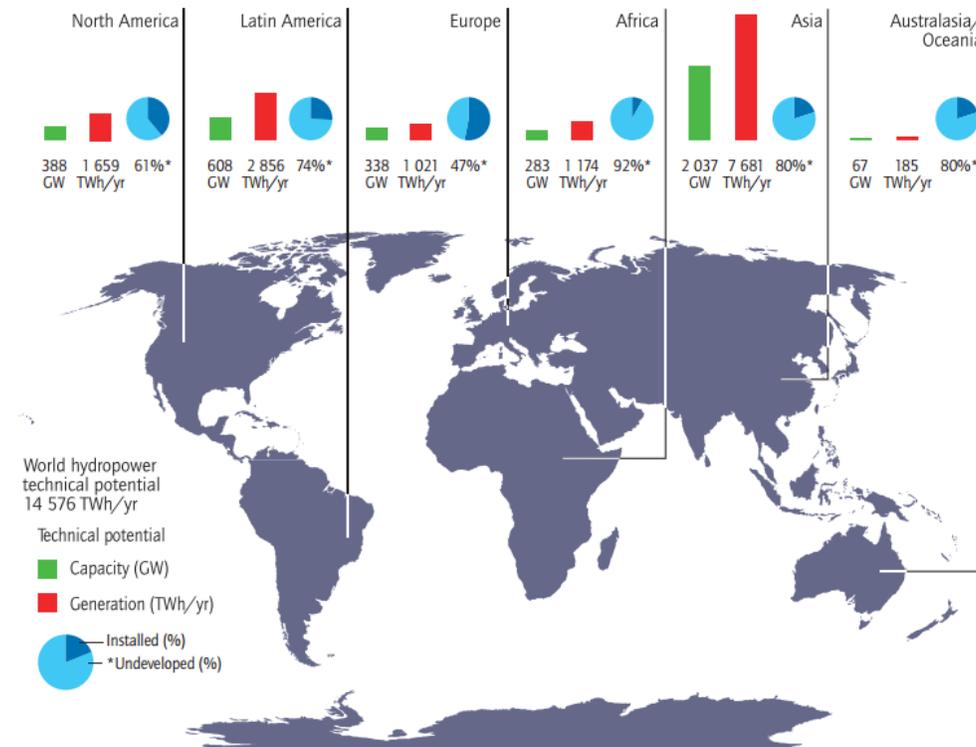
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

Figure 8: Regional hydropower technical potential and percentage of undeveloped technical potential



Source: IPCC, 2011, based on IJHD, 2010.

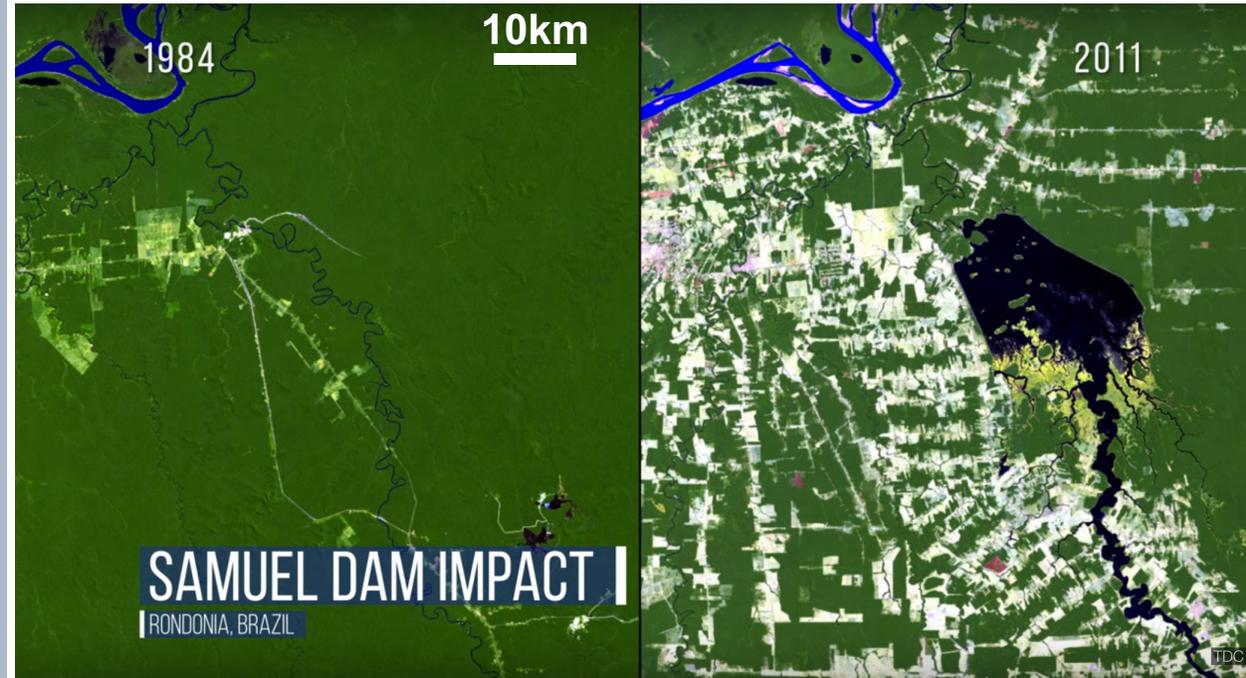
### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

#### Les énergies renouvelables

#### L'hydraulique

Impact environnemental souvent sous-estimé



- Destructions d'habitats, fragmentation de populations, barrières migratoires
- Développement de maladies infectieuses (hôtes : moustiques, escargots...)
- Déplacement de population (barrage des 3 gorges => 1 millions de déplacés)
- Risque d'accident (barrage de Banqiao en 1975 => suite au passage du typhon Nina destruction de 62 barrages en série => 26 000 à 240 000 morts).

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{TEP}} \times \text{POP}$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### L'hydrogène

L'hydrogène : élément le plus abondant dans l'univers. Cependant, sur Terre, il n'est que très rarement présent naturellement sous sa forme exploitable de dihydrogène (H<sub>2</sub>).  
Donc...

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

VOILÀ TOUT  
CE QU'ON REJETTE EN ROULANT  
À L'HYDROGÈNE.



Rouler à l'hydrogène, c'est ne rejeter que de l'eau, sans émission de CO<sub>2</sub>.  
Dès aujourd'hui, Plastic Omnium propose aux constructeurs  
une solution hydrogène globale, depuis le stockage jusqu'au système  
à hydrogène intégré, en passant par la pile à combustible.

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### L'hydrogène

L'hydrogène : élément le plus abondant dans l'univers. Cependant, sur Terre, il n'est que très rarement présent naturellement sous sa forme exploitable de dihydrogène (H<sub>2</sub>).

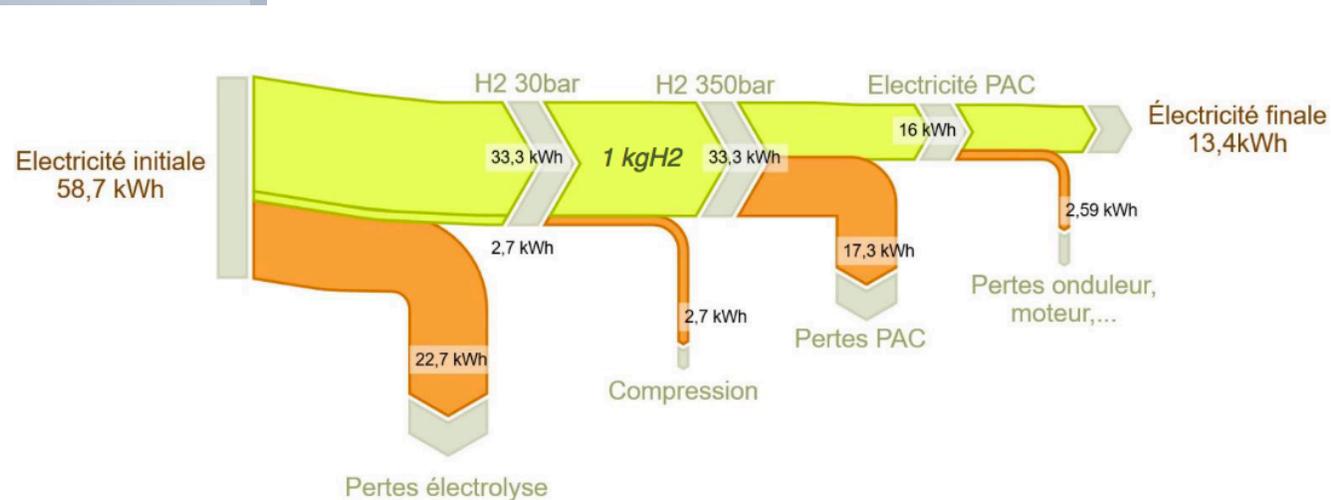
Donc... **Il faut donc le produire** => électrolyse de l'eau => **mais pour ça il faut de l'électricité** qui est encore aujourd'hui majoritairement basée sur des ressources fossiles...

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \text{PIB} \times \text{POP}$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### L'hydrogène

**Production d'hydrogène possible avec solaire/éolien**, mais coûts des électrolyseurs et des piles à hydrogène beaucoup trop élevés, pour le rendre accessible financièrement au plus grand nombre.

Il faut => une amélioration de ces dispositifs (efficacité énergétique, durabilité, augmentation des volumes produits...) = structuration industrielle de la filière => plusieurs dizaines d'années...

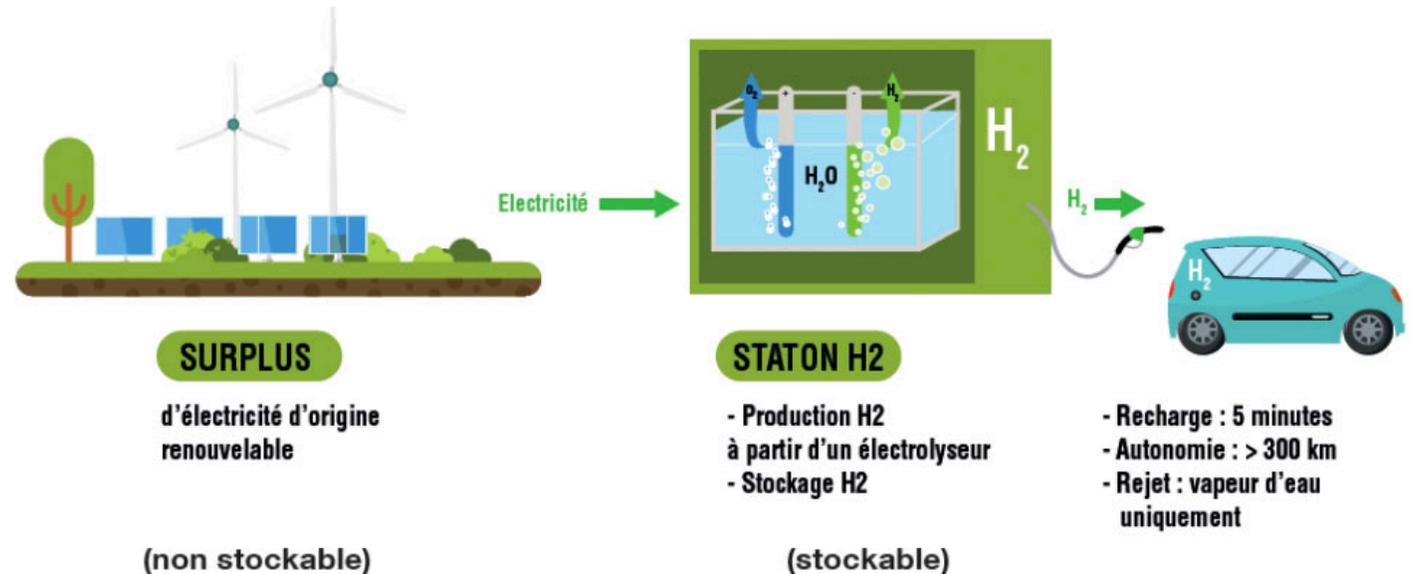
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

#### Hydrogène vert : production et stockage



## III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

#### Les énergies renouvelables

##### Le solaire et l'éolien

Impact carbone << charbon, pétrole & gaz

Mais plusieurs problèmes :

**1- Elles sont difficiles à capter**

**2- Elles sont intermittentes**

**3- Elles nécessitent bcp de ressources**

**4- Elles sont peu efficaces**

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \text{PIB} \times \text{POP}$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### Le solaire et l'éolien : difficiles à capter

Potentiel énorme mais très diffus

=> énergies difficiles à capter + il faut au minimum du vent ou du soleil.

Leur caractère diffus => rendements énergétiques faibles : < 45 % pour l'éolien (rendement en fonction de la vitesse du vent) et 6-24 % pour le photovoltaïque (rendement optimal autour de 25°C).

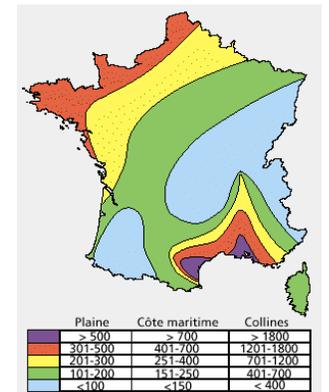
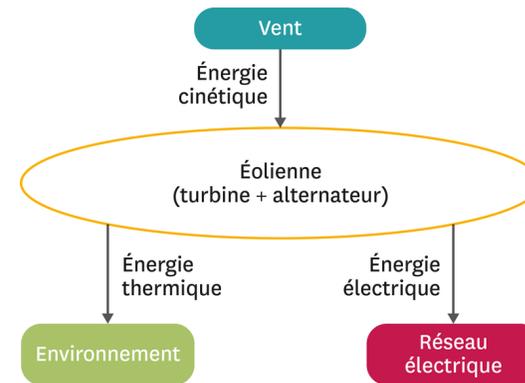
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

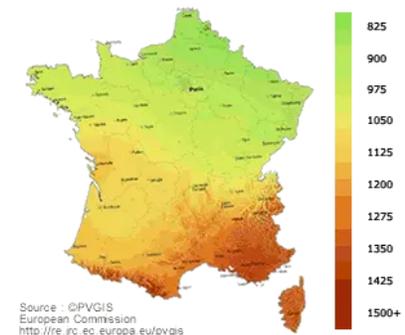
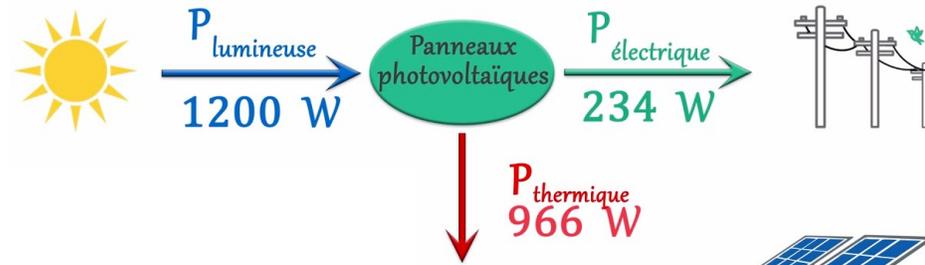
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### Éolien



### Solaire



### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

#### Les énergies renouvelables

#### Le solaire et l'éolien : intermittentes

Encore une fois, **il faut au minimum du vent et/ou du soleil!**

On remarque que malgré une puissance installée de 205 GW, la puissance de production moyenne est seulement de 30-40 GW, soit 15-20 % de la puissance installée.

=> nécessité d'un système permettant de compenser cette intermittence.

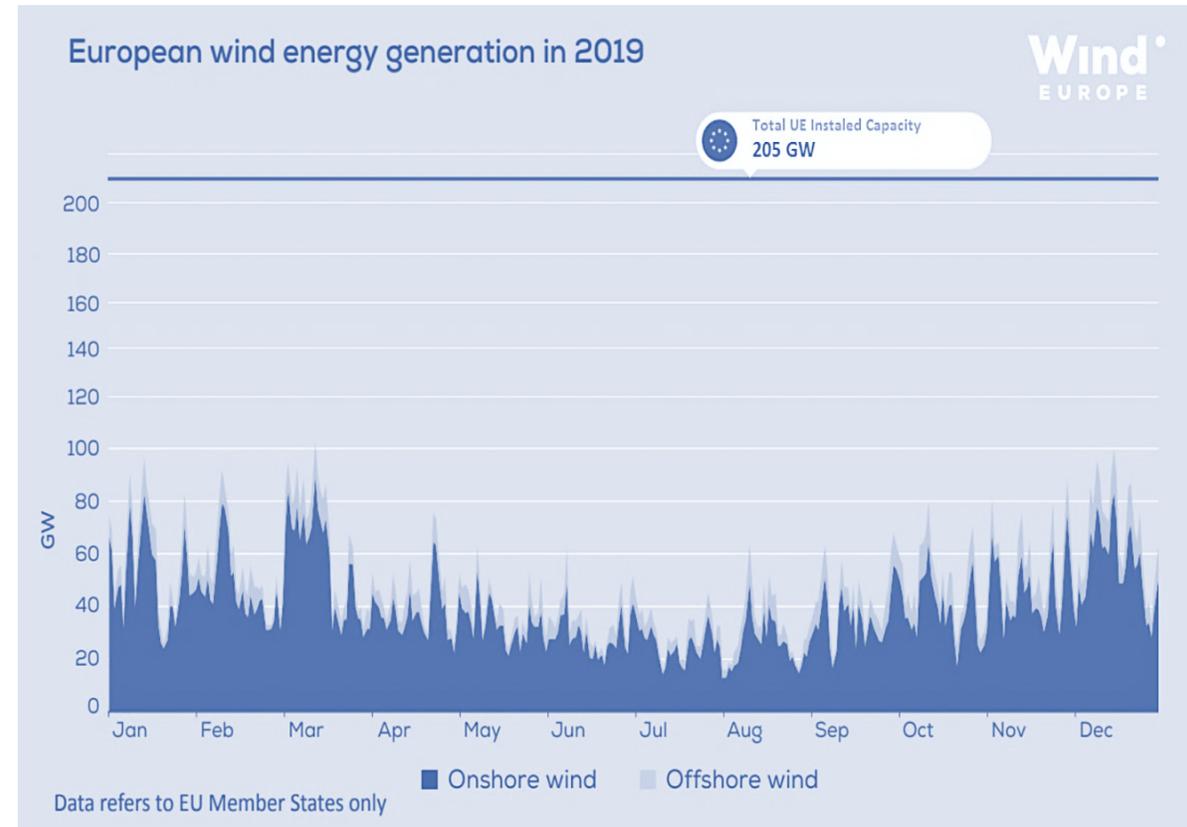
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

#### Éolien européen



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### Le solaire et l'éolien : intermittentes

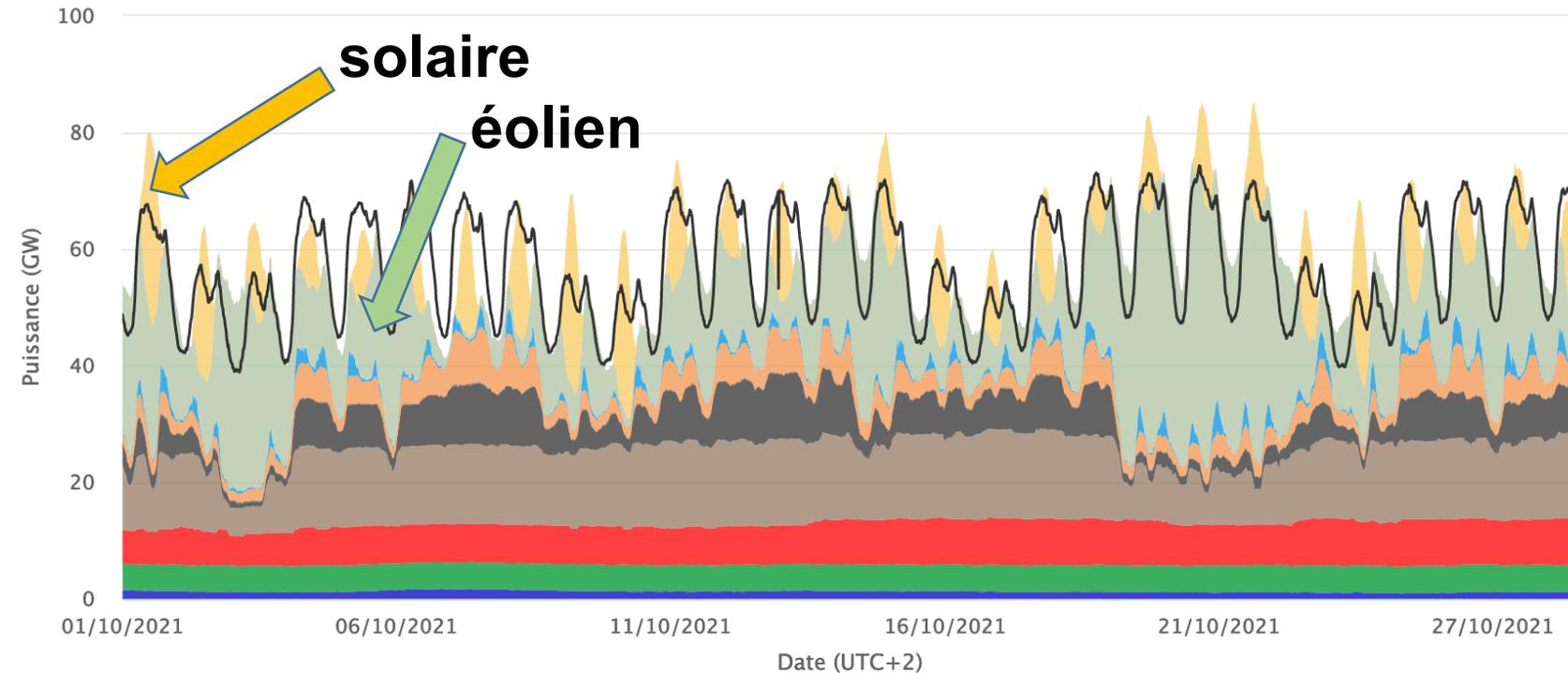
$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

Production nette d'électricité en Allemagne en octobre 2021



- Hydraulique STEP consommation
- Biomasse
- Houille
- Autres
- Éolien

- Solde des importations
- Nucléaire
- Fioul
- Hydraulique STEP
- Solaire

- Hydraulique fil de l'eau
- Lignite
- Gaz
- Hydraulique lacs
- Charge

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

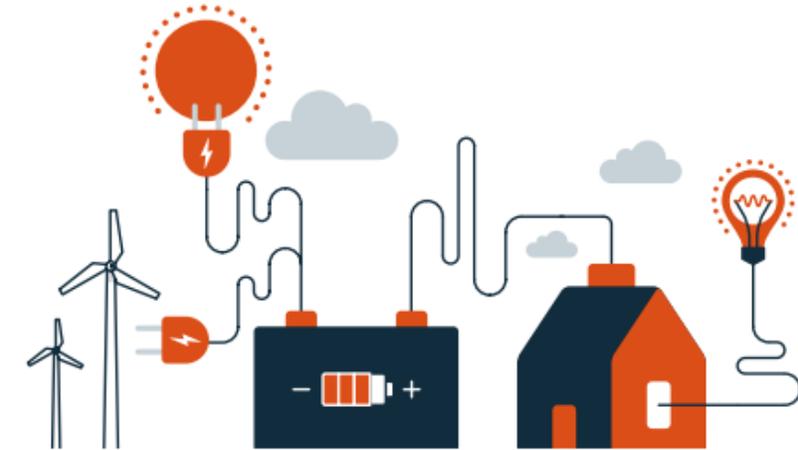
#### Le solaire et l'éolien : intermittentes

2 solutions :

- **Dispositif de stockage** (batterie)

=> l'impact carbone de l'énergie s'envole. Pour le solaire, il peut atteindre 200 gCO<sub>2</sub>/kWh.

- **Dispositif de redondance** qui permet d'assurer la production quand ces énergies intermittentes ne fonctionnent pas => doubler la puissance installée pour une consommation similaire.



+



Utilisé uniquement les jours sans vent ni soleil

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### Le solaire et l'éolien : ressources

Sont-elles réellement des énergies renouvelables si le dispositif de capture ne l'est pas ?

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times PIB \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

Materials (ton/TWh)	Generator only			
	Coal	NGCC	Nuclear PWR	Biomass
Aluminum	3	1	0	6
Cement	0	0	0	0
Concrete	870	400	760	760
Copper	1	0	3	0
Glass	0	0	0	0
Iron	1	1	5	4
Lead	0	0	2	0
Plastic	0	0	0	0
Silicon	0	0	0	0
Steel	310	170	160	310

Upstream energy collection plus generator			
Hydro	Wind	Solar PV (silicon)	Geothermal HT binary
0	35	680	100
0	0	3,700	750
14,000	8,000	350	1,100
1	23	850	2
0	92	2,700	0
0	120	0	9
0	0	0	0
0	190	210	0
0	0	57	0
67	1,800	7,900	3,300

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

### Consommation de minerais /TWh pour différentes énergies

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

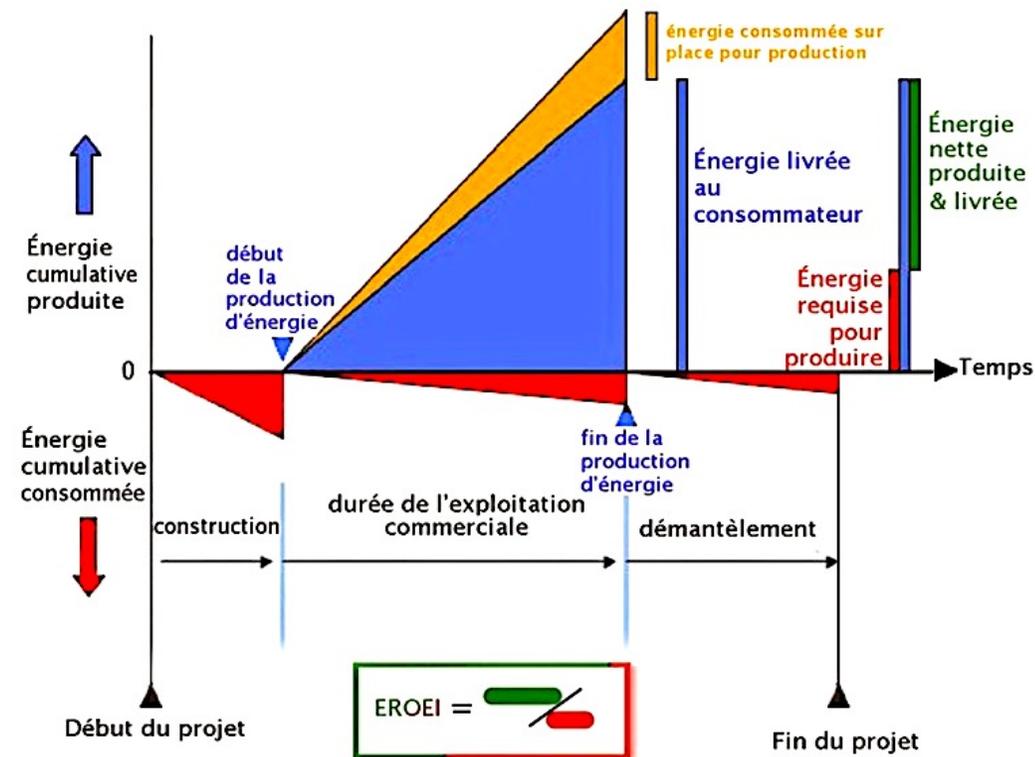
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### Le solaire et l'éolien : peu efficaces

Le taux de retour énergétique (TRE ou EROEI) est le ratio entre l'énergie utilisable et celle consommée pour l'obtenir.

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



Ex. un TRE de 5, signifie que pour 1 kWh dépensé, l'énergie récupérée est de 5 kWh => si un dispositif de captation/production à une durée de vie de 25 ans, la production des 5 premières années compense l'énergie nécessaire pour construire

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### Le solaire et l'éolien : peu efficaces

Taux de retour énergétique (TRE ou EROEI)

- solaire photovoltaïque = ~ 5-10 (1 kWh dépensé => 5-10 kWh produits).
- éolien = ~ 10-20 (1 kWh dépensé => 10-20 kWh produits).
- pétrole = ~ 30-40 (1 kWh dépensé => 30-40 kWh produits).

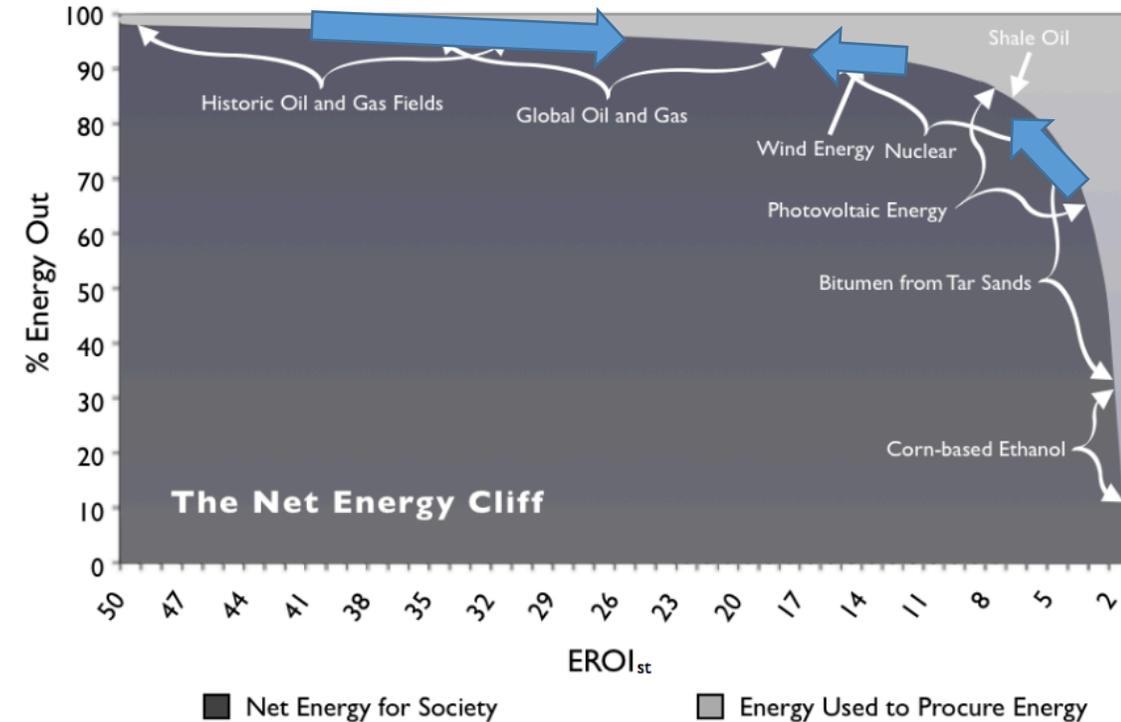
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

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



**Solaire & éolien de + en + efficace**

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Les énergies renouvelables

#### Les freins du solaire et de l'éolien

##### Freins juridique/opinion publique :

La complexité et la lenteur des procédures administratives reste l'un des principaux freins au développement du renouvelable en France => il faut compter jusqu'à 8 années de bataille juridique entre le début d'un projet et la mise en service d'un parc.

##### Freins de développement:

Pas de visibilité à long terme pour ces nouvelles technologies => manque de projets

=> Impossible de remplacer seul l'intégralité des énergies fossiles.

**Alors pourquoi pas le nucléaire?**

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times PIB \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

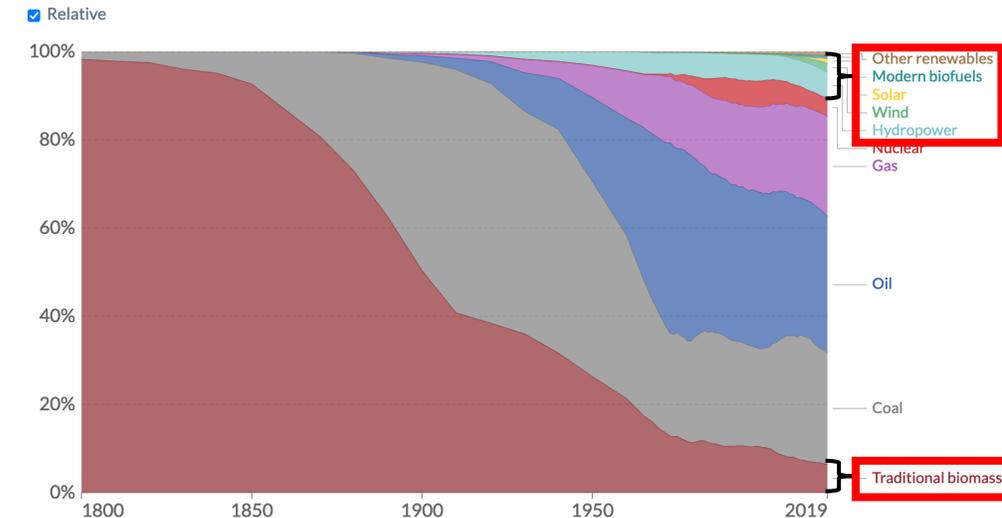
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

#### Global primary energy consumption by source

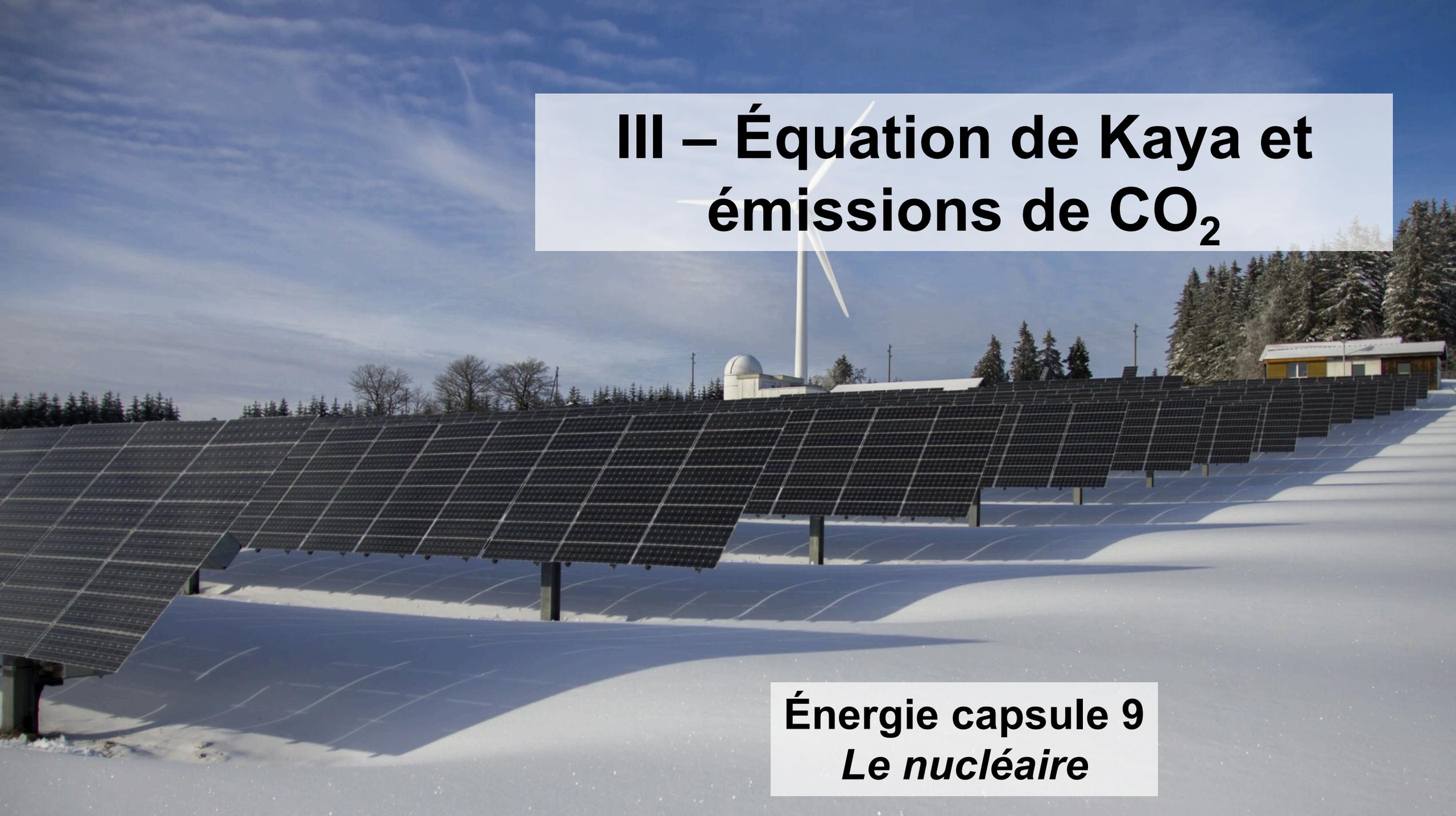
Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.

Our World in Data



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

Énergie capsule 9  
*Le nucléaire*

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

En 2019, le nucléaire c'est **4 % de l'énergie consommée dans le monde**

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

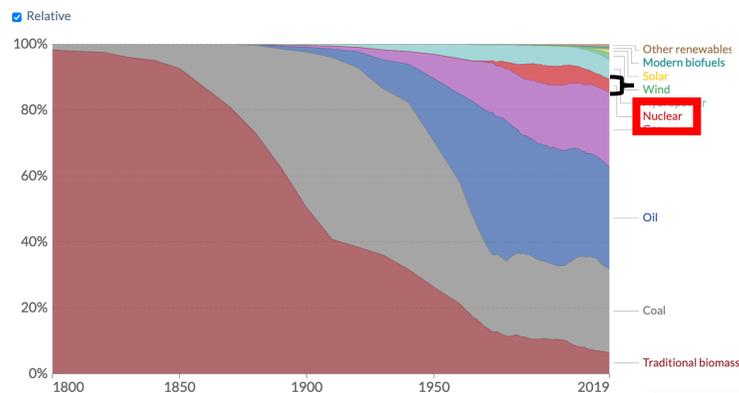
Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

Global primary energy consumption by source

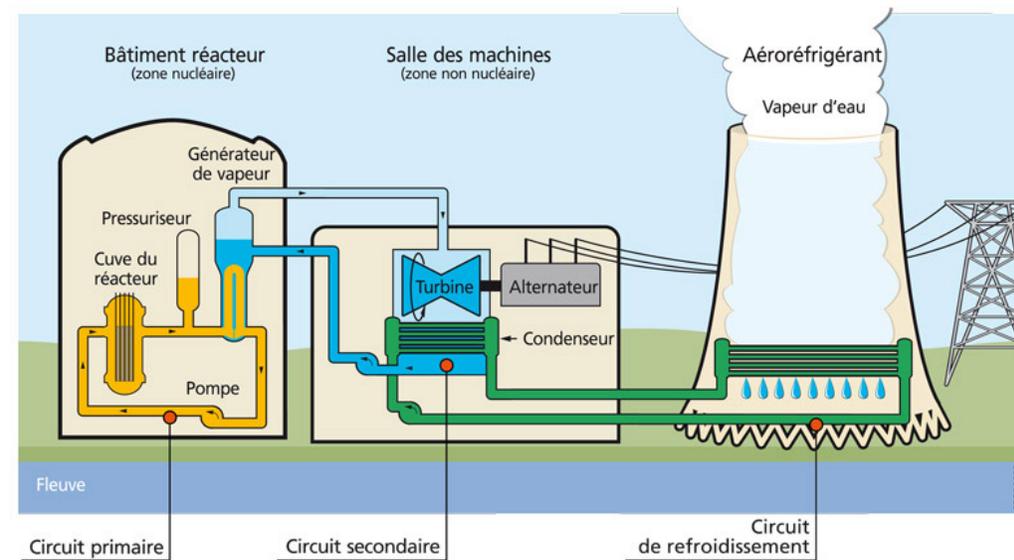
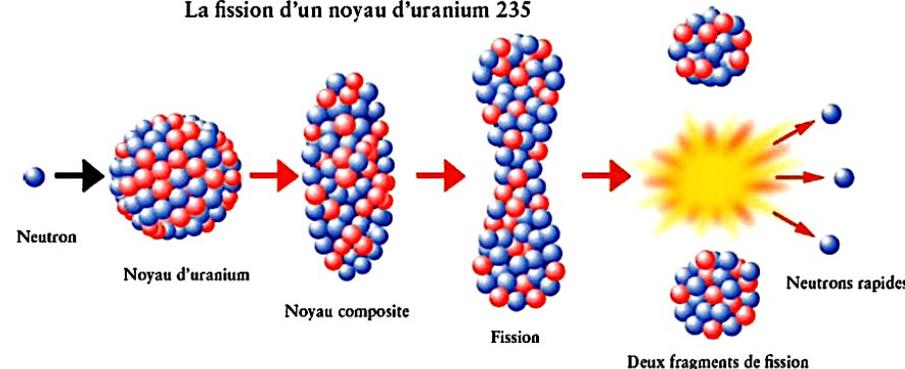
Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData

La fission d'un noyau d'uranium 235



Source : [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/1-reacteurs-nucleaires-France-Fonctionnement.aspx#.YZO2oR3TXRM](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/1-reacteurs-nucleaires-France-Fonctionnement.aspx#.YZO2oR3TXRM)

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les inconvénients

##### Risque d'accident nucléaire

Des mesures de sécurité drastiques peuvent réduire ce risque mais il ne sera jamais nul.

##### Risque de prolifération nucléaire

Le nucléaire civile n'est pas une condition pour développer l'arme nucléaire. Néanmoins, le développement du nucléaire civil pourrait tout de même favoriser l'apparition d'armes nucléaires.

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

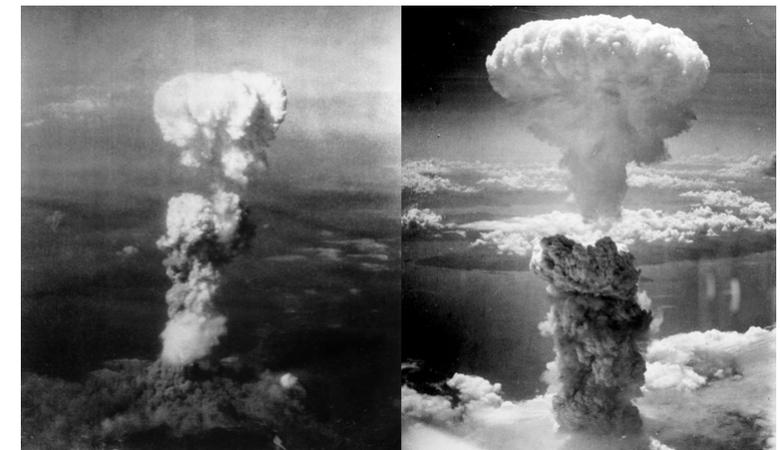
$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya



Accident de Fukushima



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les inconvénients

#### Gestion des déchets nucléaires.

≠ catégories en fonction de leur taux de radiation. Les déchets nucléaires français à très haute activité => quelques dizaines de m<sup>3</sup>.

#### Les ressources en Uranium.

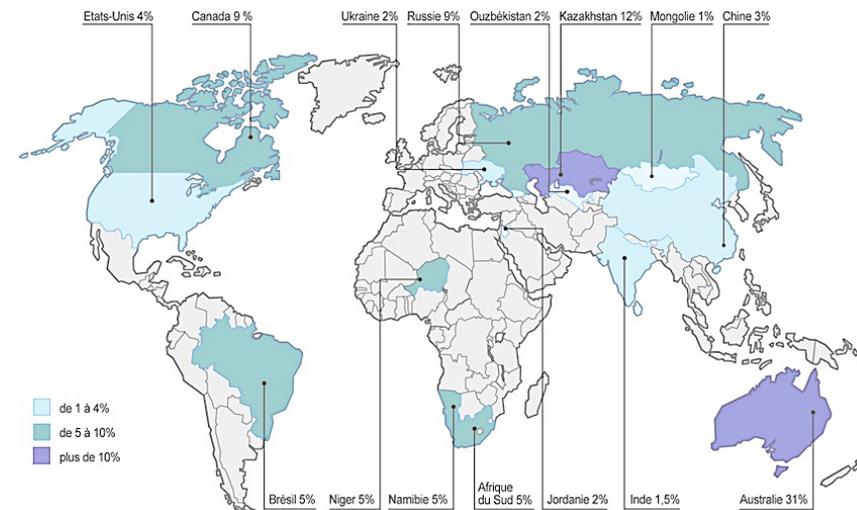
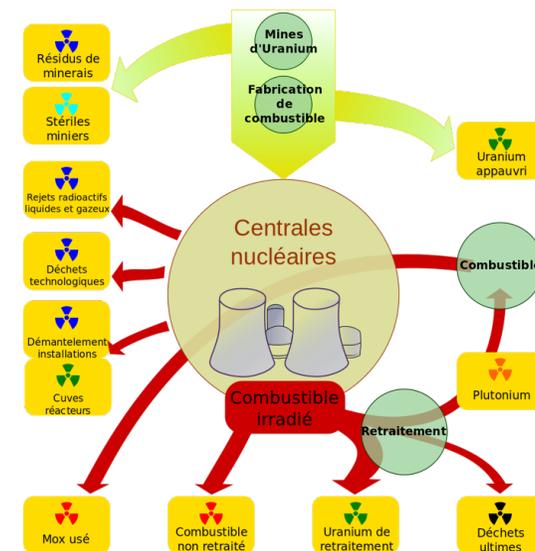
La limitation majeure => si l'énergie nucléaire se développe mondialement, les ressources pourraient devenir un problème.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

#### L'équation de Kaya



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les avantages

#### Energie pilotable et non intermittente

Possibilité de modifier la puissance d'un réacteur de 80 % en quelques heures.

Energie très décarbonée  
5-15 gCO<sub>2</sub>/kWh électrique produit.

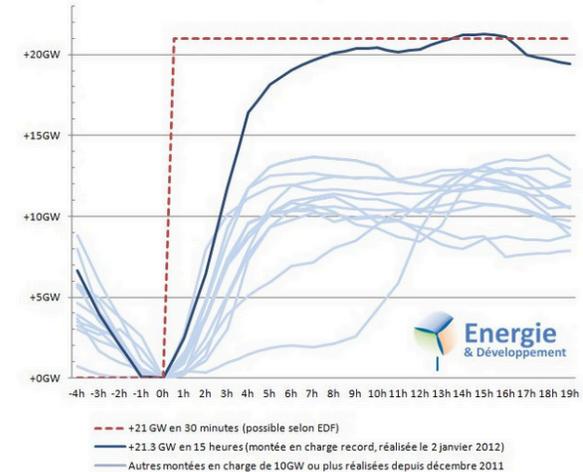
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

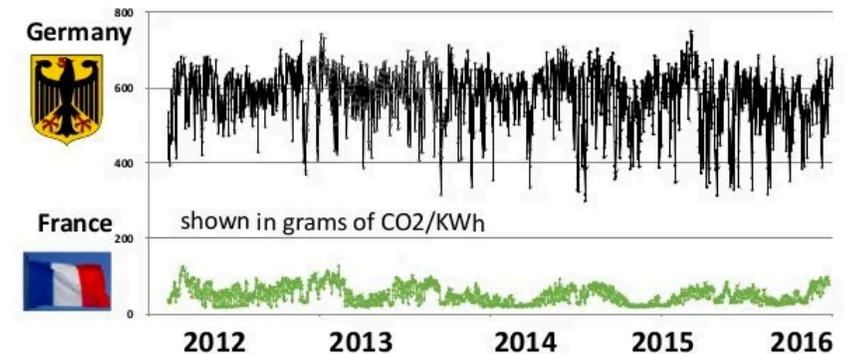
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

### L'équation de Kaya

Montée en puissance du parc nucléaire français



### Electricity in Germany Remains 6x More Carbon-Intensive than in France



Sources: Daily German electricity production data from Fraunhofer ISE. Hourly French electricity production from RTE-France.

Methods: Calculation of German Specific Carbon Intensity uses values of 1100g, 950g, 350g, and 983g of CO<sub>2</sub> per kWh for lignite coal, hard coal, natural gas, and biomass (respectively). Calculation of French Specific Carbon Intensity calculated by RTE-France.

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les avantages

#### Energie à fort potentiel de puissance/surface occupée :

- Centrale nucléaire => Production ~ **13 MWh/m<sup>2</sup>/an**  
(Fr. 2020 ~ 400 TWh)

- Parc éolien => Production ~ **0,25 MWh/m<sup>2</sup>/an**

- Parc solaire => Production ~ **0,15 MWh/m<sup>2</sup>/an**

**Une centrale nucléaire ~ 1 km<sup>2</sup> => pour la même production, il faut ~ 50 km<sup>2</sup> d'éoliennes ou ~ 85 km<sup>2</sup> de panneaux solaires**

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times PIB \times POP$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya



# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les freins

#### La peur du nucléaire

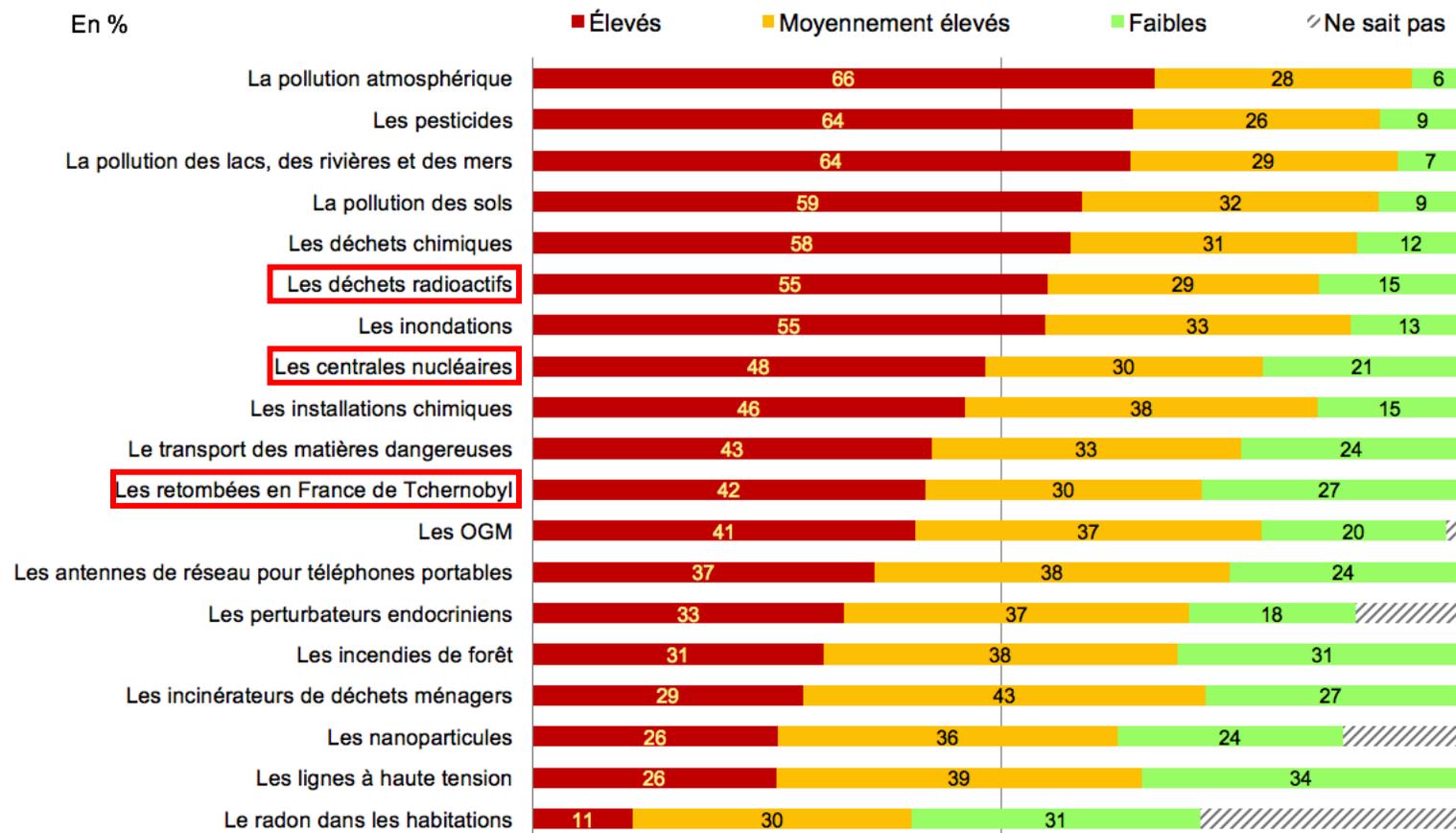
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

### Perception des niveaux de risques par les Français



**Notes :** la question posée était : « Dans chacun des domaines suivants, considérez-vous que les risques pour les Français en général sont élevés, moyennement élevés ou faibles ? » ; données collectées du 12 au 28 novembre 2014.

**Source :** IRSN, baromètre 2015 sur la perception des risques et de la sécurité par les Français

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

### Les freins

### La peur du nucléaire et pourtant...

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

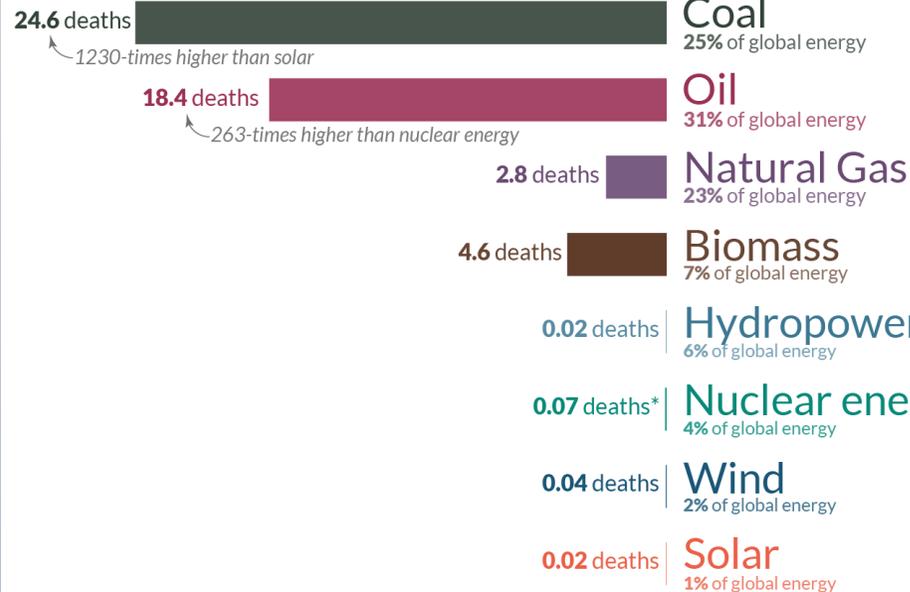
L'équation de Kaya

Our World in Data

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

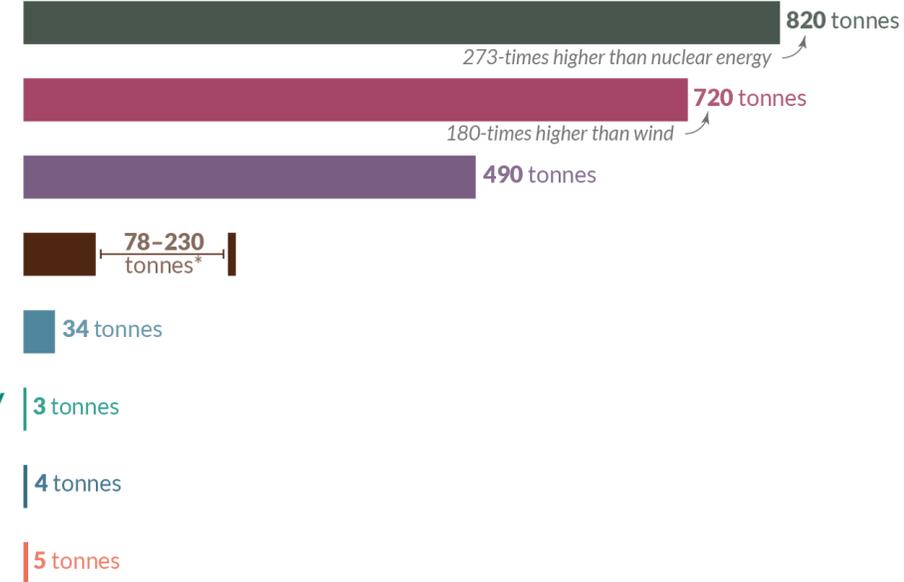
### Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of energy production.  
1 terawatt-hour is the annual energy consumption of 27,000 people in the EU.



### Greenhouse gas emissions

Measured in emissions of CO<sub>2</sub>-equivalents per gigawatt-hour of electricity over the lifecycle of the power plant.  
1 gigawatt-hour is the annual electricity consumption of 160 people in the EU.



\*Life-cycle emissions from biomass vary significantly depending on fuel (e.g. crop residues vs. forestry) and the treatment of biogenic sources.

\*The death rate for nuclear energy includes deaths from the Fukushima and Chernobyl disasters as well as the deaths from occupational accidents (largely mining and milling).

Energy shares refer to 2019 and are shown in primary energy substitution equivalents to correct for inefficiencies of fossil fuel combustion. Traditional biomass is taken into account.

Data sources: Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in *The Lancet*, and Sovacool et al. (2016) in *Journal of Cleaner Production*; Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in *Nature*; Energy shares from BP (2019) and Smil (2017).

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.

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les freins

#### Les fausses idées sur le nucléaire

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

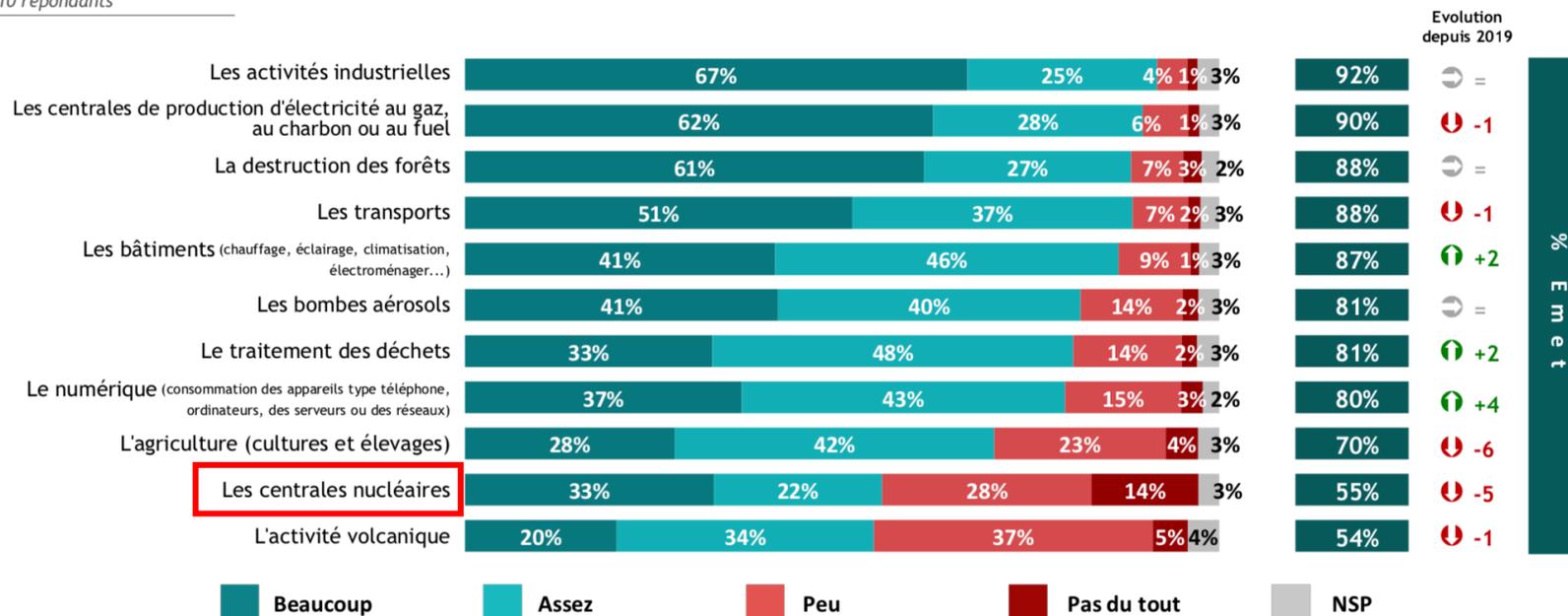
L'équation de Kaya

## Les secteurs qui émettent des gaz à effet de serre

Q18. Pour chacune des activités que je vais vous citer, dites-moi si, d'après ce que vous savez, elle émet beaucoup, assez, peu ou pas du tout de gaz à effet de serre.



Ensemble des Français  
1510 répondants



### Discussion autour de quelques idées reçues sur le nucléaire civil :

<https://jancovici.com/transition-energetique/nucleaire/quelques-idees-recues-nucleaire-civil/?fbclid=IwAR1dh52Bagnxysk6iPxYI80Z1iEPDd0bv8S-642GzRHJTlms-V5iUj5W-S8>

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Le nucléaire

#### Les freins

##### Freins politique :

- Les écologistes (+ asso. ex. Greenpeace) qui sont moteurs dans la lutte contre le réchauffement climatique sont majoritairement contre le nucléaire.
- En France, plus de la moitié des partis politiques proposent de réduire le nucléaire.

Les projets nucléaires nécessitent un temps de construction important + politique peu favorable

=> Impossible de remplacer seul l'intégralité des énergies fossiles.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

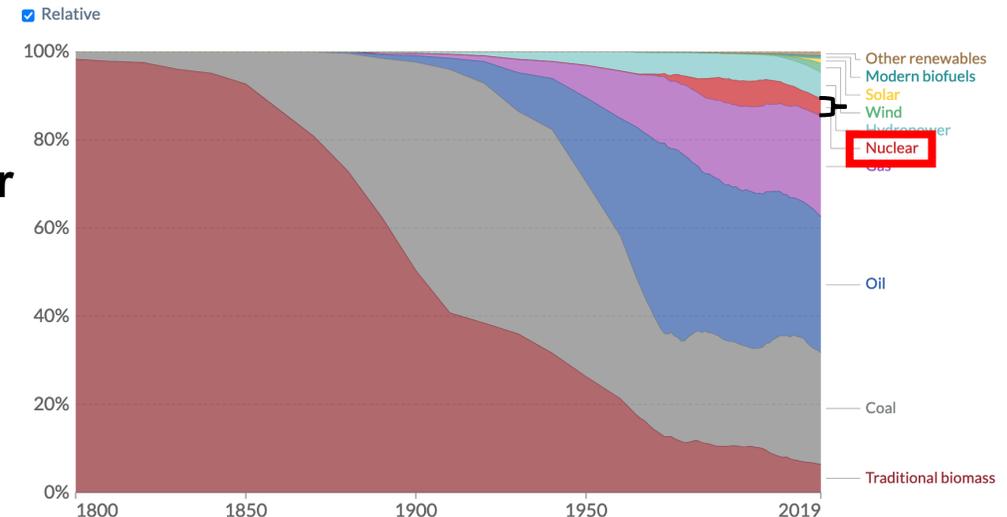
Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

#### Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

#### Le nucléaire, synthèse

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

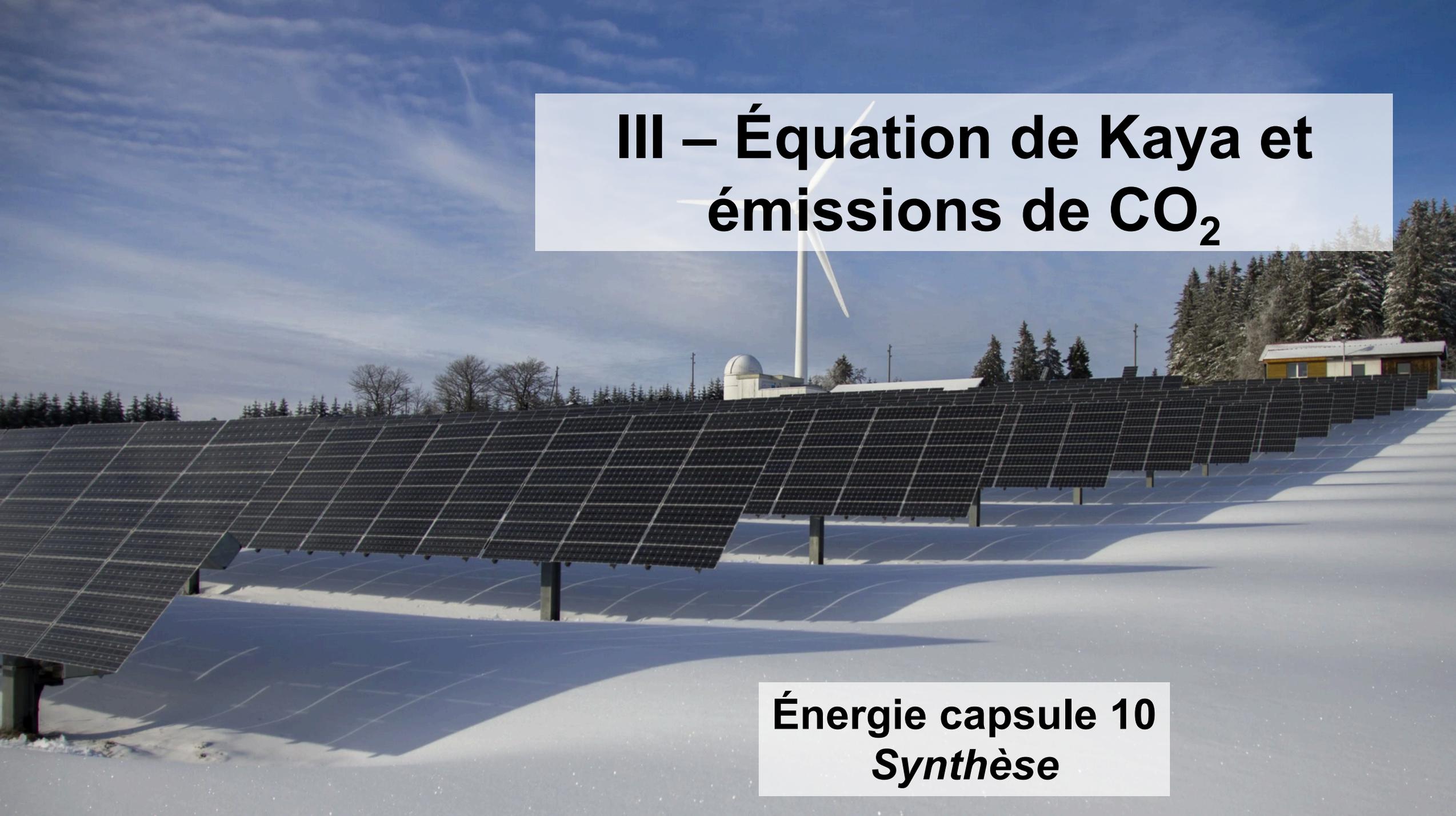
CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

L'équation de Kaya

Nucléaire = énergie dont le **potentiel est très important...** mais risques de sécurité importants. Le jeu en vaut-il la chandelle ?

Pour émettre un avis sur la question du nucléaire :

- il faut mettre en balance le **risque nucléaire VS le risque d'effondrement économique** si les problèmes de ressources en énergie fossile se confirment rapidement.
- il faut mettre en balance le **risque nucléaire VS le risque climatique** si on ne divise pas par 3 nos émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Le risque climatique pourrait => crises mondiales (sanitaires, économiques, migratoires et militaires).



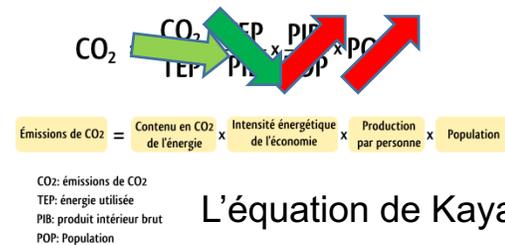
# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

Énergie capsule 10  
*Synthèse*

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

### Une décarbonation de l'énergie de grande ampleur est-elle envisageable d'ici 2050 ?



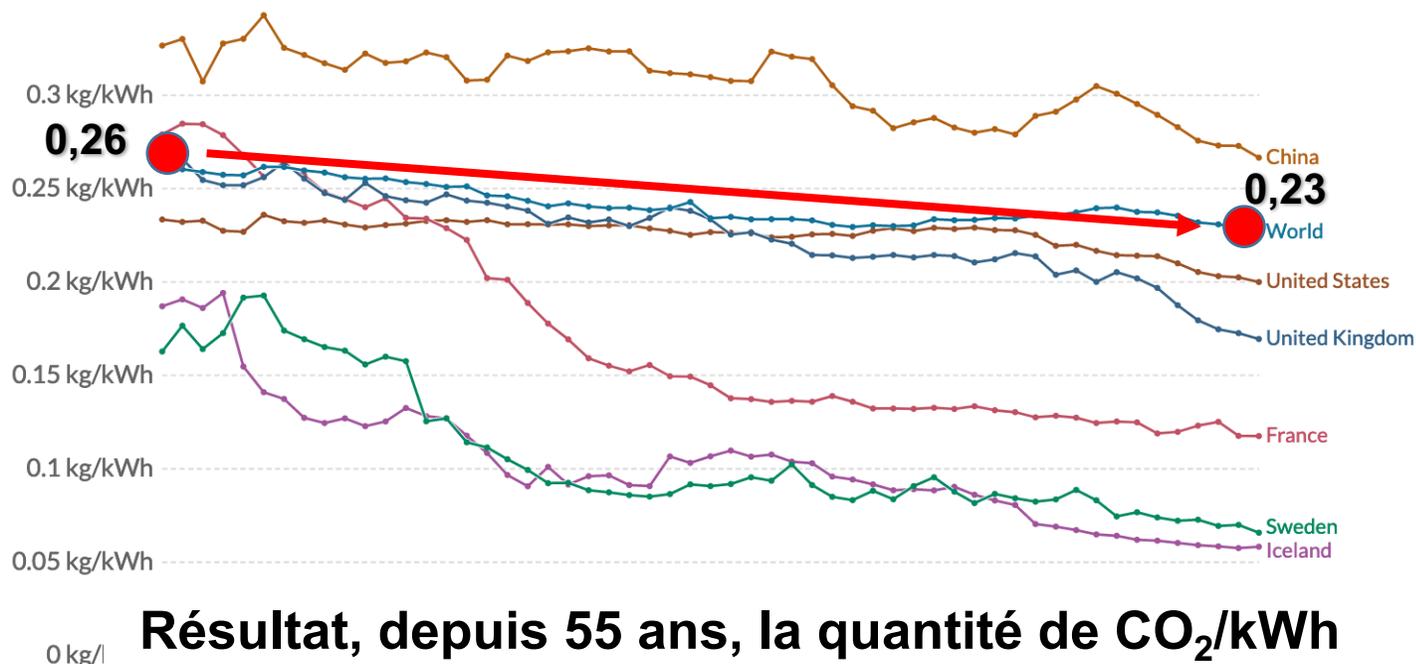
Les politiques et l'opinion publique sont peu favorables à l'expansion rapide du nucléaire et des EnRs, pour des raisons de sécurité et d'investissement nécessaire.

#### Carbon intensity of energy production

Carbon intensity of energy production is measured as the quantity of carbon dioxide emitted per unit of energy production. This is measured in kilograms of CO<sub>2</sub> per kilowatt-hour.



+ Add country



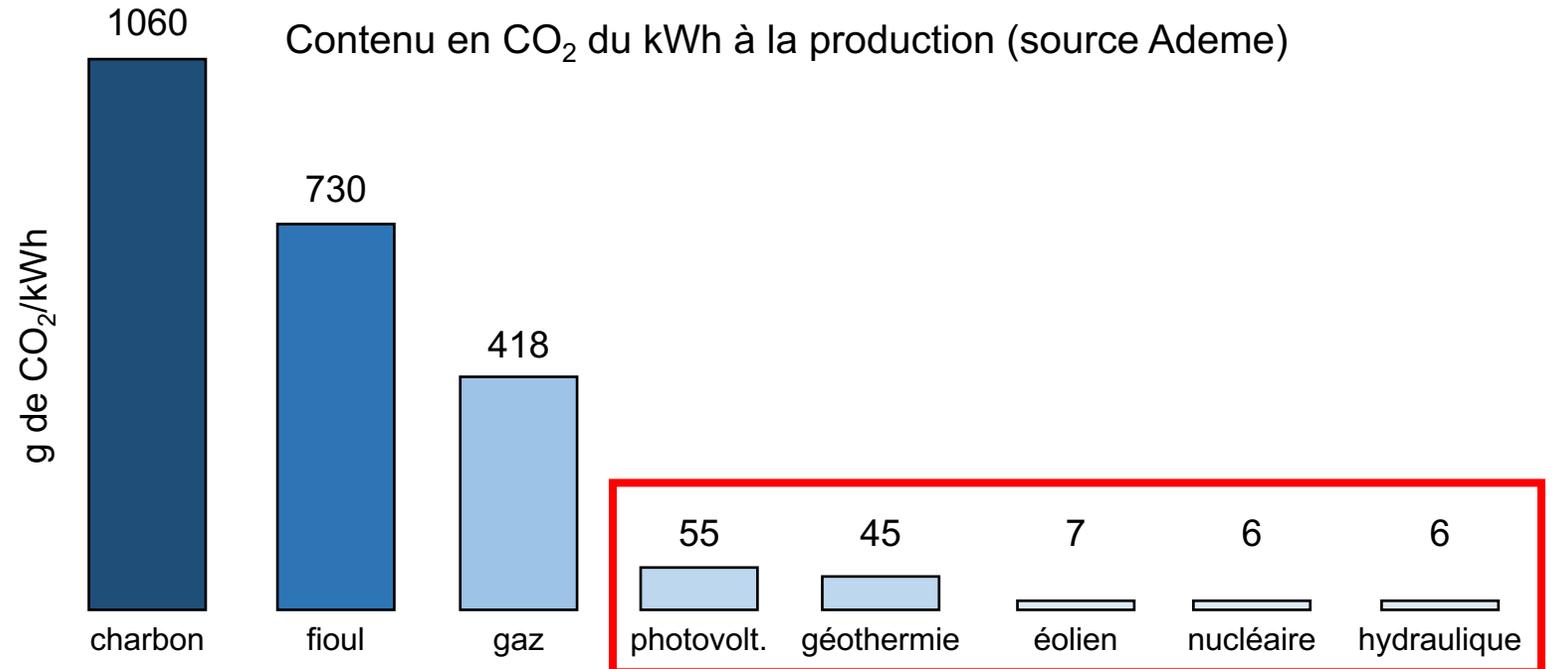
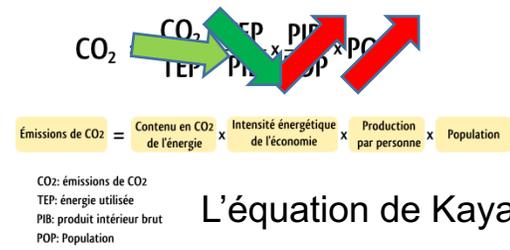
**Résultat, depuis 55 ans, la quantité de CO<sub>2</sub>/kWh dans le monde n'a pratiquement pas bougé...**

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### 4<sup>ème</sup> facteur : le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie

Les émissions de CO<sub>2</sub>/kWh diminuent, mais clairement pas à un rythme suffisant, il est évident que ce facteur ne permettra pas la division des émissions de CO<sub>2</sub> par 3 (voire par 6)

Si l'on veut faire diminuer significativement le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie => toutes les sources d'énergies bas carbone seront nécessaires et doivent être développées rapidement et à grande échelle!

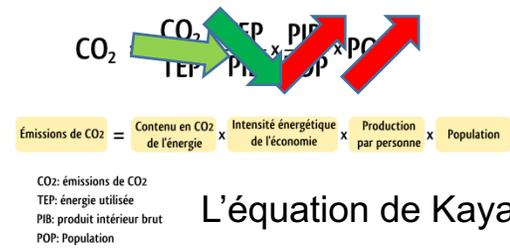


# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

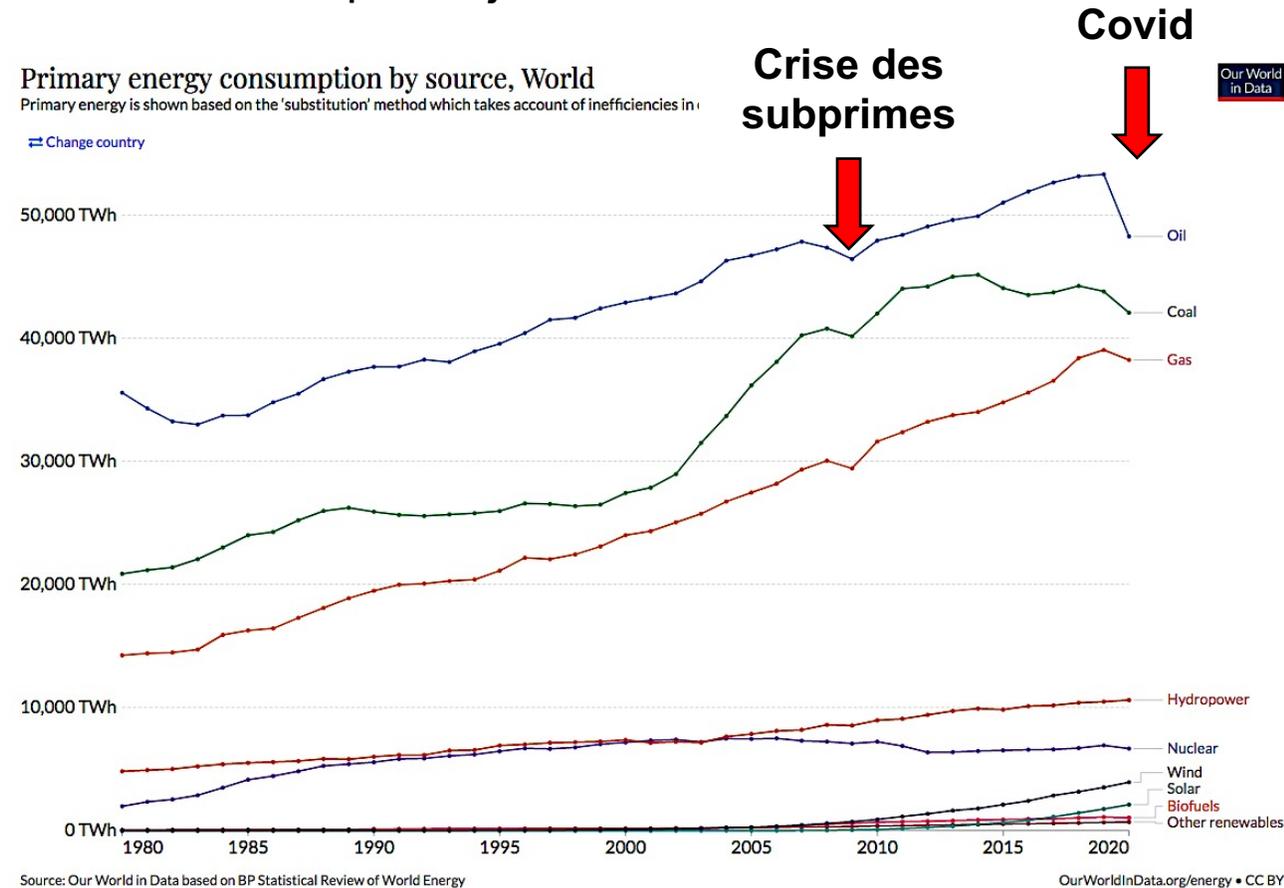
## Équation de Kaya : synthèse

Pour résumer: le progrès technique ne permettra pas de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre en moins de 30 ans.

En 2050, il est très probable que nous soyons toujours dépendants des énergies fossiles si celles-ci n'ont pas déjà montré leurs limites.



Evolution de la consommation d'énergie mondiale/source entre 1965 et 2020.



=> reprenons l'équation de Kaya pour voir quels facteurs seront affectés!

# III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

## Équation de Kaya : synthèse

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} \times \frac{TEP}{PIB} \times \frac{PIB}{POP} \times POP$$

Émissions de CO<sub>2</sub> = Contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie x Intensité énergétique de l'économie x Production par personne x Population

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>  
TEP: énergie utilisée  
PIB: produit intérieur brut  
POP: Population

## L'équation de Kaya

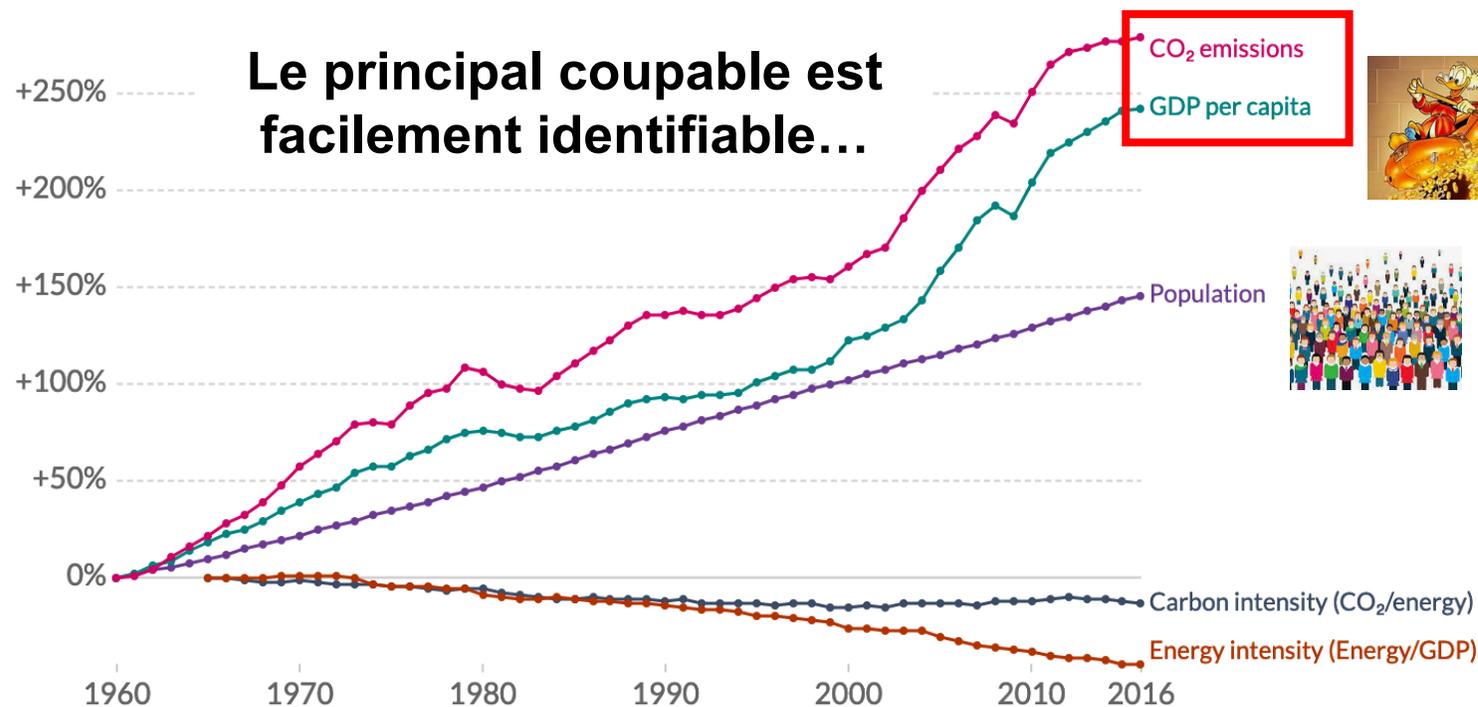
Our World in Data

### Les facteurs de l'équation de Kaya de 1960 à 2016

#### Kaya Identity: drivers of CO<sub>2</sub> emissions, World

Percentage change in the four parameters of the Kaya Identity, which determine total CO<sub>2</sub> emissions.

↔ Change country



Source: Our World in Data based on Global Carbon Project; UN; BP; World Bank; Maddison Project Database  
Note: GDP per capita is measured in 2011 international-\$ (PPP). This adjusts for inflation and cross-country price differences.  
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

### Équation de Kaya : synthèse

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Contenu en CO}_2 \text{ de l'énergie} \times \text{Intensité énergétique de l'économie} \times \text{Production par personne} \times \text{Population}$$

CO<sub>2</sub>: émissions de CO<sub>2</sub>

TEP: énergie utilisée

PIB: produit intérieur brut

POP: Population

## L'équation de Kaya

Pour diviser les émissions de gaz à effet de serre par 3, **le plus efficace serait donc jouer sur la production par personne.**

**=> adopter un mode de vie sobre énergétiquement avec une diminution de la consommation.**

Cela implique **un monde en contraction avec une récession mondiale.**

#### Équation de Kaya : synthèse

Le défi est de taille, il faut d'abord **convaincre les politiques que la croissance n'est pas compatible avec une division par 3 des émissions de GES** et que nous n'avons pas d'autres choix que d'opter pour une contraction de l'économie.

Diviser les émissions par 3 à l'échelle mondiale revient à émettre seulement 2 teqCO<sub>2</sub>/pers.

L'empreinte GES moyenne d'un français est aujourd'hui 5 fois plus élevée.

A titre informatif, on émet 2 teqCO<sub>2</sub> avec seulement **l'un** des exemples cité ci-dessous :

- 15 000 km en avion : 1 vol A/R Paris-Chicago
- 4 à 5 m<sup>2</sup> de logement construit (1 m<sup>2</sup> = 300-400 kg eqCO<sub>2</sub>)
- 6000 à 8000 km en voiture de taille moyenne en zone urbaine

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### *En résumé :*

- Pour limiter l'augmentation de TC° => il faut diminuer nos émissions de CO<sub>2</sub> => il faut diminuer (drastiquement) l'utilisation des énergies fossiles (et pas uniquement dans le secteur de la production d'électricité!)
- L'équation de Kaya montre :
  - Qu'il sera difficile de jouer sur le facteur population.
  - Que l'intensité énergétique de l'économie (kWh/\$) va dans la bonne direction, mais pas assez rapidement (effet rebond).
  - Que le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie (CO<sub>2</sub>/kWh) stagne depuis plusieurs décennies et qu'il faudra développer toutes les sources d'énergies bas carbone pour le faire diminuer significativement.
  - Que pour diviser les émissions de GES par 3 d'ici 2050, il faudra aussi (surtout?) jouer sur la production par personne (\$/hab) => sobriété énergétique + diminution de la consommation.

### III – Équation de Kaya et émissions de CO<sub>2</sub>

#### *Qu'avez vous retenu?*

- Quelles doivent être les émissions/personne en 2050 pour limiter le réchauffement à +2°C par rapport aux températures préindustrielles?
- Pouvez-vous citer les différents facteurs dans l'équation de Kaya ?
- Pourquoi la population apparaît difficilement comme un facteur de régulation ?
- En France, l'énergie électrique représente 5 %, 20 % ou 70 % de l'ensemble de l'énergie dépensée ?
- Pourquoi est-t-il difficile de parier sur l'hydrogène ?
- Quels sont les avantages et inconvénients des EnRs et du nucléaire?