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

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL ParisTech | université PARIS-SACLAY

2012-2014

ESPCI PARIS EDUCATION SCIENCE INNOVATION

2014-2016

ÉCOLE POLYTECHNIQUE IP PARIS

2016-2019

Projet CELSIUS

2019 – le plus tard possible

Mon métier aujourd'hui

Dirigeant du Projet Celsius

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

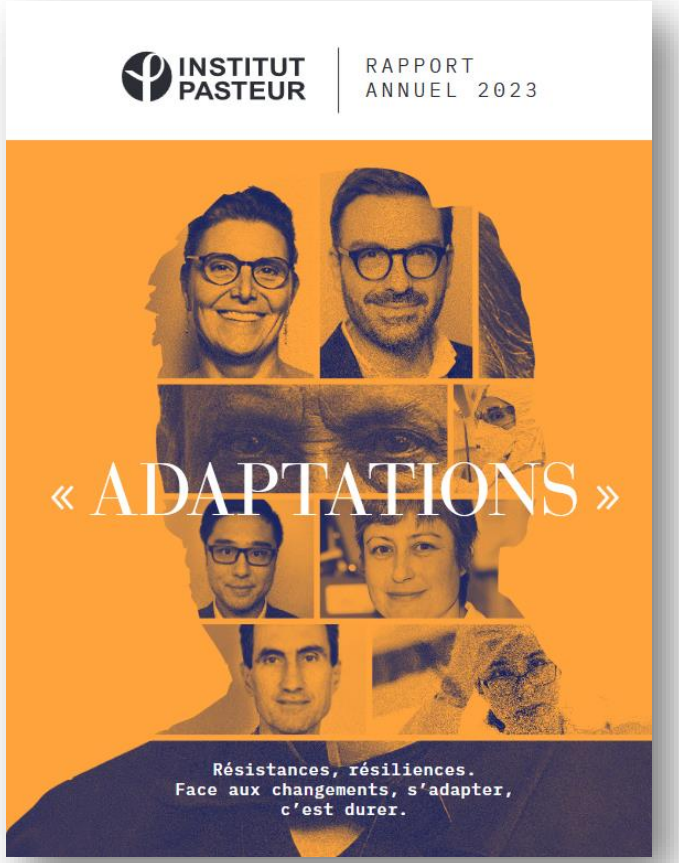
Le ski c’est sympa mais ça va pas durer

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 coorganisée 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 météos qui ont été présentées le même jour

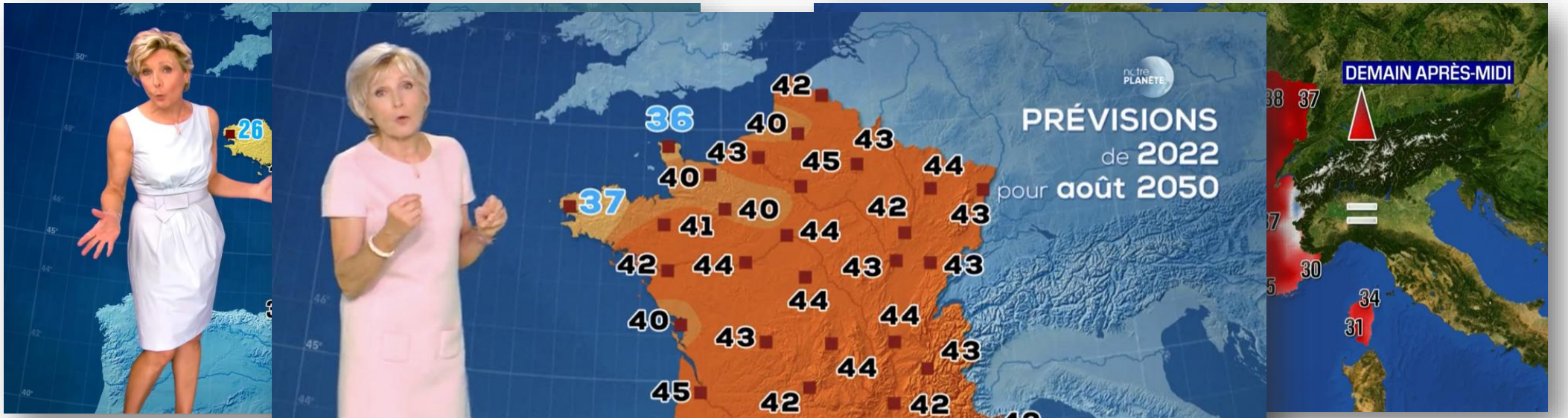
La météo de gauche est fictive

Les météos ont été filmées à 10 ans d'écart

La météo de droite est erronée

Une histoire de température

Le jeu des 7 différences



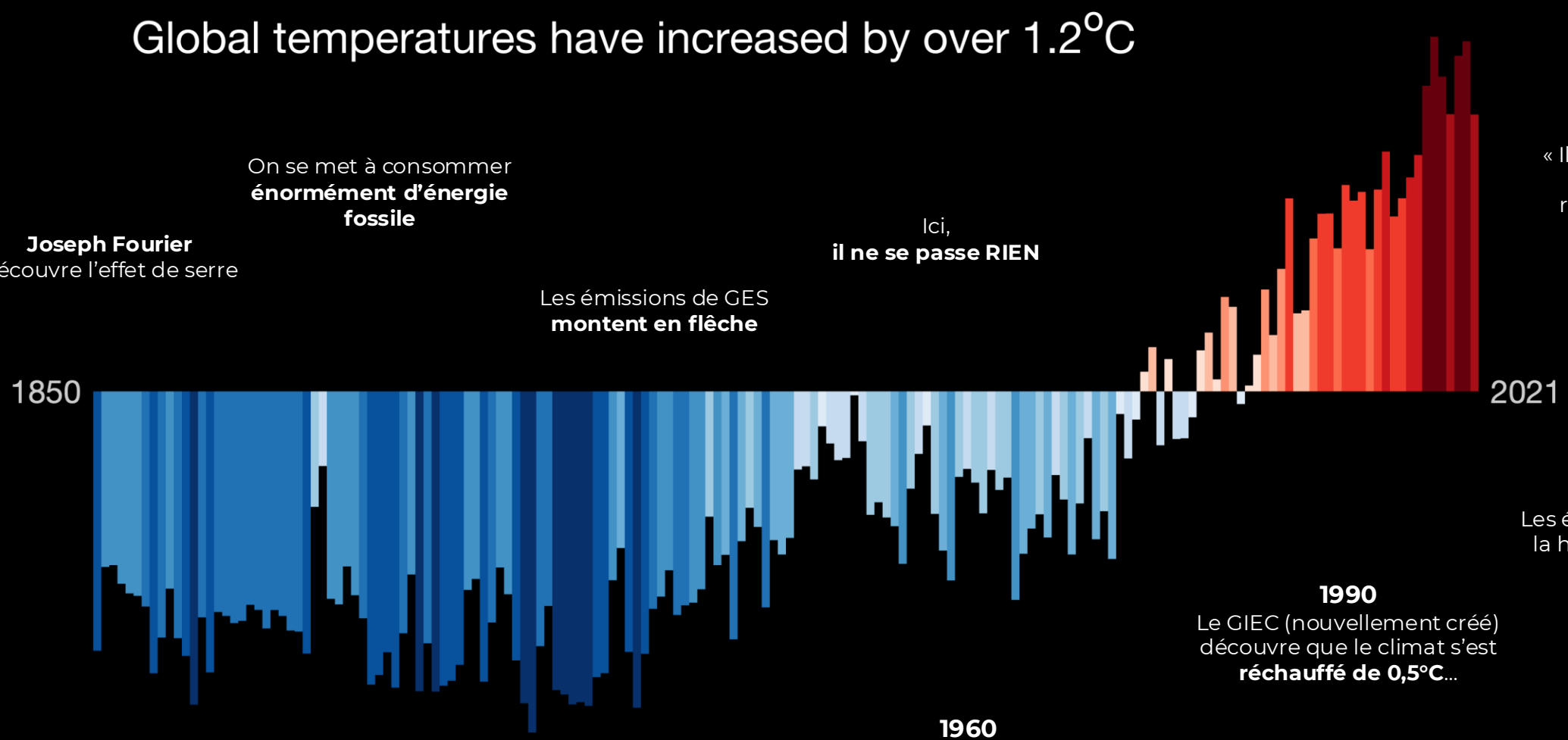
Météo fictive (pe

022

La météo de gauche est fictive

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

REMBOBINONS



Joseph Fourier
découvre l'effet de serre

On se met à consommer
énormément d'énergie fossile

Les émissions de GES
montent en flèche

Ici,
il ne se passe RIEN

1960
Les scientifiques découvrent
qu'il y a un lien entre émissions de GES et la température…

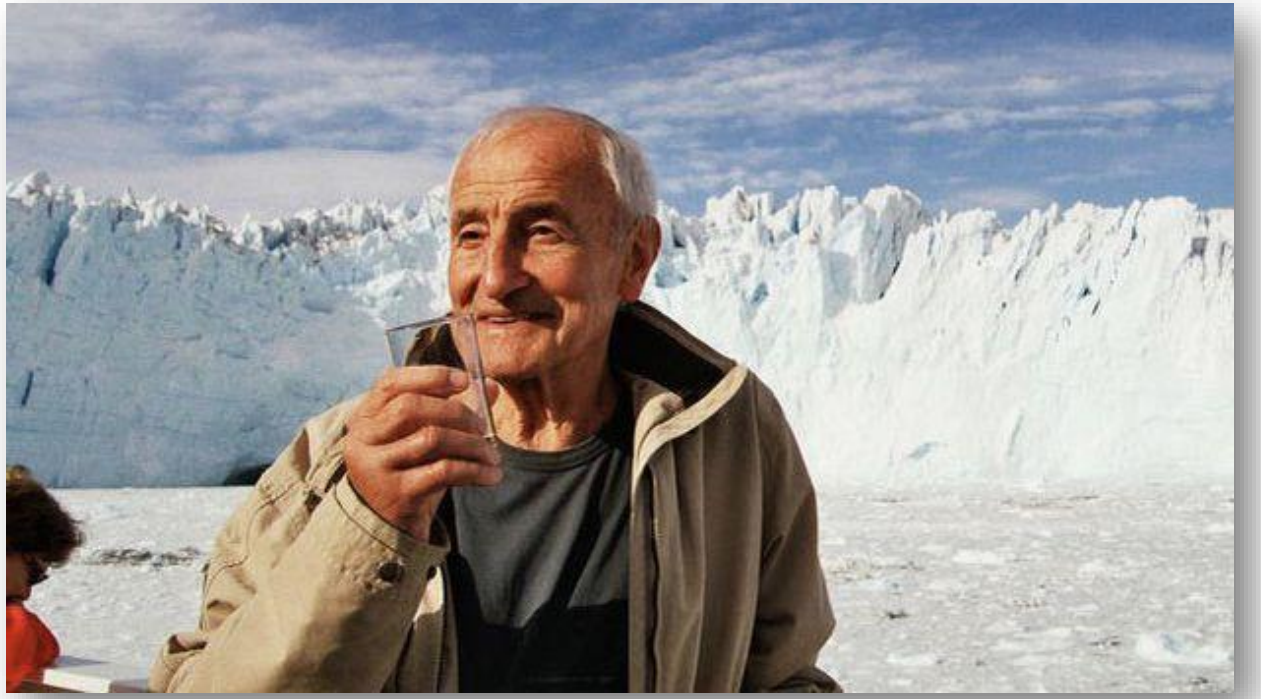
1990
Le GIEC (nouvellement créé) découvre que le climat s'est
réchauffé de 0,5°C…

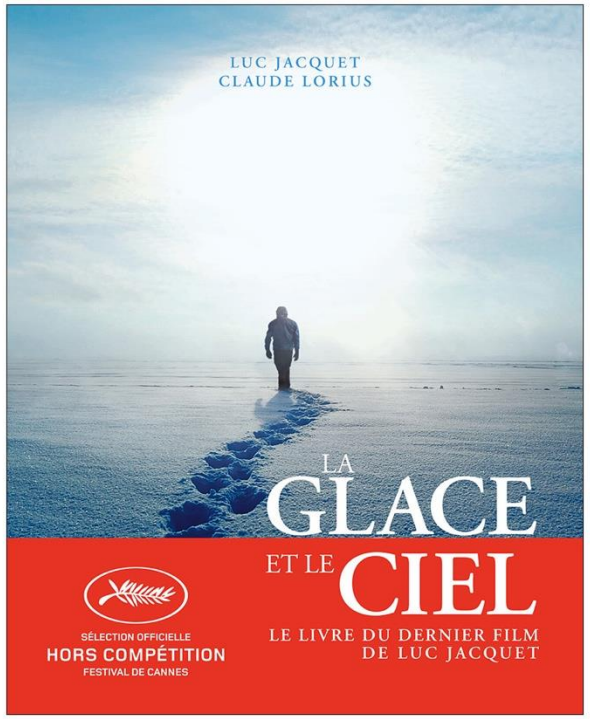
2001
Le GIEC annonce que les réchauffement est majoritairement dû… **à l'Homme !**

2015
Les états s'accordent à limiter la hausse de température à +2°C, d'ici 2100

2022
« Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres »

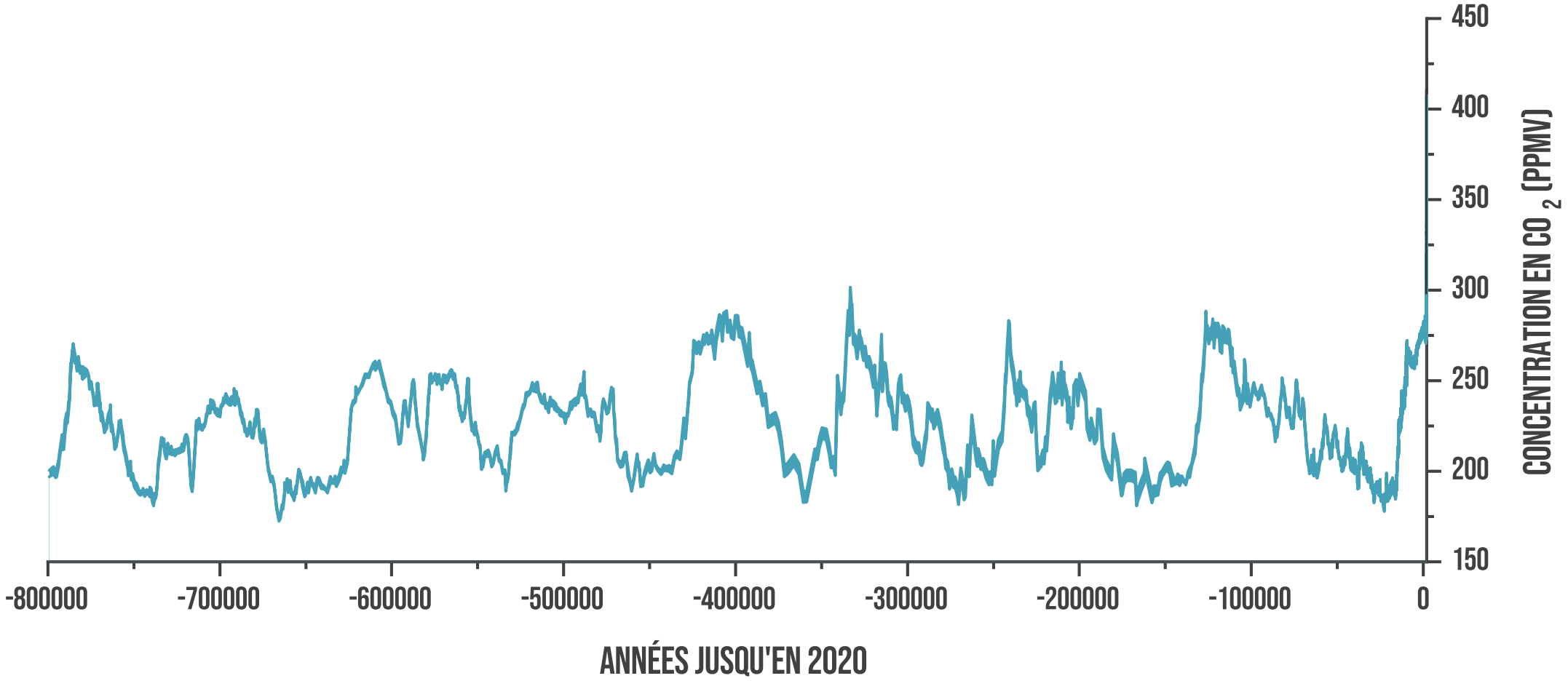
Une histoire de recherche



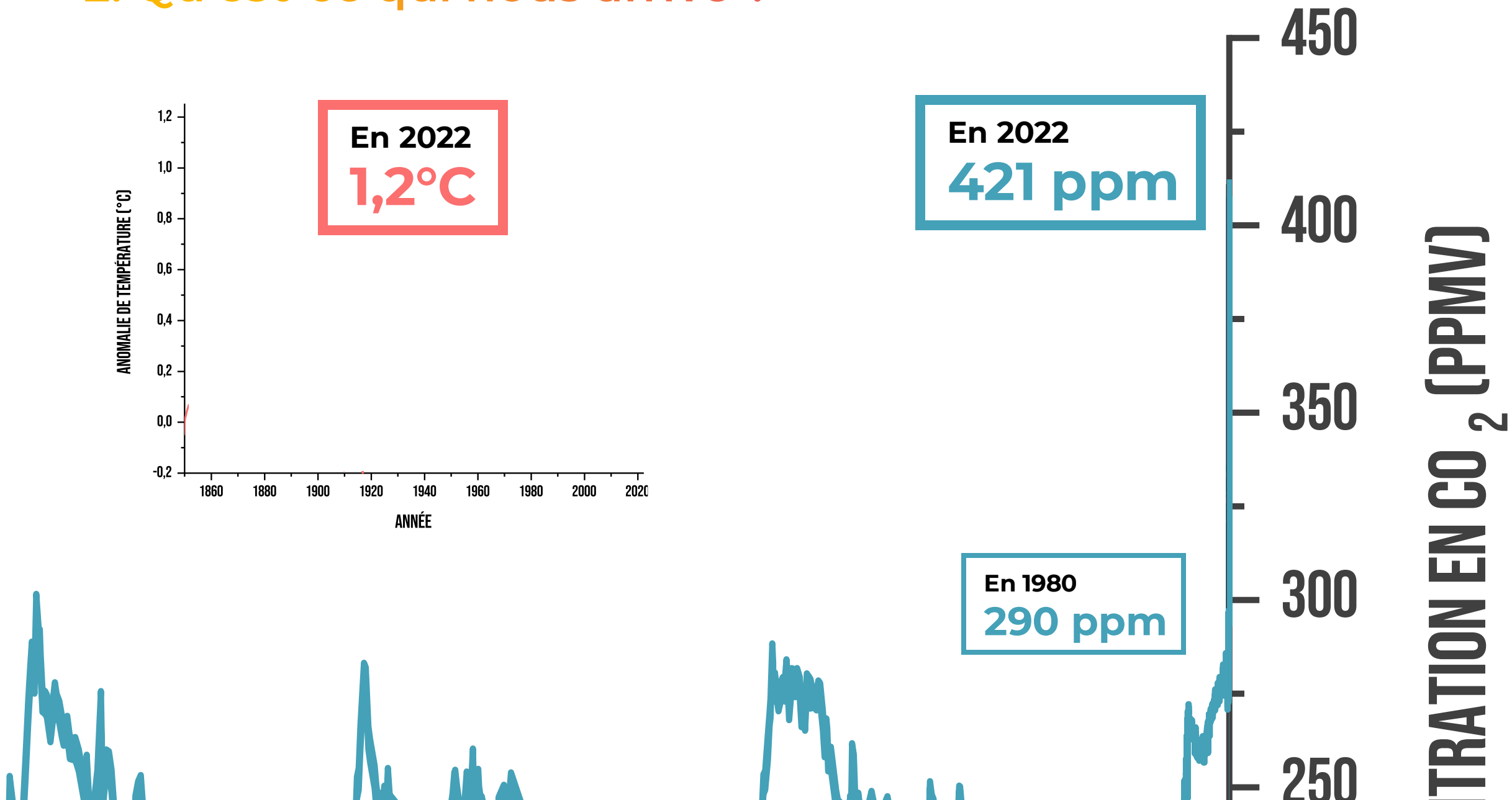


Jouzel, J., Masson-Delmotte et al. (2007) *Science*, *317*(5839), 793–796
Bereiter, et al. (2015). *Geophysical Research Letters*, *42*(2), 542–549.

Qu’est-ce qui nous arrive ?

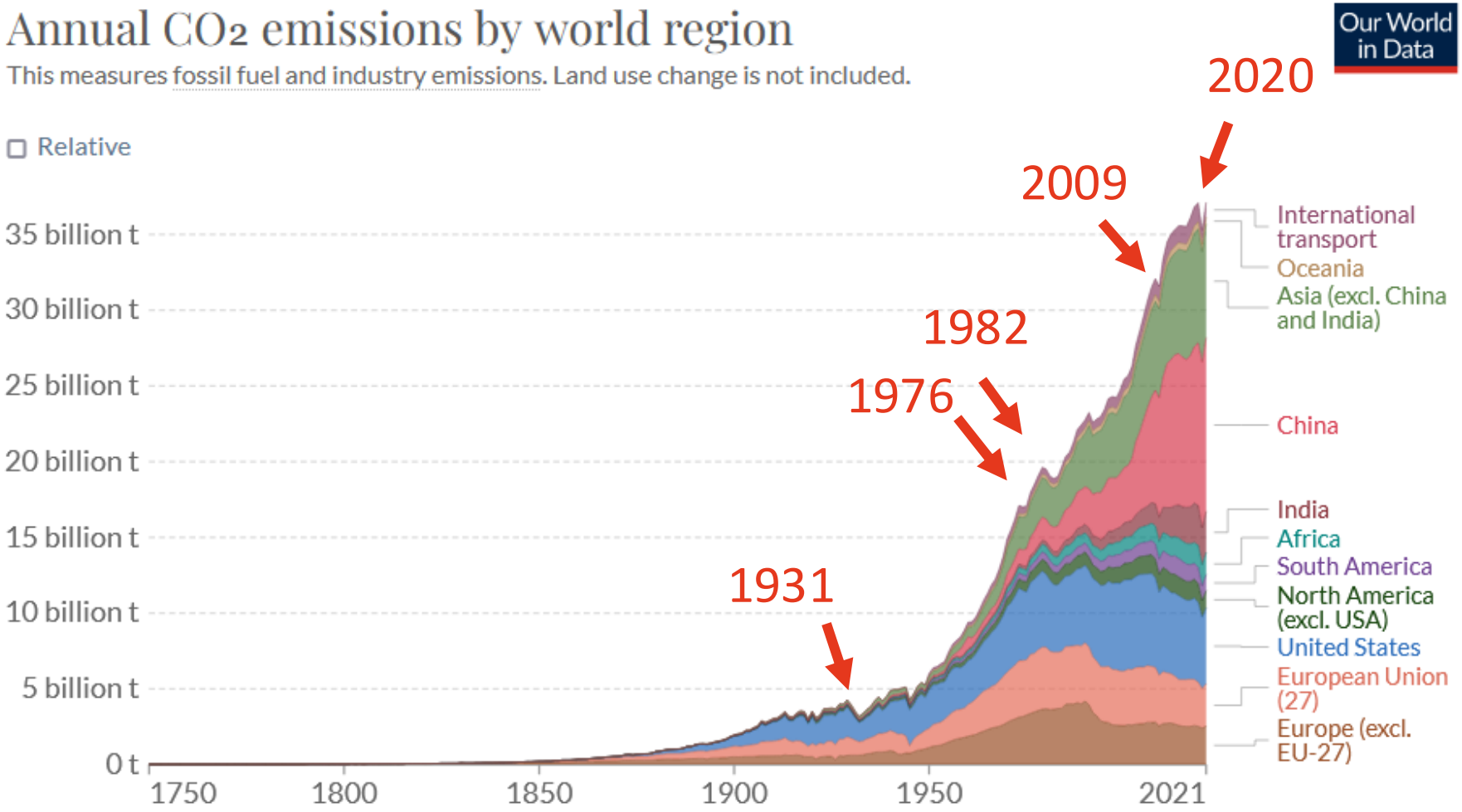


2. Qu’est-ce qui nous arrive ?



Une nouvelle époque

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



Visualisation de données – ourworldindata.org

Les gaz à effet de serre

CO_2

Dioxyde de carbone

Durée de vie : plusieurs siècles

CH_4

Méthane

Durée de vie : 10 ans

N_2O

Protoxyde d'azote

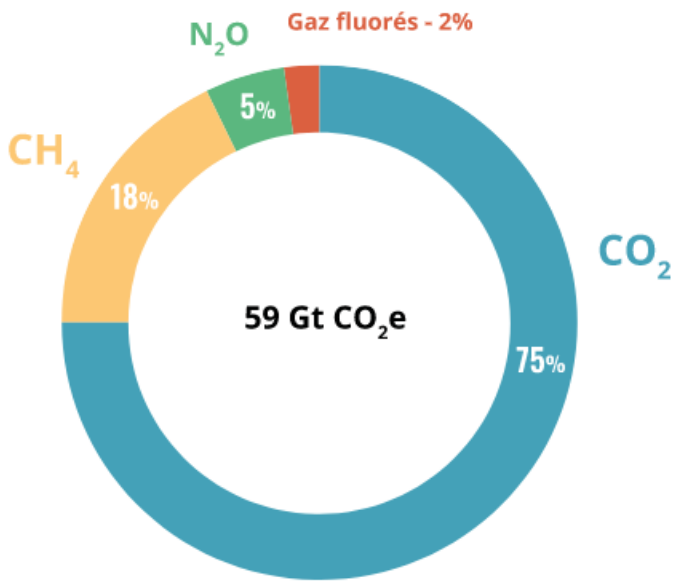
Durée de vie : 1 siècle

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 *supra*)	1	1	1
Méthane (CH_4)	11,8	81,2	27,9	7,95
Protoxyde d'azote (N_2O)	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

IPCC Report AR6 SPM.1
Jos G.J. Olivier, & Jeroen A.H.W. Peters. (2018). | *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*

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 CO_2 ?

- 500 kg
- 2 tonnes
- 5 tonnes
- 10 tonnes

(par personne et par an)

L'objectif à atteindre...

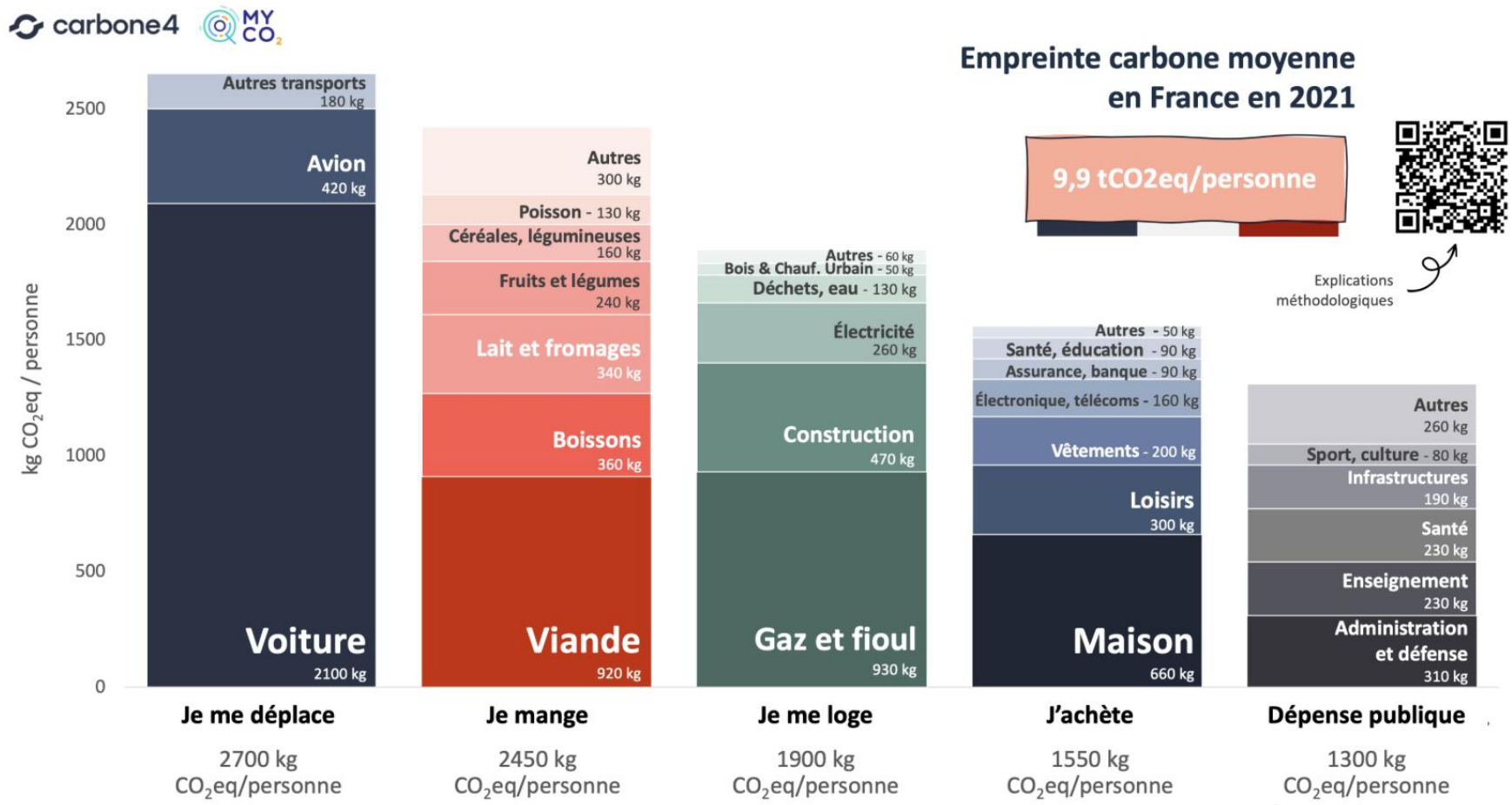
D'ici 2050

En dessous de 2°C = Combien de CO_2 ?

- 500 kg
- 2 tonnes
- 5 tonnes
- 10 tonnes

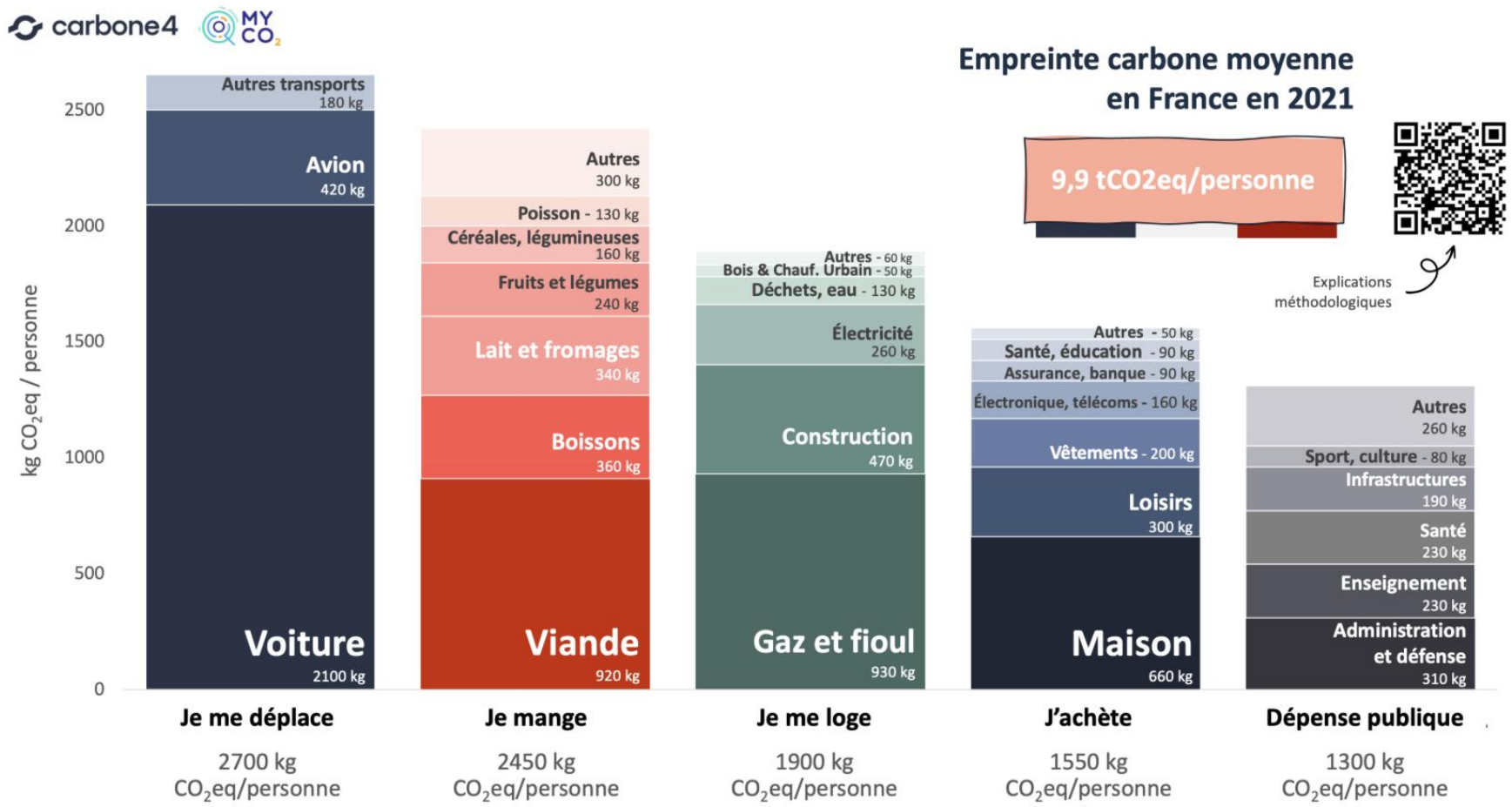
(par personne et par an)

La moyenne française



Gaz inclus : CO2 (hors UTCATF France), CH4, N2O, HFC, SF6, PFC, H_2O (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



Gaz inclus : CO2 (hors UTCATF France), CH4, N2O, HFC, SF6, PFC, H_2O (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.

Objectif 2°C

COP21 · CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE

=

2 Tonnes / pers

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

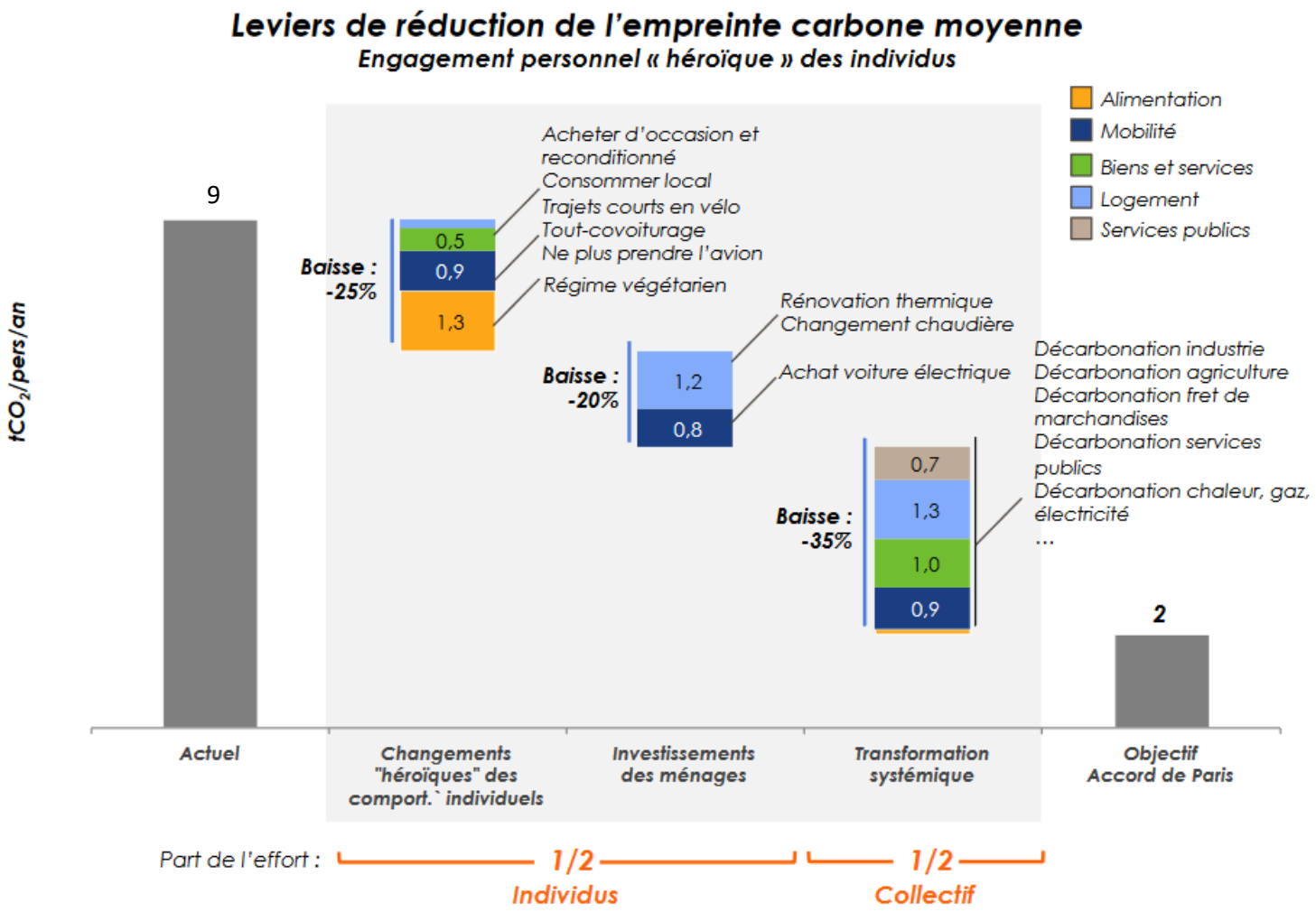
Manger
300 grammes d'agneau

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

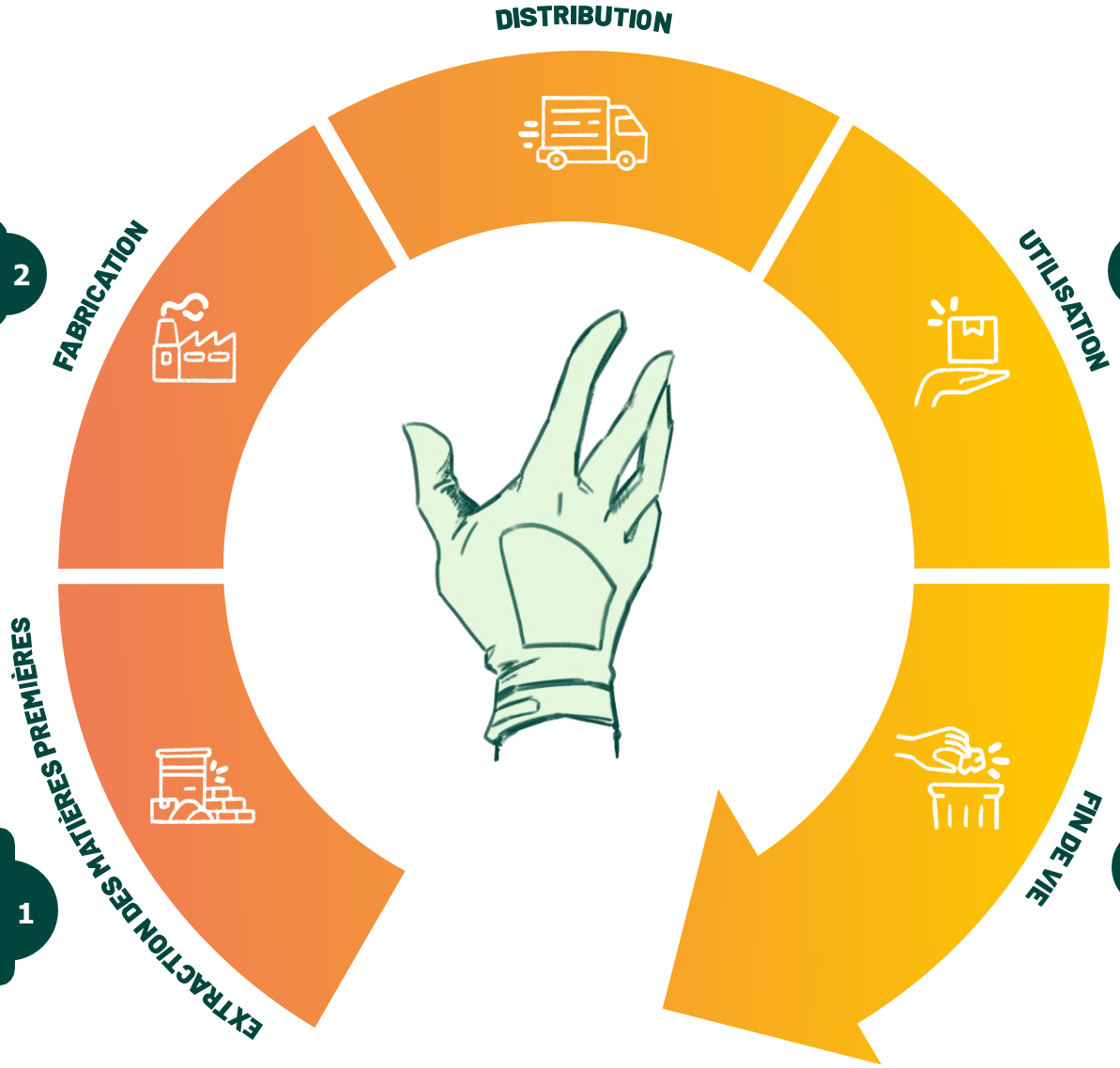
On veut savoir l'impact de ces gants pour les **réduire**

EXEMPLE DE CYCLE DE VIE

3 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.

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

4 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.



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

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

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

Projet CELSIUS

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 content[1]

Over 38% of manufacturing electricity sourced from supplier clean energy projects[2]

Smarter chemistry[3]

- 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 packaging[5]

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.

100% recycled cobalt in the battery[6]

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_2e**	**75 kg CO_2e**
Apple emissions from utility-purchased electricity (scope 2)	0 kg CO_2e	0 kg CO_2e
Life cycle product emissions (scope 3)	66 kg CO_2e	75 kg CO_2e
• Production	83%	83%
• Transportation	3%	3%
• Product use	15%	15%
• End-of-life processing	<1%	<1%
GHG reductions achieved[9]	↓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_2e	75 kg CO_2e
512GB	83 kg CO_2e	87 kg CO_2e
1TB	107 kg CO_2e	110 kg CO_2e

Les facteurs d'émission : fonctionnement

Une **donnée** liée à votre activité

Un **convertisseur**, le « facteur d'émission »

L'empreinte carbone associée

	3 555 kWh d'électricité	x	**58 gCO2e/kWh**	⇨	206 kgCO2e
Fret de marchandise	**15 tonnes** transportées sur **300 km**	x	**82 gCO2e/tonne.km**	⇨	369 kgCO2e
Acheter du matériel informatique	**10 ordinateurs**	x	**169 kgCO2e/unité**	⇨	1 690 kgCO2e
Dépenses d'assurance	**12 700€**	x	**170 kgCO2e/k€ HT**	⇨	2 159 kgCO2e

Calculer un impact carbone

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

900W

x 2h = 1,8 kWh **x**

ADEME — BASE Empreinte®

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 ?

x 12 mois = 192 € **x**

ADEME — BASE Empreinte®

€ Service/Télécommunications

France continentale

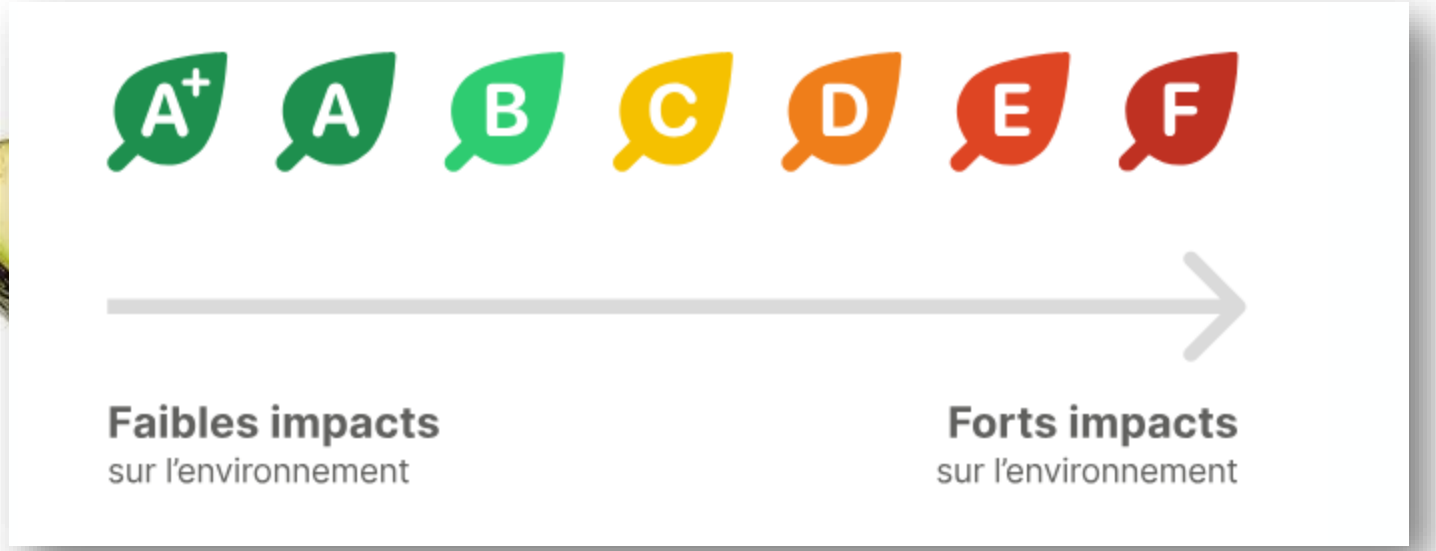
170
kg éq. CO2/keuro

Incertitude 80 %

= 32 kg CO2e

Projet CELSIUS

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

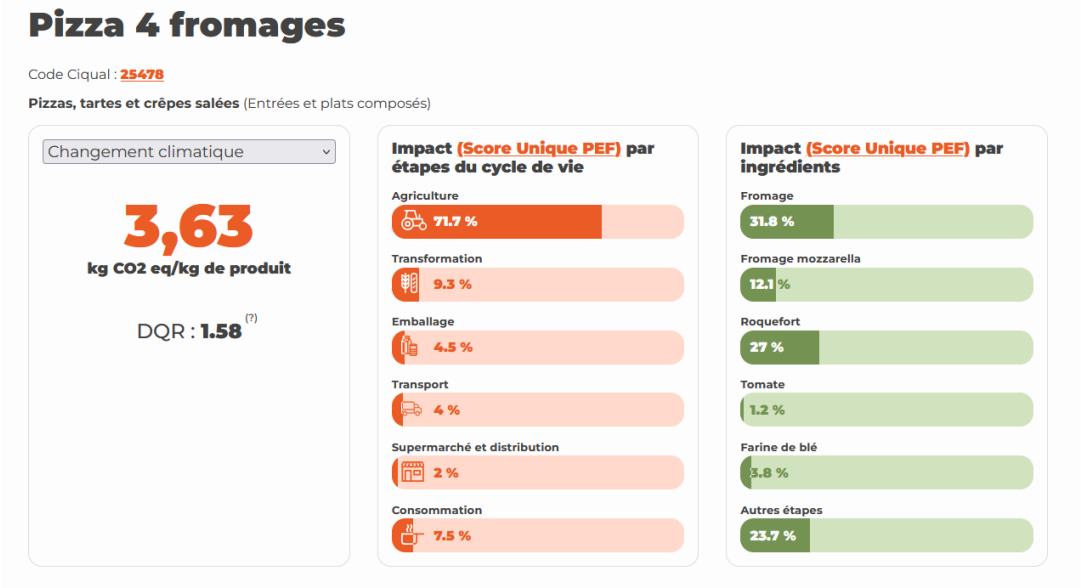
Projet CELSIUS

Une base d'ACV : Agribalyse

Les orders de grandeurs, c'est important

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

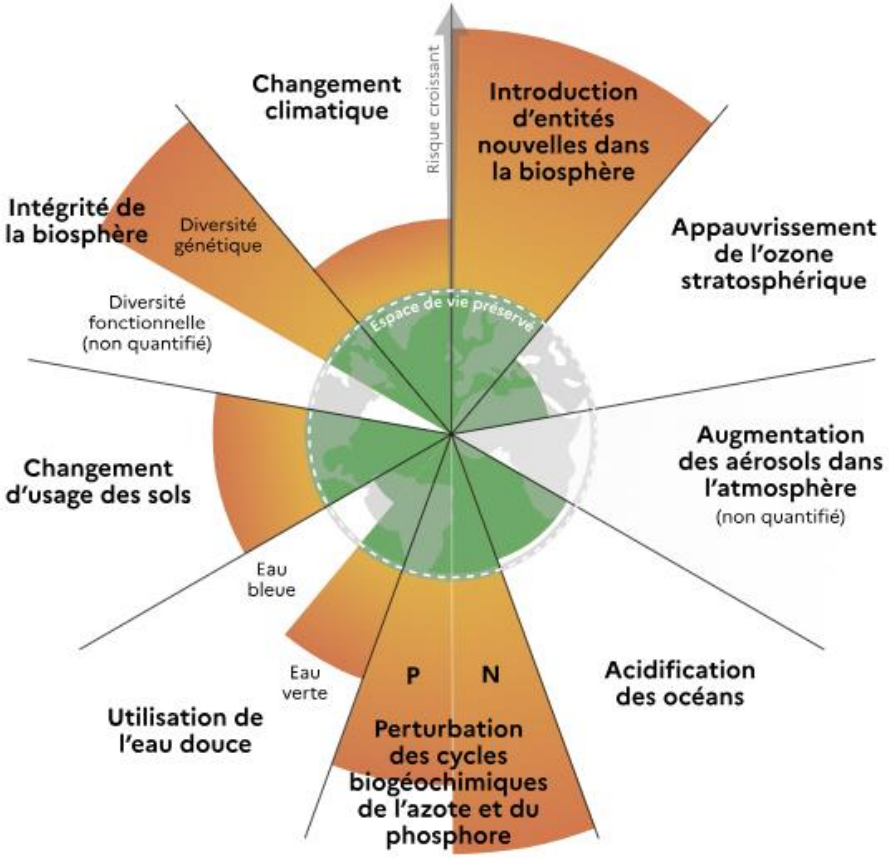
AGRIBALYSE



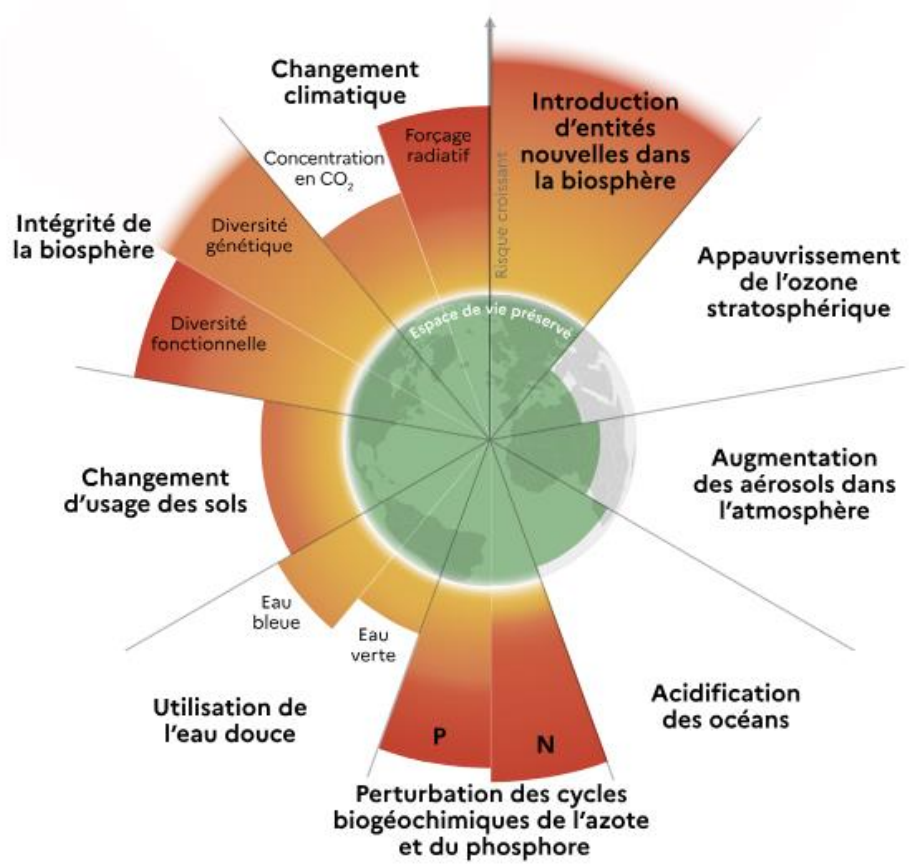
Indicateur	Mesure	Unité
Score unique EF	4,78e-1	mPt/kg de produit
Changement climatique	3,63	kg CO2 eq/kg de produit
Appauvrissement de la couche d'ozone	5,75e-8	kg CVC11 eq/kg de produit
Rayonnements ionisants	1,39	kBq U-235 eq/kg de produit
Formation photochimique d'ozone	7,58e-3	kg NMVOC eq/kg de 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 terreste	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

https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/14-revision-2023-du-cadre-des

- Global warming
- Acidification
- Terrestrial eutrophication
- Ozone depletion
- Freshwater eutrophication
- Marine eutrophication
- Freshwater toxicity
- Human toxicity non-cancer effects
- Human toxicity cancer effects
- Particulate matter
- Ionising radiation
- Photochemical ozone formation
- Mineral resource depletion
- Non-renewable energy resource depletion
- Land use
- Water scarcity footprint

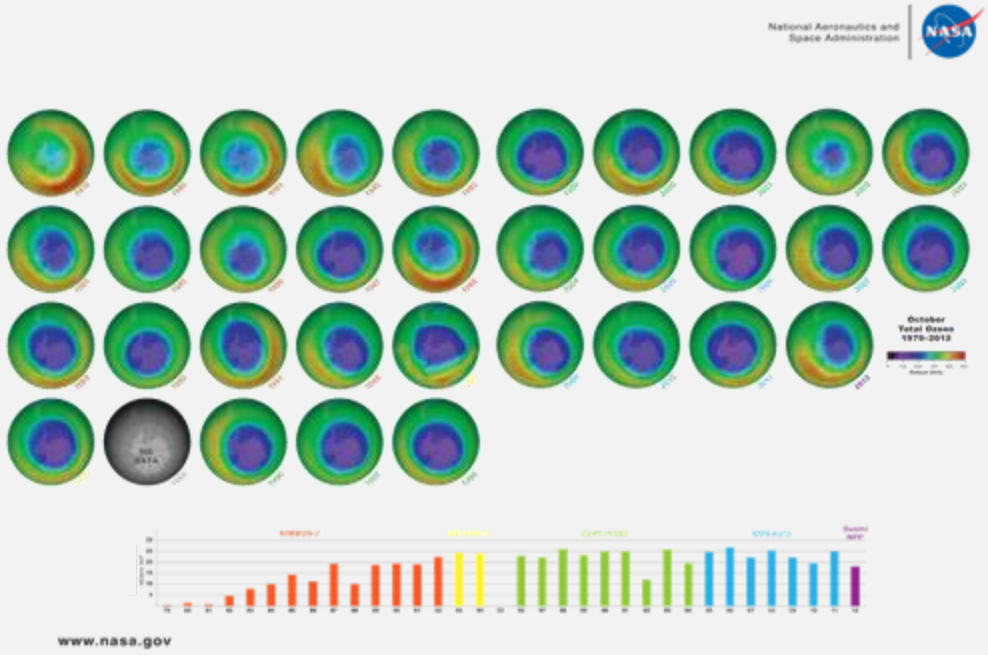
CAUSE

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

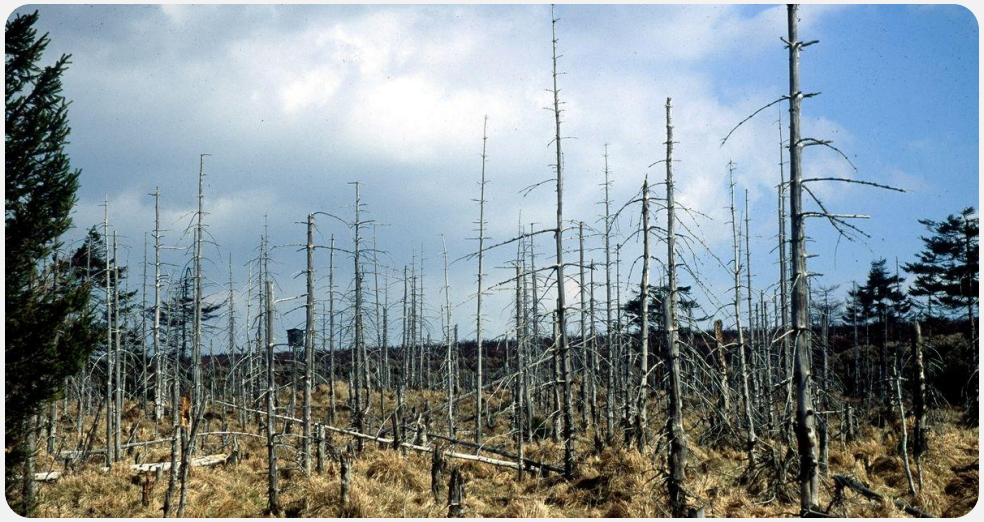
CONSEQUENCE



- 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

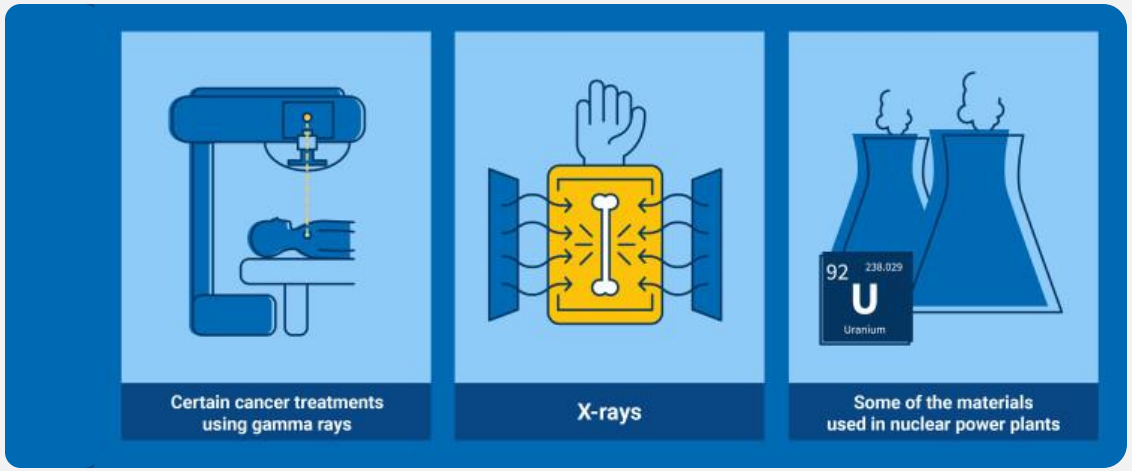
CAUSE

CONSEQUENCE

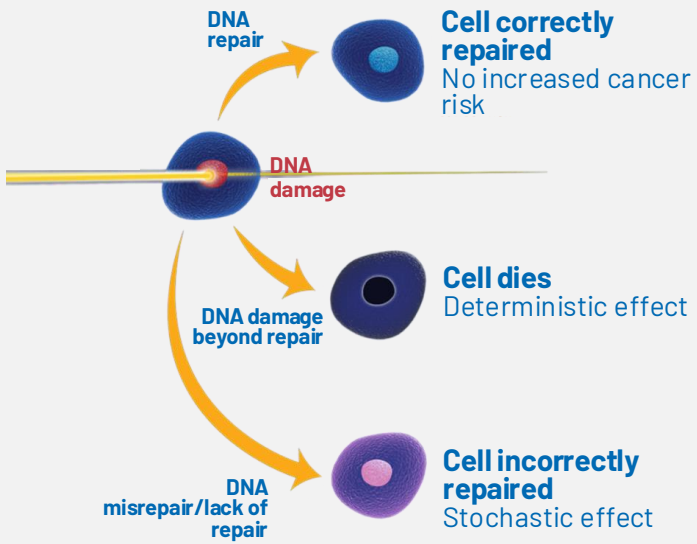


- Global warming
- Acidification
- Terrestrial eutrophication
- Ozone depletion
- Freshwater eutrophication
- Marine eutrophication
- Freshwater toxicity
- Human toxicity non-cancer effects
- Human toxicity cancer effects
- Particulate matter
- Ionising radiation
- Photochemical ozone formation
- Mineral resource depletion
- Non-renewable energy resource depletion
- Land use
- Water scarcity footprint

CAUSE



CONSEQUENCE



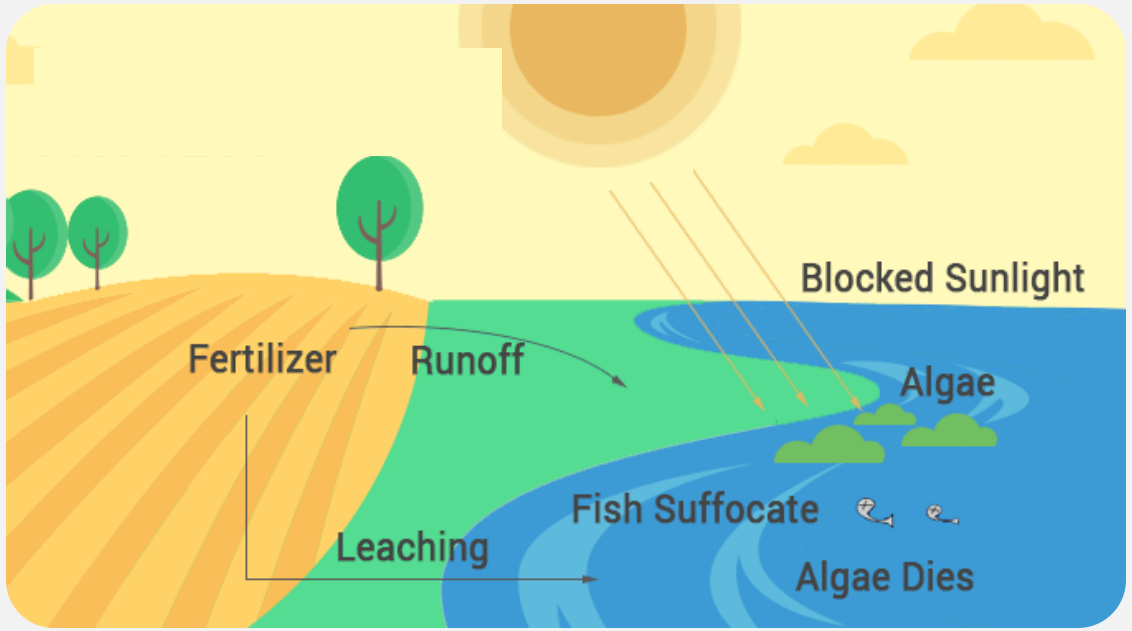
- Global warming
- Acidification
- Terrestrial eutrophication
- Ozone depletion
- Freshwater eutrophication
- Marine eutrophication
- Freshwater toxicity
- Human toxicity non-cancer effects
- Human toxicity cancer effects
- Particulate matter
- Ionising radiation
- Photochemical ozone formation
- Mineral resource depletion
- Non-renewable energy resource depletion
- Land use
- 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

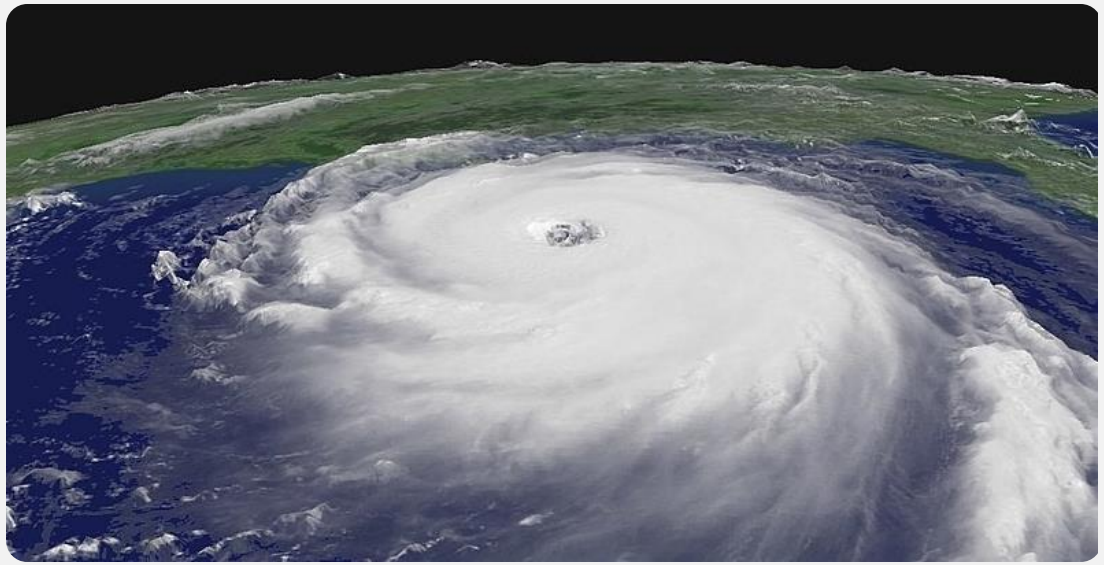


CONSEQUENCE

- Global warming
- Acidification
- Terrestrial eutrophication
- Ozone depletion
- Freshwater eutrophication
- Marine eutrophication
- Freshwater toxicity
- Human toxicity non-cancer effects
- Human toxicity cancer effects
- Particulate matter
- Ionising radiation
- Photochemical ozone formation
- Mineral resource depletion
- Non-renewable energy resource depletion
- Land use
- Water scarity footprint

CAUSE

CONSEQUENCE



Projet CELSIUS

PEF score

ECOSYSTEMS

- Acidification
- Terrestrial eutrophication
- Freshwater eutrophication
- Marine eutrophication
- Freshwater toxicity

+

HUMAN HEALTH

- Ozone depletion
- Human toxicity non-cancer effects
- Human toxicity cancer effects
- Particulate matter
- Ionising radiation
- Photochemical ozone formation

+

CLIMATE CHANGE

- Global warming

NATURAL RESOURCES

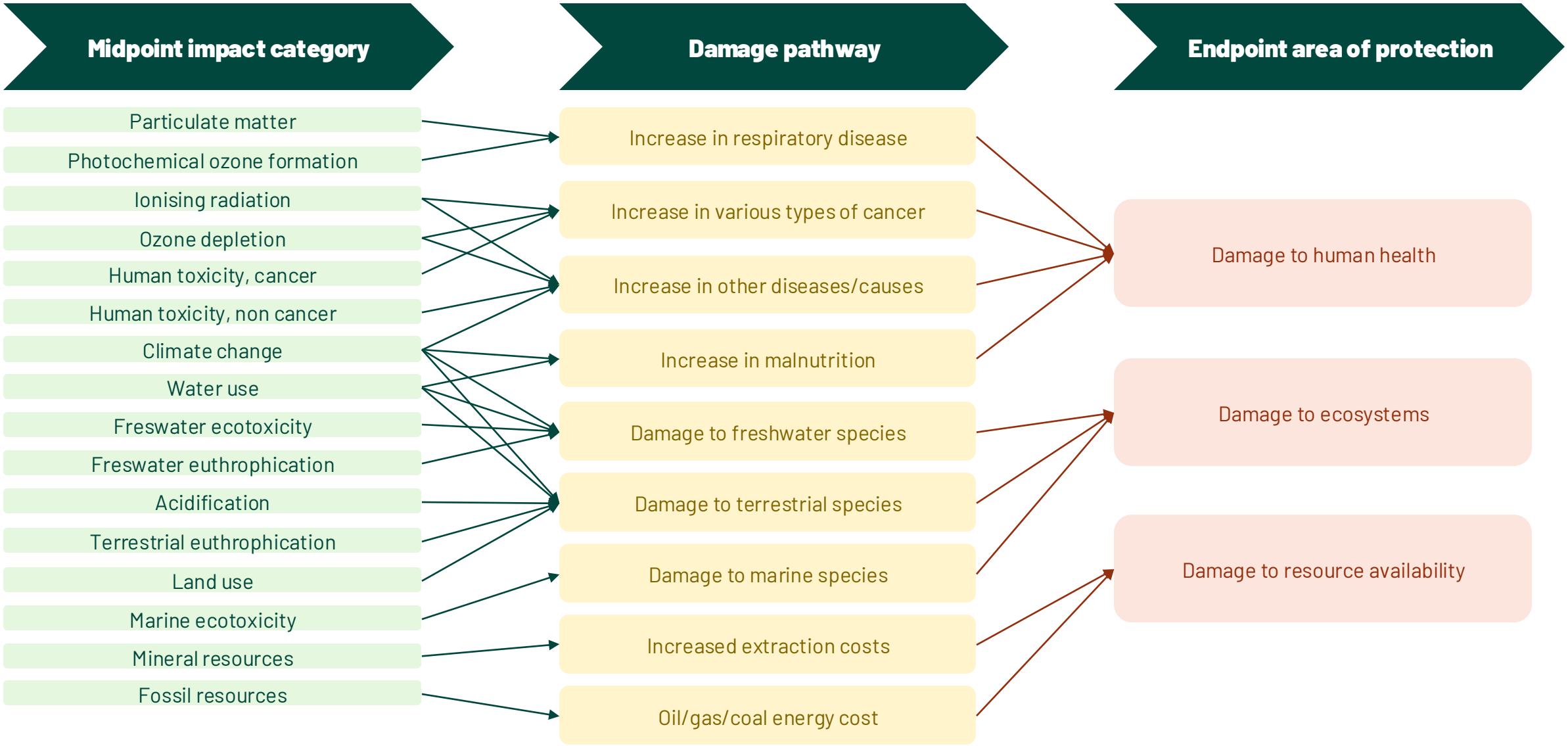
- Mineral resource depletion
- Non-renewable energy resource depletion
- Land use

WATER

- Water scarity footprint

Projet CELSIUS

PEF score



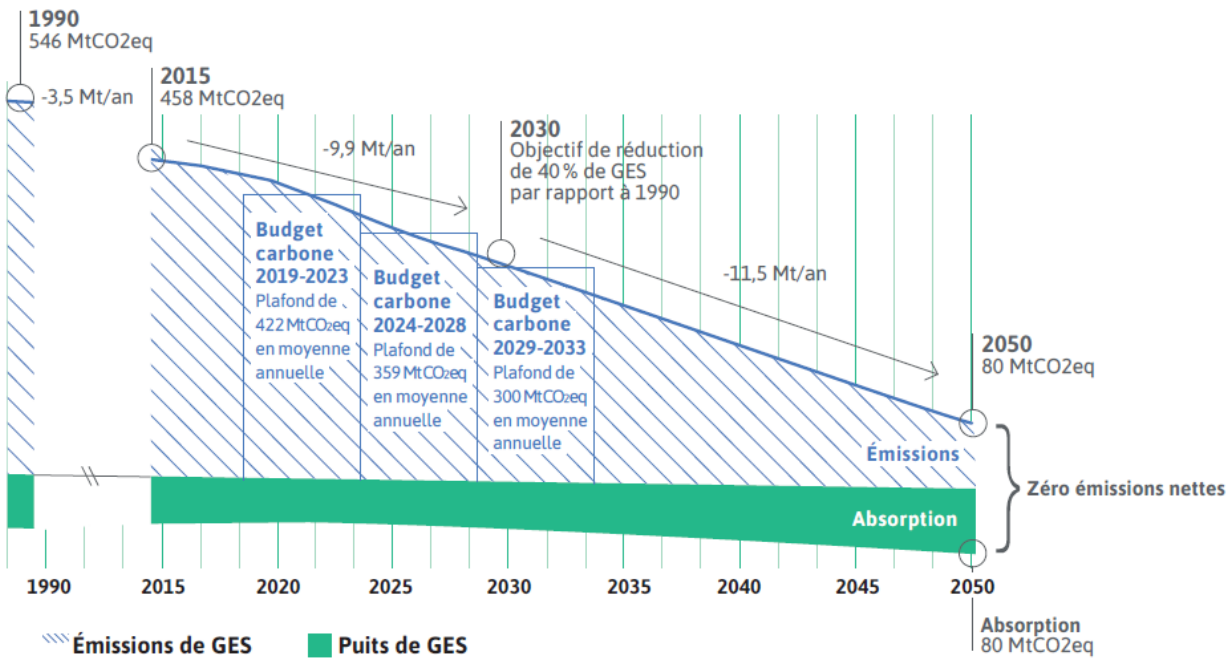
03

Dans la chimie ?

Un sujet important

En France : la Stratégie Nationale Bas Carbone

Évolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en $MtCO_2eq$). Inventaire CITEPA 2018 et scénario SNBC révisée (neutralité carbone)

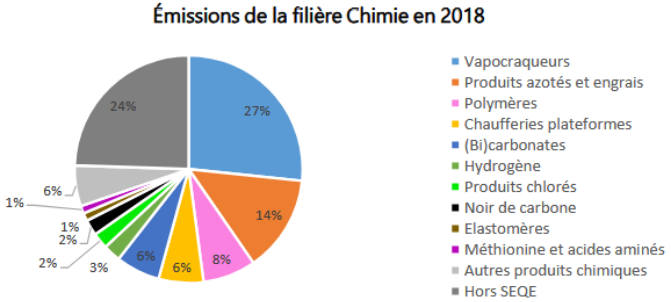


Projet CELSIUS

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 (SEQE) est donnée dans le diagramme ci-dessous. La part des émissions non couvertes par le SEQE (24 %) est également représentée.



Source : EUTL[2].

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 chaleur[5] 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 $MtCO_{2,eq}$)
Efficacité énergétique	-1,8
Chaleur biomasse	-1,4
Chaleur CSR	-0,8
N_2O	-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.

ecoinvent

Projet CELSIUS

Dans la chimie ?

ARKEMA

Groupe | Marchés | Familles de produits | Product finder | Développement durable | Chercher

Accueil > Média > Actualités > Arkema accélère le calcul de l'Empreinte Carbone de l'ensemble de son portefeuille produits

PARTAGER

Corporate | Produits | Climat

28 NOV. 2023 - ACTUALITÉ

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

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.

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)

Projet CELSIUS

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
ParisTech | PSL

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Observatoire de Paris

cnes

SAINT-GOBAIN

Projet CELSIUS

Aussi chez les étudiantes et étudiants

Projet CELSIUS

MASTERCLASS

Mesurer l'empreint environnementale

Un outil indispensable de l'ingénieur de demain