

Mesurer l'empreinte environnementale

Un outil indispensable de l'ingénieur de demain



Au programme

Tour d'horizon



Contexte
environnemental



Mesurer
**l'empreinte
environnementale**



Applications
à la chimie

Ca, c'est moi : Guillaume Pakula

D'où je viens, en quelques mots



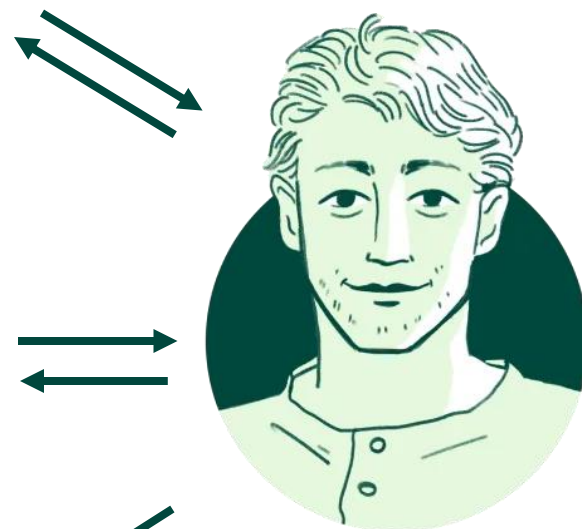
2012-2014



2014-2016



2016-2019



2019 – le plus tard possible

Mon métier aujourd'hui

Dirigeant du Projet Celsius



Vos experts Bilan Carbone®

L'équipe d'ingénieurs spécialistes du climat du Projet Celsius accompagne tout type de structures dans la quantification de l'empreinte carbone de leurs projets, l'évaluation d'impact environnemental, et la mise en œuvre de solutions à fort impact climatique.

Prendre contact

Découvrir l'équipe



Trois exemples

Le ski c'est sympa mais ça va pas durer



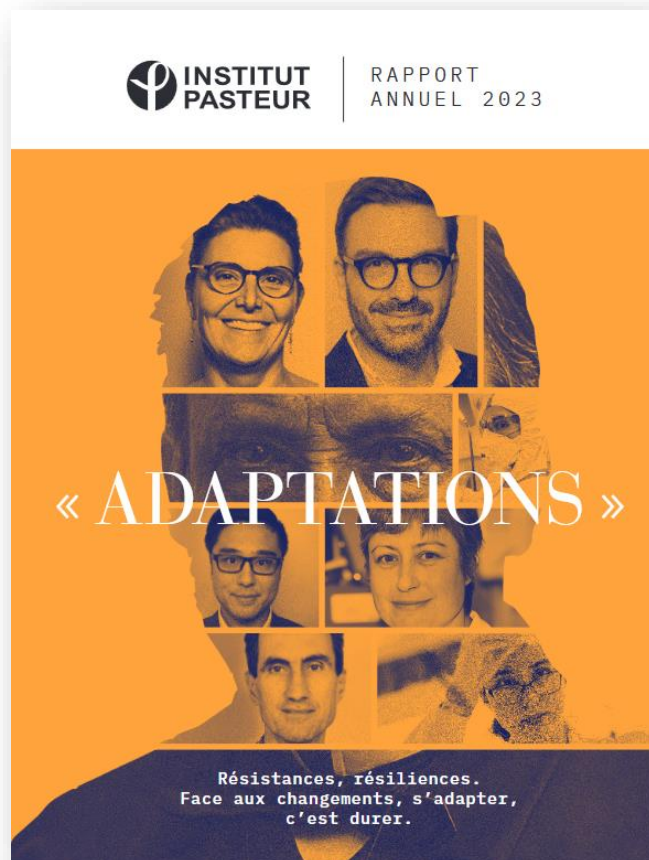
Trois exemples

Les transporteurs eux aussi sont sympas



Trois exemples

L'Institut Pasteur change son fusil d'épaule

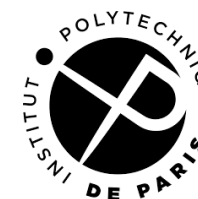


Avec plus de 200 participants, la **réunion annuelle du Pasteur Network** a été organisée par l'Institut Pasteur de Tunis, avec le soutien du Wellcome Trust, et a inclus des discussions riches autour des piliers stratégiques du Pasteur Network :

- 1.** L'avenir de la **préparation aux pandémies**, dans un contexte en évolution rapide avec le changement climatique et **les maladies sensibles au climat**.
- 2.** Le rôle du Pasteur Network dans l'avenir des **écosystèmes d'innovation et de R&D** dans les pays à revenu faible ou intermédiaire.
- 3.** L'identification des besoins pour l'amélioration continue du **partage des connaissances du réseau et des communautés de pratique**, ainsi que la célébra-

En 5 ans, ça a beaucoup changé !

Passons en revue





01

Introduction

La crise

environnementale

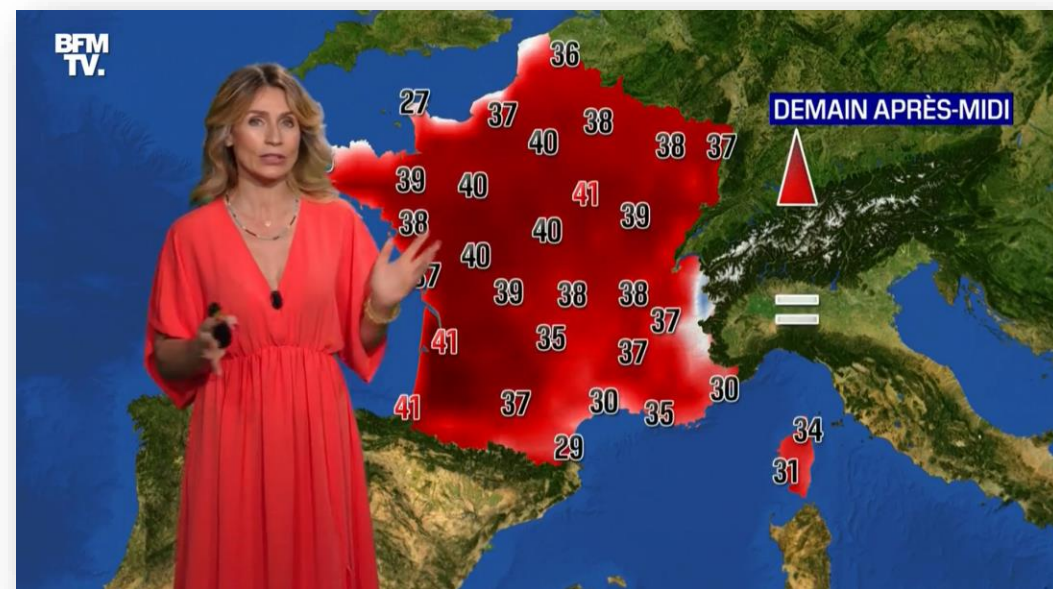
Une histoire de température

Le jeu des 7 différences



Ce sont des météo qui ont
été présentées le même jour

La météo de gauche est fictive

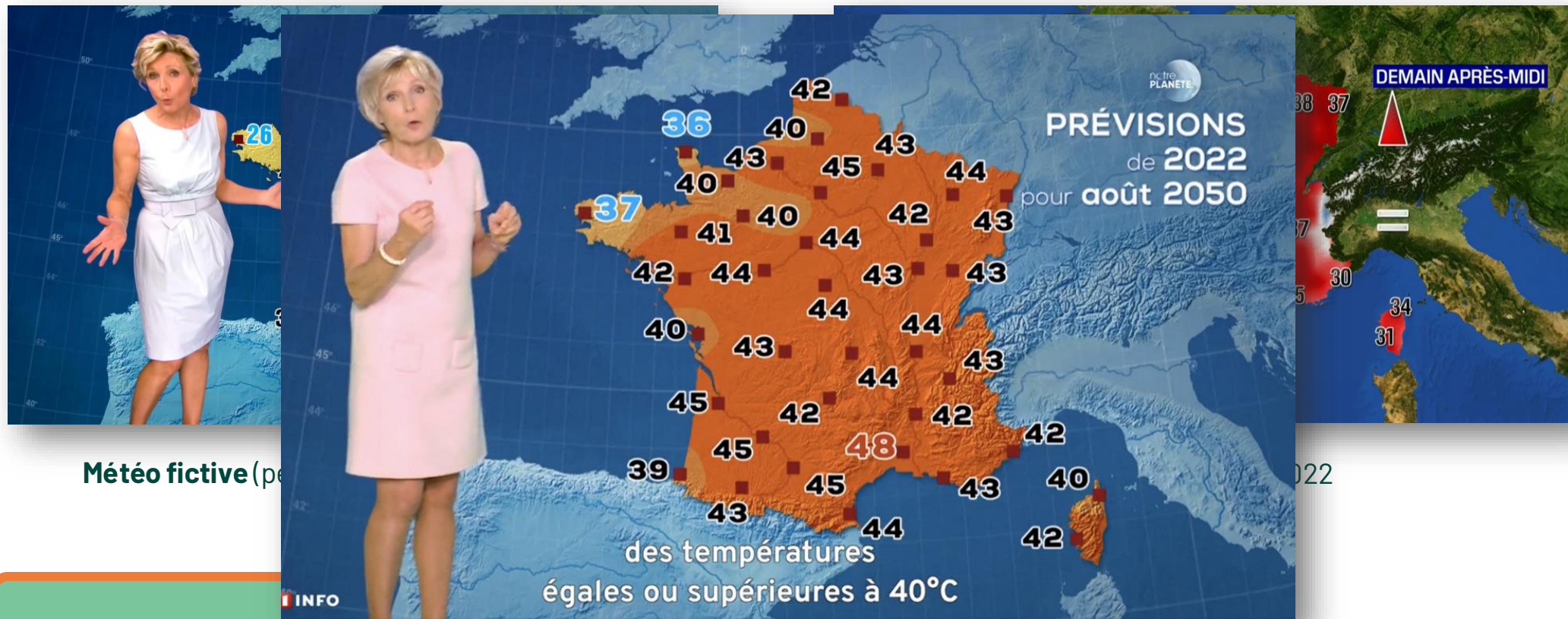


Les météo ont été filmées à
10 ans d'écart

La météo de droite est
erronée

Une histoire de température

Le jeu des 7 différences



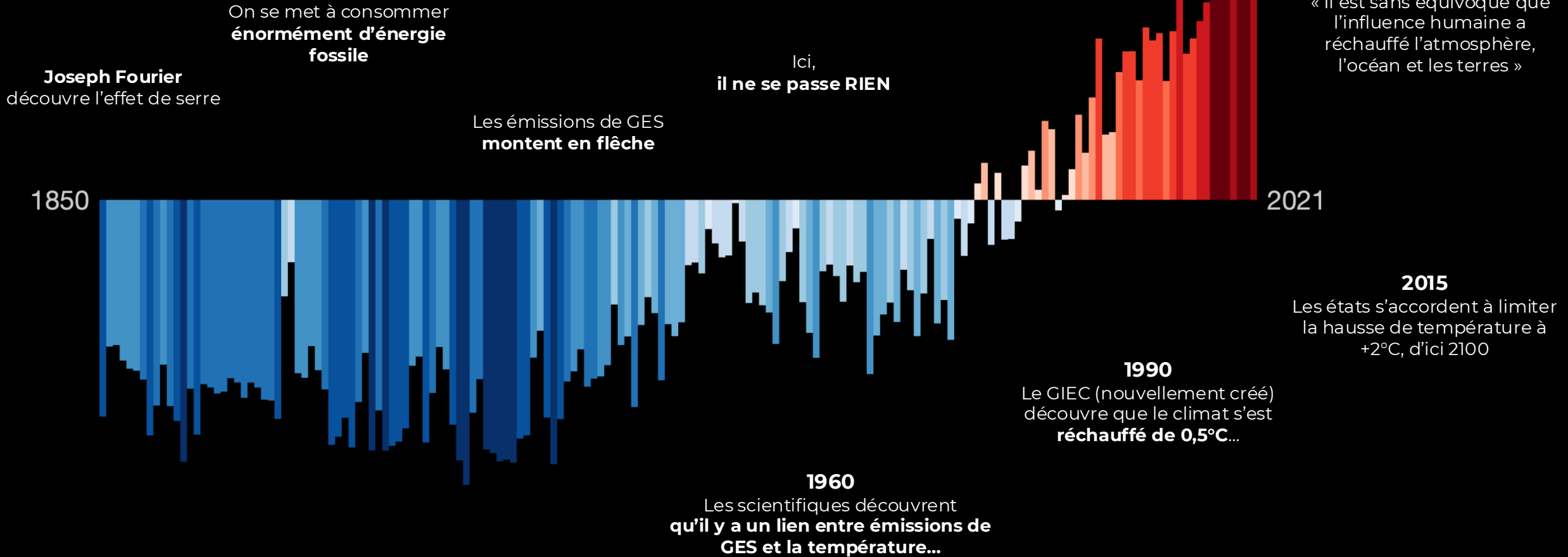
Météo fictive (p)

La météo de gauche est fictive

Seulement +1°C de réchauffement par rapport à 1850!

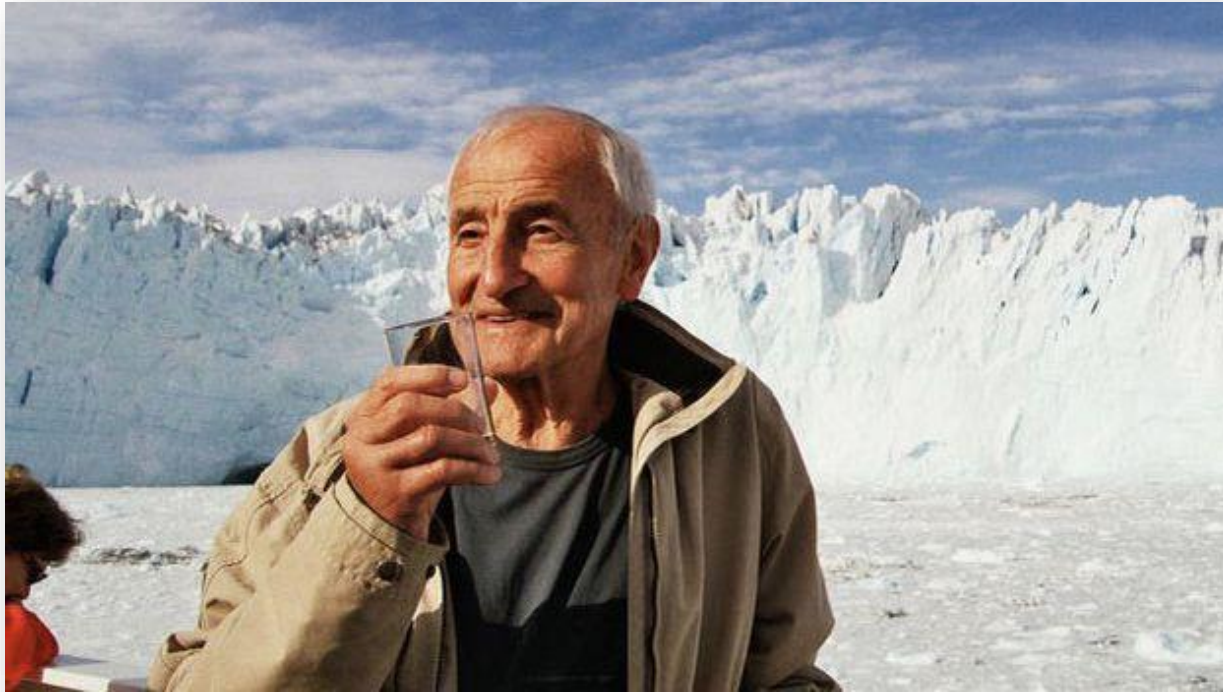
REMBOBINONS

Global temperatures have increased by over 1.2°C

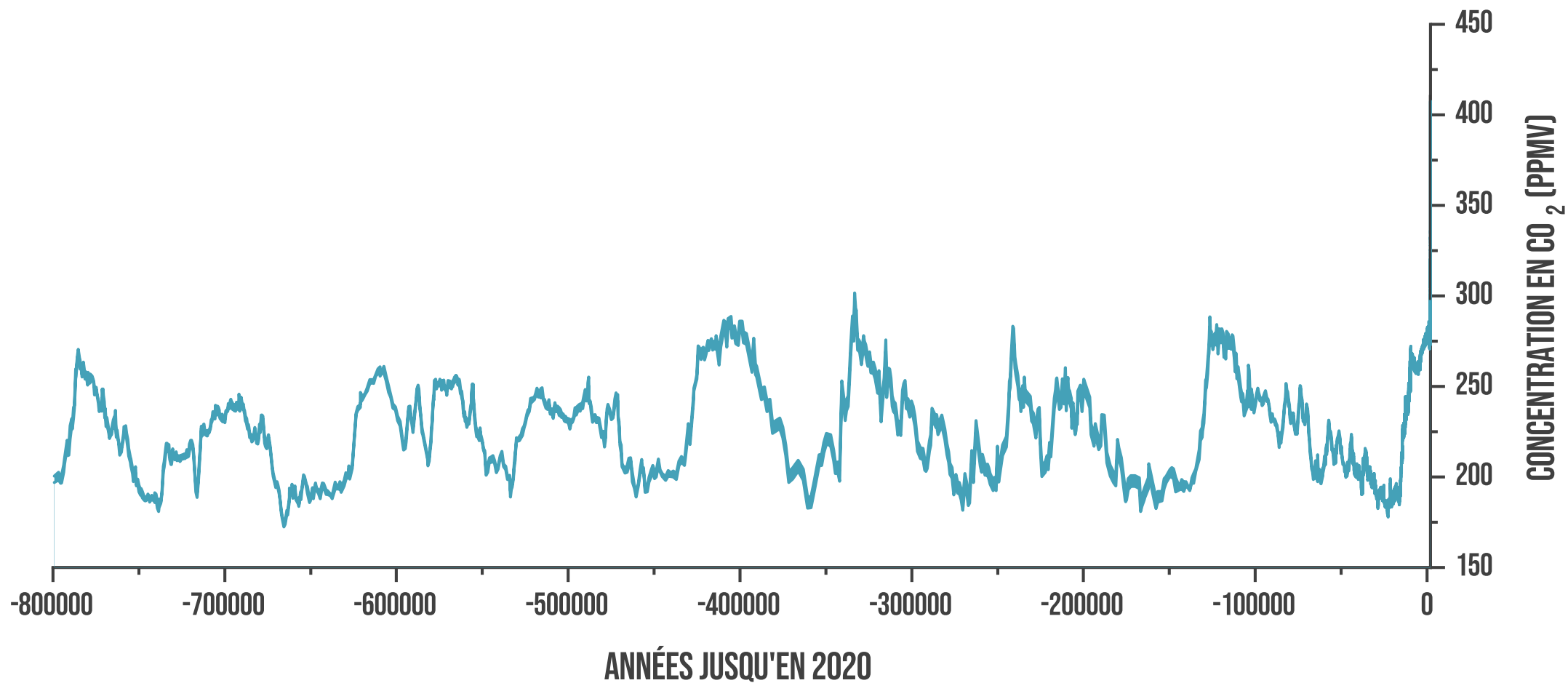


Contexte climatique

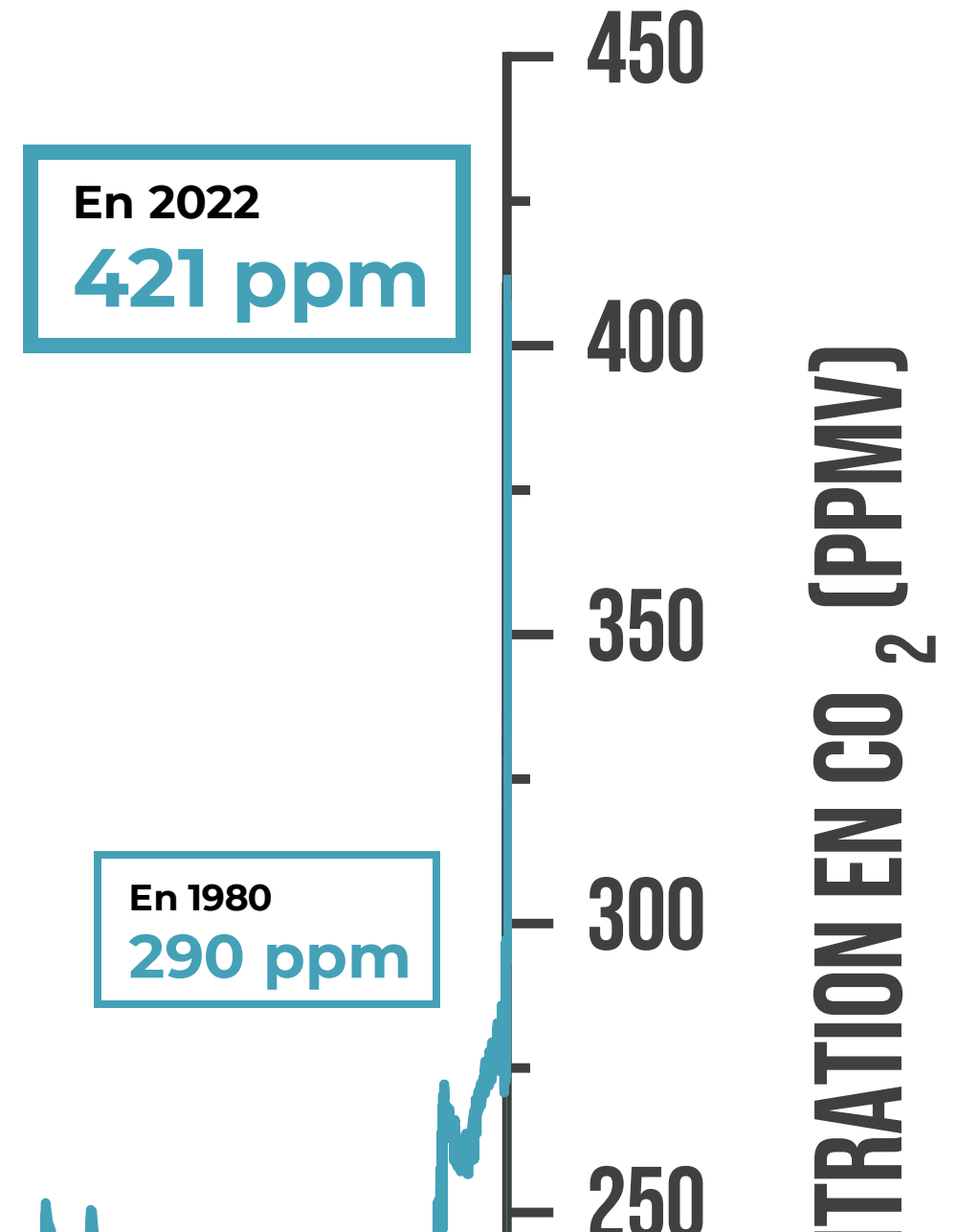
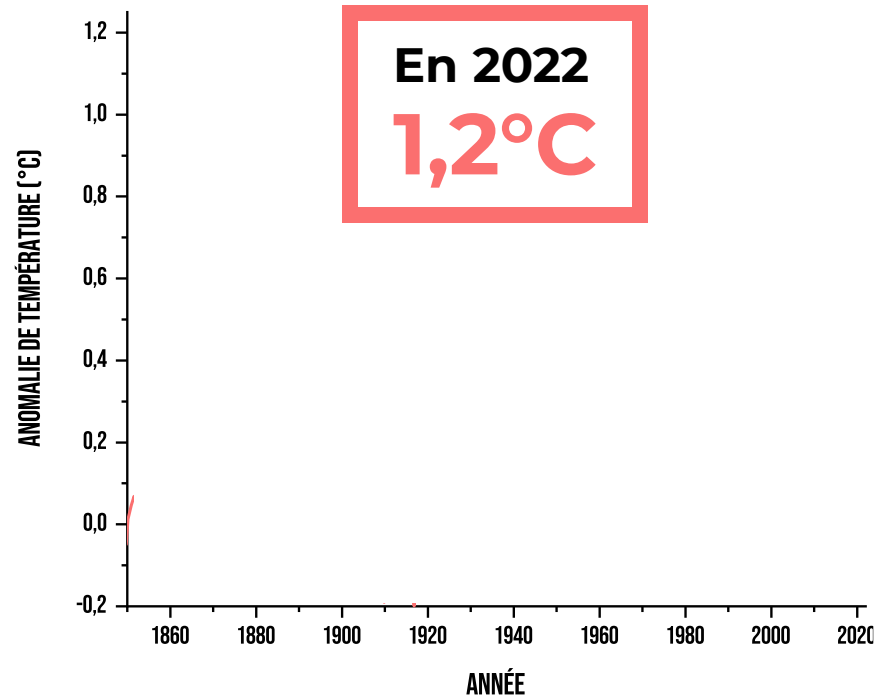
Une histoire de recherche



Qu'est-ce qui nous arrive ?



2. Qu'est-ce qui nous arrive ?



Une nouvelle époque

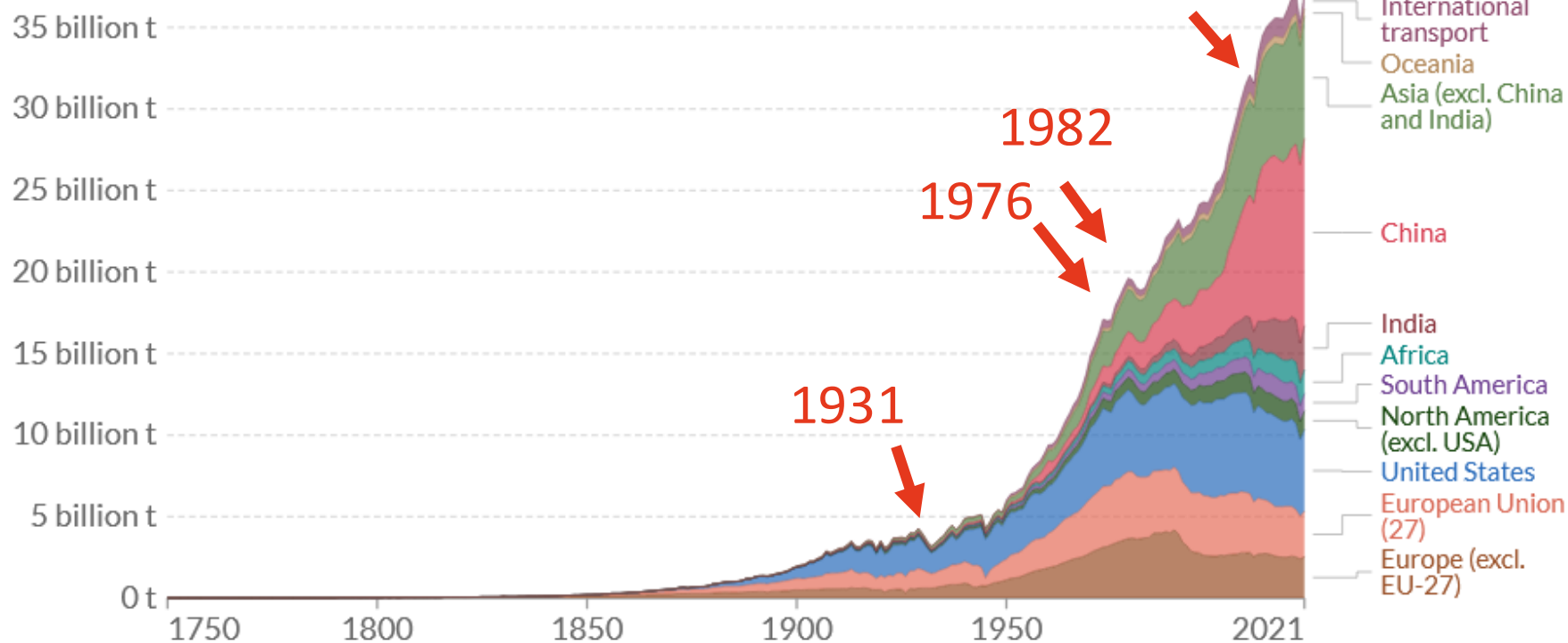
Nos émissions de gaz à effet de serre, à la loupe

Annual CO₂ emissions by world region

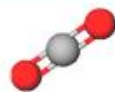
This measures fossil fuel and industry emissions. Land use change is not included.

Our World
in Data

Relative



Les gaz à effet de serre



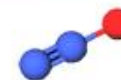
Dioxyde de carbone

Durée de vie : plusieurs siècles



Méthane

Durée de vie : 10 ans



Protoxyde d'azote

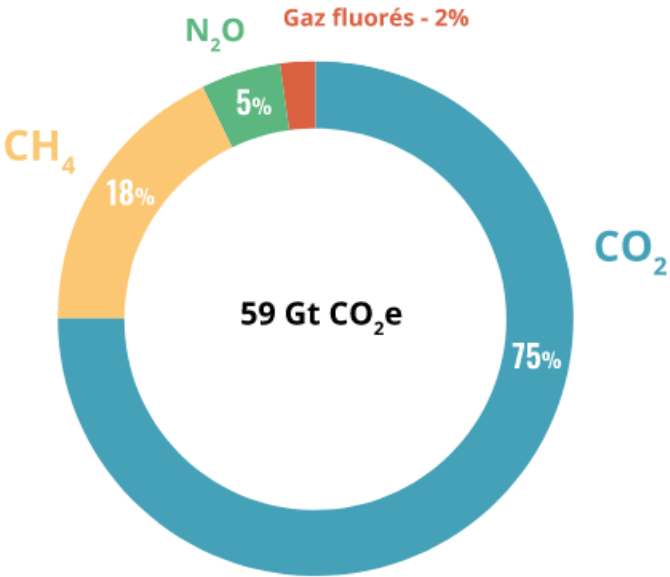
Durée de vie : 1 siècle

Les gaz à effet de serre

Gaz	Durée de séjour (années)	PRG selon la période considérée		
		20 ans	100 ans	500 ans
Dioxyde de carbone (CO ₂)	cf. (voir <i>supra</i>)	1	1	1
Méthane (CH ₄)	11,8	81,2	27,9	7,95
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	109	273	273	130
PFC-14 (tétrafluorure de carbone, CF ₄)	50 000	5 300	7 380	10 600
HFC-23 (trifluorométhane, CHF ₃)	228	12 400	14 600	10 500
Hexafluorure de soufre (SF ₆)	1 000	18 200	24 300	29 000

Le choix d'un PRG à 100 ans est une **convention**

Emissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) en 2019



Rapport GIEC AR6 2022

L'objectif à atteindre...

D'ici 2050

Le constat de l'urgence climatique

En décembre 2015, la COP21 de Paris fixe l'objectif de restreindre le réchauffement climatique à **+2°C d'ici à la fin du siècle**



COP21 • CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE

L'objectif à atteindre...

D'ici 2050

En dessous de 2°C = Combien de CO₂ ?

500 kg

2 tonnes

5 tonnes

10 tonnes

(par personne et par an)

L'objectif à atteindre...

D'ici 2050

En dessous de 2°C = Combien de CO₂ ?

500 kg

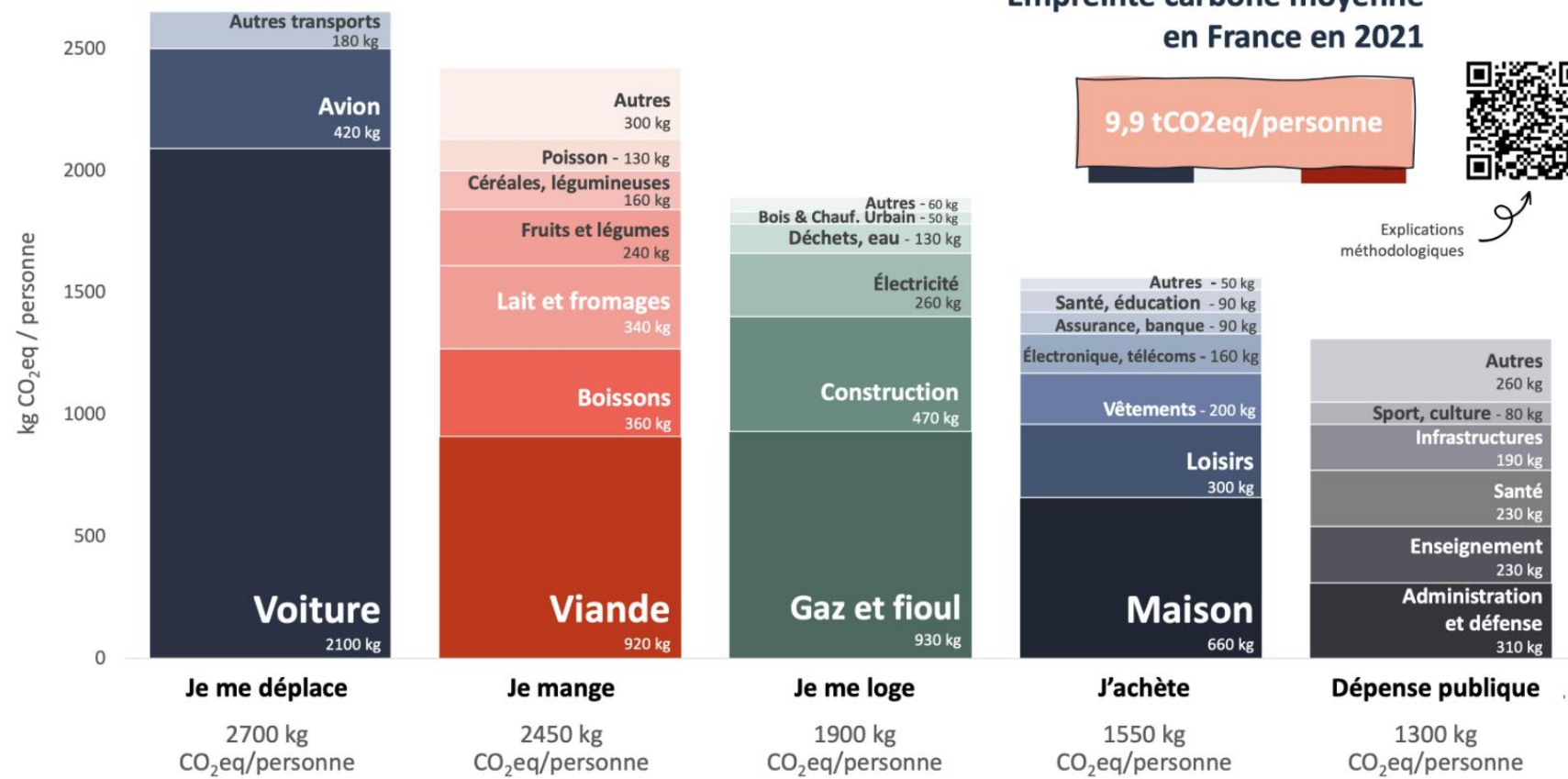
2 tonnes

5 tonnes

10 tonnes

(par personne et par an)

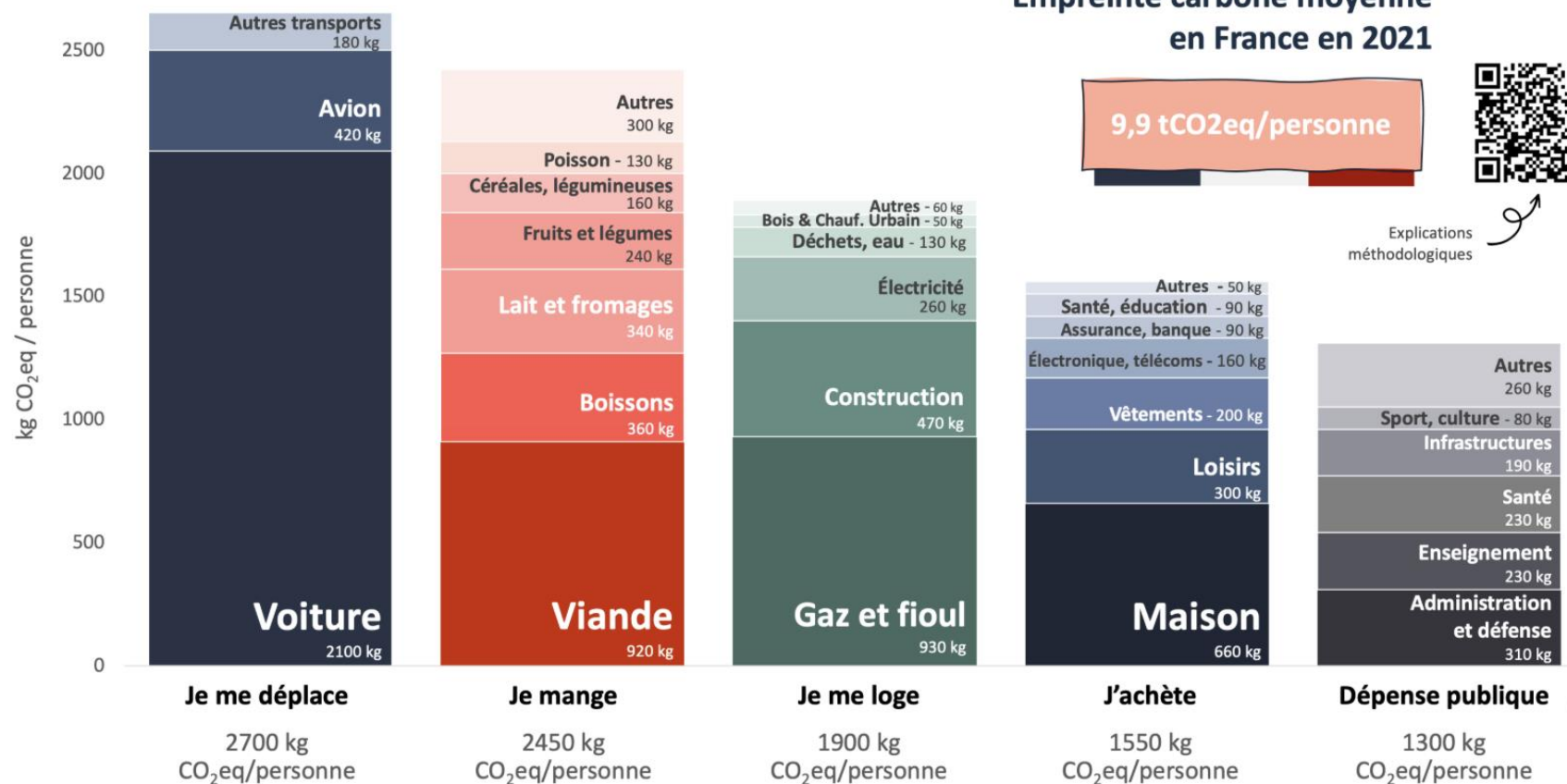
La moyenne française



Gaz inclus : CO₂ (hors UTCATF France), CH₄, N₂O, HFC, SF₆, PFC, H₂O (trainées de condensation).

Source : MyCO₂ par Carbone 4 d'après le ministère de la Transition écologique, le Haut Conseil pour le Climat, le CITEPA, Agribalyse V3 et INCA 3.

La moyenne française



Objectif 2°C



=
2 Tonnes / pers

Gaz inclus : CO₂ (hors UTCATF France), CH₄, N₂O, HFC, SF₆, PFC, H₂O (trainées de condensation).

Source : MyCO₂ par Carbone 4 d'après le ministère de la Transition écologique, le Haut Conseil pour le Climat, le CITEPA, Agribalyse V3 et INCA 3.

Tous les gestes se valent ?

Lequel est le pire ?

1

Regarder Netflix
Pendant 7 heures



0,3 kgCO2e

2

Acheter
2 kg de tomates hors saison



4 kgCO2e

~1 kgCO2e pour une
tomate de saison

3

Prendre l'avion
Aller-retour Paris-Los Angeles



3000 kgCO2e

4

Manger
300 grammes d'agneau

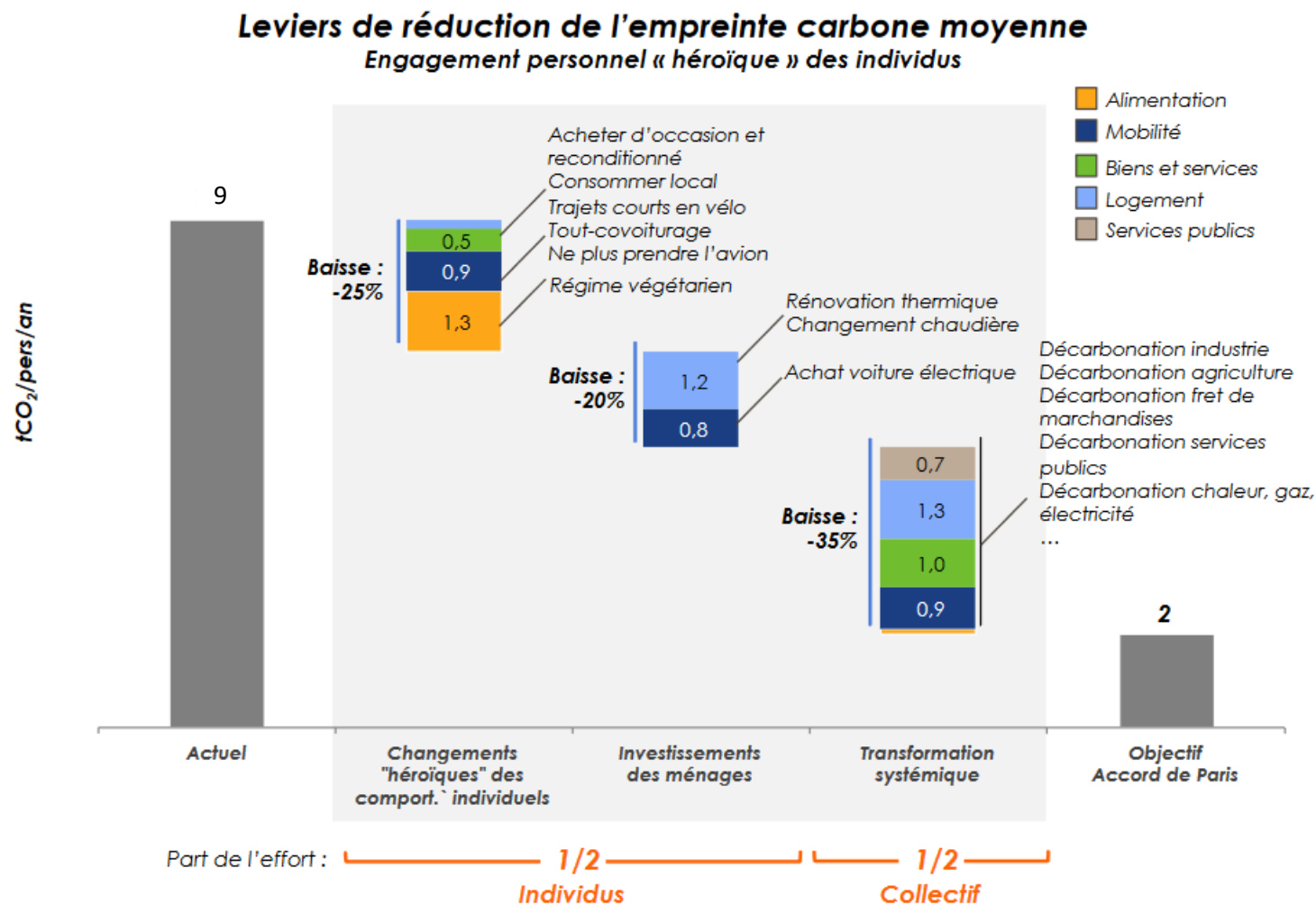


15 kgCO2e

Connaitre les ordres de grandeurs, ça change **tout**

Notre bilan : encore du boulot

Individuellement, il reste du chemin à parcourir





02

Mesurer l'impact Par l'Analyse en Cycle de Vie



On veut savoir
l'impact de ces
gants pour les
réduire

Le produit est transporté par bateau et par camion d'une usine de fabrication de gants à un centre de distribution, avant d'être acheminé chez un détaillant où il est stocké puis livré à l'utilisateur final.

3

DISTRIBUTION

UTILISATION

FIN DE VIE

FABRICATION

EXTRACTION DES MATIÈRES PREMIÈRES

Les peaux sont tannées, puis découpées et façonnées en gant.

L'utilisateur peut utiliser un conditionneur pour cuir ou d'autres produits d'entretien pour maintenir la qualité du cuir tout au long de sa durée de vie.

L'utilisateur jette ses gants dans sa poubelle domestique, qui est ensuite collectée par la municipalité et incinérée ou envoyée à la décharge.

Les peaux proviennent d'animaux qui sont élevés et abattus. Ces peaux doivent souvent être prétraitées avant d'entrer dans la phase de fabrication.

1

2

4

5





L'Analyse de cycle de vie

- + Fondée sur une approche systémique de quantification des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'une organisation
- + Une analyse multicritère normée prenant en comptes des indicateurs environnementaux
- + Un outil d'identification des enjeux et des contributeurs environnementaux
- + Un outil de comparaison et d'aide à la décision qui permet d'éviter les transferts d'impacts

Un exemple plutôt célèbre



Product Environmental Report

iPhone 15 Pro and iPhone 15 Pro Max

Date introduced
September 12, 2023

Progress toward our 2030 goal

20% recycled or renewable content¹
Over 38% of manufacturing electricity
sourced from supplier clean energy
projects²

Smarter chemistry³

- Arsenic-free display glass
- Mercury-free
- Brominated flame retardant-free
- PVC-free
- Beryllium-free

Longevity

iPhone 15 Pro and iPhone 15 Pro Max
feature Ceramic Shield as well as
IP68 water and dust resistance that
enhance the durability of the device.⁴



Responsible packaging

99% fiber-based, due to our work to
eliminate plastic in packaging⁵
100% recycled or responsibly sourced
wood fibers

Recovery

Return your device through
Apple Trade In, and we'll give it
a new life or recycle it for free.

Responsible manufacturing

Apple Supplier Code of Conduct sets
strict standards for the protection of people
in our supply chain and the planet.

Carbon Footprint

Greenhouse gas emissions were calculated using a life cycle assessment (LCA) methodology in accordance with ISO 14040, ISO 14044, and ISO 14067 standards and based on iPhone 15 Pro with 128GB. The LCA boundary for this product includes the physical product and all of its components, as well as all in-box accessories.

Greenhouse gas emissions	iPhone 15 Pro 128GB	iPhone 15 Pro Max 256GB
Total product footprint	66 kg CO ₂ e	75 kg CO ₂ e
Apple emissions from utility-purchased electricity (scope 2)	0 kg CO ₂ e	0 kg CO ₂ e
Life cycle product emissions (scope 3)	66 kg CO ₂ e	75 kg CO ₂ e
• Production	83%	83%
• Transportation	3%	3%
• Product use	15%	15%
• End-of-life processing	<1%	<1%
GHG reductions achieved ⁶	↓29%	↓30%

Note: Percentages may not total 100 due to rounding.

We've also calculated the product carbon footprint for different configurations.

Configuration	iPhone 15 Pro	iPhone 15 Pro Max
256GB	71 kg CO ₂ e	75 kg CO ₂ e
512GB	83 kg CO ₂ e	87 kg CO ₂ e
1TB	107 kg CO ₂ e	110 kg CO ₂ e

100% recycled cobalt in the battery⁶



Calculer un impact carbone

Quelle est l'empreinte carbone de 2h de vidéoprojection en amphi ?



900W

x 2h = 1,8 kWh x



Electricité/2022 - mix moyen/consommation

France continentale



0.0520
kg éq. CO2/kWh

Incertitude 10 %

= 93 grammes CO2e

Quelle est l'empreinte carbone d'un an d'abonnement téléphonique ?



130 Go
15€99/mois
sans engagement

x 12 mois = 192 € x



Service/Télécommunications

France continentale

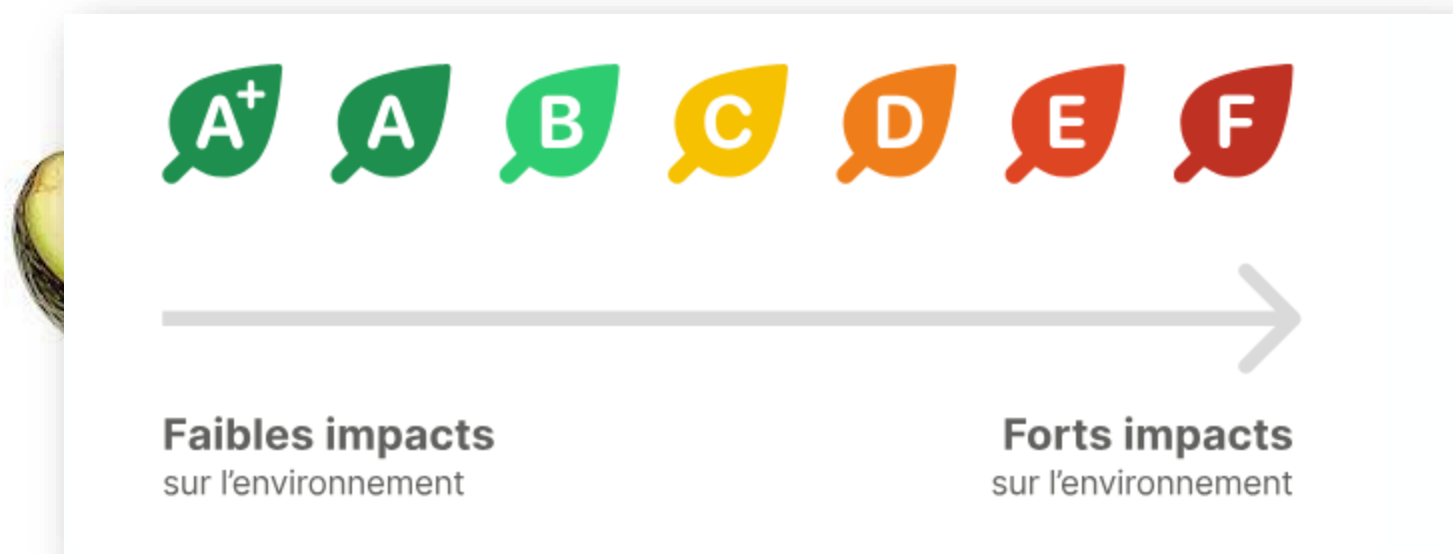


170
kg éq. CO2/keuro

Incertitude 80 %

= 32 kg CO2e

Une affaire de compromis



1,55

kg CO2 eq/kg de produit

Climat

2,37e+1

m3 depriv./kg de produit

Eau

4,56

kg CO2 eq/kg de produit

Climat

2,03

m3 depriv./kg de produit

Eau

Une base d'ACV : Agribalyse

Les ordres de grandeur, c'est important

L'impact de votre nourriture sur
<https://agribalyse.ademe.fr/app>



Pizza 4 fromages

Code Cical : **25478**

Pizzas, tartes et crêpes salées (Entrées et plats composés)

Changement climatique

3,63
kg CO2 eq/kg de produit

DQR : **1.58** ^(?)

Impact (Score Unique PEF) par étapes du cycle de vie

Agriculture

71.7 %

Transformation

9.3 %

Emballage

4.5 %

Transport

4 %

Supermarché et distribution

2 %

Consommation

7.5 %

Impact (Score Unique PEF) par ingrédients

Fromage

31.8 %

Fromage mozzarella

12.1 %

Roquefort

27 %

Tomate

1.2 %

Farine de blé

3.8 %

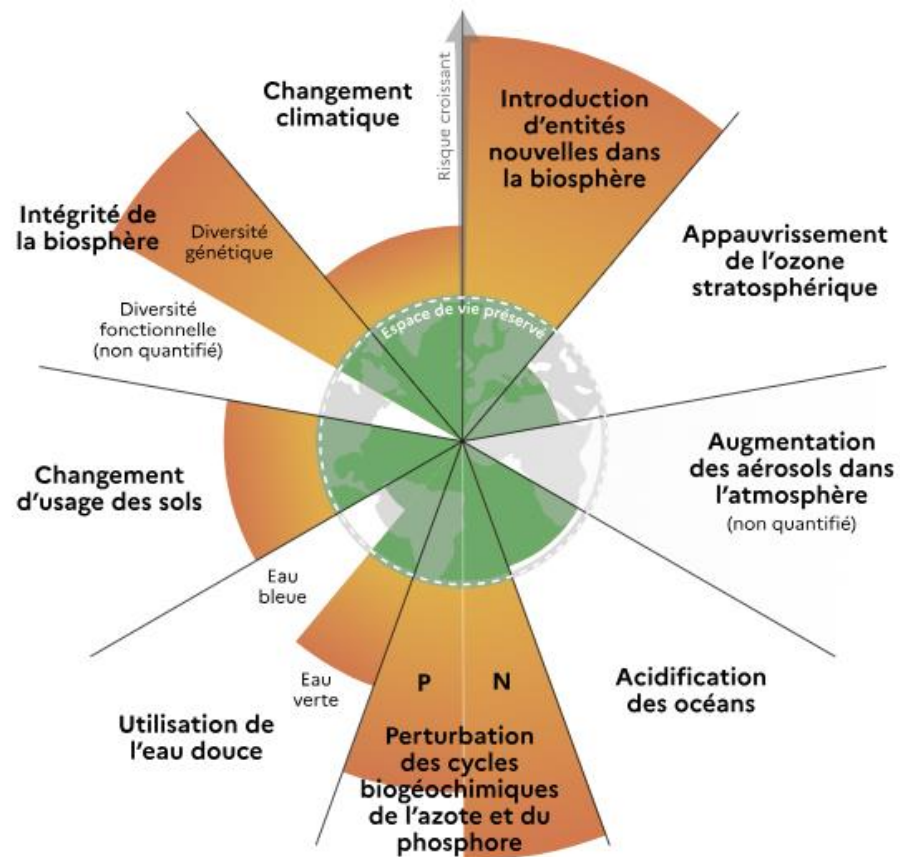
Autres étapes

23.7 %

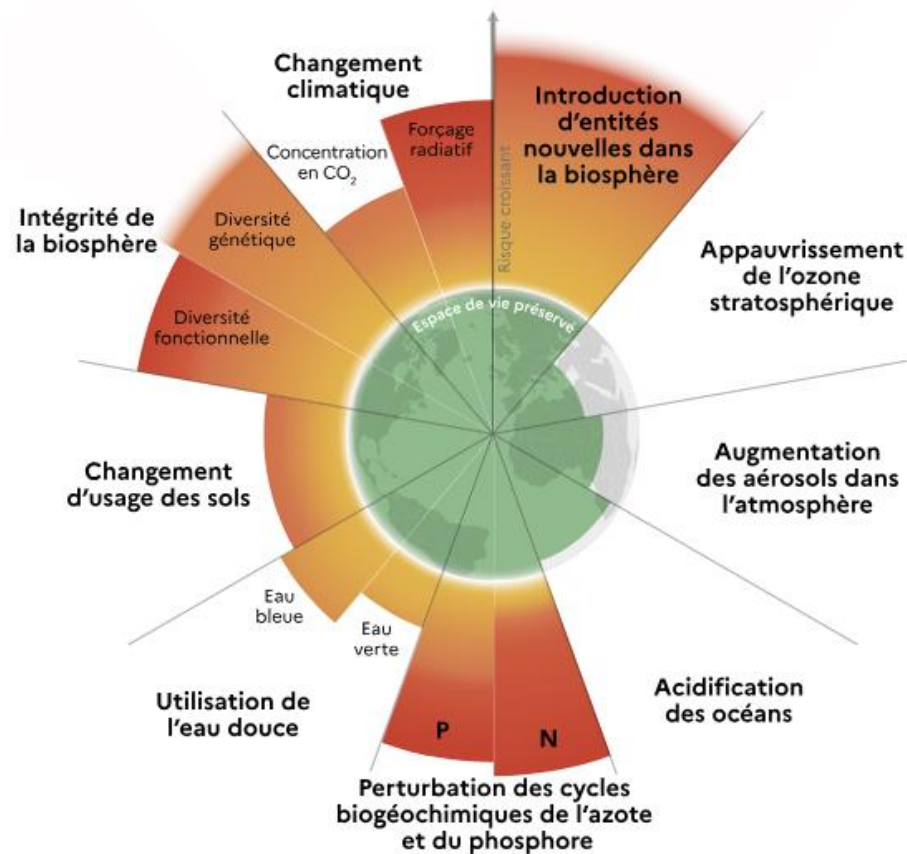
Indicateur	Mesure	Unité
Score unique EF	4,78e-1	mPt/kg de produit
Changement climatique	3,63	kg CO2 eq/kg de produit
Appauvrissement de la couche d'ozone	5,75e-8	kg CVC11 eq/kg de produit
Rayonnements ionisants	1,39	kBq U-235 eq/kg de produit
Formation photochimique d'ozone	7,58e-3	kg NMVOC eq/kg de produit
Particules	4,62e-7	disease inc./kg de produit
Acidification terrestre et eaux douces	6,29e-2	mol H+ eq/kg de produit
Eutrophisation terrestre	2,7e-1	mol N eq/kg de produit
Eutrophisation eaux douces	4,83e-4	kg P eq/kg de produit
Eutrophisation marine	1,51e-2	kg N eq/kg de produit
Utilisation du sol	2,48e+2	Pt/kg de produit
Écotoxicité pour écosystèmes aquatiques d'eau douce	2,84e+1	CTUe/kg de produit
Épuisement des ressources eau	8,25e-1	m3 depriv./kg de produit
Épuisement des ressources énergétiques	4,56e+1	MJ/kg de produit
Épuisement des ressources minéraux	1,32e-5	kg Sb eq/kg de produit
Effets toxicologiques sur la santé humaine : substances non-cancérogènes ^(?)	5,05e-8	kg Sb eq/kg de produit
Effets toxicologiques sur la santé humaine : substances cancérogènes ^(?)	1,92e-9	kg Sb eq/kg de produit

Mais ce n'est pas tout

C'est une crise environnementale



2015



2023



Global warming



**Human toxicity
cancer effects**



Acidification



**Particulate
matter**



**Terrestrial
eutrophication**



Ionising radiation



Ozone depletion



**Photochemical ozone
formation**



**Freshwater
eutrophication**



**Mineral resource
depletion**



**Marine
eutrophication**



**Non-renewable energy
resource depletion**



**Freshwater
toxicity**



Land use



**Human toxicity
non-cancer effects**



**Water scarcity
footprint**

CAUSE

CONSEQUENCE

 **Global warming**

 **Human toxicity
cancer effects**

 **Acidification**

 **Particulate
matter**

 **Terrestrial
eutrophication**

 **Ionising radiation**

 **Ozone depletion**

 **Photochemical ozone
formation**

 **Freshwater
eutrophication**

 **Mineral resource
depletion**


 **Marine
eutrophication**

 **Non-renewable energy
resource depletion**

 **Freshwater
toxicity**

 **Land use**

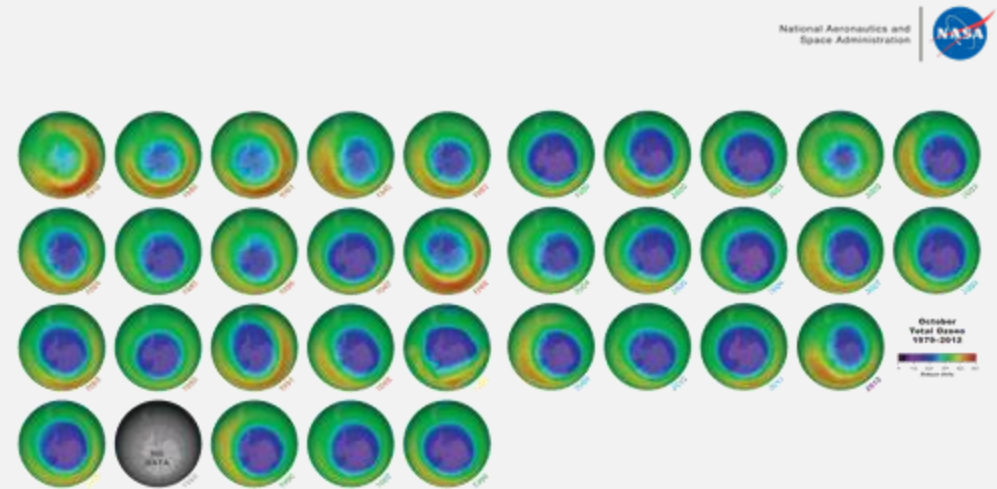
 **Human toxicity
non-cancer effects**

 **Water scarcity
footprint**

CAUSE



CONSEQUENCE





Global warming



Human toxicity
cancer effects



Acidification



Particulate
matter



Terrestrial
eutrophication



Ionising radiation



Ozone depletion



Photochemical ozone
formation



Freshwater
eutrophication



Mineral resource
depletion



Marine
eutrophication



Non-renewable energy
resource depletion



Freshwater
toxicity



Land use



Human toxicity
non-cancer effects



Water scarcity
footprint

CAUSE



CONSEQUENCE



 **Global warming**

 **Human toxicity
cancer effects**

 **Acidification**

 **Particulate
matter**

 **Terrestrial
eutrophication**

 **Ionising radiation**

 **Ozone depletion**

 **Photochemical ozone
formation**

 **Freshwater
eutrophication**

 **Mineral resource
depletion**


 **Marine
eutrophication**

 **Non-renewable energy
resource depletion**

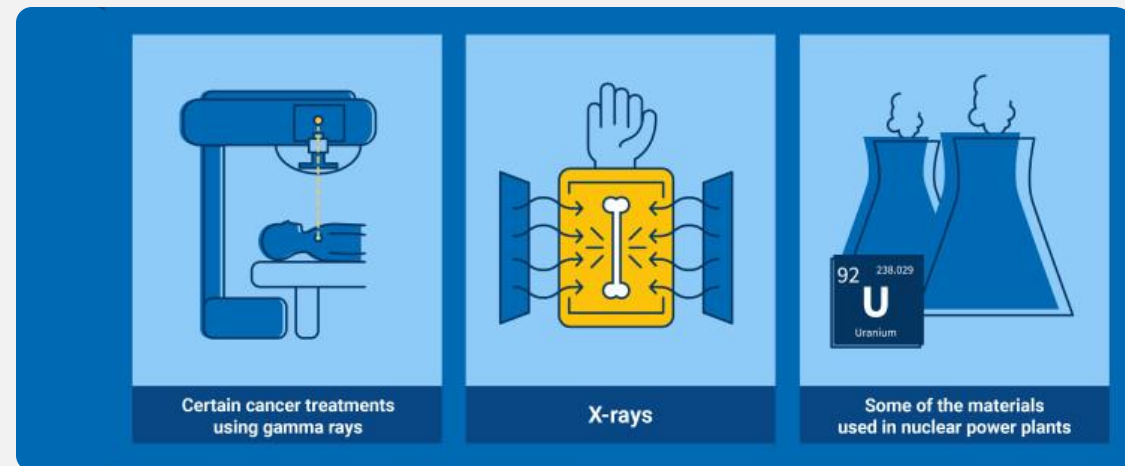
 **Freshwater
toxicity**

 **Land use**

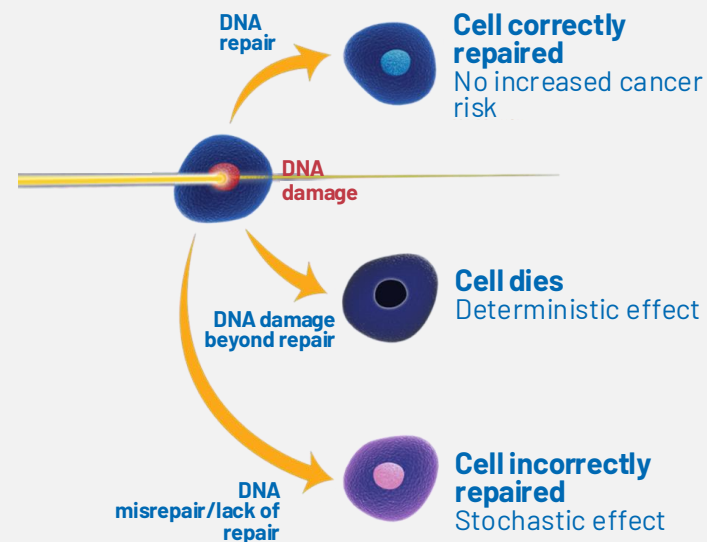
 **Human toxicity
non-cancer effects**

 **Water scarcity
footprint**

CAUSE



CONSEQUENCE





Global warming



**Human toxicity
cancer effects**



Acidification



**Particulate
matter**



**Terrestrial
eutrophication**



Ionising radiation



Ozone depletion



**Photochemical ozone
formation**



**Freshwater
eutrophication**



**Mineral resource
depletion**



**Marine
eutrophication**



**Non-renewable energy
resource depletion**



**Freshwater
toxicity**



Land use



**Human toxicity
non-cancer effects**



**Water scarcity
footprint**

CAUSE



CONSEQUENCE





Global warming



Human toxicity
cancer effects



Acidification



Particulate
matter



Terrestrial
eutrophication



Ionising radiation



Ozone depletion



Photochemical ozone
formation



Freshwater
eutrophication



Mineral resource
depletion



Marine
eutrophication



Non-renewable energy
resource depletion



Freshwater
toxicity



Land use

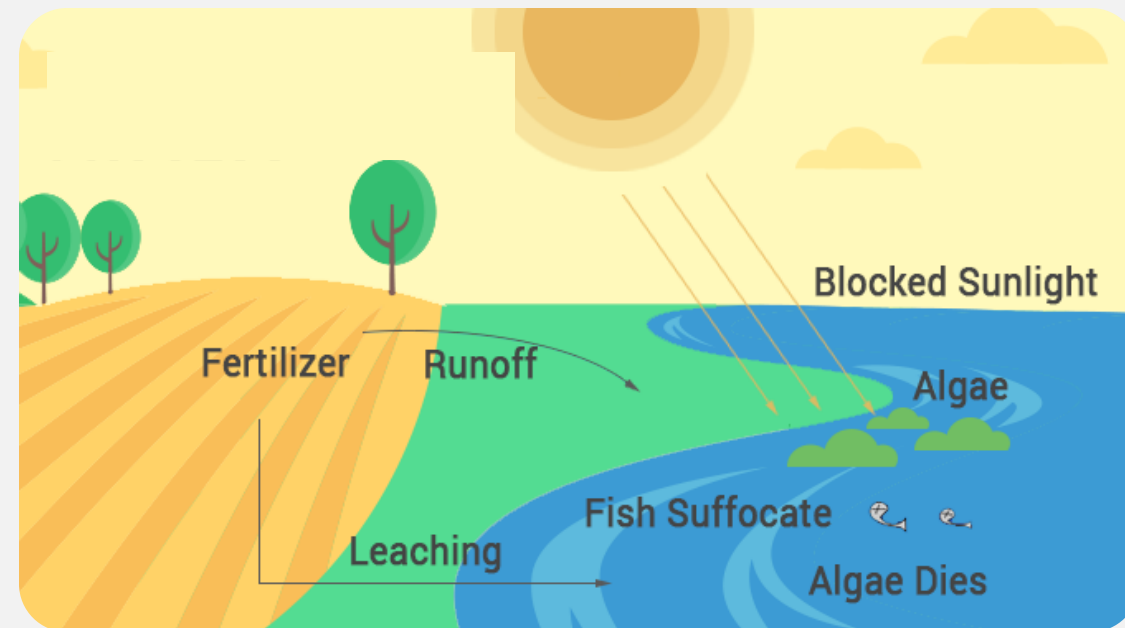


Human toxicity
non-cancer effects



Water scarcity
footprint

CAUSE



CONSEQUENCE





Global warming



**Human toxicity
cancer effects**



Acidification



**Particulate
matter**



**Terrestrial
eutrophication**



Ionising radiation



Ozone depletion



**Photochemical ozone
formation**



**Freshwater
eutrophication**



**Mineral resource
depletion**



**Marine
eutrophication**



**Non-renewable energy
resource depletion**



**Freshwater
toxicity**



Land use



**Human toxicity
non-cancer effects**

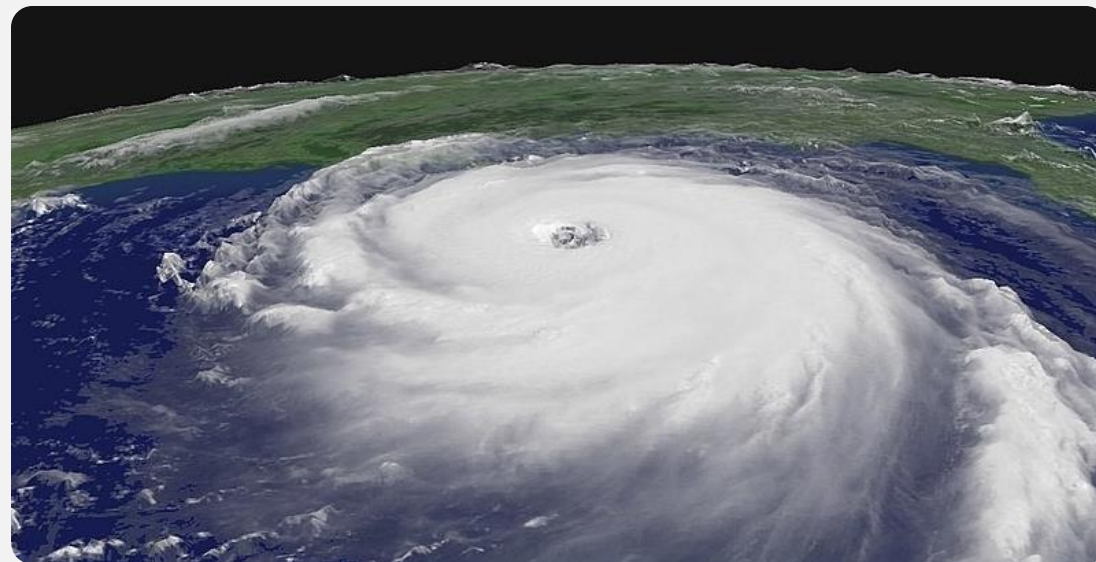


**Water scarcity
footprint**

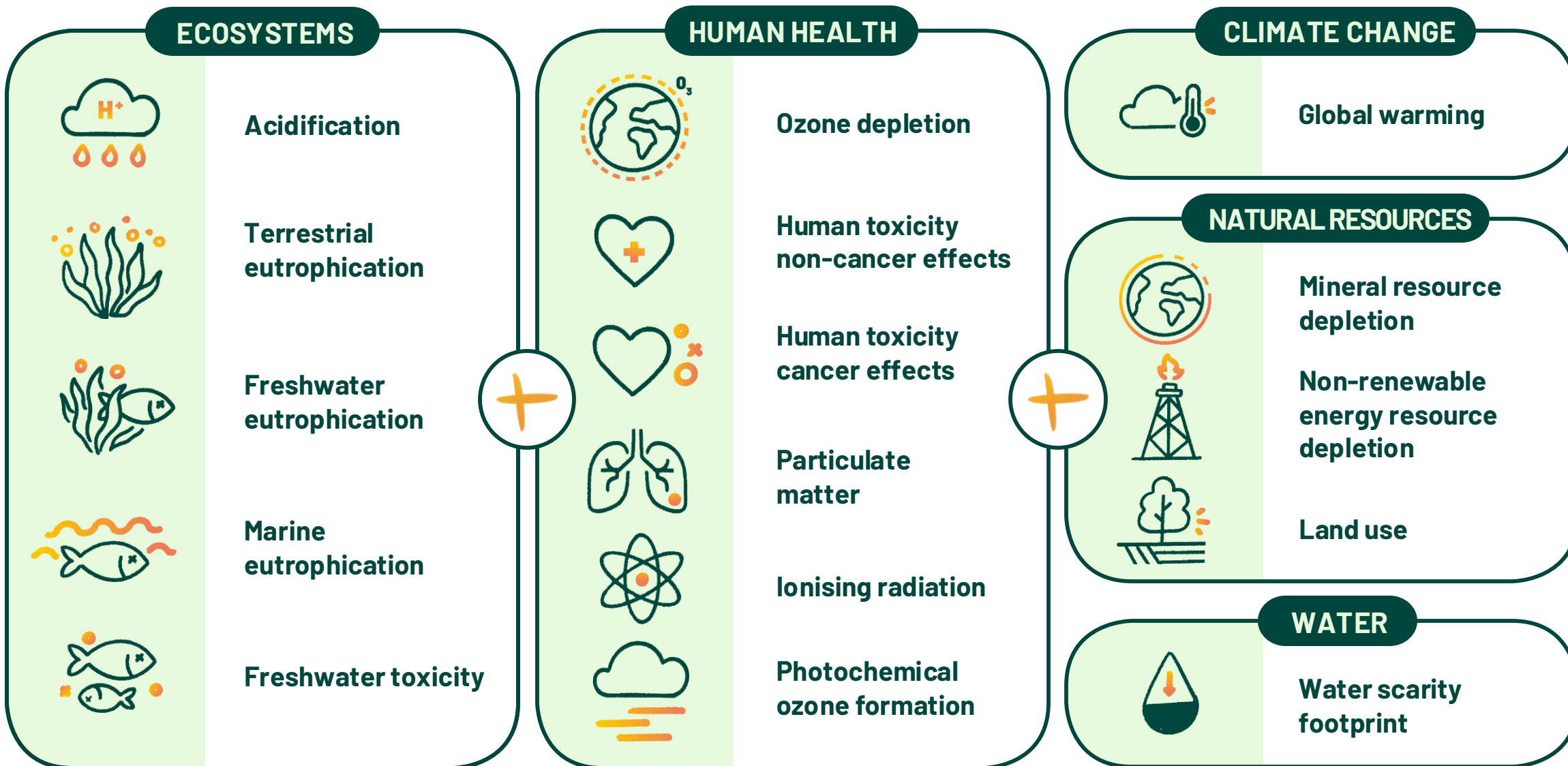
CAUSE



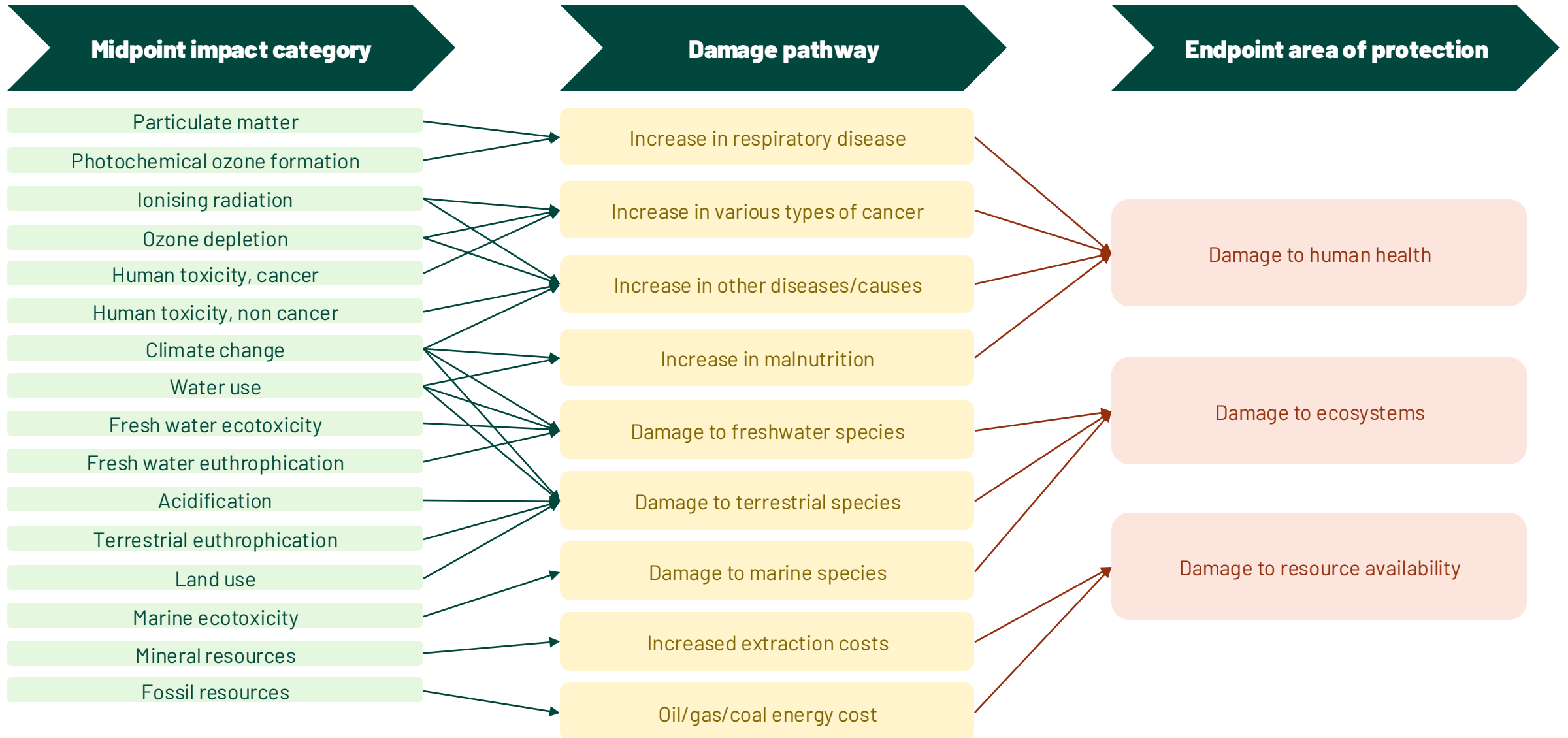
CONSEQUENCE



PEF score



PEF score





03

Dans la chimie ?

Un sujet important

En France : la Stratégie Nationale Bas Carbone

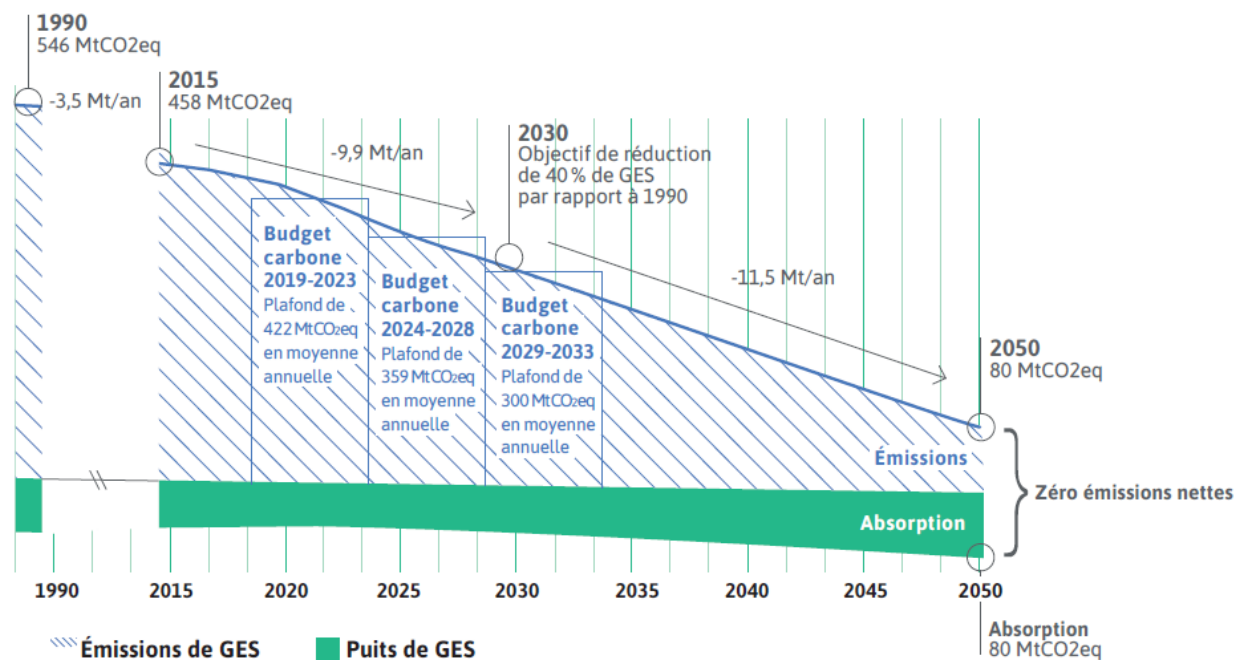


Stratégie nationale bas-carbone

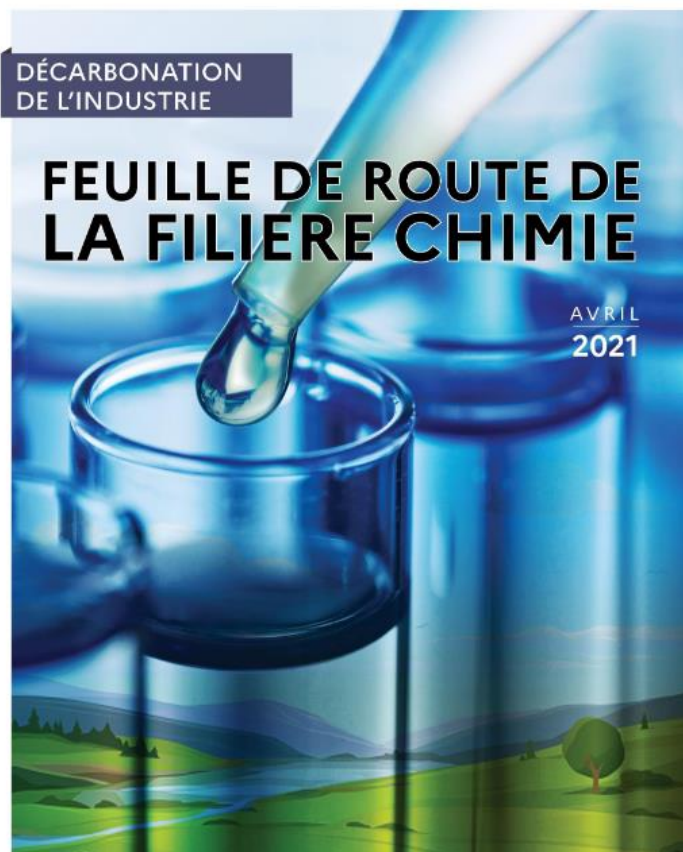


La transition écologique et solidaire vers la
neutralité carbone

Évolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français
entre 1990 et 2050 (en MtCO₂eq). Inventaire CITEPA 2018 et scénario SNBC révisée (neutralité carbone)

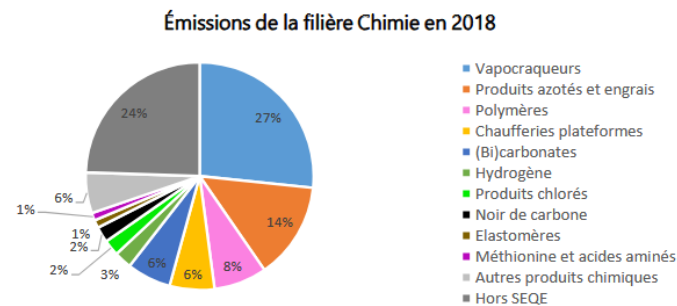


Dans la chimie ?



Inventaire par sous-secteur

La répartition des émissions annuelles par sous-secteur de la filière Chimie en 2018 en France pour les sites compris dans le Système européen de quotas d'émissions (SEQUE) est donnée dans le diagramme ci-dessous. La part des émissions non couvertes par le SEQUE (24 %) est également représentée.



Source : EUTL².

Les deux sous-secteurs les plus émetteurs de la filière chimie sont la **pétrochimie** (27 %) et les **engrais et produits azotés** (14 %). Le reste des émissions de GES de la filière est très fragmenté.

II. Trajectoire de réduction des émissions de la filière Chimie à l'horizon 2030

Présentation générale

Les différents leviers permettant d'atteindre une réduction de 26 % des émissions annuelles de GES d'ici 2030 ainsi que les réductions d'émissions annuelles correspondantes et les actions globales à mener par l'État et par la filière sont rassemblés ci-dessous. Le détail pour chacun de ces leviers est donné dans la Section « Décomposition par leviers ». Ce travail reste à établir pour certains modes de décarbonation de la chaleur⁴ tels que l'autoconsommation de biogaz, le raccordement à des unités de valorisation énergétique des déchets (UVE) et le solaire thermique.

Levier	Réduction des émissions annuelles de GES entre 2015 et 2030 (en MtCO _{2e})
Efficacité énergétique	-1,8
Chaleur biomasse	-1,4
Chaleur CSR	-0,8
N ₂ O	-0,8
HFC	-0,9
Total leviers matures	-5,7
En % par rapport à 2015	-26%

Actions transverses à mener par la filière

Se saisir des outils mis en place dans le cadre du plan de relance (notamment pour la décarbonation de l'industrie : AAP efficacité énergétique et décarbonation des procédés, AAP chaleur bas-carbone, guichet ASP), ainsi que ceux disponibles au niveau européen (fonds de transition juste, fonds d'innovation de l'ETS notamment), pour atteindre les objectifs de réduction d'émission identifiés.

eco  invent

[Corporate](#) [Produits](#) [Climat](#)

28 NOV. 2023 - ACTUALITÉ

Arkema accélère le calcul de l'Empreinte Carbone de l'ensemble de son portefeuille produits

En accélérant la caractérisation de l'empreinte carbone des solutions d'Arkema, l'outil CACTUS permettra de dépasser, avant 2024, l'objectif de **50 % des ventes d'Arkema couvertes** par un bilan carbone ou une analyse de cycle de vie (ACV) complète, contre **41 % en 2022 et 27 % en 2021**.

Ainsi, lors du *Capital Markets Day* du 27 septembre 2023, le Groupe a annoncé un nouvel objectif visant à **atteindre 90 % de ses ventes couvertes par une ACV d'ici 2030**. Il s'agit d'une nouvelle étape dans l'ambition de développement durable du Groupe, et en augmentant fortement sa capacité à calculer le PCF, Arkema aidera ses clients dans leur ambition de réduire leurs émissions de GES du scope 3 amont et dans leur quête de solutions plus durables.

*CACTUS : Carbon footprint Automated Calculation for Transparent Use and Share (calcul automatisé de l'empreinte carbone pour une utilisation et un partage transparents)

Dans le cadre de l'engagement fort du Groupe en faveur de la décarbonisation de l'ensemble de sa chaîne de valeur, Arkema a lancé l'outil numérique CACTUS*, qui vise à automatiser le calcul de l'Empreinte Carbone Produit (ou Product Carbon Footprint - PCF) de tout le portefeuille de solutions du Groupe.

Une estimation de vos projets

Langue : Anglais

Nombre d'ECTS : 75

MODULE 1

COURS 1

Sciences de l'environnement, systèmes et énergie

26h, 2 ECTS

Anthropocène ; Écosystèmes ; Changement climatique ; Pollution environnementale ; Biodiversité

COURS 2

Économie circulaire et écologie industrielle

30h, 3 ECTS

Économie circulaire ; Neutralité carbone ; Écologie industrielle ; Découplage ; Chaîne d'approvisionnement

MODULE 2

COURS 1

Procédés Industriels

30h, 3 ECTS

Thermodynamique ; Bilan matière et énergie ; Diagramme de flux ; Modélisation des procédés ; Simulation des procédés

COURS 2

Impact environnemental et analyse du cycle de vie

33h, 5 ECTS

Impact environnemental ; Pensée cycle de vie ; Logiciels ACV ; Modélisation ACV ; Durabilité

COURS 3

L'ACV : un outil de décision publique

20h, 2 ECTS

Prise de décision ; Politique ; Éco étiquetage ; Systèmes de consigne ; Incertitude

COURS 4

L'ACV économique et sociale

10h, 1 ECTS

Impact socio-économique ; ACV sociale ; Coût du cycle de vie ; Durabilité ; Pensée cycle de vie

MODULE 3

COURS 1

Retour d'expérience des Industriels sur les ACV

33h, 5 ECTS

Étude de cas ; Prise de décision ; ACV ; Optimisation des procédés

COURS 2

Projet tutoré d'analyse de cycle de vie

98h, 15 ECTS

Gestion de projet ; Travail en groupe ; Modélisation ACV ; Logiciels ACV

MODULE 4

COURS 1

Technologies pour la décarbonation de l'industrie

30h, 3 ECTS

Décarbonation ; Trajectoire ; Transition environnementale ; Empreinte carbone ; Émissions de GES

COURS 2

Matériaux, recyclage, polymères, catalyse enzymatique

30h, 3 ECTS

Épuisement des ressources ; Matériaux ; Énergies renouvelables ; Recyclage ; Technologie innovante

COURS 3

Éco-conception et technologies low-tech

20h, 2 ECTS

Éco-conception ; Low-tech ; Approche innovante ; Critique technologique ; Initiatives

MODULE 5

Mission en entreprise

15 ECTS

Stage ; Performance industrielle ; Gestion de projet ; Analyse de données ; Communication

MODULE 6

Thèse professionnelle de Mastère spécialisé

15 ECTS

Thèse professionnelle ; Recherche ; Solution pratique ; Recommandation stratégique

Dauphine

UNIVERSITÉ PARIS

PSL

★

Paris

PSL

★

Paris

PSL

★

Paris

PSL

★



Aussi chez les étudiantes et étudiants



Mesurer l'empreint environnementale

Un outil indispensable de l'ingénieur de demain

