



**HAL**  
open science

## Qu'est-ce que la science ?

Guillaume Blanc

► **To cite this version:**

Guillaume Blanc. Qu'est-ce que la science?. Licence. Anthropocène, Université Paris Cité, France. 2023, pp.19. hal-04142679

**HAL Id: hal-04142679**

**<https://hal.science/hal-04142679>**

Submitted on 27 Jun 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Qu'est-ce que la science ?

Guillaume Blanc

9 mai 2023

## 1 Introduction

Le cours « Énergie et climat » a été introduit dans le cursus de la Licence de Physique en 2020-2021. Il constitue une introduction aux enjeux écologiques de la planète, au-delà des problématiques du climat et de l'énergie, malgré son intitulé. Par « enjeux écologiques de la planète », nous entendons toutes les contraintes auxquelles est soumis l'environnement naturel et par effet de ricochet qui menacent les sociétés humaines. Ces contraintes sont de plusieurs ordres : le réchauffement climatique, l'effondrement de la biodiversité, l'épuisement des ressources (pétrole, uranium, métaux, métaux rares, etc.), les diverses pollutions comme celles du plastique ou des pesticides. Ces contraintes fortes sont très bien documentées par la science, et font que nous sommes entrés dans une nouvelle ère géologique, où l'être humain est devenu capable de modifier la planète Terre dans son ensemble. Cette ère géologique est nommée l'*anthropocène*.

Comme nous allons le voir, cette situation n'est pas stable, elle empire de manière exponentielle. Il y a donc urgence à inverser la tendance pour préserver l'espèce humaine (et les autres espèces vivantes). Pour cela, il faut que chaque individu ait conscience du problème, puisque c'est toute la société, c'est-à-dire notre mode de vie qui doit être modifié. Il y a donc nécessité à former l'ensemble des citoyens aux problèmes et aux solutions pour y remédier (Jouzel 2022).

Les problèmes sont complexes puisqu'ils font appel à l'ensemble des sciences et qu'ils sont tous connectés : le réchauffement climatique menace la biodiversité ; les solutions techniques envisagées pour le contrer induisent des pollutions et entament un peu plus certaines ressources présentes en quantités finies, etc. Les solutions sont également complexes puisqu'elles touchent intrinsèquement à nos modes de vie.

Ce cours est donc une introduction à ces enjeux, avec l'objectif de vous inciter à poursuivre votre formation au-delà, et surtout à réfléchir sur quoi faire à votre échelle. C'est ainsi un cours interactif à plus d'un titre!

La première séance définit la notion de limite planétaire, de croissance exponentielle, et vous montre comment la connaissance scientifique se construit.

## 2 Exponentielle

### 2.1 Des problèmes en vue!

La figure 1 montre l'évolution d'un certain nombre de problèmes planétaires : l'augmentation des concentrations en dioxyde de carbone, peroxyde d'azote, méthane, l'amincissement de la couche d'ozone, l'augmentation de la température de la basse atmosphère, des inondations, de l'exploitation des zones de pêche, la croissance de la quantité de crevettes d'élevage produite, des flux d'azote vers les côtes océaniques, des pertes de forêts tropicales, des surfaces terrestres soustraites à la nature, de l'extinction des espèces.

On peut voir que ces évolutions depuis 50 à 200 ans ne sont pas constantes, ni linéaires (figure 2a), mais qu'elles augmentent de plus en plus avec le temps.

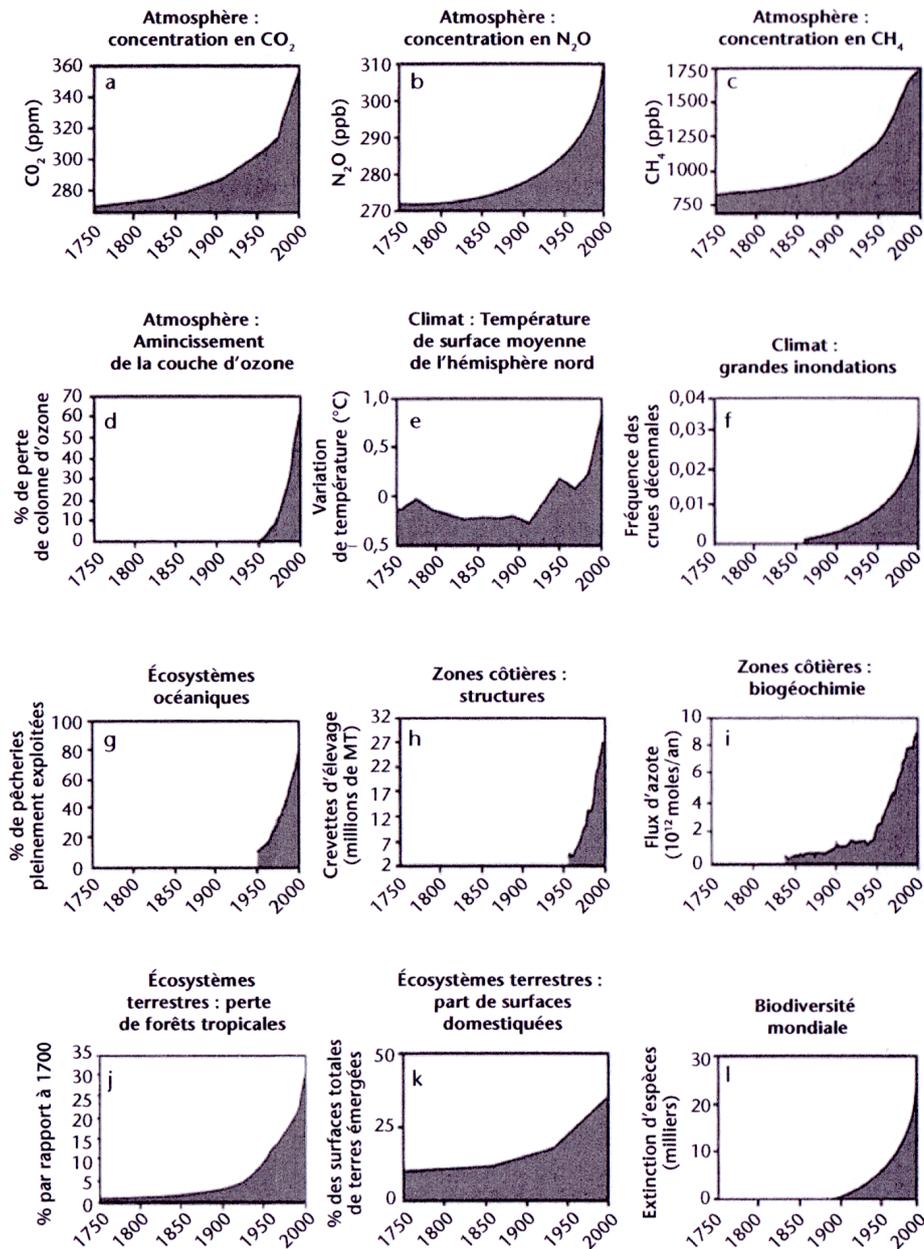


FIGURE 1 – Évolution temporelle d'un certain nombre de problèmes planétaires. D'après Steffen et al. 2015a.

## 2.2 Croissance exponentielle

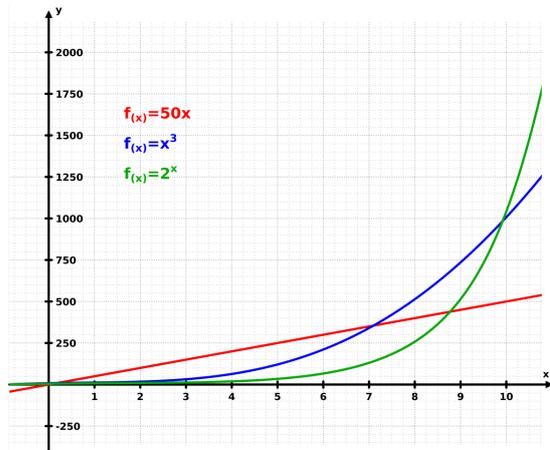
### 2.2.1 Fonction exponentielle

Vous connaissez la fonction exponentielle qui est égale à sa propre dérivée et dont la valeur en 0 vaut 1 (figure 2b).

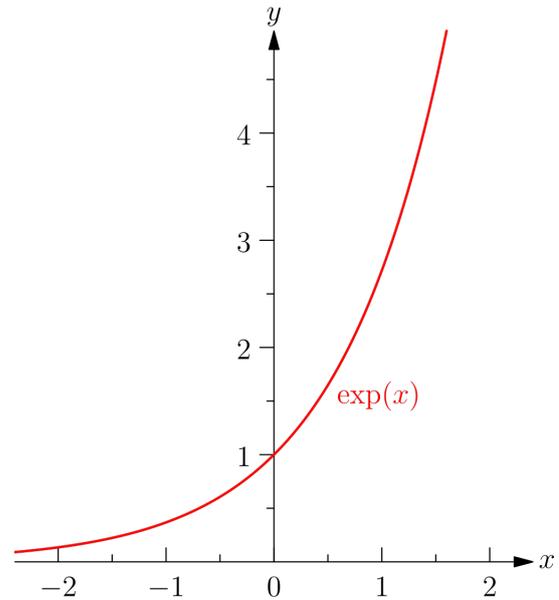
Les courbes observées sur la figure 1 ressemblent à la représentation graphique de la fonction exponentielle. On peut en effet les modéliser, ou les « ajuster » avec une courbe exponentielle.

### 2.2.2 Croissance exponentielle

Supposons qu'une population  $N(t)$  à un instant  $t$  de quelque chose (des animaux, des noyaux radioactifs, des virus, etc.) croisse dans le temps (pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ ) avec un taux constant  $\alpha$ . Alors la population à l'instant  $t + \Delta t$  est donnée par la population initiale,  $N(t)$ , à laquelle



(a) Courbe représentatives (croissantes) d'une fonction linéaire (rouge), cubique (bleue) exponentielle (vert).



(b) Courbe représentative de la fonction  $x \mapsto e^x$ .

FIGURE 2 – Fonction exponentielle.

s'ajoute la quantité de  $N$  qui a augmenté de  $\alpha$  pendant  $\Delta t$  :

$$N(t + \Delta t) = N(t) + \alpha \cdot N(t) \cdot \Delta t \quad (1)$$

L'unité de  $\alpha$  est l'inverse d'un temps;  $\alpha$  peut être positif (croissance) ou négatif (décroissance).

Cela donne :

$$\frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = \alpha \cdot N(t) \quad (2)$$

Si on fait tendre  $\Delta t$  vers 0, cela donne :

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot N(t) \quad (3)$$

d'après la définition de la dérivée de la fonction  $N(t)$  :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = \frac{dN}{dt} \quad (4)$$

L'équation (3) est une équation différentielle du première ordre à coefficients constants, sans second membre.

Elle est caractéristique d'une variation exponentielle : le taux de variation instantanée de la quantité  $N$ , soit  $dN/dt$  (ie la dérivée) est proportionnelle à la quantité  $N$  elle-même.

Pour résoudre cette équation, on peut séparer les variables, en la réarrangeant :

$$dN = \alpha \cdot N(t) \cdot dt \quad (5)$$

soit :

$$\frac{dN}{N} = \alpha \cdot dt \quad (6)$$

En intégrant, on obtient la solution de cette équation :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} \quad (7)$$

avec  $N_0 = N(0)$ .

On peut réécrire (7) selon :

$$N(t) = N_0 \cdot \mu^t \quad (8)$$

où  $\mu$  est la croissance, tandis que  $\alpha = \ln \mu$  est le taux de croissance.

### 2.2.3 Radioactivité

Certains noyaux atomiques ont la propriété de se désintégrer spontanément pour se transformer en un autre noyau atomique, c'est la radioactivité. On définit la période radioactive  $T$  comme étant l'intervalle de temps pendant lequel une population de  $N$  noyaux radioactifs diminue de moitié. Ainsi, à  $t = 0$ , on a  $N(0) = N$  noyaux, une période plus tard, c'est-à-dire à  $t = T$ , il en reste  $N(T) = N/2$  qui ne se sont pas désintégrés. En reportant cela dans l'équation (7) :

$$N(T) = \frac{N}{2} = N \cdot e^{\alpha \cdot T} \quad (9)$$

on obtient :

$$\alpha = -\frac{\ln 2}{T} = -\lambda \quad (10)$$

où  $\lambda$  est la constante radioactive (elle s'exprime en  $s^{-1}$ ).

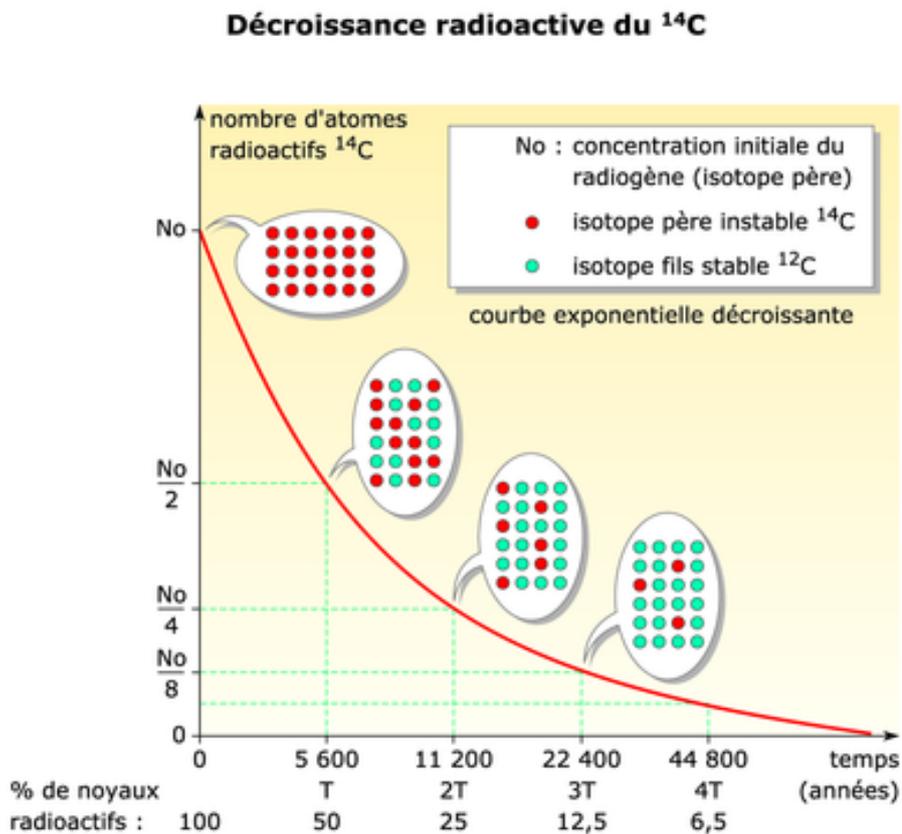


FIGURE 3 – Exemple de la décroissance radioactive du carbone 14.

La figure 3 montre la décroissance radioactive d'une population de noyaux de carbone 14, un des isotopes du carbone, radioactif, dont la période est de 5600 ans.

### 2.2.4 La population mondiale

Le taux de croissance annuel de la population mondiale est actuellement de 1,018 % (en 2020<sup>1</sup>). Cela signifie qu'à l'instant  $t = 0$ , on a  $N$  personnes; à l'instant  $t = 1$  an, on en a :

$$N(0 + 1 \text{ an}) = N(0) + 0,01018 \times N(0) \times 1 \text{ an} = N(0) + \alpha \times N(0) \times 1 \text{ an} \quad (11)$$

1. Source : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.POP.GROW?end=2020&start=1961&view=chart>

Ainsi,  $\alpha = 0,01018 \cdot \text{an}^{-1}$  et la croissance vaut :  $\mu = e^\alpha = e^{0,01018} \approx 1,01018$  (car  $e^\epsilon \approx 1 + \epsilon$  quand  $\epsilon$  est petit – développement limité de la fonction exponentielle).

Cette croissance exponentielle de la population est illustrée sur la figure 4.

## Population, 0 to 2021

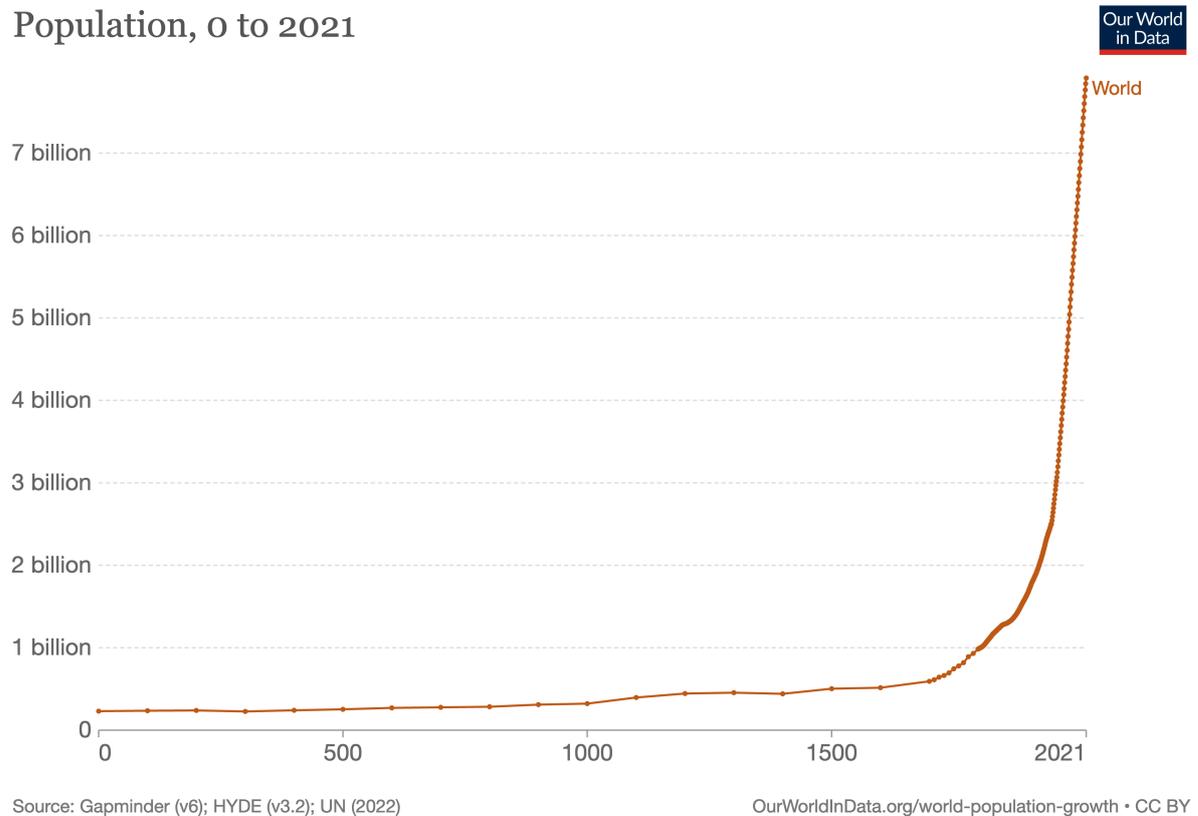


FIGURE 4 – Population humaine en fonction du temps.

### 2.2.5 Le covid

Avec la souche sauvage du SARS-CoV2, en mars 2020, on observait que le nombre de morts doublait tous les 7 jours.

Donc, à  $t = 0$ , on a  $N$  morts; à  $t = 7$  jours, on a  $2 \times N$  morts :

$$N(0 + 7 \text{ j}) = 2 \cdot N(0) = N(0) + \alpha \cdot N(0) \cdot 7 \text{ j} \quad (12)$$

soit :

$$2 = 1 + \alpha \times 7 \quad (13)$$

d'où le taux de croissance :

$$\alpha = \frac{1}{7} \text{ j}^{-1} = 0,143 \text{ j}^{-1} \quad (14)$$

et une croissance de :

$$\mu = e^\alpha = e^{0,14} \approx 1,15 \quad (15)$$

La figure 5 montre les différentes vagues de décès dus au covid depuis mars 2020. Le début de chacune des vagues est à peu près exponentiel.

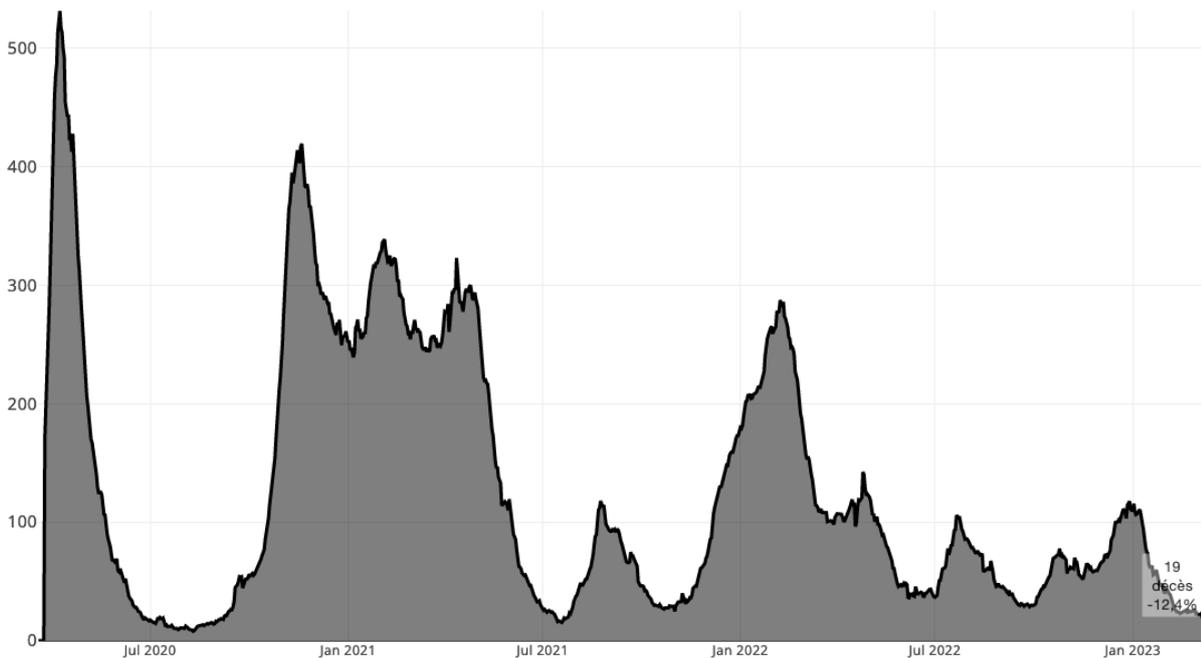


FIGURE 5 – Nombre de décès journaliers dus au covid en France. Source : <https://covidtracker.fr/france/>.

### 2.2.6 Croissance logistique

Dans le monde réel une croissance exponentielle ne peut pas durer éternellement, sinon la population concernée devient infinie, ce qui est physiquement impossible, le monde étant de taille ou de capacité finie.

Ainsi, plutôt qu'un modèle exponentiel, on peut utiliser un modèle de Verhulst qui utilise une fonction logistique. Pierre François Verhulst imagina ce modèle dans les années 1840 en réponse au modèle de Malthus qui proposait une croissance exponentielle de la population. Verhulst propose ainsi de tenir compte d'un taux de mortalité (nombre de décès annuel sur la population totale) et d'un taux de natalité (nombre de naissances annuel sur la population totale) : selon ses hypothèses, le taux de natalité  $n(N, t)$  décroît linéairement avec la population  $N(t)$ , tandis que le taux de mortalité  $m(N, t)$  croît linéairement avec la population<sup>2</sup>. Alors :

$$\frac{dN}{dt} = N(t) (n(N, t) - m(N, t)) \quad (16)$$

avec :

$$n(N, t) = a_n \cdot N(t) + b_n \quad (17)$$

avec  $a_n < 0$  car, par hypothèse, le taux de natalité décroît avec la population et  $b_n > 0$  car le taux de natalité ne peut pas être négatif. Et :

$$m(N, t) = a_m \cdot N(t) + b_m \quad (18)$$

avec  $a_m > 0$  car, par hypothèse, le taux de mortalité croît avec la population et  $b_m > 0$  car le taux de mortalité ne peut pas être négatif. Les grandeurs  $a_{n,m}$  et  $b_{n,m}$  sont des constantes. Alors on a :

$$\frac{dN}{dt} = N(t) (a_n \cdot N(t) + b_n - a_m \cdot N(t) - b_m) = N(t) (b - a \cdot N(t)) \quad (19)$$

où  $a = -(a_n - a_m) > 0$  et  $b = b_n - b_m > 0$  pour la population puisse croître quand  $N$  est petit<sup>3</sup>.

2. En réalité, ces taux décroissent tous les deux. Voir, par exemple : <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900>.

3. La différence entre taux de natalité et taux de mortalité  $n(N, t) - m(N, t)$  est le taux d'accroissement de la population.

En posant  $K = b/a$  ( $K > 0$ ), on obtient :

$$\frac{dN}{dt} = b \cdot N \left( 1 - \frac{N}{K} \right) \quad (20)$$

La fonction  $N(t) = K \quad \forall t$  est solution de cette équation; si  $N(t) < K$ , la population  $N$  croît, et si  $N(t) > K$ , la population décroît. Le paramètre  $K$  est la capacité de charge, c'est-à-dire la taille maximale de la population qu'un milieu donné peut supporter.

Il s'agit évidemment d'un modèle simpliste : les dynamiques des populations sont plus complexes que cela.

La résolution de l'équation (20) conduit à la solution logistique :

$$N(t) = \frac{K}{1 + \left( \frac{K}{N(0)} - 1 \right) e^{-bt}} \quad (21)$$

La figure 6 montre une représentation graphique de cette fonction et de sa dérivée, avec la croissance exponentielle et la saturation due au paramètre  $K$ .



FIGURE 6 – Fonction logistique (en rouge), d'équation  $y(x) = \frac{10}{1 + \left( \frac{10}{1} - 1 \right) e^{-2 \cdot x}}$  et sa dérivée (en vert) ainsi que la fonction exponentielle (en bleu) d'équation  $y(x) = e^{2 \cdot x}$ .

### 2.2.7 Les limites à la croissance

En 1972 paraissait un rapport intitulé *Les limites à la croissance (dans un monde fini)* par les écologues Donella et Dennis Meadows (entre autres). Le rapport montrait, à partir de simulations réalistes de notre société, que la croissance, dans le sens où la population croît tout en puisant indéfiniment dans un stock limité de ressources, ne pouvait durer éternellement. Il prédisait une courbe en cloche dans l'évolution de différents paramètres comme la population, la nourriture disponible, les ressources, la production industrielle, etc.

La figure 7 montre quelques courbes de ce modèle actualisées par Turner 2012.

L'époque actuelle se situe probablement au niveau du sommet des différentes courbes en cloche : les limites prédites sont atteintes, comme nous allons le voir dans la section suivante.

Nous avons fêté les 50 ans de la parution de ce rapport dit *Rapport Meadows*<sup>4</sup>.

4. À ce sujet, je vous invite à écouter l'émission *Affaires Sensibles* du 16 février 2022 sur *France Inter* qui raconte l'histoire de ce rapport (<https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/affaires-sensibles/affaires-sensibles-du-mercredi-16-fevrier-2022-7258377>).

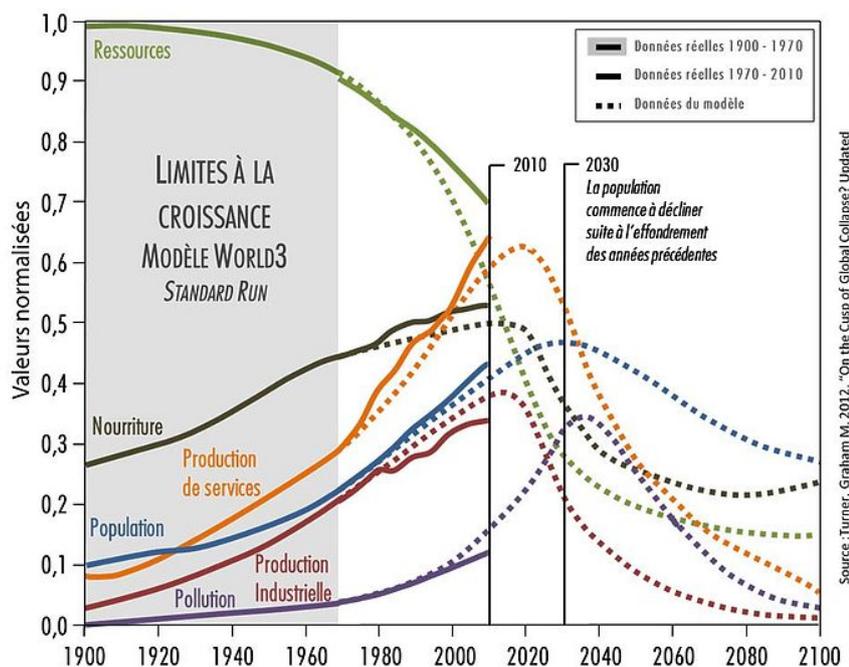


FIGURE 7 – Modèle de société élaboré en 1972 et mis à jour avec les données récentes. Tiré de Turner 2012.

### 3 Limites planétaires

Nous l'avons vu, une croissance infinie dans un monde fini n'est pas possible. On peut alors définir la notion de frontière et de limite planétaire (figure 8) (voir Boutaud & Gondran 2020).

**Frontière planétaire :** risque de la collectivité (la société) est prête à prendre dans un contexte marqué par l'incertitude.

**Limite planétaire :** limite (éventuellement diffuse) au-delà de laquelle des points de bascule sont identifiés.

**Point de bascule :** rétroaction positive = écartement du point d'équilibre.

**Variable de contrôle :** l'état du système peut être évalué à partir d'une stimulation (exemple : CO<sub>2</sub> pour le réchauffement).

Les scientifiques ont identifiés 9 limites planétaires (Steffen et al. 2015b) :

1. **Couche d'ozone** = protection du vivant contre UV solaires. Le protocole de Montréal (1985) à permis de trouver un substitut industriel. **Limite non franchie.**
2. **Climat** = réchauffement, concentration CO<sub>2</sub> atmosphérique. **Limite franchie.**
3. **Acidification des océans** = la dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'eau génère de l'acide carbonique. **Limite non franchie.**
4. **Charge en aérosols atmosphériques.** Limite non quantifiée
5. **Cycles biogéochimiques**
  - (a) Cycle de l'azote = engrais agricole (N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> → engrais). **Limite franchie.**
  - (b) Cycle du phosphore (élément nutritif agriculture), ressource non renouvelable. **Limite franchie.**
6. **Cycle de l'eau douce**
  - (a) Eau bleue (usage domestique) : **limite non franchie**
  - (b) Eau verte (eau utilisée par la végétation) : **limite franchie**

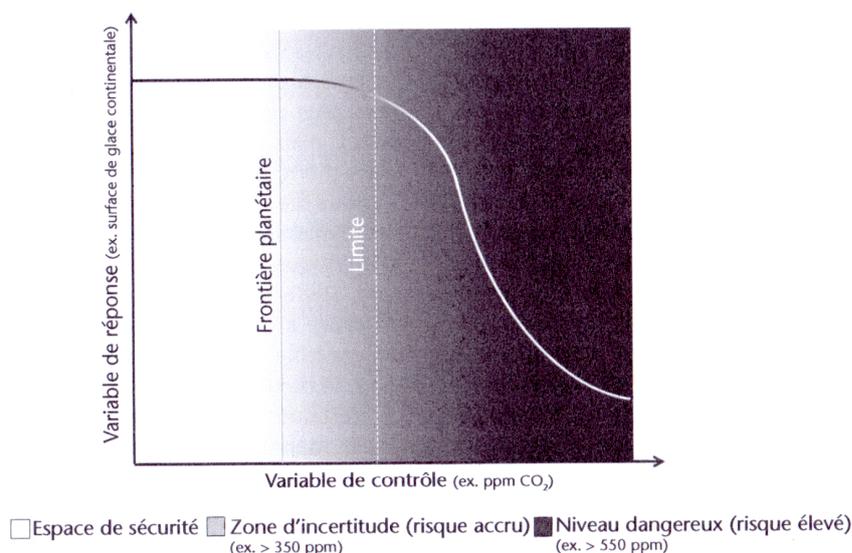


FIGURE 8 – Illustration des notions de frontière et de limite planétaire.

7. **Biodiversité** = taux d'extinction 50 à 500 fois plus élevée que pendant l'Holocène (-12000 ans à environ 1800). **Limite franchie.**
8. **Changement d'usage des sols** (déforestation). **Limite franchie.**
9. **Introduction d'entités nouvelles dans l'environnement** (molécules, substances toxiques, radioactivité, plastiques... ). **Limite franchie.**

Elles sont indiquées sur la figure 9.

Ces limites seront étudiées dans la suite du cours.

## 4 Comment se construit la science ?

Pour comprendre les enjeux écologiques d'un point de vue scientifique et non idéologique, il est important de comprendre comment la connaissance scientifique se construit. C'est l'objet de la suite de ce premier cours.

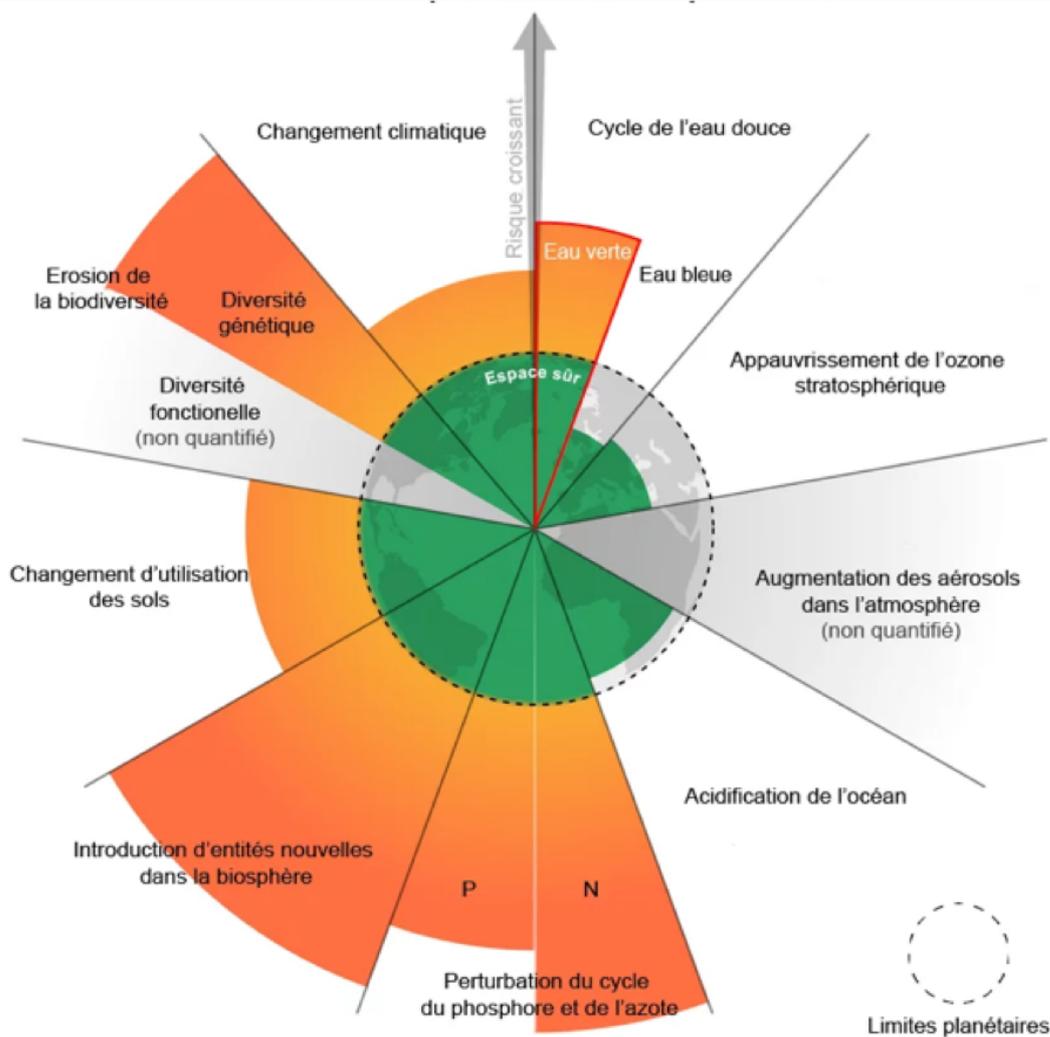
Pour plus de détails, on pourra consulter le premier chapitre de Blanc & Noûs 2023.

### 4.1 Qu'est-ce que la science ?

#### 4.1.1 Des définitions ?

Le dictionnaire Le Robert définit la science comme suit : « La science, du latin scientia signifiant « connaissance », est ce que l'on sait pour l'avoir appris, ce que l'on tient pour vrai au sens large, l'ensemble de connaissances, d'études d'une valeur universelle, caractérisées par un objet (domaine) et une méthode déterminés, et fondés sur des relations objectives vérifiables. » La science est populairement assimilée pêle-mêle à des connaissances, à des personnes (les scientifiques), à des applications, avec parfois un jugement de valeur assorti.

Nous pouvons ainsi définir la science comme une somme de connaissances qui sont obtenues avec méthode. Par essence, ces connaissances ne sont ni bonnes ni mauvaises. Il convient ainsi de distinguer ce qu'est la science, à savoir des connaissances acquises sur la nature et le monde qui nous entoure, de la mise en application de ces connaissances, la technique ou la technologie. Cette dernière met ainsi en œuvre des connaissances scientifiques acquises pour construire des méthodes, des outils, des techniques, des instruments, etc., généralement dans le but de modifier l'environnement humain. La technologie est le résultat de décisions politiques ou sociétales, le jugement de valeur peut, le cas échéant, se faire à ce niveau.



La limite planétaire concernant l'utilisation d'eau douce (eau verte) a été franchie. Elle rejoint les 5 autres déjà dépassées, dont la dernière avait été officiellement dépassée en janvier 2022.

Crédit : Wang-Erlandsson et al. (2022)  
Stockholm Resilience Center

Traduction Sydney THOMAS pour @BonPote



FIGURE 9 – Les 9 limites planétaires identifiées.

#### 4.1.2 Tentative de classification

Il est possible de classer la science en différents domaines, plus ou moins poreux les uns avec les autres. Nous distinguons ainsi traditionnellement les sciences exactes et les sciences humaines et sociales. Dans le premier, nous retrouvons les sciences de la nature (sciences de la vie et de l'environnement, sciences de la Terre et de l'Univers, science de la matière) et les sciences formelles (mathématiques, logique, informatique). Les sciences humaines et sociales regroupent, entre autres, l'histoire, l'anthropologie, la sociologie, la linguistique, la psychologie, l'économie, etc. Ce cloisonnement n'est pas hermétique, il existe de nombreuses exceptions, dont la physique qui émerge dans les différentes sciences exactes. Le découpage n'est pas disciplinaire, ni unique (on peut imaginer d'autres manières d'effectuer une classification des disciplines scientifiques) ou exhaustif. Certaines constructions scientifiques nécessitent par ailleurs des approches pluridisciplinaires ou interdisciplinaires, comme les études autour du climat, du réchauffement climatique, de la transition énergétique ou plus généralement environnementale.

### 4.1.3 La vérité?

La science s'efforce de comprendre comment fonctionne le réel (la nature au sens large), elle propose des explications sous forme de théories ou modèles, généralement charpentés autour de résultats expérimentaux ou observationnels. Une explication satisfaisante ne signifie pas qu'elle soit vraie dans l'absolu, c'est seulement la meilleure explication pour un phénomène donné à un moment donné : « La science est l'asymptote de la vérité. Elle approche sans cesse et ne touche jamais. » Victor Hugo (L'art et la science<sup>5</sup>). Une vérité scientifique est ainsi une proposition construite par un raisonnement logique et rigoureux, vérifiée par l'expérience ou l'observation. Il s'agit néanmoins d'une situation idéale qui ne correspond pas à la réalité physique et à sa complexité.

## 4.2 Une construction méthodique

### 4.2.1 Des origines dans l'Antiquité

La science se construit de manière méthodique dans le but de comprendre le réel de manière la plus efficace possible. La démarche s'est construite petit à petit au cours des siècles. Initialement basée sur l'observation et le raisonnement (Grecs), ce qui s'est révélé nécessaire mais non suffisant, elle a évolué vers l'« outil » que nous connaissons actuellement. Une évolution primordiale, qui permet, entre autres, de pouvoir « choisir », par exemple, entre deux théories sur les constituants de toute chose, d'une part celle d'Empédocle stipulant quatre éléments de base, la terre, l'eau, l'air et le feu, ou bien celle de Démocrite imaginant que tout était fabriqué avec des particules élémentaires insécables, les « atomes ». La controverse prit fin au début du 19<sup>e</sup> siècle avec les expériences de Jean Perrin.

### 4.2.2 L'expérimentation apparaît

En effet, une étape fondamentale dans l'élaboration de la méthode a été quand la science est devenue quantitative : au 17<sup>e</sup> siècle, Galilée fait des expériences sur le mouvement des corps, pour en comprendre les lois. L'expérimentation permet de faire des mesures de propriétés physiques, ce qui permet de discriminer des hypothèses contradictoires. La mesure est effectivement garante d'objectivité, dans la limite de l'interprétation des résultats, et permet d'obtenir des relations entre les grandeurs qui modélisent un phénomène (Machon 2015).

Il faut néanmoins que les expériences soient discriminantes pour permettre de discriminer entre les modèles et les théories, elles doivent être bien menées et reproductibles pour s'affranchir des artefacts et des facteurs non contrôlés. Sinon, il y a le risque d'observer un phénomène qui n'a rien à voir avec la cause annoncée, et de confondre une corrélation, c'est-à-dire un lien entre deux variables, avec une causalité, c'est-à-dire l'effet que peut avoir l'une d'elle sur l'autre (figure 10).

Il n'est ainsi pas nécessaire de cerner exhaustivement tous les aspects d'un phénomène, de faire toutes les expériences imaginables pour le comprendre et l'appréhender, il est souvent possible d'induire des lois générales à partir d'un nombre restreint de mesures. Il existe ainsi des expériences plus cruciales que d'autres, celles que l'histoire des sciences retient, mais également toutes celles qu'elle ne retient pas mais qui ont permis d'aboutir à la compréhension du phénomène.

Ainsi, une collection de faits (données, mesures, observations...) permet une explication rationnelle qui va être la meilleure façon de comprendre cette partie-là de la nature, jusqu'à preuve du contraire. Une explication satisfaisante ne signifie pas qu'elle soit vraie dans l'absolu, c'est seulement la meilleure explication d'un phénomène donné à un moment donné. Par la suite, un nouveau fait (théorie, expérience, observation...) peut permettre à l'explication d'évoluer. Par exemple, la gravitation universelle de Newton permet d'expliquer une certaine partie des lois de la nature, elle a été améliorée par la relativité d'Einstein qui permet d'étendre le domaine de compréhension et d'explication.

---

5. [https://fr.wikisource.org/wiki/William\\_Shakespeare\\_\(Victor\\_Hugo\)/I/III](https://fr.wikisource.org/wiki/William_Shakespeare_(Victor_Hugo)/I/III)

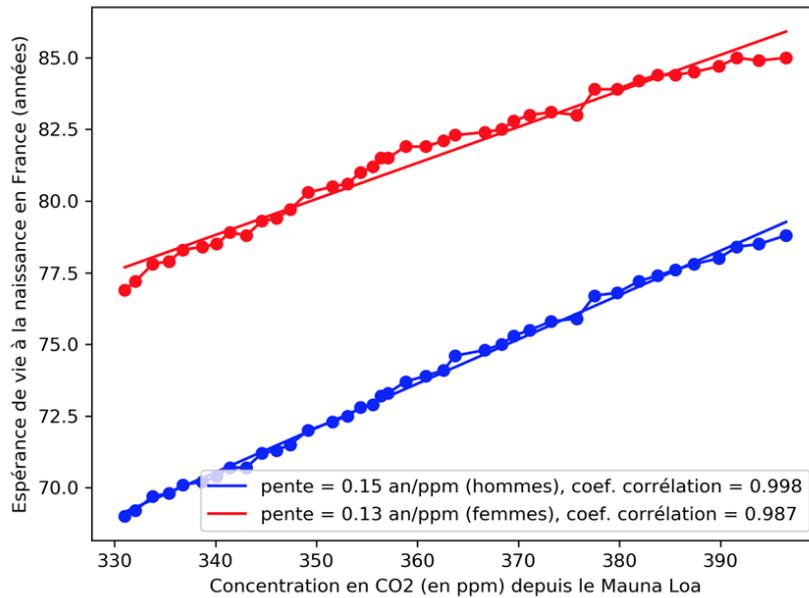


FIGURE 10 – Illustration de la corrélation entre l’espérance de vie à la naissance en France, pour les hommes (bleu) et pour les femmes (rouge), en fonction de la concentration en gaz carbonique dans l’atmosphère. Si la corrélation est belle, il est évident qu’il n’y aucune causalité entre les deux variables, ce n’est pas le gaz carbonique qui permet de vivre plus longtemps. Néanmoins les deux grandeurs croissent avec le temps.

### 4.3 Un aperçu de méthode

De manière un peu lapidaire, on peut présenter l’élaboration de la connaissance scientifique comme un cycle entre l’élaboration d’une théorie, utilisée pour prédire certains aspects, qui seront ensuite éventuellement observés ou mesurés lors d’une expérience ou d’une observation, dont l’analyse permet de valider, modifier ou rejeter la théorie (figure 11).

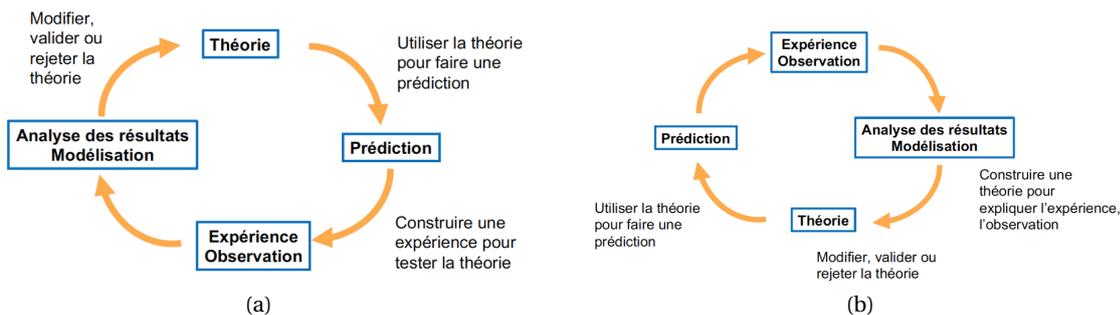


FIGURE 11 – Illustration de méthodes scientifiques, parmi d’autres schémas possibles.

Mais ce schéma est trop simpliste pour recueillir l’ensemble des démarches qui contribuent à la construction de la science. On pourrait y ajouter la notion de sérendipité, à savoir les découvertes effectuées par hasard ; l’établissement des politiques scientifiques à différentes échelles qui stipulent les axes dans lesquels la recherche doit être faite. La notion d’observation et d’expérience est elle-même réductrice : il faut parfois avoir recours à un grand nombre d’expériences ou d’observations pour cerner un phénomène, ou bien, dans certaines disciplines, à la classification pour tirer des traits généraux. Il n’y a donc pas une seule et unique méthode scientifique, mais des méthodes qui peuvent de surcroît différer selon les disciplines.

## 4.4 Qu'est-ce qui distingue la science d'un autre champ de connaissance ?

### 4.4.1 L'erreur fait partie de la méthode

La science a droit à l'erreur. La démarche de la recherche scientifique visant à construire des connaissances peut se tromper, se fourvoyer. L'erreur fait partie intégrante de la méthode, sachant qu'elle peut être corrigée. La méthode elle-même est garante de cette correction. « La science va sans cesse se raturant elle-même. Ratures fécondes. » Victor Hugo (L'art et la science). Un résultat faux sera nécessairement détecté à un moment ou un autre dans le processus collectif (dans l'espace : internationalement, et dans le temps : de nouvelles avancées peuvent réfuter des découvertes d'hier) de validation (figure 12). Ainsi, pour permettre ce processus, les expériences, les observations, les tests doivent être reproductibles par d'autres scientifiques, dans des conditions différentes.

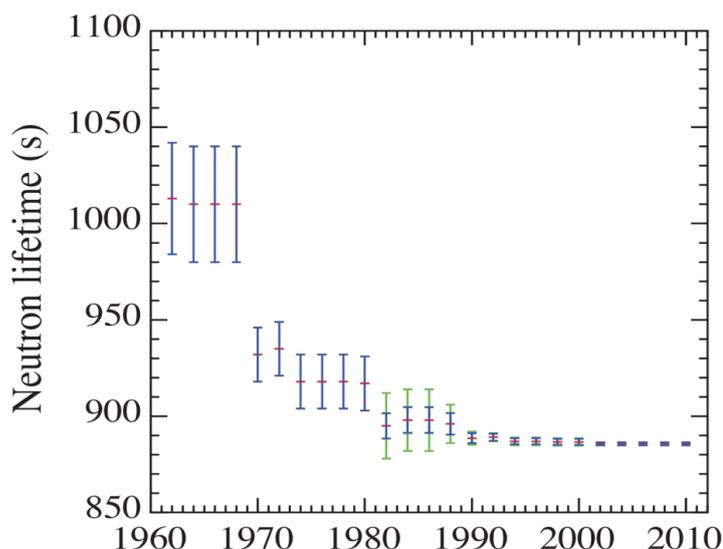


FIGURE 12 – Ce graphique montre les résultats expérimentaux de mesures de la durée de vie du neutron, qui est l'un des nucléons dans les noyaux atomiques (Nakamura 2010). À l'état libre, c'est-à-dire non confiné dans le noyau, il se désintègre en un quart d'heure. L'évolution des mesures du temps de vie du neutron depuis les années 1960 montre combien la mesure a progressé, et surtout, par rapport à ce que l'on sait faire actuellement, elle était fautive jusque dans les années 1980. Fausse notamment parce que les barres d'incertitudes d'alors, bien que plus grandes qu'actuellement, n'étaient pas compatibles avec les mesures actuelles.

### 4.4.2 La science est réfutable

Le philosophe autrichien Karl Popper (1902-1994) a introduit le critère de réfutabilité en 1910 qui permet de démarquer une science d'un champ de connaissances qui ne l'est pas. Une science peut être ainsi définie comme étant réfutable (ou falsifiable). Réfuter, c'est contredire un énoncé par une démonstration argumentée qui en établit la fausseté. Par exemple l'assertion « tous les corbeaux sont noirs » peut être réfutée en observant un corbeau blanc. Elle est donc scientifique de ce point de vue. En revanche, l'affirmation « tous les humains sont mortels » n'est pas réfutable, car il faudrait attendre un temps infini pour conclure, ce qui n'est pas possible. Elle n'est donc pas scientifique.

### 4.4.3 Les croyances

Une croyance s'appuie au contraire sur un principe d'autorité et de certitude (dogme), les faits non conformes sont écartés. Une pseudo-science est une croyance qui se pare des atours de la science sans en avoir la rigueur et la méthode. Cela peut ainsi être une théorie qui a été scientifique, mais qui a été réfutée, comme la mémoire de l'eau en tant qu'explication du dogme homéopathique.

## 4.5 Comment est actuellement produite la connaissance scientifique?

### 4.5.1 Un socle fiable et stable

La production de connaissances scientifiques repose sur un socle fiable, qui est celui typiquement enseigné en sciences exactes dans les premières années de l'enseignement supérieur. Ainsi l'existence des atomes, par exemple, ne fait pas débat, comme celle de la rotondité de la Terre à une certaine échelle spatiale. L'exploration de l'inconnu se fait donc à la frontière avec ce socle, de façon fluctuante, par essais-erreurs, petit à petit, par les chercheurs.

### 4.5.2 Qui sont les scientifiques?

Les scientifiques sont ceux qui cherchent à comprendre comment fonctionne le monde par le prisme de la science. Il peut s'agir d'amateurs (citoyens éclairés) ou de chercheurs professionnels. En France, un chercheur en sciences est soit un chercheur à plein temps dans un Établissement Public à Caractère Scientifique et technologique (EPST) comme le CNRS, l'INSERM, l'INRAE, l'INRIA, etc., ou dans un Établissement Public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC) comme le CEA, soit un enseignant-chercheur (Université) avec une charge d'enseignement. Au CNRS, par exemple, il y a des chargés de recherche, des directeurs de recherche. À l'université, il y a des maîtres de conférence, des professeurs des universités. Tous sont fonctionnaires. Les enseignants-chercheurs sont les « profs » à l'université, ils ont une mission d'enseignement qui est statutairement de 192 heures devant les étudiants, chaque année. Ils font également de la recherche. Il y a également des étudiants en doctorat, avec ou sans charge d'enseignement (vacation ou monitorat), des docteurs en « post-doc » sorte de CDD de la recherche d'après le doctorat, souvent sans charge d'enseignement, des ATER (Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherche), qui sont l'équivalent des enseignants-chercheurs mais en CDD (toujours après un doctorat). Certaines entreprises ont des laboratoires de recherche et développement, auquel cas elles emploient des chercheurs.

### 4.5.3 La production de nouvelles connaissances scientifiques

La production scientifique se fait par l'intermédiaire de publications dans des journaux spécialisés. Il existe un grand nombre de revues dans chaque domaine de la science. Par exemple en astrophysique, on a : *Astronomy and astrophysics*, *Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *New Astronomy*, etc. Il existe également quelques revues généralistes comme *Nature* ou *Science*. Dans quasiment tous les domaines des sciences de la nature, la langue de publication est l'anglais (la science est internationale, elle s'est « mondialisée » bien avant le reste de la société!).

### 4.5.4 L'article scientifique

Un article est soumis à une revue; un comité éditorial demande à des scientifiques (deux, typiquement) ayant le même domaine de compétence (et si possible pas de lien avec les auteurs de l'article) de lire l'article afin de décider s'il répond aux canons de la science et mérite d'être publié. Il s'agit de l'évaluation par les pairs, qui est généralement anonyme. Ce point est crucial, c'est ce qui distingue la production de la connaissance scientifique du reste des publications (figure 13). Ce processus permet d'avoir des publications de qualité, ce qui n'est pas le cas dans les livres ou dans les revues de vulgarisation dont les critères de publication ne sont pas scientifiques mais lucratifs (un livre doit se vendre, peu importe ce qu'il contient). Même s'il existe (et heureusement!) des livres de très bon niveau, et des revues de vulgarisation de très bon niveau (comme *Pour la Science*, *La Recherche*, etc., par exemple), le fait qu'ils soient publiés ne le garantit cependant pas.

### 4.5.5 Quelques limites

Il y a des limites à ce schéma qui sont dues à la capitalisation de la science : les chercheurs du monde entier sont soumis à une pression pour publier toujours plus, ce qui amène à des dérives qui

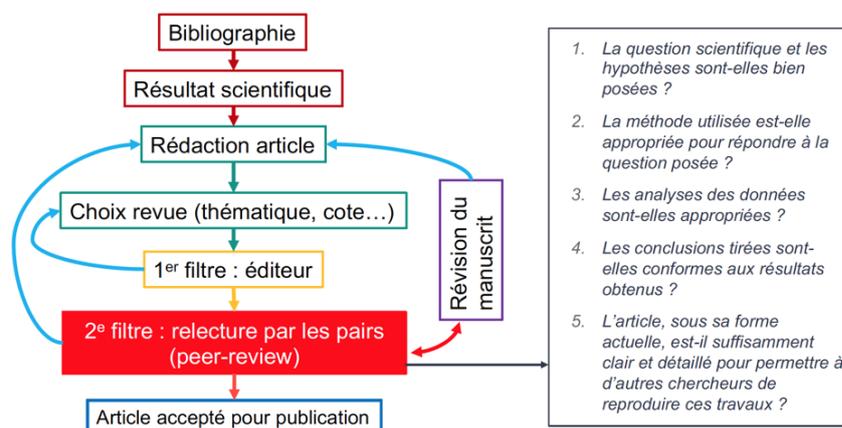


FIGURE 13 – Illustration du processus de publication d'un article scientifique. Le point le plus important est celui de la relecture par les pairs, qui permet de garantir un respect des canons de la méthode scientifique. Une liste typique de questions que doivent se poser les relecteurs est indiquée.

contreviennent à la déontologie, comme la fraude (manipulation des résultats, typiquement). Le modèle économique des revues scientifiques est également plus que discutable : des éditeurs privés peu scrupuleux en situation monopolistique prennent les chercheurs en otage en les faisant payer pour publier, pour ensuite vendre à prix d'or les revues aux bibliothèques des universités. Les chercheurs étant généralement financés par les contribuables pour faire leur travail. Il y a bien d'autres dérives humaines qui ternissent cette image, comme des idéologies, des intérêts privés, etc., qui peuvent biaiser des résultats.

#### 4.5.6 Stabilité de la science

Un résultat scientifique publié n'est pas pour autant gravé dans le marbre ! La science est un processus long, qui demande de refaire les expériences, de vérifier, de contrôler, de valider, de refaire les observations, etc. Un résultat publié l'est souvent au conditionnel. Avant de devenir un résultat fiable, il doit être vérifié par la communauté dans son ensemble. Une seule étude ne constitue généralement pas un résultat suffisamment fiable pour être traité comme tel. La fiabilité se solidifie quand plusieurs études différentes sont concordantes dans leurs résultats. Enfin, quand la majorité de nombreuses études va dans le même sens, on parle de consensus scientifique. La figure 14 illustre cela : un fait constitué d'un témoignage, d'une expérience personnelle, d'une rumeur ne constitue en rien quelque chose de fiable. Même le résultat d'une seule étude scientifique doit être considéré avec extrême précaution.

#### 4.5.7 Le consensus et la controverse

Un consensus scientifique est une position sur laquelle la plupart des scientifiques spécialistes d'un domaine s'accordent à un moment donné. Le consensus scientifique n'est, en lui-même, pas un argument scientifique, et il ne fait pas partie de la méthode scientifique. L'histoire des sciences regorge de consensus qui se sont révélés faux : l'éther luminifère, immuabilité de l'écorce terrestre... Inversement, une controverse scientifique est un débat opposant des personnalités scientifiques sur un point scientifique. Ce débat a lieu dans le champ de compétences des acteurs. Par exemple, actuellement les astrophysiciens spécialistes de l'univers se disputent (amicalement !) à propos de la nature de deux composantes essentielles de l'univers, l'énergie noire et la matière noire ou encore sur la valeur de la constante de Hubble qui quantifie le taux d'expansion de l'univers.

Inversement, certains sujets scientifiques font irruption dans le débat public quand ils touchent des domaines liés à la société (santé, environnement...). Il y a controverse publique quand le débat a lieu autour d'un tel sujet avec des acteurs qui ne sont pas forcément scientifiques et qui sont sou-

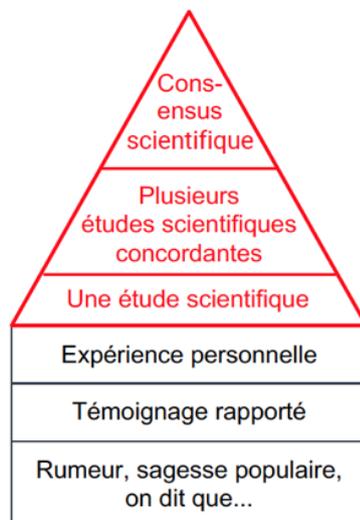


FIGURE 14 – L'échelle des preuves scientifiques.

vent en dehors de leur domaine de compétence, comme par exemple sur les OGM, le nucléaire, le réchauffement climatique, les pesticides, etc.

Ce qui n'empêche pas certaines controverses scientifiques de déborder dans le débat public, souvent en faisant fi de la règle qui veut (ou qui voudrait) qu'une seule étude doive être scientifiquement vérifiée et validée avant que tout un chacun ne s'en empare. On peut citer la question des neutrinos supraluminiques en 2011 qui a fait beaucoup parler avant d'être réfutée six mois plus tard, ou bien la mémoire de l'eau suite à une expérience en 1988 qui n'a jamais pu être reproduite, dont l'hypothèse a été réfutée, ou encore celle de la fusion froide en 1989, également réfutée.

#### 4.5.8 Exemple du consensus sur le réchauffement climatique

Un exemple de consensus scientifique qui est également une controverse publique est celui du réchauffement climatique d'origine anthropique (figure 15). Entre 90 % et 100 % (selon la question posée) des scientifiques spécialistes du sujet adhèrent au consensus depuis (au moins) plus de 15 ans (Cook et al. 2016), tandis que d'innombrables sondages montrent qu'une partie (entre 10 % et 50 % typiquement, valeur qui varie d'un pays à l'autre, d'une année à l'autre, et qui semble tendre à diminuer) de la population n'y croit pas.

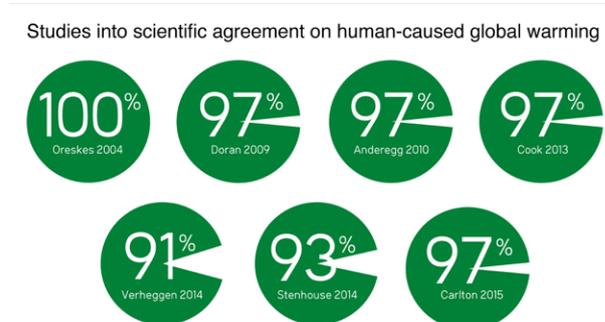


FIGURE 15 – Consensus scientifique sur le climat. Tiré de Cook et al. 2016.

## 4.6 Le traitement médiatique de l'information scientifique

Les journalistes sont un rouage essentiel pour la transmission des connaissances scientifiques entre les chercheurs et le public. Ils ont ainsi une responsabilité importante en termes de déontologie et d'objectivité. Sans maîtriser la manière dont la science se construit, cela peut amener à des dérives regrettables.

### 4.6.1 Des échelles de temps différentes

Le temps de la construction scientifique est long. Les processus qui demandent de refaire les expériences, les observations, de vérifier, contrôler, valider, sont longs, ils peuvent prendre plusieurs mois, plusieurs années voire plusieurs décennies. Cette échelle de temps n'est pas en adéquation avec le temps journalistique, dans une éternelle course au scoop scientifique, au risque d'apporter dans la sphère publique un résultat au mieux non étayé, au pire faux. La dérégulation du marché de l'information avec l'avènement de l'Internet met les médias traditionnels (presse, radio, télévision) à rude épreuve, tout un chacun peut désormais s'improviser journaliste sur le web. De fait, les manquements à la déontologie journalistique sont fréquents : le conditionnel prudent de la conclusion d'une étude se transforme rapidement en certitude.

Cela ne prête pas forcément à conséquence quand les enjeux sont uniquement des enjeux de connaissance comme en sciences fondamentales (voir la controverse des neutrinos supraluminiques) ; en revanche sur des sujets dont les enjeux sont sociétaux comme le réchauffement climatique ou la santé humaine, les manquements journalistiques peuvent provoquer des épidémies de peurs irraisonnées (les ondes électromagnétiques de la téléphonie mobile et la santé, les OGM et le cancer, les vaccins. . .) ou des décisions politiques infondées (comme pour l'énergie nucléaire civile) ou des absences de décision politique (réchauffement climatique).

## 4.7 Esprit critique

Il y a différents aspects dans « l'esprit critique » : une formation universitaire de physique fournit des outils pour critiquer des résultats liés à la physique, ordres de grandeur, logique d'une démonstration « théorique », homogénéité des expressions mathématiques, adéquations entre les modèles et les expériences, incertitudes expérimentales, etc. Cet outillage est nécessaire à tout scientifique. Il y a néanmoins un autre aspect plus général dans « l'esprit critique » qui permet en sus de former des citoyens éclairés capables d'interagir en société de manière rationnelle, dans le sens comprendre les débats de société et éventuellement y participer de manière éclairée. Pour cela, il faut d'une part prendre conscience d'un certain nombre d'aspects liés à notre psychologie, les « biais cognitifs » : notre cerveau est entraîné à prendre des décisions en permanence, sans réfléchir (heureusement!). Mais ce faisant, dans certaines situations, il se trompe. Il faut donc en avoir conscience pour pouvoir faire machine arrière et enclencher un processus de réflexion permettant de prendre alors la « bonne » décision (Kahneman 2012). Le psychologue Olivier Houdé définit ainsi l'intelligence : « L'intelligence, c'est toujours l'inhibition de nos automatismes ».

L'esprit critique pourrait ainsi se résumer à l'appréciation d'une information par rapport aux faits sur lesquels elle repose. Cela est vrai dans n'importe quelle situation, en particulier journalistique. Cette appréciation n'est possible qu'en ayant connaissance des faits. En science cela n'est possible qu'avec les connaissances adéquates. Souvent la notion d'esprit critique s'apparente à celle de scepticisme. Être sceptique devant un résultat est un état d'esprit sain pour le scientifique. Mais on ne peut pas être systématiquement sceptique et vérifier toute information. Le mathématicien Henri Poincaré dans l'introduction de son ouvrage *La science et l'hypothèse* (1917) mentionne que : « Douter de tout ou tout croire, ce sont deux solutions également commodes, qui l'une et l'autre nous dispensent de réfléchir. » L'esprit critique est donc une situation au milieu de ces deux postures extrêmes qui nécessite un travail de recherche et de réflexion.

Nous sommes soumis à de nombreux biais cognitifs comme le biais de confirmation qui consiste à privilégier les informations qui nous confortent dans nos idées préconçues. Les psychologues et sociologues, associent ce biais à la propagation irraisonnée des croyances. Et en particulier sur Internet,

où les résultats d'une recherche sur un moteur quelconque montrent dans les premières places les sites qui sont les plus populaires et non ceux qui distillent l'information la plus sûre.

#### **4.8 Marchands de peur, marchands de doute**

Un certain nombre de médias et d'organismes peu scrupuleux profitent de la crédulité de la population pour susciter la peur et engranger des profits. C'est le cas dans différents domaines touchant, par exemple, à la santé, comme les ondes électromagnétiques de la téléphonie mobile, la radioactivité et le nucléaire, etc.

D'un autre côté, des groupes d'influence détournent la production scientifique pour semer le doute sur certains aspects entre science et société, toujours dans une logique de profits (Bonneuil et al. 2021). Ce sont souvent des industriels qui emploient une stratégie pour instiller du doute dans les résultats scientifiques montrant la nocivité de leurs activités et ainsi diluer les responsabilités de leurs produits sur la santé ou l'environnement. Stratégie qui a largement été utilisée par l'industrie du tabac pour minimiser les effets néfastes de leurs produits sur la santé (Oreskes & Conway 2012).

Cette méthode, efficace, a été reprise, entre autres, par les industriels pétroliers pour semer le doute sur le réchauffement climatique; ou encore les industries phytosanitaires avec les pesticides avec une évolution de cette stratégie, en déléguant l'instillation du doute vers les « gardiens de la raison » : vulgarisateurs amateurs, professionnels ou ONG, conscient (et rémunérés) ou pas, mais pensant « bien faire » (Andreotti & Noûs 2020 ; Foucart et al. 2020).

#### **4.9 Conclusion**

Les enjeux environnementaux sont des enjeux scientifiques avant d'être des enjeux de société. À ce titre, pour les comprendre et s'en faire une idée objective, il faut commencer par comprendre comment la science se construit. Après quoi, les connaissances adéquates sont primordiales.

##### **4.9.1 Cultiver son esprit critique!**

En tant qu'enjeux de société, un regard avec « esprit critique » est nécessaire. L'esprit critique est à la fois un « état d'esprit » et un « ensemble de pratiques » qui se nourrissent mutuellement. Ce n'est jamais un « acquis ». Il faut en permanence l'actualiser et le travailler. On ne peut jamais prétendre le posséder parfaitement, on doit toujours chercher à l'accroître!

##### **4.9.2 Comment naviguer dans les eaux parfois troubles de la connaissance?**

La crise du covid l'a montré, des enjeux autres que scientifiques peuvent prendre le pas sur la connaissance et les « fake news » ne sont jamais très loin. C'est également le cas dans les enjeux écologiques.

Pour « réenchanter » le rationalisme et la science, il faut au maximum se référer aux sources primaires de l'information. Dans le cadre de la science il s'agit des articles scientifiques validés par les pairs. Il faut faire attention aux rapports des agences sanitaires, parfois biaisés par rapport aux résultats scientifiques. Il faut se former pour comprendre le socle de connaissances de base. Enfin, il faut savoir et accepter de se remettre en question.

## **Références**

Andreotti B. & Noûs C. (2020), Contre l'imposture et le pseudo-rationalisme, Zilsel, N° 7(2), pp. 15-53, ISSN 2551-8313, URL <https://www.cairn.info/revue-zilsel-2020-2-page-15.htm>.

Blanc G. & Noûs C., Physique et Enjeux de Société (OPUS | Université Paris Cité 2023), URL <https://opus.u-paris.fr/catalog/download/5/19/1252>.

- Bonneuil C., Choquet P.L. & Franta B. (2021), Early Warnings and Emerging Accountability: Total's Responses to Global Warming, 1971–2021, *Global Environmental Change*, **71**, p. 10, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378021001655>.
- Boutaud A. & Gondran N., Les Limites Planétaires (La Découverte 2020).
- Cook J., Oreskes N., Doran P.T., Anderegg W.R.L., Verheggen B., Maibach E.W., Carlton J.S., Lewandowsky S., Skuce A.G., Green S.A., Nuccitelli D., Jacobs P., Richardson M., Winkler B., Painting R. et al. (2016), Consensus on Consensus: A Synthesis of Consensus Estimates on Human-Caused Global Warming, *Environmental Research Letters*, **11**(4), p. 048002, ISSN 1748-9326, URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.
- Foucart S., Horel S. & Laurens S., Les Gardiens de La Raison (2020), la découverte edition.
- Jouzel J. (2022), Sensibiliser et Former Aux Enjeux de La Transition Écologique et Du Développement Durable Dans l'enseignement Supérieur, Technical report, URL <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/former-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique-dans-le-superieur-83888>.
- Kahneman D., Système 1 / Système2 : Les Deux Vitesses de La Pensée (Flammarion 2012).
- Machon D., Les Bavures Scientifiques, Quand Les Scientifiques Se Prennent Les Pieds Dans La Démarche, volume 36 (2015), book-e-book edition.
- Nakamura K. (2010), Review of Particle Physics, URL <https://pdg.lbl.gov/2011/download/rpp-2010-JPhys-G-37-075021.pdf>.
- Oreskes N. & Conway E.M., Marchands de Doute (Le pommier 2012).
- Steffen W., Broadgate W., Deutsch L., Gaffney O. & Ludwig C. (2015a), The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration, *The Anthropocene Review*, **2**(1), pp. 81–98, ISSN 2053-0196, 2053-020X, URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019614564785>.
- Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter S.R., de Vries W., de Wit C.A., Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G.M., Persson L.M. et al. (2015b), Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet, *Science*, **347**(6223), ISSN 0036-8075, 1095-9203, URL <https://science.sciencemag.org/content/347/6223/1259855>.
- Turner G.M. (2012), On the Cusp of Global Collapse? Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data, *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, **21**(2), pp. 116–124, ISSN 0940-5550, URL <https://www.ingentaconnect.com/content/10.14512/gaia.21.2.10>.