

# 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



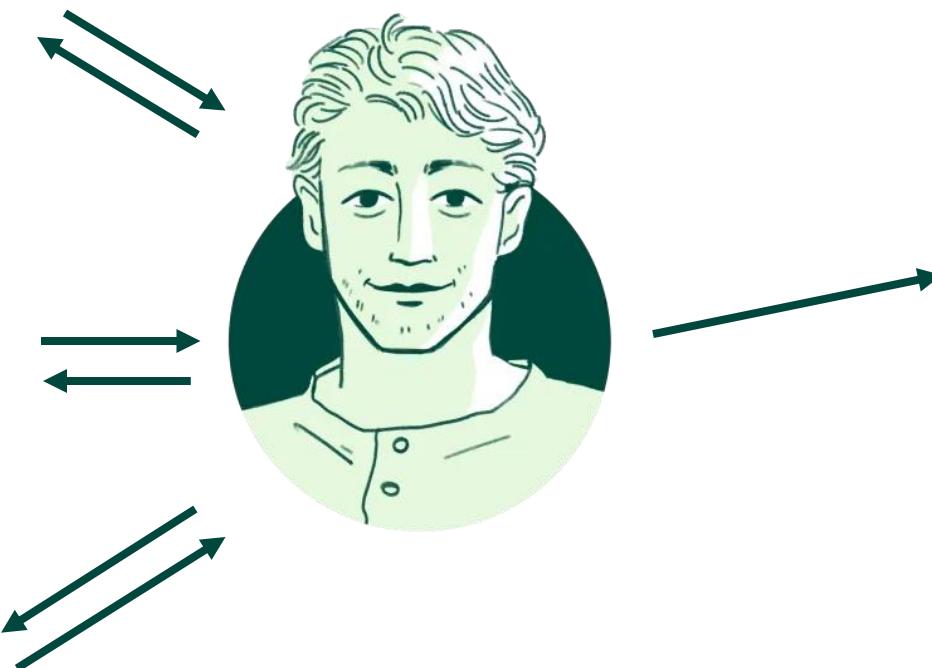
2012-2014



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



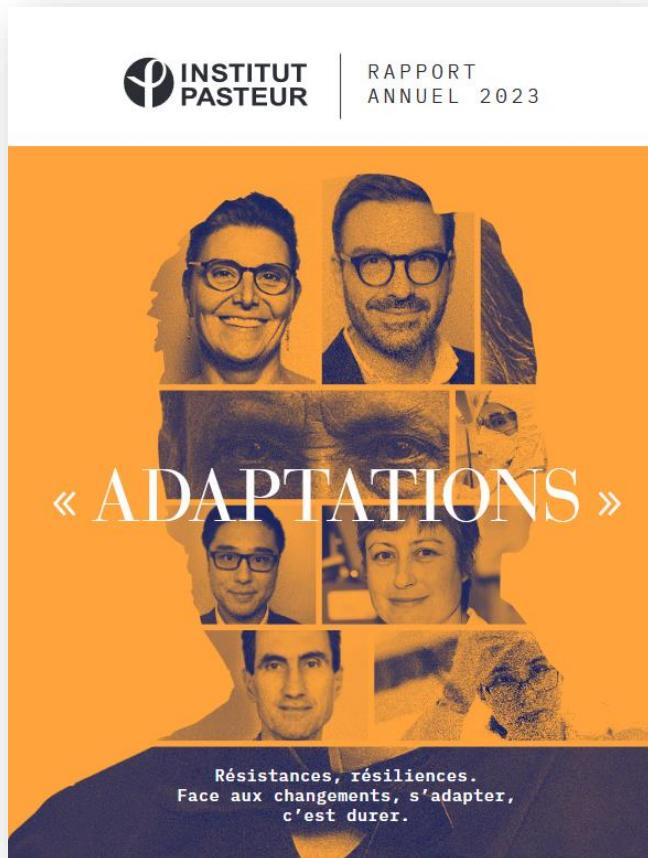
# Trois exemples

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 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

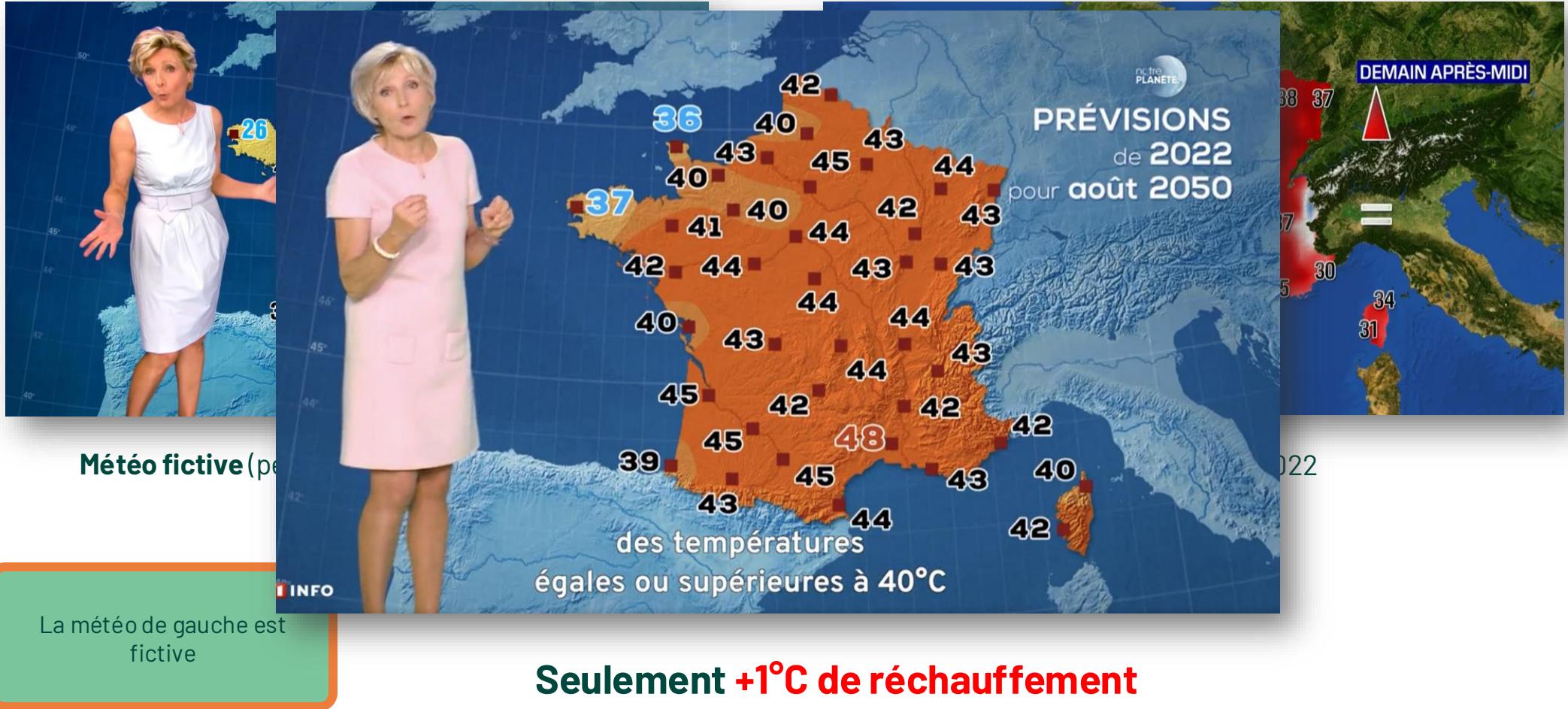


Les météos ont été filmées à 10 ans d'écart

La météo de droite est erronée

# Une histoire de température

Le jeu des 7 différences



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

# REMBOBINONS

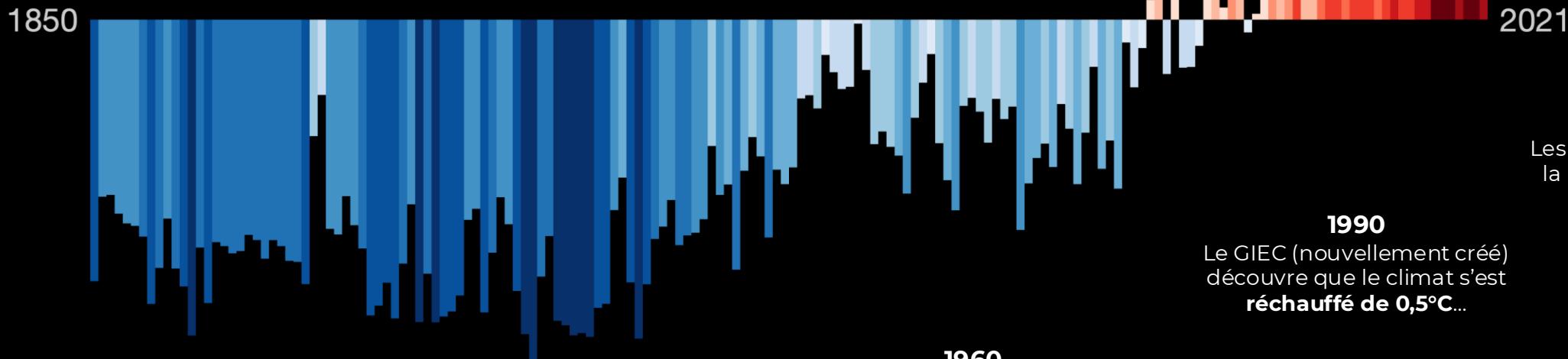
Global temperatures have increased by over 1.2°C

**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...**

**2001**

Le GIEC annonce que les  
réchauffement est majoritairement  
dû... à l'Homme !

**2022**

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

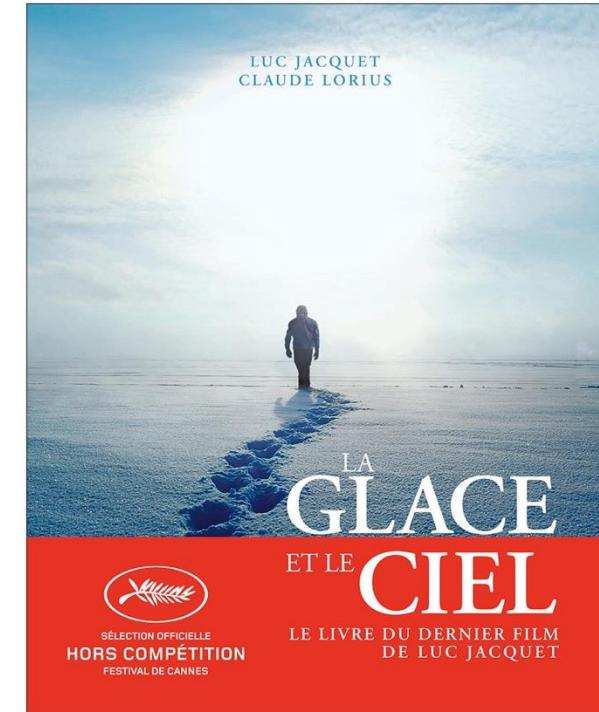
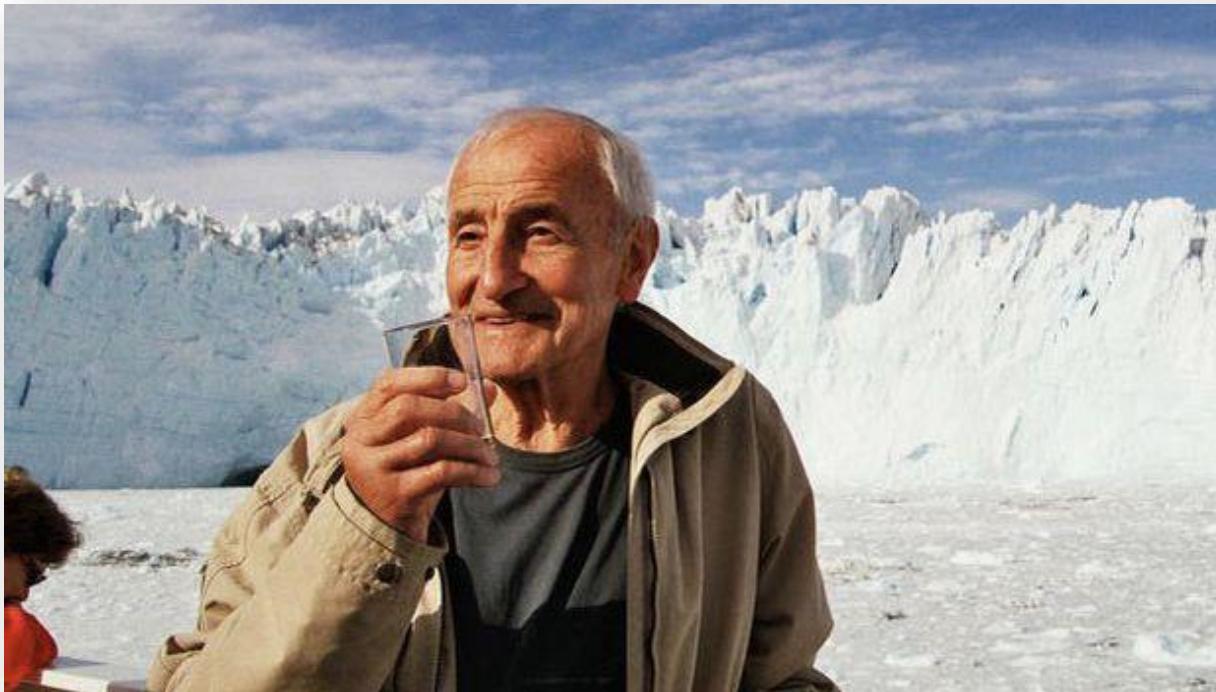
**1990**

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

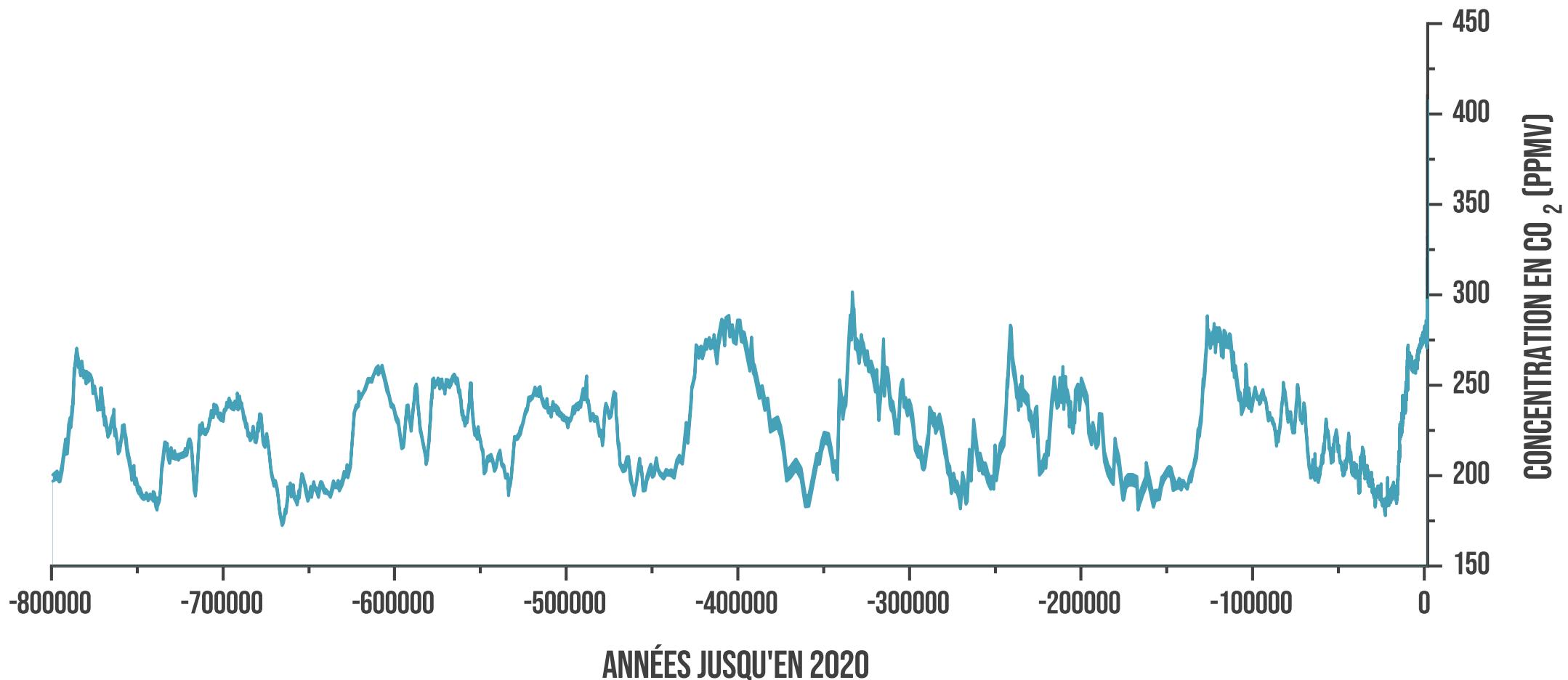
**2015**

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

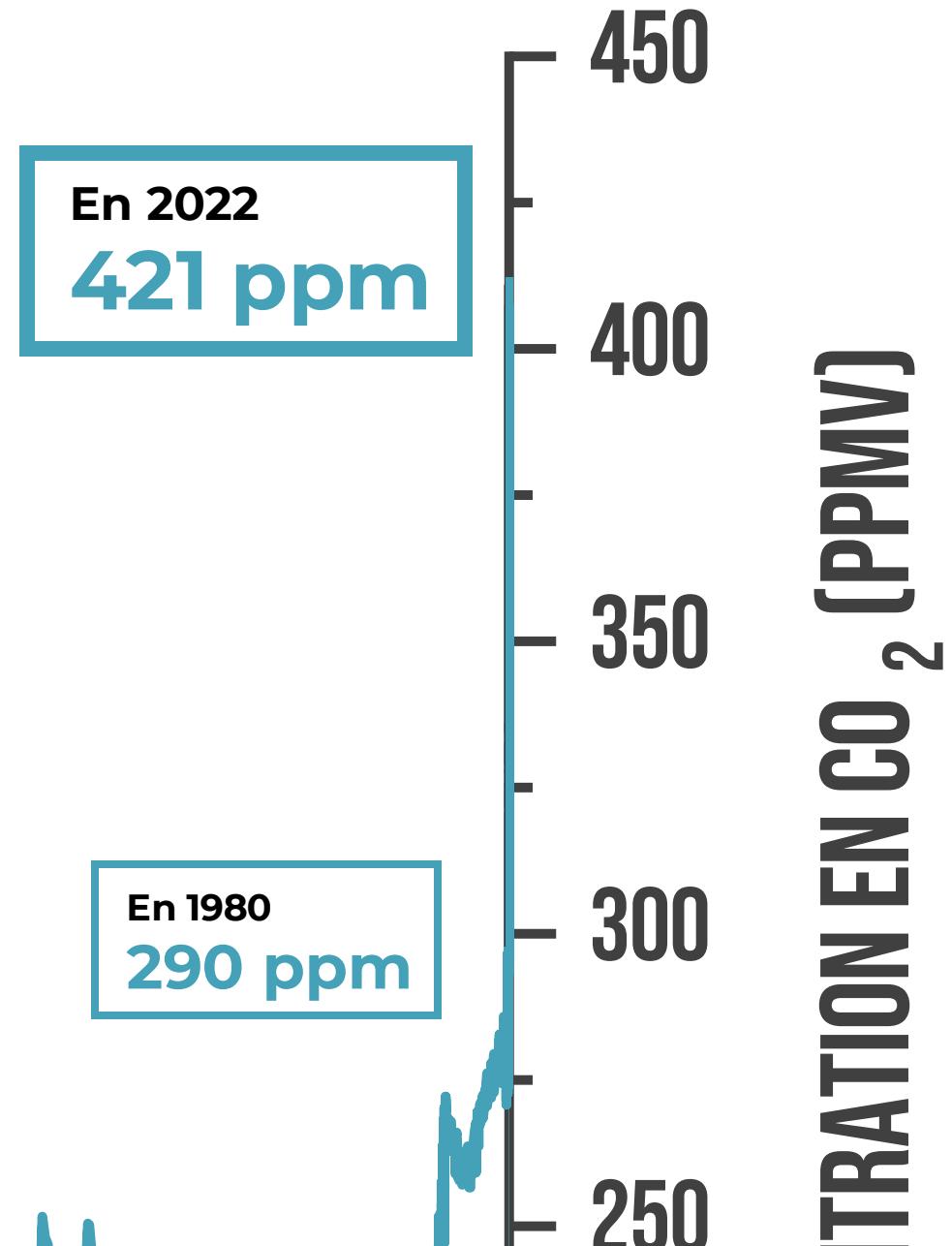
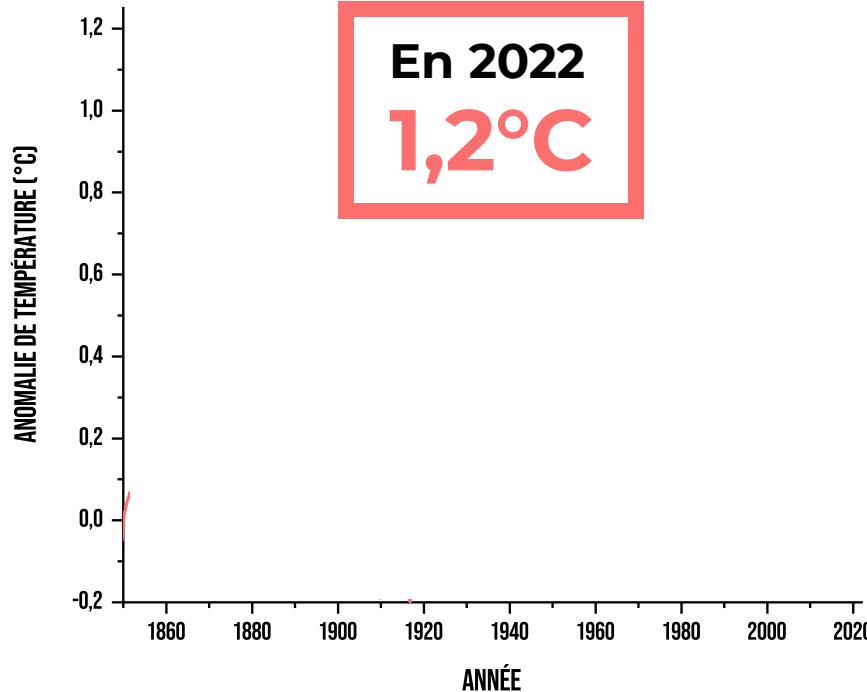
## Une histoire de recherche



# Qu'est-ce qui nous arrive ?

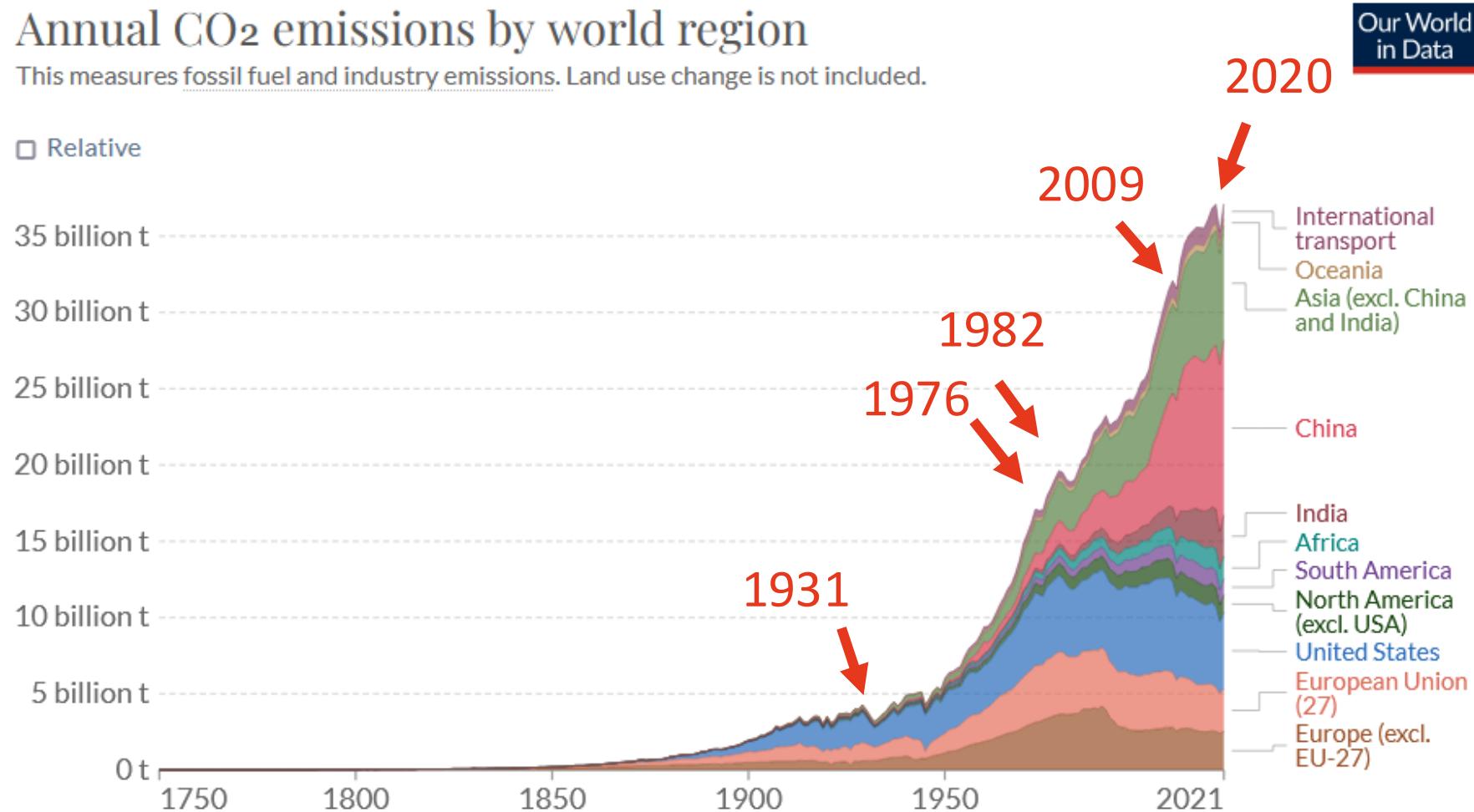


## 2. Qu'est-ce qui nous arrive ?

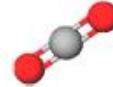


# Une nouvelle époque

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



# 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

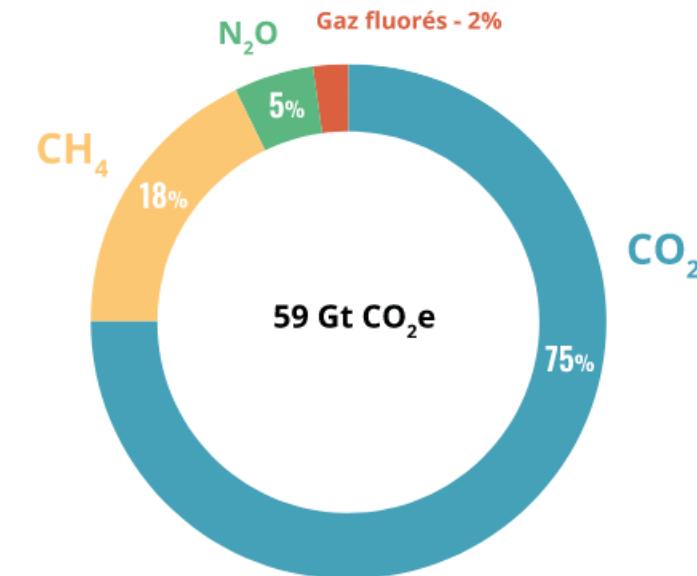
# Les gaz à effet de serre

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



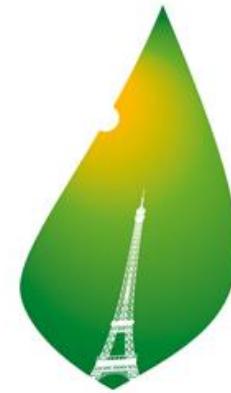
Rapport GIEC AR6 2022

# 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 CO<sub>2</sub> ?**

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<sub>2</sub> ?**

500 kg

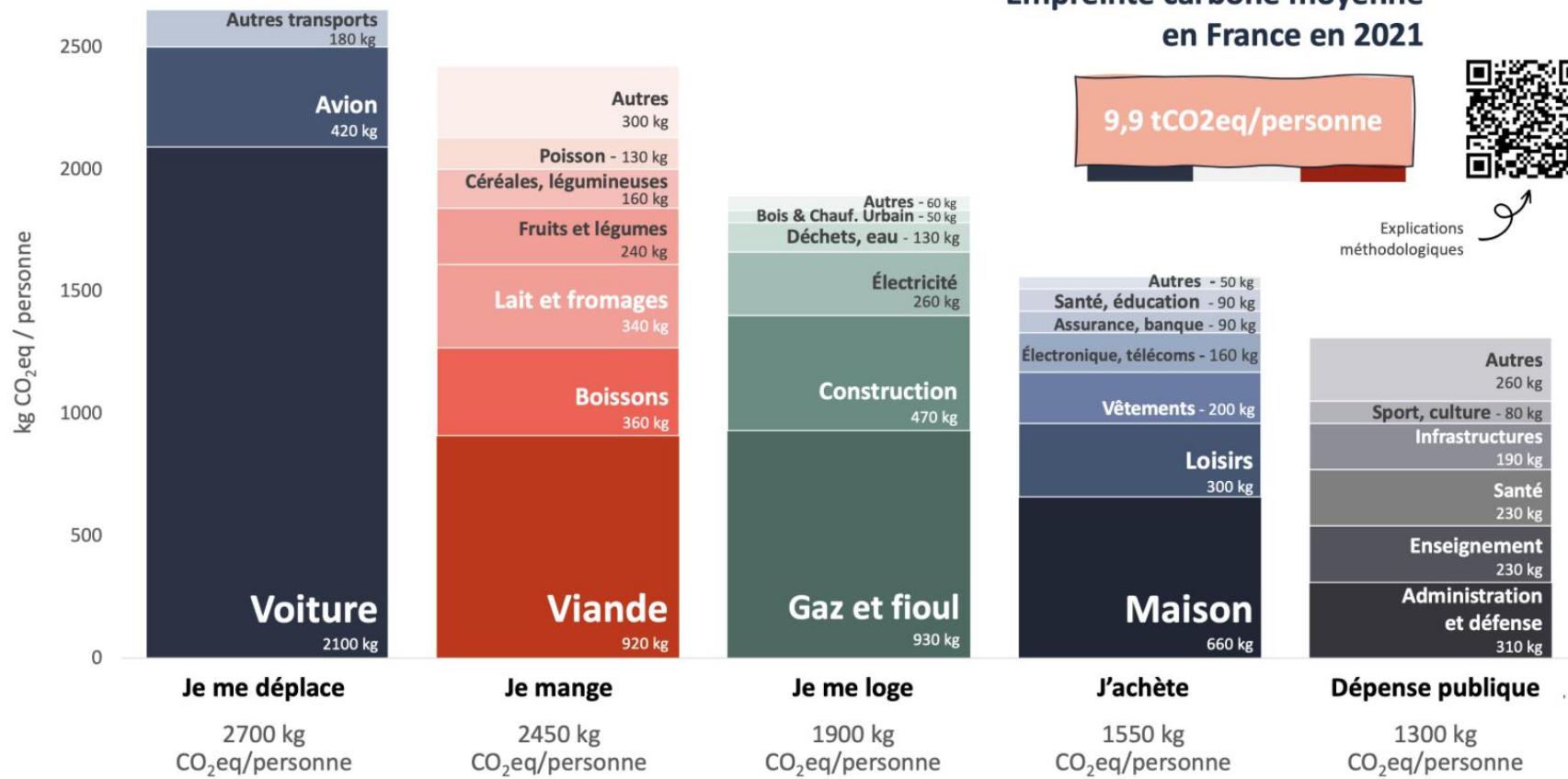
2 tonnes

5 tonnes

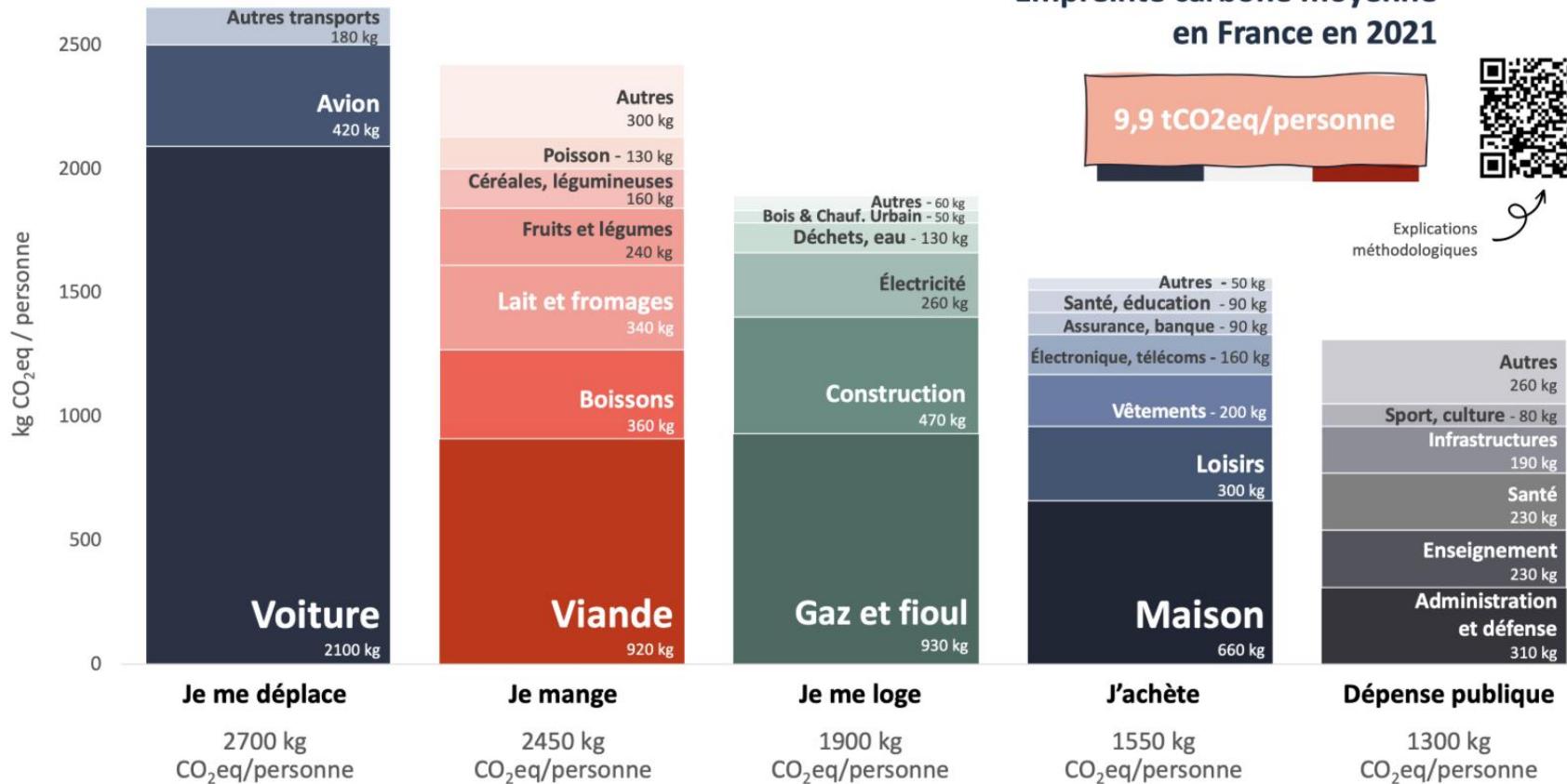
10 tonnes

(par personne et par an)

# La moyenne française



# La moyenne française



Gaz inclus : CO<sub>2</sub> (hors UTCATF France), CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, SF<sub>6</sub>, PFC, H<sub>2</sub>O (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**



=  
**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**

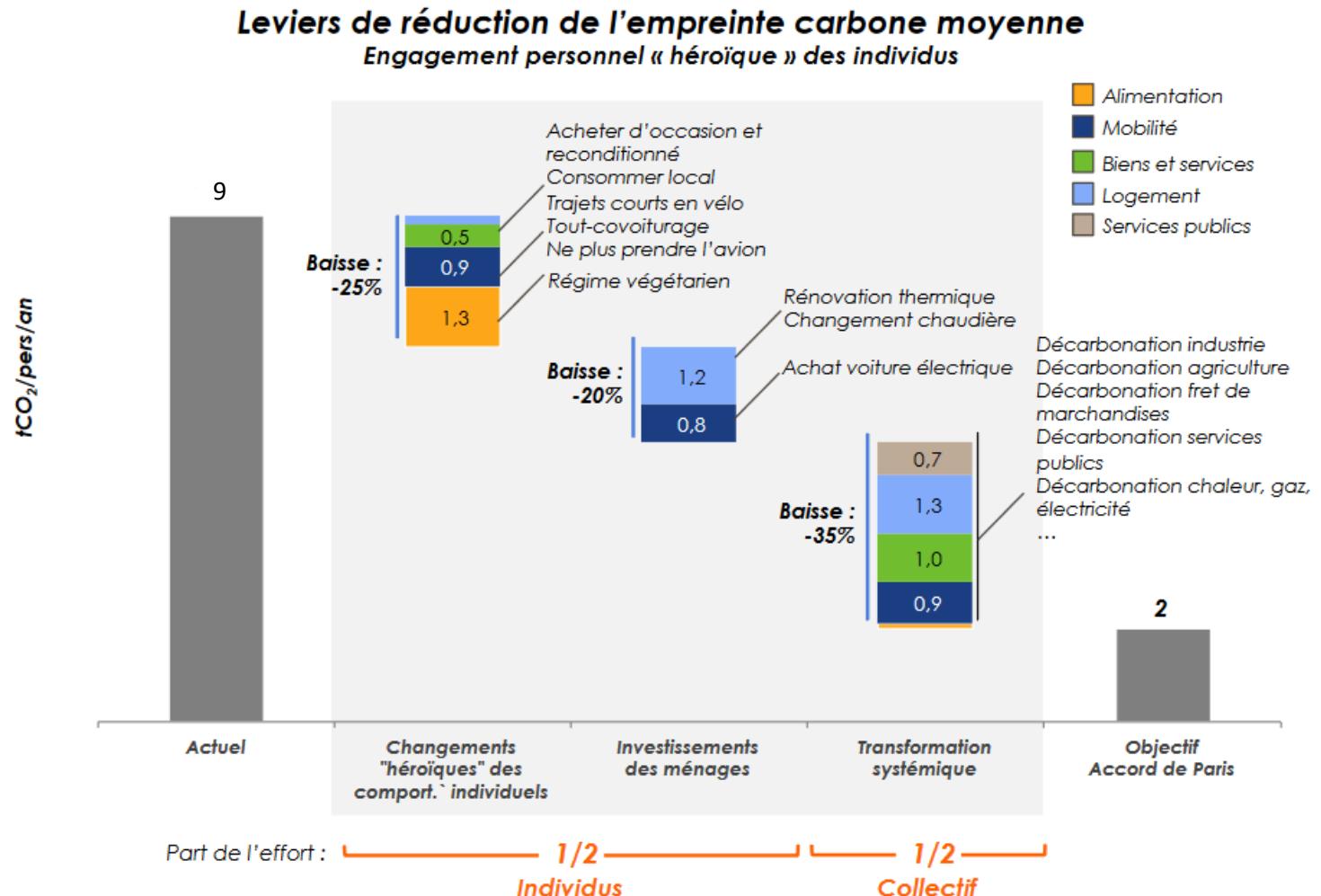


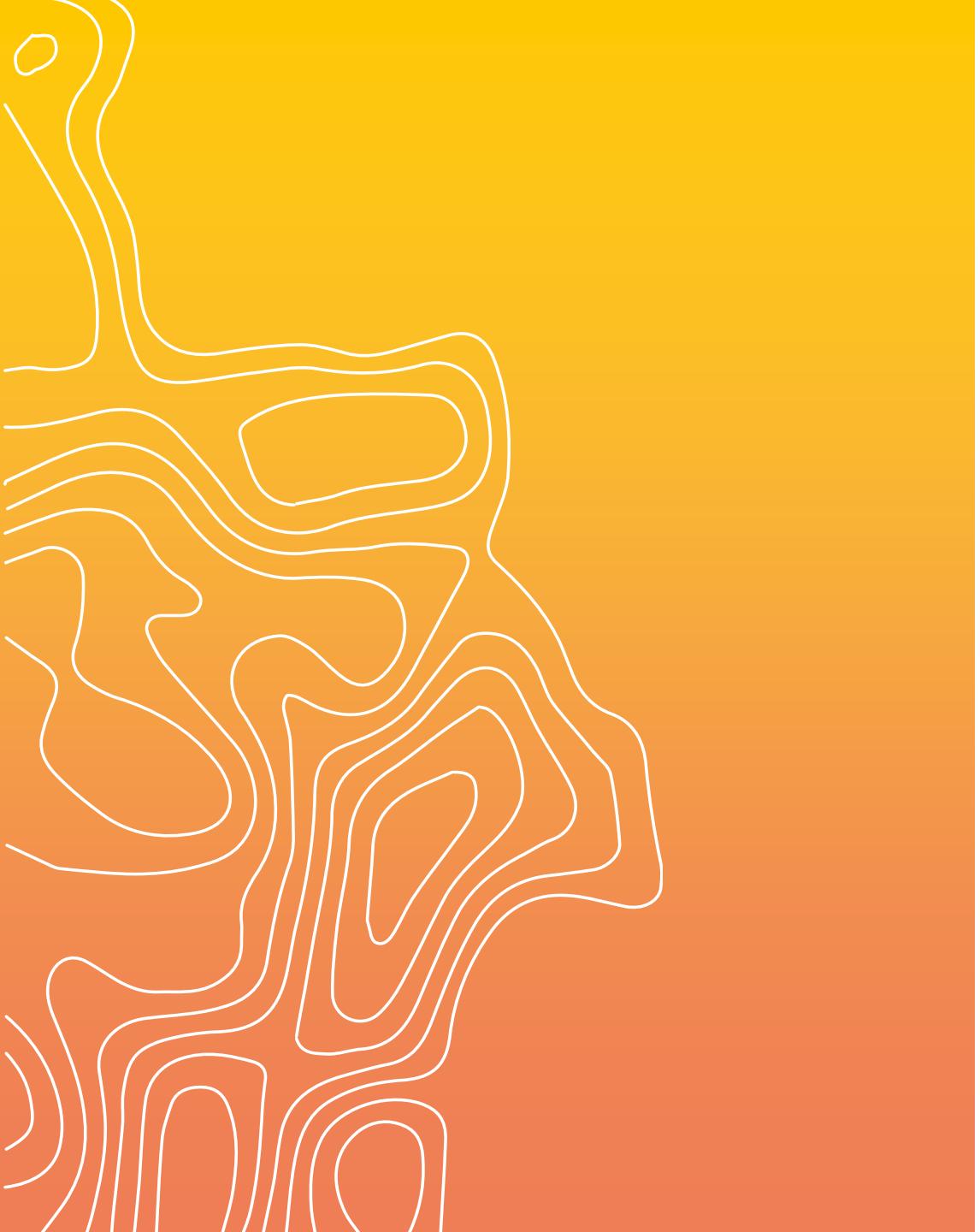
**15 kgCO2e**

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

# Notre bilan : encore du boulot

Individuellement, il reste du chemin à parcourir



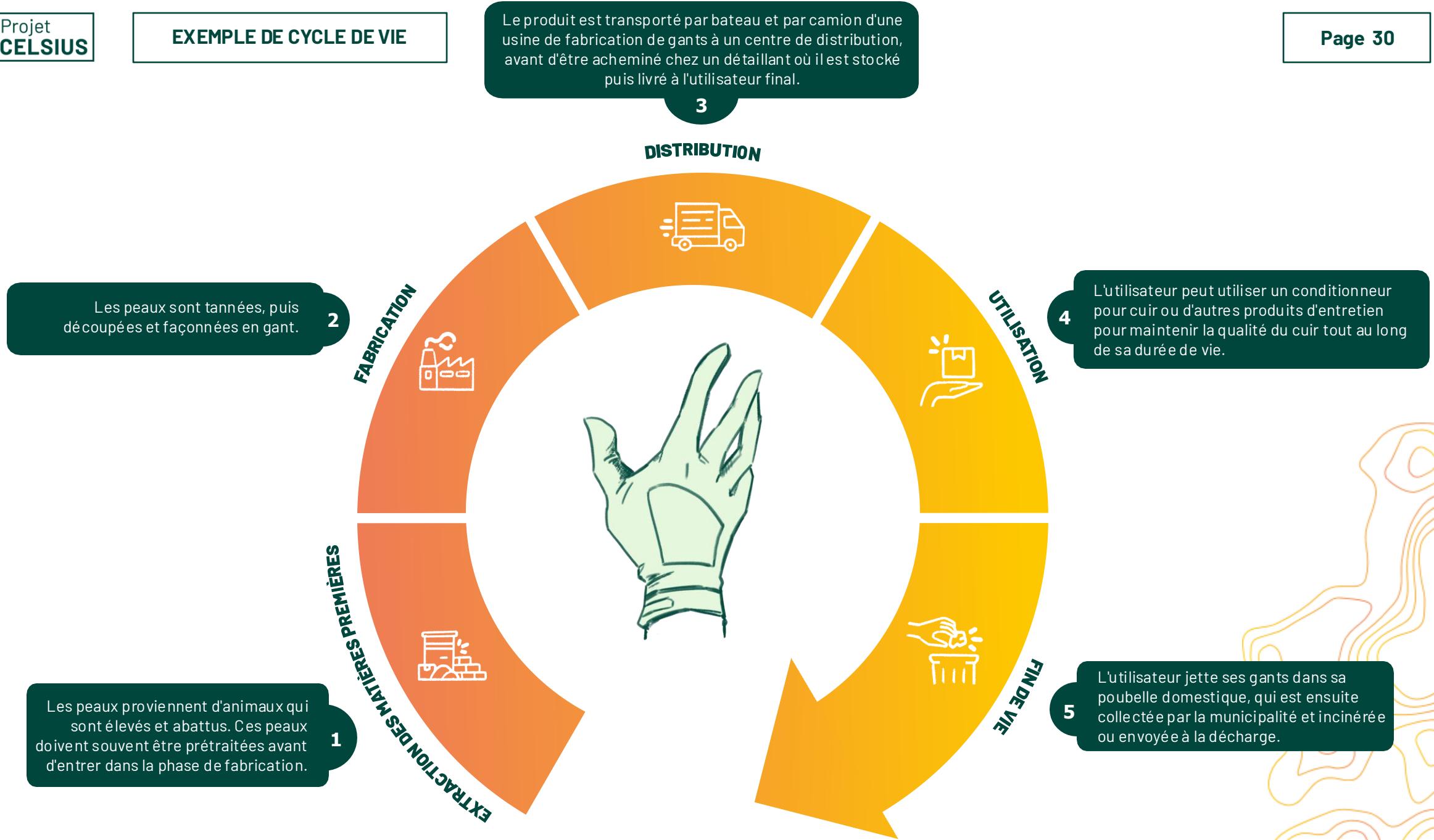


## 02

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



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





# 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 compte 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 content<sup>1</sup>  
Over 38% of manufacturing electricity sourced from supplier clean energy projects<sup>2</sup>

### Smarter chemistry<sup>3</sup>

- 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.<sup>4</sup>

100% recycled cobalt in the battery<sup>6</sup>

### Responsible packaging

99% fiber-based, due to our work to eliminate plastic in packaging<sup>5</sup>  
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.

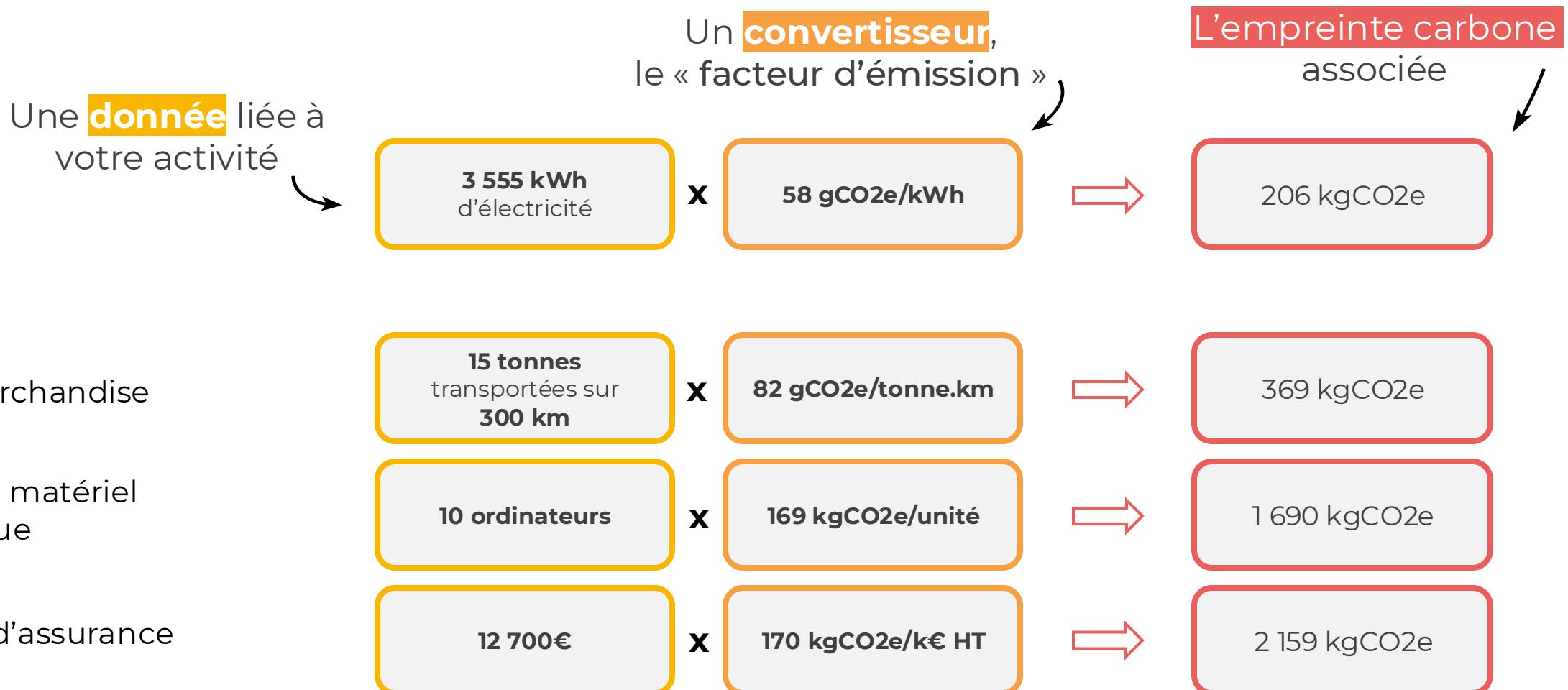
Greenhouse gas emissions	iPhone 15 Pro 128GB	iPhone 15 Pro Max 256GB
Total product footprint	66 kg CO <sub>2</sub> e	75 kg CO <sub>2</sub> e
Apple emissions from utility-purchased electricity (scope 2)	0 kg CO <sub>2</sub> e	0 kg CO <sub>2</sub> e
Life cycle product emissions (scope 3)	66 kg CO <sub>2</sub> e	75 kg CO <sub>2</sub> e
• Production	83%	83%
• Transportation	3%	3%
• Product use	15%	15%
• End-of-life processing	<1%	<1%
GHG reductions achieved <sup>9</sup>	↓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 <sub>2</sub> e	75 kg CO <sub>2</sub> e
512GB	83 kg CO <sub>2</sub> e	87 kg CO <sub>2</sub> e
1TB	107 kg CO <sub>2</sub> e	110 kg CO <sub>2</sub> e

# Les facteurs d'émission : fonctionnement



# 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 ?



x 12 mois = 192 €

x



€ Service/Télécommunications

France continentale

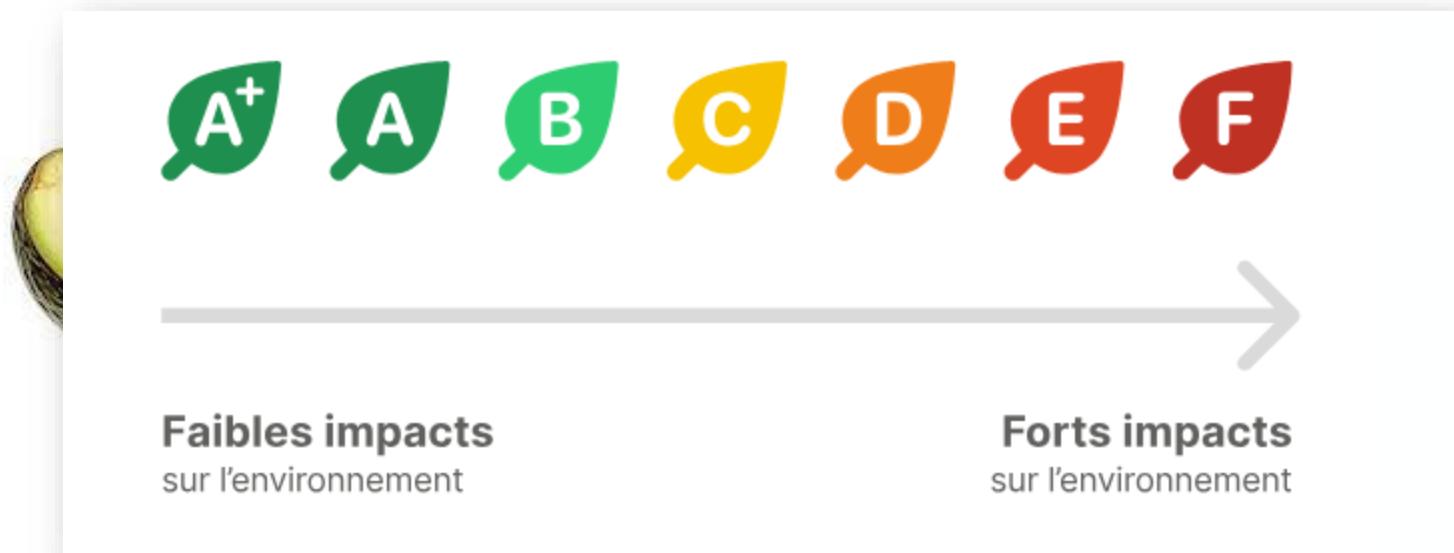


170  
kg éq. CO2/keuro

Incertitude 80 %

= 32 kg CO2e

# Une affaire de compromis



**1,55**  
kg CO<sub>2</sub> eq/kg de produit

Climat

**2,37e+1**  
m<sup>3</sup> dépriv./kg de produit

Eau

**4,56**  
kg CO<sub>2</sub> eq/kg de produit

Climat

**2,03**  
m<sup>3</sup> dépriv./kg de produit

Eau

# Une base d'ACV : Agribalyse

Les ordres de grandeur, c'est important

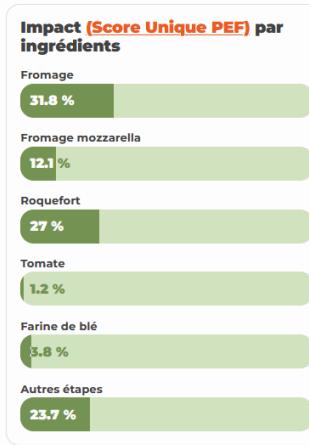
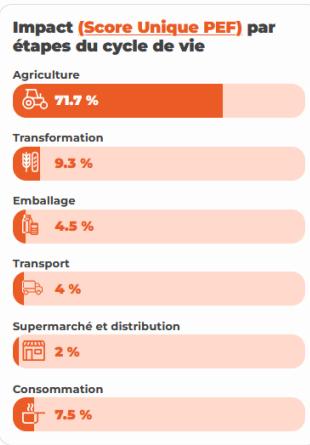
L'impact de votre nourriture sur  
<https://agribalyse.ademe.fr/app>



## Pizza 4 fromages

Code Cional : **25478**

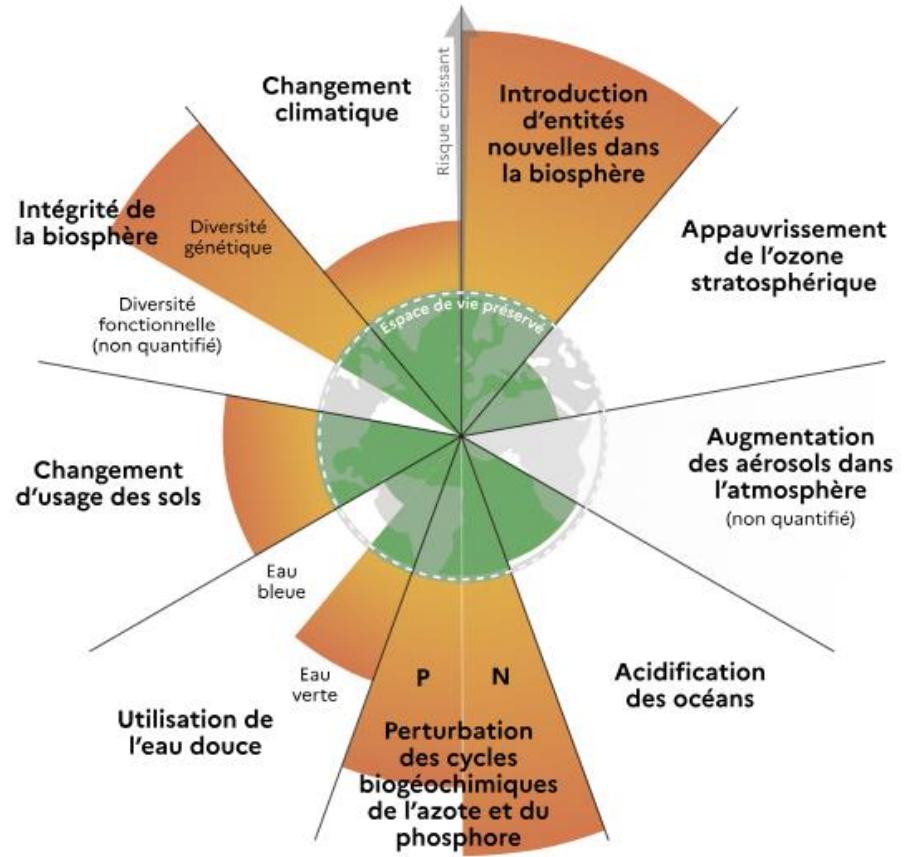
Pizzas, tartes et crêpes salées (Entrées et plats composés)



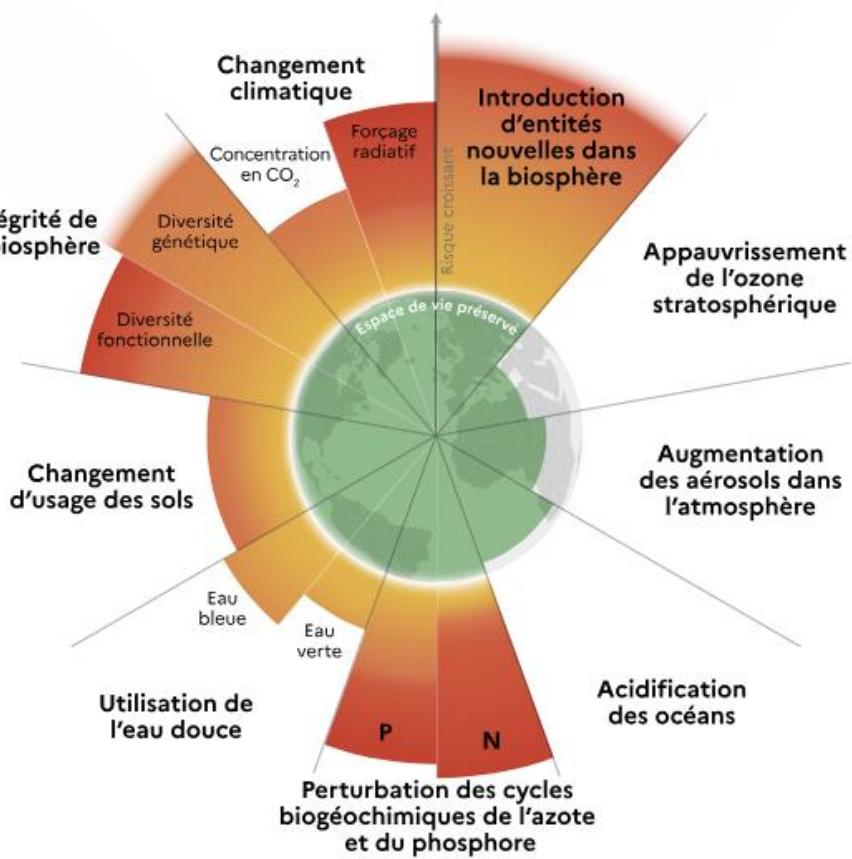
Indicateur	Mesure	Unité
Score unique EF	<b>4,78e-1</b>	mPt/kg de produit
Changement climatique	<b>3,63</b>	kg CO <sub>2</sub> eq/kg de produit
Appauvrissement de la couche d'ozone	<b>5,75e-8</b>	kg CVC11 eq/kg de produit
Rayonnements ionisants	<b>1,39</b>	kBq U-235 eq/kg de produit
Formation photochimique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

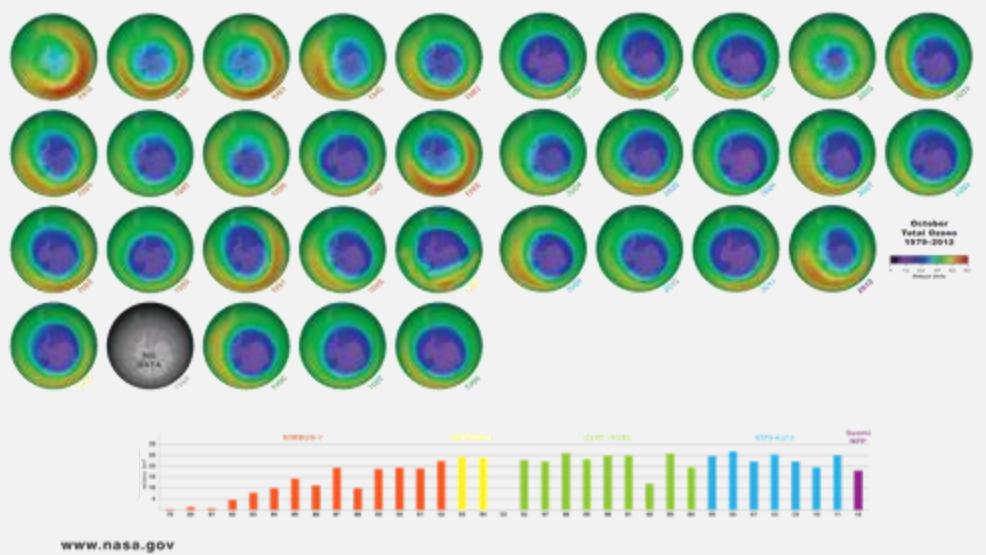
 Water scarcity  
footprint

CAUSE



National Aeronautics and  
Space Administration | 

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

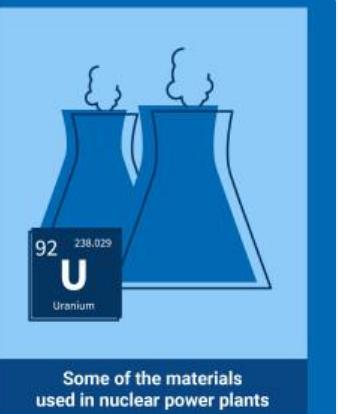
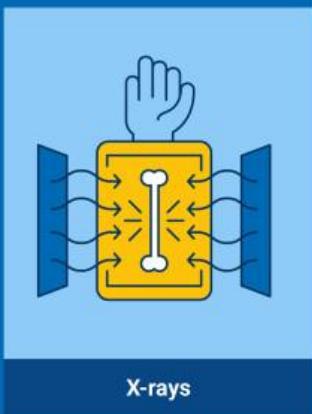
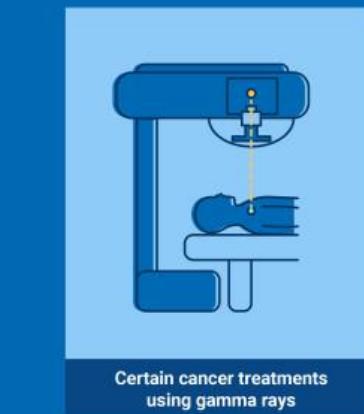
 Freshwater  
toxicity

 Land use

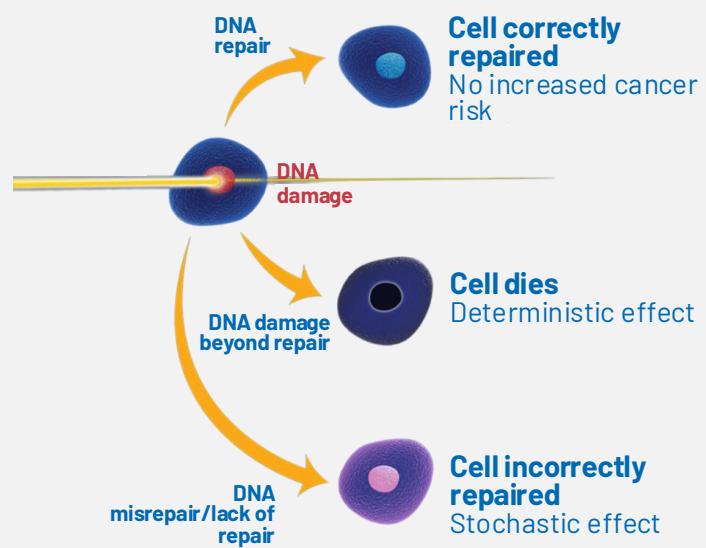
 Human toxicity  
non-cancer effects

 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

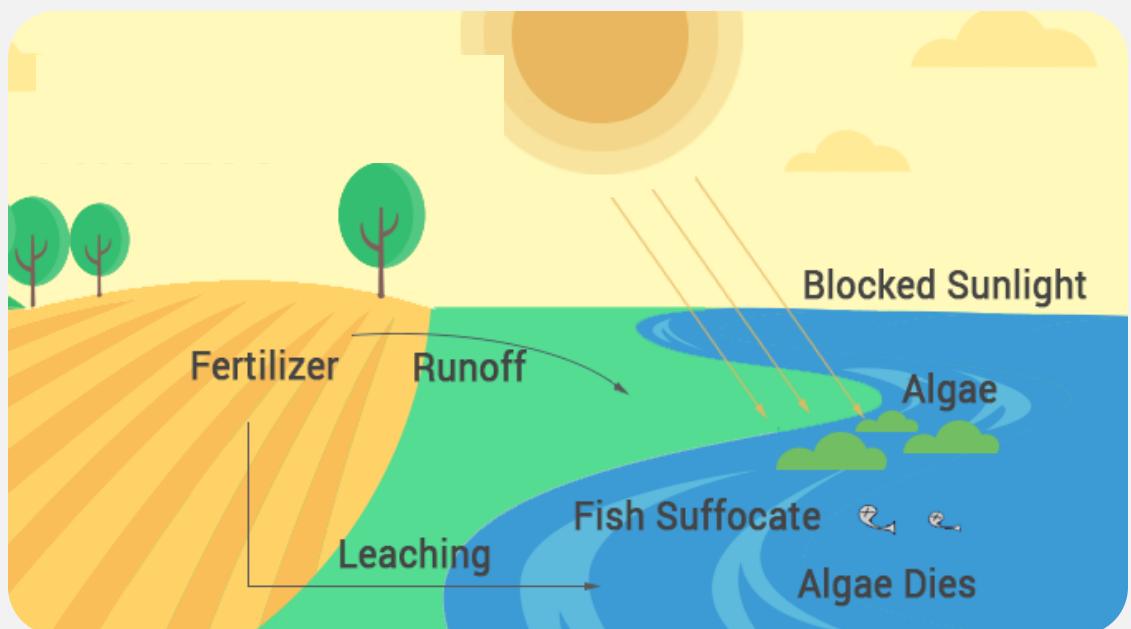
 Freshwater  
toxicity

 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

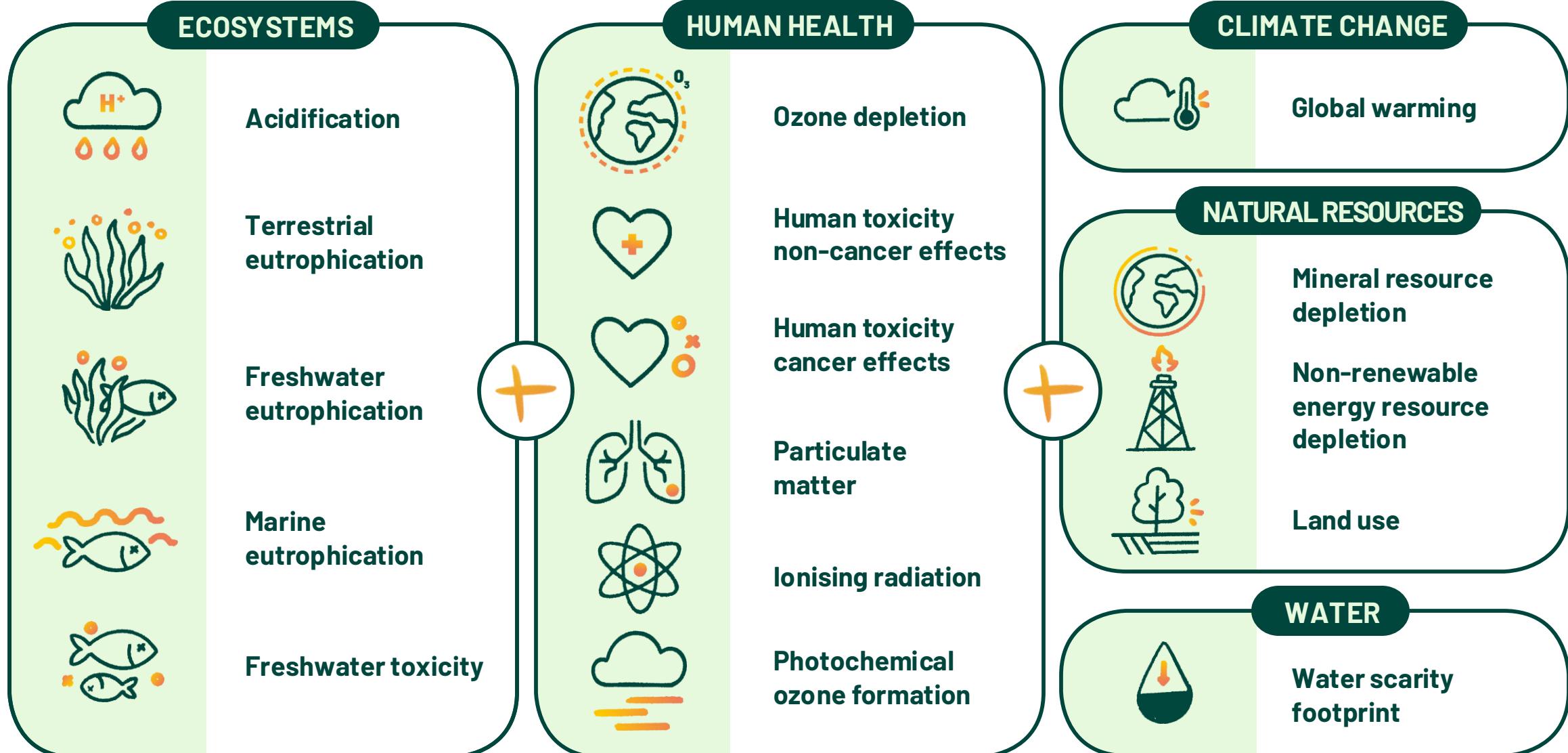
CAUSE



CONSEQUENCE

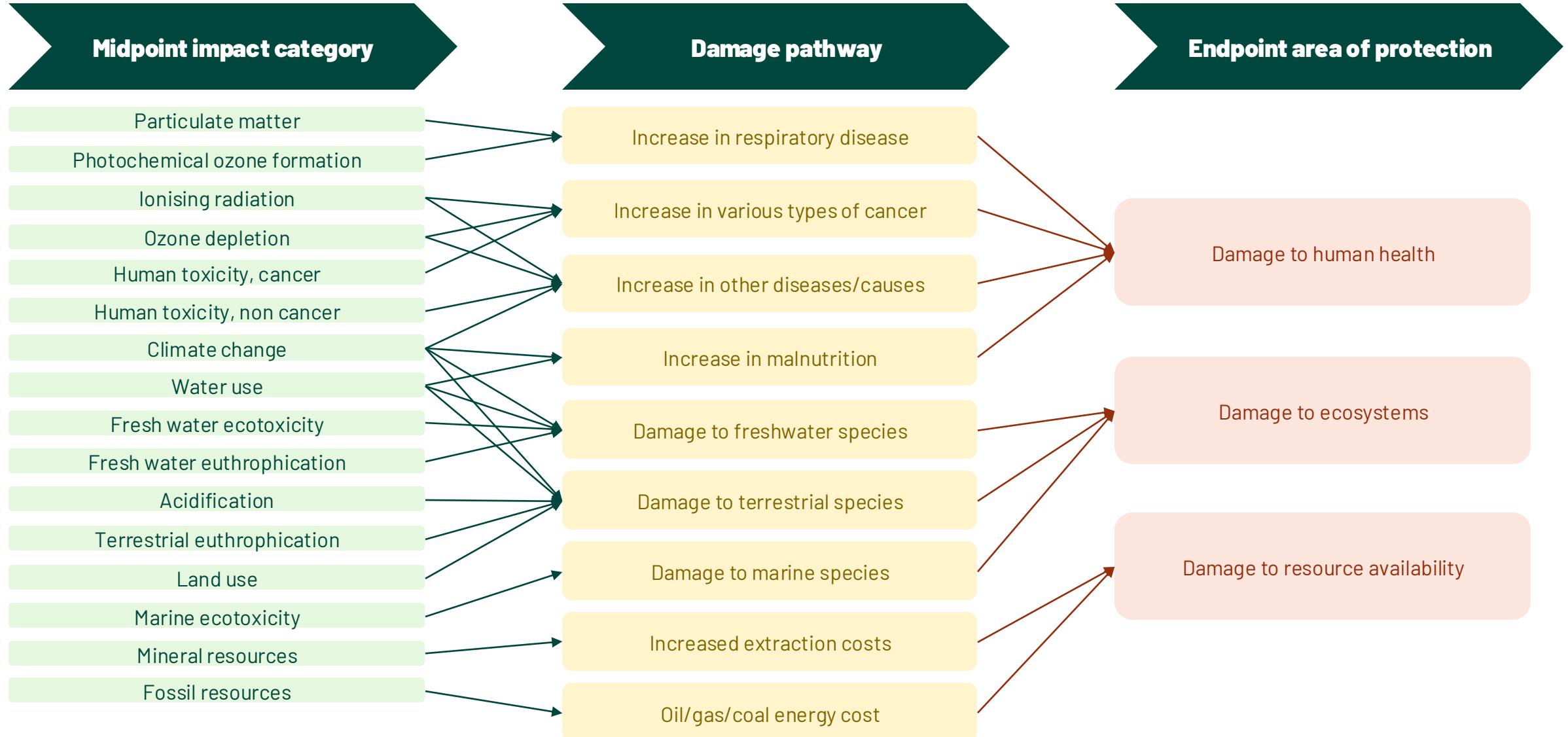


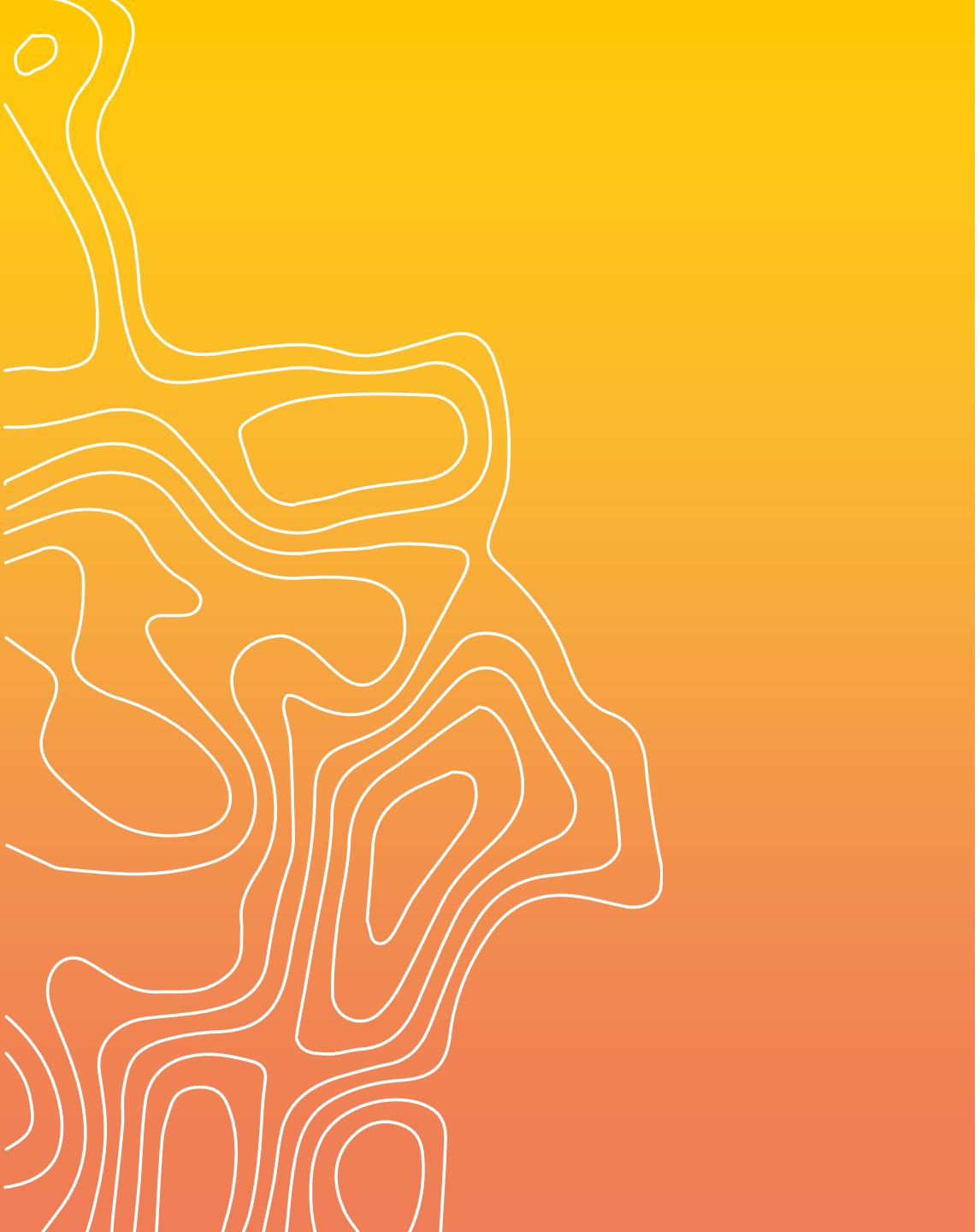
# PEF score



# PEF score

=





**03**

**Dans la chimie ?**  
**Un sujet important**

---

# En France : la Stratégie Nationale Bas Carbone

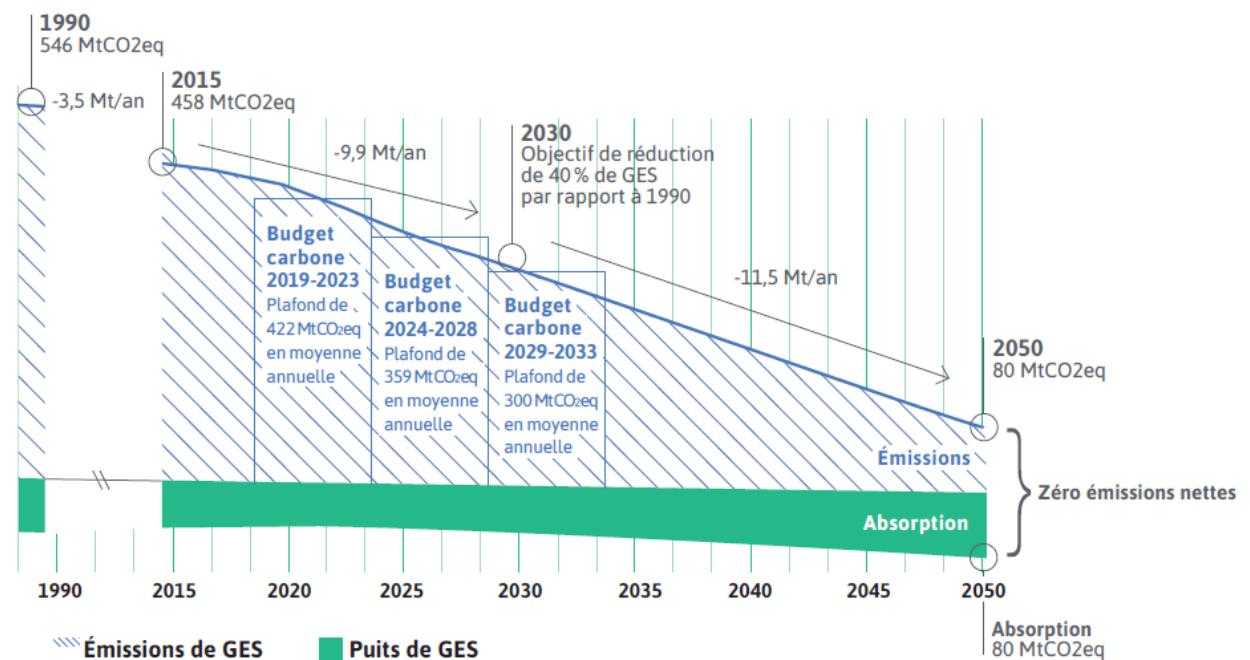


## Stratégie nationale bas-carbone

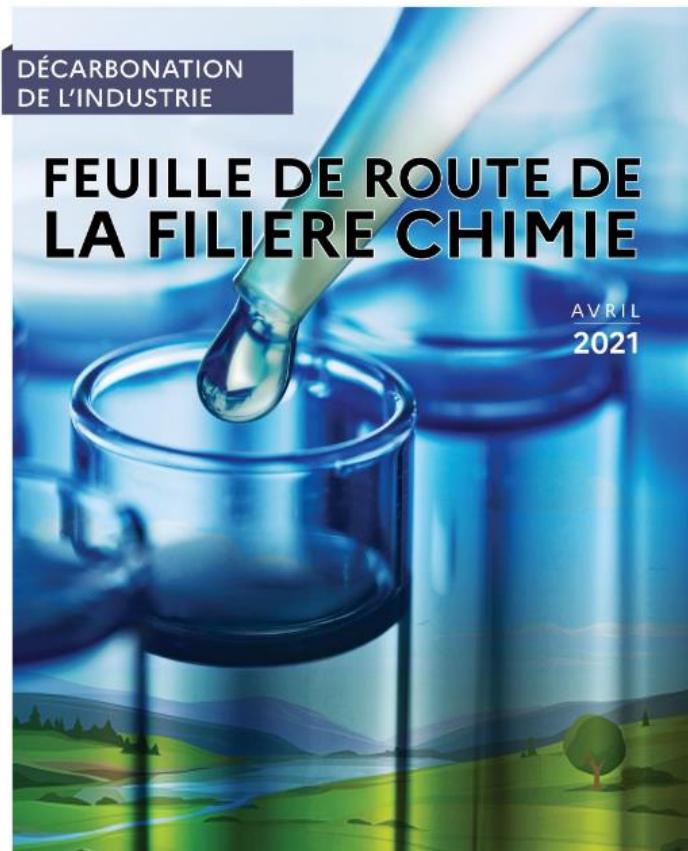


La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone

Évolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en MtCO<sub>2</sub>eq). Inventaire CITEPA 2018 et scénario SNBC révisée (neutralité carbone)



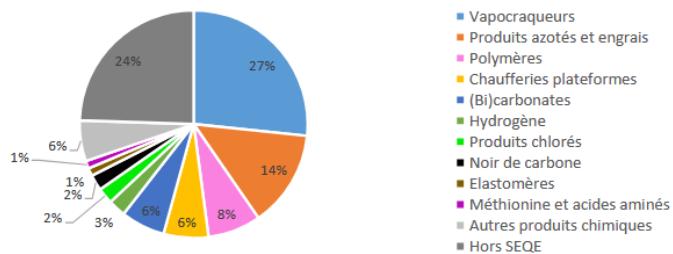
# Dans la chimie ?



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

Émissions de la filière Chimie en 2018



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<sup>2</sup>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 <sub>2</sub> ,eq)
Efficacité énergétique	-1,8
Chaleur biomasse	-1,4
Chaleur CSR	-0,8
N <sub>2</sub> O	-0,8
HFC	-0,9
<b>Total leviers matures</b>	<b>-5,7</b>
<b>En % par rapport à 2015</b>	<b>-26%</b>

### 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

# Dans la chimie ?



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

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	COURS 2		
	<b>Sciences de l'environnement, systèmes et énergie</b> 26h, 2 ECTS Anthropocène ; Écosystèmes ; Changement climatique ; Pollution environnementale ; Biodiversité	<b>Économie circulaire et écologie industrielle</b> 30h, 3 ECTS Économie circulaire ; Neutralité carbone ; Ecologie industrielle ; Découplage ; Chaîne d'approvisionnement		
MODULE 2	<b>Procédés industriels</b> 30h, 3 ECTS Thermodynamique ; Bilan matière et énergie ; Diagramme de flux ; Modélisation des procédés ; Simulation des procédés	<b>Impact environnemental et analyse du cycle de vie</b> 33h, 5 ECTS Impact environnemental ; Pensée cycle de vie ; Logiciels ACV ; Modélisation ACV ; Durabilité	<b>L'ACV : un outil de décision publique</b> 20h, 2 ECTS Prise de décision ; Politique ; Éco étiquetage ; Systèmes de consigne ; Incertitude	<b>L'ACV économique et sociale</b> 10h, 1 ECTS Impact socio-économique ; ACV sociale ; Coût du cycle de vie ; Durabilité ; Pensée cycle de vie
MODULE 3	<b>Retour d'expérience des industriels sur les ACV</b> 33h, 5 ECTS Etude de cas ; Prise de décision ; ACV ; Optimisation des procédés	<b>Projet tutoré d'analyse de cycle de vie</b> 98h, 15 ECTS Gestion de projet ; Travail en groupe ; Modélisation ACV ; Logiciels ACV		
MODULE 4	<b>Technologies pour la décarbonation de l'industrie</b> 30h, 3 ECTS Décarbonation ; Trajectoire ; Transition environnementale ; Empreinte carbone ; Émissions de GES	<b>Matériaux, recyclage, polymères, catalyse enzymatique</b> 30h, 3 ECTS Épuisement des ressources ; Matériaux ; Energies renouvelables ; Recyclage ; Technologie innovante	<b>Éco-conception et technologies low-tech</b> 20h, 2 ECTS Éco-conception ; Low-tech ; Approche innovante ; Critique technologique ; Initiatives	
MODULE 5	<b>Mission en entreprise</b> 15 ECTS Stage ; Performance industrielle ; Gestion de projet ; Analyse de données ; Communication			
MODULE 6	<b>Thèse professionnelle de Mastère spécialisé</b> 15 ECTS Thèse professionnelle ; Recherche ; Solution pratique ; Recommandation stratégique			

**Dauphine | PSL** | ParisTech

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB



Observatoire  
de Paris



# Aussi chez les étudiantes et étudiants



# Mesurer l'empreint environnementale

*Un outil indispensable de l'ingénieur de demain*

