

Température Terrestre

Rapport de visualisation avancée des données

Projet : Température Terrestre

Cursus : Data Analyst — Bootcamp Mars 2025

Auteur : Nicolas Quéquet

Groupe : Arthur Roger, Solen Billot, Yann Dumeur, Nicolas Quequet

Niveau de difficulté : 06/10

Objectif du projet :

Constater le réchauffement (et le dérèglement) climatique global à l'échelle de la planète sur les derniers siècles et dernières décennies.

- Analyse au niveau mondial
- Analyse par zone géographique
- Comparaison avec des phases d'évolution de température antérieure à notre époque

Données utilisées :

NASA GISTEMP — <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

OWID CO₂ — <https://github.com/owid/co2-data>

Dossier partagé du groupe (Google Drive) :

https://drive.google.com/drive/folders/1wfae_AZAEwtWBaZWHDHvzw1XYdq_0D5EJ

Introduction

Dans le premier rapport, nous avons récupéré, exploré, et nettoyé les jeux de données, puis nous avons créé des premières visualisations des données via les librairies Python.

Pour ce deuxième rapport, nous nous focaliserons sur la visualisation et l'interprétation des données, en suivant un rapport Power BI que vous pouvez télécharger ici:

https://drive.google.com/file/d/1dJY_mW34FTe468BIDAxtN80WdmDttjSS/view?usp=drive_link

Comme lors du précédent rapport, ma contribution au projet s'est entièrement portée sur l'analyse des données d'émissions de gaz à effet de serre, provenant de Our World In Data, nommé `owid-data-co2`, que nous avions nettoyé et divisé en plusieurs CSV plus ciblés.

Dans un premier temps, nous verrons la préparation du rapport Power BI (import des données, transformations...).

Ensuite, nous parcourrons les différentes slides du rapport Power BI, en fournissant pour chaque slide, une explication générale de la slide, tout en suivant une narration.

Enfin, nous concluerons quant à nos interprétations des visualisations, au travail que nous aimerais approfondir, et nous ouvrirons sur la suite du projet.

Préparation du Power BI

Import des données

La première étape fut d'importer les fichiers CSV créés à la suite du nettoyage expliqué dans le premier rapport.

J'ai choisi de continuer de me focaliser sur l'échelle mondiale et l'échelle continentale.

Après le nettoyage de la première partie, nous avions les fichiers CSV suivants :

- **owid_co2_world** : émissions de CO2 de 1750 à 2023 (avec également des infos sur population, PIB, et émissions de CO2 causées par l'exploitation du charbon (*coal_co2*) qui est l'unique source pour laquelle nous avons des données avant 1850).
- **owid_ghg_world** : émissions de 3 principaux gaz à effet de serre (CO2, méthane, protoxyde d'azote), détail des sources d'émissions de CO2, changements de température associés aux émissions des 3 gaz à effet de serre précités. Possède également les colonnes population et PIB. Période étudiée de 1850 à 2023.
Remarque : tout ce qui est dans *owid_co2_world* à partir de 1850 est également dans *owid_ghg_world* ; le premier ne sert qu'à avoir une plage de temps plus étendue remontant jusqu'à 1750 mais pour des données beaucoup moins détaillées.
- **owid_co2_per_energy_world** : émissions de CO2 liées à la consommation d'énergie primaire, de 1965 à 2023
- **owid_co2_continents_1880** : équivalent de *owid_ghg_world*, mais par continent, pour la période 1880-2023 (nous n'avions pas suffisamment de données de 1850 à 1880 pour tous les continents).
- **owid_co2_continents_1990** : en plus de contenir toutes les données de *owid_co2_continents_1880* sur la période 1990-2023, contient également des données d'émissions relatives à la consommation des continents, et la part d'émissions de CO2 représentée par les échanges commerciaux (colonnes *trade_co2*, *consumption_co2*, expliquées dans le premier rapport). Ces données sur les échanges et la consommation n'existent pas avant 1990.
- **owid_co2_per_energy_continents** : identique à *owid_co2_per_energy_world* mais par continents, sur la même période 1965-2023.

Il y a plusieurs remarques à faire sur ces fichiers.

Certains contiennent des données en doublons (par exemple, les colonnes population et pib sont dans plusieurs CSV, on retrouve aussi d'autres colonnes identiques sur les émissions de CO2 à différentes périodes). Les périodes sont également différentes selon les fichiers. Nous devons donc faire un choix sur la période à étudier, sur les fichiers à importer, puis faire un nettoyage dans Power Query pour éviter les doublons de colonnes tout en liant les tables entre elles.

Nous ne possédons pas d'informations sur le PIB pour les continents.

Choix de la période étudiée

En anticipation du rendu global du projet, j'ai choisi de n'étudier que la période de 1880 à 2023. En effet, nous n'avons des détails sur les émissions de gaz à effet de serre qu'à partir de 1850 voire 1880 pour certains continents. En outre, les données d'anomalies de température LOTI fournies par la NASA et étudiées par un autre membre du groupe ne commencent qu'à partir de 1880. Enfin, c'est aussi autour de cette période qu'il y a eu un bond de l'ère industrielle, mais les émissions de gaz à effet de serre ont commencé à exploser réellement autour des années 1940-1950 comme nous avons pu le voir dans notre rapport précédent. Par conséquent, il ne me semble pas nécessaire de remonter jusqu'à 1750 pour étudier l'impact des émissions de gaz sur le réchauffement climatique, la période 1880-2023 est suffisante et bien parlante. Notons également que l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre entre 1750 et 1880 est négligeable par rapport à la période 1950-2023 (nous avons pu le constater grâce aux graphiques du précédent rapport).

Nous étudierons donc dans ce rapport Power BI la période **1880-2023**.

Choix des CSV

La période de temps étant choisie, l'on se rend compte que le fichier `owid_co2_world` qui contient les données d'émissions de co2 uniquement (et sans le détail des sources) à partir de 1750 ne nous sert à rien. En effet, le fichier `owid_ghg_world` contient les mêmes données à partir de 1850.

J'ai donc importé dans Power BI tous les autres CSV listés plus tôt. Nous avons une requête par CSV, renommées de la sorte :

- `owid_ghg_world` → GES - 1850 - world
- `owid_co2_per_energy_world` → co2 et energie - 1965 - world
- `owid_co2_continents_1880` → GES - 1880 - continents
- `owid_co2_per_energy_continents` → co2 et energie - 1966 - continents
- `owid_co2_continents_1990` → co2 par conso intérieures - 1990 - continents

Nettoyage dans Power Query

La première étape fut de renommer les colonnes pour avoir des noms plus explicites en français.

Voici des exemples :

The screenshot shows the Power Query Editor interface. At the top, there is a formula bar with the text: `= Table.RenameColumns(#"Removed Columns", {"total incluant UTCATF", "1.2 co2 sans UTCATF", "1.2 cumul co2 sans UTCATF", "1.2 co2 incluant UTCATF par unité d'énergie (kg/kWh)", "1.2 conso. énergie primaire (TWh)"})`. Below the formula bar, there are five columns listed in a table-like structure. The first column is highlighted with a green header bar and contains the text "1.2 année". The other four columns have white headers. The second column is labeled "1.2 co2 sans UTCATF", the third "1.2 cumul co2 sans UTCATF", the fourth "1.2 co2 incluant UTCATF par unité d'énergie (kg/kWh)", and the fifth "1.2 conso. énergie primaire (TWh)". The fifth column is currently selected, indicated by a blue border around its header.

J'ai également dû changer les types de certaines colonnes, notamment la plupart des colonnes numériques décimales en utilisant la locale “en-US” (puisque les nombres sont au format 1.2 mais qu'en français, il ne comprend pas le . et attend un format 1,2).

Suppression des colonnes en doublons

Certaines colonnes comme “année”, “population” ou “continent” sont en doublon parmi toutes les requêtes.

L'objectif est de supprimer les colonnes en doublons pour réduire le volume de données, et essayer de suivre le schéma en étoile de la modélisation avec table de faits et table de dimensions.

Nous n'avons quasiment que des tables de faits, puisque nos CSV sont des observations, des évènements, pour une année et une zone.

Toutefois, nous pouvons considérer que les colonnes en doublons qui servent à décrire des choses peuvent être considérées comme des tables de dimensions.

Ainsi, j'ai décidé de créer deux nouvelles tables : **world** et **continents**.

La table **world** ne contient que trois colonnes : année (qui servira d'identifiant pour lier les données avec les autres tables), population mondiale et PIB.

La table **continent** contient quatre colonnes : année, continent, population par continent, et ID.

La colonne ID est une colonne créée par concaténation de la colonne année et de la colonne continent. Cela nous permet d'avoir un identifiant unique par ligne qui nous permettra de lier toutes nos tables liées à un continent.

A ^B _C ID	1 ² ₃ année	A ^B _C continent
<ul style="list-style-type: none"> ● Valid 100 % ● Error 0 % ● Empty 0 % 	<ul style="list-style-type: none"> ● Valid 100 % ● Error 0 % ● Empty 0 % 	<ul style="list-style-type: none"> ● Valid 100 % ● Error 0 % ● Empty 0 % 
864 distinct, 864 unique	144 distinct, 0 unique	6 distinct, 0 unique
1880-Africa	1880	Africa
1881-Africa	1881	Africa
1882-Africa	1882	Africa
1883-Africa	1883	Africa
1884-Africa	1884	Africa
1885-Africa	1885	Africa

J'ai alors supprimé les colonnes année, population, et PIB (quand elle existait) sur les autres requêtes.

Sur toutes les requêtes liées aux continents, j'ai créé la colonne ID concaténant année et continent.

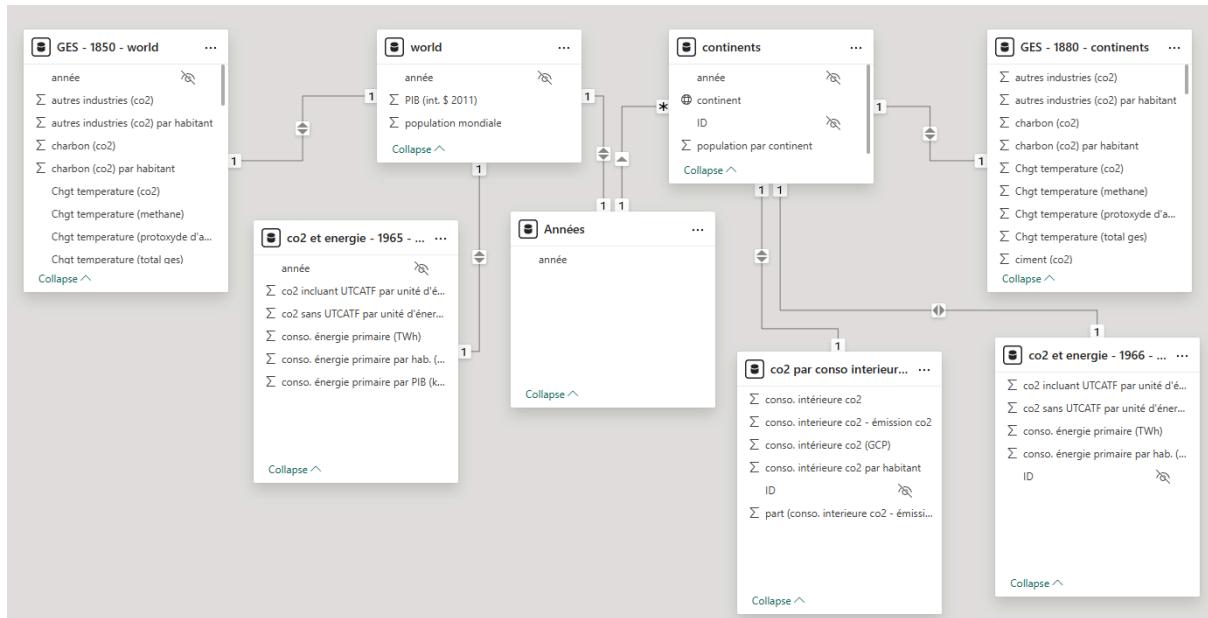
Ensuite, sur la requête "co2 par conso intérieures - 1990 - continents", j'ai supprimé toutes les colonnes à l'exception de celles liées à trade_co2 et consumption_co2, en appliquant les renommages suivants :

- consumption_co2 → conso. intérieure co2
- trade_co2 → conso. interieure co2 - émission co2

Pour les requêtes liées à l'énergie, j'ai également supprimé toutes les colonnes qui n'étaient pas directement liées à l'énergie (telles que émissions de co2 globales). Je n'ai gardé que les colonnes de consommation d'énergie primaire et d'émissions de co2 (avec et sans UTCATF) par unité d'énergie.

Modélisation et relations entre les tables

Voici le schéma obtenu suite à la modélisation :



J'ai créé une table Années allant de 1880 à 2023. Elle fait un peu office de table Calendar (puisque nous n'avons aucune information allant plus dans le détail que l'année, il n'était pas nécessaire de faire un véritable calendrier).

```
Années = GENERATESERIES(1880, 2023, 1)
```

Notre jeu de données ne se prête pas vraiment au schéma en étoile avec une table de faits entourée de tables de dimensions. Mais j'ai tenté de faire quelque chose qui s'en rapproche. Nous avons 2 parties bien distinctes : les données à l'échelle mondiale, et les données par continents.

Ces deux parties sont liées ensemble par l'année.

La partie liée au monde possède 3 tables :

- world : contient les informations générales : année, PIB et population mondiale
- GES - 1850 - world : contient les détails des émissions de GES de 1850 à 2023 dans le monde (même si nous ne visualiserons les données qu'à partir de 1880).
- co2 et énergie - 1965 - world : contient les données de consommation d'énergie primaire et émissions de co2 par unité d'énergie, de 1965 à 2023.

La partie liée aux continents est composée de 4 tables, liées par un ID concaténant l'année et le continent.

- continents : informations générales (année, continent, population)
- GES - 1880 - continents : détail des émissions de GES par continents de 1880 à 2023
- co2 et énergie - 1966 - continent : données de consommation d'énergie primaire et émissions de co2 par unité d'énergie, pour chaque continent, de 1966 à 2023.

- co2 par conso intérieures - 1990 : données sur les émissions de co2 liées à la consommation interne des continents ainsi que les différences avec les émissions globales du continent.

J'aurais pu regrouper toutes ces données en deux tables uniques : une table world contenant toutes les données du monde, et une table continents contenant toutes les données par continents.

Mais nous aurions eu des valeurs manquantes (que nous aurions remplacé par des 0) sur la majeure partie des colonnes liées à l'énergie et aux consommations internes. C'est pourquoi cela ne m'a pas semblé intéressant. J'ai plutôt préféré ce découpage, à la fois par périodes de temps mais surtout par types de données, chaque table permettant d'étudier des choses différentes.

Création de Mesures

Afin de respecter les bonnes pratiques, un certain nombre de mesures ont été créées. Toutefois, la plupart de ces mesures ne sont que des calculs simples (SUM, MAX ou AVG) de données que nous possédions déjà. Je ne l'ai fait que pour les données que je voulais afficher dans les graphiques.

En effet, notre jeu de données est déjà très détaillé, avec des colonnes contenant les cumuls d'une année sur l'autre, ou la croissance des émissions d'une année sur l'autre. Créer une mesure pour chacune de ces données m'aurait pris trop de temps si la mesure n'est finalement pas utilisée.

J'ai tout de même créé les mesures d'émissions de gaz à effet de serre par PIB puisque ces données n'existaient pas. Pour cela, j'ai appliqué le calcul suivant :

$$\text{Emissions par PIB} = \text{Emissions de gaz} / \text{PIB} * 1\,000\,000\,000$$

Exemple :

```
Total GES mondial par PIB = 1000000000 * DIVIDE(
    SUM('GES - 1850 - world'[total GES incluant UTCATF (world)]),
    SUM('world'[PIB (int. $ 2011)])
)
```

Elles s'expriment en kg d'émissions (équivalent CO2) par \$ international 2011.

J'ai également créé des mesures liées aux changements de température.

- somme des changements de température pour l'année max (ou min) d'une période :
Sum Chgt Temp Année MAX =

```
CALCULATE(
    SUM('GES - 1880 - continents'[Chgt temperature (total ges)]),
    continents[année] = MAX('Années'[année])
)
```
- différence de changements de température entre l'année max et l'année min :

```
Diff Sum Chgt Temp = [Sum Chgt Temp Année MAX] - [Sum Chgt Temp Année MIN]
```

Exploration du rapport Power BI et narration

Contextualisation

“Notre maison brûle, et nous regardons ailleurs.”

Cette célèbre citation de Jacques Chirac faisant référence au réchauffement climatique, enjeu majeur de notre siècle, fut prononcée il y a plus de 20 ans, en 2002. Déjà à l'époque, la majorité des experts scientifiques interpellaient les politiciens sur le dérèglement climatique et l'urgence de mettre en place des solutions pour sauver l'environnement et la biodiversité.

“The biggest threat is not global warming, where the ocean is going to rise one-eighth of an inch over the next 400 years. You'll have more oceanfront property, right?”

Traduction française :

“La plus grande menace n'est pas le réchauffement climatique, où l'océan va monter d'un huitième de pouce au cours des 400 prochaines années. Vous aurez plus de propriétés en bord de mer, n'est-ce pas ?”

Cette citation provient d'un message de Donald Trump, actuel président des Etats-Unis et donc l'un des hommes les plus puissants du monde, posté sur la plateforme X en 2024.

Plus de vingt années de recherches scientifiques à propos du dérèglement climatique séparent ces deux citations, toutes deux issues de chefs d'état. Si la première est alarmiste et prend le parti des experts scientifiques, la deuxième, pourtant, est ironique, proche du climato-scepticisme. Doit-on en déduire que le dérèglement climatique est de l'histoire ancienne, que tout s'est arrangé en vingt ans ? Pas vraiment, si l'on en croit la citation suivante.

“Qui aurait pu prédire la vague d'inflation, ainsi déclenchée ? Ou la crise climatique aux effets spectaculaires encore cet été dans notre pays ?”

Cette dernière citation fut prononcée par Emmanuel Macron, actuel président de la République française, lors de son allocution télévisée du 31 Décembre 2022. “Qui aurait pu prédire la crise climatique ?” est un questionnement qui peut surprendre, puisque dès la fin du XXème siècle, des politiciens en étaient alertés, et que les experts travaillent sur ce sujet et en informent les politiciens depuis des décennies. Mais dans le cadre de notre projet, ce questionnement est intéressant : au regard des données passées, et des tendances, pouvons-nous faire une prédiction large sur le futur proche ?

À l'heure où la désinformation est partout, il est de bon ton de tout remettre à plat, et de vérifier nous-mêmes les données. L'objectif de ce projet est donc de constater, par nous-mêmes, l'évolution des températures et le dérèglement climatique à l'échelle mondiale. Nous allons également étudier l'une de ses principales causes selon les experts : les émissions de gaz à effet de serre. Si nous n'allons pas avoir recours à l'intelligence artificielle pour faire de la prédiction dans le cadre de ce projet (nous laissons cela à nos

confrères Data Scientist), nous pourrons tout de même nous essayer à une prédiction intuitive de l'avenir proche à partir des tendances observées.

Ma contribution à ce travail porte spécifiquement sur l'étude des émissions de gaz à effet de serre, en m'appuyant sur des données structurées et visualisées dans Power BI. L'objectif est de mettre en lumière les tendances globales et régionales en matière d'émissions, afin d'enrichir la compréhension des dynamiques climatiques actuelles, et d'établir un lien entre activités humaines et dérèglement climatique. Nous ne nous intéresserons qu'aux émissions ayant des sources anthropiques, c'est-à-dire liées aux activités humaines. Ainsi, la vapeur d'eau, qui est l'un des principaux gaz à effet de serre, ne sera pas étudiée, car ses sources anthropiques sont négligeables.

Accueil et sommaire du rapport Power BI

Etude sur les émissions de gaz à effet de serre et leurs effets sur le réchauffement climatique

L'objectif de ce rapport est de visualiser l'évolution des **émissions de gaz à effet de serre** à l'échelle mondiale et par continents, et leur impact sur le **réchauffement climatique**.

Définitions :

GES : Gaz à Effet de Serre ; acronyme utilisé ici pour parler de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique observées : *dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et protoxyde d'azote (N₂O)*

UTCATF : Utilisation des terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie. Utilisé pour parler des émissions (et absorption) de CO₂ liées à l'agriculture, à la déforestation / reforestation et aux zones humides. Ces données sont plus difficiles à mesurer que les émissions industrielles et donc moins fiables, raison pour laquelle elles sont souvent séparées des émissions industrielles. En outre, ces émissions peuvent être négatives lorsque l'absorption de CO₂ naturelle (par les arbres) est plus élevée que l'émission de CO₂ relative à ce domaine. **CO₂ via UTCATF** signifie donc "*émissions de CO₂ liées à l'UTCATF*". **CO₂ industriel** ou **GES industriel** signifie *sans UTCATF*.

Sommaire :
(ctrl + click sur un bouton ci-dessous pour accéder à la slide correspondante)

Analyse Mondiale	Analyse Continentale
Comment évoluent les émissions de GES, au regard de la population et du PIB, à l'échelle mondiale ?	Quels continents produisent le plus de GES ?
Quelle est la contribution des gaz à effet de serre au réchauffement climatique ?	Comment évoluent les émissions de GES en fonction de la population pour chaque continent ?
Quelles sont les répartitions des sources d'émissions de CO ₂ ?	Quelles sont les sources d'émissions de CO ₂ par continent ?
Quel lien existe-t-il entre la consommation d'énergie et les émissions de CO ₂ ?	Quelles sont les contributions des continents au réchauffement climatique ?

Contrôlez sur chaque slide la période à analyser grâce au slider chronologique ci-dessous :

Année : 2000 - 2023

Ceci est la page d'accueil du rapport Power BI. Son rôle est de présenter brièvement l'objectif du rapport, à savoir : *visualiser l'évolution des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale et par continents, et leur impact sur le réchauffement climatique*.

Je propose ici deux définitions qui seront utiles à la compréhension des prochains slides :

- **GES**, pour **Gaz à Effet de Serre**, qui me permet également de donner le nom français littéral des trois principaux gaz étudiés ainsi que leur formule chimique :
 - Dioxyde de Carbone (CO₂)
 - Méthane (CH₄)
 - Protoxyde d'Azote, aussi appelé Oxyde Nitreux, (N₂O)
- **UTCATF : Utilisation des terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie.** Cette notion est importante dans l'étude des émissions de CO₂, comme

expliquées dans la définition présentée dans le rapport. C'est un terme qui ne parle pas forcément à tout le monde, d'où l'intérêt de le définir ici. J'en profite pour préciser que dans la suite du rapport, toutes les mentions de CO₂ industriel ou de GES industriel signifient qu'il s'agit d'émissions *sans tenir compte de l'UTCATF*, tandis que les émissions totales incluent l'UTCATF.

Nous avons ensuite un sommaire présentant les huit slides de visualisations : quatre relatives à une analyse mondiale, et quatre relatives à une analyse par continents.

Enfin, le slider chronologique situé en bas, que l'on retrouvera sur la plupart des slides, permet de zoomer sur une période de notre choix en choisissant la date de départ et la date de fin de l'analyse, entre 1880 et 2023.

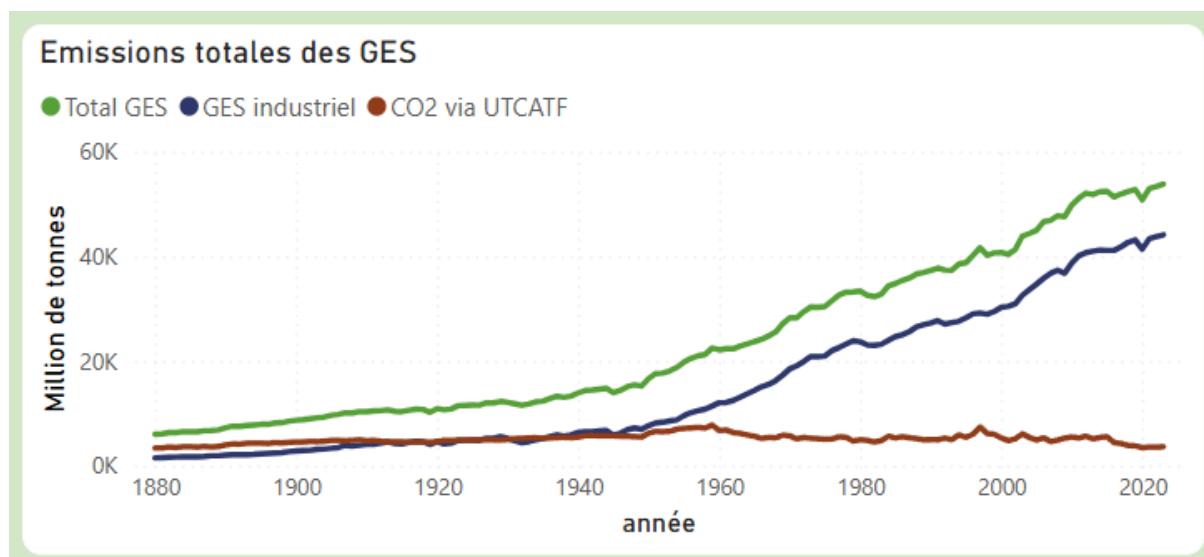
Pour ce compte-rendu, nous allons dérouler les slides dans l'ordre du Power BI.

Comment évoluent les émissions de Gaz à Effet de Serre, au regard de la population et du PIB, à l'échelle mondiale ?

Pour cette première analyse, nous allons regarder l'évolution d'informations générales à l'échelle du monde.

Cette slide est composée de 4 graphiques de courbes, que nous allons détailler ci-dessous.

Emissions totales des Gaz à Effet de Serre



Ce premier graphique justifie les définitions de GES et de UTCATF vues ci-dessus.

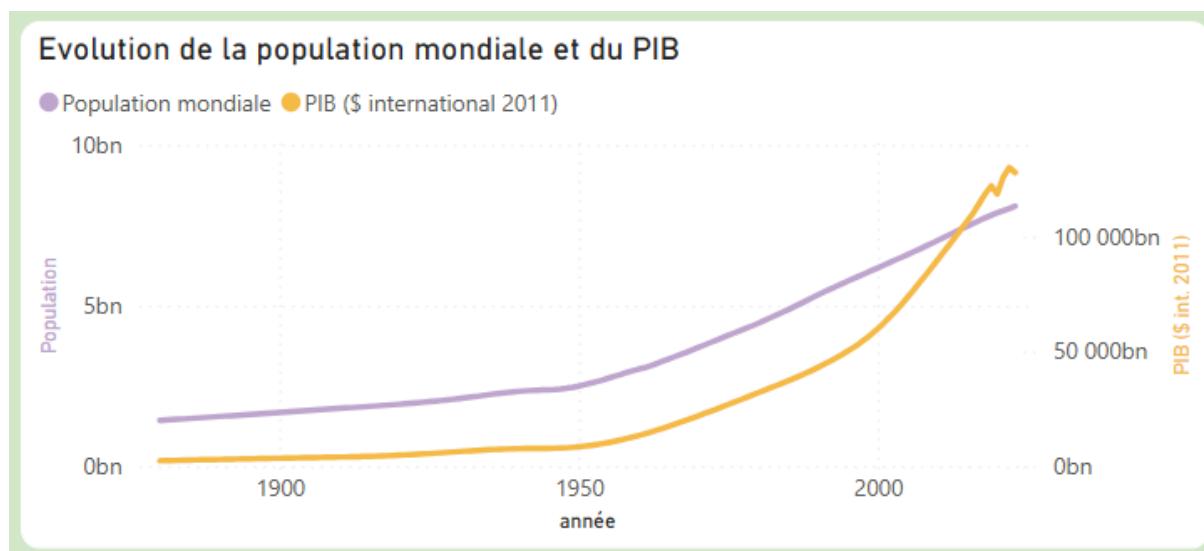
Comme l'indique son nom, il présente l'évolution des émissions des gaz à effet de serre au cours du temps. Sur la capture d'écran, la période étudiée est de 1880 à 2023, mais dans le Power BI, nous pouvons zoomer sur n'importe quelle période grâce au slider chronologique situé en bas. Cela étant valable pour toutes les visualisations et tous les slides, cette information ne sera plus répétée dans le compte-rendu.

Nous avons trois courbes, qui représentent toutes des quantités d'émissions en million de tonnes (équivalent CO₂).

- Total GES, la courbe verte, représente les émissions totales (CO₂, CH₄, N₂O), incluant les émissions de CO₂ issues de l'UTCATF. Cette courbe n'est pas tout-à-fait la somme des deux autres courbes. (D'une part, parce qu'il existe d'autres gaz à effet de serre qui ne sont pas étudiés ici tels que les gaz fluorés, par manque de données ; d'autre part, parce que les données Total GES / GES industriels n'ont pas les mêmes sources que les données de CO₂ via UTCATF, les méthodologies peuvent changer, amenant à des résultats différents.)
- GES industriel : émissions des gaz causés par l'exploitation industrielle (qui représente la grande majorité des émissions depuis les années 50). Par industrie, on entend toute activité humaine non naturelle émettant des gaz à effet de serre, souvent par combustion pour fournir de l'énergie. Cela peut provenir du charbon, du pétrole, etc...
- CO₂ via UTCATF : émission de CO₂ causée par UTCATF (on estime que les émissions des autres gaz dans ce domaine sont négligeables). Lorsque l'on brûle ou coupe des arbres, par exemple, le CO₂ qui y était contenu est relâché, et on réduit les capacités d'absorption naturelles du CO₂ par les arbres (déforestation).

L'on remarque que l'émission de CO₂ liée à l'UTCATF est relativement stable au cours du temps. En revanche, les émissions de gaz industriels explosent à partir des années 1950.

Evolution de la population mondiale et du PIB



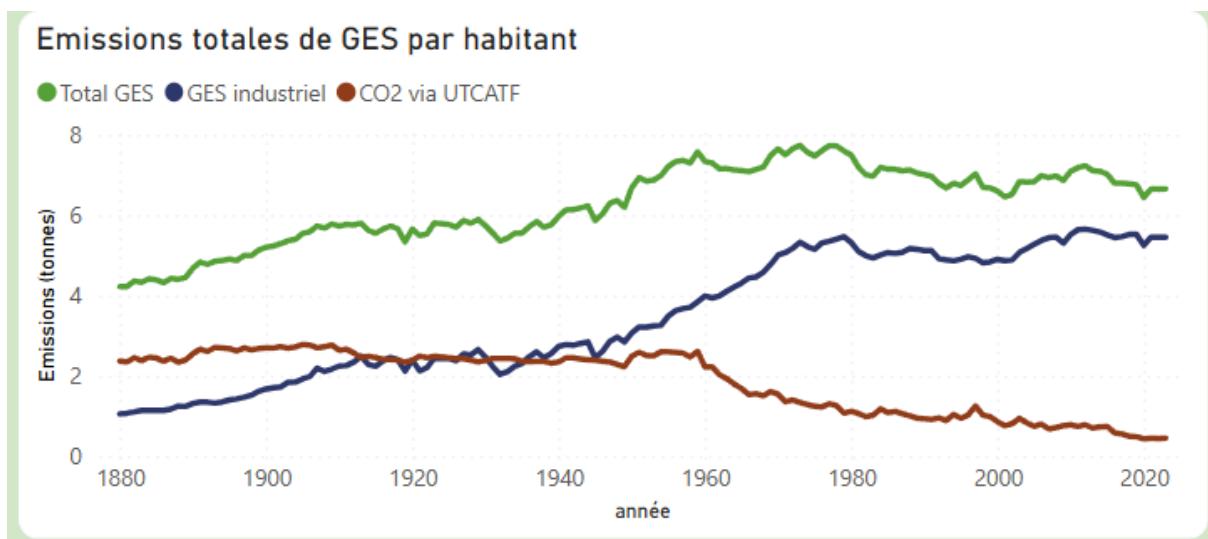
Ce graphique nous montre la croissance de la population mondiale et du PIB (en \$ international 2011).

Il est intéressant de constater que ces courbes suivent une trajectoire semblable à celle des émissions de gaz industriels, avec un boom à partir des années 1950. Le PIB, c'est-à-dire ici la somme des richesses des pays, augmente plus vite que la population.

En effet, une augmentation de la population est également une augmentation de la force de travail, c'est-à-dire de la capacité à produire des richesses. Et cette croissance de la production de richesses se fait par une demande plus élevée en énergie, et donc en une plus forte exploitation de combustibles provoquant des émissions de gaz à effet de serre.

Maintenant que nous avons, d'une part, l'évolution des émissions de GES, et d'autre part, l'évolution de la population et du PIB, il est intéressant de regarder l'évolution des émissions de GES par habitant et par PIB, ce qui est l'objectif des deux prochaines visualisations.

Émissions totales de GES par habitant



Ce graphique reprend donc les trois courbes du premier graphique avec les mêmes couleurs : émissions totales de GES, émissions de GES industrielles, et CO2 par UTCATF. Mais cette fois-ci, ces émissions sont divisées par la population mondiale, et exprimées en tonnes.

Il y a plusieurs choses intéressantes à constater.

Tout d'abord, on remarque que ces courbes ne suivent pas du tout les mêmes tendances que les courbes précédentes. Et c'est assez logique : les émissions de GES (totales et industrielles) ainsi que la population suivent une trajectoire identique, par conséquent, le rapport des premières par la dernière résulte en des courbes plutôt stables.

Là où nous avions deux phases sur les précédentes visualisations (une phase de croissance lente avant 1950 puis une phase de forte croissance après 1950), sur ces trois nouvelles courbes, nous pouvons distinguer quatre phases.

Les périodes des phases données ci-dessous sont à titre indicatif, qu'à quelques années près (2 ou 3 ans).

Première phase : 1880 à 1914

Dans cette première phase, les émissions de CO₂ par UTCATF par habitant sont relativement stables (2.37t à 2,49t), avec une hausse à 2.6-2.8t de 1890 à 1910.

En revanche, les émissions de GES industrielles connaissent déjà une hausse passant de 1.05 à 2.28 tonnes par habitant.

Logiquement, la courbe représentant le total des GES suit la tendance des deux autres courbes cumulées.

Deuxième phase : 1914-1950

Cette période est caractérisée par deux guerres mondiales (1914-1918 ; 1939-1945) et donc une grande instabilité politique et économique.

On constate ici une stabilisation de toutes les émissions, avec une très légère baisse des émissions de CO₂ par UTCATF, et une légère hausse des émissions industrielles.

C'est durant cette période que les émissions de gaz industriels dépassent celles issues de l'UTCATF.

Troisième phase : 1950-1978

On remarque ici une très forte hausse des émissions de gaz industriels, passant d'environ 3 à plus de 5 tonnes par habitant (presque 5.5t en 1980).

De façon presque symétrique, les émissions de CO₂ dues à l'UTCATF sont en baisse à partir de 1960, passant d'environ 2.5 à 1.25 tonnes par habitant, soit une division par deux.

Les émissions totales suivent une hausse jusqu'en 1960 (lorsque les émissions de CO₂ ne diminuent pas encore), puis se stabilisent grâce aux diminutions des émissions d'UTCATF qui compensent les augmentations des émissions industrielles.

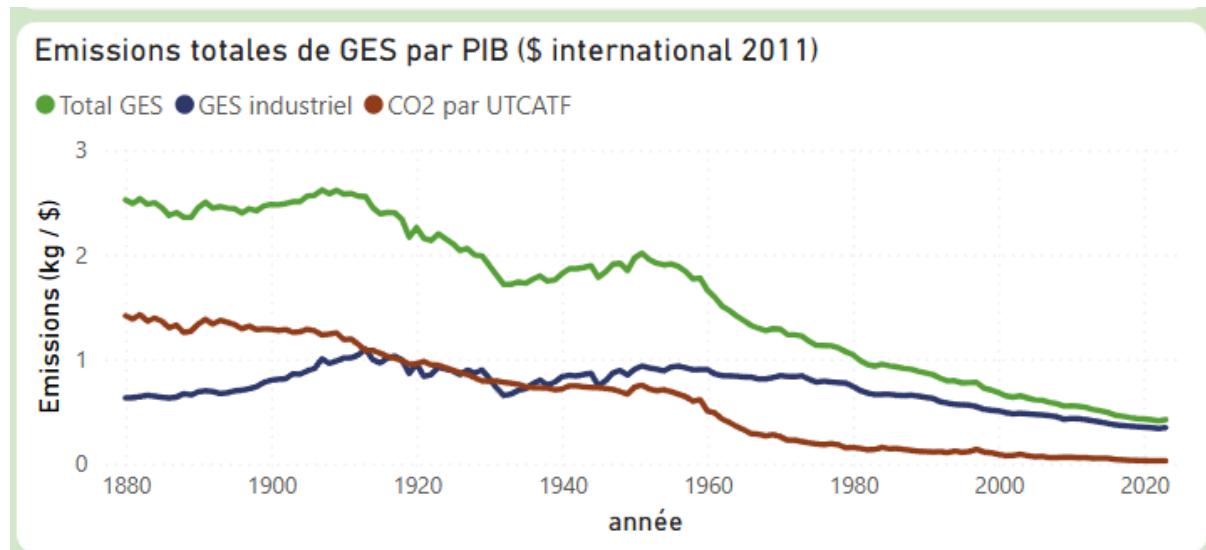
Quatrième phase : 1978-2023

Enfin, sur la dernière phase, nous constatons une stabilisation des émissions industrielles par habitant, avec une légère diminution des émissions globales, et les émissions de CO₂ par habitant issues d'UTCATF qui continuent de diminuer.

Etant donné que les émissions d'UTCATF mondiales sont restées stables, et que la population a grandement augmenté à partir de 1950, il est logique que ces dernières, rapportées aux habitants, aient diminué.

Cette stabilisation depuis le début des années 80 semble indiquer que la consommation moyenne d'un habitant de la planète Terre émet approximativement la même quantité de gaz à effet de serre.

Emissions des GES par PIB



Ce dernier graphique de notre première slide nous montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre rapportées au PIB.

Nous pouvons, là-aussi, distinguer plusieurs phases.

Première phase : 1880-1913

Cette première phase coïncide avec celle du précédent graphique dans le sens où elle s'étale sur la même période.

Il est intéressant de constater que les émissions de GES industriels suivent la même tendance, rapportées au PIB, que lorsqu'on les rapporte à la population.

En revanche, les émissions de CO2 d'UTCATF par PIB suivent une trajectoire symétriquement opposée, connaissant une légère baisse.

Au final, ces deux courbes se compensent, et la courbe des émissions totales de GES par PIB est donc plutôt stable sur cette période d'avant-guerre.

Deuxième phase : 1913-1932

Cette fois, cette deuxième phase ne suit pas la même période que la deuxième phase du graphique précédent, puisqu'elle s'étend jusqu'en 1932 et non 1950.

On constate une grande réduction des émissions de GES par PIB sur cette période, ce qui est assez surprenant. Cela signifie que durant cette période, le PIB a une croissance plus élevée que les émissions totales de GES, puisque la conséquence du rapport du deuxième sur le premier résulte en une décroissance.

Troisième phase : 1932-1951

Durant cette troisième phase, qui correspond finalement à la deuxième moitié de notre deuxième phase du graphique précédent, l'on constate une stabilisation avec une très légère hausse des émissions de GES par PIB. Les émissions de CO2 UTCATF par PIB continuent de descendre, mais les émissions industrielles par PIB ont une très légère hausse.

Quatrième phase : 1951 - 2023

La dernière phase peut être en réalité décomposée en deux sous-phases.

D'abord, nous constatons une diminution rapide des émissions totales de GES par PIB jusqu'en 1975 environ, principalement marquée par une réduction des émissions de CO2 via UTCATF par PIB tandis que les émissions industrielles sont stables.

Ensuite, nous voyons une diminution plus faible des émissions (totales, industrielles et CO2 UTCATF) jusqu'à nos jours.

Cela indique que, pour un même taux de richesse, nous avons besoin d'émettre moins de gaz à effet de serre. Cela est probablement dû au fait que nous utilisons de plus en plus d'énergie propre.

Conclusion du premier slide

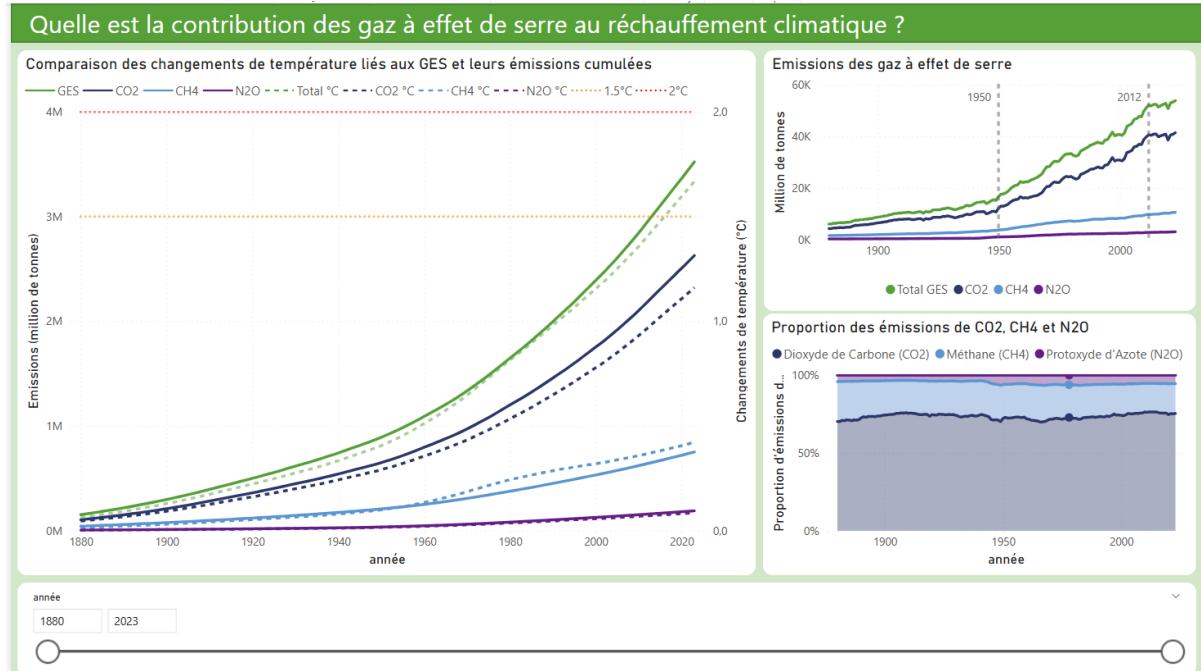
Ce premier slide qui nous offre une analyse globale de nos données nous permet de faire des observations très intéressantes, et pas forcément intuitives de prime abord.

En effet, le fait que la production de richesses nécessite moins d'émissions de GES n'est pas forcément une conclusion à laquelle nous pourrions nous attendre de prime abord.

Cela nous montre aussi l'importance d'avoir des graphiques clairs et impartiaux, et la facilité avec laquelle nous pourrions manipuler des données pour arriver aux conclusions voulues. En effet, si nous ne présentions que le graphique d'évolution du PIB et le graphique des émissions selon le PIB, nous pourrions tout-à-fait en arriver à la conclusion : "les émissions de GES sont en diminution, donc il n'y a aucun problème". Ce que dément le premier graphique qui montre toujours une forte augmentation des émissions de GES lorsqu'on ne les rapporte pas au PIB.

Après cette analyse globale des émissions de gaz à effet de serre, nous allons observer la proportion des trois principaux gaz à effet de serre étudiés.

Quelles sont les proportions des trois principaux gaz à effet de serre étudiés, et leurs effets sur la température mondiale ?

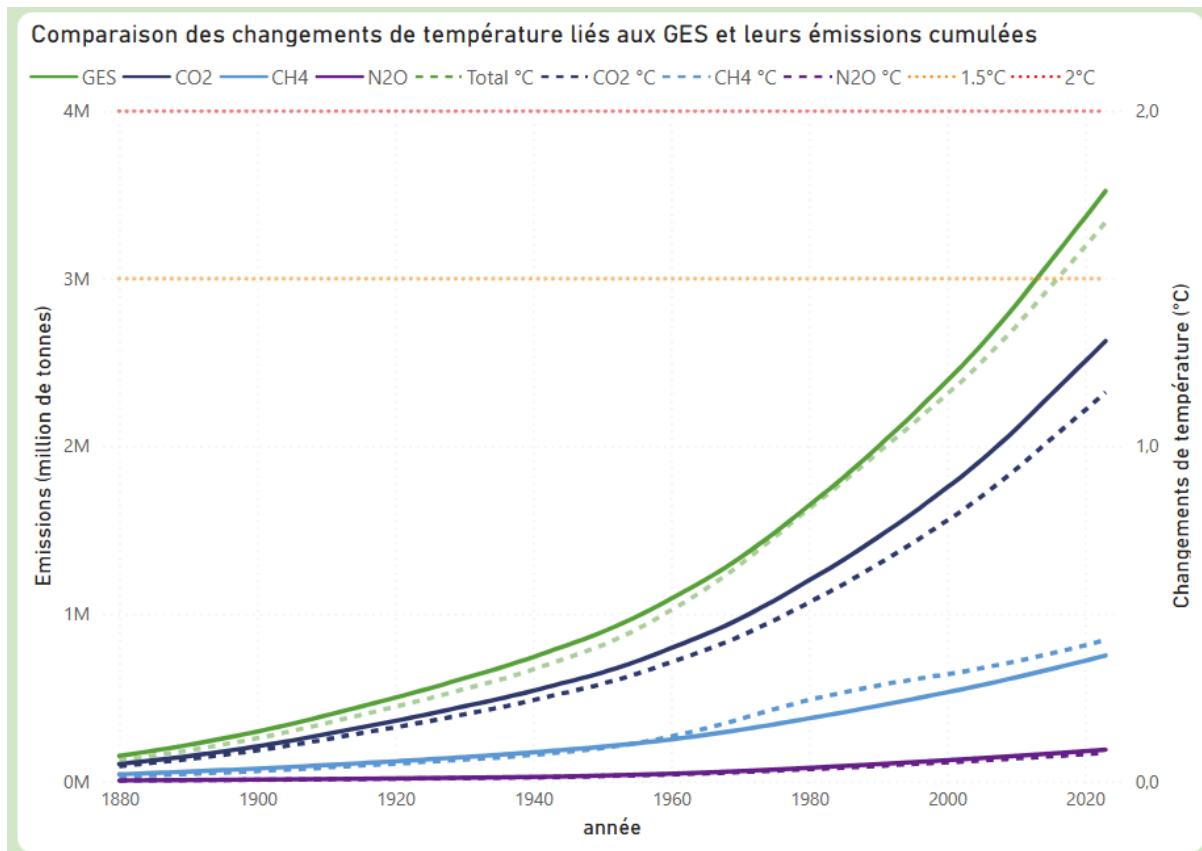


Les trois principaux gaz à effet de serre anthropiques, c'est-à-dire liés aux activités humaines, sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), et le protoxyde d'azote (N₂O). Il y a également les gaz fluorés, pour lesquels nous n'avons pas de données ici, et qui représentent une proportion moindre.

L'objectif de cette slide est de présenter les proportions des trois premiers gaz à effet de serre, et de voir leurs effets sur l'augmentation de la température.

En ce qui concerne le **méthane** et le **protoxyde d'azote**, les données sont exprimées en **équivalent CO₂** (elles correspondent à un calcul de conversion qui permet de prendre en compte la puissance de réchauffement de ces deux gaz par rapport au CO₂ qui sert de référence). Le méthane a un pouvoir de réchauffement de 28 à 36 fois supérieur à celui du CO₂ sur une période de 100 ans mais est moins durable dans l'atmosphère (environ 12 ans, tandis que le CO₂ reste plusieurs siècles). Le protoxyde d'azote a un pouvoir de réchauffement d'environ 265 à 298 fois plus élevé que le CO₂ sur 100 ans, et peut rester dans l'atmosphère plus de 100 ans.

Comparaison des changements de température liés aux GES et leurs émissions



Ce graphique présente deux évolutions distinctes au cours du temps : l'évolution des émissions des trois gaz à effet de serre cumulées (courbes continues), et les effets sur l'augmentation globale des températures de chacun de ces gaz (courbes en tiret). Des seuils de température (ligne droite en pointillés) ont également été placés.

Effets des gaz à effet de serre sur l'augmentation globale des températures :

Définissons tout d'abord ce que nous entendons par "effets sur l'augmentation globale des températures". Dans ce rapport, nous n'étudions pas l'augmentation des températures terrestres, cette partie étant étudiée par d'autres membres de l'équipe. Nous partons donc du principe, dans ce graphique, que, oui, il y a bien une augmentation globale des températures sur la planète. Les données de température présentées ici sont une estimation du réchauffement causé par les émissions cumulées de gaz à effet de serre. Cette estimation est basée sur l'approche *TCRE* (*réponse climatique transitoire aux émissions cumulées de carbone*), qui est une relation linéaire reliant les émissions cumulées de CO₂ (ou équivalent CO₂ pour les autres gaz à effet de serre) à l'augmentation de température moyenne mondiale, et définie par le rapport du *GIEC AR6* (2021). Le réchauffement représente le changement de la température moyenne à la surface du globe (GMST). Il faut bien comprendre qu'il s'agit d'une **estimation à partir d'un modèle mathématique**, et non pas d'*observations réelles*. L'objectif de ce modèle est d'établir la part de responsabilité humaine dans le réchauffement climatique.

Evolution des émissions cumulées de gaz à effet de serre :

Les quatre courbes continues représentent, pour chaque année, le cumul de toutes les années précédentes des émissions de gaz à effet de serre.

- La courbe verte représente l'ensemble des gaz à effet de serre cumulés.
- La courbe bleue foncé représente le cumul des émissions de CO₂.
- La courbe bleue claire représente le cumul des émissions de méthane.
- La courbe mauve représente le cumul des émissions de protoxyde d'azote.

Puisque les estimations de changements de température causés par les gaz sont calculés à partir d'une relation linéaire basée sur le cumul des émissions de ces gaz, il me semblait intéressant de mettre ces courbes en parallèle. Puisqu'il s'agit d'un cumul, elles ne font qu'augmenter : on prend en compte les émissions de toutes les années précédentes, elles ne peuvent donc pas décroître. En revanche, elles peuvent augmenter plus ou moins rapidement en fonction de l'augmentation ou de la baisse des émissions d'une année sur l'autre.

Ainsi, on constate que le cumul des émissions de CO₂ augmente de façon exponentielle. Le cumul des émissions de méthane croît davantage après 1950, tout comme le cumul des émissions de protoxyde d'azote bien que ces dernières restent faibles en comparaison des deux autres.

Evolution des changements de température :

De par le calcul mathématique issu d'une relation linéaire, il est logique que ces courbes en tirets suivent une trajectoire presque parallèle aux émissions de GES. Ces courbes ont les mêmes couleurs que les émissions utilisées pour l'estimation.

Ainsi :

- La courbe verte en tirets représente l'estimation des changements de température globaux moyens causés par l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre.
- La courbe bleue foncée représente les changements de température provoqués par émissions de CO₂.
- La courbe bleue claire se rapporte au méthane.
- Et la courbe mauve en tirets se rapporte au protoxyde d'azote.

On peut remarquer que les courbes des changements de température sont bien plus proches des courbes d'émissions pour le méthane et le protoxyde d'azote que pour le CO₂, ce qui peut s'expliquer par le pouvoir de réchauffement supérieur de ces deux derniers gaz sur une période de 100 ans. Ainsi, la courbe de température du méthane dépasse même la courbe des émissions de celui-ci, alors que la courbe des températures liées au CO₂ reste en-dessous de la courbe d'émissions de CO₂ tout en suivant une trajectoire parallèle.

A partir de 1960, la courbe de changement de température dû au méthane dépasse celle des émissions cumulées de celui-ci, ce qui peut s'expliquer par son pouvoir de réchauffement plus élevé que pour le CO₂.

En revanche, on peut s'étonner que la courbe de changements de température dus aux émissions de N₂O ne soit pas plus élevée compte tenu du pouvoir de réchauffement extrêmement plus fort du N₂O par rapport aux deux autres. En effet, ces deux courbes liées au N₂O sont quasiment superposées. Cela pourrait s'expliquer, d'une part, par le fait que le N₂O est émis en quantité beaucoup moins grande, d'autre part par le fait que le pouvoir de réchauffement est calculé sur une période de 100 ans, et qu'il faudrait peut-être attendre plus de temps pour voir exploser les effets du N₂O sur le réchauffement.

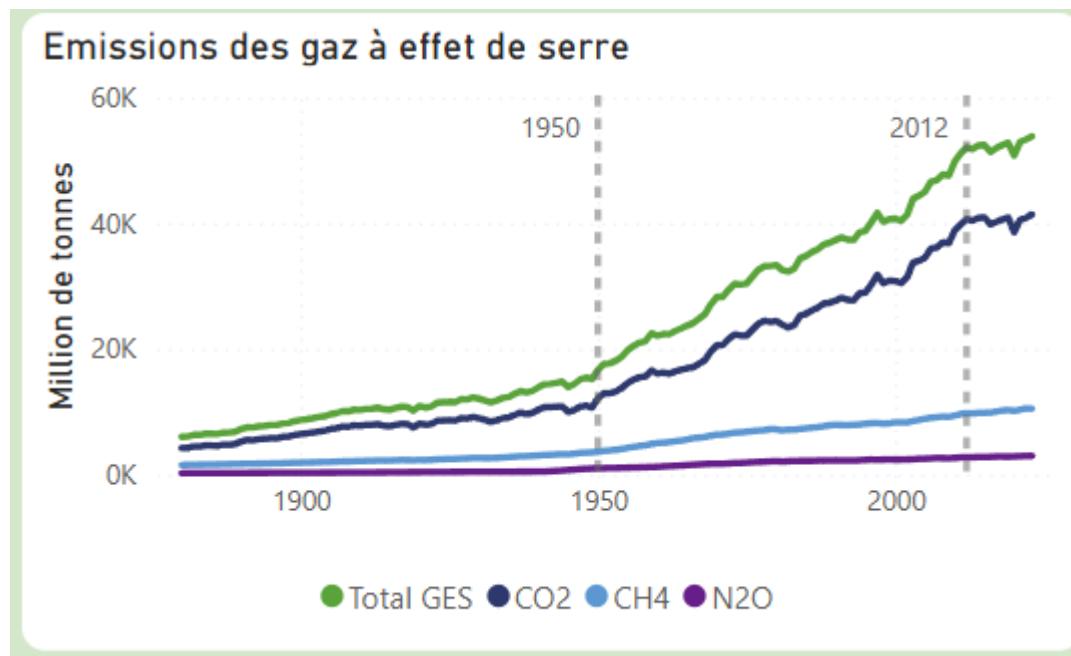
Seuils de +1.5°C et +2°C

La ligne droite en pointillée orange représente le seuil de 1.5°C. Il s'agit d'un seuil d'augmentation de température par rapport à la période préindustrielle (moyenne des températures sur les années 1850-1900) utilisée par le GIEC et l'Accord de Paris de 2015 sur le climat. Les experts scientifiques estiment que le seuil de +1.5°C de hausse de température est associé à des impacts climatiques moins graves que ceux attendus à +2°C et est un objectif à ne pas dépasser d'après l'Accord de Paris. En effet, au-delà de 1.5°C, les experts affirment que les risques de **boucles de rétroactions**, de **points de bascule** climatiques et de **conséquences graves sur les écosystèmes et les sociétés humaines** augmentent fortement.

J'ai également tracé le seuil de 2°C à ne surtout pas dépasser, en ligne pointillée rouge.

On remarque que le seuil de 1.5°C est dépassé par les changements de température globaux à partir de 2016. Toutefois, il faut nuancer cette observation, car l'on ne compare pas les mêmes choses. Les seuils de 1.5° et 2° ne devraient pas être dépassés sur une moyenne glissante d'une période de 10 ans et basées sur des observations réelles. Or, ce qui est calculé ici à propos des courbes de température, c'est une estimation mathématique sur ce qu'a provoqué l'humanité en termes de réchauffement, mais pas la température constatée. Cela ne veut donc pas dire que nous avons réellement dépassé ce seuil de 1.5°C en 2016. En revanche, il est certain que nous nous en approchons, et que la tendance des changements de température est à la hausse. Ainsi, si l'on continue sur cette trajectoire, nous atteindrons le seuil critique de +2°C d'ici quelques années.

Evolution des émissions des gaz à effet de serre



Les quatre courbes représentent les émissions de GES.

Pour toutes ces courbes, nous observons deux phases : croissance modérée de 1880 à 1950, puis croissance très rapide après 1950, ce qui correspond à nos observations dans le slide précédent.

La courbe verte, la plus haute, représente les émissions totales de GES ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O} + \text{autres}$ dont nous n'avons pas le détail).

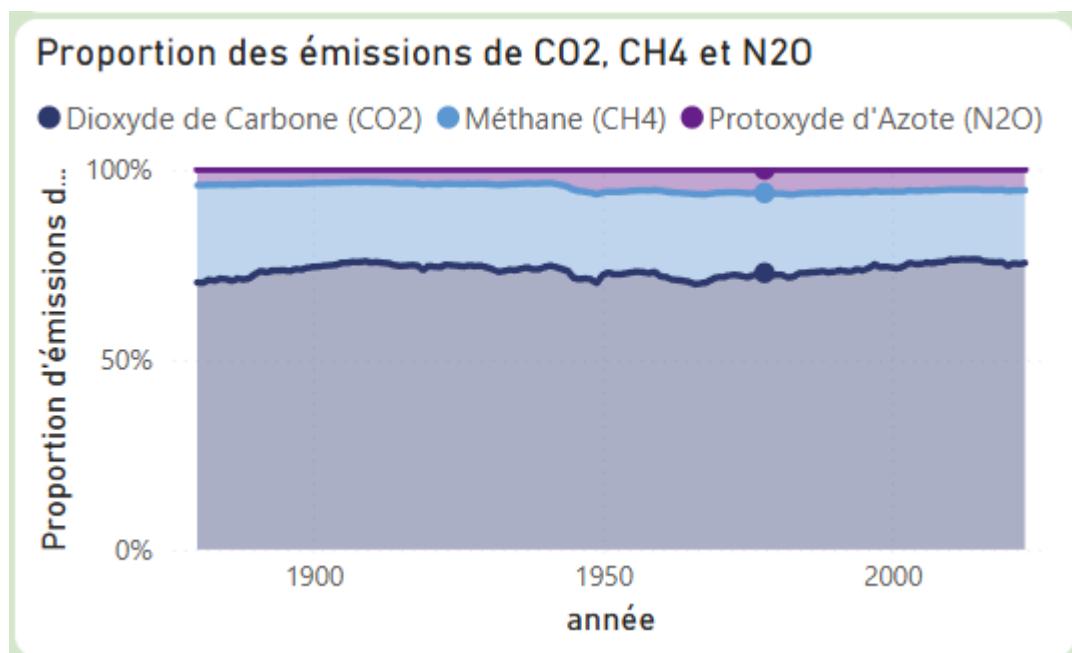
Cette courbe est identique à celle du premier graphique de la première slide puisqu'elle représente la même chose, mais il était intéressant de la remettre ici pour recontextualiser.

La courbe bleu foncé représente l'évolution des émissions de CO_2 . On voit qu'elle suit de façon presque parallèle la courbe d'émissions totales, bien qu'elle ait tendance à s'éloigner légèrement de celle-ci au cours du temps. Cela signifie que l'augmentation des émissions de l'ensemble des GES est plus rapide que l'augmentation des émissions de CO_2 . On constate toutefois une stabilisation des deux courbes à partir de 2012, avec un creux en 2020 qui correspond à la période du COVID et des confinements, et donc un ralentissement économique dans le monde entier.

En bleu clair, nous avons l'évolution des émissions de méthane. L'augmentation de ces émissions est plus modérée par rapport au CO_2 , mais continue de croître après 2010 contrairement aux émissions de CO_2 qui se stabilisent. On peut en déduire qu'à l'échelle mondiale, l'humanité fait plus d'efforts pour réduire les émissions de CO_2 que pour réduire les émissions de méthane.

En mauve, nous avons l'évolution des émissions de protoxyde d'azote. Ces émissions sont très faibles avant 1950, et commencent réellement à croître dans la deuxième moitié du XXème siècle, de façon moins élevée que les deux autres.

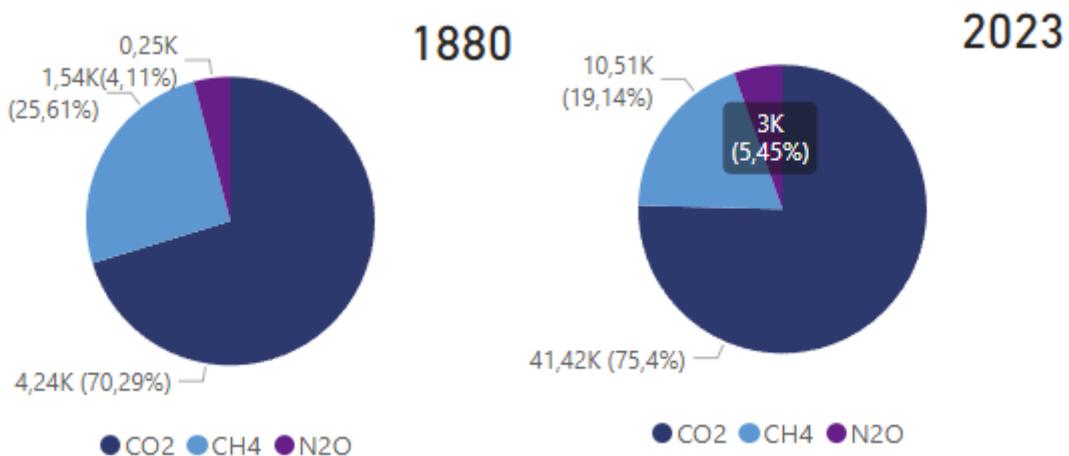
Proportion des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O



Ce dernier visuel nous montre l'évolution de la proportion des trois gaz à effet de serre observés, au cours du temps.

On remarque que les proportions sont plutôt stables, avec le CO₂ représentant environ 75%, le CH₄ environ 20%, et le N₂O environ 5%.

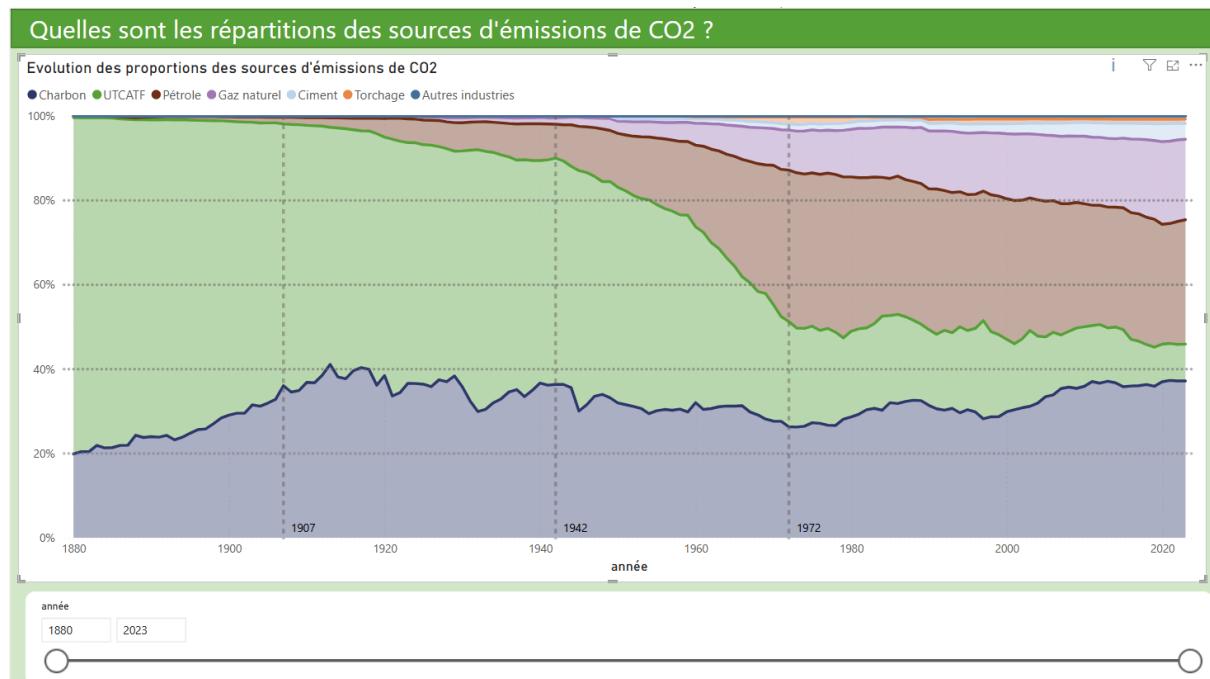
Notons qu'un tooltip personnalisé sur ce graphique permet de voir les proportions exactes de chaque gaz pour une année précise. Ainsi, en survolant les extrémités (1880 et 2023), on peut voir que les proportions n'ont pas drastiquement changé au cours du temps : le CO₂ est passé de 70 à 75%, et le méthane de 25 à 20% environ.



Cela signifie que les émissions de ces différents GES ont évolué en même temps, et ont donc toutes suivi la même forte augmentation comparativement à leurs valeurs de 1880.

Puisque le CO₂ est le gaz à effet de serre d'origine anthropique le plus répandu, nous allons, dans la prochaine slide, observer les répartitions des différentes sources d'émissions de CO₂.

Quelles sont les répartitions des sources d'émissions de CO₂ ?



Description du graphique

Ce graphique nous montre l'évolution des proportions des différentes sources d'émissions de CO₂ au cours du temps, toujours à l'échelle mondiale.

Un tooltip personnalisé permet d'avoir le détail des pourcentages de chaque catégorie pour l'année survolée sous forme de camembert, comme nous allons le voir ci-dessous.

Des lignes horizontales situées tous les 20% permettent de simplifier la lecture du graphique et de mieux se rendre compte des proportions.

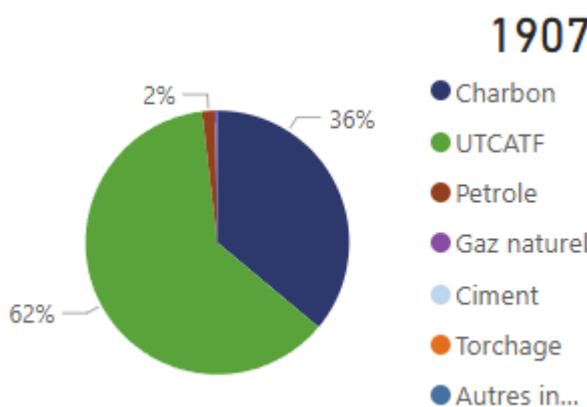
J'ai également tracé trois lignes verticales sur ce graphique, afin de représenter quatre phases distinctes.

Etude des différentes périodes

Première phase : 1880-1907

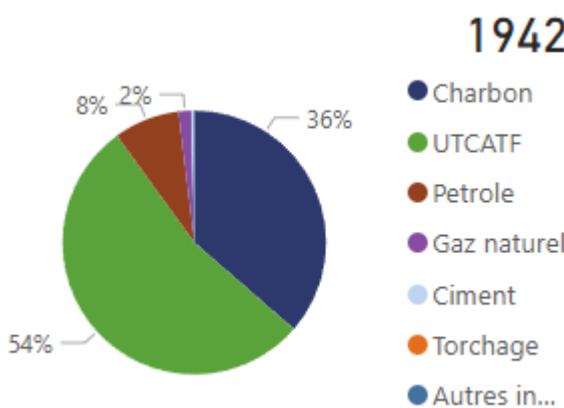
La révolution industrielle s'est étendue à travers le monde au cours du XIXème siècle. Cette première phase marque la fin de ce siècle et le début du XXème. A cette époque, les émissions de CO₂ étaient dues en grande majorité à l'utilisation des terres, l'exploitation des sols (UTCATF, 62 à 80%). Le reste était principalement dû à l'exploitation du charbon comme sources d'énergie (20-36%). Au cours de ces trois décennies, nous voyons que la proportion d'émissions dues au charbon augmente, prenant plus de place par rapport aux émissions liées à l'UTCATF qui reste majoritaire.

Bien que le pétrole commence à être exploité durant cette période, il ne représente qu'une infime quantité des émissions de CO₂ (2%).



Deuxième phase : 1907-1942

Cette sombre période de l'histoire, marquée par les deux guerres mondiales, voit une stabilisation de la proportion d'émissions de CO₂ dues à l'exploitation du charbon, tandis que la proportion liée à l'exploitation du pétrole prend de plus en plus de place. De ce fait, la proportion des émissions liées à l'UTCATF diminue. Aussi, nous commençons à exploiter les gaz naturels pour produire de l'énergie, mais cela reste négligeable (moins de 2%).



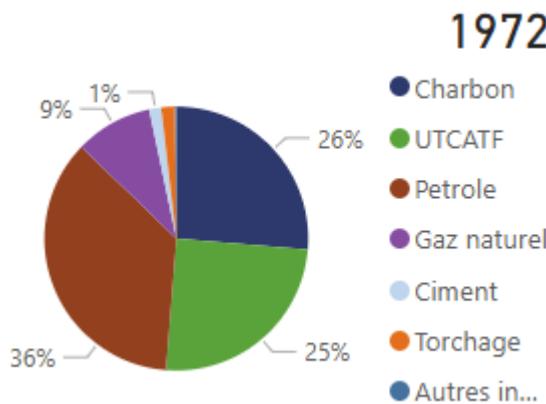
Notons que cela ne signifie pas que les émissions de CO₂ liées à l'UTCATF diminuent sur cette période. Même si c'est effectivement le cas comme vu sur de précédents graphiques, ce n'est pas ce qui est mesuré dans ce graphique-ci. Ici, on ne regarde que l'évolution des proportions des sources d'émissions entre elles. La proportion représentée par l'UTCATF pourrait diminuer quand bien même ses émissions de CO₂ augmenteraient, si les augmentations des autres sources de CO₂ étaient plus fortes de sorte à prendre une plus grande proportion. Il faut donc bien faire attention à ne pas mal interpréter ce graphique.

De la même manière, le fait que la proportion d'émissions dues au charbon soit relativement stable sur cette période (dans le sens où les proportions sont identiques entre le point de départ et le point d'arrivée malgré quelques fluctuations) ne veut pas dire que les émissions de CO₂ dues au charbon sont restées stables. Elles ont très bien pu augmenter durant cette période, mais de façon moins forte que les émissions liées à l'exploitation du pétrole.

Cette remarque est valable pour la lecture globale de ce graphique.

Troisième phase : 1942-1972

Cette phase, essentiellement située après la seconde guerre mondiale, correspond à une période d'essor économique et de boom démographique. On y voit l'exploitation du pétrole exploser et prendre une part bien plus grande des émissions de CO₂, au détriment de la proportion des émissions liées à l'UTCATF qui chute drastiquement. La proportion d'émissions liées au charbon baisse légèrement, tandis que celle liée au gaz naturel augmente de façon plus modérée que celle liée au pétrole. Nous voyons aussi apparaître à cette période, dans des proportions beaucoup plus petites, les émissions de CO₂ liées à la fabrication du ciment, et au torchage de gaz (combustion volontaire de gaz inutilisé et gaspillé pour des raisons budgétaires, en particulier lors du forage de puits de pétrole).



Ainsi, à la fin de cette période, les émissions liées à l'UTCATF et à l'exploitation du charbon représentent chacune un quart des émissions de CO₂. Celles liées à l'exploitation du pétrole représentent 36%. Celles liées à l'exploitation de gaz naturel représentent moins de 10%, et les autres se partagent moins de 5% des émissions totales.

Quatrième phase : 1972 à 2023

Cette phase d'un demi-siècle se caractérise par une évolution plus stable des proportions, dans le sens où les augmentations et diminutions sont plus modérées.

La proportion de charbon remonte. Celle des émissions liées à l'UTCATF continuent de diminuer, et les émissions liées au pétrole prennent une place de moins en moins importante. On note une augmentation assez élevée de la proportion d'émissions de CO₂ liés à la fabrication du ciment, comparativement à son faible taux.



Conclusion

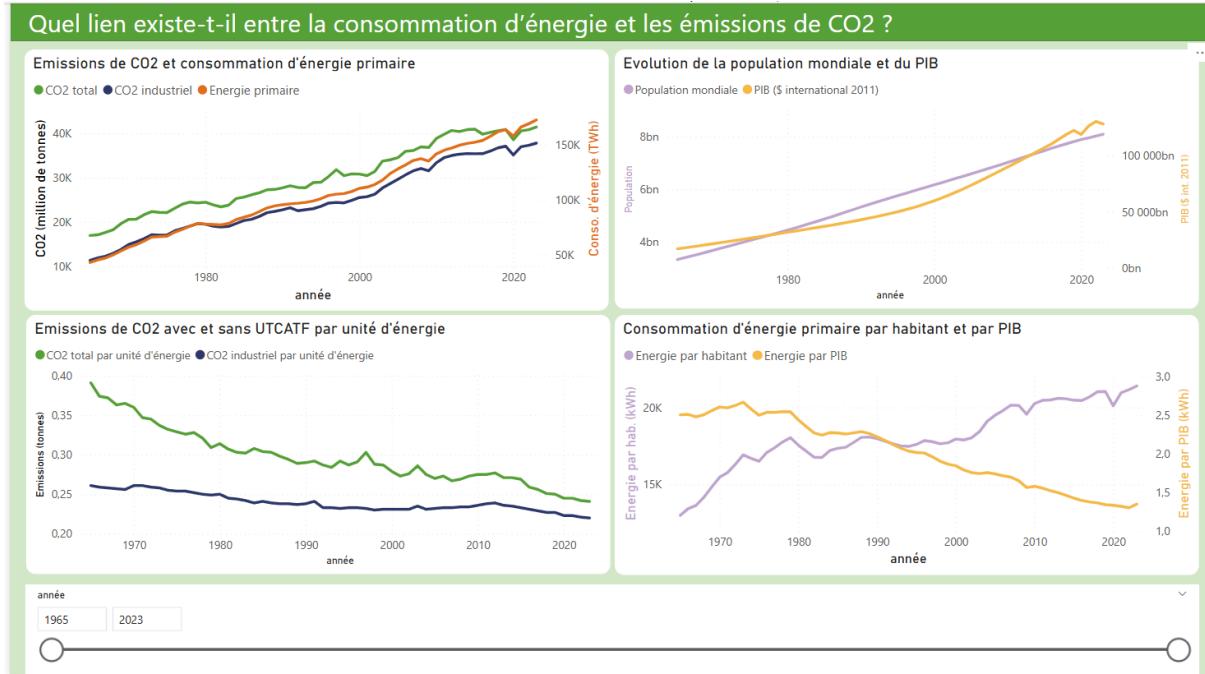
Comprendre l'évolution des sources d'émissions de CO₂ au cours du temps nous permet de trouver des explications quant aux augmentations des émissions de CO₂, et surtout de trouver où l'on peut faire des efforts pour réduire celles-ci.

Par exemple, le charbon est encore aujourd'hui responsable de plus d'un tiers des émissions de CO₂. Or, on sait que certains pays utilisent toujours de nombreuses usines à charbon pour produire de l'énergie ; une solution à mettre en place urgentement est de remplacer ces usines à charbon par des sources d'énergie propre, qui n'émettent pas de CO₂ (par exemple : nucléaire, éolien, solaire, hydraulique... chacune ayant ses propres avantages et inconvénients, mais cela est encore un autre sujet très vaste !).

De même, l'exploitation du pétrole est la source de 30% des émissions à l'heure actuelle, et on sait qu'elle sert essentiellement aux transports (terrestres, maritimes, aériens). Mettre en place des politiques pour réduire ces transports (limiter les échanges internationaux et le tourisme ? utiliser plus de voitures électriques ?) permettrait de réduire cette exploitation et donc de réduire les émissions de CO₂. Mais cela aura bien sûr de forts impacts économiques et sociaux, et dans un monde ultra-mondialisé, où la majorité de nos produits proviennent de l'importation internationale pour des réductions de coûts, et où les voyages semblent être la passion de nombreuses personnes, ces politiques semblent difficiles à mettre en place. En particulier dans un monde où préparer la guerre semble plus important pour les personnes au pouvoir, que d'œuvrer pour la transition énergétique.

Et puisque les sources d'émissions de CO₂ (charbon, pétrole, gaz...) nous amène à parler d'énergie, le prochain slide présentera la relation entre les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie primaire dans le monde.

Quel lien existe-t-il entre la consommation d'énergie et les émissions de CO2 ?



Nous allons ici observer le lien entre la consommation d'énergie primaire et les émissions de CO2.

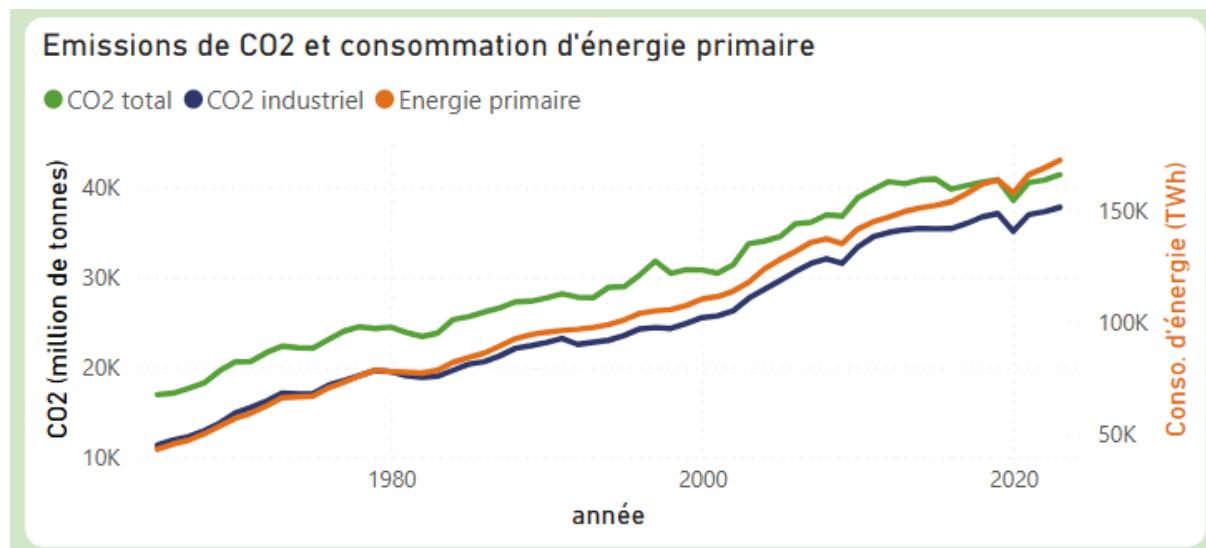
La période étudiée s'étend de 1965 à 2023 ; en effet, nous ne disposons pas des données énergétiques avant 1965.

Energie primaire : l'énergie primaire représente l'énergie brute avant toute transformation (ex. : pétrole brut avant raffinage, charbon avant combustion, énergie solaire avant conversion en électricité).

Elle inclut :

- **Énergies fossiles** (pétrole, charbon, gaz naturel)
- **Énergies renouvelables** (solaire, éolien, hydroélectricité, biomasse)
- **Énergie nucléaire**

Relation entre émissions de CO2 et consommation d'énergie primaire



Ce graphique présente trois courbes à lire sur deux axes différents.

Sur l'axe de gauche, nous avons les émissions de CO2 en million de tonnes. Il correspond aux courbes verte (émissions totales, incluant UTCATF) et bleue foncée (émissions de CO2 industriel, sans UTCATF). Elles suivent une trajectoire parallèle.

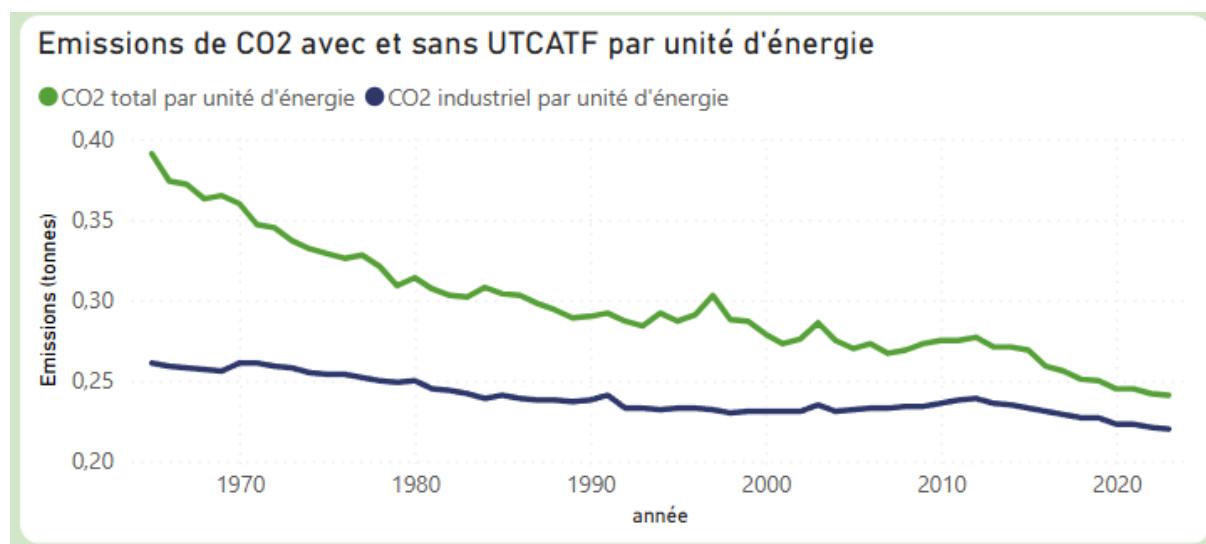
Sur l'axe de droite, nous avons la consommation d'énergie primaire exprimée en TWh (terawatt / heure), qui correspond à la courbe orange.

On constate que cette courbe est très proche de celle des émissions de CO2. Il semble donc y avoir une corrélation entre ces deux courbes, qui peut s'expliquer très simplement : les émissions de CO2 industriel sont en grande partie dues à la consommation d'énergie primaire (exploitation du charbon et du pétrole comme vus précédemment).

Toutefois, plus on avance dans le temps, plus ces deux courbes s'éloignent. En effet, la courbe de consommation d'énergie augmente plus que celle des émissions de CO2. Et bien que l'on voit une stabilisation des émissions après 2010, la courbe de consommation d'énergie continue de croître. Cela peut s'expliquer par le fait que nous utilisons de plus en plus d'énergie propre.

On remarque une pointe vers le bas en 2020 pour toutes les courbes : cela est très certainement dû à la pandémie de covid-19, qui a résulté en une grande baisse de l'économie et de la production.

Émissions de CO2 par unité d'énergie

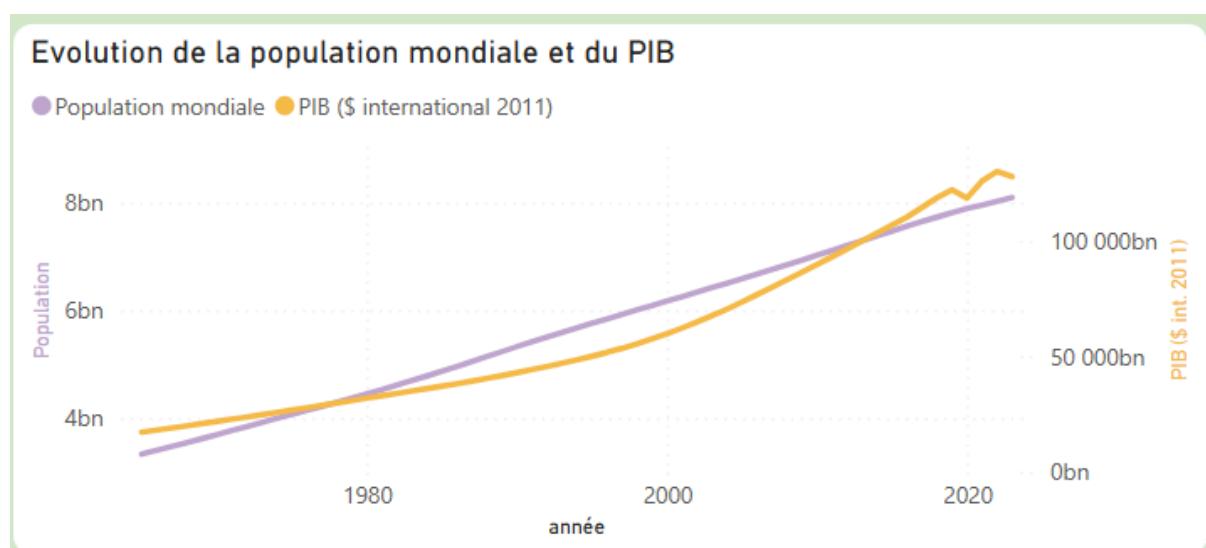


Ce graphique montre l'évolution des émissions de CO2 totales (avec UTCATF) et industrielles (sans UTCATF) par unité d'énergie, exprimées en tonnes.

Ce qui est très intéressant dans ce graphique, c'est qu'on constate une diminution des émissions par unité d'énergie au cours du temps (alors même que les émissions de CO2 en elles-mêmes augmentent, tout comme la consommation d'énergie primaire). Mais cela est logique avec l'observation du graphique précédent : le fait que la courbe de consommation d'énergie grimpe plus vite que celle des émissions de CO2, et donc s'en éloigne, indique que l'on émet moins de CO2 pour une même production énergétique. Ce qui se confirme bien ici.

Ainsi, même si les besoins en énergie sont croissants (notamment du fait de l'augmentation de la population et du PIB), on produit de plus en plus d'énergie proprement, c'est-à-dire sans émettre de CO2, ce qui est plutôt une bonne nouvelle.

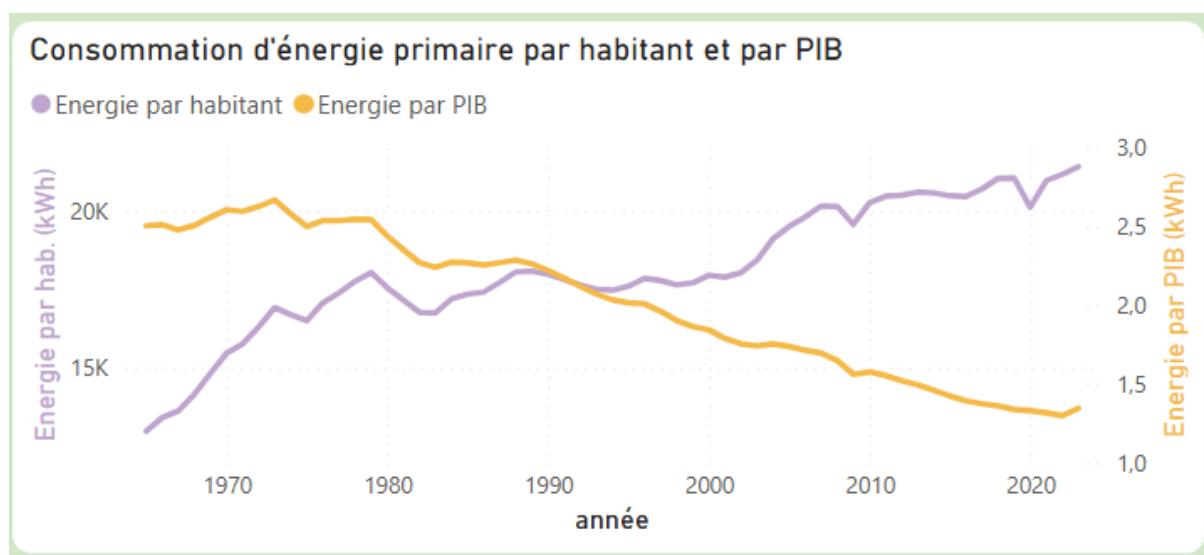
Evolution de la population mondiale et du PIB (1965-2020)



Il n'y a pas grand chose à dire sur ces deux courbes, puisqu'elles ont déjà été présentées dans la première slide. La seule différence est la période étudiée. Dans le premier slide, il y a la possibilité de faire un zoom sur la période 1965-2023. En revanche, ici, nous ne pouvons remonter avant 1965.

Je trouve tout de même intéressant de remettre cette courbe ici, pour contextualiser la courbe ci-dessous qui montre la consommation d'énergie par habitant et par PIB.

Consommation d'énergie primaire par habitant et par PIB



Ce graphique nous montre la consommation d'énergie primaire par habitant et par PIB (\$ international 2011). L'unité est la même (kWh), mais les échelles sont différentes puisque les unités d'énergie ne sont pas divisées par la même chose. Ainsi, l'énergie par habitant varie de 13 000 à 21 000 kWh de 1965 à 2023, tandis que par PIB elle varie de 2.5 à 1.35 kWh.

Ce qui est assez flagrant, c'est que ces courbes suivent des tendances opposées.

En effet, la consommation d'énergie par habitant augmente au cours du temps. En moyenne, un habitant dans le monde consomme donc plus d'énergie en 2023 qu'en 1965 (augmentation d'environ 50%). Cela n'est pas très étonnant. Le monde est de plus en plus industrialisé. Les pays autrefois sous-développés sont maintenant en développement et ont davantage d'accès à l'électricité et au chauffage. En outre, même pour les pays qui étaient développés il y a soixante ans comme la France, les progrès technologiques ne cessent d'augmenter, et donc les besoins en électricité également.

Ce qui est plus étonnant en revanche, c'est de voir que la consommation d'énergie primaire par PIB est en baisse depuis le début des années 1970. Cela signifie que nous avons besoin de moins d'énergie pour une même production de richesses. La production de richesses mondiales augmente plus rapidement que notre consommation d'énergie primaire. Cela est pourtant cohérent avec l'étude du premier slide qui montrait l'évolution des

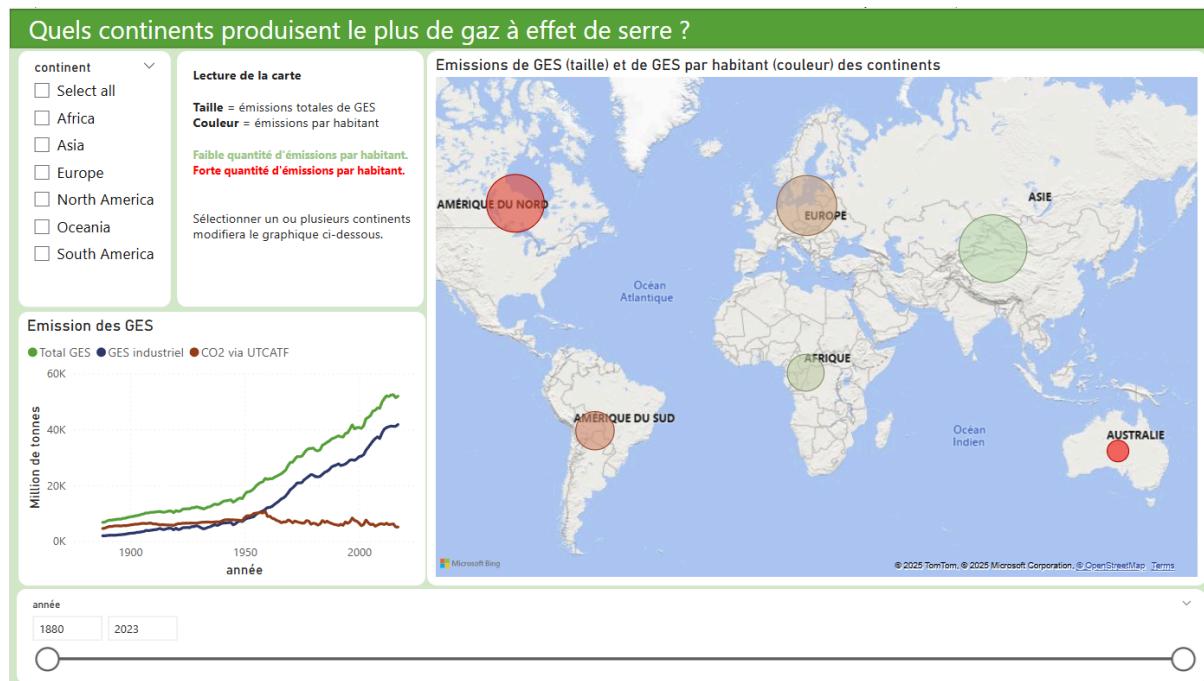
émissions de GES par PIB : nous avions déjà constaté que nous émettions moins de GES pour une même production de richesse. Une fois encore, nous pouvons supposer que de plus en plus de richesses sont produites à partir d'énergies propres (notamment le nucléaire qui représente une très grande part de la production d'énergie chez certains pays développés comme la France).

Conclusion

Ce dernier slide de notre analyse mondiale nous permet de terminer sur une note d'espérance. Bien que les besoins en énergie augmentent avec la population, et que la consommation d'énergie primaire soit en hausse, nous produisons de plus en plus d'énergie propre. Nous pourrions donc être capables, en continuant nos efforts, de ne plus être dépendant des énergies fossiles et de cesser l'exploitation du pétrole et du charbon afin de réduire drastiquement les émissions de CO₂.

Maintenant que nous avons fait une analyse mondiale des émissions de gaz à effet de serre, nous allons zoomer sur les continents, et comparer les continents entre eux.

Quels continents produisent le plus de gaz à effet de serre ?



Ce slide est composé de deux graphiques : un graphique de courbes, et une carte du monde.

Explications générales de la carte du monde

Le plus important est la carte du monde, qui montre deux choses :

- la quantité cumulée d'émissions de gaz à effet de serre par continents, sur la période choisie. Cela se traduit par la taille de la bulle. Cela nous permet d'avoir un aperçu très rapide des continents qui émettent le plus de gaz au cours d'une période donnée.
- la quantité cumulée d'émissions de gaz à effet de serre par habitant pour chaque continent, via la couleur. Une couleur proche du vert pâle indique une faible émission de CO₂ par habitant, tandis qu'une couleur chaude et proche du rouge indique une très forte émission de CO₂ par habitant.

Cette carte est intéressante car elle nous montre les différences qui existent entre les continents en termes d'émissions. Ainsi, les continents qui émettent beaucoup de GES ne sont pas forcément ceux qui en émettent le plus par habitants. Il est logique qu'un territoire contenant plus d'habitants émette plus de GES, d'une part parce que les besoins en énergie seront plus grand : les habitants ont besoin de se chauffer, de se déplacer, de se nourrir, bref, de vivre dans un certain confort, ce qui implique naturellement de produire de l'énergie et donc d'émettre du GES tant que les alternatives propres ne sont pas majoritaires. D'autre part, parce que plus d'habitants signifie aussi plus de travailleurs, donc plus de production de richesses, qui nécessite généralement de l'énergie et par conséquent des émissions de gaz à effet de serre.

En restant sur la période la plus grande, de 1880 à 2023, nous distinguons à la fois deux catégories de continents concernant les émissions globales, et trois catégories concernant les émissions par habitants.

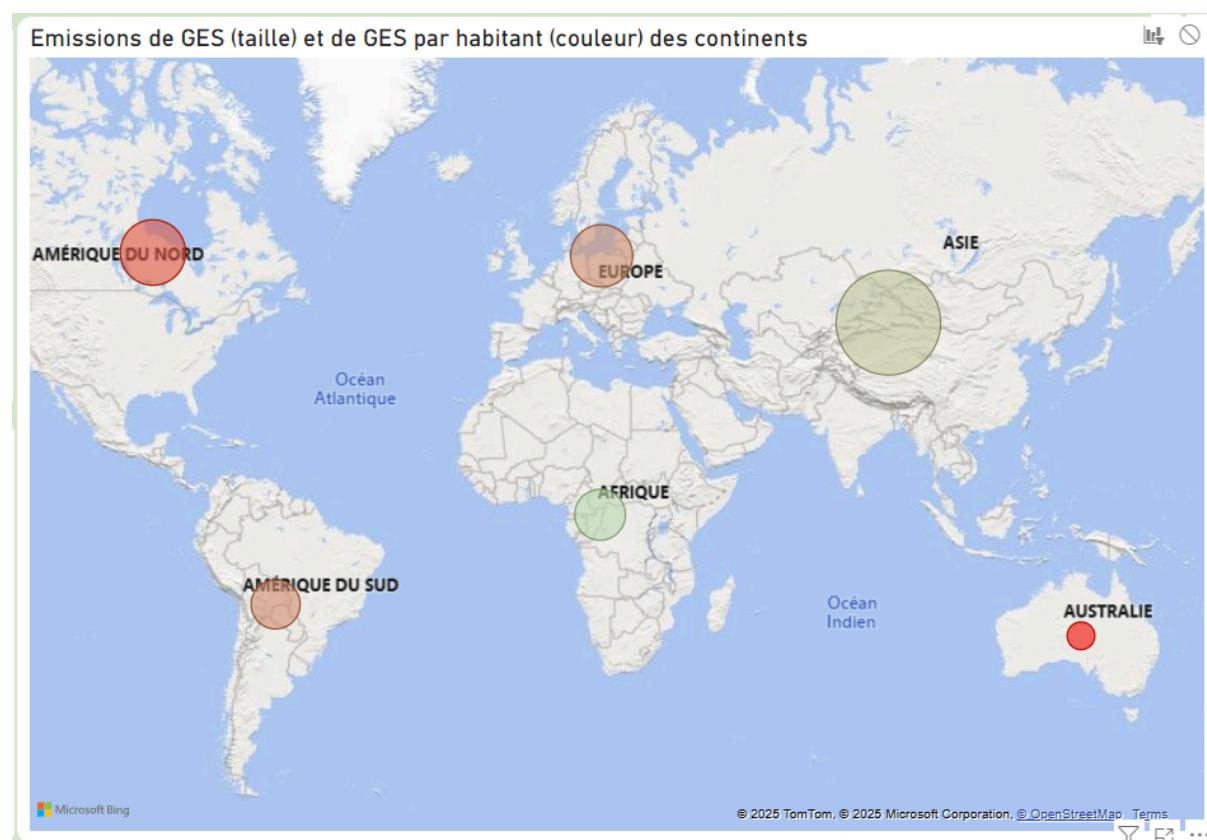
Hémisphère Nord VS Hémisphère Sud

Il est intéressant de constater que les continents qui ont produit le plus de GES sur cette échelle de temps sont les trois continents de l'hémisphère nord : Asie, Europe et Amérique du Nord.

Cette différence était vraiment flagrante au début de la période étudiée, par exemple, sur la période de **1880 à 1900** :



Cette différence a tendance à se réduire si l'on prend les deux dernières décennies, **de 2003 à 2023** :



L'Asie reste un important contributeur aux émissions de GES, mais on peut constater que l'Amérique du Sud et l'Afrique rattrappent l'Amérique du Nord et l'Europe.

Cela s'explique par le fait qu'au début du XXème siècle, l'Europe et l'Amérique du Nord étaient déjà bien développés, contrairement à l'Amérique du Sud et à l'Afrique. Ces continents sont aujourd'hui bien plus développés et industrialisés, ils émettent donc plus de GES.

Émissions de GES par habitant

Comme évoqué plus haut, nous pouvons distinguer trois pôles concernant les émissions de GES par habitant, et ces trois pôles, constitués chacun de deux continents, restent toujours les mêmes, quelque soit la période, bien qu'ils soient plus ou moins prononcés.

Les "gros consommateurs"

Cette catégorie que nous appelons "gros consommateurs" est celle pour laquelle les émissions de GES par habitant est la plus élevée. Elle est composée de l'Amérique du Nord et de l'Océanie (principalement Australie).

L'Océanie est un continent ayant très peu d'habitants, par conséquent, les émissions de GES provenant de ce continent sont faibles par rapport aux autres continents ; mais en moyenne, chaque habitant est à l'origine d'une très grande quantité d'émission de GES.

Nous pouvons faire une supposition : plus un pays est riche, plus la vie de ses habitants est confortable (en moyenne), et donc plus elle nécessite d'énergie pour maintenir ce confort (électricité, chaleur, transports, loisirs...). Sans jeter la pierre à qui que ce soit, nous pouvons en déduire que les habitants de l'Amérique du Nord et de l'Océanie, en moyenne, polluent plus que le reste du monde en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre.

Si un pays très peuplé comme la Chine avait le même taux d'émission de GES par habitant, ce serait une catastrophe planétaire en ce qui concerne le dérèglement climatique. Et pourtant, de quel droit pourrions-nous priver les habitants de l'Asie de jouir du même confort que les habitants de l'Océanie ? Ces questions nous montrent qu'au-delà de l'aspect écologique, il y a des enjeux sociaux, en matière d'inégalités, qu'il faut prendre en compte. Il est important que chaque habitant prenne conscience de sa propre responsabilité dans la crise climatique, et que les pays les plus riches fassent preuve de sobriété.

Les "consommateurs modérés"

Cette catégorie regroupe l'Europe et l'Amérique du Sud. Pour ces deux continents, et à toute période étudiée entre 1880 et 2023, les émissions de GES par habitant sont intermédiaires, entre ceux qui émettent le plus et ceux qui émettent le moins.

En tant qu'eurocéens, nous en avons conscience, nous vivons avec un certain confort, et sans doute consommons-nous plus d'énergie et de produits émettant des GES, que

nécessaire. Même si ce n'est pas au niveau de la catégorie précédente, nous devons, nous aussi, faire attention à notre consommation d'énergie et de biens.

Les “faibles consommateurs”

Cette catégorie regroupe les deux derniers continents en matière d'émissions de GES par habitant : l'Asie, et l'Afrique.

Ces continents, très peuplés, ont des pays très pauvres et parfois peu développés, ce qui explique qu'ils produisent et émettent moins de GES.

Cette carte permet de mettre l'accent sur les inégalités qui existent entre les continents eux-mêmes, pour des raisons historiques, climatiques, géopolitiques.

Le confort dans lequel nous sommes habitués à vivre, en tant qu'occidentaux, est directement lié aux émissions de GES. En effet, pour avoir ce confort, nous avons besoin d'une grande production d'énergie et de biens, ce qui génère des GES. Tout être humain devrait pouvoir jouir du même confort, il est injuste qu'il n'y en ait que certains qui puissent en jouir selon la zone géographique où il est né. Et pourtant, nous savons que si toute l'humanité vivait dans le même confort que nous-autres, occidentaux, européens, américains du nord, les émissions de GES seraient nettement plus élevées, et le seuil critique des +2°C serait dépassé depuis longtemps. Nous vivrions d'ores et déjà dans un monde invivable. Mais alors, que faire ? Comment expliquer aux peuples d'Asie et d'Afrique que pour des raisons climatiques, ils n'auront pas le droit au même confort que nous, quand nous avons pu profiter durant des décennies, insouciants, et que nous continuons encore d'en profiter aujourd'hui ? La recherche et la technologie permettront-elles de garder le confort actuel et de l'apporter au reste du monde tout en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre ? Ou bien devrions-nous abandonner une partie de notre confort, pour "montrer l'exemple" ? Produire moins, consommer moins de produits non nécessaires, imaginer un autre modèle de société où la consommation de biens n'est plus la principale actrice du bonheur.

Mais gardons ces questions pour le moment, et continuons de parcourir le rapport.

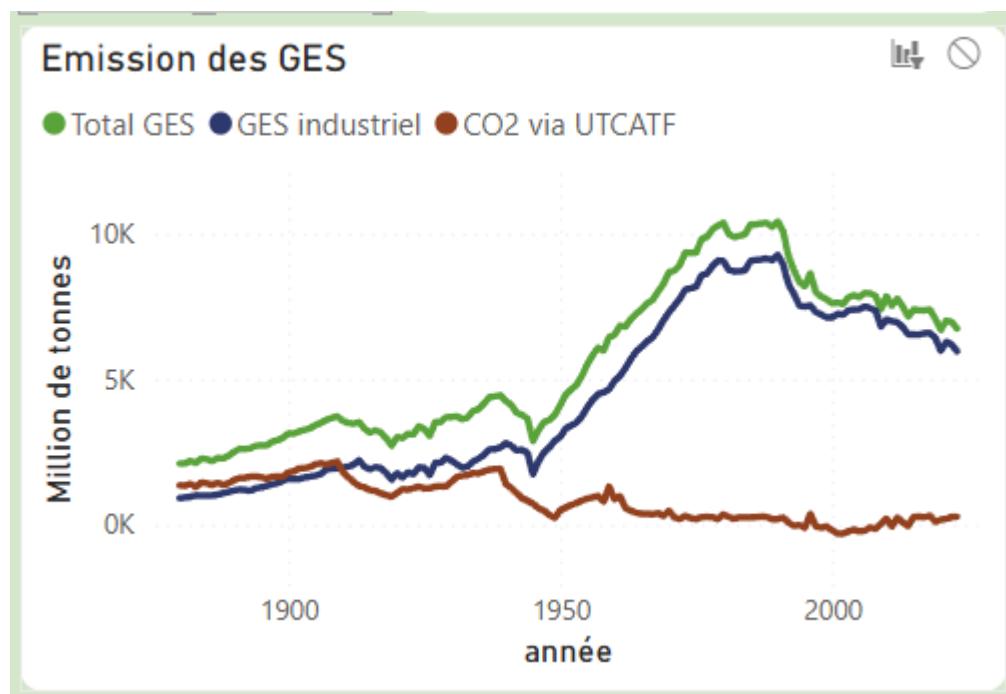
Émission des GES des continents

L'autre graphique, en courbes, est un graphique que nous avions déjà analysé dans la première slide, puisqu'il montre l'évolution, au fil du temps, des émissions de GES totales, industrielles, et des émissions de CO₂ liées à l'UTCATF.

Mais ce qui est intéressant ici, c'est que l'on peut filtrer par continent. Nous pouvons sélectionner un ou plusieurs continents, soit via le filtre en haut à gauche, soit en cliquant (ou ctrl + clic) sur les bulles de la carte du monde. Le graphique s'adapte alors pour montrer la somme des émissions pour les continents sélectionnés.

Cela est très intéressant, car nous pouvons observer des tendances globales pour certains continents.

Nous pouvons, par exemple, faire un focus sur l'**Europe** :

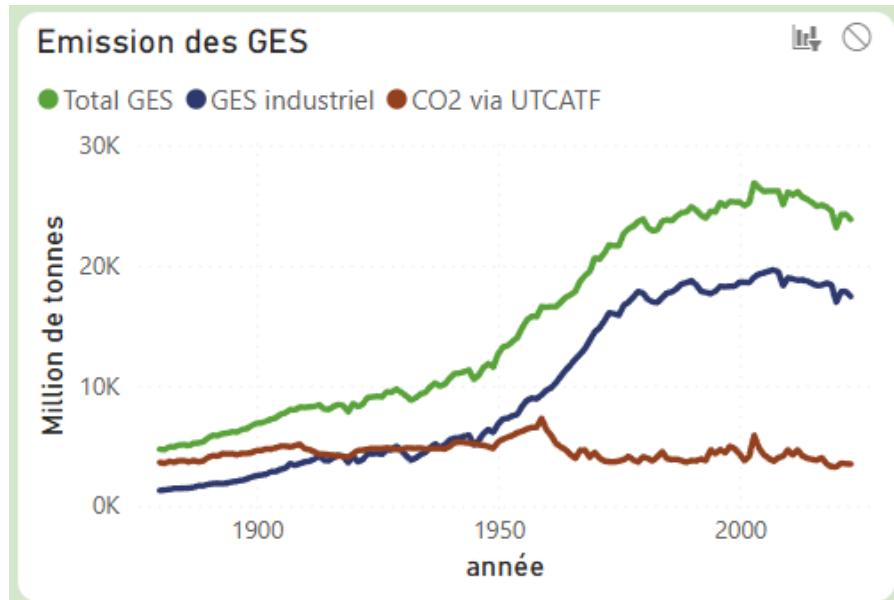


Nous voyons plusieurs périodes distinctes. Augmentation des émissions jusqu'en 1909, puis chute jusqu'en 1919 (la guerre mondiale est passée par là). Nouvelle augmentation jusqu'en 1939. Nouvelle guerre mondiale et donc chute des émissions jusqu'en 1945. Énorme boom des émissions (grande croissance économique, baby-boom, beaucoup de choses à rebâtir après la guerre) jusqu'en 1980.

Période de stagnation des émissions jusqu'en 1990. Prise de conscience du réchauffement climatique lié aux activités humaines. Réduction drastique des émissions jusqu'en l'an 2000. Nouvelle stagnation voire légère hausse pendant une dizaine d'années, puis légère baisse jusqu'à nos jours.

Naturellement, les émissions de GES sont fortement liées à l'histoire géopolitique d'un continent (guerres, croissance économique, crises...) et cela est valable pour tous les continents.

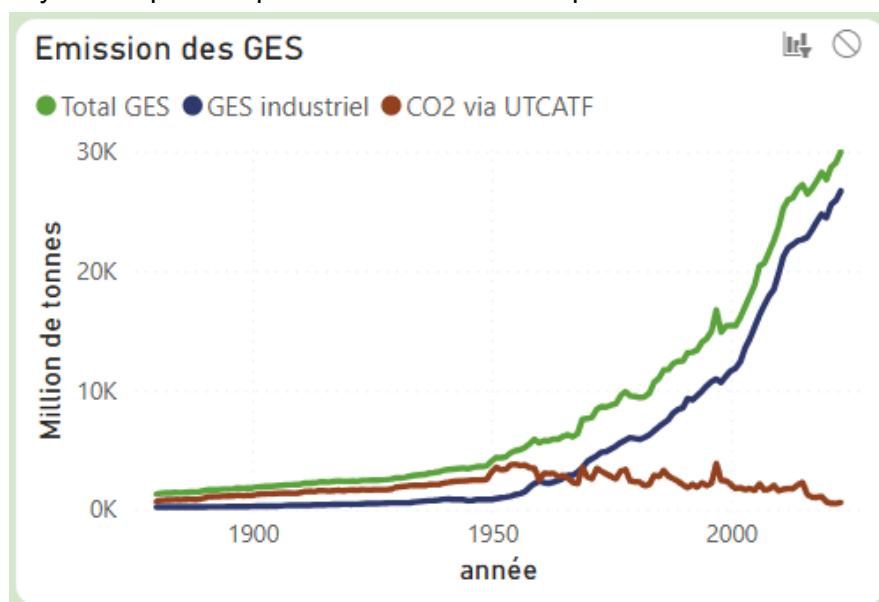
Maintenant, prenons **tous les continents à l'exception de l'Asie**, c'est-à-dire celui qui a la plus faible émission de GES par habitant :



Ces courbes suivent globalement la tendance européenne, avec quelques variations dues aux situations de chacun de ces continents, mais on remarque une prise de conscience dans les années 80, puis une réduction progressive des émissions de GES, ce qui est plutôt bon signe. Cela est certainement dû au développement d'énergie propre dans ces continents.

Mais, n'est-ce pas étrange ? Ces courbes ne suivent pas du tout la tendance mondiale du premier slide, où l'on voyait une augmentation continue, sans stabilisation ni descente... Pourtant, nous avons sélectionné cinq continents sur six.

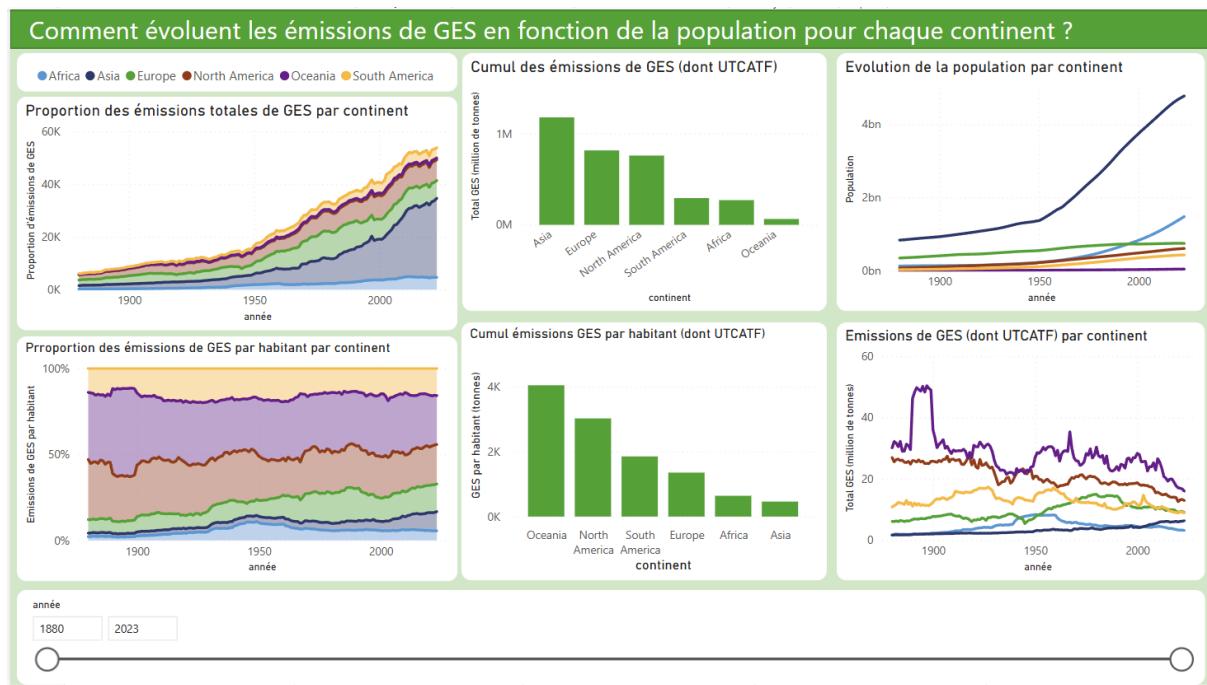
Voyons un peu ce qu'il en est du continent que nous avions délaissé : **l'Asie**.



Les émissions de GES en Asie augmentent de façon exponentielle. Cela confirme que ce continent, qui a la plus faible émission par habitant, est aussi celui avec la plus forte émission absolue (bulle de la plus grande taille sur la carte du monde). Mais surtout, à lui seul, il parvient à changer complètement la tendance mondiale.

Le fait qu'il soit le continent émettant le plus de GES tout en ayant la plus faible émission par habitant nous permet de déduire que c'est aussi le continent avec la plus grande population (ce que nous allons vérifier au prochain slide). Il est donc tout-à-fait logique qu'il émette davantage de GES que les autres continents, et ce, même si les données d'émission sont alarmantes.

Comment évoluent les émissions de GES en fonction de la population pour chaque continent ?

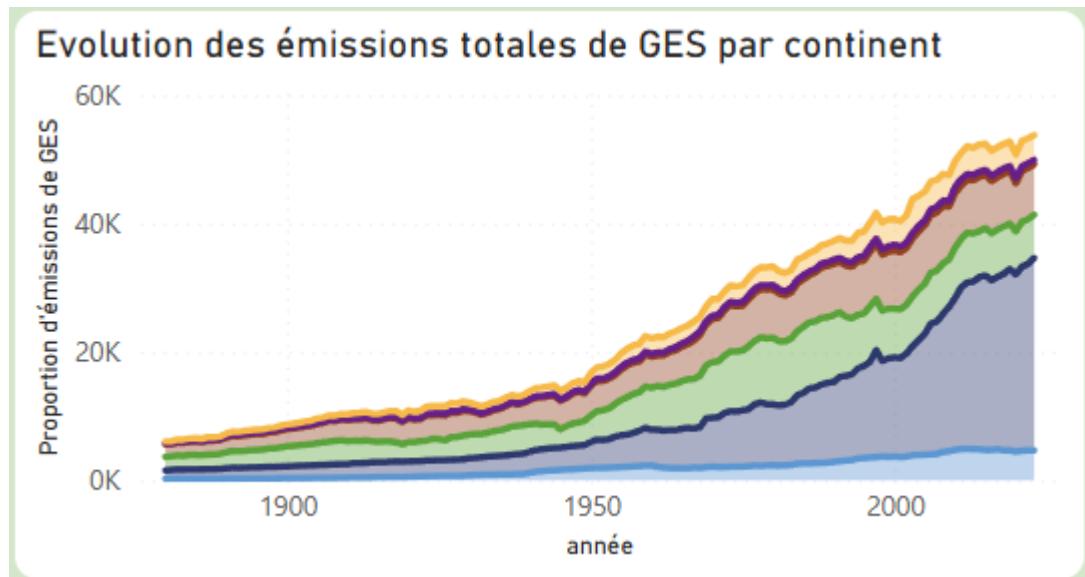


Allons un peu plus dans le détail de l'évolution des émissions de GES en fonction de la population.

Cette slide relativement dense nous montre six graphiques explicités ci-dessous.

Evolution des émissions totales de GES par continent

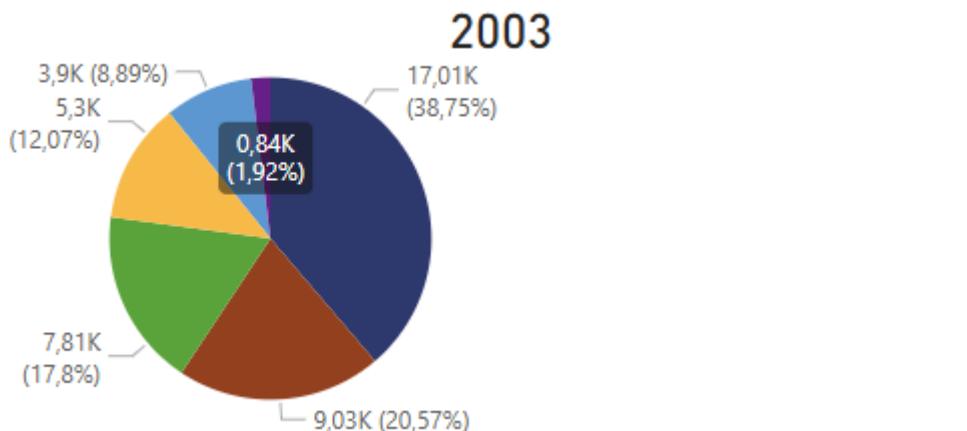
● Africa ● Asia ● Europe ● North America ● Oceania ● South America



Comme son nom l'indique, ce graphique en courbes présente l'évolution des émissions de GES au cours du temps, par continent. Les valeurs sont superposées, ce qui permet de mieux se rendre compte des proportions de chaque, et d'avoir la valeur mondiale sur la couche la plus haute.

Un tooltip personnalisé nous permet d'avoir un focus sur une année particulière, pour voir plus précisément la part de chaque continent et ses émissions sur l'année.

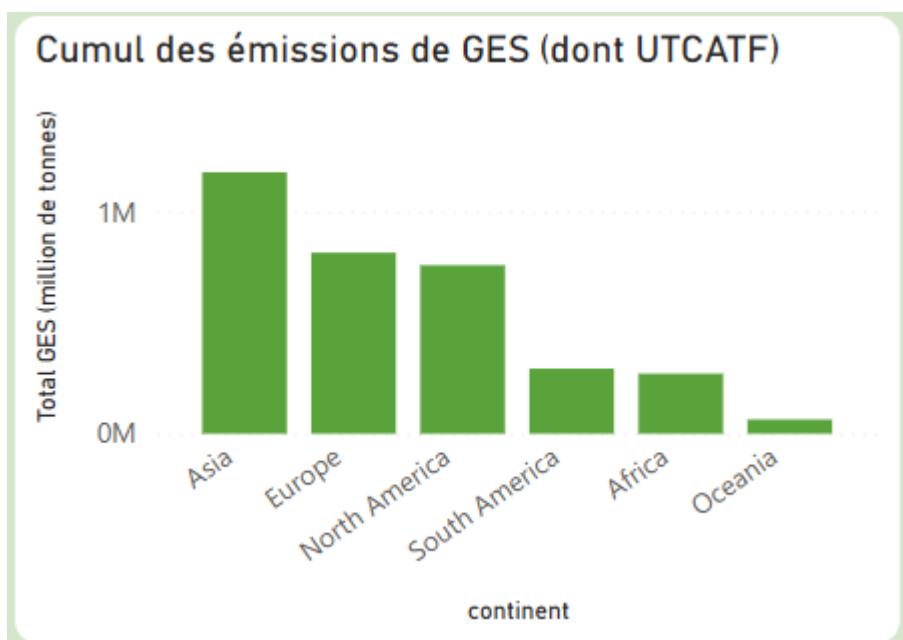
● Africa ● Asia ● Europe ● North America ● Oceania ● South America



Sur ce graphique, on constate surtout une très grande augmentation des émissions de GES sur le continent asiatique, qui représente à lui seul plus de 50% des émissions mondiales à partir de 2013.

Nous constatons une faible réduction des GES du continent européen, une légère augmentation du continent africain, tandis que les émissions des Amériques et de l'Océanie semblent stables depuis plusieurs décennies.

Cumul des émissions de GES (incluant UTCATF)



Ce diagramme montre le cumul des émissions de GES totales sur la période étudiée, et permet donc de comparer facilement les continents entre eux.

En jouant sur le slider du temps, nous pouvons trouver l'année exacte à partir de laquelle les émissions cumulées de l'Asie ont dépassé celles de l'Europe ou de l'Amérique du Nord.

Nous constatons qu'il s'agit de l'année 2003 (si l'on commence le calcul du cumul à partir de 1880) :

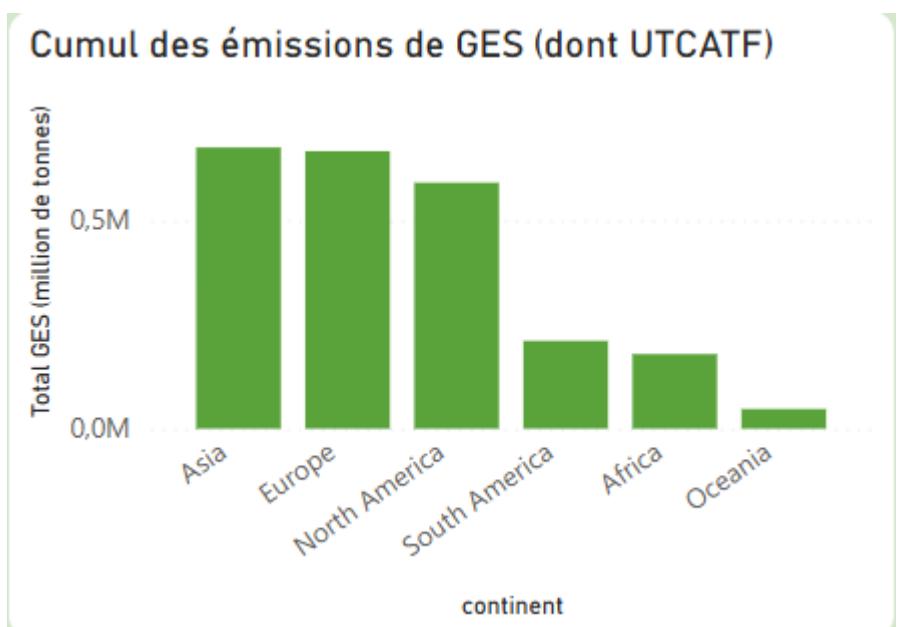
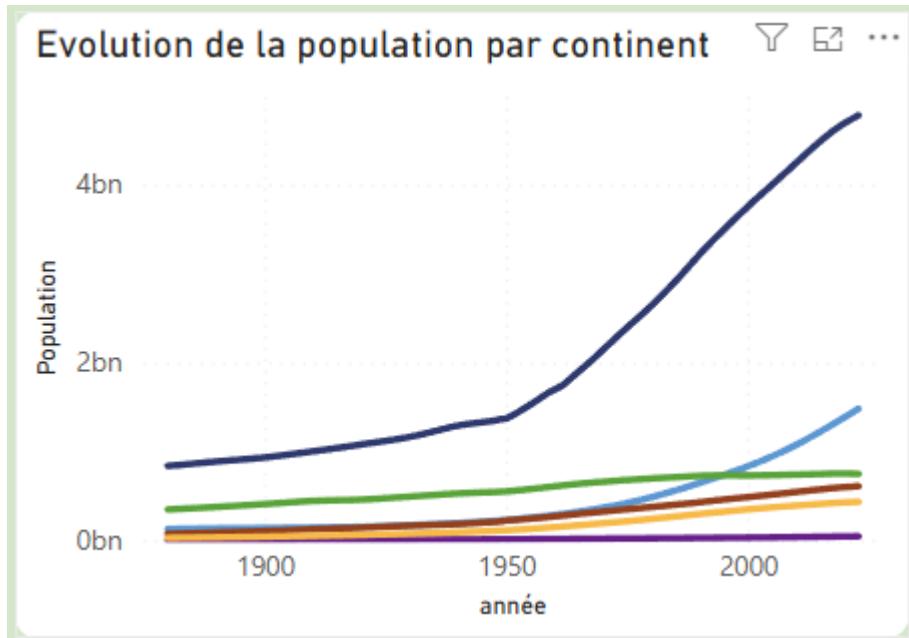


Diagramme pour la période 1880-2003 ; Si l'on s'arrête en 2002, la barre Asia est quasiment identique à celle de l'Europe mais très légèrement plus petite.

Evolution de la population par continent

● Africa ● Asia ● Europe ● North America ● Oceania ● South America



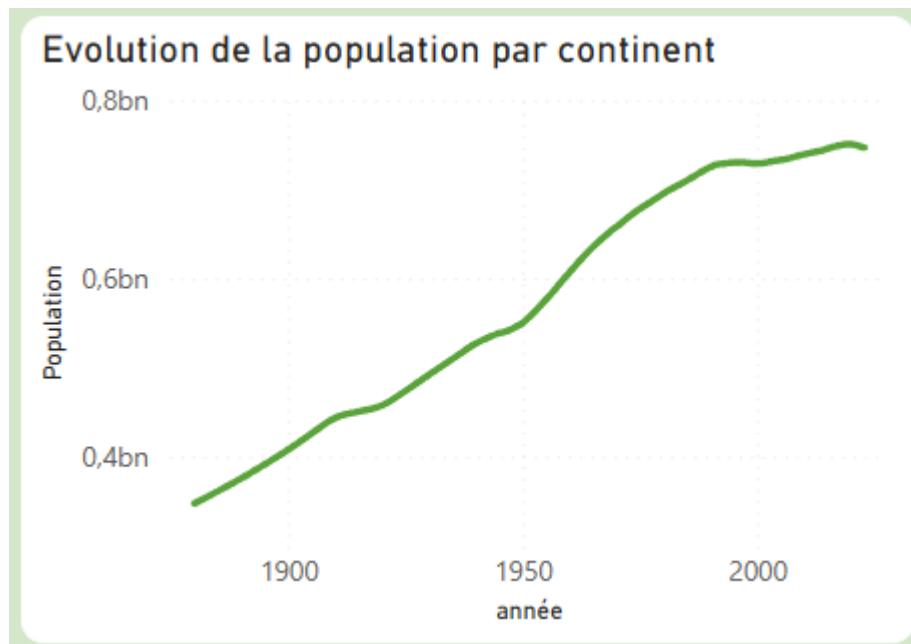
Dans le slide précédent, nous avons vu une nette différence entre les continents en ce qui concerne les émissions globales, et les émissions par habitant. Cela laissait supposer que l'Asie a une population bien plus élevée que les autres continents, puisqu'elle a des quantités d'émissions de GES bien supérieures au reste du monde, mais une émission par habitant plus faible que les autres continents.

Ce graphique nous permet de confirmer cette hypothèse. On remarque surtout qu'à partir de 1950, l'Asie connaît un boom démographique, plus fort encore que celui de l'Afrique. Cette courbe est si largement supérieure à celles des autres continents, qu'elle influence grandement la courbe d'évolution de la population mondiale que nous avions vue plus tôt.

Il n'est donc pas étonnant que l'Asie soit le continent qui émet le plus de CO₂, au regard de l'évolution de sa population. On peut voir aussi que les populations d'Europe et d'Océanie sont presque en stagnation (depuis les années 90 pour l'Europe). En réalité, la courbe de l'Asie est si élevée qu'elle rend difficile la lecture des autres courbes (en dehors de celle de l'Afrique) et qu'il est impossible de voir de vraies tendances pour les autres continents.

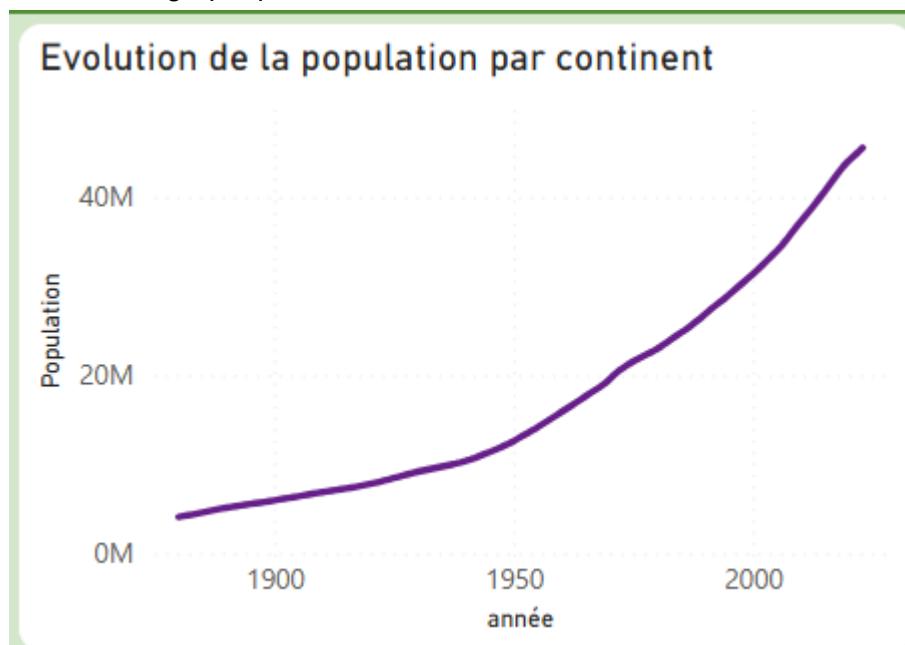
Heureusement, nous pouvons sélectionner un ou plusieurs continents à filtrer en cliquant dessus dans la légende en haut à gauche.

Nous pouvons ainsi faire un zoom sur l'évolution de la **population en Europe** :



On constate qu'il y a tout de même une augmentation de la population presque constante jusqu'en 1990, puis une hausse très légère jusqu'en 2019, et un début de baisse jusqu'en 2023.

Nous pouvons faire la même chose sur l'**Océanie**, pour laquelle la courbe était une ligne droite sur le graphique avec l'ensemble des continents :



Nous voyons ainsi qu'en Océanie, la population augmente, et cette augmentation s'accélère depuis les années 50. Ce genre d'analyses est impossible sur le graphique affichant l'évolution de tous les continents du fait de l'échelle bien plus grande de la population en Asie.

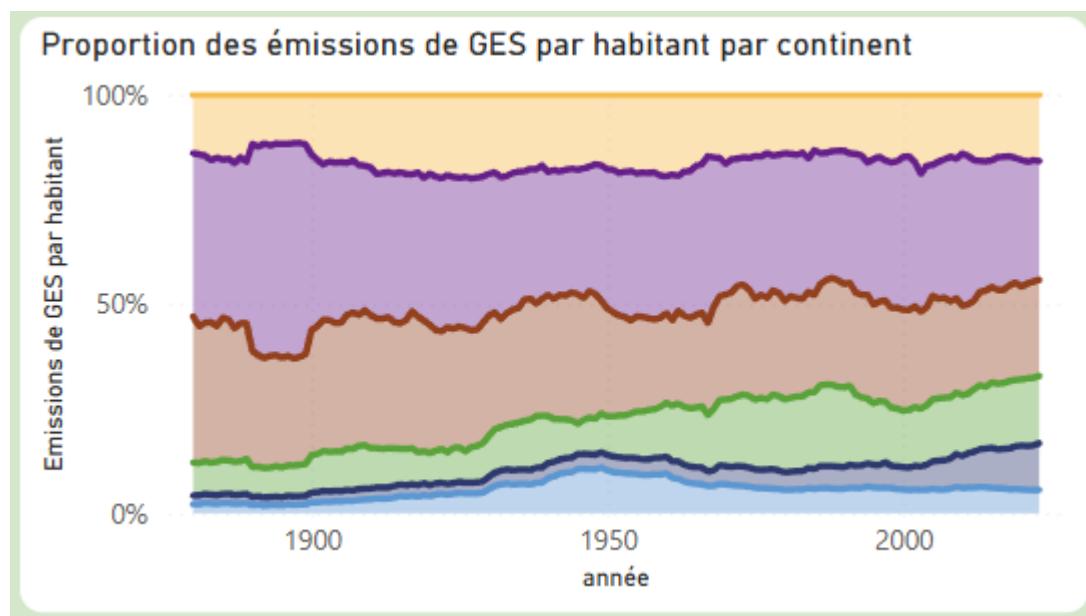
Nous pouvons nous poser une question légitime : **à quel point l'augmentation de la population humaine peut-elle être un problème en ce qui concerne le réchauffement climatique ?**

C'est une question difficile car elle touche aux droits humains, au droit à la reproduction, cela pourrait être presque un sujet philosophique à part entière. Le problème en soi n'est pas tant l'augmentation de la population mondiale en elle-même, ni le fait qu'elle soit plus élevée au sein d'un continent plutôt que d'un autre, mais bel et bien l'émission des gaz à effet de serre impactée par cette augmentation, du fait d'un plus grand besoin en énergie et d'une plus grande production de biens de consommation.

Le sujet de l'augmentation de la population mondiale est un vaste sujet à part entière, qui a bien d'autres impacts sur l'environnement que les émissions de GES et le dérèglement climatique, notamment à propos de la place que l'on prend sur le territoire des autres espèces, de la biodiversité... Ce n'est, là encore, pas le sujet de ce rapport, bien que ce soit aussi un sujet intéressant à explorer, et peut-être y a-t-il des solutions politiques à trouver de ce côté-là également, tout en protégeant les libertés individuelles et les droits humains.

Proportions des émissions de GES par habitant par continent

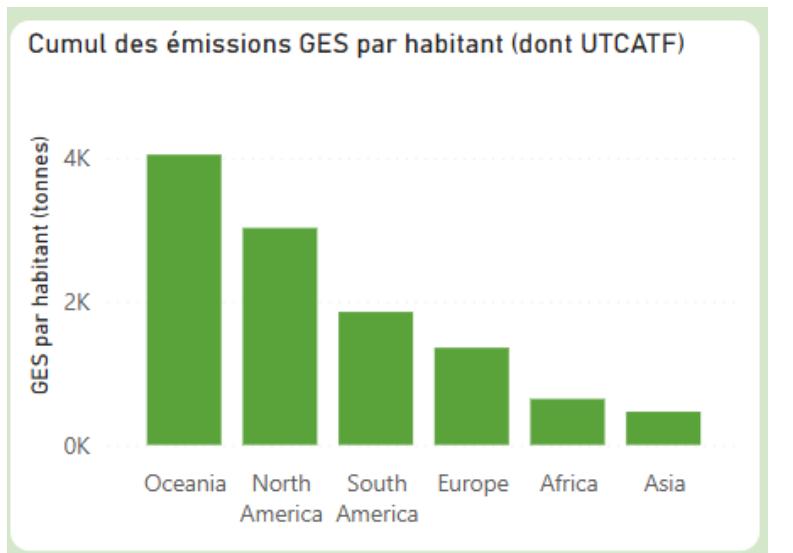
● Africa ● Asia ● Europe ● North America ● Oceania ● South America



Ce graphique nous montre l'évolution, à travers le temps, de la proportion de chaque continent en ce qui concerne les émissions de GES par habitant.

Il confirme ce que nous avions pu voir sur la carte du monde des émissions : l'Océanie (en mauve) est le continent ayant la plus grosse émission de GES par habitant. Notons d'ailleurs une augmentation anormale de ces émissions entre 1890 et 1900 pour l'Océanie, qui correspond à une période d'industrialisation extrêmement rapide durant cette décennie. C'est assez atypique et, là encore, nous pourrions ouvrir un tiroir pour en apprendre plus sur cette période spécifique afin de mieux comprendre ce qu'il s'est passé, mais nous ne le ferons pas pour ne pas davantage nous éloigner du sujet.

Cumul des émissions de GES par habitant

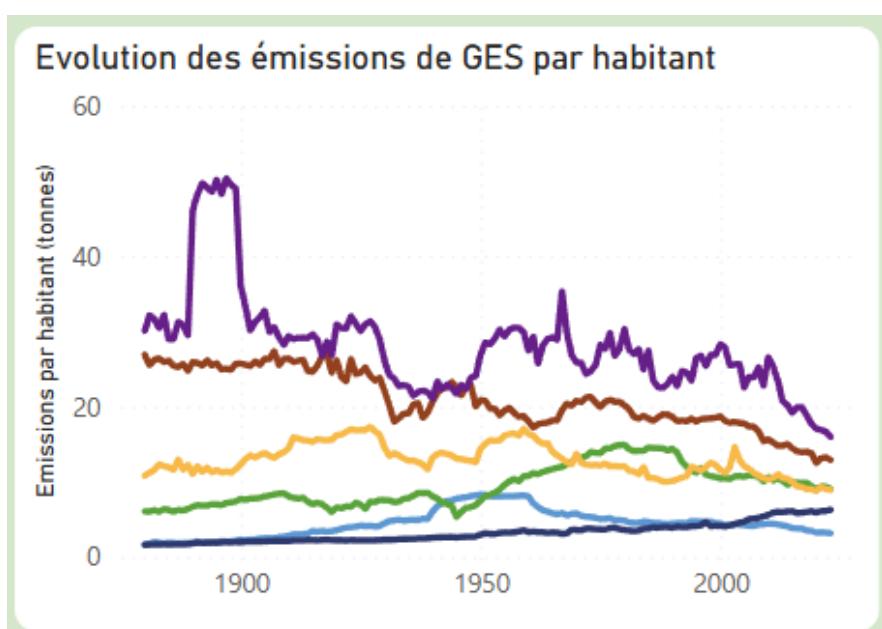


Ce diagramme permet de comparer les continents en termes d'émissions de GES par habitant, en affichant le cumul sur la période définie.

Nous retrouvons les mêmes infos que vues précédemment (sur le diagramme des proportions et sur la carte du monde), à savoir : l'Océanie émet énormément de GES par habitant (c'est aussi le continent avec le moins d'habitants), et l'Asie en est l'exact opposé.

Tout cela ayant déjà été détaillé en amont dans ce compte-rendu, nous ne nous attarderons pas plus sur ce graphique ici.

Evolution des émissions de GES par habitant par continent



Ce graphique nous permet de voir l'évolution, au cours du temps, des émissions de GES par habitant.

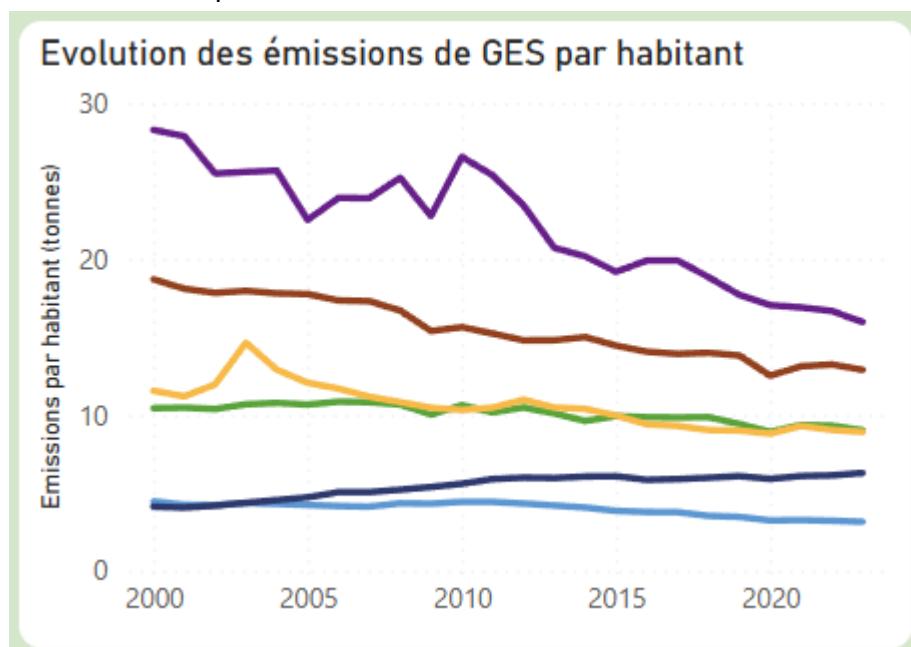
On retrouve la même période atypique de 1890 à 1900 pour l'Océanie correspondant à une forte industrialisation très rapide.

Sur cette longue période de temps, nous voyons une tendance à la baisse pour l'Océanie et l'Amérique du Nord. Au niveau de l'Europe, une augmentation de 1950 à 1990 environ puis une baisse correspondant aux efforts vers la transition énergétique.

Le continent africain présente une courbe atypique en forme de pont : une hausse rapide au début des années 40, une stagnation pendant 20 ans, puis une baisse rapide avant une diminution plus légère jusqu'à nos jours.

Sur les dernières décennies, seul le continent asiatique semble avoir les émissions par habitant qui augmentent.

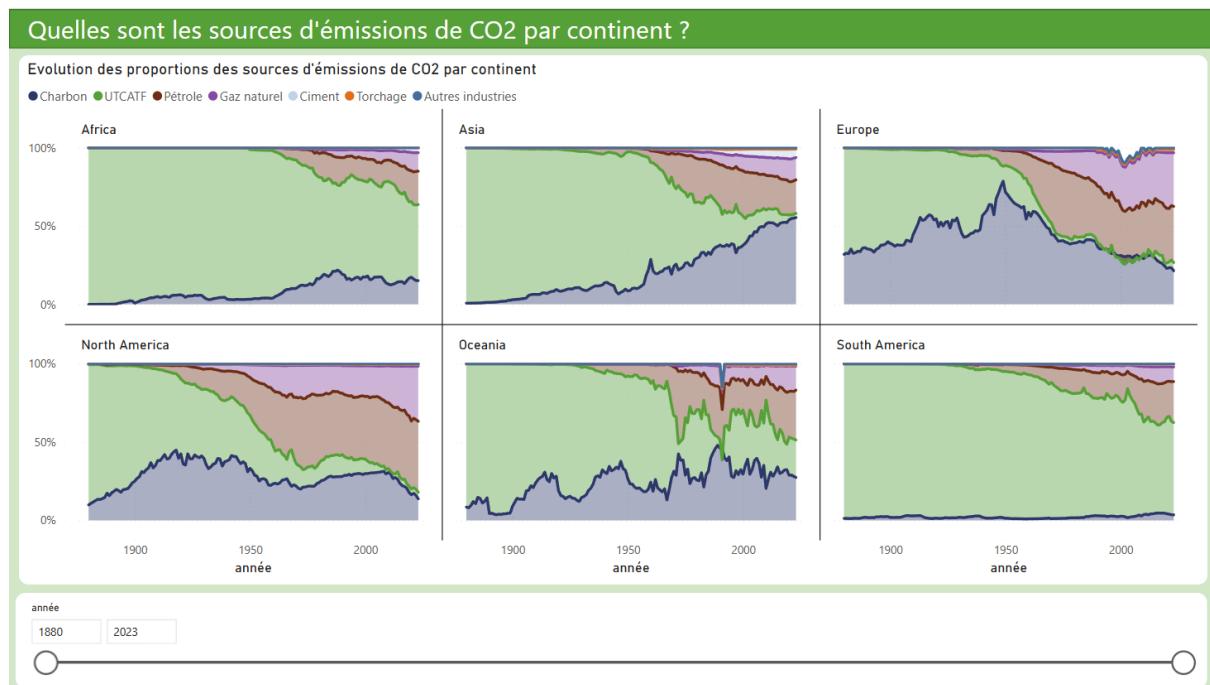
Zoomons sur la période **2000-2023** :



Nous voyons bien que les émissions par habitant baissent dans tous les continents de façon plus ou moins forte, à l'exception de l'Asie, où elles augmentent. Cela est inquiétant compte tenu de l'augmentation de la population asiatique, mais d'un autre côté, c'est également une question de justice et d'égalité entre les continents. Si nous acceptons un taux d'émission par habitant élevé pour nous-mêmes, nous devons bien l'accepter pour les autres continents. D'où l'importance de montrer l'exemple en réduisant nos émissions par habitant.

Dans ce sens, l'Océanie qui est le continent avec la plus forte émission de GES par habitant est aussi celui connaissant la baisse la plus élevée, sans doute font-ils plus d'efforts au niveau de la transition énergétique pour revenir à des niveaux d'émissions par habitants plus raisonnables.

Quelles sont les sources d'émissions de CO2 par continent ?



Ce slide présente les mêmes données que nous avions vu sur un slide à l'échelle mondiale, à savoir les sources d'émissions de CO2, mais avec une division par continent.

Ce qui est très intéressant ici, c'est de voir comment les continents, du fait de leur histoire géopolitique, de leur climat, de leurs ressources, ont des évolutions très différentes en ce qui concerne les différentes sources d'émissions de CO2.

Par exemple, l'Amérique du Sud a une part très importante d'émissions liées à l'UTCATF. On peut bien sûr penser à la déforestation de la forêt amazonienne qui occupe une part importante ici. De plus, la part d'émissions dues au charbon a toujours été très faible sur ce continent.

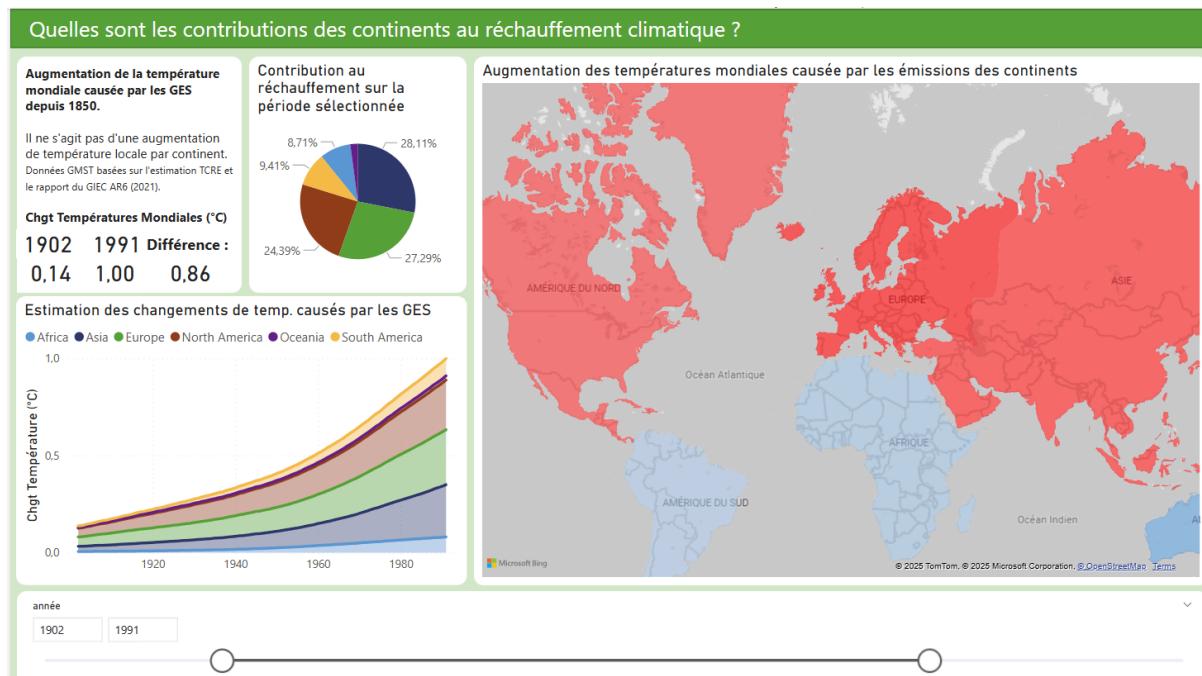
Concernant l'Europe, on voit que la part d'émissions dues au charbon diminue grandement après 1950, tandis que les parts de pétrole et de gaz augmentent fortement. Il est intéressant de constater qu'en Europe, durant les années 1990-2010, la part d'émission liée à l'UTCATF était négative : cela signifie qu'il y avait plus d'absorption de CO2 (grâce à la reforestation) que d'émission de CO2.

En Asie, la part de charbon augmente fortement depuis 1950, suivant une tendance opposée à celle de l'Europe. En sachant que l'Asie est aussi le continent ayant émis le plus de GES ces dernières décennies, on peut en déduire qu'ils utilisent énormément de charbon pour produire de l'énergie, et qu'ils ont donc un gros travail de transition énergétique à faire.

Il est également surprenant de constater qu'au niveau de l'Océanie, le diagramme est très dentelé. Il ne cesse d'y avoir des hausses et des baisses quant à la part du charbon. C'est encore pire entre 1970 et 2000, où l'on voit deux énormes creux de la part des émissions liées à l'UTCATF (1973 et 1991), et il serait très intéressant de plonger plus en détail dans

cette période, pour ce continent, et de corréler cela avec des recherches historiques sur ce qui a pu se passer au sein de ce continent durant cette période. Mais nous ne le ferons pas dans le cadre de ce rapport déjà bien long.

Quelles sont les contributions des continents au réchauffement climatique ?



De la même manière qu'à l'échelle mondiale, nous avons analysé la responsabilité de chacun des trois gaz à effet de serre étudiés dans le réchauffement climatique, nous allons ici étudier la responsabilité de chaque continent dans l'estimation de l'augmentation des températures causée par les émissions de GES.

L'objectif du slide est de répondre à la question suivante : sur une période étudiée, à quel point les émissions de GES de chaque continent ont augmenté la moyenne des températures mondiales ?

Introduction

Augmentation de la température mondiale causée par les GES depuis 1850.

Il ne s'agit pas d'une augmentation de température locale par continent.
Données GMST basées sur l'estimation TCRE et le rapport du GIEC AR6 (2021).

Chgt Températures Mondiales (°C)

1902	1991	Déférence :
0,14	1,00	0,86

Ce petit encart nous présente l'augmentation mondiale de la température durant la plus petite année et la plus grande années choisies dans notre période de sélection (avec le filtre chronologique tout en bas). Il nous montre également la différence entre les deux valeurs, c'est-à-dire quel a été le changement de température moyen mondial estimé au cours de cette période.

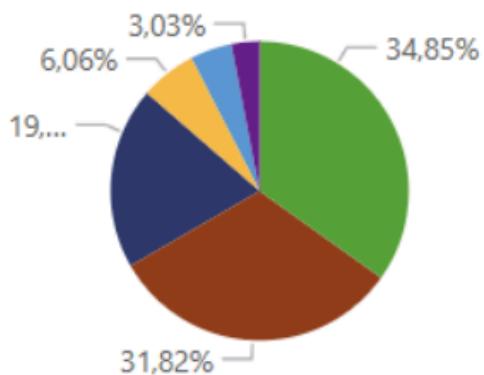
Un petit texte explicatif permet de mieux comprendre le slide. Nous rappelons que les changements de température sont basés sur une estimation. Il est très important de noter que lorsqu'on parle de changement de température ici, on parle de changement à l'échelle mondiale. Ainsi, en 1991, ce n'est pas le continent européen qui se réchauffait de 0.28°C par rapport à la période préindustrielle de référence. Le monde entier se réchauffait de 1°C, et l'Europe y était responsable pour 28%, soit 0.28°C. Ces estimations de changement de température sont directement basées sur les émissions de GES des continents, et n'ont rien à voir avec les températures que l'on peut observer localement sur ces territoires.

Contribution des continents au réchauffement global sur la période étudiée

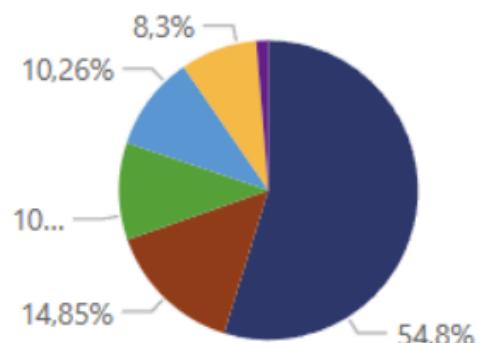
Le camembert permet de voir la proportion de chaque continent quant à sa responsabilité dans l'augmentation des températures sur la période choisie.

Il peut être intéressant de comparer les vingt plus vieilles années avec les vingt plus récentes années, pour voir comment la contribution des continents au réchauffement climatique a évolué.

Contribution au réchauffement sur la période sélectionnée



Contribution au réchauffement sur la période sélectionnée



Chgt Températures Mondiales (°C)

1880 1900 Différence :
0,06 0,13 0,07

Chgt Températures Mondiales (°C)

2003 2023 Différence :
1,21 1,67 0,46

● Africa ● Asia ● Europe ● North America ● Oceania ● South America

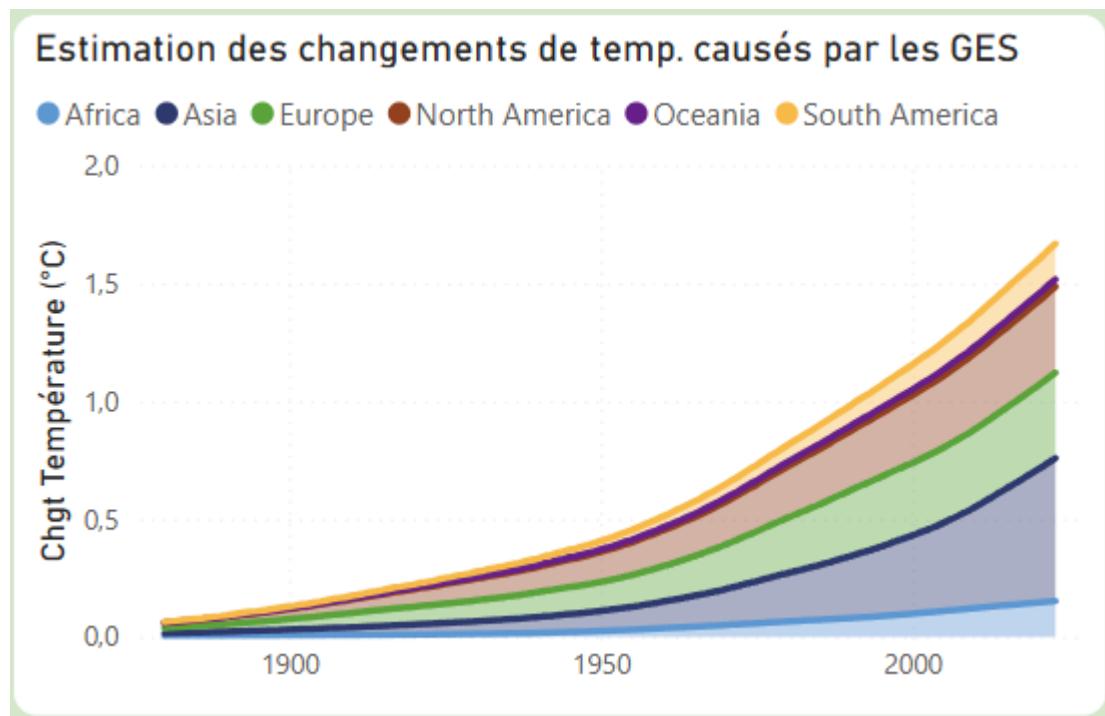
On remarque que la répartition est très différente. De 1880 à 1900, l'Europe était la principale responsable du réchauffement climatique, à près de 35%. Puis nous avons l'Amérique du Nord à 32% et l'Asie à 19%. Notons qu'à cette période, l'augmentation estimée de température durant ces 20 années n'était que de 0.07°C, pour une augmentation depuis 1850 de 0.13°C.

Entre 2003 et 2023, l'Asie est responsable de 55% du réchauffement climatique. L'Amérique du Nord en est responsable de 15%, tandis que l'Europe et l'Afrique sont toutes deux responsables de 10%, suivies de près par l'Amérique du Sud à 8%. Durant ces vingt années, l'estimation de l'augmentation de la température mondiale est de 0.46°C. A titre de comparaison, il a fallu un peu plus de 100 ans pour atteindre un réchauffement global de 0.46°C (seuil atteint en 1956 sur des valeurs basées sur 1850). **En 20 ans, nous avons donc autant réchauffé la planète que sur la période 1850-1956, soit plus d'un siècle !**

Ainsi, l'Asie a pris une part beaucoup plus importante de responsabilité dans l'augmentation des températures mondiales, tandis que les autres continents se sont rééquilibrés, en dehors de l'Océanie du fait de son faible taux d'émission.

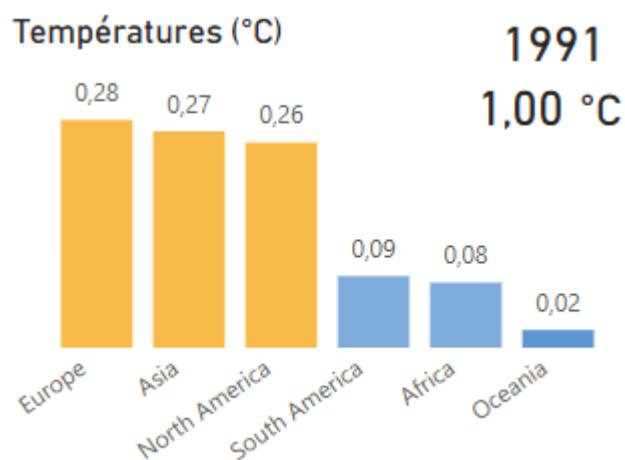
Tout ceci est cohérent avec le fait que l'Asie est le continent avec la plus grande population, de loin, et émet donc beaucoup plus de GES.

Estimation des changements de temp. causés par les GES au cours du temps



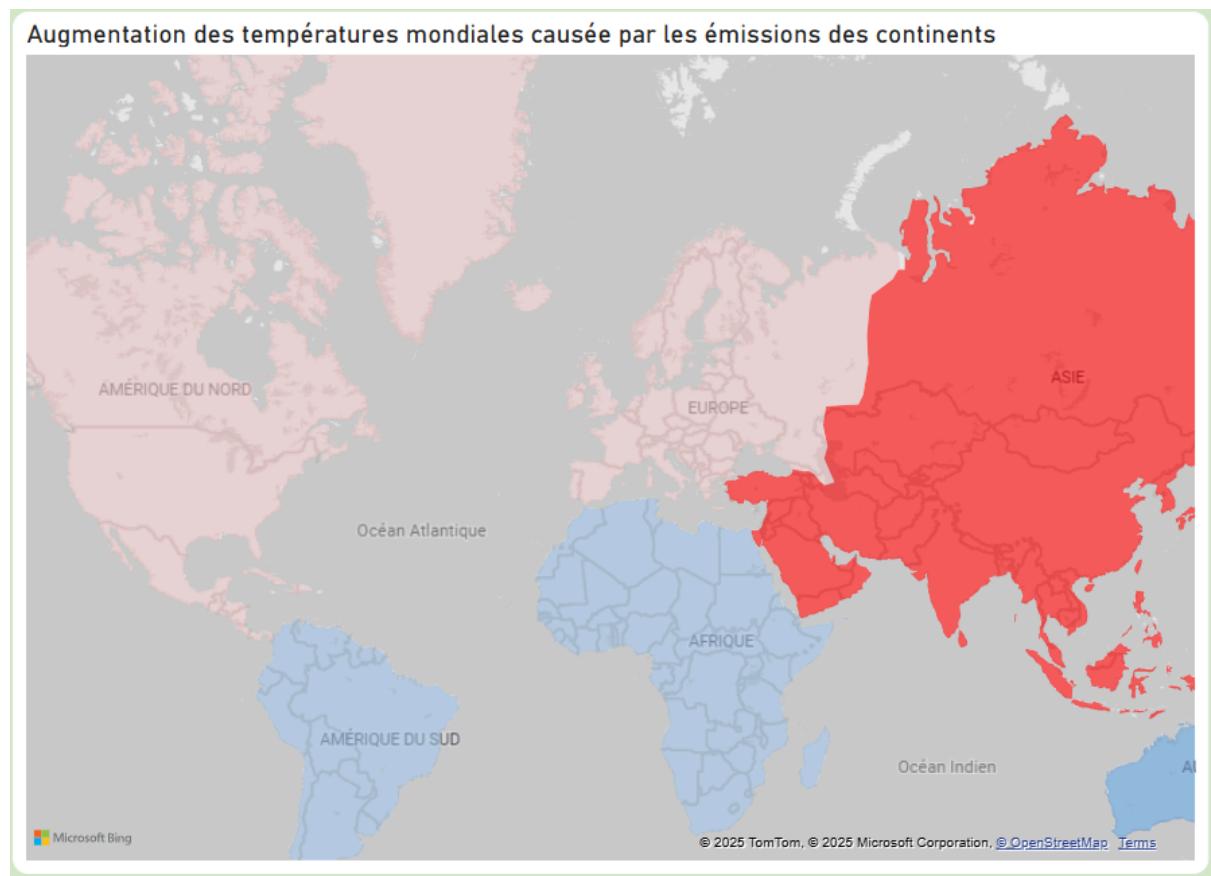
Ce graphique en courbes permet de suivre, au cours du temps, l'évolution de l'augmentation de la température (cumulée) pour chaque continent. Nous pouvons ainsi voir l'augmentation de température provoquée par chaque continent pour chaque année entre 1880 et 2023.

Un tooltip personnalisé permet de voir les valeurs dans le détail pour l'année sélectionnée, ainsi que l'augmentation totale de la température mondiale. Ainsi, en survolant l'année 1991, nous avons le tooltip suivant :

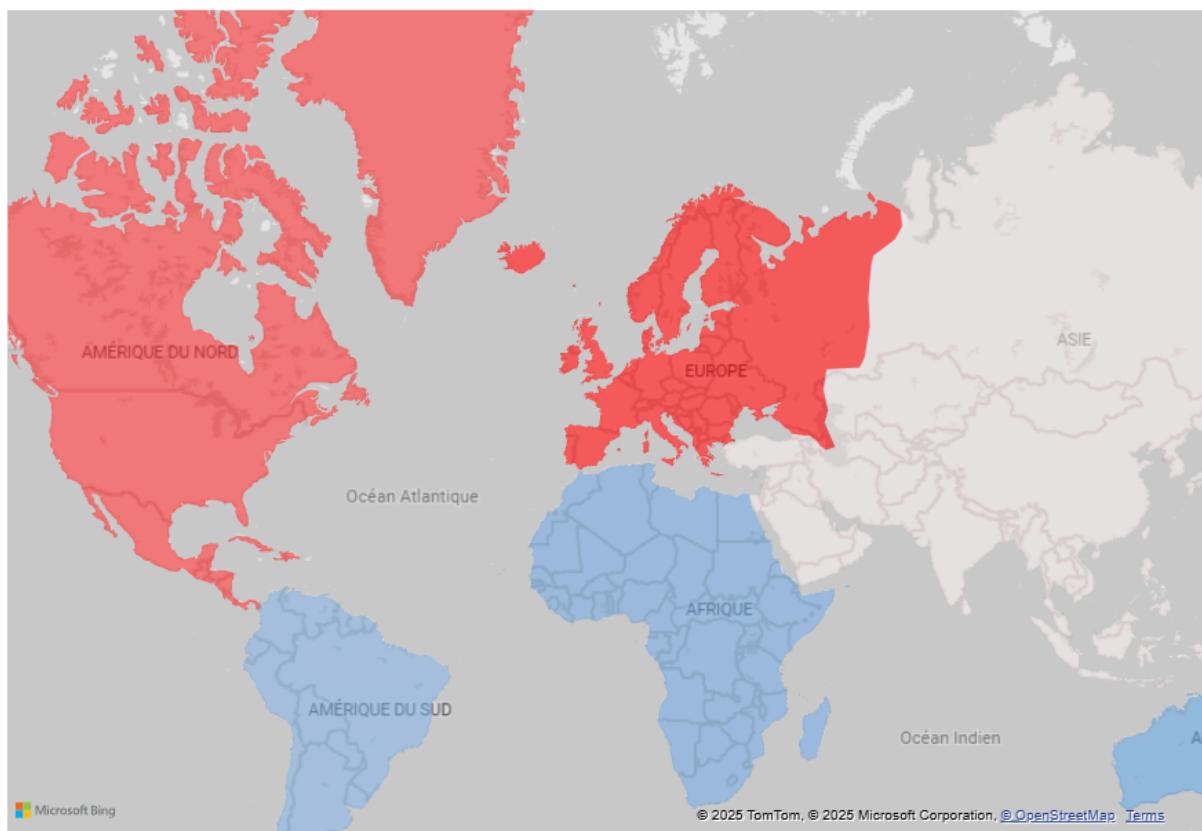


Notons que les données de changement de température sont des données cumulées. Si l'on reprend l'exemple de 1991, l'Europe n'a pas été responsable de 0.28° de réchauffement au cours de cette année-là uniquement, mais a atteint cette valeur entre 1850 (année de référence) et 1991.

Carte de l'augmentation des températures mondiales par continent



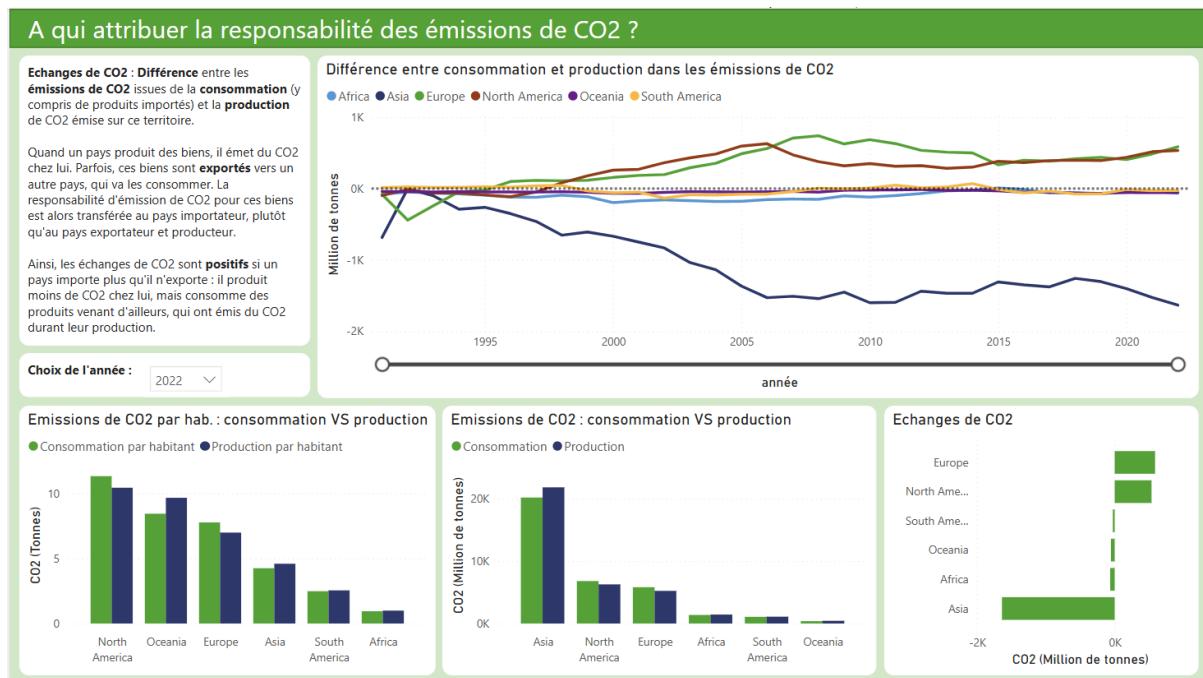
Ainsi, sur la période **1880-1900**, la carte ressemble à cela, quand bien même l'augmentation de température est beaucoup plus faible que sur les vingt dernières années :



Cette carte permet également de cliquer sur un continent (ou d'en sélectionner plusieurs avec ctrl + clic), afin de filtrer ces continents sur les autres graphiques.

Elle permet d'avoir un visuel plus intuitif des responsabilités par continent.

A qui attribuer la responsabilité des émissions de CO2 ?



Cette dernière slide aborde un concept important lorsque l'on analyse les émissions de CO2 par zones géographiques : à qui attribuer la responsabilité des émissions de CO2 ?

En effet, nous avons vu que certains continents émettent beaucoup plus de CO2 que d'autres. Mais en ont-ils l'entièbre responsabilité ?

C'est là qu'intervient la notion d'**échanges de CO2**.

Note : nous n'étudierons ici que les **émissions de CO2 industrielles**, c'est-à-dire toutes celles qui ne sont pas liées à l'UTCATF.

Explications du principe d'échanges de CO2

Cette notion vise à faire la distinction entre le CO2 émis à cause de la consommation d'une population (consommation en énergie et en biens), et le CO2 émis pour la production de biens qui seront exportés et consommés dans d'autres zones géographiques (smartphone, vêtements, voitures...). Cela est donc lié au commerce international.

Cette valeur est calculée en faisant la **différence** entre les émissions de CO2 relatives à la consommation (d'énergie, de produits internes et de produits importés), et les émissions de CO2 produites sur ce territoire. Il permet d'établir une approche par **consommation** plutôt que par **production** : la responsabilité de l'émission de CO2 va au consommateur final (qui achète un produit importé) plutôt qu'au producteur qui a émis du CO2 pendant la création du produit et qui l'a ensuite exporté.

Un territoire (pays, continent...) qui produit énormément de biens qu'il exporte ensuite, et qui importe peu, aura une valeur d'échanges négative, car il aura émis beaucoup de CO2 pour la consommation d'autres pays. A l'inverse, un pays qui importe beaucoup de produits aura

plutôt une valeur d'échanges positive, puisqu'il prendra la responsabilité des émissions liées au produit consommé.

Cette approche permet de définir la responsabilité des émissions de CO2 de façon plus juste et de responsabiliser les consommateurs.

Présentation de la slide

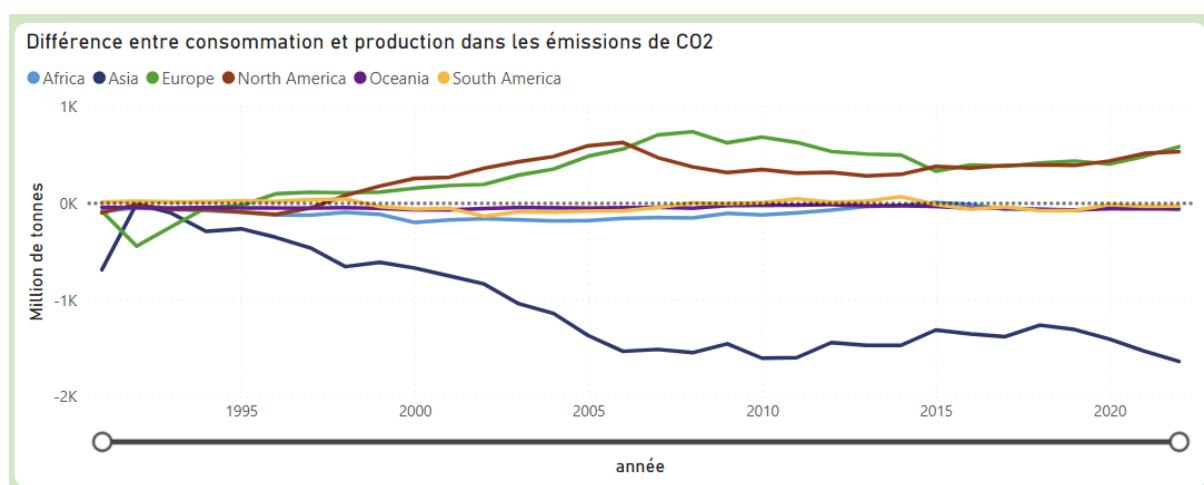
Cette slide est composée de quatre graphiques, et d'une zone explicative qui résume la définition d'échange de CO2 vue plus haut.

Le graphique en courbes montre l'évolution des échanges de CO2 au cours du temps.

Les trois graphiques en-dessous traitent de l'information pour une année précise. En effet, les émissions globales changeant grandement au cours du temps, faire une analyse sur plusieurs années présente peu d'intérêt. L'année peut être changée par le dropdown sur la gauche.

Notons que la période étudiée commence à partir de 1991 et finit en 2022 : nous n'avons des données que pour cette période-là.

Différence des émissions de CO2 entre consommation et production au cours du temps



Ces courbes permettent de voir, au cours du temps, les échanges de CO2 à l'échelle des continents.

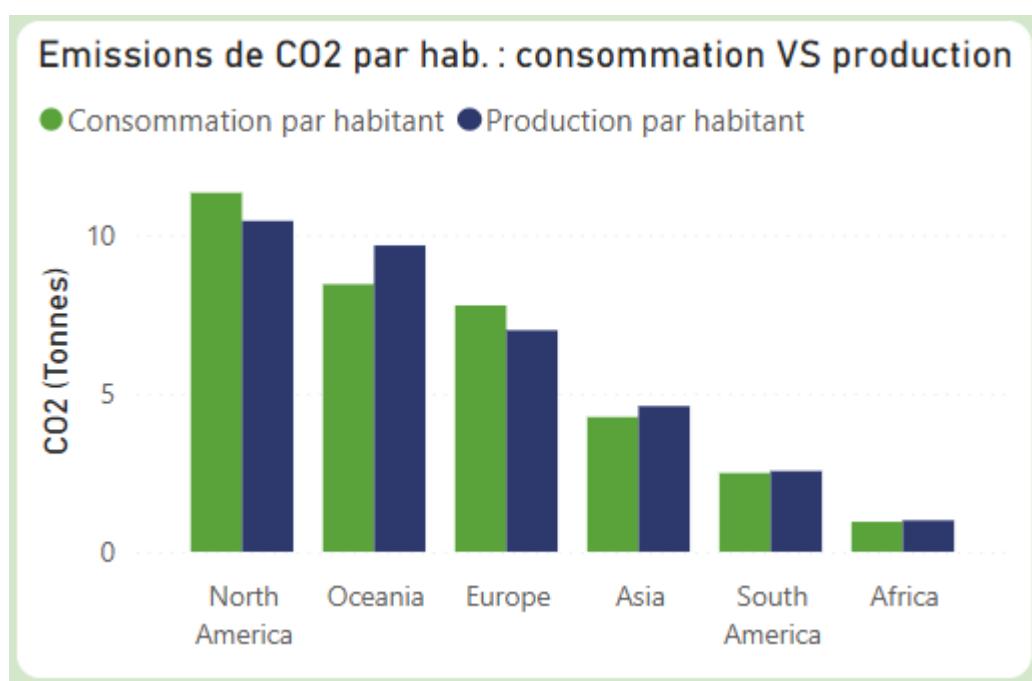
Une droite horizontale en pointillé marque le point 0, c'est-à-dire qu'il y a autant de CO2 consommé par le continent que de CO2 qu'il produit.

L'on peut faire trois constatations rapidement en voyant ce graphique :

- l'Europe et l'Amérique du Nord sont de grands consommateurs (donc de grands importateurs de biens dont la production a émis du CO₂)
- L'Océanie, l'Amérique du Sud, et dans une moindre mesure, l'Afrique, suivent très bien la ligne du 0. On peut en déduire que l'Océanie et l'Amérique du Sud produisent autant de CO₂ qu'ils en consomment (il y a donc un équilibre au niveau des émissions de CO₂ en termes d'import/export). C'est un peu moins vrai pour l'Afrique, qui produit un peu plus de CO₂ pour les autres pays puisque ce continent est en négatif.
- L'Asie est très loin dans le négatif, avec une grande chute jusqu'en 2006 puis une stabilisation. L'Asie produit énormément de CO₂ comme nous l'avons vu, mais une très grande quantité de ces émissions sont dues à la production de biens qui sont ensuite exportés et consommés dans d'autres continents.

Cela permet de nuancer les observations précédentes, à propos de l'Asie en tant que continent émettant le plus de gaz à effet de serre. Bien que cette observation est réelle, cette nouvelle analyse nous fait prendre conscience que c'est aussi parce que d'autres continents, tels que l'Europe et l'Amérique du Nord, consomment beaucoup de biens produits en Asie, que ce continent génère autant d'émissions de gaz à effet de serre.

Comparaison des émissions de CO₂ par habitant par la consommation et la production



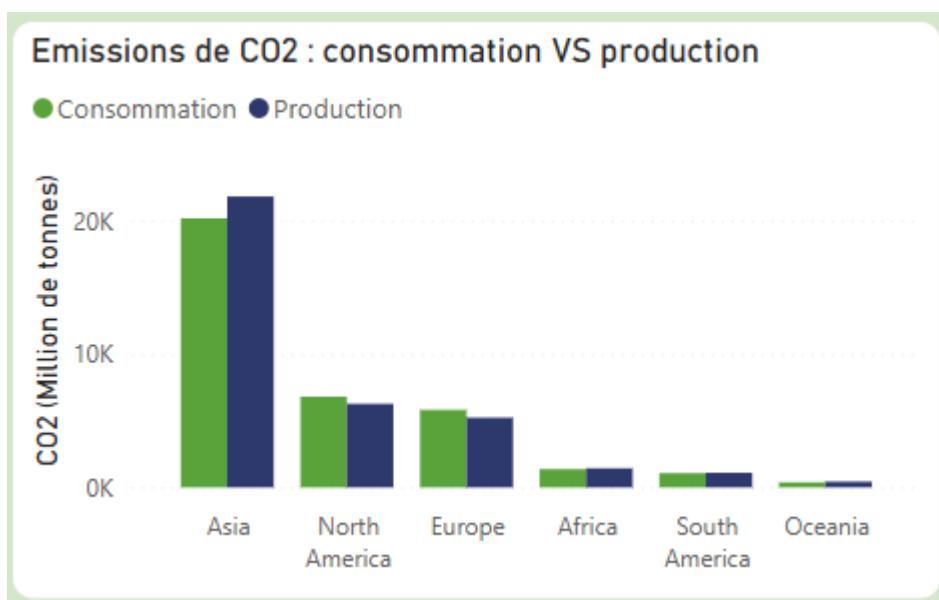
Ce graphique nous montre, pour chaque continent, sur l'année choisie, les émissions de CO₂ par habitant :

- propres à la consommation du continent (tout ce que le continent consomme, incluant les biens importés), en vert
- produites uniquement sur ce continent, en bleu foncé

Ce graphique permet de constater à nouveau deux choses :

- l'Amérique du Nord, l'Océanie puis l'Europe sont les continents ayant le plus gros taux d'émission de CO₂ par habitant. Nous avions fait des observations similaires à propos des émissions totales de GES, mais ici, nous ne nous focalisons que sur les émissions de CO₂ industrielles.
- L'Amérique du Nord et l'Europe "émettent" plus de CO₂ par habitant, par consommation que par production, ce qui est conforme au graphique précédent. C'est l'inverse pour les autres continents, qui exportent davantage.

Comparaison des émissions de CO₂ par la consommation et la production

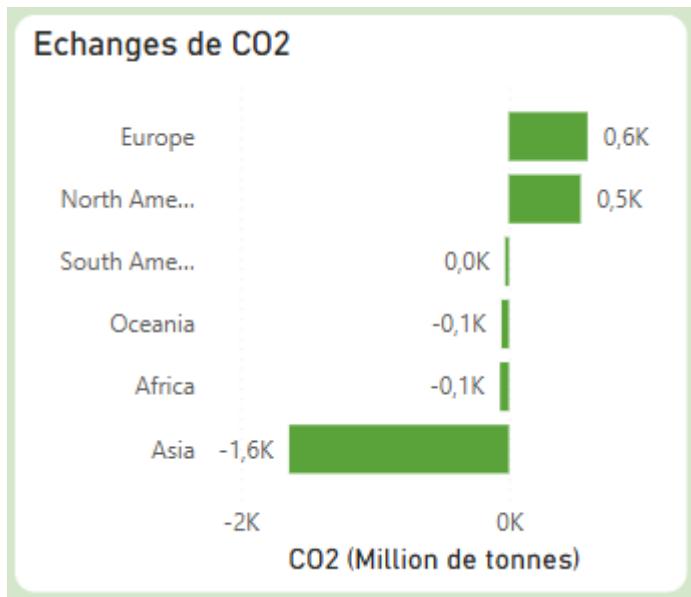


Ce graphique ressemble au précédent mais traite des émissions de CO₂, sans les diviser par le nombre d'habitants.

Sans surprise, l'Asie est nettement au-dessus des autres continents en matière d'émissions de CO₂. Mais une partie de ses émissions concerne des produits exportés ailleurs (cette partie correspond à la différence entre la barre bleue et la barre verte). Ainsi, dans une approche d'émissions par consommation, nous devons nous intéresser aux barres vertes.

En soi, cela ne change pas fondamentalement les conclusions. L'Asie reste le continent émettant le plus de CO₂, et la majeure partie de ces émissions sont imputées à la consommation de l'Asie (qui, rappelons-le, est tout de même très inférieure à la plupart des autres continents d'un point de vue émission par habitant). Seule une petite partie des émissions peut être retirée et imputée à la consommation des autres continents.

Échanges de CO2



Ce dernier diagramme nous permet de voir la répartition des échanges de CO2 pour l'année sélectionnée. Ainsi, en 2022, on constate que l'Asie a produit sur son territoire 1.6 milliards de tonnes de CO2 de plus que la quantité d'émissions relatives à ce qu'elle a consommé. A l'inverse, la consommation de l'Europe et de l'Amérique du Nord sont responsables de plus de 0.5 milliard de tonnes d'émissions de CO2 de plus que ce que ces continents ont eux-mêmes produits sur leur territoire.

Notons que vous pouvez retrouver le même graphique en tant que tooltip sur le graphique en courbe présentant l'évolution des échanges CO2 au cours du temps.

Conclusion

Nous arrivons au bout des 60 pages de ce long compte-rendu, et donc, de cette analyse des émissions de gaz à effet de serre dans le monde.

En travaillant sur le rapport Power BI et en rédigeant ce compte-rendu, je me suis rendu compte des possibilités infinies d'exploration du sujet. Nous en avons évoqué quelques-uns tout au long du compte-rendu. Nous pouvons toujours ouvrir un tiroir ici et là pour étudier plus en profondeur certaines parties, en zoomant sur un territoire ou sur une période. C'est très intéressant, mais également très difficile de ne pas se perdre dans toutes ces analyses.

J'ai tenté de rester focalisé sur mon cadre : analyser les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale et par continents, ainsi que leurs impacts sur le réchauffement climatique.

J'aurais aimé pousser plus loin certaines analyses. Notamment à propos de l'Asie : voir les parts de la Chine et du Japon en matière d'émissions de GES par rapport aux autres pays asiatiques. Voir même faire une analyse par pays.

Par manque de temps, et parce qu'il fallait un périmètre suffisamment restreint, j'ai choisi de focaliser mes analyses sur le monde et sur les continents. Les continents forment des zones géographiques très facilement identifiables. Ils partagent souvent des histoires et cultures communes, même s'il y a parfois de grandes disparités au sein d'un même continent. Ils permettent aussi un découpage facile par hémisphère, qui peut s'avérer utile lorsqu'il faudra mettre cela en commun avec les analyses des températures effectuées par les autres membres de l'équipe. Voilà pourquoi j'ai choisi ce périmètre d'analyse.

Il aurait également été intéressant d'analyser les émissions en fonction de groupes de pays par développement économique : les émissions des pays les plus riches, les plus pauvres...

Cette analyse nous montre qu'au-delà de l'aspect écologique, les émissions de gaz à effet de serre et le dérèglement climatique touchent aussi à des réflexions politiques, voire philosophiques. Nous avons évoqué la question de l'augmentation de la population, notamment en Asie, qui conduit à de très fortes émissions de CO₂ sur ce continent, le rendant aujourd'hui responsable de la moitié des émissions de GES qui contribuent au dérèglement climatique. Quelles politiques pourrions-nous mettre en place pour faire face à cela, tout en respectant les libertés, la dignité humaine, les droits humains ? Nous avons aussi pu mettre en avant de fortes inégalités entre les continents. Les émissions de GES, étroitement liées à l'industrialisation, sont un reflet des différences de développement entre les continents.

L'une des premières solutions que nous pourrions envisager serait de faire en sorte que l'exploitation du charbon et du pétrole diminuent drastiquement dans tous les continents, puisque nous avons vu qu'ils étaient en grande partie responsable des émissions de CO₂. L'UTCATF n'est pas en reste non plus, avec la déforestation et l'exploitation de sols pour l'agriculture. L'agriculture est également un très vaste sujet, notamment si on le rapporte à l'élevage d'animaux pour la production industrielle de viande. En effet, l'agriculture est grandement utilisée pour nourrir des animaux en élevage (tels que l'élevage bovin, en partie

responsable des émissions de méthane). Ces élevages intensifs sont eux-mêmes la source d'émissions de GES, alors même qu'une très grande quantité de viande produite est jetée, gaspillée, par les pays les plus riches. Voilà encore un exemple de tiroirs que l'on peut ouvrir, une autre exploration à faire, parmi les possibilités infinies offertes par ce sujet.

Dans la suite du projet, nous allons, au sein de l'équipe, mettre en commun nos différents travaux et analyses individuelles afin d'établir des corrélations. Nous avons vu ici une estimation de la responsabilité par continent de l'augmentation des températures, il sera intéressant de mettre cela en relation avec les anomalies de température observées localement. De même, il pourrait être intéressant de faire une exploration des émissions de CO₂ par rapport à la consommation d'énergie primaire par continent, voire pays, et de mettre ça en lien avec le jeu de données relatifs aux énergies de owid.

Essayons désormais de répondre à la question : “*Qui aurait pu prédire le dérèglement climatique ?*”

Au vu de l'analyse de nos données, je pense que le dérèglement climatique n'est pas seulement prédit, mais observé et documenté depuis des décennies. Et si les courbes d'émissions de gaz à effet de serre et d'augmentation de la température continuent sur cette même trajectoire, malgré les efforts de transition observés dans certains continents, je me risque à prédire un funeste avenir pour l'humanité toute entière et la biodiversité. Seuls des changements drastiques de nos sociétés, à l'échelle mondiale, et urgents, pourraient nous sauver de la catastrophe. Le défi est énorme, mais le jeu en vaut la chandelle : il ne s'agit ni plus ni moins que de la survie de l'humanité et de la majeure partie des espèces vivantes.

Sources

owid-co2-data.csv provient de <https://github.com/owid/co2-data?tab=readme-ov-file> de l'organisation Our World in Data. <https://ourworldindata.org>

Les données proviennent de ces sources :

- Jones et al. - National contributions to climate change (2024) [<https://zenodo.org/records/7636699/latest>]
- Global Carbon Budget (2024) [<https://globalcarbonbudget.org/>]
- Bolt and van Zanden - Maddison Project Database 2023 [<https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2023>]
- U.S. Energy Information Administration - International Energy Data (2023) [<https://www.eia.gov/opendata/bulkfiles.php>]; Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024) [<https://www.energyinst.org/statistical-review/>]
- Population based on various sources (2024) [<https://ourworldindata.org/population-sources>]

Informations complètes ici :

<https://github.com/owid/co2-data/blob/master/owid-co2-codebook.csv>

Citation de Jacques Chirac :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Notre_maison_b%C3%BBle_et_nous REGARDONS_ailleurs

Citation de Donald Trump :

<https://www.ndtv.com/world-news/donald-trump-elon-musk-interview-on-x-trump-mocks-climate-change-6325520>

Citation d'Emmanuel Macron :

https://www.lemonde.fr/politique/article/2023/01/03/emmanuel-macron-et-le-climat-un-discours-qui-rate-sa-cible_6156389_823448.html

Vapeur d'eau et effet de serre :

<https://www.encyclopedie-environnement.org/zoom/effet-de-serre-vapeur-eau-co2/>

Seuil de 1+5°C dépassé en 2024 :

<https://reporterre.net/Le-seuil-de-1-5-oC-de-rechauffement-officiellement-depassee-en-2024>

Energie primaire :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_%C3%A9nerg%C3%A9tique_\(statistique\)#Conventions_sur_la_d%C3%A9finition_de_l%C3%A9nergie_primaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_%C3%A9nerg%C3%A9tique_(statistique)#Conventions_sur_la_d%C3%A9finition_de_l%C3%A9nergie_primaire)