



Les défis environnementaux du XXI^e siècle



Les défis environnementaux du XXI^e siècle

Édition 2022

Ce cours a été écrit par **Ivar Ekeland** et **Aicha BenDhia**, avec la collaboration de **Jacques Treiner** pour le chapitre 7 et de **Margot Malpote** pour les illustrations. Il a bénéficié du soutien de **2050** et de la **Fondation Madeleine**.

Les auteure.s ont souhaité faire de cet ouvrage un bien commun en le plaçant sous licence libre Creative Commons.

Avant-propos





Marie Ekeland

C'était la fin des années 90. L'heure était à la révolution numérique, et je parlais, emplie de curiosité, d'énergie et d'enthousiasme, participer à l'avènement de cette nouvelle ère depuis New York. Clavier à la main, je codais, développant les algorithmes et les interfaces qui remplaceraient les mains levées et les ordres criés aux bourses de Wall Street ou de Paris.

Vint l'an 2000. Les startups s'installaient à Paris malgré la bulle. Le capital-risque aussi, que je découvrais et que je n'ai pas quitté depuis. Je m'attelais à comprendre, au-delà de la technologie, quels étaient la nature, les enjeux, les conséquences, les opportunités et les risques de cette révolution numérique. Comment elle reconfigurait nos modes de vie, nos organisations sociales et nos équilibres économiques. Pour l'accompagner au mieux.

Défilèrent les années 2010. L'avènement des réseaux sociaux, du bitcoin, de l'intelligence artificielle, de la réalité virtuelle. Je comprenais qu'au-delà d'accompagner la révolution numérique, il convenait de choisir ce à quoi l'on voulait qu'elle contribue. Parce que le numérique peut le meilleur comme le pire, et que la finance agit en amplificateur, les deux offrant une puissance d'agir formidable au service de demain. Mais pour quel « demain » ?

Nous sommes en l'an 2020. L'année Covid, l'année masquée. L'heure est à la mutation fertile. Un cycle de transformations redémarre et je sens m'envahir les mêmes curiosité, énergie et enthousiasme qu'il y a 25 ans. Les époques se répondent : une nouvelle fois les jeunes, les chercheurs et les entrepreneurs sont à l'avant-garde, une nouvelle fois cette mutation touche tous les secteurs, tous les continents, toutes les personnes, une nouvelle fois la rapidité à laquelle il nous faut nous adapter aux nouveaux usages nous surprend et dépasse les organisations, encore en train d'absorber la révolution précédente.

Je reprends le cycle au début : comprendre ce qu'il se passe. La mutation fertile repose fondamentalement sur l'adaptation aux bouleversements environnementaux que nous vivons : réchauffement climatique et perte de biodiversité. C'est l'objet de ce livre que de commencer à les décrypter en profondeur, dans toutes leurs dimensions, afin de construire un savoir précieux qui nous permettra d'agir efficacement. Ce savoir est transdisciplinaire, et il a vocation à être enrichi, approfondi, confronté à la pratique et décliné dans tous les métiers.

Pour partager cette intelligence et agir pour éviter le pire et donner toutes ses chances au meilleur, nous avons créé 2050. Sur chaque sujet essentiel à la vie humaine, de l'agro-alimentaire aux services assurantiels, nous déployons une stratégie d'investissement visant à

régénérer la fertilité de nos économies. Nous finançons des écosystèmes d'entreprises alignant leur intérêt économique avec celui de la société et de la planète, nourris par des communs stratégiques qui leur permettent de se développer en puissance et en résilience.

Ce livre en est la première brique, notre premier commun stratégique. Ses auteurs, Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, l'ont mis sous licence libre afin que vous puissiez vous approprier pleinement ce savoir, l'augmenter, le transmettre à votre tour. Il s'agit d'une première dans le monde académique: qu'ils en soient ici remerciés.

Enfin, ce livre est aussi une collaboration inter-générationnelle fructueuse, porteuse d'espoir et d'ouverture, et une transmission familiale. Mon père est le premier à m'avoir éveillée au réchauffement climatique et à la perte de biodiversité ainsi qu'à leurs conséquences, après son séjour à Vancouver dans les années 2000.

Ses coopérations scientifiques lui avaient fait toucher du doigt la réalité de l'extinction progressive des poissons dans les océans à cause de la surpêche. Idem pour la disparition des arbres dans les forêts de Colombie Britannique, nécrosés année après année par un scarabée parasite qui ne mourrait plus l'hiver. Il avait également étudié les conséquences de ces phénomènes sur l'économie locale et la société canadienne, comprenant leur importance et leur inertie.

Je suis heureuse qu'il ait effectué ce formidable travail transdisciplinaire d'exploration, de compréhension et de synthèse de l'état de l'art scientifique, et qu'Aïcha l'ait épaulé pour en faire un savoir transmis sous forme de culture générale. Et je me réjouis que nous puissions vous en faire profiter à votre tour.

2050 démarre aujourd'hui, j'espère avec vous.





Ivar Ekeland

Faut-il avoir peur du réchauffement climatique ? Et de la perte de biodiversité ? Et de l'imprégnation chimique des sols ? Et de toutes ces menaces que couve le 21ème siècle, dont on sent vaguement qu'elles sont liées, et qui sont d'autant plus redoutables qu'on les connaît moins ?

Devant l'incertitude, l'ignorance crée la peur, et la peur paralyse. Je vais prendre une analogie maritime. Quand on part en voiture, on peut planifier son voyage jusqu'au dernier détail : le premier soir je coucherai là, le troisième jour je déjeunerai ici, et j'arriverai à destination tel jour à telle heure. Mais quand on part en croisière c'est une autre affaire : la route dépend du temps qu'il fera, ainsi que de la mer, et on ne peut pas les prévoir longtemps à l'avance. Quelles que soient les précautions prises, on peut rencontrer du mauvais temps, voire du très mauvais temps, et il peut tomber sur vous très vite. Mieux vaut alors être préparé, avoir vu venir le grain, avoir pris des ris, avoir changé la course du bateau et savoir manoeuvrer à la lame. Ce qui est un danger pour l'un est une opportunité pour l'autre.

Oui, il faut avoir peur de la mer si on n'y connaît rien. Mais si on a appris, il ne faut plus en avoir peur, il faut juste savoir qu'elle a ses lois, et qu'il faut les respecter. Le réchauffement climatique, c'est pareil. Il peut se passer beaucoup de choses d'ici 2100, et on ne sait pas où il va nous mener. Mais il a ses lois, et il vaut mieux les connaître si l'on veut être capable d'affronter la traversée. Il y a des lois physiques, comme

l'effet de serre, il y a des lois historiques, comme l'effet rebond, dit aussi effet Jevons, il y a des lois biologiques, comme les grands cycles naturels, et il faut les comprendre si on veut agir efficacement.

Le but de ce cours est de donner le bagage minimal permettant de comprendre le réchauffement climatique. Il est volontairement réduit: nous n'avons pas cherché à approfondir les choses (pour ceux qui le souhaitent, il y a une abondante documentation en ligne), nous avons plutôt cherché à montrer l'unité profonde du phénomène. Pour mettre en place une taxe carbone, par exemple, il faut à la fois comprendre comment les émissions de CO₂ contribuent à l'effet de serre, ce qui relève de la physique, et pourquoi une telle taxe sera mal acceptée si elle n'est pas perçue comme juste, ce qui relève de l'éthique et du droit.

Ah, une dernière chose : on est libre de partir en croisière ou non, on peut même choisir sa date de départ. Pour le réchauffement climatique, on n'a pas le choix : nous sommes tous embarqués, et le bateau est parti. Il est même parti très vite : la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est passée de 313 ppm en 1958 à 415 ppm aujourd'hui, en décembre 2020.





Aicha Ben Dhia

Conaissez-vous la fable de l'éléphant? Dans une pièce se trouve un grand éléphant (c'est une grande pièce!). On y fait entrer dix explorateurs courageux auxquels on a bandé les yeux. Ceux-ci n'ont jamais entendu parler d'éléphant auparavant. Ils s'approchent de l'animal à tâtons et le découvrent du bout des doigts. À leur sortie de la pièce, on les interroge: qu'est-ce qu'un éléphant? À quoi cela ressemble? «C'est vertical, cylindrique massif, et ça ne bouge pas», répond une première exploratrice en mimant des mains. Un second réagit: «Au contraire! C'est courbe, lisse et froid.» Le troisième s'énerve: «Ni lisse, ni froid, c'est plein de poils et ça vole au vent!» La quatrième quitte la pièce en claquant la porte parce que personne n'a même pensé à écouter attentivement les bruits que faisait l'éléphant.

Qu'est-ce que le réchauffement climatique? À quoi cela ressemble? À un glacier qui fond, une éolienne off-shore ou un gilet jaune sur un rond-point? Le livre que vous tenez entre vos mains aimerait être le onzième personnage de la fable: expert de rien mais ouvrant ses oreilles à tout pour réussir à comprendre les bouleversements environnementaux que nous vivons et en construire un dessin cohérent. Il est motivé par l'idée qu'on ne comprend vraiment un problème qu'en croisant les angles de vue; que ces enjeux doivent être accessibles à tous, scientifique ou non, économiste ou pas, plutôt que de subir un flux d'information angoissant et désorganisé; que comprendre, c'est déjà agir.

Cet ouvrage pose le socle et présente les mécanismes naturels qui régulent le climat. On y verra que le climat a toujours changé, au rythme géologique de centaines de milliers d'années, et que les êtres vivants n'en sont pas des spectateurs mais des acteurs interconnectés. Depuis deux cents ans, ce régime est bouleversé et nous allons voir quelles trajectoires futures se dessinent devant nous.

Comment les sociétés se sont-elles saisies de la puissance des énergies fossiles, métamorphosant leur rapport au monde et leurs organisations économiques et sociales? C'est l'objet de la seconde partie.

Nous avons rassemblé ce savoir à l'occasion du lancement d'un cours pluridisciplinaire sur les enjeux écologiques du XXI^e siècle à l'université Paris-Dauphine. Une première dans l'enseignement supérieur — et pas seulement en France! — à destination de tous les étudiantes et étudiants de licence, qu'ils ou elles se destinent au marketing, à la finance ou à l'entrepreneuriat social.

Car toutes nos vies professionnelles — et personnelles — se jouent dorénavant au milieu des tourbillons écologiques que ce livre raconte. Plutôt qu'un tsunami terrifiant, j'espère que ces tourbillons prendront au gré de votre lecture la forme d'une grande vague peinte par Hokusai: immense et belle. Et que cela contribuera à vous inspirer cette posture subtile d'équilibriste entre humilité contemplative et audace joyeuse qu'il nous faut pour surfer dessus!

19	1	Le climat sur Terre a toujours varié, mais jamais aussi vite qu'aujourd'hui!
20		Introduction
22	1	— Le mouvement autour du soleil, le cycle des saisons et le brassage de l'atmosphère
28	2	— L'eau
30	3	— Le climat
31	4	— Les changements climatiques au cours de l'histoire de la Terre
37		Conclusion

39	2	L'atmosphère, une couette gazeuse
40		Introduction
42	1	— L'effet de serre
49	2	— Les gaz à effet de serre (GES)
51	3	— Le forçage radiatif
53		Conclusion

55	3	Les êtres vivants sont tous interconnectés: c'est la biosphère et elle contribue directement au climat terrestre
56		Introduction
58	1	— La biosphère
63	2	— La complexité du vivant
67	3	— La fragilité du vivant
69	4	— D'où viennent l'oxygène et l'énergie dont les vivants ont besoin?
73		Conclusion

75	4	Sur Terre et dans l'atmosphère, le carbone circule en permanence. Que se passe-t-il quand les activités humaines modifient les flux vers l'atmosphère?
76		Introduction
78	1	— Plantes et planctons dans la photosynthèse
81	2	— Cycle du CO ₂
85	3	— Hors de l'équilibre
90	4	— Durée de vie dans l'atmosphère
95	5	— Et la vapeur d'eau dans tout ça?
97		Conclusion

99	5	Observations, expérimentations et interprétations convergent: démarche scientifique et climatocépticisme ne vont pas bien ensemble
100		Introduction
102	1	— Il se passe quelque chose
110	2	— Et du côté des vivants?
117	3	— Le lien avec le CO ₂
122	4	— Le lien avec les activités humaines
125		Conclusion

127	6	Et maintenant, où allons-nous? Comprendre les scénarios du GIEC
128		Introduction
130	1	— Comment fait-on les prévisions?
142	2	— Qu'est-ce que le GIEC?
144	3	— Comment lire les rapports du GIEC?
155		Conclusion



159 **7**
Des carburants fossiles à la transition énergétique
1ère partie — Introduction à l'énergie

- 160 Introduction
- 162 1 — L'énergie
- 176 2 — Énergies primaires
- 182 3 — L'énergie dans le monde
- 188 Conclusion

191 **8**
Des carburants fossiles à la transition énergétique
2ème partie — Leviers d'actions sur les émissions de gaz à effet de serre

- 192 Introduction
- 194 1 — Le budget carbone
- 199 2 — Etat des lieux : les secteurs d'émission
- 203 3 — La réduction des émissions de GES :
quels leviers actionner ?
- 204 4 — La transition énergétique
- 212 5 — L'amélioration des rendements
- 216 6 — L'usage des sols
- 221 7 — L'économie verte, ou comment agir sur la
consommation ?
- 225 Conclusion

229 **9**
Brève histoire sociale des émissions de GES
1ère partie — La révolution industrielle

- 234 Introduction
- 236 1 — Les transformations des conditions de vie
- 244 2 — 1500 – 1800 : l'essor de l'Europe et les premiers
systèmes industriels
- 254 3 — 1800 – 1950 : la révolution du charbon
- 271 Conclusion

273 **10**
Brève histoire sociale des émissions de GES
2ème partie — La Grande Accélération

- 274 Introduction
- 276 1 — La « Belle Époque » des énergies fossiles
- 280 2 — Nouvelles puissances militaires, nouveaux systèmes
industriels
- 294 3 — De nouveaux modes de vie
- 301 Conclusion

305 **Conclusion**

Ce cours est un commun

Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, co-auteur.e.s, ont souhaité faire de cette leçon un bien commun en le plaçant sous licence libre Creative Commons CC-BY-SA 4.0. Cela signifie que vous pouvez réutiliser, distribuer, citer, modifier et adapter les contenus de cette leçon comme bon vous semble, y compris à des fins commerciales, tant que :

1 — Vous l'attribuez de la manière suivante: "Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, avec le soutien de l'Université Paris-Dauphine, la Fondation Madeleine et la société 2050";

2 — Le contenu que vous créez sur la base de celui-ci est placé sous une licence similaire, c'est-à-dire qu'il n'interdit à personne de réutiliser vos améliorations.

Pour plus de détails, nous vous invitons à consulter la licence complète: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fr>

Cette licence ne concerne toutefois pas les illustrations en couverture de chaque leçon ou les travaux référencés, qui demeurent placés sous leur mention légale d'origine.



Déclaration d'intérêts : Ivar Ekeland est indépendant et ne touche d'autre rémunération que ses pensions de retraite. Aïcha Ben Dhia est salariée par la société 2050.do, dont l'une des missions est de construire des ressources communes mises à la disposition de tou.te.s.

Remerciements

Nous remercions l'Université Paris-Dauphine d'avoir soutenu l'idée d'un cours sur le réchauffement climatique obligatoire pour tous les étudiants, quelle que soit leur discipline. Ce cours a été mis en place en Septembre 2020, pour tous les étudiants rentrant à l'Université. Il est basé pour partie sur les leçons disponibles ici, rédigées par nous, et pour partie sur des leçons rédigées par Dominique Méda, Valérie Guillard et Stéphanie Monjon. Cette entreprise a été pilotée, durant l'année universitaire 2019-2020, par un groupe de travail présidé par Eric Agrikoliansky. Le département LSO, dirigé par Renaud Dorandeu, avait ouvert une option en deuxième année, ce qui nous a permis de tester cet enseignement sur un petit groupe d'étudiants motivés.

Merci à Jacques Treiner pour son soutien, ses précieuses relectures et sa contribution significative sur le chapitre 7.

Merci à la Fondation Madeleine et la société 2050, qui ont soutenu le projet dès le début, notamment grâce à l'implication d'Aïcha Ben Dhia. Leur soutien au projet était conditionné à la mise à disposition du cours sous licence *Creative Commons*.

Merci à Quintin Leeds pour la mise en page de cet ouvrage et à Margot Malpote pour les illustrations de chaque chapitre.

Merci à Charly Berthet, Meyha Camara, Dominique Dron, Marie Ekeland pour leurs relectures, corrections et contributions.

Ce cours n'en est qu'à sa deuxième édition, et nous avons à cœur qu'il s'améliore ! Si vous repérez des coquilles, des erreurs ou des oublis, ou si vous avez des suggestions d'amélioration ou d'ajout, écrivez-nous à coursclimat@2050.do.



1

**Le climat sur Terre
a toujours varié,
mais jamais aussi vite
qu'aujourd'hui!**



Introduction

Il y a eu trois découvertes fondamentales pour comprendre les mouvements de la Terre. On sait que la Terre est ronde depuis l'Antiquité, mais il a fallu attendre le 16ème siècle pour savoir qu'elle tourne autour du Soleil et le 19ème siècle pour démontrer qu'elle tourne sur elle-même. De nombreuses conséquences en découlent.

On a pu, par exemple, expliquer l'alternance des saisons, des étés chauds aux hivers froids, à cause de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de sa trajectoire, qui fait qu'on ne reçoit pas les rayons du Soleil avec le même angle suivant le moment de l'année.

Mais on peut aussi expliquer bien d'autres choses encore, comme le régime des vents, indispensable pour naviguer, pour prévoir la météo du jour et pour comprendre... les variations du climat qui nous attendent!

Car le climat change. Si l'on remonte très loin dans l'histoire de la Terre, on sait qu'il a énormément changé. Pour vous donner une idée de l'ampleur de ces changements, il y a 20 000 ans, avec 5 degrés de moins en moyenne sur la planète, New York était sous la banquise. Le climat changera aussi certainement dans le futur lointain. Ces changements sont liés à des modifications de l'orbite terrestre. Alors, pourquoi s'inquiéter si le climat change en ce moment?

C'est qu'il change très vite, beaucoup trop vite. Jusqu'à présent, les changements étaient graduels, car ils suivaient les modifications très lentes de l'orbite terrestre. Ces modifications prennent des dizaines de milliers d'années. Cela laissait aux êtres vivants le temps de s'adapter. Mais les changements que nous observons aujourd'hui sont concentrés sur quelques dizaines d'années, et les conséquences sont très dif-

férentes. C'est un peu comme si vous étiez dans une voiture qui roule à 100 km/h et qui doit s'arrêter: est-ce que vous allez vivre la même expérience si on vous donne 1000 mètres pour freiner, ou 1 mètre? Dans le premier cas c'est un freinage, dans le second c'est un crash.

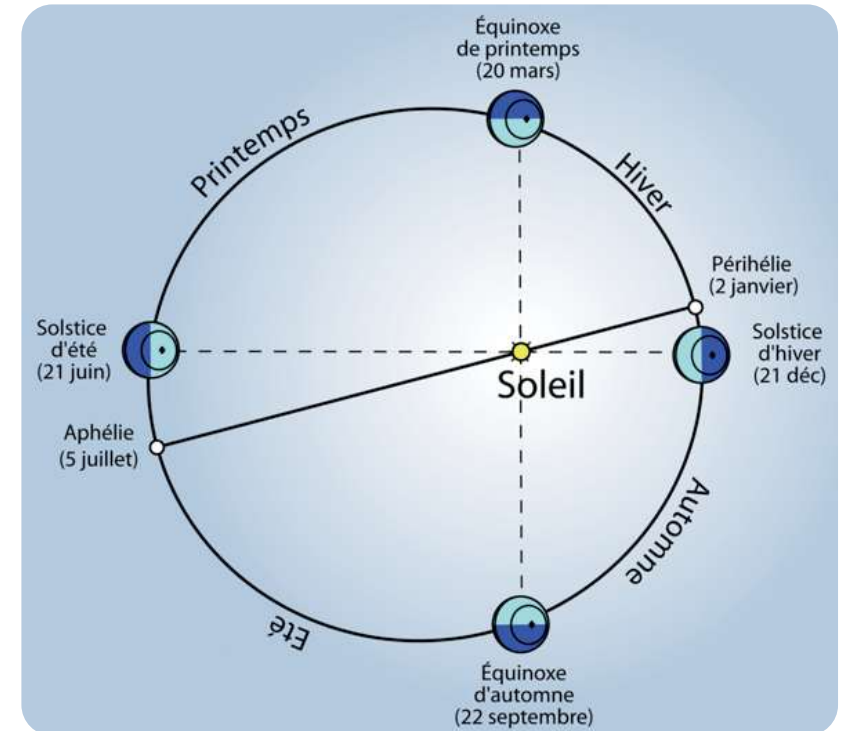


1

Le mouvement autour du Soleil, le cycle des saisons et le brassage de l'atmosphère

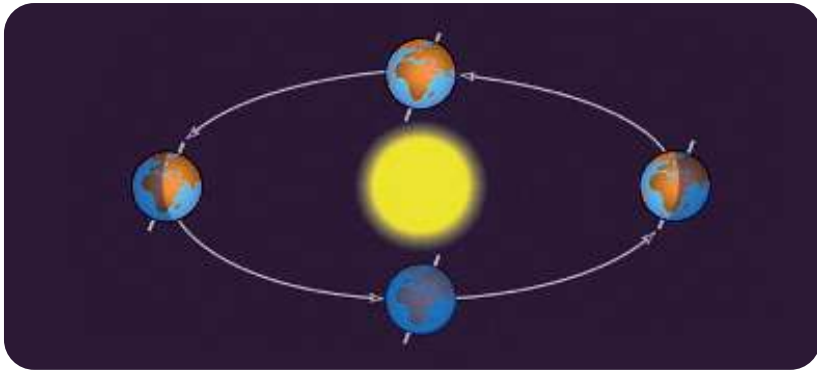
1.1. Les deux rotations de la Terre

La Terre est animée par deux mouvements principaux. D'une part, elle tourne autour du Soleil. Sa trajectoire est plane (pas comme un papillon de nuit qui tourne autour d'une ampoule en montant et descendant sans cesse, mais comme un patineur sur glace qui reste sur un même plan horizontal). Au 17^{ème} siècle, Kepler (1571-1630) découvre que cette trajectoire n'est pas exactement un cercle mais une ellipse, ce qui veut dire qu'il y a un point qui est le plus proche du Soleil, et un point qui est le plus éloigné. Le temps que la Terre met à parcourir l'ellipse est l'année. D'autre part, la Terre tourne sur elle-même. L'axe de cette rotation passe par les pôles. Le temps qu'elle met à effectuer une rotation complète est la journée. Chacun de ces mouvements est simple. Si on considère leur combinaison, cela commence déjà à se complexifier.



Rotation de la Terre autour du Soleil et alternance des saisons dans l'hémisphère Nord.

Source : www.soutien.proffexpress.com

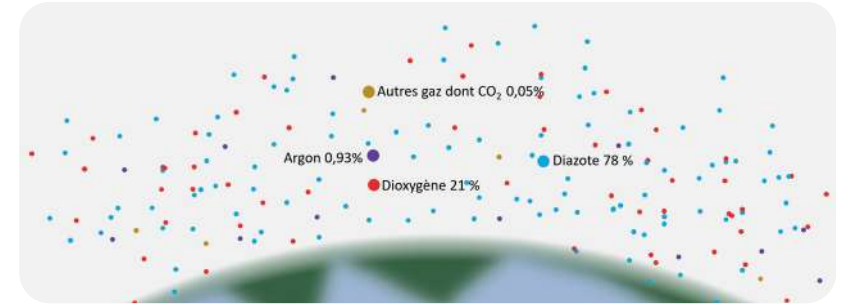


Variation de l'exposition au Soleil dans les hémisphères due à l'inclinaison de l'axe

Pourquoi avons-nous des saisons ? Parce que l'axe de rotation de la Terre est incliné : il garde toujours la même direction dans l'espace et n'est pas exactement perpendiculaire avec le plan de l'orbite mais fait un angle d'environ 23° avec celui-ci. De ce fait, pendant la moitié de l'année, un des hémisphères sera penché vers le Soleil, et durant l'autre moitié, ce sera l'autre. Les saisons sont certainement l'exemple qui nous est le plus familier de la dépendance du climat aux mouvements astronomiques.

1.2. L'atmosphère

Il faut introduire un dernier facteur-clé pour comprendre le climat: **l'atmosphère**. L'atmosphère est une **couette gazeuse** qui entoure la Terre, constituée à 78% de molécules de diazote, à 21% de dioxygène, 0,93% d'argon, et moins de 0,05% d'autres gaz comme le dioxyde de carbone (le fameux CO_2). Beaucoup de planètes du système solaire ont des atmosphères. Mais leurs compositions sont très différentes de celle de la Terre. Par exemple, l'atmosphère de Mars contient principalement des molécules de dioxyde de carbone et presque pas du tout de dioxygène. Celle de Vénus est surtout faite de dioxyde de carbone. Sur l'une comme sur l'autre, impossible aux animaux terrestres de respirer.



Résumé

Atmosphère, rotation de la Terre autour du Soleil, et rotation inclinée de la Terre sur elle-même: voilà les facteurs astronomiques qui déterminent le climat terrestre.

1.3. Le brassage de l'atmosphère par les vents

Si vous demandez la météo de demain à Paris, quelles informations souhaitez-vous obtenir exactement? **La température** au sol bien sûr. C'est le premier élément de la météo. Quel est le second? **Le vent**. Qu'est-ce que le vent? Rien d'autre que les molécules en suspension dont nous venons de parler (diazote, dioxygène...) qui se déplacent ensemble dans l'atmosphère.

Mais est-ce que cela dépend vraiment des mouvements astronomiques? La réponse est oui. Si l'on monte dans un satellite et qu'on observe les grands déplacements d'air à l'échelle planétaire pendant une année, on s'aperçoit qu'il y a une **grande régularité** et que ces déplacements peuvent être expliqués par les mouvements astronomiques de la Terre.

D'ailleurs, vous connaissez certainement des mouvements d'air réguliers et prédictibles. Dans un sauna par exemple, est-ce que l'air chaud monte ou est-ce qu'il descend? Il monte! Et que se passe-t-il lorsque vous faites bouillir de l'eau liquide dans une casserole? Les molécules

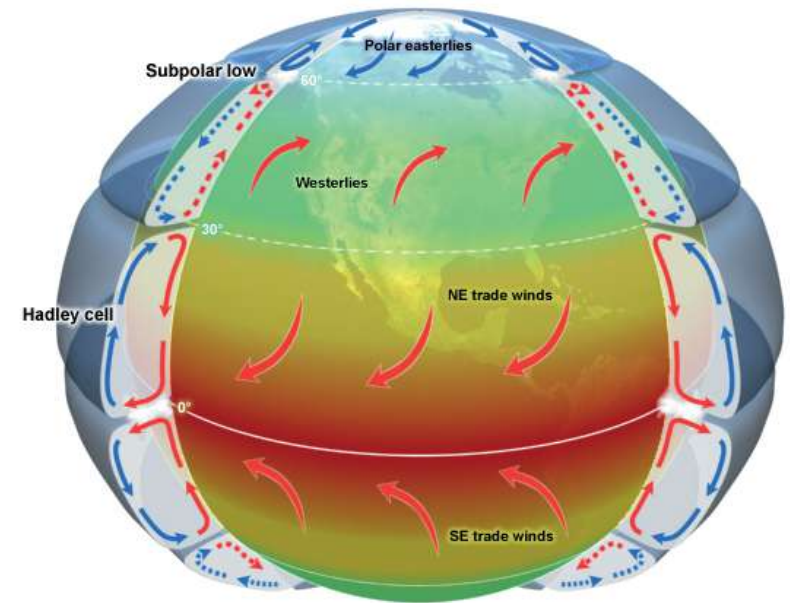


se désolidarisent les unes des autres et l'eau liquide se transforme en eau gazeuse, aussi appelée vapeur d'eau. Dans quelle direction vont ces molécules d'eau sous forme gazeuse? Vers le haut! Car dans un gaz, ce qui est chaud monte et ce qui est froid descend.

Ce genre de **règles mécaniques** s'applique aussi à l'échelle planétaire (les courants d'air chaud montent, ils sont déviés de différentes façons car la Terre tourne d'Ouest en Est, etc.). Cela explique pourquoi les vents soufflent régulièrement d'un point à l'autre du globe. La figure ci-dessous donne une représentation schématique du régime des vents sur la Terre, avec les flux chauds en rouge et les flux froids en bleu. L'essentiel ici n'est pas de connaître chacun des mouvements mais de comprendre que ces mouvements d'air sont aussi prédictibles et réguliers que l'air chaud qui monte dans un sauna.

Arrêtons-nous un instant pour noter un second point capital. Cette figure montre que l'atmosphère terrestre est **brassée en permanence**. Cela veut dire que si l'on envoie une molécule persistante en suspension dans l'atmosphère, elle restera peut-être en suspension mais ne restera pas sur place. Elle sera déplacée d'un point à l'autre du globe au gré des vents.

Ainsi si une entreprise émet du CO₂, le gaz émis ne stagne pas au-dessus d'elle. Si tel était le cas, elle en souffrirait elle-même (et prendrait sans doute bien vite les mesures nécessaires pour y remédier). C'est parce que le gaz est dispersé qu'elle peut le négliger et le laisser se répandre sur la planète. Faute d'être réglé localement, la pollution devient alors un **problème global**.



Orientation des vents atmosphériques.

Source: The COMET Program

Résumé

- ♦ Les vents terrestres sont régis par les mouvements astronomiques de la Terre. Ils suivent des déplacements largement prédictibles et réguliers.
- ♦ L'atmosphère est brassée en permanence: toute molécule qui se maintient en suspension voyage d'un point à l'autre du globe.

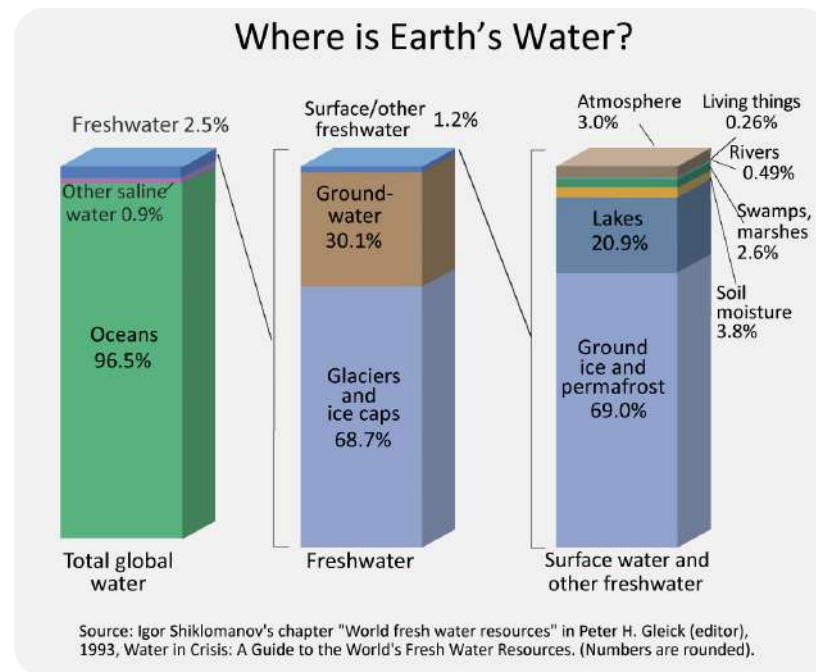
2 | L'eau

Température au sol, force et direction des vents. Que manque-t-il à ce bulletin météo pour savoir si vous devez organiser un pique-nique ou une sortie au cinéma? L'eau bien sûr!

L'eau, c'est-à-dire: les nuages, la pluie, la neige, la grêle, la glace. La planète Terre est la seule du système solaire où les températures sont assez clémentes pour que l'on y trouve l'eau sous ses trois formes: solide, liquide, gazeuse. L'immense majorité de l'eau sur Terre se trouve sous forme liquide, dans l'océan (97%), dans les rivières, dans la végétation et le sol. Elle se trouve ensuite sous forme solide, dans les calottes glaciaires (2%) c'est-à-dire essentiellement la banquise.

Il y en a moins de 0,001% sous forme gazeuse: c'est la **vapeur d'eau** de l'atmosphère.

C'est une proportion infime de l'eau présente sur la Terre, mais elle joue pourtant un rôle capital, comme nous le verrons plus tard. Pour l'instant, contentons-nous de constater qu'elle est extrêmement visible, sous forme de nuages ou de précipitations, et que l'humidité est, avec la température et les vents, la troisième donnée essentielle de la météorologie.



Lecture: 96,5% des molécules d'eau présentes sur Terre se trouve sous forme liquide dans les océans. L'eau douce ne représente que 2,5%, dont les deux tiers (68,5%) sont dans les glaciers et les calottes glaciaires. Il n'y a qu'une infime portion de l'eau (2,5% x 1,2% x 3%) qui se trouve sous forme de vapeur dans l'atmosphère.

Source: Igor Shiklomanov dans "Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources.", Peter H. Gleick



3

Le climat

Température, humidité, vent en un point donné à un instant donné : voilà les trois composantes de la **météo**.

Ces composantes varient d'instant en instant et de place en place. Mais si vous enregistrez ces variations sur plusieurs journées, et cela pendant des mois, vous verrez qu'elles suivent des **cycles périodiques**. La plupart de ces cycles nous sont devenus très familiers (on sait tous que dans l'hémisphère Nord, il fait quasiment toujours plus chaud en juillet qu'en mars, et en mars qu'en décembre ; ou bien encore qu'il pleuve plus en novembre qu'en juin).

C'est pourquoi on peut faire des moyennes sur plusieurs années et parler du « **climat** » d'un endroit donné sans spécifier une année en particulier. Ces **moyennes** sont en général prises sur trente ans, et dépendent de l'endroit où l'on se place.

Ce sont ces moyennes de températures, vents et précipitations qui constituent le « climat ».

Résumé

- ♦ Une très faible proportion de l'eau sur terre est sous forme gazeuse, en suspension dans l'atmosphère (nuage, humidité, brouillard), mais elle joue localement un rôle important sur le climat.
- ♦ Le climat en un point est la donnée moyenne de la température, des vents et des conditions d'humidité en ce point. Les moyennes sont généralement faites sur trente années d'observation.

4

Les changements climatiques au cours de l'histoire de la Terre

4.1. Le climat change. Comment le sait-on ?

Logiquement, si les facteurs astronomiques, comme l'orbite terrestre ou l'inclinaison de l'axe, changent, le climat changera. A l'heure actuelle, l'orbite terrestre est une ellipse presque circulaire avec une inclinaison de l'axe de rotation de 23 degrés par rapport à la verticale. Si par exemple l'axe s'écarte davantage de la verticale, les jours d'été rallongeront et les jours d'hiver raccourciront car les saisons seront encore plus marquées dans les deux hémisphères.

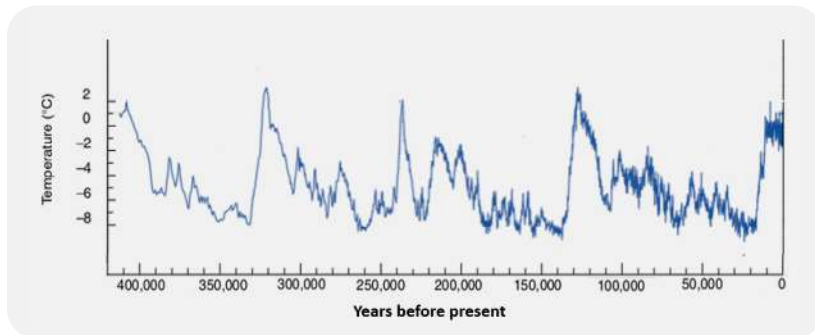
Effectivement, tous ces facteurs changent, suivant des cycles réguliers : de l'ordre de 400 000 ans pour l'orbite, de 40 000 pour l'inclinaison, et de 26 000 pour les solstices. Naturellement, le climat change avec. Comment le prouve-t-on ? Comment arrive-t-on à remonter le temps et reconstituer les climats passés ?

Il reste des traces des changements climatiques passés dans les fossiles, les pollens par exemple, qui permettent de reconstituer la végétation. Mais la grande avancée est due aux **forages polaires**. L'idée de base est que la composition de la neige et de la glace dépend de la température et de l'insolation au moment où elles se sont formées. En outre, elles emprisonnent des bulles d'air qui témoignent de la composition de l'atmosphère à cette époque. On dispose donc d'archives qui permettent de mettre en parallèle la température et la teneur en

dioxyde de carbone (CO_2) et en méthane (CH_4). Les premiers carottages, en Arctique, ont permis de remonter 80 000 ans en arrière, et les carottages réalisés en Antarctique nous permettent de remonter dix fois plus loin !

4.2. Relation entre température et gaz à effet de serre

Le graphique ci-dessous est une reproduction de la courbe de température mesurée dans la glace sous la base russe de Vostok en Antarctique (tirée de l'article scientifique Petit et al. (1999)¹). La courbe ne donne pas directement une température absolue, elle donne les écarts de température par rapport à une température de référence de -55°C . Les températures relevées varient donc entre -53°C et -64°C environ. Mais ce qui frappe en regardant la figure, c'est la **régularité des variations**, avec un pic tous les 100 000 ans environ.



Évolution de la température au-dessous de la station de Vostok.

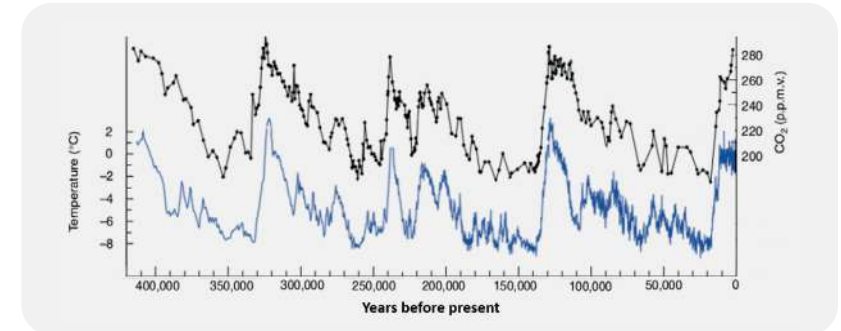
Source: www.climatedata.info

Cette **vitesse très lente** correspond bien aux variations des paramètres astronomiques. La chute quasiment verticale qu'on observe tous les cent mille ans ou à peu près (et qui correspond à des chutes de température de 10°C environ) s'effectue quand même sur 10 000 ans !

On peut ensuite y superposer la courbe de **concentration de CO_2** en noir. Comme on l'a vu dans la partie précédente, l'air de l'atmosphère

contient très peu de molécules de CO_2 , de l'ordre de 0,05%. Pour exprimer la teneur de l'air en CO_2 , on n'utilise donc pas les pourcentages mais les **« pour-millions »**, c'est-à-dire qu'on indique le nombre de molécules de CO_2 par million de molécules d'air. Cela se dit « partie-par-million » et correspond à la notation **« ppm »**.

Le parallélisme des deux courbes est frappant.

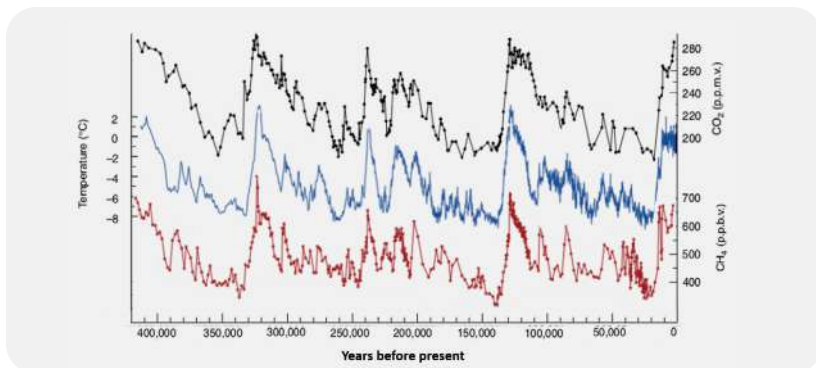


Évolution conjointe de la température et de la concentration de CO_2 dans l'air.

Source: www.climatedata.info

Ajoutons enfin la courbe du méthane CH_4 en rouge. Il y a encore moins de particules de CH_4 que de CO_2 dans l'atmosphère. On exprime donc la teneur de l'air en CH_4 en « parties-pour-milliards », en anglais « part-per-billion ». Cela correspond à la notation « ppb ». Là encore, la corrélation avec les deux autres courbes est très visible.





Évolution conjointe de la température et des concentrations du CO₂ et du CH₄ dans l'air.

Source: www.climatedata.info

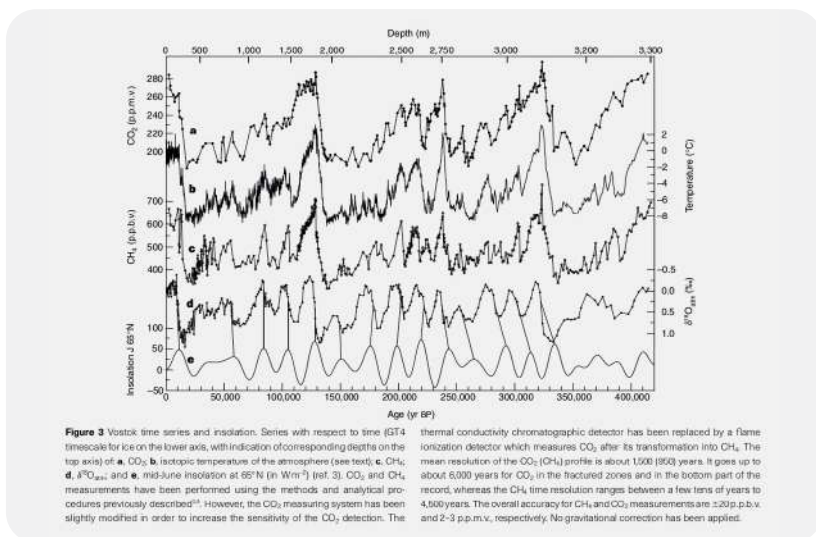


Figure 3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (IST4 timescale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the top axis) of: **a.** CO₂, **b.** isotopic temperature of the atmosphere (see text), **c.** CH₄, **d.** $\delta^{18}O_{atm}$ and **e.** mid-June insolation at 65°N ($W m^{-2}$) (ref. 3). CO₂ and CH₄ measurements have been performed using the methods and analytical procedures previously described¹⁴. However, the CO₂ measuring system has been slightly modified in order to increase the sensitivity of the CO₂ detection. The thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO₂ after its transformation into CH₄. The mean resolution of the CO₂ (CH₄) profile is about 1500 (953) years. It goes up to about 6000 years for CO₂ in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH₄ time resolution ranges between a few tens of years to 4,800 years. The overall accuracy for CH₄ and CO₂ measurements are 2.0 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

Évolution temporelle des paramètres climatiques au-dessous de la station de Vostok.

Petit, J., Jouzel, J., Raynaud, D. et al., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436 (1999). <https://doi.org/10.1038/20859>

Voilà le graphique issu de l'article scientifique d'origine. La **corrélation** entre la teneur de l'atmosphère en CO₂ et en CH₄ (méthane) et la température est évidente. Est-ce que cela implique que la teneur en CO₂ et en CH₄ soit la cause des variations de température? Sans informations supplémentaires, la réponse rigoureuse à cette question est « pas nécessairement ». A priori cela pourrait être l'inverse (une température plus chaude pourrait accroître les quantités de gaz carbonique et de méthane dans l'air) ou peut-être qu'un autre facteur inconnu influence tous ces paramètres conjointement. Mais à ce stade de l'enquête, une chose est sûre: les périodes où l'atmosphère contient de CO₂ et de CH₄ sont aussi les périodes où il fait le plus chaud.

4.3. Les changements climatiques récents

Terminons ce chapitre en revenant à l'image de la voiture et du crash. Quand on voit ces variations, on se dit que la Terre en a vu d'autres! Peut-être, après tout, n'y a-t-il pas de raison de s'inquiéter si nous traversons à nouveau une zone de turbulence climatique.

La Terre, oui, mais l'humain? Sur ce long axe du temps, qui n'est encore pas grand-chose à l'échelle de l'âge de la planète Terre, on peut dire approximativement que l'espèce humaine est apparue il y a 10 000 ans. En zoomant sur ces 10 000 dernières années, on observe une **stabilité exceptionnelle** de la température à des valeurs relativement hautes, entre -56°C et -54°C. Cette stabilité a profité aux êtres humains et à leur écosystème pour s'adapter, se maintenir et se développer.

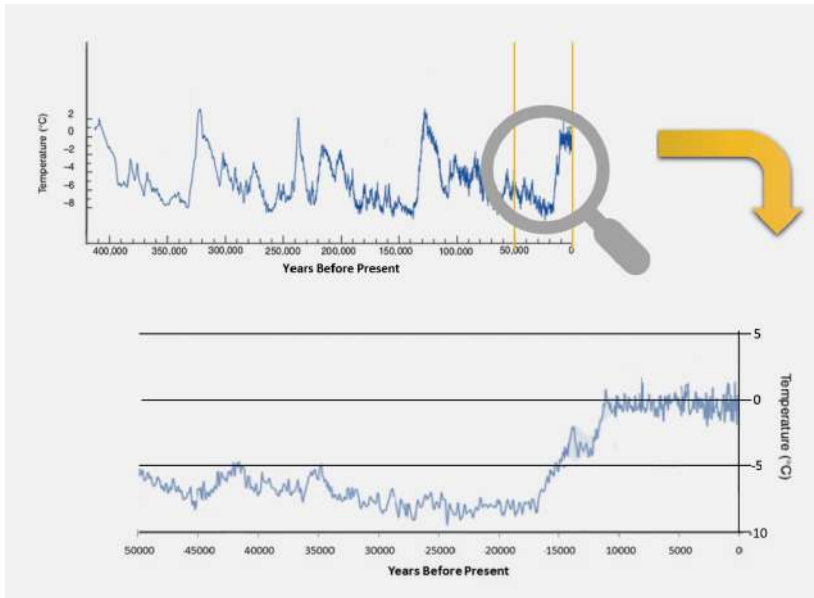
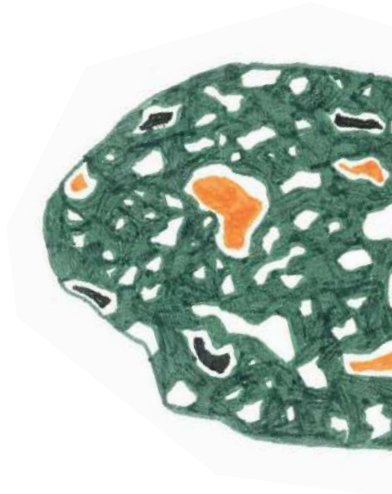


Conclusion

Les personnages sont en scène : la Terre et son atmosphère, les vents et les molécules en suspension qu'ils transportent, diazote, dioxygène et en infime proportion, gaz carbonique, vapeur d'eau, méthane...

Puis le script: variations régulières et parallèles des personnages centraux – température, gaz carbonique, méthane – suivant dans l'ensemble les modifications de la trajectoire de la Terre dans le système Solaire. Un script vieux de 500 000 ans et que l'on sait déchiffrer en plongeant dans les glaces millénaires de l'Antarctique. Cela laisse rêveur.

Mais la pièce prend depuis deux siècles un nouveau tour. Car les variations climatiques observées depuis la Révolution Industrielle n'ont rien des légères fluctuations observées pendant les 10 000 dernières années de stabilité. Ces variations sont du même ordre que les grands cycles astronomiques... mais sur une échelle de temps mille fois plus rapide.



Zoom sur l'évolution de la température sur les 50 000 dernières années.

Source: www.climatedata.info

Résumé

- ♦ On connaît les températures et la composition de l'atmosphère passées en effectuant des carottages dans la banquise et les lacs gelés de Sibérie.
- ♦ La température sur Terre a varié de façon cyclique, au gré des variations des facteurs astronomiques, sur des échelles temps de l'ordre de la dizaine de milliers d'années.
- ♦ Les variations de température et les teneurs de l'atmosphère en CO_2 sont très fortement corrélées, ce qui suggère qu'elles sont liées.
- ♦ Les 10 000 dernières années sont caractérisées par une remarquable stabilité de températures hautes qui a profité à l'espèce humaine et à celles qui l'entourent.





2

L'atmosphère, une couette gazeuse



Introduction

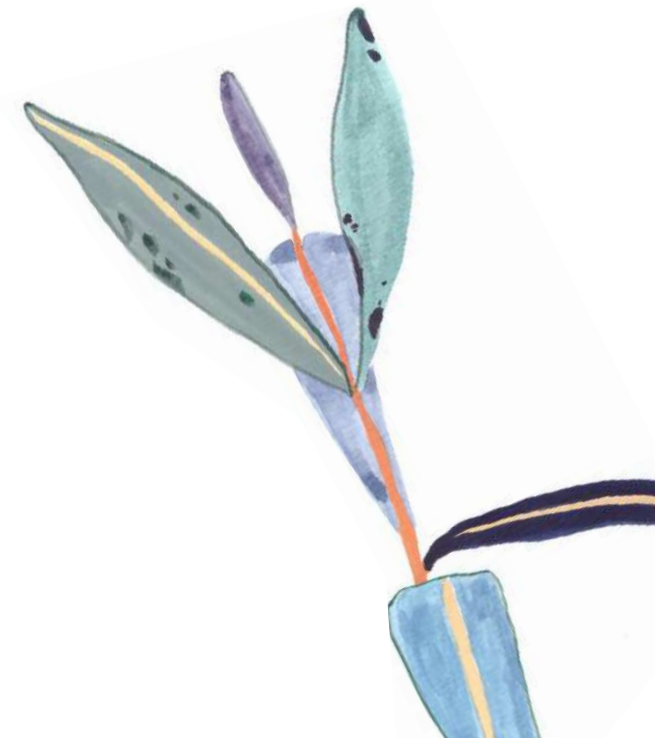
Lorsque vous partez camper, n'oubliez pas votre sac de couchage. Si vous n'en avez pas, vous aurez trop froid pour dormir. La chaleur de votre corps va diffuser autour de vous: au mieux elle réchauffera la tente si vous en avez une, mais pour vous elle sera perdue. Si vous en avez un, il vous renverra une grande partie de la chaleur que vous émettez, et c'est comme cela que vous aurez chaud.

Notre planète aussi a un sac de couchage: c'est son atmosphère. Elle absorbe une partie de la chaleur émise par la Terre et la lui renvoie.

L'atmosphère est souvent comparée à une serre agricole. On peut aussi songer à un sac de couchage. Vous savez que les sacs de couchage sont plus ou moins chauds suivant leur épaisseur et la qualité de ce qui est à l'intérieur: les sacs les plus chauds et les plus chers sont rembourrés en plumes de canard.

Ce qui remplace les plumes de canard, dans le cas de l'atmosphère, ce sont certaines molécules qui retiennent très bien la chaleur. Ce sont ces gaz qu'on appelle gaz à effet de serre: ceux que vous connaissez (le gaz carbonique, le méthane...) et un autre auquel vous ne pensez peut-être pas: la vapeur d'eau.

Plus il y en a, plus l'atmosphère est chaude. Ajouter des gaz à effet de serre dans l'air, c'est comme ajouter des plumes de canard dans le sac: cela épaissit le sac. Le problème, c'est qu'on peut facilement retirer les plumes d'un sac de couchage, mais qu'on ne sait pas retirer facilement le gaz carbonique de l'atmosphère. S'il fait déjà trop chaud aujourd'hui, il fera encore plus chaud demain.



1

L'effet de serre

1.1 Le rayonnement des corps chauds

La surface du Soleil est à une température de l'ordre de 5700 degrés Celsius. C'est une température considérable! Cette température est directement liée à la lumière que le Soleil nous renvoie. C'est même exactement parce qu'il chauffe que le Soleil nous envoie des rayons lumineux. Plus étonnant encore: ce principe est vrai pour tout objet. Tout objet (votre montre, votre orteil, un brin d'herbe) émet du rayonnement lumineux, et ce rayonnement dépend directement de sa température.

Vous répondrez peut-être que quand la bouilloire chauffe, elle n'illumine pas la cuisine. D'un autre côté, vous connaissez les lunettes infra-rouges qui permettent de détecter des corps humains dans le noir dans les films d'espionnage parce qu'ils sont plus chauds que le reste des objets dans la pièce (ou plus récemment de mesurer à distance les températures anormalement élevées en prévention du covid-19). Eh bien, si vous chaussez vos lunettes infrarouges en vous faisant un thé, vous verrez aussi votre bouilloire dans le noir!

Pourquoi? Il serait compliqué d'entrer dans le détail de cette loi fondamentale de la physique moderne et nous allons nous contenter d'en illustrer les principes essentiels.

1. Chauffer un objet de matière (un morceau de bois, votre main ou de la vapeur d'eau) revient à créer de **l'agitation des atomes et molécules** qui le composent. Cela doit vous rappeler le chapitre précédent et la formation de la vapeur d'eau. Avant même d'atteindre 100 degrés Celsius, le fait de chauffer de l'eau liquide crée de l'agitation à l'intérieur de la casserole. C'est aussi pour cela qu'il faut mettre de l'eau chaude

si l'on veut infuser du thé: leur agitation permet à toutes les molécules d'eau d'imbiber rapidement les feuilles de thé et de diffuser leur parfum dans la tasse.

2. Plus mystérieux: lorsqu'un atome (ou une molécule) s'agite, il peut se décharger de son énergie en envoyant des **ondes lumineuses**. La surface du Soleil est à une température très élevée. Elle est donc composée d'atomes très agités, et ces atomes ne demandent qu'à se décharger d'une partie de leur énergie en renvoyant de la lumière partout dans le système solaire.¹

3. Alors pourquoi votre bouilloire n'est pas une boule disco à facettes dans votre cuisine? Cela tient à la **forme des ondes** qu'elle envoie et à la **sensibilité de nos yeux**. En effet, une onde lumineuse, comme les vagues sur la mer, peut avoir plusieurs formes: certaines ondes sont très étalées (les «sommets» de chaque vague sont très espacés), d'autres sont très compactes. On dit qu'une onde peut avoir une grande longueur d'onde (sommets très espacés) ou une petite **longueur d'onde** (sommets très rapprochés). S'agissant des ondes lumineuses, il n'y a pas de relation entre la vitesse de l'onde et sa longueur d'onde (c'est d'ailleurs vrai aussi pour les ondes acoustiques et c'est pour cela que toutes les notes d'un accord, malgré leurs différentes longueurs d'onde, atteignent votre oreille au même moment).²

Plus un objet a une **température élevée**, plus il rayonne des ondes lumineuses compactes, c'est-à-dire à courtes longueurs d'onde, et plus ces ondes seront **nombreuses**. Le Soleil étant très chaud, il émet principalement des ondes lumineuses à très courtes longueurs d'onde et il en émet énormément. Celles que notre œil est apte à détecter ont une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètre (un

¹ — C'est la loi fondamentale de rayonnement des corps noirs, qui a été décrite au 20^{ème} siècle.

² — En conséquence, les ondes lumineuses à grandes longueurs d'onde sont les ondes de plus basses fréquences.



micromètre est 1 000 000 fois plus petit qu'un mètre). C'est ce qu'on appelle couramment la **lumière visible**. La bouilloire, elle, est beaucoup moins chaude que le Soleil: elle émet donc des rayons lumineux à plus grandes longueurs d'onde, que notre œil humain ne « voit » pas, et elle en émet beaucoup moins.

4. L'objet chaud perd une partie de son énergie et se refroidit en émettant des ondes lumineuses. Cette énergie est contenue dans les ondes émises, qui, en arrivant au contact d'un nouvel objet, sur Terre par exemple, peuvent lui **transmettre cette énergie** et le **chauffer**. Lorsqu'on dit que le Soleil « chauffe » la Terre, on signifie qu'il transmet de l'énergie en envoyant des ondes lumineuses que la Terre « absorbe ».

Résumé

- ♦ Un objet ayant une température plus élevée qu'un autre est un objet dont les atomes et molécules qui le composent s'agitent davantage et qui peuvent décharger une partie de leur énergie en émettant des ondes lumineuses. Les ondes lumineuses vont toutes à la même vitesse mais auront des longueurs d'ondes d'autant plus courtes que la température de l'objet est élevée.
- ♦ L'œil humain perçoit les ondes lumineuses uniquement pour certaines longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 micromètre.
- ♦ L'objet qui émet perd de l'énergie et se refroidit. Les ondes lumineuses émises transportent cette énergie et peuvent la transmettre aux objets qu'elles atteignent et qui, en conséquence, se réchauffent.

1.2 Le rayonnement de la Terre et les conditions d'équilibre

C'est donc l'énergie transportée par le rayonnement solaire qui réchauffe les objets célestes qu'il rencontre, et notamment la Terre. Celle-ci, étant chauffée, va émettre à son tour du rayonnement. La Terre reçoit donc de l'énergie (le rayonnement solaire), et en émet (son propre rayonnement). Ces deux rayonnements sont-ils également chargés en énergie?

Raisonnons. Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'au cours des 10000 dernières années, la température sur Terre était très stable. Si le rayonnement que la Terre recevait au cours d'une année était supérieur à celui qu'elle renvoyait, que se passerait-il? La Terre aurait un « surplus » d'énergie, donc un surplus de chaleur. Elle se mettrait donc à chauffer, tous les ans un peu plus, ce qui n'est pas ce qu'on observe sur les 10000 ans de l'holocène. De façon identique, si la Terre émettait davantage d'énergie qu'elle n'en recevait, elle refroidirait.

Résumé

- ♦ Si elle est à l'équilibre thermique, la Terre ne peut qu'émettre exactement la même quantité d'énergie qu'elle reçoit.

1.3 Le rôle de l'atmosphère et l'effet de serre

Les physiciens ont beaucoup étudié le rayonnement émis par un corps chaud et ont trouvé une équation qui prédit parfaitement la forme des ondes lumineuses émises par un corps chaud en fonction de sa température. Nous avons vu que dans le cas du Soleil, à 5700°C, les ondes lumineuses émises s'étendent de l'ultraviolet à l'infrarouge, la plupart de longueur d'onde autour de 0,6 micromètres (lumière visible par l'œil humain). Comme la température du sol terrestre est beaucoup plus faible que celle de la surface solaire, le rayonnement émis par le sol de la Terre est décalé vers les grandes longueurs d'onde. Il se situe dans ce qu'on appelle l'**infrarouge**, avec des longueurs d'ondes autour de 10 micromètres, bien loin de la lumière visible par l'œil humain³.

Ce rayonnement terrestre échappe donc à notre vision... mais pas à toutes les molécules de l'atmosphère. Certaines grosses molécules de l'air (le CO₂, l'H₂O, ...) sont sensibles aux ondes à grandes longueurs d'ondes émises par la Terre. Plutôt que de les laisser passer (comme

³ — On parle d' "infra-rouge" car les ondes émises par la Terre ont des fréquences plus faibles que celles de la lumière visible rouge.

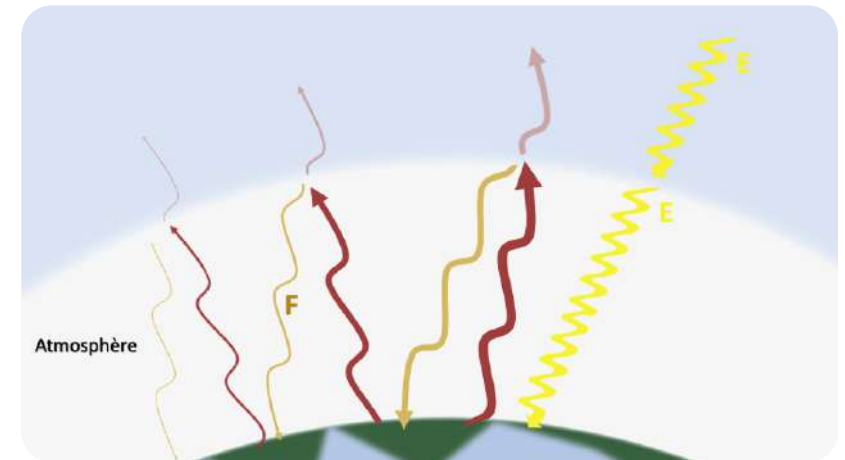


une bouée dans la mer laisse passer les ondes des vagues), elles absorbent l'énergie portée par les ondes lumineuses terrestres, chauffent, s'agitent, et finissent par se décharger à leur tour, en renvoyant des ondes lumineuses dans toutes les directions. C'est encore le principe de rayonnement lumineux lié à la température des molécules qui s'applique.

Au bilan, cela signifie que la Terre ne reçoit pas seulement le rayonnement direct du Soleil, mais aussi celui qui est partiellement absorbé puis ré-émis par l'atmosphère dans sa direction. Comme un sac de couchage qui retient la chaleur de votre corps quand vous dormez, comme une serre agricole qui piège de l'air chaud près du sol, l'atmosphère retient une partie de la chaleur de la Terre.

On peut décomposer ces flux d'énergie en période d'équilibre climatique. Le rayonnement du Soleil (E) arrive sur l'ensemble Terre + Atmosphère. Ces ondes à courtes longueurs d'onde traversent l'atmosphère sans être interceptées par l'atmosphère. Arrivant sur le sol terrestre, une partie est directement réfléchi. Par quoi? Principalement la banquise, mais aussi les glaciers et toute autre surface de réverbération. Le reste est absorbé par la Terre: par votre peau qui rougit au Soleil, par les plantes qui utilisent cette énergie pour croître, par les océans qui chauffent.

En sens retour, la Terre chauffée renvoie des ondes lumineuses, cette fois principalement dans l'infrarouge. Les molécules comme H_2O ou CO_2 agissent alors en miroir partiel: une partie (environ 40%) des ondes terrestres est renvoyée sur Terre, et le reste traverse l'atmosphère et repart dans le système Solaire. Une nouvelle «boucle émission-absorption-réémission» est initiée comme sur le dessin ci-dessous avec les flèches beiges redescendant vers la Terre:



Au total, la Terre est donc chauffée de deux manières: par les ondes solaires directes, d'une part, et par la somme de toutes les ondes renvoyées par la couette atmosphérique, d'autre part. Appelons cette somme F . Si le climat sur Terre est stable (comme on l'a supposé plus haut), alors la Terre ne doit recevoir ni plus ni moins d'énergie qu'elle n'en émet. Autrement dit la Terre, doit être à une température telle qu'elle ré-émet exactement $E+F$. S'il n'y avait pas d'atmosphère, F serait égal à 0 et à l'équilibre, la Terre serait exactement à une température telle qu'elle renverrait une quantité d'énergie E . Sans atmosphère, les physiciens ont précisément calculé que la température (moyenne) de la Terre devrait être de $-19^{\circ}C$. En réalité, elle est de $15^{\circ}C$, soit une différence de $34^{\circ}C$. Ce n'est pas rien!

Que se passe-t-il si l'atmosphère se charge soudainement de plus de molécules de CO_2 ? On comprend que la Terre va se réchauffer, car F va augmenter. Il y a plus: un tel changement, soudain, dans la composition de l'atmosphère est un changement structurel. La température de la Terre, comme celle de votre corps sous les couvertures, s'y ajuste progressivement pour éventuellement atteindre un nouvel équilibre.

Autrement dit, un changement ponctuel mais structurel a des effets durables et on n'en observe pas immédiatement les conséquences.

Résumé

- ♦ L'atmosphère est responsable de l'«effet de serre» qui réchauffe la Terre.
- ♦ Cela est dû à quelques molécules spécifiques qui absorbent les ondes de grande longueur d'onde et émettent du rayonnement vers la Terre.

2

Les gaz à effet de serre (GES)

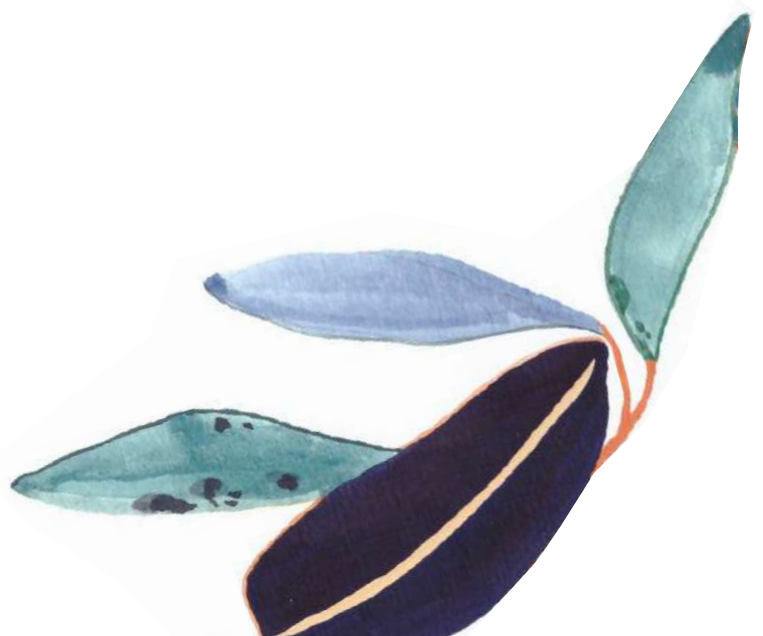
L'air, c'est-à-dire l'atmosphère, est un mélange de différentes molécules: il comporte essentiellement du diazote N_2 (78%) et du dioxygène O_2 (21%). L'un et l'autre sont composés de deux atomes et sont insensibles aux ondes de grande longueur d'onde. Elles ne participent donc pas à l'effet de serre. C'est dans le 1% restant que se joue toute l'action. L'effet de serre est dû exclusivement aux autres gaz, dont les molécules sont au moins composées de trois atomes et qui sont présents dans des quantités infimes (quelques dixièmes de pourcents pour la vapeur d'eau, moins de 0,1% pour les autres). Ils sont donc **faiblement concentrés dans l'air**, mais cela ne les empêche pas d'être d'une redoutable efficacité en matière d'effet de serre.

La principale molécule responsable de l'effet de serre est la vapeur d'eau, H_2O . Sa concentration dans l'atmosphère varie beaucoup: elle est mesurée par l'**humidité relative**, qui va de 0 à 100%. Quand on atteint une humidité relative de 100%, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes, et on obtient des nuages, qui finissent par retomber en pluie, en neige ou même en grêle.

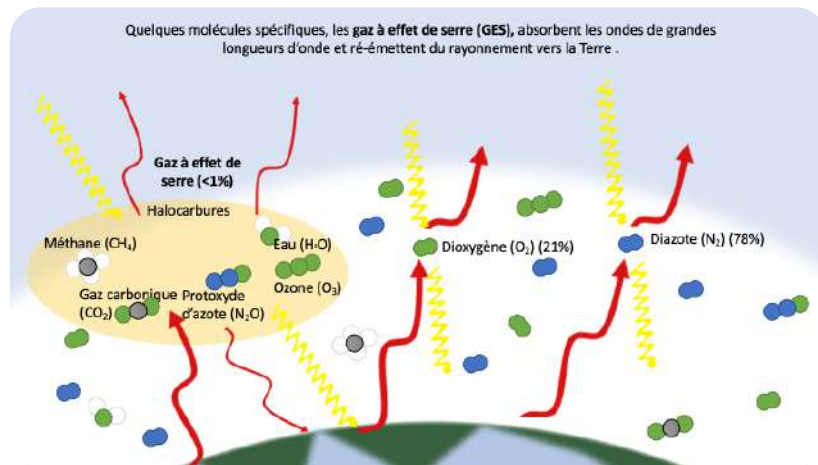
Occupons-nous des autres gaz à **effet de serre** (GES), c'est-à-dire de l'air sec. Les GES restants sont, par ordre d'importance⁴:

- le gaz carbonique, CO_2 , concentration actuelle 415 ppm, mais en augmentation constante, responsable de 65% de l'effet de serre restant (c'est-à-dire hors vapeur d'eau)

4 — <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/effet-de-serre.xml>



- le méthane, CH_4 , concentration actuelle 2ppm, responsable de 15% de l'effet de serre restant
- les halocarbures:
 - Ce sont des gaz exclusivement d'origine industrielle, comme les fréons, qui se sont illustrés en détruisant la couche d'ozone de l'atmosphère.
 - Ils sont 16 000 fois plus absorbants des ondes lumineuses terrestres que le CO_2 , et en dépit d'une très faible concentration représentent au moins 10% de l'effet de serre hors H_2O .
- l'ozone O_3 , pour 10%
- le protoxyde d'azote N_2O pour 5%.



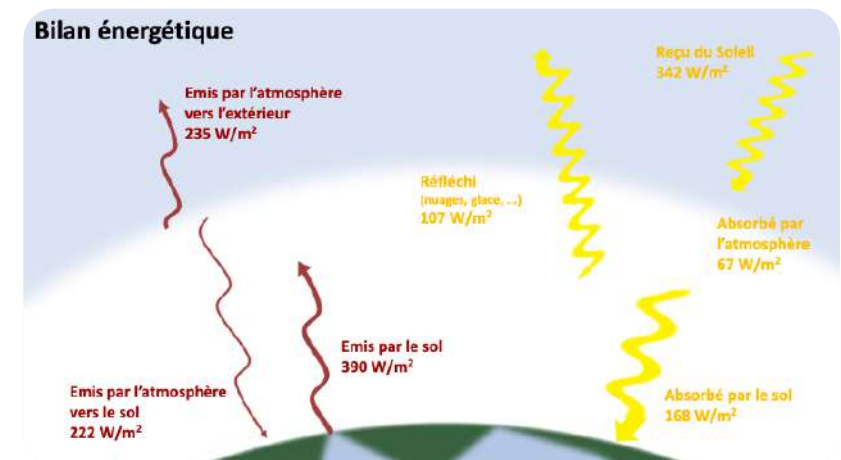
3

Le forçage radiatif

Tout le rayonnement solaire n'est pas absorbé par le sol. Une partie est réfléchi directement par la neige, la glace ou les nuages, qui fonctionnent comme des miroirs, une autre est absorbée par les basses couches de l'atmosphère.

Il faut donc modifier légèrement le bilan énergétique de la Terre, qui se présente finalement comme suit (l'unité est le Watt par mètre carré):

- reçu du Soleil: 342 W/m^2
- réfléchi: 107 W/m^2
- absorbé par l'atmosphère: 67 W/m^2
- absorbé par le sol: 168 W/m^2
- émis par l'atmosphère vers l'extérieur: 235 W/m^2
- émis par l'atmosphère vers le sol: 222 W/m^2



Ainsi qu'on l'a expliqué, ce bilan énergétique est en équilibre depuis 10 000 ans et la température de la Terre est stable. Ce sont donc les mêmes flux qui prévalaient en 1750, en 1515, en -52 ou aux temps des pharaons. Flux entrants et sortants sont égaux: $235 + 107 = 342$.

Mais depuis deux siècles l'équilibre est rompu; la Terre n'évacue plus toute l'énergie qu'elle reçoit. La différence entre l'énergie reçue et l'énergie évacuée est appelée le **forçage radiatif**. Le terme de forçage renvoie à l'idée que cela pousse la Terre hors de son équilibre. Il est exprimé en **Watt par mètre carré** (W/m^2). En 2016, il est estimé à $3 W/m^2$ (nous reviendrons sur les mesures d'énergie et de puissance dans un prochain chapitre).

L'énergie en « surplus » va mécaniquement réchauffer la Terre et nous verrons qu'effectivement les températures moyennes augmentent depuis 1750. Et comme quand on allume le feu sous une casserole, la température de l'eau augmente, mais ce n'est pas tout : le liquide commence à s'agiter et il s'évapore davantage. En ce qui concerne la Terre, il faut s'attendre à ce que l'atmosphère se réchauffe, que les vents deviennent plus violents et que l'air se charge d'humidité, qui retombera sous forme de précipitations plus abondantes.



Conclusion

Les gaz à effet de serre sont les molécules atmosphériques composées de trois atomes ou plus qui réagissent aux ondes à grandes longueurs d'onde émises par la Terre et ré-émettent une partie de ces ondes lumineuses vers la Terre. Ces gaz induisent un réchauffement de la Terre et de son atmosphère alors qu'ils ne représentent pas plus d'1% de la composition totale de l'atmosphère. Depuis deux siècles, la quantité de gaz à effet de serre augmente: mécaniquement, la Terre reçoit alors plus d'énergie qu'elle n'en renvoie, et entre dans une phase de réchauffement. Nous allons voir dans les prochains chapitres que l'histoire ne s'arrête pas là. Une émission ponctuelle de gaz à effet de serre suffit à créer un surplus d'énergie et à faire sortir la Terre de l'équilibre thermique, mais nous ajoutons en outre chaque année plus de ces gaz dans l'atmosphère. La montée des températures s'accélère alors, avec toute une série d'effets en cascade, dont la plupart se renforcent.

Questions pour aller plus loin

- La Terre émet-elle des ondes lumineuses avec des longueurs d'onde plus petites ou plus grandes que celles émises par le Soleil?
- Le Soleil peut-il continuer indéfiniment de renvoyer des ondes lumineuses vers l'extérieur? Que se passera-t-il pour sa température si l'on attend très très longtemps?
- Certains animaux vivent la nuit, plutôt que le jour. Au fil de l'évolution naturelle, leur vision s'est adaptée pour voir certaines ondes lumineuses mieux que nous. Pensez-vous qu'ils voient mieux les ondes de grande longueur d'onde ou de courte longueur d'onde?
- Plus difficile: est-ce que ces animaux voient les mêmes arcs-en-ciel que nous?





3

**Les êtres vivants
sont tous interconnectés:
c'est la biosphère
et elle contribue
directement au
climat terrestre**



Introduction

Ce chapitre parle de biologie, des êtres vivants et de comment ils s'intègrent au climat terrestre. Avant toute chose: c'est quoi, au juste, un être vivant? Qu'est-ce qui nous différencie, nous humains, crapauds, tulipes, de la matière dite «inerte», des pierres et de l'acier? C'est une vaste et profonde question.

Dans ce chapitre, nous allons donc poser une définition simplifiée du vivant et nous apercevoir que l'une des grandes caractéristiques des êtres vivants est d'être extrêmement dépendants de leur environnement et d'être en constante évolution. Si une astronaute met un caillou en orbite dans l'espace et repasse un an plus tard, que se passe-t-il? À moins d'une météorite malchanceuse, elle le retrouvera parfaitement intact. Et si elle remplace le caillou par un poisson? Ou, moins caricaturalement, par tout un bac de légumes, avec sa terre et ses vers de terre?

En vérité, si l'on regarde à quelles conditions les êtres vivants perdurent, même sans aller les déposer dans l'espace, on se rend compte qu'ils sont très fragiles, car très dépendants les uns des autres et des conditions extérieures. Chaque être réussit à préserver sa vitalité par des stratégies sophistiquées et diverses, à condition que son environnement ne change pas trop.

Ce que nous allons aussi voir dans ce chapitre, et approfondir dans le suivant, c'est aussi que non seulement la vie sur Terre est impactée par le climat, mais que le contraire est vrai aussi! La vie a influencé, et continue à influencer, le climat terrestre. Vous imaginez sans doute que le dioxygène que nous respirons fait partie de l'atmosphère depuis l'origine du monde, comme le décor de la scène de théâtre où sont apparus les êtres humains et avant eux leurs ancêtres vivants. Il n'en

est rien! Le dioxygène n'existait pas il y a 3 milliards d'années. Il est apparu comme sous-produit de la photosynthèse. Il continue à être produit aujourd'hui, avec le gaz carbonique, mais sa proportion dans l'atmosphère ne varie plus car un équilibre est atteint.

C'est cet équilibre qui est en train d'être détruit. Et tout comme l'apparition de l'oxygène a tué des milliers d'êtres vivants pour qui il était toxique, à notre tour, nous avons de quoi nous inquiéter si les conditions climatiques étaient amenées à changer.



1

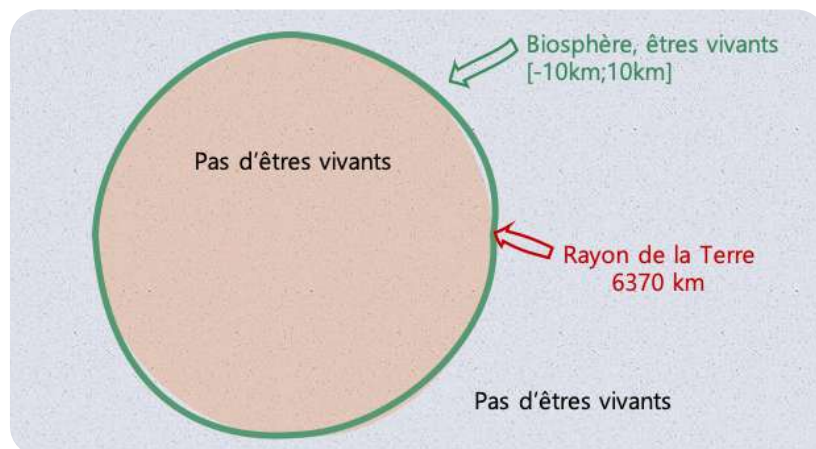
La biosphère

1.1 La vie sur Terre

Il y a de la vie sur Terre. C'est même le seul endroit de l'univers où l'on est sûr qu'il y en ait. Elle est localisée dans une très fine pellicule sur sa surface, entre -10 km (le fond des océans) et +10 km (limite de la troposphère).

C'est là, et là seulement, qu'il y a tout ce que nous connaissons de plantes, insectes, planctons, champignons, animaux, petits et gros, qui s'alimentent, se reproduisent, et constituent le milieu naturel où est née l'espèce humaine.

C'est ce qu'on appelle la **biosphère**. Le rayon de la Terre (la distance entre vos pieds et le centre de la Terre) est de 6 370 km, et la biosphère en fait 0,3%, c'est-à-dire pas grand'chose!



Lecture: Le rayon terrestre est de 6370 km (en moyenne). L'épaisseur de la biosphère en représente trois millièmes, c'est-à-dire en proportion, autant que trois millimètres sur un mètre, ou un millimètre sur trente centimètres. Si on représentait le globe comme un cercle sur toute cette page, ce serait l'épaisseur du trait. En d'autres termes, nous et nos compagnons vivants n'occupons qu'une toute petite bulle dans laquelle nous trouvons des conditions favorables à notre survie.

1.2 Interdépendances

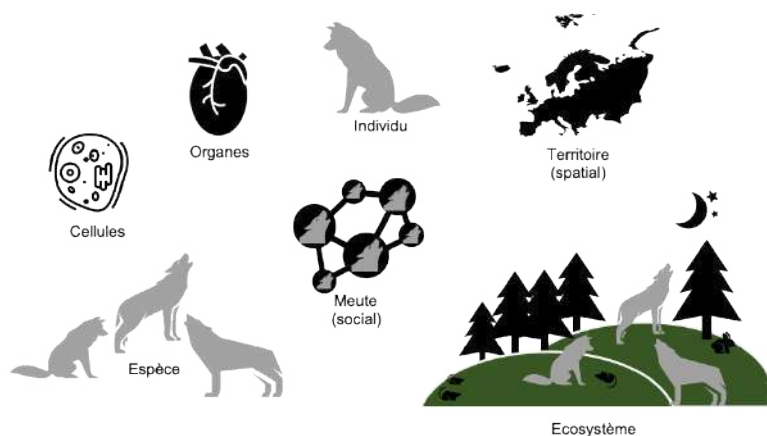
La biosphère constitue **un seul système**: il n'y a pas de sous-partie qui fonctionne en totale indépendance du reste. Tous les êtres vivants sont liés. Toutes les parties se tiennent, on ne peut pas toucher à l'une sans finalement toucher à toutes les autres.

De plus, les connexions sont **dynamiques**, c'est-à-dire qu'elles évoluent au cours du temps. Ces processus de connexion sont aussi organisés en structures multiples, entrecroisées les unes aux autres suivant des logiques différentes.

Prenons l'exemple du loup pour illustrer ce point:

- Commençons à petite échelle: nous y observons déjà une organisation biologique d'êtres vivants interconnectés. Les cellules sont regroupées en organes, chacun ayant ses propres fonctions. C'est cet ensemble interconnecté qui constitue un **individu** et qu'on appelle le loup. Notez que toutes ces structures ne sont ni complètement indépendantes (si un organe est atteint, le loup risque de mourir, et avec lui toutes les autres structures disparaissent) ni totalement dépendantes (certaines cellules meurent et sont remplacées tous les jours).
- Il est à la base d'une autre hiérarchie biologique: les individus capables de se reproduire entre eux. Ceux-ci constituent une **espèce**.

- Mais ce n'est pas fini: d'autres espèces vivent dans le même milieu et dépendent les unes des autres suivant de multiples rapports: de prédation, parasitisme, symbiose, etc. Cela imbrique le loup dans un ensemble interconnecté avec les lièvres et les renards, donc les petits rongeurs et insectes, mais aussi les grands arbres qui lui offrent des cachettes à l'abri desquelles il met bas. Ensemble, ces êtres constituent un **écosystème**.
- L'interdépendance des espèces est souvent révélée par des perturbations importantes et soudaines venues de l'extérieur. Par exemple, la réintroduction du loup dans le parc national du Yellowstone aux États-Unis a profondément modifié l'écosystème: en diminuant la population de cervidés, les loups ont changé la couverture végétale et permis à d'autres espèces animales de prospérer.⁵



⁵ — Pour aller plus loin, vous pouvez consulter: <https://academic.oup.com/jmammal/article/99/5/1021/5107035>

Lecture: Biologique, sociale, territoriale... Le loup, comme tous les êtres vivants est au cœur de processus dynamiques à des échelles temporelles et spatiales multiples.

Mais ce n'est pas tout! Le loup est aussi inséré dans d'autres hiérarchies qui se superposent à la hiérarchie des cellules > organes > individus > espèce > écosystème que nous venons de décrire, par exemple:

- **Sociale**: au sein même de son espèce, l'individu fait partie d'une meute, strictement hiérarchisée, avec des règles fixes pour la chasse, le partage des proies, la reproduction.
- **Spatiale**: sa meute est en concurrence avec d'autres meutes, et fait l'économie de conflits coûteux en se cantonnant dans un territoire bien délimité.⁶

Chacune de ces hiérarchies a sa propre logique dynamique:

- Au niveau de l'espèce, ce sont l'alimentation et la reproduction qui déterminent sa survie.
- Au niveau de l'écosystème, ce sont les mécanismes darwiniens d'adaptation qui commandent l'évolution: les espèces s'adaptent les unes aux autres et aux changements géographiques et climatiques
- Au niveau de la meute, le problème est de gérer le flux des entrants (nouveau-nés, juvéniles) et des sortants (atteints par la limite d'âge). Elle y pourvoit par l'éducation et l'apprentissage, qui apprennent aux nouveaux comment chasser, comment se comporter avec les autres, comment grimper dans la hiérarchie sociale.

⁶ — Pour en apprendre davantage et découvrir comment la délimitation du territoire, la définition des frontières, font l'objet de négociations entre meutes, lisez «Les diplomates» de B. Morizot.

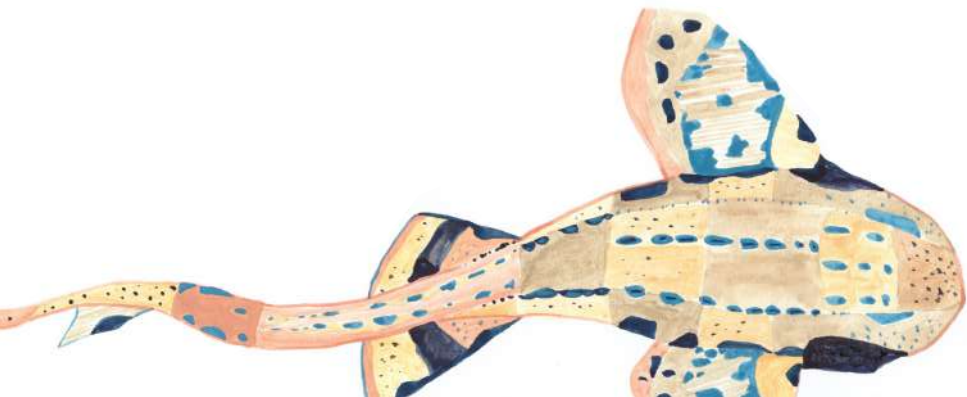
- Au niveau individuel, chaque loup a une histoire: il commence comme nouveau-né, devient juvénile, puis adulte, et atteint finalement la vieillesse. Sa position dans la hiérarchie sociale change au cours du temps en fonction de ses capacités bien sûr, mais aussi de ses actions: il a une stratégie.

Notons que les diverses logiques peuvent se croiser (en définitive les règles de reproduction et de chasse adoptées par la meute doivent favoriser la survie de l'espèce) et que les échelles de temps sont très différentes d'une dynamique et d'une hiérarchie à l'autre (un loup vit une quinzaine d'années, alors que l'espèce canis lupus existe depuis cinquante millions d'années).

Notons enfin que la stabilité apparente des systèmes biologiques cache des flux permanents, où les entrées compensent les sorties: les meutes de loups peuvent subsister des dizaines d'années dans le même territoire. Les individus meurent, les chefs changent, mais c'est toujours la même meute.

Résumé

- ♦ La biosphère constitue un seul système d'êtres vivants interconnectés.
- ♦ C'est le théâtre d'une multitude de processus dynamiques, stationnaires ou non, articulés les uns aux autres, et fonctionnant à des échelles de temps et d'espace très différentes.



2

La complexité du vivant

2.1 Décrire un système physique

La matière est composée d'atomes, en grand nombre certes, mais tous identiques: on ne peut pas différencier un atome de fer d'un autre atome de fer. Cette identité permet de la décrire à l'aide de quelques mesures clés: prendre sa température, étudier sa composition (de quels atomes – «briques élémentaires» - elle est faite), mesurer sa taille...

Imaginez par exemple que vous deviez décrire un caillou de calcaire. Sa forme, au micron près, sa composition chimique (de quels atomes il est fait), sa température. Avec uniquement ces informations, une amie à vous pourrait (avec les bons instruments) aller tailler un caillou exactement identique, dans une roche calcaire de composition exactement identique et le chauffer à la bonne température. Mis à côté du premier caillou, il deviendra peu ou prou indiscernable. Et l'on peut attendre des jours, peut-être des années, on sera bien en peine de voir une quelconque différence entre les deux cailloux.

2.2 Décrire un système biologique

L'état d'un système biologique est beaucoup plus difficile à définir. On ne peut pas le résumer par quelques chiffres, comme pour un corps inerte.

Essayez de décrire un individu en bonne santé par exemple: par quoi commenceriez-vous? La température du corps est un bon indice (si la température chute à 26 degrés ou monte à 42, il y a de quoi s'inquiéter).

ter). On pourrait certainement ajouter les taux de glycémie dans le sang, le rythme cardiaque, la réaction musculaire à l'effort... mais ce ne serait encore pas suffisant! Saviez-vous par exemple que dans votre système digestif vivent quelques 150 000 bactéries qui n'ont pas le même ADN que les cellules de votre corps, sans lesquelles la digestion serait impossible et dont l'on découvre aujourd'hui qu'elles auraient une grande influence sur votre état psychique et immunitaire...

On pourrait obtenir d'autres chiffres, en prescrivant d'autres examens, mais ils ne suffiront jamais à décrire complètement l'état d'un corps humain. Et comment définir l'état de santé d'un écosystème: une mangrove par exemple, ou une forêt? Pourrait-on compter le nombre et la taille des arbres de chaque espèce? Cela ne suffira pas: pour qu'une espèce d'arbres survive dans la forêt, ses individus sont disséminés à différents endroits de la forêt, en fonction peut-être de leur âge et de leur forme. Et d'ailleurs si on ne considère que les arbres, on se trompera, car on manquera une foultitude d'interactions et d'acteurs qui assurent la pérennité de la forêt. Il faudrait, par exemple, prendre en compte les insectes (pollinisateurs ou vecteurs de maladies), les champignons qui vivent en symbiose avec leurs racines pour leur apporter les bons nutriments, les autres plantes comme le lierre qui grimpe sur leurs troncs et les animaux, y compris les carnivores (on a vu comment le loup avait changé l'écosystème du Yellowstone: cela affecta même les arbres).

2.3 Que penser des politiques de protection et de préservation de la biodiversité?

La complexité des systèmes vivants a des conséquences pratiques pour toutes les politiques de protection et de préservation de la biodiversité. Reprenons l'exemple des forêts. Il est facile d'observer qu'une forêt d'eucalyptus est très différente d'une forêt amazonienne. Mais est-ce que l'on peut faire une liste finie de toutes ces différences? Est-ce qu'on peut les mesurer, ou sont-elles purement qualitatives? Si l'on en détruit une, est-ce que l'on peut la remplacer par l'autre? La

réponse est négative, et cela pose un problème à toutes les politiques de conservation.

La biodiversité elle-même est bien difficile à caractériser, même dans un espace restreint. On sent bien qu'elle est liée au nombre d'espèces et à la qualité de leurs interactions, mais encore? Comment la mesurer? Quel sens donner aux procédures dites de compensation? Qu'est-ce que cela veut dire que je compense un Paris-Pékin en avion en faisant planter des arbres (lesquels?) quelque part (où cela?). Si je détruis un écosystème, par exemple en asséchant une zone humide pour y construire un aéroport, je ne pourrai jamais le reconstituer à l'identique. Au mieux, je pourrai construire un écosystème analogue ailleurs. Comment les comparer, comment juger que l'un compense l'autre?

Résumé

♦ Du fait de cette multiplicité d'interconnexions en constante évolution, il est très difficile de décrire et de reproduire un système vivant.



3

La fragilité du vivant

Les êtres vivants meurent. Les objets physiques inertes ne meurent pas. Si un vase est là aujourd'hui, il y a de fortes chances qu'il soit encore là demain, dans un an ou dans vingt ans. Si on le met sur orbite autour de la Terre, il tournera gentiment, sauf s'il est frappé par une météorite. Si un être vivant est là aujourd'hui, il sera peut-être là demain, mais il est peu probable qu'il soit toujours là dans vingt ans; s'il l'est, il aura beaucoup changé. Si je le mets sur orbite autour de la Terre, il mourra immédiatement.

Pour survivre, les être vivants ont besoin d'un **environnement favorable**: dans la mesure de leurs moyens, ils cherchent à **l'établir** et à **le maintenir**.

Lecture instructive en même temps qu'amusante: la bande dessinée «Dans la combi de Thomas Pesquet», qui montre les exploits techniques et la débauche d'énergie nécessaires pour maintenir en vie trois astronautes dans une station orbitale. On se rend bien compte à travers cet exemple de notre dépendance directe à un environnement propice à la vie.

Dans un environnement suffisamment favorable, les êtres vivants ont des mécanismes qui leur permettent de se maintenir. C'est ce qu'on appelle **l'homéostasie**. Ainsi, le corps humain déploie quantité d'efforts pour maintenir sa température interne autour de 37°C. Au-delà de 38°C, c'est la fièvre, et si elle atteint 40°C c'est un risque de santé majeur et immédiat. Tous les êtres vivants ont un milieu interne protégé, dont le pH et la composition sont maintenus entre des limites fixes.

Un exemple quotidien d'homéostasie du corps humain est la transpiration. Mais ce mécanisme de défense du corps en environnement hostile (car trop chaud) n'est pas toujours possible: si la température et l'humidité ambiantes excèdent certaines limites, l'être humain ne peut pas maintenir sa température interne autour de 37°C et meurt rapidement. Par exemple s'il fait seulement 40 degrés mais que le taux d'humidité est de 100%, le corps n'arrive pas à transpirer et est en danger de mort. Notons que de telles combinaisons existent déjà sur Terre et que leur fréquence va augmenter dans les années qui viennent.

Plus généralement, l'homéostasie désigne en biologie les mécanismes par lequel un état est maintenu autour d'une valeur bénéfique pour le système considéré, grâce à un processus de régulation. Lorsque vous sentez des difficultés à transpirer et à rester longtemps dans un hammam saturé de vapeur d'eau, vous comprenez que les êtres vivants atteignent vite leurs limites à se maintenir dans un état sain si leur environnement n'est pas favorable.

Cela ne concerne pas seulement les individus: les espèces aussi peuvent mourir, ou plutôt disparaître. Et c'est bien logique puisque les individus d'une même espèce ont globalement les mêmes limites dans leur capacité à se maintenir dans un environnement hostile. On parle alors d'**extinction**.





Les espèces peuvent même disparaître très rapidement. Le pigeon américain, *Ectopistes Migratorius*, un oiseau grégaire qui se déplaçait en bandes de milliards d'individus (mais oui! plus que le nombre d'humains sur Terre), et dont les colonies couvraient des dizaines de kilomètres carrés, fut complètement exterminé par une chasse systématique dans les dernières années du 19^{ème} siècle.⁷

Source: Wikipédia

Résumé

- ♦ Les êtres vivants meurent. Les objets physiques inertes ne meurent pas.
- ♦ Pour survivre, les êtres vivants ont besoin d'un environnement favorable: dans la mesure de leurs moyens, ils cherchent à l'établir et à le maintenir.
- ♦ Dans un environnement suffisamment favorable, les êtres vivants ont des mécanismes qui leur permettent de se maintenir. C'est ce qu'on appelle l'homéostasie.

⁷ — Plus de détails sur l'extinction du pigeon américain: https://fr.wikipedia.org/wiki/Tourte_voyageuse

4

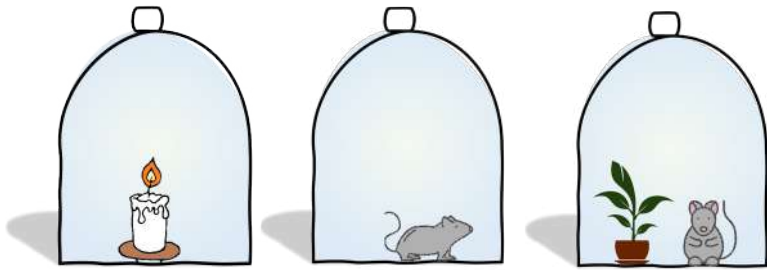
D'où viennent l'oxygène et l'énergie dont les vivants ont besoin?

4.1. La photosynthèse

Tout au long de la vie, les êtres vivants respirent, s'alimentent et se reproduisent. Pour survivre, les êtres humains inspirent du dioxygène (O₂), tandis qu'ils expulsent du dioxyde de carbone (CO₂) en expirant. Mais alors comment se fait-il que les animaux, dont nous sommes, n'aient pas déjà épuisé les stocks de dioxygène sur Terre?

La réponse a été trouvée par Joseph Priestley au 17^{ème} siècle et complétée par Jan Ingenhousz en 1778 grâce à une fameuse expérience. Premier temps de l'expérience: on place une bougie allumée sous une cloche en verre étanche. Que se passe-t-il après quelques secondes? La bougie s'éteint, à court de dioxygène nécessaire à sa combustion. Deuxième temps: on place sous la cloche une souris. Il faut attendre plus longtemps, mais à son tour, la souris meurt, privée de dioxygène pour respirer. Troisième temps: on introduit sous la cloche une plante verte. La plante ne meurt pas. On ajoute une nouvelle souris: elle survit!





Cette expérience a été faite par Joseph Priestley au 17^{ème} siècle; il a ainsi constaté que les plantes sont capables de «régénérer un air vicié». C'est le premier pas vers la découverte de la **photosynthèse!**

On peut déduire une seconde chose essentielle de cette expérience fondatrice. La première souris meurt car elle inspire des molécules de dioxygène (deux atomes d'oxygène liés) et expire du dioxyde de carbone (un atome de carbone et deux atomes d'oxygène liés), qu'elle ne sait plus ré-inspirer. La plante, elle, sait faire le chemin inverse! Comment?

Allez chez le fleuriste et achetez une plante. Disons que la plante pèse 500 grammes et que la terre dans le pot pèse 5 kg. Pendant un an, vous en prenez soin, l'arrosez, l'exposez à la lumière. Après un an, la plante pèse 1 kg. Et combien pèse la terre du pot? À quelques grammes près qu'on peut négliger, elle pèse toujours 5 kg! Mais alors, où la plante a-t-elle pris ses 500g supplémentaires? De la terre? De l'air? De l'eau d'arrosage? Des trois à la fois?



La réponse est de l'air et de l'eau d'arrosage. C'est la photosynthèse: la plante prélève le carbone contenu dans le CO₂ de l'atmosphère, les atomes d'hydrogène et d'oxygène de l'eau H₂O, et les fixe sous forme de matière organique. Ainsi, si on brûle la plante, on libèrera le carbone emprisonné dans cette matière organique, et il retournera dans l'atmosphère sous forme de CO₂. C'est logique!

Résumé

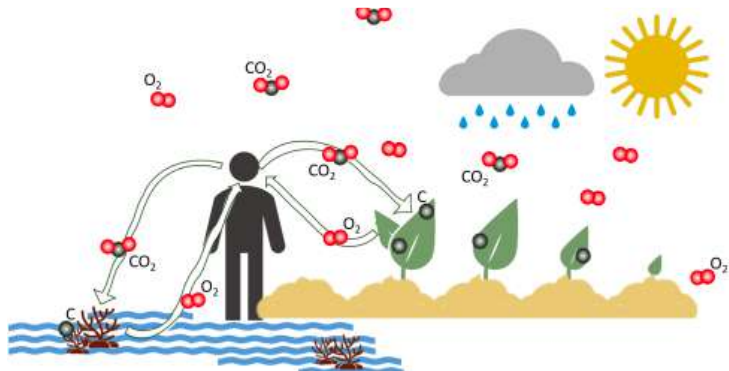
- ♦ La photosynthèse est le mécanisme «complémentaire» de la respiration des animaux, par lequel les plantes absorbent du dioxyde de carbone (CO₂) pour renvoyer du dioxygène (O₂).
- ♦ Les animaux dont nous sommes dépendent donc absolument des plantes et des autres êtres vivants comme le plancton pour fabriquer l'oxygène dont ils ont besoin.
- ♦ La photosynthèse est une manière de stocker le rayonnement solaire sous forme chimique. C'est le processus par lequel la plante grandit en fixant les uns à la suite des autres des atomes de carbone qu'elle récupère dans le CO₂ qu'elle «inspire» et qu'elle mélange à l'eau qu'elle «boit».
- ♦ Pas étonnant qu'en coupant du bois et en le brûlant, on libère dans l'air... du carbone!



4.2. Le cycle de l'oxygène

Au tout début de l'histoire de la Terre, il n'y avait pas d'oxygène dans l'atmosphère! Cela paraît presque incroyable. C'est l'apparition de la photosynthèse, avec les plantes et les bactéries, qui a donné à notre planète son oxygène atmosphérique, il y a 2,3 milliards d'année, et l'a maintenu depuis au niveau actuel de 21% de la composition de l'air en dépit de sa consommation par la respiration des êtres vivants, et des diverses combustions. Il y a donc un cycle de l'oxygène:

- d'un côté il est absorbé régulièrement par les animaux et par les plantes, pour leur «respiration»
- de l'autre, il est émis par le plancton et les plantes, au cours de la photosynthèse



Lecture: Sous l'effet de la lumière, les plantes (plantes terrestres, algues, plancton océanique...) « inspirent » le CO₂ expiré par les animaux et renvoient de l'O₂.

Notre survie en tant qu'espèce dépend donc entièrement de ce service rendu par les plantes et le plancton! Le bilan est globalement équilibré, les continents et l'océan produisant respectivement 16,5 et 13,5.10¹⁰ kg d'oxygène par an.



Conclusion

Pour écrire la première version de ce chapitre, nous étions attablés dans le bureau d'Ivar à Paris. Pour la relire, nous nous retrouvons sur Zoom. Entre-temps, le coronavirus s'est invité dans nos vies, illustrant trop bien l'interdépendance et la fragilité du monde vivant que ce chapitre décrit.

La science moderne découvre (ou redécouvre) aujourd'hui la richesse et l'infinité des liens qui nous enchevêtrent dans ce grand système qu'on appelle biodiversité. Nous maintenir en vie, en bonne vie, suppose donc de ménager ces liens, des bactéries de nos estomacs jusqu'aux pangolins de forêts lointaines.





4

Sur Terre et dans l'atmosphère, le carbone circule en permanence. Que se passe-t-il quand les activités humaines modifient les flux vers l'atmosphère ?



Introduction

Aussi étrange que cela puisse paraître, l'atmosphère terrestre actuelle n'a pas toujours été celle qu'on connaît et qu'on respire aujourd'hui. Son histoire est intimement liée à celle des êtres vivants. Certes, la Terre primitive, il y a quatre ou cinq milliards d'années, avait une atmosphère, mais elle était très différente de celle que nous connaissons actuellement: il n'y avait pas d'oxygène.

L'oxygène n'apparaît que beaucoup plus tard, il y a deux ou trois milliards d'années, émis par les premiers organismes vivants. Pour beaucoup d'autres êtres vivants, il était toxique, comme le serait pour nous humains un air chargé de soufre, et ces êtres ont disparu. L'oxygène n'a atteint son niveau actuel, environ 20% de l'air, qu'il y a 600 millions d'années.

Qu'est-ce qu'on veut dire en disant que «les êtres vivants émettent de l'oxygène»? Les atomes d'oxygène ont toujours existé sur Terre, mais sous différentes formes et prises dans différentes molécules. Certains êtres vivants ont des organismes qui «digèrent» ces molécules, les décomposent, et les recomposent autrement avant de les libérer dans l'air.

Aujourd'hui du dioxygène est émis en permanence par les plantes sous l'effet de la lumière du soleil: c'est la photosynthèse, que nous avons vue dans le précédent chapitre. Ce dioxygène est réabsorbé en permanence par la respiration des animaux, et par tous les phénomènes d'oxydation et de combustion. Il y a donc un cycle de l'oxygène: chaque molécule qui passe dans l'atmosphère n'y reste que temporairement et la quittera au bout d'un temps plus ou moins long.

Cette histoire de cycle n'est pas propre à l'oxygène. Tous les gaz de l'atmosphère, ou presque tous, ont leur propre cycle: ils y sont émis par certains processus et absorbés par d'autres. L'atmosphère est un lieu de stockage temporaire, avant d'être renvoyé ailleurs sur Terre, comme une baignoire reliée à une nappe phréatique dont on recyclerait l'eau en permanence. Si le niveau de l'eau est constant dans la baignoire, ce n'est pas parce que l'eau stagne, c'est parce que l'arrivée compense exactement la sortie.

Le cycle le plus connu, après celui de l'oxygène, est le cycle du CO_2 . Et c'est bien sûr celui qui nous intéresse pour étudier l'effet de serre et les changements climatiques. Le cycle du CO_2 a ceci de particulier que le trou d'évacuation de la baignoire est très étroit. Ainsi si on déverse du CO_2 supplémentaire dans l'atmosphère (par exemple en brûlant du bois ou du pétrole), cet excédent se fera sentir pendant plusieurs siècles.

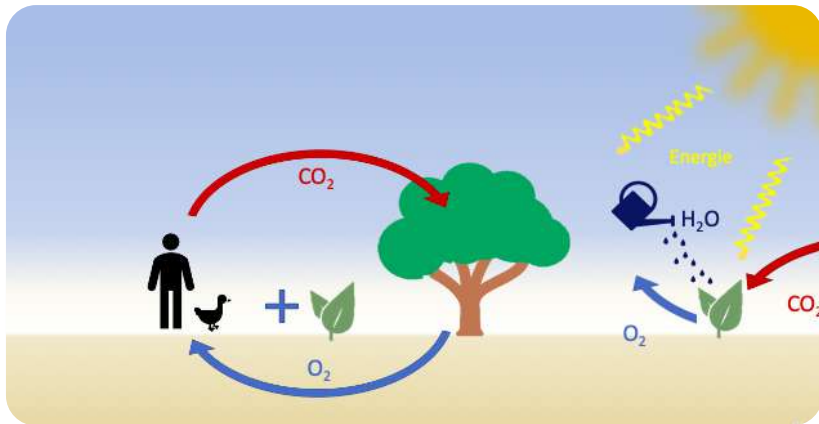


1

Plantes et planctons dans la photosynthèse

Sous l'action du Soleil et lorsqu'elles reçoivent suffisamment d'eau, les plantes sont capables d'absorber le CO_2 gazeux et d'émettre en retour du dioxygène O_2 . C'est la photosynthèse. Si la photosynthèse a lieu grâce à l'énergie transmise par les ondes lumineuses du Soleil, que se passe-t-il la nuit?

La circulation s'inverse, car les plantes respirent, elles aussi!



Lecture: Le jour, les plantes réalisent la photosynthèse. La nuit elles respirent comme les animaux.

Notre vie (et celle de tous les animaux) dépend donc de la capacité qu'ont les plantes de fabriquer de l'oxygène à partir de gaz carbo-

nique. Le domaine des « plantes » est très vaste et va bien au-delà des arbres et des fleurs de nos jardins. Il va de la forêt amazonienne au phytoplancton dans les océans. Les **phytoplanctons** sont des plantes marines microscopiques, flottant à la surface des océans. Elles ne sont pas visibles à l'œil nu, mais on peut visualiser leur distribution sur les océans par satellite, et elles sont cruciales pour l'alimentation des animaux marins, soit qu'ils s'en nourrissent directement (baleines), soit qu'ils soient à la base de la chaîne alimentaire.

D'ailleurs que pourrions-nous appeler le « poumon de la planète »? On parle toujours de la forêt amazonienne. Mais le phytoplancton est beaucoup plus efficace, si l'on considère la quantité de CO_2 qu'il réussit à séquestrer durablement sur Terre. En effet, la végétation terrestre, même quand elle n'est pas coupée et brûlée par les humains, finit par mourir, et se décompose à l'air, absorbant de l'oxygène et renvoyant du CO_2 dans l'air, comme une respiration très lente. Au contraire: le phytoplancton, quand il meurt, a une bonne chance de tomber au fond de l'océan, dans un milieu pauvre en oxygène et le carbone qu'il contenait reste piégé au fonds de l'océan. Le bilan global lui est favorable, si bien que l'on considère que plus de la moitié de l'oxygène que nous respirons « provient » du phytoplancton. Nous sommes donc comme les baleines: notre survie dépend de petites plantes qui sont à des milliers de kilomètres de nous et que nous ne voyons même pas. Bel exemple d'interdépendance d'espèces vivantes sur la planète Terre.⁸

⁸ — L'instrument SeaWiFS de la NASA examine les océans et les terres pour observer la flore et le phytoplancton. Pour découvrir l'instrument SeaWiFS, vous pouvez consulter: <https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a002000/a002077/index.htm>



Résumé

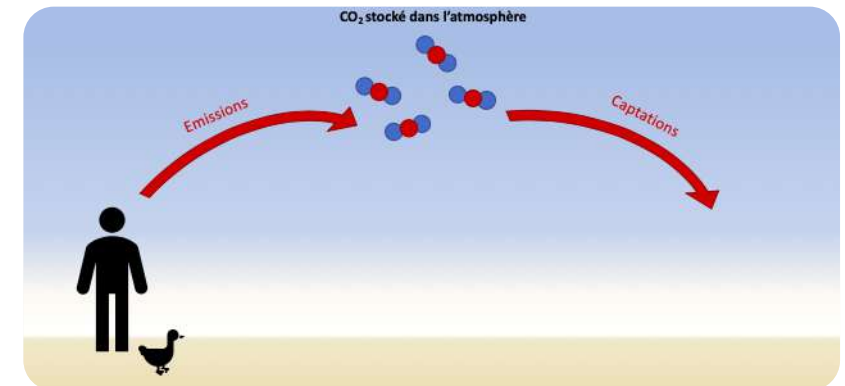
- Les plantes profitent de l'énergie du rayonnement solaire pour « inspirer » le CO_2 dans l'air et synthétiser des molécules contenant ce carbone qu'elles « inspirent ».
- Ce faisant, elles extraient de l'atmosphère du gaz carbonique et y rejettent du dioxygène que nous respirons.
- En termes de captation « nette » de carbone sur Terre, le plancton océanique est encore plus efficace que les plantes ordinaires car lorsqu'il se décompose, le carbone qu'il contient reste piégé au fond des océans.



2

Cycle du CO_2

Revenons au thème central de ce cours: le climat. Nous avons vu dans les deux premiers chapitres que l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère était le principal facteur d'effet de serre, qui réchauffe la Terre.

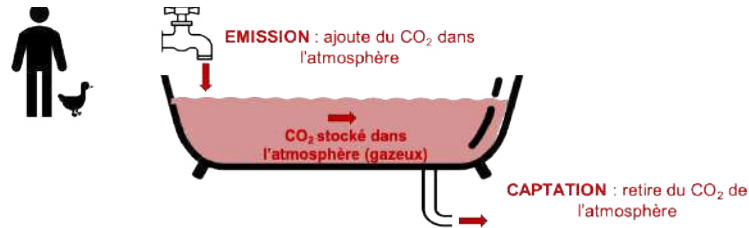


Pour comprendre ce qui détermine la quantité de CO_2 dans l'atmosphère, concentrons-nous dans le schéma précédent sur les échanges de carbone. D'un côté les émissions, de l'autre la captation, entre les deux: le CO_2 stocké dans l'atmosphère.

On peut voir ce problème comme celui d'une baignoire. Deux choses déterminent la quantité stockée dans la baignoire atmosphérique: la quantité émise par le robinet d'une part, et la quantité évacuée par la bonde d'autre part. Où va le carbone qui est évacué par la bonde? Il est tout simplement stocké quelque part sur Terre, par exemple dans les plantes.

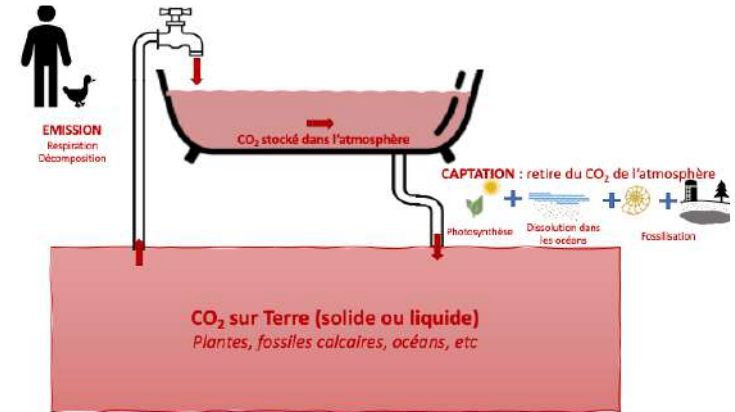


En fait, l'immense majorité du carbone de notre planète (terre et atmosphère) est stockée sous forme solide sur Terre, lié à du calcium et de l'oxygène: ce sont les roches calcaires, et les coquilles des animaux, notamment des coraux. En effet, le CO₂ atmosphérique peut se dissoudre dans l'océan et on estime que les océans contiennent 50 fois plus de carbone que l'atmosphère! Une partie de ce carbone flottant est récupérée par les animaux marins pour faire des coquilles, qui se retrouveront des millions d'années après sous forme de roches calcaires.

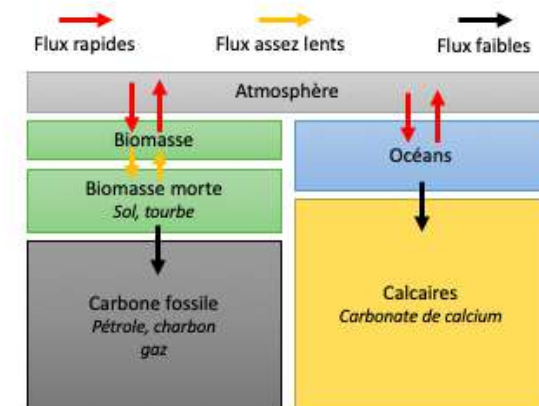


En ce qui concerne le carbone terrestre hors océans, il est fixé par les plantes et les animaux, et retournera lentement dans l'atmosphère quand ceux-ci se décomposeront. Il peut se faire cependant que certains échappent à la décomposition en raison de circonstances particulières, par exemple parce qu'ils sont ensevelis dans des marais, loin de l'oxygène de l'air. C'est l'origine des carburants fossiles: charbon, gaz ou pétrole.

Hors intervention humaine, plusieurs mécanismes assurent donc la captation du CO₂ atmosphérique sur Terre (photosynthèse, dissolution dans les océans, etc.) et inversement, plusieurs mécanismes engendrent de nouvelles émissions vers l'atmosphère (respiration, décomposition, etc.)



Bien sûr, ces différentes formes de captation ne se font pas sur les mêmes **échelles de temps**. Une inspiration suivie d'une expiration a lieu en quelques secondes. Un arbre vit quelques dizaines d'années avant de se décomposer. Mais les roches calcaires ou les nappes de pétrole ont mis plusieurs centaines de millions d'années à se constituer. C'est ce qui est représenté sur le schéma fonctionnel suivant:



Résumé

- ✦ Pour le CO₂, comme pour le dioxygène, l'atmosphère se comporte comme une baignoire dont l'eau est renouvelée : les molécules n'y sont stockées que temporairement, et sont en permanence recaptées sur Terre, avant d'être à nouveau émises dans l'air.
- ✦ Le stock de carbone dans la baignoire atmosphérique est déterminé par les quantités émises relativement aux quantités captées.
- ✦ Le principal lieu de stockage terrestre du carbone est l'océan, où le carbone atmosphérique est photosynthétisé par le plancton ou directement dissout.
- ✦ Certains processus d'émissions ou de captations sont très rapides (respiration, décomposition, ...) tandis que d'autres sont extrêmement longs (formation des roches calcaires, formation du pétrole et autres fossiles carbonés, ...).

3

Hors de l'équilibre

3.1 Le cycle du carbone déséquilibré

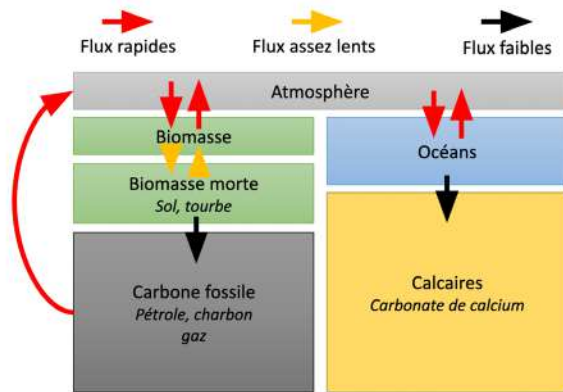
Ce cycle du carbone a été en équilibre jusque vers 1850, c'est-à-dire que les émissions dans l'atmosphère étaient équilibrées par les captations sur Terre. Ainsi la quantité de CO₂ dans l'atmosphère restait stable.

Depuis 1800, ce processus est perturbé par l'utilisation humaine des combustibles fossiles.

On a vu que le pétrole, le charbon et autres fossiles ne sont rien d'autre que du carbone lentement amalgamé avec d'autres atomes et stocké sur terre ou sous terre. En les brûlant, on fracture ces amalgames et on libère le carbone sous forme de gaz.

Voilà donc deux siècles que l'on injecte directement dans l'atmosphère des quantités supplémentaires de CO₂ qui ne s'inscrivent pas dans les cycles naturels.





Où va ce CO₂ supplémentaire, que l'atmosphère n'était, pour ainsi dire, pas habituée à recevoir? Un quart environ se dissout dans l'océan, un tiers est capté par les plantes, et le reste stagne dans l'atmosphère. C'est ce stockage qui entraîne un accroissement de l'effet de serre, et donc un réchauffement de la planète. C'est le forçage radiatif, que nous avons défini dans les chapitres précédents.

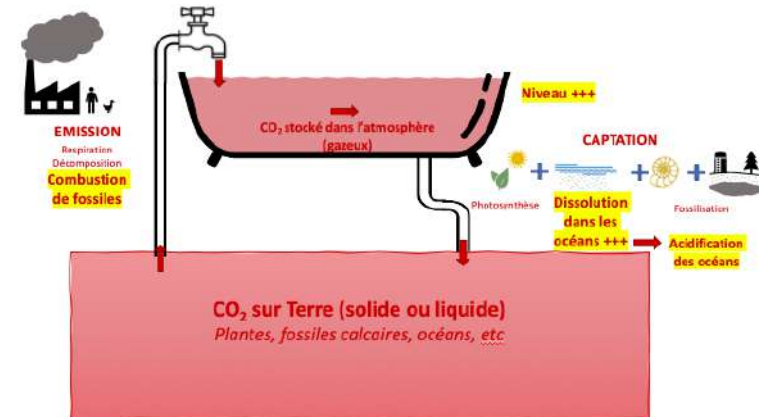
3.2 Un double problème

À vrai dire, le problème est même double: non seulement la combustion de fossiles augmente les émissions mais elle réduit aussi la capacité de captation des océans.

On estime que 20 à 30% du CO₂ excédentaire dans l'atmosphère (émissions d'origine humaine) est absorbé par les océans sous forme dissoute. À côté du cycle du carbone atmosphérique qui sature, il y a donc un puits de carbone océanique, qui stocke une partie du carbone excédentaire. Ce stockage excédentaire rend les océans plus **acides** (cela se vérifie en mesurant leur pH et en constatant qu'il diminue). C'est le phénomène d'acidification des océans, sur lequel nous reviendrons, et qui est un autre marqueur important du réchauffement

climatique. Malheureusement, l'acidification rend l'océan moins capable d'absorber du CO₂, et donc de jouer le rôle de puits de carbone, comme si en demandant à la bonde de la baignoire d'évacuer plus d'eau elle se bouchait.

Si nous revenons à notre baignoire, nous comprenons donc que le niveau augmente:



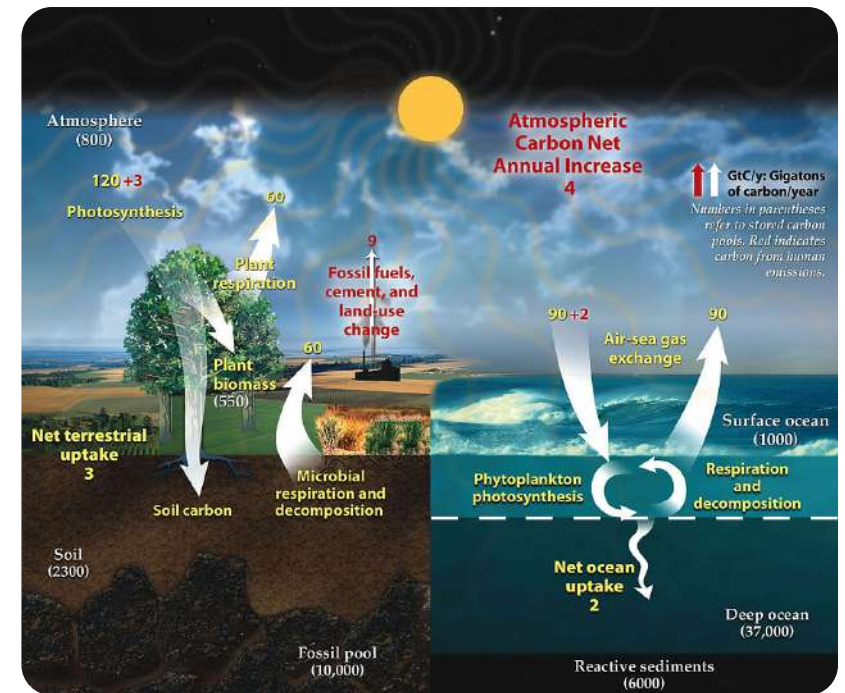
3.3 La circulation du carbone en chiffres

La figure⁹ suivante montre les stocks (en blanc, entre parenthèses) et les flux de carbone (en jaune et rouge) en gigatonnes de carbone par an (une gigatonne représente un milliard de tonnes). Le carbone apparaît ainsi sous différentes formes et lié à différents éléments chimiques. Remarquons d'abord que les stocks sont significativement plus importants que les flux. L'immense majorité du carbone est stockée sous

⁹ — Source: http://www.starch.dk/private/energy/img/CO2%20Balance.pdf?fbclid=IwAR3KlgwglAUzYFMKZtpXpvz56XJug1D_D4yamL2qzfU5joT1x9kR6ckrNDg

forme solide ou liquide. Lié à du calcium et de l'oxygène, il constitue les roches calcaires, et les coquilles des animaux, notamment des coraux. Enfoui sous terre, en association avec de l'hydrogène: il forme le pétrole. La proportion de carbone gazeux dans l'atmosphère représente moins de 1% du stock total et apparaît en association avec de l'oxygène: c'est le gaz carbonique, le fameux CO₂.

Flèches et chiffres en jaune indiquent ensuite les flux annuels: on voit que du carbone ne cesse d'être échangé vers et depuis l'atmosphère. Aux flux naturels (respiration, dégradation, photosynthèse...) s'ajoutent depuis deux siècles les émissions humaines (en rouge). 9 Gigatonnes sont envoyées dans l'atmosphère, dont 3 boostent la photosynthèse des plantes et 2 sont captées par les océans. Ce surplus d'émissions se conclut par un solde positif de quatre gigatonnes de carbone par an dans l'atmosphère. Tous les ans, ce sont donc environ seize gigatonnes de CO₂ supplémentaires qui s'accumulent dans l'atmosphère¹⁰. Pour combien de temps?



Cycle du carbone et bio-séquestration

Source: US Department of Energy, [http://www.starch.dk/private/energy/img/CO₂%20Balance.pdf](http://www.starch.dk/private/energy/img/CO2%20Balance.pdf)

¹⁰ — Un atome de CO₂ contient deux molécules d'oxygène pour une seule de carbone. Il y a donc un facteur de conversion: quatre (plus précisément, 3,67) tonnes de CO₂ ne contiennent qu'une tonne de carbone.

Résumé

- ♦ Le cycle du carbone a été en équilibre jusque vers 1850, et depuis il a été perturbé par l'utilisation des combustibles fossiles.
- ♦ Cela rejette dans l'atmosphère des quantités de CO₂ qui dépassent les capacités d'absorption des terres et des océans
- ♦ Ce carbone excédentaire est partiellement dissout dans l'océan, qui s'acidifie, ce qui atténue sa capacité de captation. Une autre partie est captée par la photosynthèse des plantes.
- ♦ Tous les ans, ce sont donc seize gigatonnes de CO₂ supplémentaires qui s'accumulent dans l'atmosphère.

4

Durée de vie dans l'atmosphère

4.1 Une question qui ne date pas d'hier

Reprenons l'image de la baignoire: le robinet, ce sont les émissions de CO₂. La bonde, ce sont les absorptions. Ce qui reste dans la baignoire, c'est le stock dans l'atmosphère. L'ensemble était à peu près équilibré avant 1800. Il rentrait dans la baignoire autant de CO₂ qu'il en sortait, et le niveau de l'eau était donc stable. Nous avons vu dans le tout premier chapitre que la proportion de CO₂ dans l'atmosphère s'est ainsi maintenue autour de 280 ppm¹¹ jusqu'en 1800.

Depuis, l'utilisation des combustibles fossiles (le charbon d'abord, le pétrole ensuite, le gaz enfin) est venue s'ajouter aux émissions de CO₂ naturelles. Le débit du robinet a augmenté et le niveau de CO₂ dans la baignoire atmosphérique s'est élevé. La proportion de CO₂ dans l'atmosphère atteint aujourd'hui 416 ppm, pas loin de deux fois plus qu'avant la Révolution industrielle!

Comment est-ce possible que la combustion du charbon pour les premières machines à vapeur anglaises nous impacte encore aujourd'hui? Et si on arrêta aujourd'hui de brûler des combustibles fossiles, combien de temps faudrait-il à l'atmosphère pour retrouver les niveaux de CO₂ naturels? Autrement dit: si on ramène le débit du robinet à

son niveau antérieur, combien de temps faudrait-il à la baignoire pour retrouver son niveau antérieur?

4.2 Une analogie pour comprendre la durée de vie du carbone dans l'air

C'est en fait une question sur l'efficacité de la bonde et sa capacité à évacuer plus que le flux ordinaire.

Imaginez que vous êtes en 2025, et votre municipalité a mis en place une réglementation plus stricte sur la collecte des déchets: n'est autorisé qu'un sac de 5L maximum par personne par semaine (tout le monde se met au vrac!), avec un petit surplus pour circonstances exceptionnelles autorisé à hauteur de 0,2 L par semaine. Arrive la date de votre anniversaire: vous invitez une flopée d'amis, autour d'un bon repas et de quelques bouteilles. Mais le lendemain, panique: votre sac poubelle fait 9L, au lieu des 5 autorisés! Combien de temps cet excédent d'ordures va-t-il encombrer votre cuisine? Profitant du surplus hebdomadaire autorisé, vous allez patiemment sortir 5,2L par semaine pendant plusieurs semaines consécutives. Par un petit calcul, on voit qu'il faudra 20 semaines pour revenir au niveau d'avant votre anniversaire. Pour éviter les mauvaises odeurs, vous allez bien sûr optimiser les ordures dont vous vous débarrasserez chaque semaine (plutôt évacuer les plus anciennes en priorité), de sorte que le dernier sac de 5,2L ne contiendra sans doute plus aucun carton de pizza de votre soirée.

L'important n'est pas l'ordure de votre anniversaire prise isolément, mais le changement durable de niveau d'ordures qu'a entraîné l'excédent ponctuel de votre anniversaire. Le niveau d'ordures dans votre cuisine aura pendant 20 semaines gardé la trace de l'excédent ponctuel.

¹¹ — Rappel: une concentration de 280 ppm du CO₂ signifie que sur un échantillon aléatoire d'un million de molécules dans l'air atmosphérique, il y a en moyenne 280 molécules de CO₂.



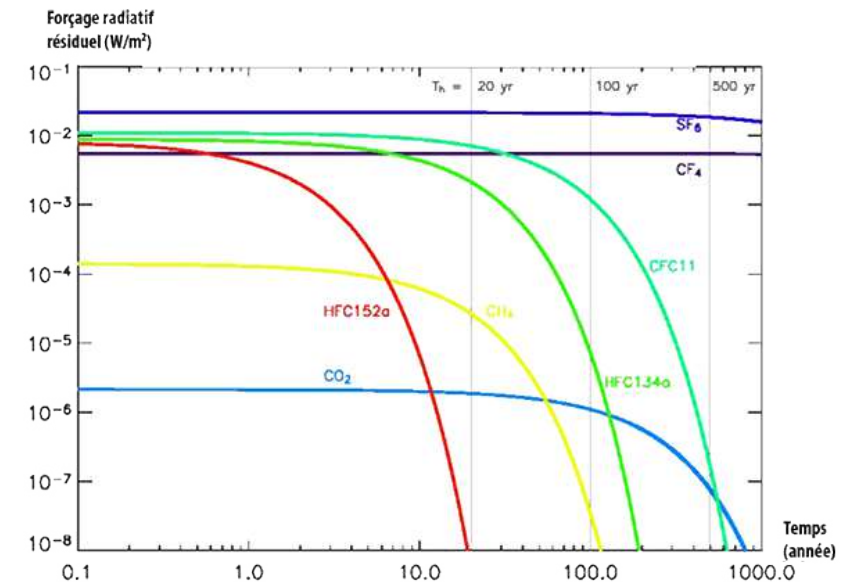
4.3 Forçage radiatif résiduel

C'est exactement ce qu'il se passe dans la baignoire atmosphérique avec l'excédent de CO₂ émis au cours des dernières décennies. Parce que seule une portion excédentaire peut être évacuée, le stock restera encore pour de très nombreuses années au-dessus de son niveau « naturel » habituel.

Le graphique ci-dessus précise ces durées de « persistance » dans l'atmosphère pour différents GES, aussi appelées « durées de vie ». Chaque courbe indique la durée de la trace que laisse une unité excédentaire du gaz dans l'atmosphère en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de renforcement de l'effet de serre à partir de sa date d'émission. Attention, l'axe horizontal, en années, est sur une échelle logarithmique, de sorte que le marqueur à gauche du chiffre 10 indique la 9ème année après émission mais celui de droite marque l'année 20.¹² L'axe vertical est lui aussi gradué de façon logarithmique: on comprend donc que le CO₂ au moment de son émission est environ cent fois moins puissant en termes d'effet de serre que le méthane CH₄ en jaune, mais voit ses effets persister 10 fois plus longtemps. En effet, observez la courbe bleue: on voit que l'effet réchauffant d'une tonne de CO₂ supplémentaire émise aujourd'hui sera à peu près constant pendant un siècle. Il faudra attendre 500 ans pour l'effet soit divisé par dix! On exprime cela habituellement en disant que le CO₂ émis aujourd'hui « reste » un siècle dans l'atmosphère et ne « disparaît » qu'au bout de mille ans. Le CO₂ que nous émettons aujourd'hui va donc réchauffer l'atmosphère pendant plusieurs siècles!

12 — Les graduations sont en années mais les marqueurs ne sont pas équidistants: ce sont leurs logarithmes qui le sont. Par exemple: $\log(100) - \log(10) = \log(1000) - \log(100)$. Ce type d'échelles est particulièrement utile pour représenter sur un même graphique des données variant sur des échelles très différentes (quelques années ou des centaines d'années). Pour mieux comprendre l'échelle logarithmique: <https://youtu.be/HWEZZ7fk4JA>.

Étonnant: les courbes noires et violettes ne diminuent jamais! L'effet de forçage radiatif persiste indéfiniment. En effet, il s'agit du SF₆ et du CF₄, deux molécules contenant du fluor et produites exclusivement par l'industrie. Le fluor est un élément chimique extraordinairement réactif, et qui n'est présent dans la nature que sous forme de minéraux stables. Historiquement, il a été très difficile de l'isoler, mais une fois qu'on y est arrivé, on s'en est servi pour fabriquer des composés qui ont des propriétés industrielles intéressantes, comme liquide réfrigérants (dont les fameux CFC qui détruisent la couche d'ozone) ou isolants électriques (c'est le cas du SF₆). Comme ils ne font pas partie d'un cycle naturel et qu'ils sont chimiquement stables en raison des propriétés du fluor, ils ne sont jamais réabsorbés par les continents ou les océans, et une fois émis ils stagnent éternellement dans l'atmosphère. Voilà peut-être la forme la plus pure d'un « déchet ».



Persistance de l'effet de forçage radiatif après émission

Source: D. Hauglustaine, LSCE, cité par <https://jancovici.com>

Résumé

- ✦ Lorsqu'un gaz est émis par l'activité humaine de façon «excédentaire» dans l'atmosphère, le système naturel va mettre un certain temps avant de revenir à l'équilibre.
- ✦ La durée durant laquelle on continue d'observer la trace d'un excédent ponctuel est appelée «durée de vie» d'un gaz.
- ✦ Pour un GES, l'important n'est pas sa trace en quantité mais sa trace en termes de forçage radiatif.
- ✦ La durée de vie du carbone est particulièrement longue (environ 1000 ans). Pour diviser par 10 l'effet de forçage d'une unité excédentaire de CO₂, il faut donc attendre pas moins de 500 ans!

5

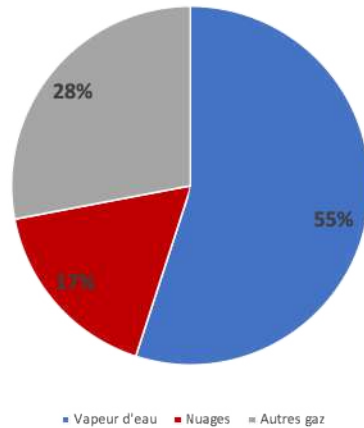
Et la vapeur d'eau dans tout ça ?

Une question subsiste : pourquoi, dans la figure précédente, ne parle-t-on pas de la vapeur d'eau ? Pourtant, on a vu dans le chapitre sur l'effet de serre qu'H₂O est un GES plus puissant que CO₂. Le camembert suivant montre qu'il est responsable, sous forme gazeuse ou condensée (nuages) des presque trois quarts de l'effet de serre de la planète.

La réponse est qu'il y a un cycle naturel de l'eau : présente en quantité énorme dans les océans et un peu sur les continents sous forme d'eau douce, elle s'évapore et retombe en pluie. Les émissions humaines ne perturbent pas ce cycle, parce qu'elles sont infimes par rapport aux émissions naturelles, comme l'évaporation des océans. Elles ne s'accumulent pas non plus dans l'atmosphère car celle-ci ne peut pas accumuler indéfiniment de la vapeur d'eau : au-delà d'une certaine limite, elle se condense et retombe en pluie. C'est comme si votre baignoire d'H₂O avait une trappe d'évacuation, ce qui détermine un niveau maximal que le stock ne peut donc pas dépasser ! Cette limite augmente avec la température, ce qui déclenche un cercle vicieux : plus la température moyenne de l'atmosphère augmente, plus elle est capable de stocker de vapeur d'eau, ce qui renforce l'effet de serre.



Répartition des contributions à l'effet de serre « naturel » des différents gaz présents dans l'atmosphère



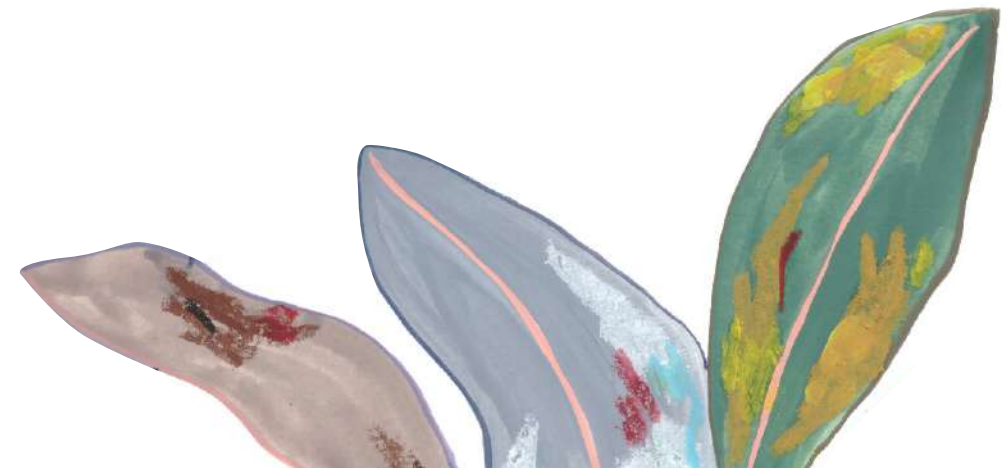
Résumé

- Les émissions humaines supplémentaires de vapeur d'eau sont négligeables par rapport aux émissions naturelles et ne s'accumulent pas dans l'atmosphère. Ce mécanisme de saturation n'existe pas pour le CO₂.
- Le réchauffement climatique renforce l'effet de serre naturel du H₂O.

Conclusion

Les atomes de carbone sur Terre et dans l'atmosphère se répartissent ainsi de façon dynamique, suivant de grands cycles naturels. Chaque plante, chacune de vos respirations participe à ces cycles, même si elles ne représentent qu'une infime poussière dans ces grands mouvements d'ensemble.

Cependant, depuis la Révolution industrielle, les sociétés humaines puisent dans les réserves fossiles, denses réservoirs de carbone constitués au cours de centaines de millions d'années. Comme dans la scène de l'apprenti sorcier de Fantasia, ces émissions excédentaires créent un déséquilibre à l'échelle planétaire qu'il devient très difficile de maîtriser. Les capacités de compensation naturelle par la captation sont limitées, d'autant plus limitées que le réchauffement s'accroît, et cette persistance des gaz à effet de serre dans l'atmosphère sur plusieurs centaines d'années prolonge d'autant leur impact sur l'effet de serre.





5

Observations,
expérimentations
et interprétations
convergent: démarche
scientifique et
climatoscepticisme ne
vont pas bien ensemble



Introduction

Après ces quatre premiers chapitres sur l'histoire de la Terre et du climat, nous allons entrer un peu plus dans le feu de l'action. Et plus précisément à la rencontre des climatosceptiques. Parmi eux, certains disent qu'il ne se passe rien, d'autres que cela se réchauffe mais que ce n'est pas le CO₂, et d'autres enfin que cela ne provient pas de l'activité humaine.

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les éléments qui nous font dire, au contraire, qu'il se passe bel et bien quelque chose d'inhabituel, que la seule explication raisonnable est l'augmentation très rapide des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère depuis deux cents ans, notamment du CO₂, et que la seule source identifiée de ces émissions supplémentaires est l'utilisation humaine des combustibles fossiles.

Il ne s'agira pas ici d'émettre des opinions, mais de donner des observations empiriques. L'augmentation des températures moyennes est un fait avéré, ainsi que la diminution de la biodiversité. Que la teneur en CO₂ ait augmenté et continue de le faire est le résultat de mesures effectuées régulièrement. Que le CO₂ soit un gaz à effet de serre est vérifié depuis plusieurs siècles par des expérimentations empiriques.

Quand on est scientifique et qu'on a en main toutes ces observations, le problème est de les coordonner dans un schéma cohérent. Car la science n'est pas qu'une affaire de faits: c'est une affaire de sélection et d'interprétation des infinies observations qu'on peut faire du monde. En l'occurrence, le seul schéma cohérent dont nous disposons est l'effet de serre. C'est une conclusion simple, directe, et qui a derrière elle plus d'un siècle de travaux scientifiques.

Le climatoscepticisme aboutit à l'inaction. « Ce n'est pas la peine de s'agiter, de toutes façons on n'y peut rien, il faut donc laisser faire les choses. » C'est la position de nombre de politiques et d'industriels, à l'instar de l'administration de Donald Trump. Position véritablement dangereuse, parce que si le travail des scientifiques depuis un demi-siècle a établi quelque chose, c'est bien que les équilibres climatiques et écologiques sont en train de basculer, et que nous sommes à un moment charnière dans l'histoire de l'humanité. C'est justement le moment où il est encore possible d'infléchir l'avenir, et de le rendre plus supportable pour nous et nos descendants, et peut-être même meilleur qu'aujourd'hui!



1

Il se passe quelque chose

Tout le monde n'est pas d'accord :



Source: Twitter

Et pourtant...

1.1 Des records de chaleur

Les lignes qui suivent devront être ré-écrites chaque année, car chaque année de nouveaux records sont battus. Au moment où nous l'écrivons, avril 2020, voici les derniers :

- Il a fait 45°9 dans le Gard le 28 Juin 2019, la température la plus élevée jamais enregistrée en France
- Il a fait 38°7 à Cambridge le 25 Juillet 2019, la température la plus élevée jamais enregistrée en Grande-Bretagne

- Il a fait 20°75 à la base Comandante Ferraz le 9 Février 2020, la température la plus élevée jamais enregistrée en Antarctique
- Il a fait 21°C à Alert, le 15 Juillet 2019, la température la plus élevée jamais enregistrée dans cette base située à moins de 900 km du pôle Nord

1.2 Évolution des moyennes

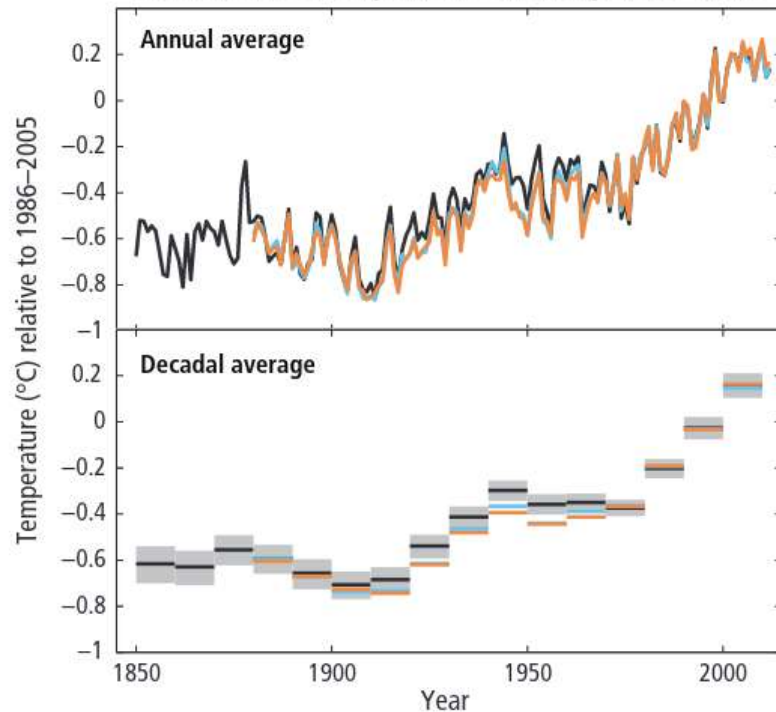
Il s'agit de températures extrêmes dans des endroits localisés. Qu'en est-il des moyennes sur la planète ?

- Entre 2005 et 2019, neuf mois de juillet ont été les plus chauds jamais enregistrés depuis que l'on fait des mesures.
- Le quinquennat 2015-2019 a été le plus chaud jamais enregistré, avec une température moyenne supérieure de 1°1 C à celle du XIXe siècle.
- Le graphique ci-joint, extrait du rapport 2014 du GIEC, montre les changements depuis 1850. On notera que la température a grimpé de 1°C depuis 1920, et que le mouvement s'accélère depuis 1980 (les différentes couleurs correspondent à différentes séries de mesures).



Ce graphique, extrait du rapport 2014 du GIEC, montre les changements de températures moyennes sur le globe depuis 1850.

(a) **Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly 1850–2012**



Évolution de la température depuis 1850 selon différentes séries de mesures

Source: Rapport 2014 du GIEC

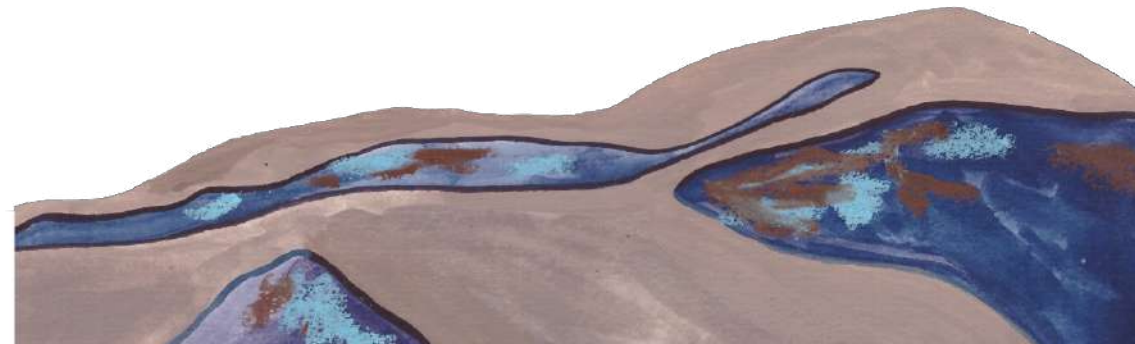
Lecture: Les différentes couleurs des courbes (orange, noir, etc.) correspondent à différentes séries de mesures réalisées par différentes équipes de recherche. Le fait qu'elles soient quasiment identiques nous confirme la fiabilité des résultats.

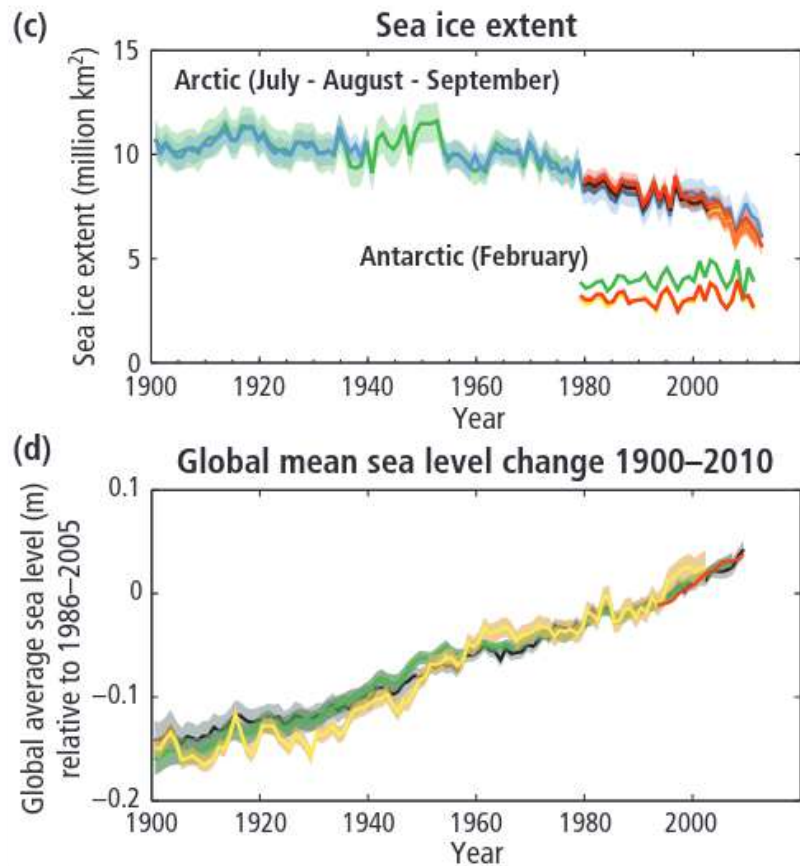
En regardant l'ensemble du mouvement des courbes depuis 1850, on voit que les températures étaient globalement stables jusqu'en 1920 puis se sont réchauffées, allant de $-0,8$ à $+0,2$ degrés par rapport à la température de référence. L'augmentation est particulièrement marquée dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. On note que la température a grimpé de 1°C depuis 1920, et que le mouvement s'accélère depuis 1980.

La même chose est visible sur le graphique du bas où on fait la moyenne de chaque température annuelle sur 10 ans consécutifs à partir du graphique du haut (d'où l'aspect de la courbe en palier, sans l'aspect dents-de-scie du graphique du haut). L'accélération finale est particulièrement visible.

1.3 Fonte de la banquise

L'augmentation des températures moyennes se traduit par la fonte des glaces des pôles. Le graphique suivant, extrait du même rapport, montre le rétrécissement de la banquise et l'élévation du niveau des mers depuis un siècle (les différentes couleurs représentent à nouveau des séries de mesures différentes, menées par des équipes indépendantes).





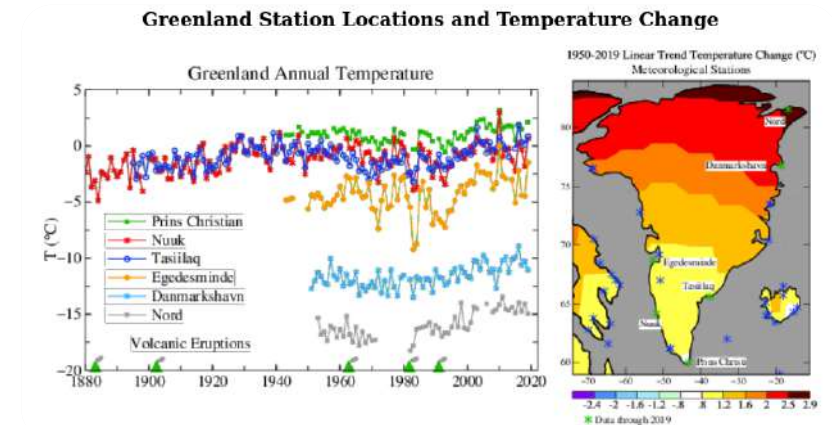
Évolution de la surface couverte par la banquise et du niveau des mers

Source: Rapport 2014 du GIEC

On voit par exemple que la banquise en Arctique couvrait environ 10 millions de km² jusqu'en 1960, puis amorce un déclin progressif qui nous amène aujourd'hui autour de 5 millions de km². Deux fois moins qu'il y a 60 ans.

Vous serez peut-être surpris.e de ne pas voir de mouvement similaire en Antarctique. Comme nous l'avons déjà observé, l'Antarctique et l'Arctique réagissent différemment: l'un est un continent (comme l'Europe ou les Amériques) isolé des autres par un océan qui fait le tour du globe, l'autre est une mer intérieure entre l'Europe, l'Asie et le Groenland. La glace de l'Antarctique est un glacier, celle de l'Arctique une banquise, et cela amène à des comportements différents.

Vous trouverez des courbes tenues à jour régulièrement et beaucoup d'autres renseignements sur le site de l'Université Columbia¹³. Nous en extrayons notamment la figure suivante, qui montre que c'est en Arctique que l'on a relevé les changements de température les plus importants, et ce d'autant plus qu'on monte vers le Nord (ce qu'indique le dégradé de rouge dans la carte du Groenland à droite):



Évolution de température à différents points du Groenland

Source: Site de l'Université Columbia

¹³ — <http://www.columbia.edu/~mhs119/>

1.4 Peut-il faire plus froid sur une planète qui se réchauffe?



Question 1: Certains météorologues disent que 2012 a été une année exceptionnellement chaude en France. Pourtant, en février 2012, la Saône a gelé à Lyon, pour la première fois depuis 1985. Est-ce compatible?

Question 2: Le 26 février 2015, dans un épisode désormais célèbre¹⁴, le sénateur américain Inhofe apportait au Sénat une boule de neige qu'il venait de ramasser à l'extérieur, et faisait remarquer qu'il faisait très froid, et qu'il fallait vraiment ne pas avoir les yeux en face des trous pour prétendre que l'année 2014 avait été particulièrement chaude. Après quoi il lançait la boule vers le président de séance. C'est vrai qu'il avait fait très froid ce jour-là à Washington. Est-ce un argument recevable contre le réchauffement climatique?

Réponse 1: Oui! Si on dit que 2012 a été une année chaude, on veut dire que la moyenne des températures prises sur l'année et sur le territoire était plus élevée que les années précédentes. Mais cela n'empêche pas qu'à certains moments et à certains endroits il y ait eu des températures exceptionnellement basses!¹⁵

Réponse 2: Non, comme ci-dessus: on peut avoir une moyenne élevée avec certaines mesures basses. D'ailleurs, comme le dit le journaliste de l'article, ce même jour de février, s'il faisait particulièrement froid à Washington, il faisait par ailleurs particulièrement chaud en Floride (30°C)! D'où l'importance en sciences de ne pas juger des situations uniquement sur des cas particuliers.

Résumé

- ♦ La planète se réchauffe, c'est-à-dire que les températures augmentent régulièrement depuis 1850.
- ♦ Il s'agit des moyennes saisonnières autant que des températures extrêmes et le mouvement s'accélère.
- ♦ Le mouvement est aussi visible via la fonte rapide de la banquise arctique.

¹⁴ — Un épisode que vous trouverez raconté ici: <https://time.com/3725994/inhofe-snowball-climate/>

¹⁵ — Voir pour les détails (et pour quelques belles photos) <https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/lmg378-2012-02-27.xml>

2

Et du côté des vivants?

2.1 bouleversements du monde vivant

Quand on fait chauffer de l'eau dans une casserole, des courants se forment pour répandre la chaleur dans le liquide (c'est ce qu'on appelle la convection), puis l'eau s'agite de manière désordonnée avant de commencer à bouillir. Nous n'en sommes pas là, mais c'est une règle générale: à mesure que l'atmosphère se réchauffe, elle s'agite de plus en plus, ce qui signifie que les événements extrêmes, températures (froids ou canicules) ou précipitations (cyclones, sécheresses) vont être plus fréquents et plus accentués.

Ces changements vont impacter les êtres vivants de manière spectaculaire. En 2019, un Martien aurait pu voir des incendies dévaster trois continents: l'Amérique (en Amazonie), l'Asie (en Sibérie) et l'Australie (dans le Sud-Est). Dans ce dernier pays, les feux ont détruit la faune et la flore sur 186 000 km² (à titre de comparaison, la Grande-Bretagne a une superficie de 230 000 km²), brûlant les arbres et les animaux. Les rares survivants sont promis à disparaître, faute d'habitat et de nourriture.



Source: <https://www.theguardian.com/australia-news/2019/dec/31/australia-bush-fires-towns-devastated-and-lives-lost-as-blazes-turn-the-sky-red>

Ces incendies ont frappé les imaginations, ainsi que les images de koalas rescapés dont on ne pouvait rien faire car leur habitat avait disparu. Mais le plus souvent, ces transformations passent inaperçues, en raison de la perte de mémoire entre générations humaines. C'est ce qu'on appelle **«l'effet cliquet»**: nous considérons comme « normale » la situation que nous avons connue dans notre jeunesse. Ceux qui roulaient en voiture dans les années 1960 se souviennent qu'il fallait s'arrêter tous les cent ou deux cents kilomètres pour nettoyer son pare-brise, recouvert d'une véritable bouillie d'insectes volants. Les sportifs qui faisaient du vélo à la campagne l'été devaient fermer la bouche pour ne pas avaler d'insectes. Ceux qui roulent aujourd'hui n'ont pas ce souvenir, et ne se demandent pas où sont passées ces nuées de mouches, moustiques, hannetons, fourmis, abeilles ou guêpes. Entre-temps la réalité a changé.



2.2 Mesurer le vivant



©David Liittschwager. Source : <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2010/02/life-ecosystems-one-cubic-foot/>

Comment peut-on s'en rendre compte au-delà de nos expériences subjectives individuelles à vélo ou en voiture? Quantifier la « biodiversité » est un exercice beaucoup plus difficile que de mesurer la température ou la pression de l'air.

Une tentative intéressante a été faite par un photographe nommé Liittschwager.¹⁶ Dans des milieux divers il a procédé à l'expérience sui-

¹⁶ — Le livre a été publié par Chicago University Press, et vous pourrez trouver certaines photos du procédé sur la toile.

vante: placer une structure métallique cubique, formée uniquement de six arêtes de 30 cm (comme sur l'image ci-dessous parmi les coraux), et photographier tout ce qui passe dans la cage et qui mesure plus d'un millimètre, et ce, en continu pendant 24H. Après cela, l'artiste a regroupé toutes les images de ces organismes vivants sur des planches éblouissantes de richesse et de diversité.

On est tenté de penser que ces planches peuvent suffire à donner une idée complète de la biodiversité à l'endroit considéré. On y voit en effet une incroyable multitude d'êtres vivants... Et pourtant il en manque encore beaucoup! D'abord parce qu'il s'agit de la situation en un jour donné: suivant le temps qu'il fait et les saisons, les populations changent, et il faut songer aussi aux migrateurs. Il manque tout ce qui vit sous terre: le sol regorge de vie, avec les vers de terre et les champignons. Par construction, il manque tout ce qui a moins d'un millimètre: les bactéries par exemple. Enfin et surtout, il manque toutes les relations qui lient les différentes espèces: elles ont toute leur place assignée dans l'écosystème, et elles ont besoin des autres espèces pour survivre.

La richesse de la faune et de la flore échappera toujours aux mesures. Mais si l'on veut en donner une idée en quelques chiffres, afin de pouvoir communiquer avec des gens assis derrière des bureaux, et documenter, de manière objective, les pertes ou les gains, on utilise le plus souvent:

- Le nombre d'espèces présentes, par catégories (mammifères, insectes, plantes, arbres) ;
- La surface occupée par l'espèce et le nombre d'individus ;
- Le poids total des individus constituant l'espèce (ce qu'on appelle la **biomasse**).

Il faut toujours se rappeler que ces chiffres sont saisonniers: certaines plantes ou certains insectes paraissent absents certaines années, où

ils subsistent sous forme de graines ou d'œufs. Ces indicateurs, pour insuffisants qu'ils soient, sont bien utiles. Ils permettent de montrer, par exemple, que la forêt amazonienne, où la vie grouille à tous les étages, du sous-sol jusqu'à la canopée, est infiniment plus riche qu'une forêt d'eucalyptus, avec ses feuillages clairsemés et son sol aride. On ne peut pas remplacer l'une par l'autre.

2.3 Biodiversité en déclin

Que nous enseignent ces outils de mesure? Une étude¹⁷ de 2017 montre qu'en Allemagne, la biomasse d'insectes volants était le quart de ce qu'elle était en 1990. Selon l'effet cliquet, ce qui est pour notre génération une perte réelle ne l'est pas pour la suivante, qui se réfère à ce qu'elle voit autour d'elle et a du mal à s'imaginer que la réalité a pu être très différente.

Au niveau mondial, une analyse comparée des données historiques¹⁸ montre que 40% des espèces d'insectes sont menacées d'extinction. En ce qui concerne les mammifères, une étude¹⁹ menée sur 177 espèces montre que toutes ont perdu au moins 30% de leur habitat, et que 40% ont perdu 80% ou plus de leur population. Enfin, la Grande Barrière de Corail vient de subir un épisode de blanchiment massif, le troisième en cinq ans²⁰. Les coraux vivent en symbiose avec des algues, et le blanchiment signifie qu'ils s'en séparent, ce qui conduit à terme à leur mort, et avec eux à la disparition de tout l'écosystème des récifs coralliens, l'un des plus riches et des plus spectaculaires du monde.

17 — <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185809>

18 — <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>

19 — <https://www.pnas.org/content/114/30/E6089>

20 — <https://www.theguardian.com/environment/2020/mar/25/great-barrier-reef-suffers-third-mass-coral-bleaching-event-in-five-years>

Voici la situation actuelle, telle qu'elle figure dans le rapport de 2019 de l'IPBES²¹, l'organisme équivalent au GIEC mais travaillant sur la biodiversité. Pour avoir les chiffres bilan, concentrez-vous sur la moitié droite de l'image.

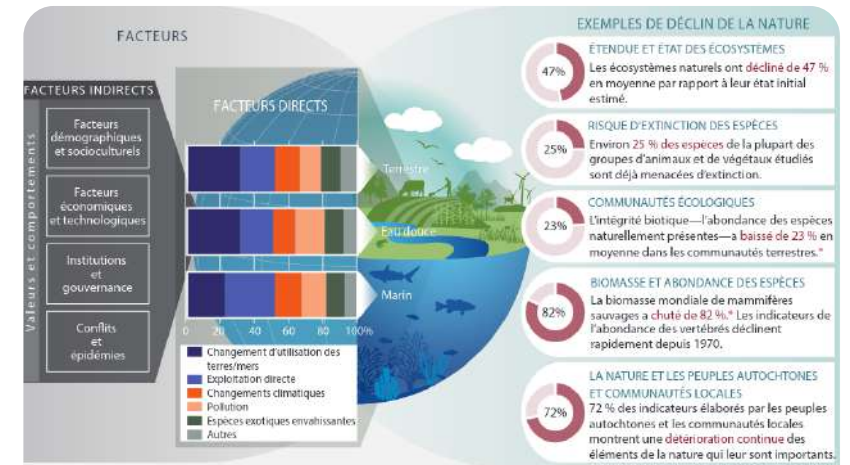


Figure SPM 2 Exemples de déclins observés dans la nature au niveau mondial, soulignant le recul de la biodiversité provoqué par des facteurs de changement directs et indirects.

Exemples de déclins observés dans la nature

Source: Rapport 2019 de l'IPBES

2.4 Climat... ou pollution?

Ces changements ne sont pas dus principalement à la hausse des températures – du moins pas encore! En général, ils sont causés par un premier effet plus direct lié aux activités humaines: **la pollution et la destruction des milieux de vie**. On estime que 75% de l'environnement terrestre et 65% du milieu marin ont été «gravement altérés»

21 — https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_fr.pdf

par les activités humaines, ce qui n'est pas si étonnant quand on sait que l'élevage et l'agriculture occupent plus du tiers de la surface des continents et utilisent les trois quarts des ressources en eau douce²².

Le **rythme de destruction** des espèces animales et végétales est sans précédent depuis la disparition des dinosaures, si bien que les spécialistes parlent dorénavant de «**sixième extinction**».

On pourrait penser que c'est tout bénéfique pour l'espèce humaine, qui aura la planète pour elle toute seule. La pandémie de COVID-19 vient nous démontrer qu'il n'en est rien! La biosphère nous nourrit et nous protège de bien des façons. Les virus étaient sur cette planète bien avant nous, et ils ont trouvé leurs hôtes au fur et à mesure de l'évolution. Si un virus de chauve-souris ou de pangolin voit son hôte disparaître, soit parce qu'il est chassé soit parce que son habitat se rétrécit, il mutera pour trouver un autre hôte. L'homme étant devenu l'espèce la plus abondante et la moins menacée, c'est évidemment l'hôte idéal.

Résumé

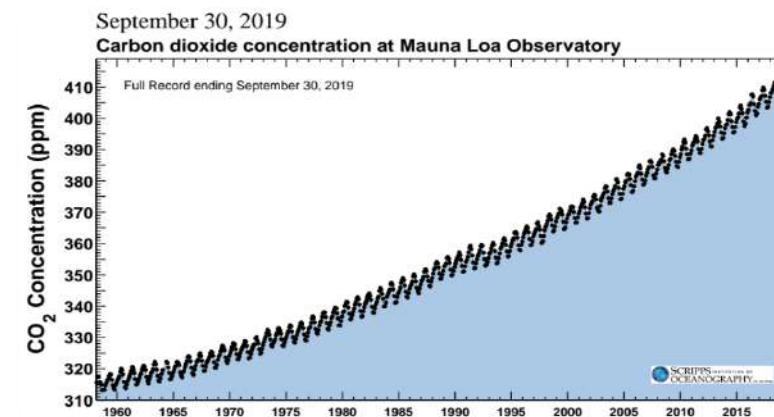
- ✦ Le réchauffement s'accompagne d'un effondrement biologique: beaucoup d'espèces ont disparu, et celles qui subsistent se raréfient
- ✦ La cause directe principale est la pollution et la destruction de leurs milieux de vie.
- ✦ On mesure ce déclin de la biosphère principalement en comptabilisant le nombre d'espèces existantes, le nombre d'individus par espèce et leur biomasse.

3

Le lien avec le CO₂

3.1 La courbe de Keeling

En 1958, Charles Keeling installait à Hawaï un observatoire météorologique chargé de mesurer la concentration de l'air en CO₂. L'endroit, l'île volcanique Mauna Loa, avait été choisi pour son isolement et son absence de végétation. Les relevés se sont poursuivis sans interruption jusqu'à aujourd'hui, ce qui en fait une base de données particulièrement précieuse et intelligible.



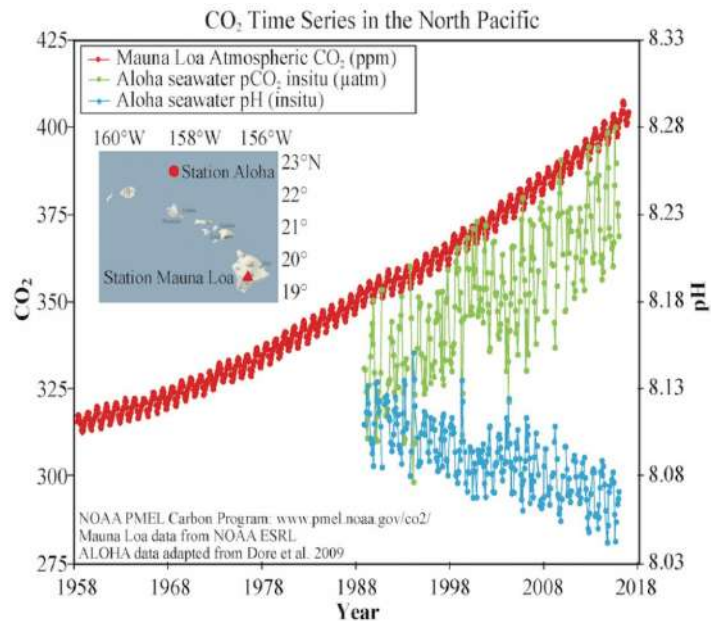
Courbe de Keeling

Source: Site internet de l'Observatoire de Mauna Loa

Le graphique indique qu'au début de l'expérience, la concentration de CO₂ était de 314 ppm. Elle est maintenant de 414 ppm, soit une augmentation de 32% sur toute la période, c'est-à-dire 0,56% par an pendant 50 ans. D'ailleurs, pourquoi la courbe n'est-elle pas parfaitement lisse et a-t-elle cet aspect denté? Ce sont les fluctuations saisonnières

au cours d'une année, dues au cycle du carbone: les plantes sont plus actives l'été que l'hiver!

Vous pourrez vous rendre sur le site de l'observatoire²³ pour trouver les observations à jour. Vous y trouverez également des informations concernant les autres GES, comme le méthane, et l'acidification des océans. Celle-ci n'a été mesurée, toujours autour de Mauna Loa, qu'à partir de 1990, et cela donne ceci:



Data: Mauna Loa (http://ftp.cgd.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt) ALOHA (http://hawaii.sei.furui.edu/lot/products/HOT_surface_CO2.txt)
Ref: J.E. Dore et al. 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:12235-12240

Évolution conjointe de la concentration en CO₂, dans l'air et dans l'eau, et de l'acidité de l'eau

Source: Site internet de l'Observatoire de Mauna Loa

23 — <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

La courbe en rouge, vous la reconnaissez, c'est la teneur en CO₂ de l'air, la courbe en vert c'est la teneur en CO₂ de l'eau, et la courbe en bleu c'est le pH (plus il est bas, plus l'eau est acide, plus les coraux souffrent). Il est clair à la lecture du graphique que ces trois variables semblent évoluer de façon « liée ». C'est ce qu'on appelle une **corrélation**.

3.2 Corrélation et causalité

On croise des corrélations entre variables tous les jours, et inmanquablement lorsqu'on lit la presse. Un détour par un exemple va nous éclairer sur le bon usage à en faire.

Est-ce que fumer cause les cancers du poumon? Sans nier que les fumeurs étaient plus fréquemment atteints de cancer du poumon que les non-fumeurs, le grand statisticien Irving Fisher, fumeur lui-même, affirmait plus précisément que l'un n'était pas la cause de l'autre, mais qu'il existait une cause non encore identifiée, un gène sans doute, qui prédisposait à la fois au cancer du poumon et au tabagisme. L'un n'était donc pas la cause de l'autre, et Fisher concluait qu'empêcher les cancéreux de fumer était une double peine, car cela leur retirait la maigre consolation qui leur restait. À l'inverse, les randonneurs ont plus souvent des entorses que les nageurs, et ils mangent aussi plus souvent du saucisson. Est-ce à dire que le saucisson est un facteur d'entorses?

Vous l'avez compris, dans le cas du cancer du poumon, le tabagisme est une cause directe alors que dans le cas du saucisson et des entorses, il y a un facteur causal caché qui explique les deux observations: la pratique de la randonnée.

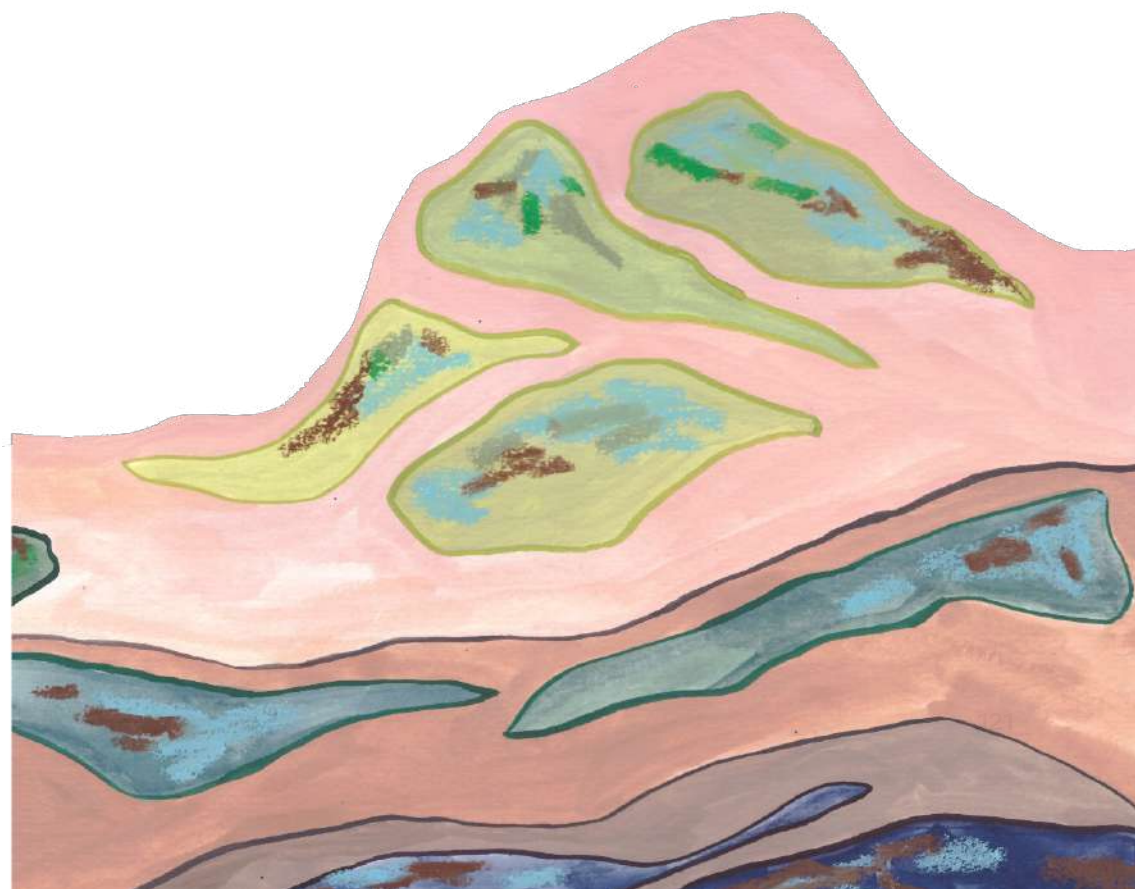
Revenons maintenant à notre question: est-ce le CO₂ qui cause l'élévation de température et l'acidification des océans? On pourrait imaginer que non, et qu'en fait l'une et l'autre soient la conséquence d'une cause commune, aujourd'hui inconnue. En théorie c'est possible, comme pour les entorses et le saucisson. Mais nous avons des

expériences de simulation réalisées en laboratoire qui montrent que le CO₂ crée un effet de serre. Dès le 19^{ème} siècle, bien avant donc que le réchauffement ne fasse sentir ses effets, des savants (Fourier (1824), Tyndall (1861), Arrhénius (1896)) avaient prédit que la teneur de CO₂ dans l'atmosphère affecterait la température (amusant: eux s'intéressaient plutôt au refroidissement qu'au réchauffement, car ils voulaient expliquer les ères glaciaires!). En résumé, le fait que le CO₂ soit un GES ne fait plus de doute et nous savons donc que plus il y en a dans l'atmosphère, plus celle-ci retiendra de chaleur. Nous pouvons aussi tester et **prouver expérimentalement** que le CO₂ se dissout dans l'eau, et acidifie celle-ci.

Outre ces faits observables et expériences de simulation concordants, l'accumulation de CO₂ fournit une explication **simple** au réchauffement et nous ne disposons pas actuellement d'explication alternative. Les phénomènes astronomiques que nous avons discutés dans le premier chapitre par exemple, se déroulent beaucoup plus lentement, et l'orbite de la Terre n'a pas eu le temps de changer en cinquante ans. On pourrait tenter de relier ce faisceau d'indices de façon plus tarabiscotée, ou en invoquant une puissance cachée inconnue. Mais voilà une vieille règle en science (et bien utile aussi dans la vie de tous les jours!): quand on a le choix entre plusieurs explications, la plus simple est jugée la plus probable (ce qu'on appelle d'ailleurs curieusement le rasoir d'Occam). Tant qu'on ne trouve pas d'autre explication qui rende cohérentes nos observations et expériences et qui soit de préférence plus simple (cela pourrait arriver après tout!), il faut accepter que le CO₂ (et les autres GES) soit la cause du réchauffement climatique et de l'acidification des océans.

Résumé

- ♦ Les mesures disponibles, dont la fameuse courbe de Keeling, attestent de la corrélation entre température, CO₂ et acidité des océans.
- ♦ Au-delà d'une simple corrélation, le modèle d'effet de serre par accumulation de CO₂ dans l'atmosphère rend cohérent les expériences de simulations en laboratoire et les observations.
- ♦ L'approche scientifique consiste donc à adopter ce modèle, tant qu'il n'y en a pas de plus convaincant.



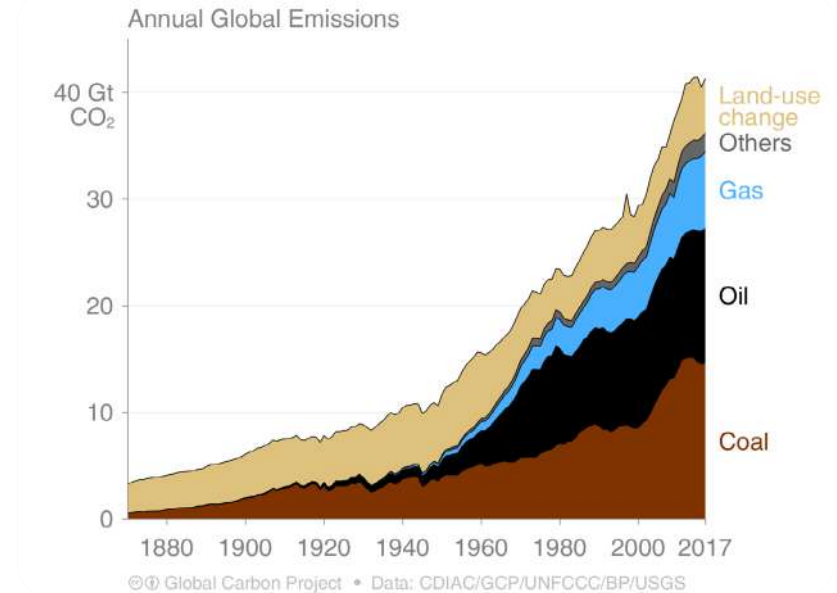
4

Le lien avec les activités humaines

La proportion de CO₂ dans l'air était de 280 ppm avant 1850, elle est aujourd'hui de 417 ppm. D'où vient le CO₂ qui s'est accumulé dans l'atmosphère? En soi, ça n'est pas une question simple. Les éruptions volcaniques, par exemple, rejettent du CO₂. De tout ce que nous connaissons, la seule différence des deux derniers siècles dans le remplissage et le vidage de la baignoire carbone, c'est l'utilisation des **combustibles fossiles**. On pourrait en théorie envisager un autre dérèglement biologique du cycle du carbone. Mais nous n'en avons aucune trace, ni aucune raison de penser qu'il y en ait.

Le graphique suivant donne les émissions humaines par source depuis 1880²⁴. Notons qu'il s'agit de gigatonnes (Gt) de molécules de CO₂ et non pas d'atomes de carbone seul. Pour avoir l'équivalent en gigatonnes d'atomes de carbone, il faut en gros diviser par quatre (3,67 exactement). Les 40 Gt de CO₂ qu'on a atteint en 2017 correspondent à environ 10 Gt d'atomes de carbone. On peut alors rapprocher ce graphique de celui du chapitre précédent (le cycle du carbone).

24 — On trouvera d'autres graphiques, détaillés et actualisés, sur le site du Global Carbon Project: https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/2019_COP25_GCP_CarbonBudget_gpeters.pdf?gRkQ71BSsg8JYWP_2LFGg6zKKfHeTHEj



Évolution des émissions annuelles de CO₂

Source: Global Carbon Project

Jusqu'en 1950, c'est l'utilisation du sol (agriculture, déforestation, bois) qui est la principale responsable des émissions. Ces émissions ont par exemple lieu lorsqu'on déboise une forêt pour brûler le bois comme combustible de chauffage, ou lorsqu'on assèche des marais pour y construire des villes. Depuis la fin du 19^{ème} siècle, on observe un lent décollage des combustibles fossiles: d'abord le charbon, puis le pétrole. A partir de 1950, l'économie mondiale est entièrement dominée par les combustibles fossiles, le gaz apparaît, et les émissions décollent véritablement: elles sont **multipliées par quatre en 70 ans!**

Est-ce que cela suffit à déséquilibrer les stocks de carbone atmosphérique à l'échelle de la planète entière? Oui. Dans un cycle naturel des atomes de carbone, les émissions sont de l'ordre de 210 Gt de carbone (120 pour les continents et 90 pour les océans). En lisant le graphique précédent, on voit que l'activité humaine injecte 9 à 10 Gt d'atomes

de carbone supplémentaires par an. Ce n'est pas négligeable, et cela suffit à perturber le cycle naturel. Pour reprendre la comparaison de la baignoire, on ouvre le robinet de plus en plus grand et pendant plusieurs années. L'eau coule plus fort et il n'y a pas à s'étonner que le niveau s'élève.

Résumé

- ♦ Le seul changement en émissions de carbone des deux derniers siècles est celui de l'utilisation des combustibles fossiles.
- ♦ Ces émissions ne sont pas marginales et sont d'un ordre de grandeur suffisant pour dérégler le cycle à l'échelle planétaire.

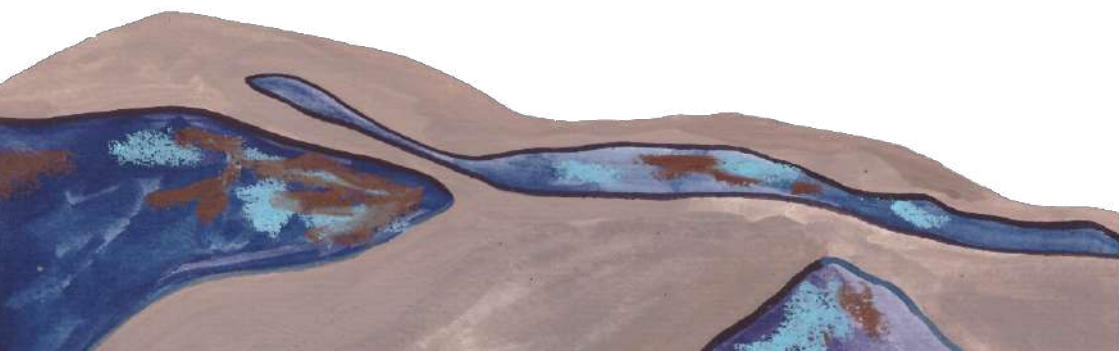


Conclusion

Si l'on approche le problème en scientifique, on peut dire que le réchauffement climatique est avéré et qu'il est dû aux émissions humaines de CO₂ par la combustion de fossiles. On ne voit pas d'autre cause possible à une augmentation aussi rapide de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Par ailleurs, on assiste aussi à une disparition accélérée de nombreuses espèces vivantes, aujourd'hui principalement due à la destruction et pollution de leurs lieux de vie, demain certainement amplifiée par les conséquences du réchauffement climatique.

Et d'un certain point de vue, c'est une excellente nouvelle! Car ce réchauffement, comme nous le verrons, risque d'avoir des conséquences catastrophiques s'il se poursuit. Si ce n'était pas le CO₂, nous serions à la merci d'une cause que nous ne connaissons pas et sur laquelle nous ne pourrions pas grand-chose.

Mais comme c'est le CO₂, on peut agir: si l'on arrive à diminuer la quantité présente dans l'atmosphère, on amènera certainement une baisse des températures. Il est crucial de comprendre que nous ne sommes pas impuissants et c'est bien pour cela que l'on se casse la tête à faire des sciences: pour trouver des moyens d'agir.





6

**Et maintenant,
où allons-nous?
Comprendre les
scénarios du GIEC**



Introduction

Ayant compris le fonctionnement du climat et le moment de bascule hors du commun que nous vivons, il est légitime de s'interroger: où cela va-t-il nous entraîner et pouvons-nous essayer d'influencer la trajectoire à venir?

Pour répondre à ces questions, il serait certainement utile de savoir, pour chaque choix de société possible, ce qui nous attendra climatiquement parlant. De se projeter dans les futurs possibles. C'est ce que nous allons discuter dans ce chapitre.

L'accord de Paris, signé en 2015, demande à tous les États signataires d'agir en sorte que le réchauffement moyen, par rapport aux temps préindustriels, soit moindre que 2°C en 2100, et de préférence voisin de 1,5°C. Comment est-on arrivé à ce consensus, et comment s'est-on fixé cet objectif, sachant que nous en sommes déjà à 1,1°C? Alors qu'on a tant de mal à prévoir le temps qu'il fera au-delà d'une ou deux semaines, peut-on vraiment faire des prédictions sérieuses sur le climat qui régnera dans cent ans? Nous allons voir comment c'est possible et discuter les projections les plus connues établies par le GIEC, Groupe International d'Expert sur le Climat, dans son rapport de 2014.

Le GIEC est l'organisme qui s'occupe de collecter et de rassembler les travaux des différents centres de recherche qui travaillent sur le climat. Il publie régulièrement des rapports qui font le point sur nos connaissances et sur ce que sera l'avenir, en fonction de ce que nous faisons aujourd'hui et demain. Ces rapports sont disponibles en ligne, consultables par tout un chacun. Ils constituent une base de travail indispensable pour les collectivités et les entreprises qui doivent planifier leur développement à moyen ou long terme.

Questions pour s'échauffer

- Question 1: Les quantités de CO₂ émises dans l'atmosphère par les activités humaines se sont envolées avec la révolution industrielle. De toute la quantité émise depuis deux siècles, quelle proportion a été émise dans les trente dernières années: 1/8, 1/4 ou 1/2?
Réponse: 1/2
- Question 2: Sur la trajectoire actuelle «business as usual», le GIEC prévoit un réchauffement de 4°C ou davantage en 2100. Il s'agit d'un réchauffement moyen sur la planète. En ce qui concerne l'Arctique seul, de combien serait le réchauffement moyen: 2°C, 6°C, 13°C?
Réponse: 13°C
- Question 3: Sur la trajectoire actuelle «business as usual», le GIEC prévoit une élévation du niveau des mers de 1 à 2 cm par an jusqu'en 2100. Suivant la même étude, si les émissions s'arrêtaient à cette date, le niveau des mers pendant le 22^{ème} siècle (1) baisserait de 1 à 2 cm par an (2) resterait stable (3) croîtrait de 4 à 10 cm par an.
Réponse: (3) - croîtrait de 4 à 10 cm par an
- Question 4: quand un glaçon fond dans un verre d'eau, l'eau ne déborde pas. Alors pourquoi devrait-on s'inquiéter de la fonte de la banquise et de l'élévation du niveau de la mer?
*Réponse: En effet ce n'est pas la fonte de la banquise qu'il faut relier à l'élévation du niveau des mers, même si les deux sont des conséquences du réchauffement. L'élévation du niveau des mers est due à la dilatation thermique de l'eau (plus chaude, elle occupe un volume supérieur) à la fonte des calottes glaciaires, comme les glaciers des Alpes mais aussi et surtout le Groenland ou l'Antarctique (**90% de la glace mondiale se trouve en Antarctique!**). Toute la glace qui y est stockée repose sur une plaque terrestre continentale: si cette glace fond, son eau douce viendra se déverser et s'ajouter à celle des océans.*

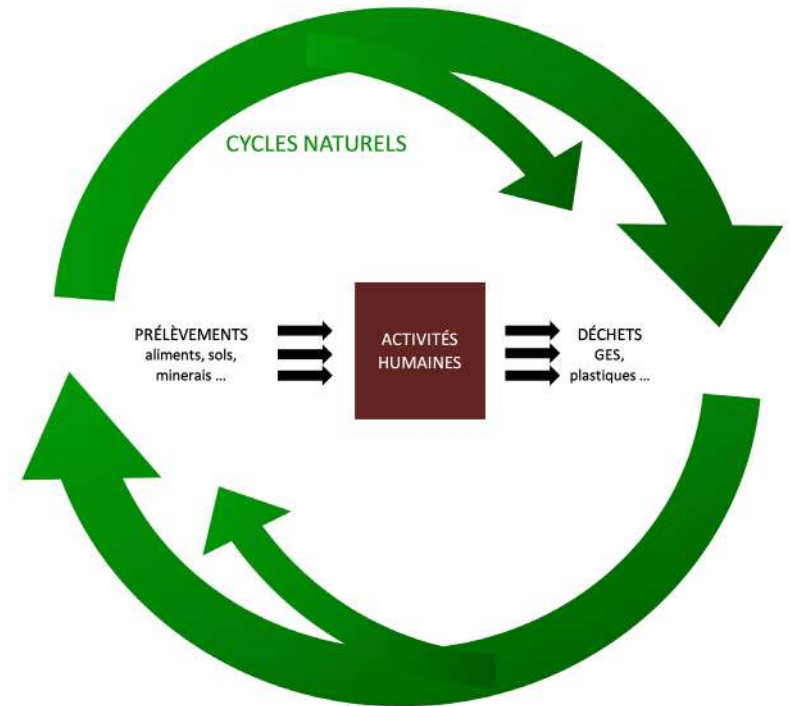


1

Comment fait-on les prévisions?

Le climat est un produit de la biosphère, c'est-à-dire que le climat ne serait pas ce qu'il est sans les interactions avec les êtres vivants. La biosphère est le théâtre de cycles naturels, physiques ou biologiques, que l'humanité perturbe en prélevant des ressources (animaux et végétaux pour l'alimentation, minéraux pour l'industrie) et en rejetant des déchets, notamment des GES, notamment du CO₂. On peut se représenter cela de manière sommaire par le schéma suivant:

Le climat est donc l'effet combiné de deux causes: les **cycles naturels** d'une part; les **activités humaines** (et notamment les émissions de GES) d'autre part. Nous considérons les cycles naturels macroscopiques comme indépendants de la volonté humaine et les physiciens et biologistes savent les caractériser par des équations d'évolution. Mais les activités humaines relèvent de décisions individuelles ou collectives que nous pouvons quelquefois orienter mais pour lesquelles rien, ou presque, ne peut être déterminé en avance. Les cycles font l'objet de prédictions, les activités humaines futures ne peuvent faire l'objet que de conjectures.



Cela ne poserait pas de problème pour prédire le climat des décennies à venir si les humains n'ajoutaient qu'une goutte d'eau à la grande mécanique naturelle du climat. Mais comme nous l'avons vu, depuis deux siècles, les activités humaines ne sont plus du tout négligeables par rapport aux grands cycles naturels et ont un impact significatif sur le climat. Comment donc prédire le climat si celui-ci résulte à la fois de cycles macroscopiques prévisibles et d'actions humaines indéterminées?

La solution adoptée par la communauté scientifique consiste à séparer le problème en deux. On commence par se fixer un certain nombre de **scénarios possibles** pour les activités humaines. Puis, dans cha-

cun de ces scénarios, on fait les calculs sur la façon dont les grands cycles vont se comporter. Les résultats des projections climatiques dépendent donc du scénario retenu, et ne sont pas des prévisions à proprement parler, puisqu'elles ne prédisent pas le scénario, mais le prennent comme entrée dans leurs calculs. C'est pour marquer cette différence que l'on parle de **projections** plutôt que de prévisions.

1.1. Les scénarios

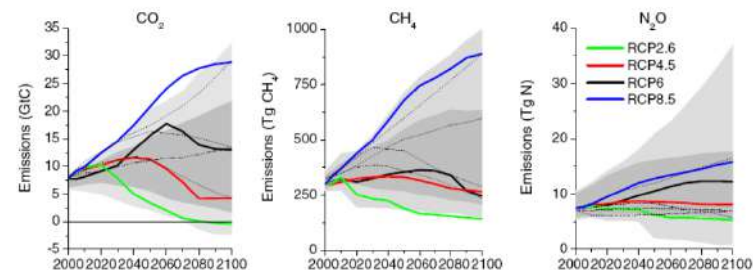
Comme vous vous en doutez, le nombre de scénarios imaginables est infini. Heureusement, tous les détails ne sont pas importants si l'on cherche à connaître l'évolution du climat. Le paramètre le plus déterminant pour le climat, c'est bien sûr la quantité de gaz à effet de serre (GES) relâchée dans l'atmosphère. On peut donc considérablement simplifier le problème en envisageant chacun des scénarios uniquement selon la quantité d'émissions de GES associée.

Ces **scénarios d'émissions** sont maintenant standardisés. On les appelle les Representative Concentration Pathways (Trajectoires Représentatives de la Concentration), en abrégé **RCP**, caractérisés chacun par une évolution possible de la quantité de GES présente dans l'atmosphère d'ici à la fin du siècle. Ils sont au nombre de quatre, du plus pessimiste, le RCP 8.5, au plus optimiste, le RCP 2.6, en passant par le RCP 4.5 et le RCP 6.

À quoi se rapportent les chiffres de 8.5 ou 2.6? Le chiffre indique le forçage radiatif atteint en 2100 suivant ce scénario, par exemple 8,5 Watt/m² dans le scénario RCP 8.5, c'est-à-dire le déséquilibre entre l'énergie reçue par la Terre et l'énergie renvoyée dans l'espace.

Les voici :

RCP Emission Trajectories



Évolutions projetées des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O dans les différents scénarios étudiés

Source: Rapport 2014 du GIEC

Lecture: Les quatre scénarios sont représentés par des courbes de couleur et les trois graphiques représentent trois gaz à effet de serre, avec le plus connu, le CO₂, à gauche. Le RCP 8.5 correspond au climat le plus chaud puisque plus le forçage est grand, plus la planète se réchauffe. C'est cohérent avec ce qu'on voit sur les trois graphiques: la courbe en bleu est la plus haute pour les 3 gaz à effet de serre représentés. Notez que la courbe verte commence plus haut que la courbe noire en émissions de CO₂ et ce n'est pas une erreur: pour réduire les émissions futures, il faut considérablement s'activer aujourd'hui, quitte à émettre plus de CO₂ à court-terme.

La décision de se limiter à quatre scénarios est récente. Auparavant, les chercheurs ont exploré une grande variété de scénarios, et les dessins montrent où les RCP se situent par rapport à la littérature antérieure: 95% de celle-ci se trouve dans le grisé sombre, et 5% dans le grisé léger. On voit bien comment ils sont représentatifs: le RCP 8.5 représente le « business as usual » (BAU), sans aucune politique climatique. Le RCP 2.6 correspond au contraire à une politique de réduction drastique des émissions dès aujourd'hui.

Résumé

- ♦ Le climat est l'effet combiné de deux causes: les cycles naturels, prévisibles; et les activités humaines, que nous ne savons pas prédire.
- ♦ Les climatologues procèdent donc en se fixant un certain nombre de scénarios possibles pour les activités humaines, dans lesquels ils simulent les phénomènes naturels.
- ♦ Les 4 scénarios de référence (RCP) sont indexés en termes d'émissions totales, jusqu'au scénario RCP 8.5 qui correspond au prolongement de la trajectoire actuelle.
- ♦ Le chiffre indique le forçage radiatif atteint en 2100. Plus le chiffre est haut, plus le réchauffement sera important.

1.2 Les calculs

L'avantage d'avoir fixé des scénarios-type est que l'on peut ensuite passer la main aux mathématiciens, physiciens, biologistes et autres scientifiques, qui vont pouvoir faire leurs calculs sans se soucier de savoir d'où viennent les émissions et comment elles sont produites. Connaissant les quantités de GES émises par les activités humaines à chaque instant, ils vont calculer le temps qu'il fera, en utilisant les équations habituelles de la météorologie.

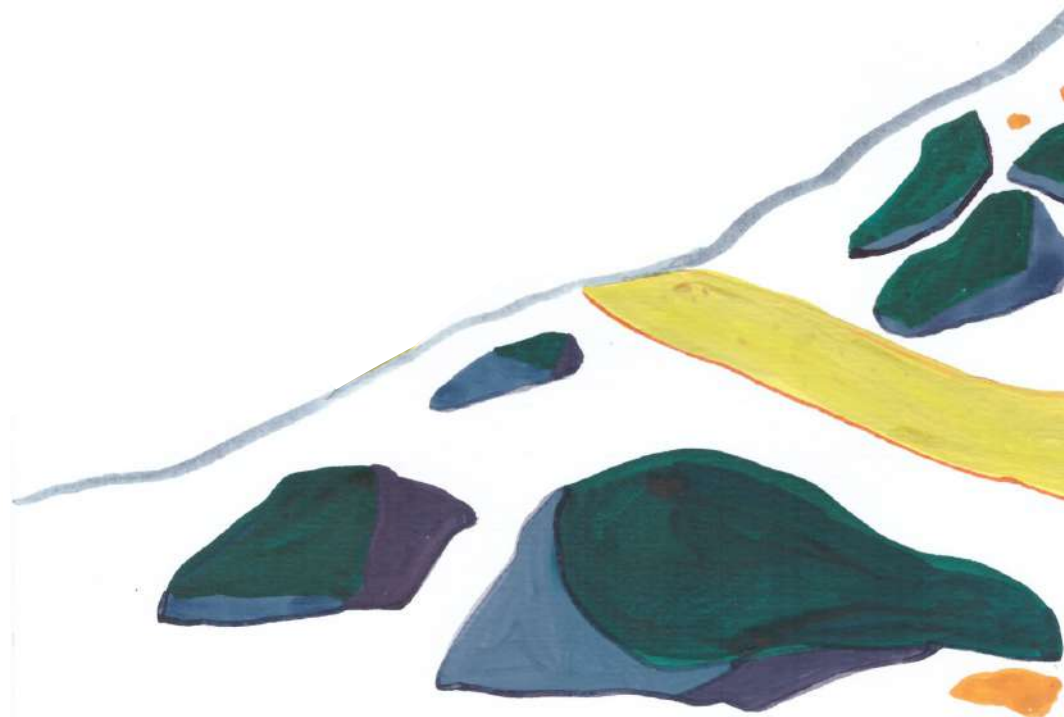
Mais vous répondrez peut-être: chacun sait que les prévisions météorologiques ne sont guère fiables au-delà d'une ou deux semaines. Comment donc se fier à des prévisions climatiques qui s'étendent jusqu'à la fin du siècle?

La réponse est que le météorologiste à la radio doit annoncer le temps exact qu'il fera à un point et une date précise. À l'inverse, une climatologue propose des **prédictions moyennes** sur plusieurs années à venir et de façon **probabiliste**. C'est la clé de la différence entre météo et climat.

La situation est analogue aux lancements d'un dé. À chaque lancer, au moment où le dé quitte la main du lanceur, sa trajectoire est parfaitement déterminée, et peut être calculée en appliquant les lois habi-

tuelles de la physique. Imaginez le météorologiste comme la personne qui s'occupe de calculer la trajectoire avant que le dé ne touche le tapis, et la climatologue comme la personne chargée de dire en moyenne les faces sur lesquelles le dé s'arrêtera le plus souvent. L'un peut prédire la position, dire par exemple à quel endroit le dé touchera le tapis, l'autre peut donner les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat. L'un et l'autre apportent des réponses précises, l'un et l'autre sont scientifiques, l'un et l'autre utilisent les équations physiques du mouvement des vents, des précipitations, etc. mais la seconde ne cherche pas à obtenir une prédiction à proprement parler, mais une description probabiliste des futurs possibles.

Est-ce qu'une telle réponse statistique, qui ne dit pas ce qui va se passer mais qui énonce les résultats possibles et donne une probabilité pour chacun d'eux, est utile? Bien sûr que oui! À choisir entre deux dés, mieux vaut jouer avec celui qui a 50% de chances de faire 6 que celui qui n'en a que 10%.



En résumé, si nous appliquons cela au sujet du réchauffement climatique:

	Le météorologiste	La climatologue
Cherche à prédire	La température et les précipitations exactes de la date future qui nous intéresse	Les températures et précipitations moyennes les plus probables sur la période future qui nous intéresse
Propose une réponse	Exacte: une seule météo est prédite pour chaque date	Probabiliste: montre les différentes moyennes possibles sur des périodes de plusieurs années, et les probabilités associées à chaque possibilités
Ne cherche pas à prédire	Le scénario d'émissions de GES dues aux activités humaines. Il est pris comme donnée dans ses calculs, comme le type de lancer du dé.	Le scénario d'émissions de GES dues aux activités humaines. Il est pris comme donnée dans ses calculs, comme le type de lancer du dé.
Effectue ses calculs	Une seule fois avec le maximum de précision	De nombreuses fois, en modifiant chaque fois légèrement les conditions initiales pour tenir compte des erreurs possibles. Le bilan des résultats permet d'identifier les résultats les plus probables.
Utilise les équations	De la physique du climat	De la physique du climat

Pour chacun des scénarios, les climatologues donnent les probabilités que le réchauffement moyen soit de 1, 2, 3, 4°C ou même plus. Choisir une politique et s'y tenir, c'est choisir un des dés. Ne rien faire (business as usual), c'est choisir le dé estampillé RCP 8.5. Le climatologue ne vous donnera pas le climat qui prévaudra en 2100, mais la liste des climats possibles et la probabilité de chacun d'eux.

1.3 Vers 2100 en accélérant

Comme nous l'avons vu à plusieurs reprises, le CO₂ émis en excédent aujourd'hui ne commencera à être éliminé naturellement que dans un millier d'années. Même si nous arrêtons net toutes nos émissions dès aujourd'hui, le stock de CO₂ présent dans l'atmosphère restera sensiblement inchangé pendant cinq siècles et tout le troisième millénaire aura à faire avec l'atmosphère que nous lui aurons léguée.

Mais, même dans ce cas, cela ne voudrait pas dire que le climat resterait inchangé pendant cette période. Et cela pour plusieurs raisons. D'abord, comme le second chapitre nous l'a fait comprendre, le «rembourrage» du sac de couchage atmosphérique de la Terre des dernières décennies a créé un déséquilibre structurel entre énergie reçue et énergie renvoyée. Le climat terrestre est donc en train d'évoluer naturellement vers un **nouveau point d'équilibre**, plus chaud, auquel nous ne sommes pas encore.

En outre, le réchauffement va en **s'accélération**. Cela est dû au fait que certains mécanismes, parfois très lents, finissent par en déclencher d'autres qui agissent en retour sur les premiers et les renforcent. Par exemple, le réchauffement en siècle 1 fait fondre une partie de la banquise, qui ne sera plus là en siècle 2. Or la glace réfléchit la lumière du soleil, et c'est autant d'énergie qui était renvoyée vers l'espace sans être interceptée par les GES (ce ne sont pas des infrarouges). En siècle 2, il y aura donc moins de lumière solaire réfléchi, et davantage de lumière absorbée par la surface et renvoyée sous forme de rayonnement infrarouge. Ce rayonnement sera intercepté par les GES, viendra réchauffer davantage l'atmosphère, et faire fondre encore davantage



de banquise. Le réchauffement s'accélère donc d'année en année. Dans le cas des glaces polaires, leur fonte complète peut s'étaler sur plusieurs siècles et faire monter le niveau des mers de plusieurs dizaines de mètres.

On connaît plusieurs mécanismes naturels de ce genre, qui tous accélèrent le réchauffement au-delà de 2100. On n'en connaît pas qui le ralentissent. C'est pourquoi les rapports du GIEC, dans le cadre du RCP 8.5, parlent d'une élévation du niveau des mers de 1,5 à 2 cm par an jusqu'en 2100, puis de plusieurs centimètres par an au-delà. Il n'en dit pas plus, car on ne sait pas à quel rythme les glaces vont fondre. La fonte complète de la glace antarctique, à elle seule, élèverait le niveau des mers de 70 mètres (ce qui n'est heureusement pas pour tout de suite).

1.4. Les effets de seuil

Les calculs actuels incorporent essentiellement tous les mécanismes dont la communauté scientifique juge qu'ils ont ou auront une influence sur le climat dans les deux ou trois siècles qui viennent. Ils n'incorporent pas des mécanismes connus, mais sur lesquels on n'a pas assez d'informations pour faire des prévisions (la chute d'un astéroïde sur la Terre, une nouvelle guerre mondiale). Une exception cependant : tous les scénarios font l'hypothèse que d'ici 2100 on aura inventé des processus industriels permettant d'extraire le CO₂ de l'atmosphère et de le séquestrer, et que ces processus pourront être déployés à l'échelle nécessaire. Nous en sommes très loin à ce jour, et à dire vrai on ne voit guère comment y arriver. Il n'empêche que cette industrie hypothétique joue un rôle fondamental dans les réductions d'émissions prévues par les RCP de 2.5 à 6.

Parmi les mécanismes physiques ou biologiques qui sont bien compris en théorie, mais sur lesquels on n'a pas suffisamment d'informations pour établir des prédictions certaines, il faut enfin mentionner les **effets de seuil**. En anglais, on parle de « tipping points », points de bascule. Le principe est le même que lorsqu'on charge une barque petit à

petit : elle s'enfoncé chaque fois un peu plus mais elle flotte toujours, et tout d'un coup, une petite charge supplémentaire la fait couler. Passer certains seuils peut conduire à des changements brutaux et colossaux à l'échelle d'un continent entier. Concernant le réchauffement climatique, les scientifiques qui ont réalisé la carte suivante en ont identifié neuf :

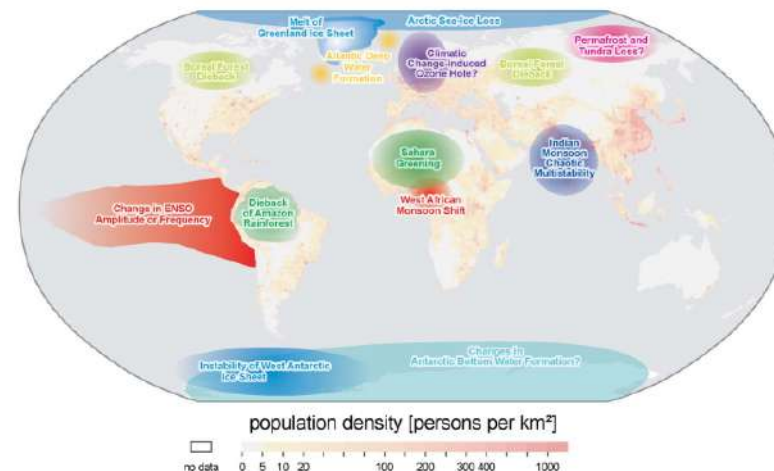


Fig. 1. Map of potential policy-relevant tipping elements in the climate system, updated from ref. 5 and overlain on global population density. Subsystems indicated could exhibit threshold-type behavior in response to anthropogenic climate forcing, where a small perturbation at a critical point qualitatively alters the future fate of the system. They could be triggered this century and would undergo a qualitative change within this millennium. We exclude from the map systems in which any threshold appears inaccessible this century (e.g., East Antarctic Ice Sheet) or the qualitative change would appear beyond this millennium (e.g., marine methane hydrates). Question marks indicate systems whose status as tipping elements is particularly uncertain.

Neufs effets de seuil potentiels impactant le climat planétaire

Source : « Tipping elements in the Earth's climate system », article publié dans la revue PNAS²⁵

25 — https://www.pnas.org/content/pnas/105/6/1786.full.pdf?wptouch_preview_theme

Prenons le cas de la mousson, un régime qui amène des précipitations importantes pendant une partie de l'année, le reste de l'année étant sec. C'est l'alternance entre saison sèche et saison des pluies autour de l'équateur, en Afrique de l'Ouest et en Inde. Ce que dit l'article, c'est qu'il y a un risque que ces régimes disparaissent avec le réchauffement climatique. Pour l'Inde, cela conduirait à une sécheresse généralisée, avec toutes les conséquences pour l'alimentation et la survie des populations que vous pouvez imaginer.

Notez néanmoins que ces effets de seuil n'amènent pas tous à plus de sécheresse: en Afrique par exemple, cela conduirait au verdissement du Sahara, dorénavant arrosé par des pluies. Ce serait une des rares conséquences positives du réchauffement climatique! Vous pouvez aller en lire davantage dans l'article original.

1.5 Pourquoi 2100?

Pourquoi donc avoir retenu la date de 2100? L'idée est de trouver un compromis en montrant à la fois l'ampleur des changements à venir (dont les plus impressionnants n'advieront pas dans 10 ans mais dans 50 ou 60 ans) tout en étant suffisamment proche pour que les personnes vivant aujourd'hui se sentent concernées.

Contrairement aux générations qui ont aujourd'hui le pouvoir de décision sur nos systèmes économiques et sociaux, ceux qui sont nés après 2000 vivront toute leur vie professionnelle dans un climat qui se réchauffe, et ont une bonne chance que leur vieillesse se déroule à la fin du siècle dans les conditions décrites par les rapports du GIEC.

Résumé

- ♦ Pour chaque scénario d'émissions humaines, les climatologues proposent une projection statistique, qui indiquent les trajectoires possibles et leurs probabilités associées.
- ♦ Cette incertitude tient en partie à la difficulté de calculer l'ensemble des paramètres affectant le climat, mais aussi à des phénomènes d'accélération, qui augmentent l'ampleur des changements, et plus encore aux effets de seuil, à partir desquels l'intégralité du système peut être bouleversée.
- ♦ Les projections mettent le cap sur 2100, qui est un horizon à la fois suffisamment proche pour se sentir concernés et suffisamment lointain pour prendre la mesure de l'ampleur des changements à venir.



2

Qu'est-ce que le GIEC?

Il existe beaucoup de centres de recherche sur le climat, tels que l'ISPL (Institut Pierre-Simon de Laplace) à Paris et beaucoup d'institutions qui font de la prospective, comme la NASA aux États-Unis²⁶. Mais le **GIEC**, Groupe International d'Experts sur le Climat, est unique en ce qu'il représente un **consensus scientifique et politique international**.

Il a été fondé par l'Organisation des Nations Unies et l'Organisation Météorologique Internationale en 1988, sous le nom anglais «IPCC», pour International Panel on Climate Change²⁷, dans le but de «fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade».

Il ne s'agit pas d'un centre de recherche, mais d'une organisation intergouvernementale qui a 195 États membres. Pour remplir son mandat, elle fait appel à des scientifiques, mais leurs conclusions sont toujours soumises aux États membres, seuls habilités à les valider. Elle publie un rapport tous les six ans (chacun d'eux se décomposant en plusieurs sous-rapports), en plus de rapports sur des sujets particuliers. Il y a eu cinq rapports, en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2014, et le dernier en date sera publié en 2022 (le premier volume est disponible depuis août 2021).

²⁶ — Ces organisations ont des sites très intéressants sur le sujet comme : <https://www.climat-en-questions.fr/> ou <https://climate.nasa.gov/>

²⁷ — Son site est le <https://www.ipcc.ch/> et une partie est en français : <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>

Les chercheurs qui collaborent aux rapports le font sur la base du volontariat et ne sont pas rémunérés. Ils représentent toutes les disciplines, toutes les régions du globe et la rotation est importante²⁸.

Leur travail consiste à compiler les différents résultats obtenus par les différentes équipes de chercheurs de part le monde, et d'en extraire les informations pertinentes. La procédure de validation est longue et complexe, entre les auteurs du rapport et les chercheurs dont ils rendent compte des résultats, puis entre les auteurs du rapport et les politiques qui représentent leurs gouvernements et défendent leurs intérêts (songez à l'Arabie Saoudite, qui, économiquement parlant, n'a pas vraiment intérêt à remettre en question les émissions liées à la consommation d'hydrocarbures). Les scientifiques peuvent aussi se proposer comme relecteur des rapports et faire des remarques auxquelles le GIEC doit répondre. Chaque rapport résulte donc d'un accord scientifique et politique : toutes les informations publiées ont été validées par la communauté scientifique dans son ensemble et par les autorités politiques des pays concernés au terme d'un processus ouvert et transparent, fonctionnant sans financement privé. C'est un énorme avantage permettant de faire autorité, même si l'on peut craindre que ce consensus ne soit obtenu en minimisant les risques encourus.

Résumé

- ♦ Le GIEC est une institution intergouvernementale représentant 195 États membres.
- ♦ Il a pour mandat de faire la synthèse des études scientifiques disponibles sur l'évolution climatique.
- ♦ Le GIEC produit des rapports environ tous les 6 ans, qui font l'objet d'un consensus scientifique et politique et dont découle leur autorité sur la scène internationale.

²⁸ — <https://medialab.sciencespo.fr/en/news/cartographier-les-auteurs-du-giec/>



3

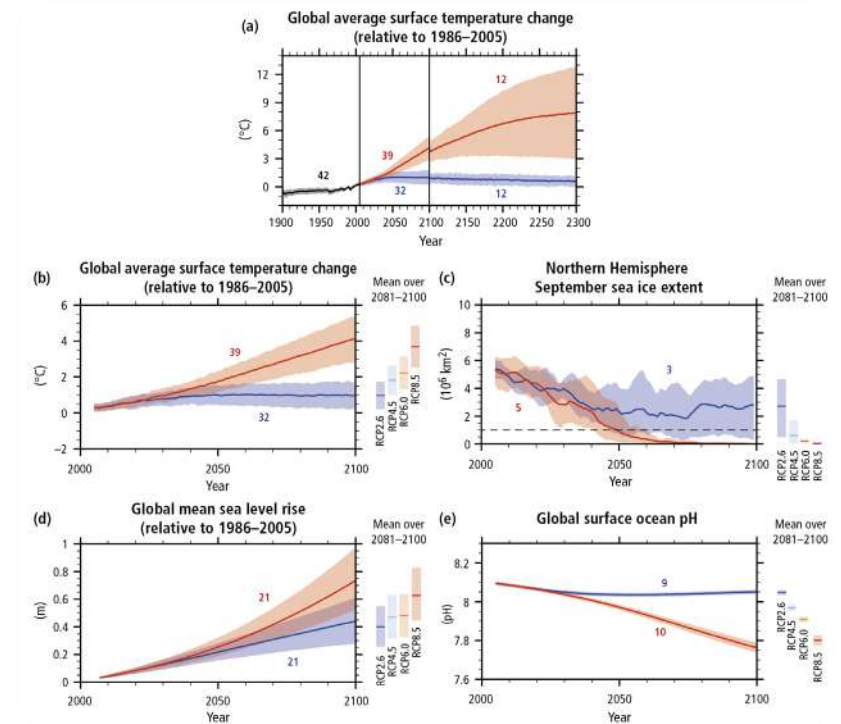
Comment lire les rapports du GIEC?

3.1 Cartographies du réchauffement attendu

Les rapports sont disponibles en ligne, sur le site du GIEC. Le rapport 2014, par exemple, en comporte en fait quatre: l'un porte sur les projections, c'est-à-dire le déroulement du réchauffement jusqu'en 2100 suivant les quatre scénarios retenus, l'autre sur la manière dont les activités humaines pourraient s'y adapter, le troisième sur la manière dont on pourrait l'atténuer, et un rapport de synthèse. Chacun de ces quatre rapports commence par un «résumé pour les décideurs» qui présente l'essentiel, et se termine par les annexes techniques.

En ce qui concerne les projections, elles sont toujours de nature probabiliste et elles sont donc présentées avec leur probabilité de réalisation.

La page 59 du Rapport de Synthèse présente les projections en ce qui concerne la température moyenne, l'extension de la banquise, l'élévation du niveau des mers et le pH des océans. La voici:



Évolution de différents marqueurs du réchauffement climatique dans deux scénarios extrêmes

Source: Page 59 du Rapport 2014 du GIEC

Exercice d'application :

Commençons par le premier graphique qui s'affiche sur la page du rapport, tout en haut.

1. Il indique la température moyenne annuelle à la surface du globe. Deux trajectoires possibles y sont représentées. L'une correspond au scénario RCP 2.6, l'autre au scénario RCP 8.5. D'après vous, quelle courbe est celle du scénario 2.6 et quelle courbe est celle du scénario 8.5?

2. On lit sur le graphique que la courbe rouge atteint la valeur 8 en 2300. Est-ce à dire qu'il fera 8 degrés Celsius en moyenne en 2300 dans ce scénario?

3. On voit aussi que la première partie des deux courbes est identique, en noire. À quoi correspond-elle?

4. Zoomons sur la courbe rouge. On voit tout autour une zone rouge pâle. À quoi correspond-elle, à votre avis? Et comment se comporte-t-elle au fil des années?

5. Lorsqu'on regarde la courbe bleue, on voit aussi la zone bleutée correspondant à un intervalle de confiance de 95% mais pas le même élargissement au fil des années. Est-ce que la première partie de ce chapitre peut nous fournir des explications possibles?

La suite de la page 59 du rapport présente 4 autres graphiques dont l'évolution du niveau des mers, du pH des océans et de la surface de banquise arctique.

6. Sans les regarder de près, vous savez certainement déjà à quoi vont ressembler ces graphiques. Dans le(s)quel(s) de ces trois graphiques vous attendez-vous à voir la courbe rouge au-dessous de la courbe bleue?

1. En effet, la rouge présente l'augmentation de température la plus élevée et correspond donc au scénario 8.5.

2. Non bien sûr: le titre nous dit que, comme pour d'autres graphiques que nous avons vus dans les chapitres précédents, l'axe vertical du graphique indique les valeurs en comparaison avec la moyenne sur la période de référence 1986-2005. Ainsi dans le scénario 8.5, il fera en l'an 2300 8 degrés Celsius de plus qu'en 1986-2005.

3. Aux températures observées dans le passé. Plutôt rassurant qu'il s'agisse des mêmes courbes pour les deux scénarios!

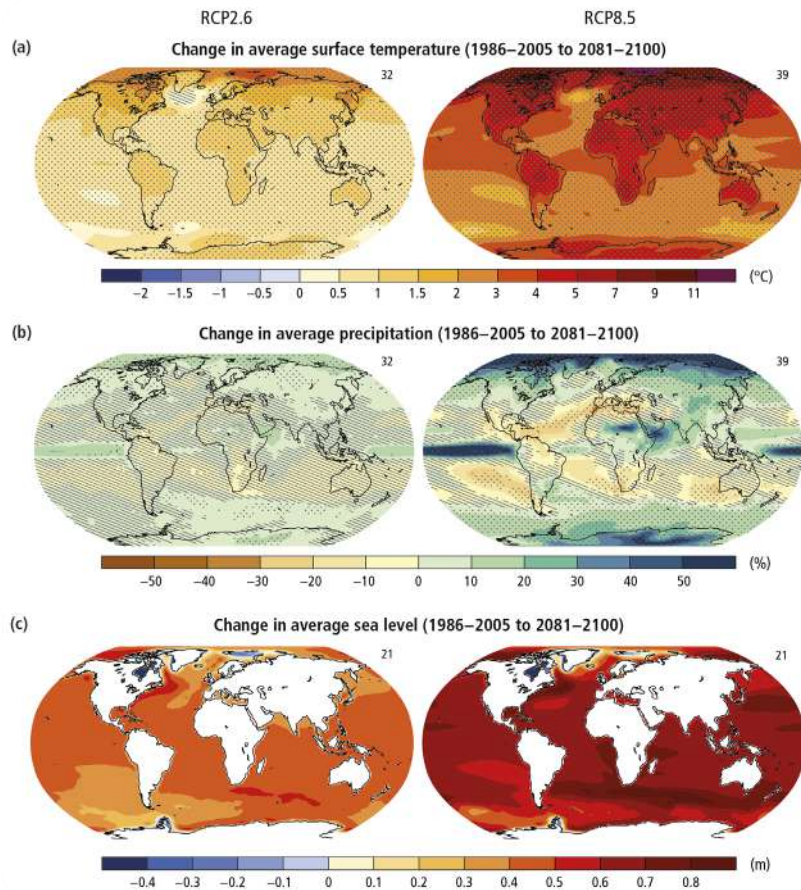
4. Il s'agit d'une zone dans laquelle que le GIEC estime que la température future se trouvera à 95% de chances. On parle aussi d'un intervalle de confiance statistique. Rappelez vous du lancer de dé du climatologue: le climatologue sait qu'il ne peut pas prédire parfaitement la température future mais réalise de nombreuses simulations pour voir les valeurs que celle-ci a le plus de chance de prendre. La ligne rouge foncé est la moyenne obtenue en utilisant les calculs de plusieurs équipes de recherche différentes (leur nombre est indiqué sur par des chiffres de la même couleur). On voit que moins d'équipes ont fait des projections au-delà de l'année 2100: on lit 39 jusque 2100 puis 12 au-delà. On voit aussi que la zone s'élargit avec les années. C'est logique: plus on essaie de prédire loin dans le futur, moins on est sûr de nos projections, donc plus la zone où on s'attend à atterrir est grande.

5. Comme nous l'avons discuté dans la première partie du chapitre, le réchauffement amorcé au cours de dernières décennies va se poursuivre et risque même de s'accélérer. Prédire les effets «boule de neige» est plus difficile que dans le scénario 2.6 où les émissions sont fortement limitées très rapidement. C'est même drastiquement plus compliqué lorsqu'on passe des effets de seuil.

6. Sans surprise, la courbe rouge est sous la bleue s'agissant de la surface de banquise, puisque plus il fera chaud, plus vite va fondre la ban-

quise. Elle est aussi sous la courbe bleue pour le pH océanique, puisque plus le pH est faible, plus les océans sont acides ce qui correspond à davantage de CO₂ dissout dans les océans.

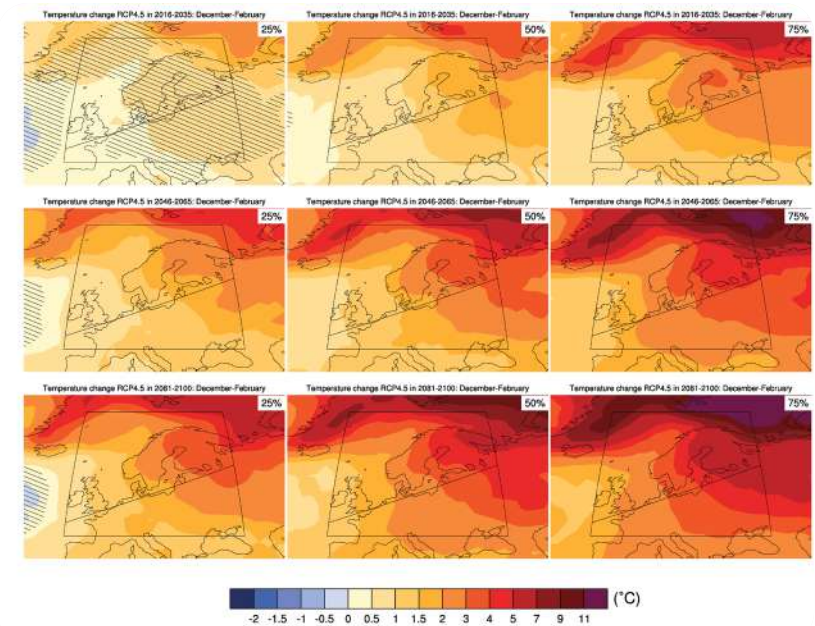
Ces projections globales sont détaillées géographiquement. Prenons par exemple la page 61:



Évolutions climatiques régionales dans deux scénarios extrêmes
Source: Page 61 du Rapport 2014 du GIEC

On voit tout de suite les **disparités régionales**. Pour le scénario 8.5, l'élévation moyenne des températures sur le globe est prévue pour 4°C, mais en Arctique elle sera de 13°C. Et curieusement, au Sud du Groenland, il y a une région où la température moyenne sera stable, et pourra même baisser dans le scénario RCP 2.6, dans le cadre d'un réchauffement général! Intéressante aussi la toute dernière figure: cherchez donc à placer New York, Londres, Kolkata et Tokyo sur la carte...

Dans le Rapport consacré à la physique du changement climatique, vous trouverez des cartes détaillées par grandes régions du monde. Si par exemple vous vous intéressez à l'Europe, voici le programme en ce qui concerne les températures d'hiver en Europe du Nord, suivant un scénario optimiste, où l'on a entrepris de limiter les émissions de GES, le RPC 4.5:



Évolutions des températures en Europe dans le scénario RCP 4.5
Source: Rapport 2014 du GIEC

Pour ne pas vous perdre dans tous ces dégradés de rouges et oranges, scrutez d'abord les titres: ils indiquent les dates. La première ligne montre donc trois projections pour l'hiver des années 2016-2035; la seconde ligne pour 2046-2065; la dernière pour 2081-2100. Et sans surprise: les cartes deviennent de plus en plus rouges à mesure qu'on descend. Car même dans ce scénario optimiste, il fera plus chaud chaque année. Comme d'habitude les résultats de ces projections sont statistiques: on propose donc une projection médiane et une « zone de confiance » autour de cette moyenne où on s'attend à trouver les résultats. Ainsi, les valeurs médianes attendues sont représentées dans la colonne centrale, avec les trois cartes portant le chiffre 50%. À quoi correspondent les cartes avec 25% à gauche et celles avec 75% à droite? Elles indiquent l'étendue de la zone de confiance autour de la moyenne attendue. Plus précisément, une carte 25% signifie que le GIEC estime qu'il y a moins de 25% de chances d'avoir un réchauffement plus faible que celui représenté sur la carte. De façon analogue, une carte 75% signifie que le GIEC estime qu'il y a 75% de chances d'avoir un réchauffement plus faible que celui représenté sur la carte. Ces trois cartes permettent donc de dessiner une zone de confiance dans laquelle on s'attend à atterrir.

Exercice d'application

Parmi les affirmations suivantes, lesquelles sont vraies? Lesquelles sont fausses?

1. L'Angleterre et la France ont plus d'une chance sur deux de connaître un réchauffement de plus 0,5 degrés Celsius entre 2016 et 2035.
2. Dans tous les cas, le réchauffement est d'autant plus important qu'on regarde au Nord et vers l'Europe Centrale.
3. Il y a 75% de chances que le réchauffement fasse plus de 3 degrés en 2081-2100 en France et en Allemagne.
4. L'hiver arctique a une chance sur deux de se réchauffer de 9°C au moins à la fin du siècle.

1. *Vrai, c'est ce que montre la carte 50% de la première ligne*
2. *Vrai, c'est ce qu'on voit par le dégradé de couleurs sur toutes les cartes*
3. *Faux: la carte 75% indique que 75% des simulations donne un réchauffement inférieur ou égal à 2-3 degrés. Les 25% restants prédisent un réchauffement supérieur.*
4. *Vrai. C'est ce qu'on lit sur la carte centrale de la dernière ligne.*

Les réchauffements sont donnés par rapport à la fin du 20^{ème} siècle, il faut donc rajouter 0,6°C pour trouver les réchauffements par rapport à l'ère préindustrielle. On voit que, même dans ce scénario optimiste, alors que le réchauffement moyen est de 4°C sur la région, l'hiver arctique a une chance sur deux de se réchauffer de 9°C au moins à la fin du siècle.

Vous trouverez sur le site de l'IPCC²⁹ l'évolution des températures d'été en Europe du Nord, et l'évolution des précipitations. Il s'agit d'un atlas des projections, et vous y trouverez des cartes analogues pour toutes les régions du monde.

3.2 Conséquences du réchauffement pour les sociétés humaines

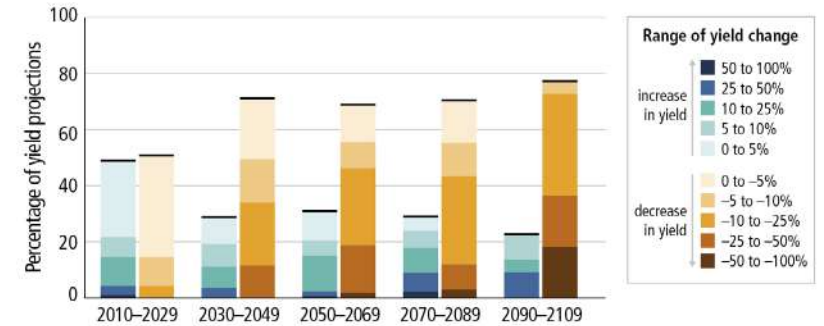
Ce réchauffement n'est pas sans conséquence. Voici par exemple, en page 69 du rapport de synthèse, l'évolution prévue des **rendements** des cultures de céréales au cours du 21^{ème} siècle, par rapport aux rendements de celles-ci en 2000. Le tableau rassemble les résultats d'un millier de programmes de recherches menés sous des hypothèses variées, et il indique la progression ou au contraire le déclin des ren-

²⁹ — <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/atlas-of-global-and-regional-climate-projections/>

dements de vingt ans en vingt ans. Certaines études concluent à une progression (en bleu), d'autres à une régression (en ocre-marron), et le tableau indique la proportion de chacune avec leurs conclusions. On voit que la grande majorité est pessimiste, voire très pessimiste :

Alors qu'environ la moitié des études escomptent des augmentations de rendements au cours de la période 2010-2029 (la barre des bleus est presque au même niveau que la barre des ocres), seules 20% et quelques s'attendent à des augmentations sur la période 2090-2109.

Parmi les études nombreuses qui s'attendent à des baisses de rendements à partir de 2030, près de 20% concluent à une chute des rendements de plus de moitié à la toute fin du siècle (voir la portion marron la plus foncée sur la période 2090-2109), et près de 40% à une chute de plus de 25% (si l'on additionne les deux ocres-marron les plus foncés sur cette période).

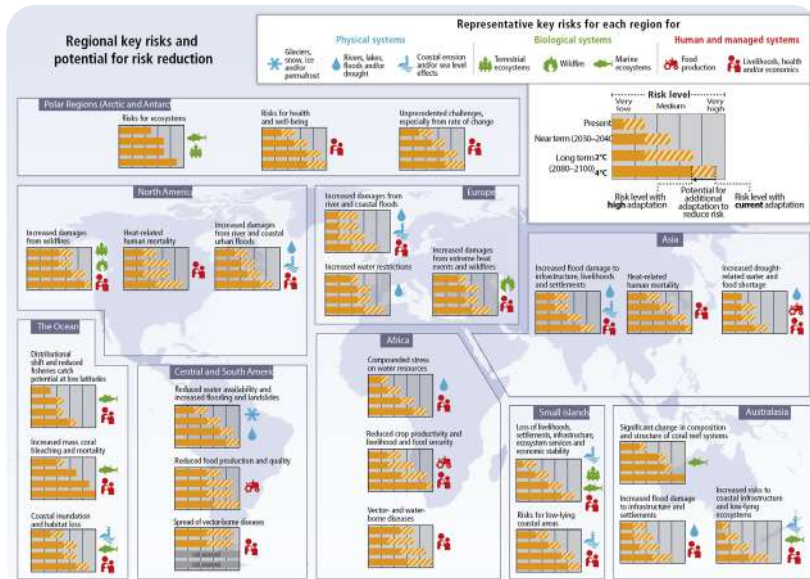


Distribution des projections des rendements agricoles selon différentes études scientifiques

Source: Page 69 du Rapport 2014 du GIEC

Par ailleurs, les cartes que nous avons vues représentent des moyennes, et ne contiennent pas toute l'information. Au fur et à mesure que la moyenne s'élève, les **événements extrêmes** deviennent plus fréquents. Les canicules se succèdent, chacune battant le record établi par la précédente. Des cyclones de plus en plus violents naissent sous les tropiques, et les années de sécheresse se prolongent ailleurs. Chaleur et sécheresse se combinent pour donner de gigantesques incendies, comme ceux qui ont ravagé l'Australie en 2019 et 2020.

Le GIEC a tenté de dresser la liste des différents risques qui accompagnent le réchauffement: les incendies et les inondations ne sont que les plus visibles. Les résultats sont contenus dans les deux rapports sur l'atténuation et l'adaptation. On peut les résumer dans un tableau synthétique que voici, et qui est expliqué page 65 du Rapport de Synthèse:



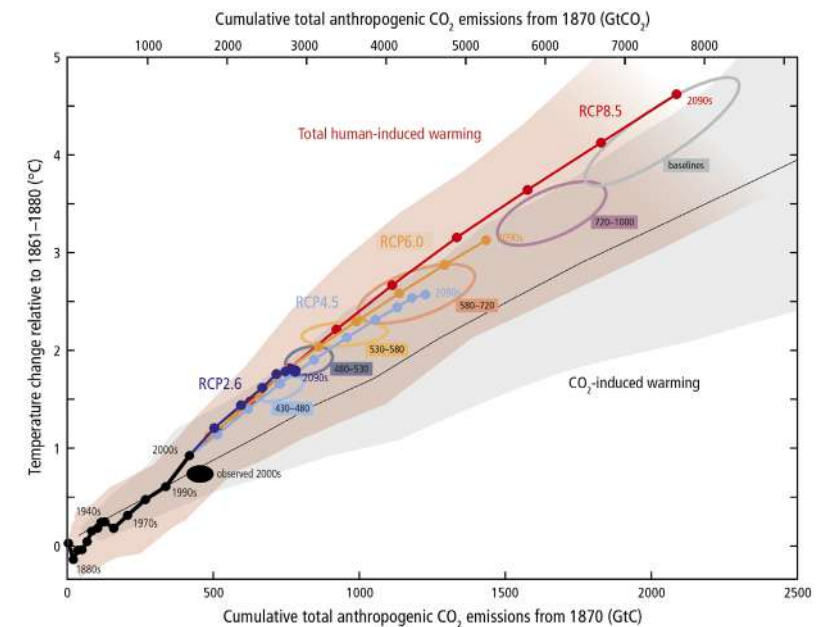
Projections des risques par région

Source: Page 65 du Rapport 2014 du GIEC

Les risques sont évalués sous deux hypothèses, un réchauffement de 2°C par rapport à 1985 à la fin du siècle par, et un réchauffement de 4°C. Pour chacune d'elles, il donne le risque à court terme (2030-2040) et le risque à long terme (2080-2100). C'est expliqué dans le petit encart en haut à droite. Juste au-dessus, vous trouverez la classification des risques par type. On voit par exemple que l'Asie sera particulièrement touchée (pénurie alimentaire due à la sécheresse, destruction des villes et des infrastructures par des inondations, et mortalité directe due à la combinaison de chaleur et d'humidité, comme nous l'avions signalé dans le chapitre sur la biologie). L'Amérique du Nord ne sera pas épargnée non plus, frappée notamment par la mortalité directe.

Conclusion

Pour conclure ce chapitre, il est bon de rappeler les hypothèses correspondant aux quatre scénarios retenus, les RCP 2.6, 4.5, 6 et 8.5. Ce sont essentiellement des scénarios d'émission de GES, et ils sont représentés par le graphique suivant, avec les réchauffements correspondants:



Émissions cumulées de CO₂ et élévation de la température moyenne par scénario

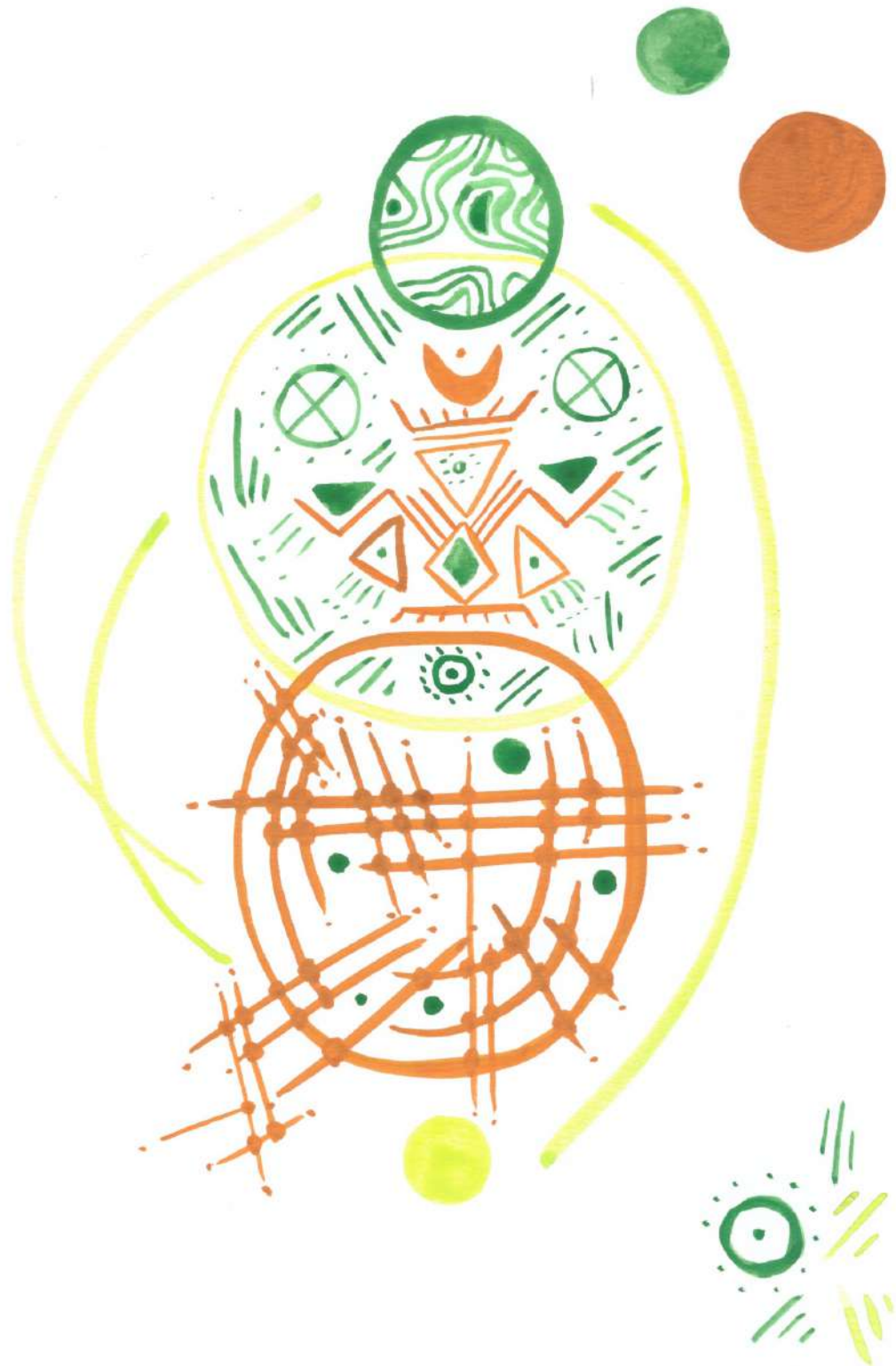
Source: Rapport 2014 du GIEC

En abscisse (en haut du graphique) on lit la quantité totale de CO₂ émise par les activités humaines depuis 1870, et en ordonnées le réchauffement correspondant. Les dates sont indiquées directement sur la figure. On voit par exemple que sur le scénario 8.5, BAU, l'humanité est supposée avoir émis en 2090 plus de 7500 Gigatonnes de CO₂, alors qu'aujourd'hui nous en sommes encore autour de 2000 Gigatonne. Est-il vraiment réaliste de penser qu'on va multiplier cette quantité par 4 ou 5 en moins d'un siècle? Un scénario comme 2.6 n'est-il pas beaucoup plus raisonnable? Est-il si difficile d'y arriver?

Hélas, ce n'est pas si simple, et la suite du cours s'attachera à cette question. Mais dès maintenant nous pouvons noter qu'entre 1970 et 2000, le stock de carbone a été doublé: on a émis autant de CO₂ en trente ans que durant tous les siècles précédents. Et on peut donc retourner la question: est-ce réaliste de penser que cette tendance s'inversera spontanément?

Si elle ne s'inverse pas d'elle-même, alors il faut réfléchir et agir pour prendre une autre trajectoire ! Car sans désespérer de nos capacités d'adaptation, les conséquences prévues du réchauffement seront bien plus favorables à la vie humaine dans un scénario à 2.6 qu'à 8.5. Comment nos systèmes économiques et sociaux peuvent-ils s'engager sur cette autre trajectoire ? C'est le sujet des prochains chapitres !





7

Des carburants fossiles à la transition énergétique

1ère partie — Introduction à l'énergie

Partie co-écrite avec Jacques Treiner,
physicien et enseignant, président du comité
des experts du *Shift Project*.



Introduction

Nous sommes aujourd'hui près de 8 milliards sur cette planète, et la majorité d'entre nous vivent mieux et plus longtemps que leurs ancêtres. Ce progrès indubitable commence avec la révolution industrielle, et s'est accéléré vers 1950. Mais les émissions de gaz à effet de serre (GES), ainsi que la perte de biodiversité ont suivi la même trajectoire, au point qu'elles risquent aujourd'hui de compromettre tous les acquis des deux siècles précédents, un peu comme une voiture qui a fait un long trajet et dont l'aiguille de température du moteur entre dans la zone rouge. Nous allons nous arrêter un instant sur le bord de la route, ouvrir le capot et ausculter le moteur. Comment fonctionne-t-il ? Qu'est-ce qui ne va plus ? Quels outils avons-nous pour réparer ? Après le diagnostic, il sera temps de décider ce qu'il convient de faire.

Cette séquence sur l'énergie se déroule en deux parties. Dans cette première partie, nous allons introduire les concepts-clés pour parler d'énergie, notamment les notions de puissance et de rendement énergétique. Nous passerons ensuite en revue les diverses sources d'énergie et leurs caractéristiques : stock ou flux, concentrée ou diluée, pilotable ou intermittente, et enfin nous montrerons leur répartition sur la planète. Ces informations sont cruciales pour comprendre le développement historique des sociétés modernes et les enjeux actuels du réchauffement climatique.

Questions pour s'échauffer

- Il y a aujourd'hui 7,8 milliards d'habitants sur la planète alors qu'il y en avait 1 milliard en 1800. À quelle date y en avait-il la moitié, soit 4 milliards ? (a) 1902 (b) 1953 (c) 1974

Réponse : (c)

- Un correspondant a écrit un jour à Ivar : « Pourquoi ne généralise-t-on pas l'usage de l'électricité ? Cela permettrait à l'économie de fonctionner sans émettre de GES, et cela résoudrait le problème du réchauffement climatique ». Que lui auriez-vous répondu ?

Réponse : Et comment vous la produisez, l'électricité ?

- Un baril de pétrole fait 160 litres. Combien consomme-t-on de barils de pétrole dans le monde par jour ? (a) 1 million (b) 10 millions (c) 100 millions (d) 1 milliard

Réponse : (c)

- Les vaches émettent du méthane CH_4 , elles en émettent même beaucoup. De quelle manière ? (a) elles rotent (b) elles pètent (c) le méthane est contenu dans leurs bouses

Réponse : (a)



1

L'énergie

1.1. Qu'est-ce que l'énergie ?

Dans la langue courante, on parle de l'énergie comme s'il s'agissait d'une marchandise comme une autre, d'une *chose* : on l'achète à la pompe, on la paie à EDF, on la produit dans des centrales, et on peut même lire le « contenu énergétique » des aliments sur le packaging. Comme si l'énergie pouvait être produite puis consommée pour finalement disparaître.

C'est une erreur : on ne produit pas l'énergie et on ne consomme pas d'énergie, on consomme du carburant ou des aliments et par une certaine transformation, on est ensuite capable de courir sur un terrain de foot ou de faire rouler une voiture. L'énergie est un concept physique qui permet de relier quantitativement les transformations de la matière, de sorte que le bilan énergétique d'une transformation est toujours équilibré. Une comptabilité telle que de l'état initial de la matière à son état final, l'énergie se conserve toujours.

Expliquons cela. Les êtres humains vivent de transformer la matière: ils défrichent, cultivent, construisent (et accessoirement émettent des GES !). Un vêtement, un aliment, un logement, un ordinateur, une voiture, une usine : tout cela c'est de la matière transformée par du travail humain aidé de machines, qui sont elles-mêmes des matériaux transformés. Au cours de son histoire, l'être humain a découvert des manières de plus en plus ingénieuses d'exploiter à son avantage les transformations de la matière. La révolution industrielle, par exemple, résulte de l'invention, puis du perfectionnement de machines susceptibles d'exploiter le charbon.

Il n'y aurait pas forcément besoin d'utiliser le concept d'énergie pour raconter cela. En revanche, ce concept devient indispensable quand il s'agit de relier quantitativement ces transformations. Peut-on effectuer les mêmes transformations avec un litre d'essence, un kilo de charbon, ou un cheval prêté pendant une heure ? Combien de litres d'essence faut-il pour effectuer un travail donné ? L'énergie est un dénominateur commun, une sorte de monnaie, qui permet de répondre. Ainsi, avec un seul litre d'essence, on peut effectuer le même travail qu'avec 1,5 kg de charbon ou 15 chevaux mis à disposition pendant une heure. Dans le langage usuel, on exprime cela en disant qu'un litre d'essence « contient » autant d'énergie que 1,5 kg de charbon ou 15 chevaux pendant une heure.

Bien sûr, dans la pratique, cette équivalence quantitative ne suffit pas. Encore faut-il qu'il existe des transformations physiques capables de transformer cette énergie en travail utile ! On ne peut pas manger du pétrole pour courir, pas plus qu'on ne peut mettre des carottes dans le réservoir de la voiture pour qu'elle avance. Dans la suite de ce cours comme dans le langage usuel, il sera inévitable de parler de « production », de « consommation » ou de « transfert » d'énergie, qu'on assimile même à la matière elle-même (on mange des « barres énergétiques » avant un marathon, n'est-ce pas ?). Gardez cependant en tête que l'énergie demeure un concept, une comptabilité qui relie quantitativement les différents états de la matière.

Pour toute transformation, qu'elle soit faite par un animal ou une machine, on distingue la quantité d'énergie entrante (associée à ce qu'on va exploiter de l'état initial de la matière) de la quantité d'énergie qui sera effectivement utilisée, dite énergie utile (afférente à ce qui dans l'état final de la matière nous intéresse : le déplacement de la voiture par exemple). Notez que celle-ci est toujours inférieure à la quantité d'énergie entrante : la différence vient d'une partie de la transformation qui nous est « inutile », c'est-à-dire qui ne correspond pas à l'objectif visé. Pour une voiture qu'on veut faire rouler, l'énergie entrante quantifie tout ce que le carburant qu'on injecte du moteur peut permettre de faire. La plupart du carburant va permettre à la voiture

d'avancer (énergie utile) mais une partie de l'essence brûlée va faire chauffer le moteur, ce qui ne nous « sert à rien ». Pour cela, on parle souvent d'énergie « dissipée ». En réalité, elle ne l'est pas (chauffer est une transformation qui nous « sert » dans bien d'autres contextes !), mais effectivement, dans ce cas, elle ne contribue pas à l'objectif visé. Si on avait tenu compte de toute l'énergie sortante, utile et inutile, celle-ci serait toujours égale à l'énergie entrante.

Résumé

- ♦ L'être humain vit en transformant la matière.
- ♦ L'énergie est une grandeur qui permet de relier quantitativement les transformations de la matière.
- ♦ Dans toute transformation, il y a conservation d'énergie : l'énergie entrante associée à l'état initial de la matière est égale à la somme des énergies sortantes, utiles et inutiles, associées à l'état final de la matière.
- ♦ On parle souvent "d'énergie dissipée" pour décrire l'énergie sortante "inutile".



Pour les lecteurs amateurs de physique et de mathématiques

Lâchons une masse m d'une hauteur h . Elle va prendre de la vitesse à mesure qu'elle perd de l'altitude. Il existe un rapport quantitatif entre la hauteur de chute h et la vitesse acquise v en arrivant au sol :

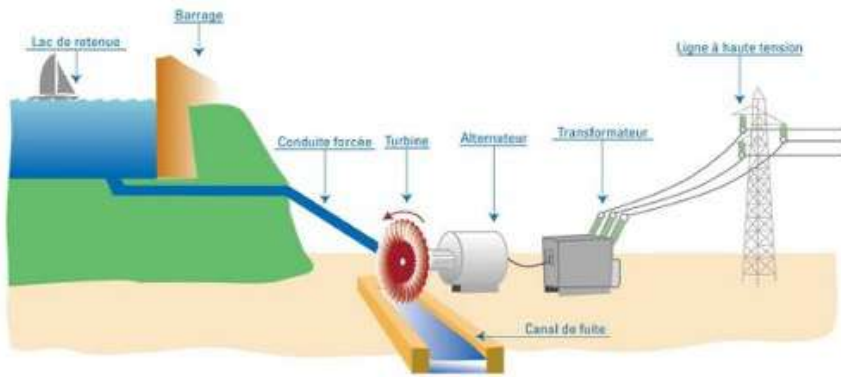
$$9,81mh = \frac{1}{2}mv^2$$

Cette équation exprime le bilan énergétique de la transformation : la masse immobile située à une hauteur h est devenue une masse en mouvement impactant le sol avec une vitesse v . Le bilan est « équilibré » : l'énergie entrante $9,81mh$ (appelée « énergie potentielle », qui est la multiplication de la masse, de la hauteur et d'une constante dite « constante gravitationnelle » à peu près égale à 9,81) est égale à l'énergie sortante (appelée « énergie cinétique ») : $\frac{1}{2}mv^2$.

C'est bien pratique d'avoir un tel bilan énergétique ! Grâce à lui, nous pouvons savoir :

- ♦ Si je double la masse m est-ce que j'augmente la vitesse d'impact ?
Non
- ♦ Si je double la masse m , est-ce que j'augmente l'énergie cinétique ?
Oui, je la double
- ♦ Si je double la hauteur de chute h , de combien est-ce que j'augmente l'énergie cinétique ? 2
- ♦ Pour doubler la vitesse v , de combien dois-je augmenter la hauteur ? 4

C'est ce principe qui est à la base de l'énergie hydroélectrique, à l'œuvre dans les systèmes de barrages et de centrales hydroélectriques : on retient l'eau en altitude par un barrage, puis on la fait tomber d'une hauteur h par des conduites forcées, et l'énergie cinétique acquise sert à actionner des turbines (mouvement de rotation qui, via des alternateurs et par d'autres transformations, génèrera de l'électricité, c'est-à-dire un mouvement d'électrons dans un circuit conducteur).



1.2 Qu'est-ce que le rendement énergétique ?

Le rendement énergétique d'une machine, et plus généralement d'une transformation physique, est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie entrante. Le rendement d'une machine idéale serait donc égal à 1. Dans la pratique, comme on l'a vu, il y a toujours de la dissipation d'énergie, c'est-à-dire qu'une part plus ou moins importante de l'énergie entrante est utilisée pour d'autres fins que celle pour laquelle la machine est conçue, et le rendement énergétique est donc inférieur à 1.

Pour un moteur de voiture thermique, le rendement énergétique est donc obtenu en divisant l'énergie utile, associée au déplacement de la voiture par l'énergie initiale fournie par la combustion de l'essence: il est de l'ordre de 30-40% pour les machines usuelles. La différence entre les deux vient notamment de la chaleur du moteur absorbée par le radiateur ou rejetée dans l'atmosphère avec les gaz d'échappement. Plus le rendement énergétique est élevé, moins la voiture consomme pour une certaine distance parcourue.

Dans une centrale thermique, la source de chaleur initiale peut être du charbon, du gaz ou de l'uranium, et le résultat apparaît sous forme d'énergie électrique, c'est-à-dire que le procédé permet de créer un mouvement d'ensemble des électrons dans un métal conducteur. Le

rendement énergétique global est d'environ 35-40 %. La chaleur résiduelle est rejetée dans l'environnement (atmosphère, cours d'eau, mer). Si l'on est suffisamment ingénieux, on peut aussi la récupérer dans un autre réseau et l'utiliser pour chauffer des logements, ce qui augmente le rendement énergétique global de la centrale.

La plus importante de toutes les transformations physiques, celle en tout cas qui permet la vie sur cette planète, est la photosynthèse : elle stocke l'énergie du rayonnement solaire (énergie entrante) sous forme chimique dans la matière organique (l'état final de la matière est un état où se sont formées de multiples molécules tout au long de la tige de la plante). Son rendement énergétique, c'est-à-dire la proportion du rayonnement qui est effectivement stockée, est très faible : il se situe entre 1 et 6% suivant les plantes.

Pour les lecteurs amateurs de physique et de mathématiques

Classiquement, les physiciens distinguent plusieurs types de transferts d'énergie : le travail et la chaleur. Le travail correspond à un déplacement ou une déformation. Si vous levez votre bras, vous fournissez du travail, et si la voiture roule, la combustion de l'essence fournit du travail. La chaleur correspond à une agitation désordonnée à l'échelle microscopique : si vous chauffez de l'eau, vous augmentez la vitesse des molécules du liquide, sans que celui-ci quitte la casserole, c'est-à-dire sans qu'on ne voie de changement macroscopique.

On ne peut pas produire de travail sans produire de chaleur. Dans un moteur thermique de voiture, on commence par brûler de l'essence, ce qui augmente la température dans les cylindres, et par un dispositif mécanique très astucieux, on convertit cette chaleur en travail qui fait avancer le véhicule. Mais toute l'énergie ne va pas dans le travail : une partie est convertie en chaleur, qui va augmenter la température des pneus et du moteur, et même de l'air ambiant !

1.3 Autres usages du concept de rendement

Le concept de « rendement » est très couramment utilisé, et pour des choses très différentes, ce qui peut créer de la confusion. En agriculture par exemple, on parle du « rendement d'une culture » ou « rendement agricole » pour parler du poids de denrées alimentaires produites par hectare cultivé. Il a beaucoup augmenté depuis cinquante ans : en France, il est passé de 3 tonnes à l'hectare en 1961 à 7,8 en 2015¹.

Cela ne signifie pas pour autant une augmentation des rendements énergétiques des exploitations agricoles ! Pendant ces cinquante ans, on a considérablement augmenté l'énergie entrante, sous forme de travail mécanique (machines agricoles) et d'engrais chimiques (nitrates) : entre 1948 et 1998, la quantité totale de travail mécanique dans l'agriculture a été multipliée par 44², ce qui a permis de multiplier la quantité produite par surface par 2 ou 3. On voit bien que l'énergie sortante (énergie récupérée sous forme alimentaire) n'augmente pas dans la même proportion que l'énergie entrante, c'est-à-dire que le rendement énergétique peut diminuer.

Mais du point de vue économique, l'agriculteur ne se soucie ni du rendement énergétique ni du rendement agricole. Ce qui l'intéresse, c'est un troisième type de rendement : le « rendement financier ». Plus précisément, s'il vend sa récolte au prix P, et si elle lui a coûté C (en achat de semences, en salaires versés, en engrais et pesticides, en utilisation de machines et en carburant), le profit est P-C et le rendement financier $(P-C)/C$. Si C est plus grand que P, il ne produira qu'à pertes, ce qui n'est pas soutenable. Dès lors que P est plus grand que C, il réalise un profit. Plus P est élevé par rapport à C (les tomates se vendent très cher et les intrants sont bon marché), plus le rendement financier est élevé. Si les prix du carburant et des engrais sont suffisamment bas,

il sera économiquement avantageux pour l'agriculteur d'industrialiser son système de production.

Quel est finalement le bilan énergétique global d'un système de production agricole ? En sortie, nous avons l'énergie stockée dans la récolte, et en entrée, l'énergie apportée par les engrais et celle utilisée par les machines agricoles et le travail humain. Mais ce n'est pas tout ! Il y a aussi l'énergie solaire captée par la photosynthèse des plantes cultivées, et l'énergie fournie par les processus naturels qui se déroulent dans le sol (apport de nutriments aux racines par les réseaux de champignons et de bactéries par exemple). Ce sont ces sources d'énergie supplémentaires, captées par les plantes « à notre insu », qui permettent à l'être humain de récupérer plus d'énergie sous forme d'aliments que celle qu'il a fournie sous forme de travail. Et c'est bien cela qui a permis à l'humanité de survivre depuis les premiers temps de la cueillette puis de l'agriculture !

Résumé

- ♦ Le rendement énergétique d'une machine (et plus généralement d'une transformation physique) est le rapport entre l'énergie utile (dans le cas d'une voiture : son déplacement) et l'énergie entrante (dans le cas d'un moteur thermique : l'énergie libérée par combustion de l'essence dans le moteur).
- ♦ Le rendement énergétique d'une machine est toujours inférieur à 1 car aucun processus de transfert d'énergie ne peut se faire sans « dispersion » d'énergie.
- ♦ On peut définir d'autres types de rendements, qui peuvent influencer les décisions des individus plus que le rendement énergétique.

1 — <https://ourworldindata.org/crop-yields>

2 — Mathieu Calame, « Enraciner l'agriculture », PUF 2020, p.160

1.4 Qu'est-ce que la puissance ?

Reprenons l'analyse de la centrale hydroélectrique. Le lac haut constitue un réservoir d'eau. L'eau qui en coule et passe dans les canalisations est caractérisée par son débit, exprimée en mètres-cube par seconde, m^3/s . Ce débit d'eau va produire un *débit d'énergie*, l'énergie électrique délivrée par seconde.

C'est évidemment une grandeur importante : on peut disposer d'une grande réserve d'eau, mais si le débit est faible, on ne pourra pas éteindre un incendie. De même on peut avoir une grande fortune, mais si on ne dispose que d'un euro par jour, on ne pourra pas faire grand-chose avec. En physique, le débit d'énergie s'appelle la *puissance*. Si l'on désigne par P la puissance d'un dispositif, par E l'énergie qu'il fournit quand il fonctionne pendant une durée T , on a la relation $P = E/T$, ou de façon équivalente $E = P \times T$. Autrement dit, la puissance est la quantité d'énergie disponible par unité de temps.

Résumé

† La puissance est le débit d'énergie, c'est-à-dire la quantité d'énergie utilisable par unité de temps.

1.5 Unités et ordres de grandeur

L'unité d'énergie est le *Joule* (J). Une masse de 1 kg tombant de 1 mètre de hauteur fournit 9,8 J (que l'on arrondit souvent à 10 J pour faciliter les calculs). Avec cette convention, il faut 10 J pour soulever de 1 m une masse de 1 kg. L'unité de puissance est le *Watt* (W). Un dispositif qui produit ou consomme 1 J par seconde a une puissance de 1 W. Ce sont là les unités de base pour exprimer des quantités d'énergie et de puissance, comme le mètre ou le gramme sont les unités de base pour les distances et les poids.

La nourriture qu'un humain consomme en une journée, transformée par la digestion, fournit 10 à 12 millions de Joules. Ce transfert

d'énergie a lieu pendant une journée, soit 86400 secondes. On peut donc dire que la puissance du système digestif est d'environ 120 W en moyenne (on divise 11 millions par 86 400). Cette énergie sert trois fonctions : nous maintenir à 37 °C, c'est-à-dire compenser les pertes de chaleur par notre peau ; fabriquer des cellules pour remplacer nos cellules mortes ; et bien sûr nous permettre d'actionner nos muscles (cœur, respiration, effort).

Allons faire une promenade en montagne. Si vous montez 300 m de dénivélé et si vous pesez 70 kg, vous utilisez 205 800 J, soit environ 200 000 J (vous pouvez faire le calcul de l'énergie potentielle suivant la formule vue plus haut), et si vous le faites en une heure vous développez une puissance de 57 W (3600 secondes en 1 h). Si elle s'entraîne, une sportive peut augmenter sa puissance pendant l'effort et atteindre plusieurs centaines de Watts. Est-ce beaucoup ? Qu'est-ce que ces quantités d'énergie et puissance mobilisables par notre seule force physique nous permettent de faire ? Pour le savoir, imaginons que l'on installe notre sportive sur un vélo d'appartement convertissant énergie mécanique en énergie électrique. Eh bien avec cette centaine de Watts délivrés pendant une bonne heure d'effort et de sueur, elle pourra... faire griller à peine une tranche de pain !³

Oui ! Une tranche de pain seulement ! Et notre sportive sera probablement épuisée et affamée. Par comparaison, la combustion d'un litre d'essence transfère à elle seule près de 36 millions de joules. Avec un moteur de rendement énergétique standard à 30%, cela ferait une dizaine de millions de joules d'énergie utile, soit 6 fois plus que ce qu'un humain peut fournir en une journée d'effort. Et tout cela pour 1,5 € sans transpirer... Nous commençons ici à comprendre qu'aller puiser dans d'autres sources d'énergie nous est indispensable pour vivre

³ — Regardez la vidéo d'un médaillé olympique, Robert Förstermann, déployant toute son énergie pour faire griller (à peine) une tranche de pain : <https://www.youtube.com/watch?v=S4O5voOCqAQ>

confortablement et réaliser toutes les transformations de la matière dont nous sommes dépendants au quotidien.

Vu les ordres de grandeur en jeu dans la vie quotidienne et a fortiori à grande échelle, on exprime le plus souvent les puissances en kiloWatts (kW, 1000 Watts), MégaWatts (MW, 1 million de Watts), GigaWatts (GW, 1 milliard de Watts) ou même TeraWatts (TW, 1000 milliards de Watts). Plutôt qu'en joules, on exprime les énergies en Watt-heure (Wh) et ses multiples kWh, GWh, TWh. Un Wh est l'énergie fournie par une puissance de 1W fonctionnant pendant une heure⁴. Enfin, quand il s'agit de mesurer de grandes quantités d'énergie, on utilise la *tonne-équivalent-pétrole*, ou tep (en anglais toe), et ses multiples ktep, Mtep, Gtep. Une tep correspond à l'énergie obtenue par la combustion d'une tonne de pétrole, soit 42 milliards de joules.

Voici d'autres exemples pour intégrer cette différence majeure d'énergie et de puissance entre machines utilisant des sources d'énergie fossiles, et humains avec leur seule force musculaire :

Tracteur	60 kW soit 600 humains
Pelleteuse	100 kW soit 1000 humains
Camion	400 kW soit 4000 humains

Il ne faudrait pas en déduire, par exemple, qu'une pelleteuse fait le travail de 1000 ouvriers : ceux-ci ont besoin de se reposer. La pelleteuse, elle, peut fonctionner 24h sur 24 sans fatiguer : elle fait donc plutôt le travail de 1000 équipes de 2 ou 3 personnes.

⁴ — La conversion entre Joules et kWh s'obtient facilement : 1 kW fait 1000 W et 1h fait 3600 secondes, donc 1 kWh = 3 600 000 J.

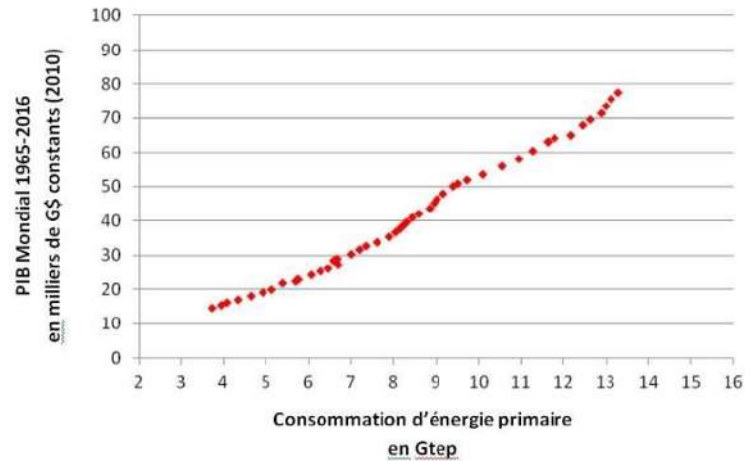
L'humanité dans son ensemble (7,8 milliards d'habitants) consomme aujourd'hui près de 14 Gtep, ce qui fait en moyenne 1,8 tep/hab.⁵ Comme il y a environ 3×10^7 secondes dans une année, cela fait une puissance par habitant de $1,8 \times 42 \times 10^9 / (3 \times 10^7) = 2500$ W. On a vu que la puissance humaine moyenne sous forme d'effort musculaire était d'environ 100 W. Chacun de nous dispose donc en moyenne d'une ressource énergétique environ 25 fois plus grande que ce qu'un humain seul est capable de développer ! Pour un habitant de pays riche de l'OCDE, c'est 2,2 fois plus, soit 55 « humains seuls », et même 4,5 fois plus pour un américain, soit 112 « humains seuls ». C'est comme si nous avions à notre service 55 « serveurs énergétiques »⁶ infatigables apparaissant sous formes de machines diverses qui fabriquent les biens et les services que nous consommons et qui nous permettent d'atteindre les niveaux de vie que nous connaissons.

Vous ne serez alors pas étonné de voir que le PIB est très étroitement lié à la consommation d'énergie primaire. Depuis plus de soixante ans, il faut environ 1,6 kWh pour 1 \$ de PIB⁷, une considération fondamentale et pourtant rarement intégrée dans les cours d'économie moderne.

⁵ — Cette moyenne cache une grande disparité : 4 tep/hab pour les pays de l'OCDE, 8 tep/hab pour un.e américain.e, 0,5 tep/hab pour un habitant de pays pauvre. Comme l'énergie mesure la capacité à transformer la matière pour produire des biens et des services, ces disparités de consommation d'énergie sont fortement corrélées aux inégalités de niveaux de vie.

⁶ — Jean-Marc Jancovici parle "d'esclaves énergétiques", voir : <https://jancovici.com/en/energy-transition/energy-and-us/how-much-of-a-slave-master-am-i/>

⁷ — Jacques Treiner, « Fil conducteur pour une introduction à l'Anthropocène en début d'études supérieures », Janvier 2020



Évolution du PIB mondial en fonction de la consommation d'énergie primaire depuis 1965

Résumé

- ✦ Les quantités de puissance usuelles s'expriment en W, kW ou GW. Les quantités d'énergie s'expriment en Joules, mais plus fréquemment en kWh ou GWh.
- ✦ Un individu peut déployer une puissance d'environ 100 W d'effort musculaire, soit une énergie utilisable de 100 Wh si l'effort est réalisé pendant une heure.
- ✦ La combustion d'un litre d'essence transfère à elle seule 10 kWh, soit 100 fois plus.
- ✦ En moyenne, un habitant de l'OCDE dispose de 55 fois plus de ressources énergétiques que sa seule capacité physique.

Pour les lecteurs amateurs de physique et de mathématiques

Revenons à votre randonnée en montagne. Si vous montez 300 mètres de dénivelé en une heure et que votre masse est de 70 kg, quelle quantité d'énergie avez-vous utilisée ? Selon la formule $9,8mh$, vous avez dû dépenser $9,8 \times 70 \times 300 = 205\,800$ J.

La durée de la balade en secondes est 3 600s. La puissance que vous avez développée est donc de $205\,800 / 3\,600 = 57$ W. En huit heures de randonnée à ce rythme, vous aurez dépensé environ 1 646 400 J, ce qui équivaudra à environ 0,5 kWh. Si vous vous entraînez, vous arriverez peut-être à atteindre une puissance de 200 W et à la maintenir pendant huit heures, ce qui fera 2 kWh.

En comparaison, la combustion d'un seul litre d'essence libère environ 10 kWh...

2

Énergies primaires

Il existe sur Terre un certain nombre de sources d'énergie exploitables. Beaucoup sont constituées par des processus physiques simples : l'énergie d'une masse en hauteur (par exemple par la rétention d'eau par un barrage, qui fera tourner des turbines dans les centrales hydroélectriques en s'écoulant dans des conduites forcées) ou l'énergie d'une masse lancée avec une certaine vitesse v qui frappe quelque chose (mécanisme des moulins, à eau ou à vent, où le fluide en mouvement fait tourner une roue ou une aile).

Le rayonnement est aussi une source d'énergie exploitable, que ce soit le rayonnement visible émis par le soleil qui est utilisé par la photosynthèse, ou le rayonnement infrarouge du poêle en hiver auprès duquel on se réchauffe. Les êtres vivants, une fois nourris, peuvent également être mobilisés comme des sources d'énergie, et ont été largement utilisés : que l'on songe au travail humain ou au travail animal. Si l'on remonte le fil pour savoir d'où les êtres vivants tirent leur énergie propre, on tombe en dernière analyse sur la photosynthèse, qui stocke sous forme chimique l'énergie du rayonnement solaire.

Les sources d'énergie exploitables sur Terre sont appelées des énergies *primaires*. L'hydrogène, par exemple, n'est pas disponible à l'état libre sur notre planète, et n'est donc pas directement exploitable : ce n'est pas une énergie primaire. En revanche, on peut le rendre exploitable, par exemple en craquant du méthane, puis s'en servir comme source d'énergie : on dit alors que c'est une énergie secondaire (il a d'abord fallu de l'énergie pour craquer le méthane). L'électricité est dans le même cas : elle n'est pas disponible directement (sauf à domestiquer la foudre) mais on peut la produire en utilisant des énergies primaires.

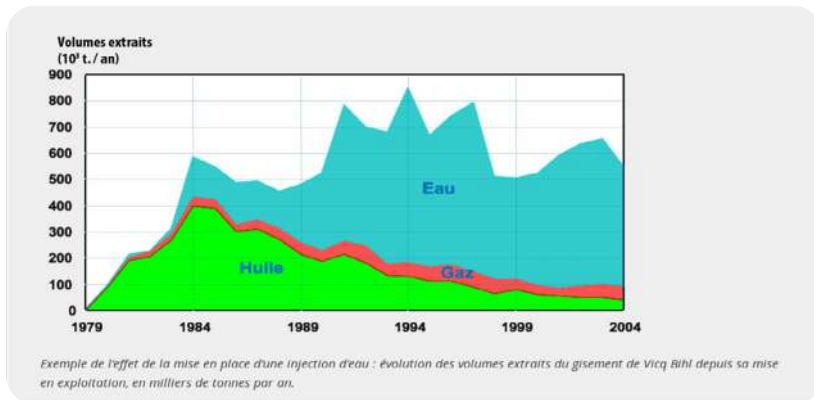
Pour savoir quelles sources d'énergie utiliser, on peut les comparer selon trois caractéristiques importantes :

- disponibles sous forme de flux ou sous forme de stock ;
- pilotables ou intermittentes ;
- concentrées ou diluées.

2.1 Énergies de stock ou de flux

Le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium sont des sources d'énergie de *stock* : ils se présentent sous forme de gisements qu'il faut localiser et dont il faut les extraire, et qui un jour s'épuisent. L'avantage c'est qu'on peut les transporter ailleurs et les utiliser quand on veut et autant qu'on veut, tant qu'il en reste. D'un point de vue d'approvisionnement énergétique, le problème est qu'ils ne se renouvellent pour ainsi dire pas (pour faire du charbon ou du pétrole, il a fallu des centaines de millions d'année ; quant à l'uranium, il ne se renouvelle pas et il se désintègre !) et qu'ils s'épuiseront nécessairement un jour.

Le schéma d'exploitation d'un gisement est toujours le même, qu'il s'agisse de charbon, de pétrole, de gaz, ou de minerai : après la mise en exploitation, la production augmente rapidement, puis redescend lentement jusqu'à ce que le gisement soit abandonné. Plutôt que parce qu'il est totalement épuisé, le gisement sera abandonné car ce qu'il contient encore devient trop difficile ou coûteux à extraire. A titre d'exemple, voici un schéma typique d'exploitation d'un puits de pétrole. Au début, le pétrole gicle sans problème, puis, à mesure que le gisement s'épuise, il faut injecter de l'eau sous pression pour faire sortir le liquide qui reste. Il sort un mélange de pétrole, de gaz et d'eau, et finalement on ferme le puits quand la quantité de pétrole et de gaz extraite devient trop faible pour compenser les coûts d'exploitation.



Profil d'exploitation d'un gisement de pétrole

Source : <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/a-quoi-doit-ressembler-l'exploitation-dun-gisement-de-petrole/>

Au contraire, le vent, les courants marins ou fluviaux, ou encore le rayonnement solaire se renouvellent en permanence, et on peut donc potentiellement s'en servir indéfiniment : ce sont des énergies de flux. Il en est de même des êtres vivants, que ce soit les plantes ou les animaux que nous mangeons ou le bois que nous brûlons, à condition toutefois que l'on prenne soin de les renouveler. L'avantage des énergies de flux est qu'elles sont renouvelables. Mais, par opposition aux énergies de stock, elles ne sont pas disponibles toujours et partout : le vent souffle où il veut, quand il veut, et avec la force qu'il veut.

2.2. Énergies concentrées ou diluées

Une énergie de stock est dite *concentrée* si elle peut fournir beaucoup d'énergie par unité de poids, ou de volume. On a vu que le pétrole est une énergie extraordinairement concentrée : la combustion d'un litre d'essence fournit à peu près 10 kWh. L'antracite, le charbon de meilleure qualité, fournit également 10 kWh par kg, mais celui de qualité inférieure, le lignite, en fournit deux fois moins. Cela explique qu'il soit peu rentable de transporter le lignite sur de longues distances. Les centrales électriques fonctionnant au lignite sont donc généralement

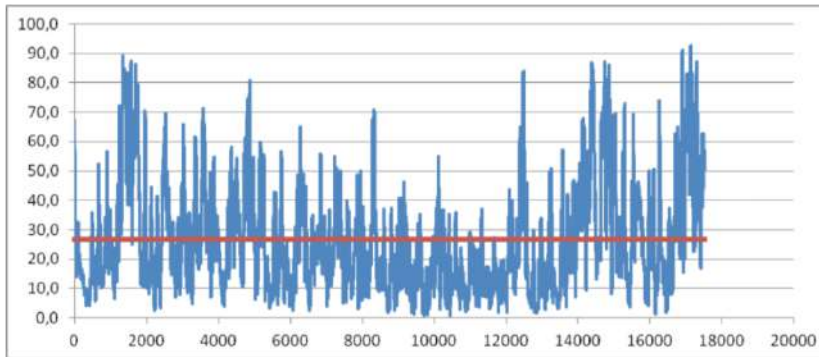
situées près de la mine, ou alors dans les ports, à proximité des livraisons par bateau.

Un réacteur nucléaire fournit une puissance de l'ordre de 1 GW en continu. Pour obtenir la même puissance, vous pourrez au choix utiliser 100 à 300 tonnes de combustible fossile à l'heure, ou bien récupérer 1200 tonnes d'eau tombant de 100 m de hauteur par seconde, ou bien encore installer 1000 éoliennes de 5 MW, ou finalement déployer 30 km² de panneaux solaires. Vous voyez que la concentration, et donc le poids ou le volume des installations énergétiques nécessaires, est un paramètre important dans votre prise de décision.

2.3 Énergies pilotables ou intermittentes

Une source d'énergie est *pilotable* si on peut l'utiliser à tout moment et régler son débit. C'est le cas des énergies de stock, mais pas des énergies de flux : le vent souffle quand il veut, et quand le ciel est couvert, les panneaux solaires ne débitent guère. Si une source d'énergie n'est pas pilotable, il y a deux possibilités : on sait quand elle sera disponible (c'est le cas des marées par exemple, qu'exploitent les usines marémotrices) ou bien on ne le sait pas du tout (c'est le cas de l'éolien) ou très partiellement (c'est le cas du solaire : on sait qu'il n'y en aura pas la nuit). On parle alors d'*intermittence*.

A titre d'exemple, voici un graphique qui donne la puissance fournie par le réseau éolien français, demi-heure par demi-heure, durant l'année 2013, en pourcentage de la puissance installée (c'est-à-dire de la puissance qu'on retirerait s'il ventait suffisamment et simultanément sur toutes les éoliennes installées). On voit qu'au maximum, on tire 90% de la puissance installée (il n'y a jamais de vent sur tout le territoire en même temps), au pire 0% (il peut y avoir calme plat sur tout le territoire, notamment en plein été). Tout compte fait, on récupère sur l'année 26,7%, soit un peu plus du quart, de la puissance installée. Encore faut-il pouvoir stocker l'électricité perçue en excès lors des périodes de grand vent, ce qui nous emmène au point suivant.



Puissance éolienne instantanée sur l'année 2013 en France

Lecture : Le graphique indique la puissance éolienne instantanée en France tout au long de l'année 2013, demi-heure par demi-heure, renormalisée à 100 GW. Sur la fin de l'année, c'est-à-dire pendant l'hiver, on observe par exemple que la puissance peut atteindre un maximum au-delà de 90% de 100 GW, soit 90 GW. La ligne horizontale rouge indique la puissance moyenne sur l'année, de 26,7 GW.

Source : Jacques Treiner, « Stockage de l'énergie, comment le dimensionner ? » Les Focus, Techniques de l'Ingénieur, mars 2017.

2.4 Stockage des énergies de flux

Il est évidemment dommage de ne pas disposer d'énergie au moment et à l'endroit où l'on en a besoin. L'enjeu est donc d'essayer de stocker les énergies de flux. Depuis longtemps, on a eu l'idée de retenir l'eau par un barrage pour la relâcher au moment opportun, comme dans l'exemple de la centrale hydroélectrique. Exploitée autrefois par des moulins à eau ou à vent, c'est encore cette même idée qu'on utilise aujourd'hui pour stocker l'énergie produite par les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques. En sortie, éoliennes et panneaux photovoltaïques sont conçus pour induire un courant électrique (les unes à partir de l'énergie mécanique du vent, les autres du rayonnement solaire). Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) utilisent cette électricité pour remonter de l'eau d'un réservoir inférieur

à un réservoir supérieur (mouvement exactement inverse de la chute dans les turbines discutée précédemment). Par abus de langage, on dit donc parfois qu'on « stocke de l'électricité ».

On peut aussi la stocker autrement, en s'en servant pour fabriquer de l'hydrogène qui servira de carburant, pour comprimer de l'air qui actionnera des turbines, ou pour charger des batteries qui stockent l'énergie sous forme chimique. Mais il est important de comprendre les limites de ces techniques : l'énergie totale contenue dans toutes les batteries électrochimiques du monde est actuellement de quelques TWh, moins d'un jour moyen de la consommation française ! On est loin de pouvoir suppléer par ce moyen aux intermittences de la production. Par contre, on se sert couramment de l'hydroélectrique pour suppléer aux fluctuations de la consommation.

Résumé

- ♦ Certaines sources d'énergie sont directement utilisables sous forme de stock mais ces stocks sont non renouvelables (pétrole, charbon, gaz, uranium).
- ♦ Au contraire, d'autres sources sont indéfiniment disponibles à l'échelle de vie humaine (vent, rayonnement solaire, marées) mais elles sont intermittentes, plus ou moins pilotables, et difficilement stockables.
- ♦ Il faut puiser à toutes ces sources pour répondre aux besoins, et la difficulté de stocker l'énergie issue de sources renouvelables est un frein à leur utilisation.

3

L'énergie dans le monde

3.1 Les sources

La liste des sources d'énergie primaire sur notre planète est vite faite. On peut les présenter par ordre chronologique d'utilisation :

- d'abord la biomasse, notamment le bois (utilisé pour se chauffer), les plantes (utilisées directement pour se nourrir, et indirectement, en mangeant ceux qui s'en nourrissent ou en les utilisant comme animaux de trait) ;
- le vent, utilisé pour certains travaux (par l'intermédiaire de moulins), pour la propulsion (comme les bateaux à voile), et plus récemment pour produire de l'électricité (éoliennes) ;
- l'eau courante, pour certains travaux (via les moulins), le transport (comme avec les péniches, bateaux sans voile), et plus récemment pour produire de l'électricité (barrages, usines marémotrices) ;
- le charbon, surtout utilisé de nos jours dans des centrales thermiques, pour produire de l'électricité, et pour la fabrication de l'acier (coke) ;
- le pétrole, omniprésent dans les transports (essence, diesel, kérosène) et le chauffage (fuel) ;
- le gaz, utilisé dans des centrales thermiques pour produire de l'électricité, ainsi que pour le chauffage.

- l'uranium, utilisé dans des centrales nucléaires pour produire de l'électricité ;
- le rayonnement solaire, utilisé directement (photovoltaïque) et indirectement (en exploitant les produits de la photosynthèse).

Toutes les centrales électriques fonctionnent suivant le même principe : on fait tourner un alternateur qui envoie de l'électricité. Pour faire tourner l'alternateur, on peut utiliser un moteur (centrales à gaz) ou une turbine, une sorte de moulin dont les ailettes sont poussées par un souffle. Le souffle est obtenu en chauffant un gaz (air ou vapeur d'eau) qui se détend (augmente de volume) et actionne la turbine. La chaleur nécessaire est obtenue soit en brûlant du charbon (centrales à charbon), soit en utilisant la chaleur dégagée par la fission contrôlée d'un isotope rare de l'atome d'uranium (^{235}U , représentant seulement 0,7% des stocks d'uranium naturel).

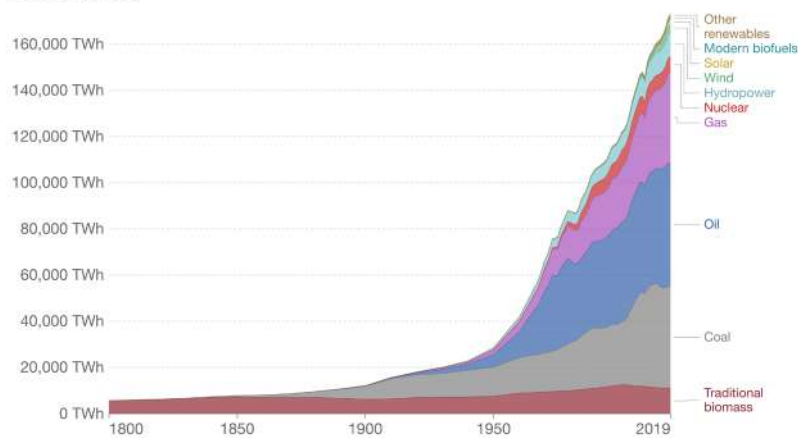
3.2 Combien en utilise-t-on ?

Voici une figure représentant l'évolution de la consommation mondiale d'énergie depuis 1820*.

8 — Source : OWID <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Consommation annuelle d'énergie mondiale de 1820 à 2010

La figure représente l'axe du temps en abscisse et celui de la consommation énergétique annuelle en TeraWatheures (TWh, 10^9 kWh, soit 862 000 tep) en ordonnée. On note une explosion de la consommation totale après 1950 : elle est d'abord multipliée par 4 entre 1820 et 1950 puis... par 5 en 50 ans entre 1950 et 2000 ! En 2019, la consommation mondiale était de 171 240 TWh, soit presque 15 milliards de tonne d'équivalent pétrole, 40 millions de tep par jour.

Fait essentiel à noter pour la suite de notre discussion : 80% de l'énergie utilisée dans le monde aujourd'hui provient de la combustion des carburants fossiles, charbon, pétrole et gaz. En 1950 la proportion était de 70%, elle n'a fait que monter depuis.

C'est que les nouvelles sources d'énergie ne se substituent pas aux anciennes ! Elles viennent s'y ajouter. C'est un empilement de feuilles dont chacune grossit avec le temps. Autrement dit, il n'y a jamais eu

de « transition énergétique », dans le sens du remplacement des minéraux par les ordinateurs. Le charbon date de la première révolution industrielle, et on n'est pas surpris de l'augmentation de son utilisation jusqu'aux premières heures du pétrole dans les années 30. Mais lorsque la consommation de pétrole explose, celle de charbon poursuit son chemin à bonne allure, avec même une accélération sur les 10 plus récentes années. Seul son usage a changé : il ne sert plus à alimenter les poêles des maisons ou les chaudières des navires, mais à fabriquer de l'électricité.

3.3 Où sont-elles ?

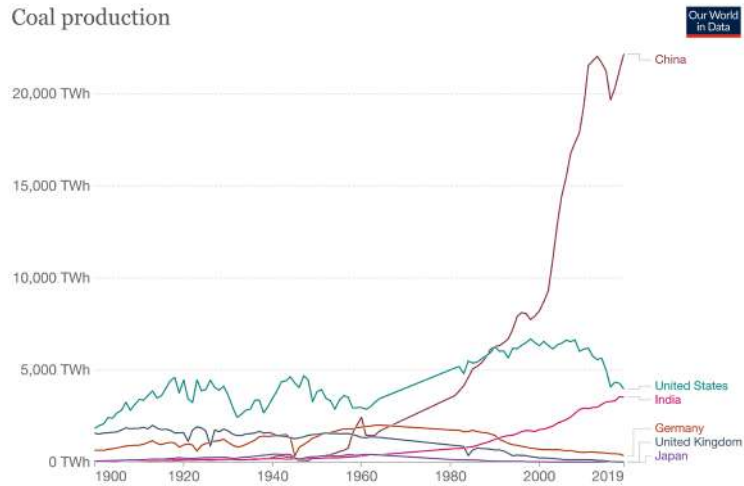
Les sources d'énergie primaire sont très inégalement réparties de par le monde. De plus, il y a un problème de renouvellement : au fur et à mesure que les gisements connus s'épuisent, il faut en découvrir d'autres (tant qu'il en reste) puis les mettre en exploitation. La géopolitique mondiale ne peut pas se comprendre si on ne tient pas compte de ces disparités, de la volonté des pays développés de préserver leurs sources d'approvisionnement, et des pays en voie de développement d'y accéder.

Voyez ci-dessous la production de charbon, de pétrole et de gaz par région depuis 1900. Ces graphiques sont tous extraits de Our World in Data (OWID) <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>. Il y en a bien d'autres, ils sont interactifs, il y a aussi des cartes : allez voir !



Production de charbon

Coal production

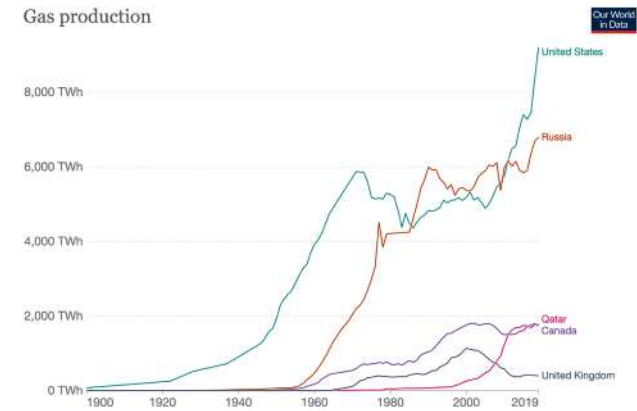


Source: BP Statistical Review of World Energy; and Shift Data Portal

OurWorldInData.org/fossil-fuels/ - CC BY

Production de gaz

Gas production

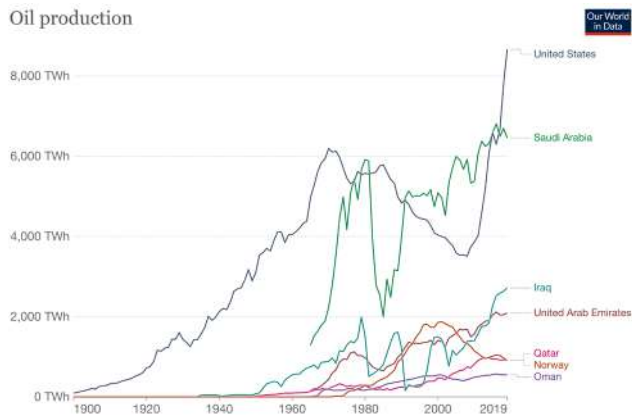


Source: BP Statistical Review of World Energy; the SHFT Project

OurWorldInData.org/fossil-fuels/ - CC BY

Production de pétrole

Oil production



Source: BP Statistical Review of World Energy; the SHFT Project

OurWorldInData.org/fossil-fuels/ - CC BY

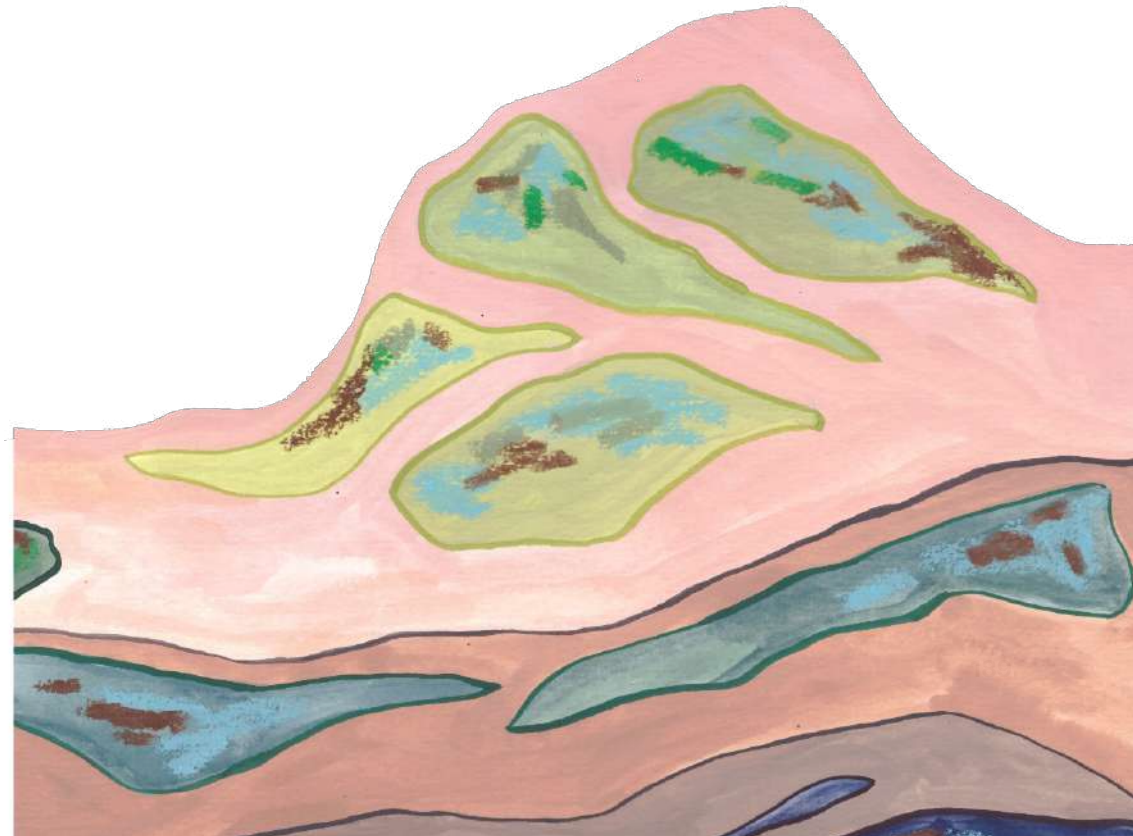




Conclusion

L'énergie ne se produit pas, bien qu'on le dise très souvent, par abus ou commodité de langage. Elle s'exploite à partir de sources et il existe sur notre planète plusieurs sources d'énergie, aux caractéristiques très différentes. Le vent, l'eau, le soleil sont des énergies de flux, les combustibles fossiles et l'uranium sont des énergies de stock.

Parce que ces sources d'énergie de stock ont un potentiel immense et des caractéristiques d'utilisation très intéressantes, la consommation énergétique mondiale a été multipliée par plus de 6 depuis 1950 et aujourd'hui, 80% de la consommation d'énergie mondiale provient de la combustion des carburants fossiles, charbon, pétrole et gaz. En réduire l'utilisation ne sera donc pas simple. D'autant plus qu'historiquement, quand on s'est mis à exploiter une nouvelle source d'énergie, elle est venue s'ajouter aux autres et elle ne les a pas remplacées : il n'y a encore jamais eu de transition énergétique.





8

Des carburants fossiles à la transition énergétique

2ème partie —
Leviers d'actions sur les
émissions de gaz à effet de
serre



Introduction

Dans le chapitre précédent, on a ouvert le capot de la voiture. On a fait mieux : on a identifié les principales caractéristiques du moteur : énergie, puissance, rendement. Il est temps maintenant de se préoccuper des gaz d'échappement.

Dans ce chapitre-ci, nous allons faire le bilan les émissions de GES et examiner les moyens de les réduire. Vous allez voir qu'il y a beaucoup de pistes d'action possibles ! L'enjeu est donc de choisir avec discernement.

Bien entendu, chaque levier d'action (le nucléaire, la transition agricole, ...) est un sujet de cours à part entière. Le but de ce chapitre sera donc de vous faire un premier tour d'horizon des principaux leviers d'action possibles, de sorte que vous puissiez vous faire une idée de leurs avantages et leurs limites. Elle vous ouvrira des pistes que vous pourrez creuser dans la suite de votre parcours, de vos lectures et de vos réflexions.

C'est un chapitre particulièrement long, alors n'hésitez pas à le lire en deux temps, par exemple en faisant une pause après la section sur la transition énergétique.

Questions pour s'échauffer

- Les ménages en France mangent moins de fruits et légumes que les recommandations de santé de l'OMS, et les sondages révèlent qu'ils en trouvent les prix trop élevés. Est-ce que réduire ces prix (par exemple par des subventions) augmentera à coup sûr la consommation de fruits et légumes ?

Pas sûr : peut-être que cela libèrera simplement du budget pour acheter d'autres aliments, comme la viande par exemple.

- Pour tenir les objectifs de l'accord de Paris (maintenir l'augmentation des températures moyennes en-dessous de 2°C d'ici à 2100), il faudrait que les émissions de CO₂ d'origine humaine accumulées depuis 1850 soient inférieures à 2 900 milliards de tonnes de carbone. Nous en étions à 2 260 en 2020, et les émissions cette année-là étaient de 40 Gt¹. Si elles se stabilisent à ce niveau, en quelle année ce budget sera-t-il épuisé ?

En 2036.

- Les émissions annuelles de CO₂ étaient de 11 Gt en 1950 et 40 Gt en 2020. Si elles continuent d'augmenter à ce rythme, en quelle année ce budget sera-t-il épuisé ?

Cela fait 1,9% par an, et le budget sera épuisé deux ans plus tôt, en 2034.

¹ — Source : <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.

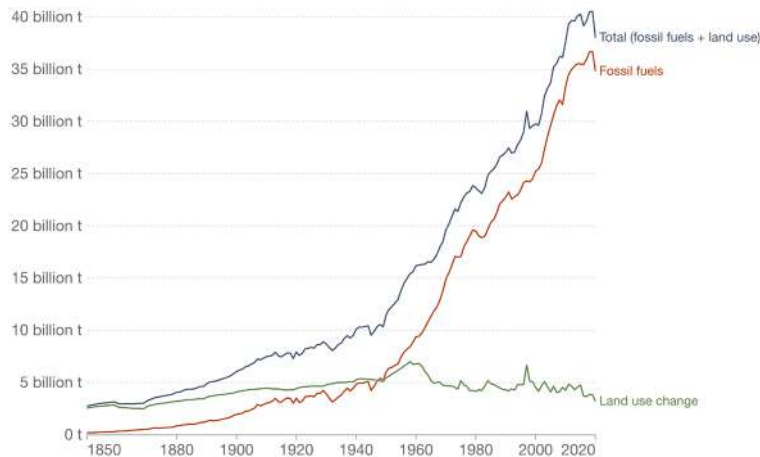


1

Le budget carbone

1.1. Historique des émissions

Reprenons l'historique des émissions de CO₂ d'origine humaine. En ce qui concerne le CO₂, il faut distinguer les émissions dues à la combustion des carburants fossiles des émissions dues à l'utilisation des sols, c'est-à-dire des émissions dues à l'agriculture (élevage, engrais, dégradation des sols) et à la déforestation, rassemblées sous le sigle AFOLU (Agriculture, FOrestry and Land Use). C'est ce qu'indique le graphique suivant, où vous verrez qu'à l'heure actuelle, les émissions annuelles de CO₂ dans le monde sont de l'ordre de 40 Gigatonnes (Gt), dont 35 sont directement imputables aux carburants fossiles.



Émissions mondiales de CO₂ de sources fossiles ou d'affectation des sols
Source : OWID

Le méthane CH₄, le dioxyde d'azote NO₂, et plusieurs autres gaz créent aussi de l'effet de serre, avec des durées de vie très différentes. En 2016, ils représentaient 10 Gt d'équivalent CO₂, qui venaient s'ajouter aux 40 Gt d'émissions de CO₂ d'origine humaine.

Il n'en reste pas moins que l'essentiel des émissions, 35 Gt sur 40 pour le CO₂, ou 50 si on compte l'ensemble des GES, est due à l'utilisation des carburants fossiles, charbon, pétrole et gaz. Malheureusement, on a vu dans le chapitre précédent que ces mêmes carburants fournissent 80% de l'énergie utilisée dans le monde ! On voit l'ampleur du problème. La situation peut-elle changer dans l'avenir ?

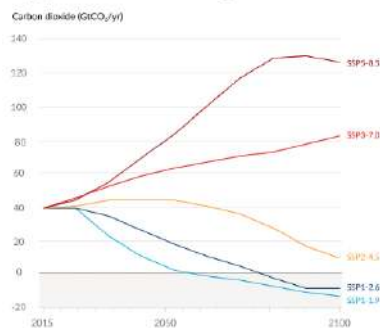
1.2 Les scénarios futurs

L'accord de Paris de 2015 fixe comme objectif de contenir d'ici à 2100 le réchauffement climatique « nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°C. »

Est-ce possible ? Depuis le premier tome de ce cours, basé sur le rapport 2014 du GIEC, une partie du rapport 2022 a été publiée, ce qui nous permet d'actualiser les projections. Les voici :

Future emissions cause future additional warming, with total warming dominated by past and future CO₂ emissions

Figure SPM.4



Les 5 scénarios du 6ème rapport du GIEC

Lecture : 5 scénarios, démarrant en 2015, ont été modélisés par le GIEC, dont l'indice, de 1.9 à 8.5, correspond au forçage radiatif atteint en 2100. Voir le site du GIEC <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> pour les autres prévisions associées à ces scénarios, notamment en termes de réchauffement.

Le scénario du haut représente aujourd'hui le *Business as Usual*, où les émissions de CO₂ continuent à croître comme elles l'ont fait jusqu'à présent, pour atteindre 130 Gt annuelles à la fin du siècle ! Cela conduirait à une augmentation de température qui dépasserait de beaucoup les 2°C.

Les deux scénarios du bas permettraient de respecter les objectifs de l'accord de Paris. On remarquera qu'ils font plafonner les émissions aux alentours de 2020, et que dans la seconde moitié du siècle les émissions deviennent négatives, c'est-à-dire que l'on retire du carbone de l'atmosphère (utilisant pour cela des techniques de capture qui n'existent pas encore, du moins pas à l'échelle industrielle).

1.3. Changer de trajectoire

Une manière simpliste, mais efficace, de se rappeler les contraintes est de raisonner en « budget carbone ». Pour avoir deux chances sur trois de tenir les objectifs de l'accord de Paris, c'est-à-dire de mainte-

nir l'augmentation des températures moyennes en-dessous de 2°C, il faudrait que les émissions d'origine humaine accumulées depuis 1870 soient inférieures à 2 900 milliards de tonnes de carbone. Nous en sommes à 2 260 en 2020, ce qui signifie qu'il nous reste un budget carbone global de 640 milliards de tonnes pour tenir jusqu'en 2100. Si l'on continue sur le rythme actuel de 40 par an, ce budget sera épuisé en 2036. Si l'on continue à accélérer, ce sera plus tôt.

Notez qu'en outre, la quantité de carbone présente dans les combustibles fossiles encore disponibles sous terre est beaucoup plus élevée que ce budget. Si l'on veut respecter l'objectif des 2°C, il faudra laisser dans le sol les deux tiers du carbone fossile qu'il contient encore !² Cela veut dire qu'on ne pourra pas compter sur la nature pour nous restreindre. La question est donc d'adopter volontairement une nouvelle stratégie de réduction des émissions, qui puisse nous placer sur une nouvelle trajectoire climatique.

Au vu des tendances, vous pouvez penser que c'est irréaliste, vous demander pourquoi le GIEC envisage sérieusement des scénarios à 2°C, et pourquoi les gouvernements continuent à affirmer cet objectif alors que le scénario « Business as usual » en est si loin. C'est aussi que le GIEC intègre dans ses scénarios des émissions négatives évoquées précédemment, c'est-à-dire en fait des absorptions ou des extractions de CO₂ déjà dans l'atmosphère ou qui s'apprête à s'y échapper. Le GIEC envisage par exemple de planter systématiquement des forêts pour extraire directement le CO₂ de l'atmosphère. Il parie aussi que les progrès techniques permettront de supprimer les émissions industrielles de GES en installant des capteurs à la sortie des cheminées d'usine ou dans les processus industriels, et en stockant le carbone sur terre ou sous terre, sous une forme ou une autre.

2 — Voir OWID <https://ourworldindata.org/grapher/global-carbon-budget-for-a-two-degree-world>

Ce sont là des activités qui font l'objet d'un nombre croissant de programmes de recherche mais à l'heure actuelle, ni la solution « technique » ni la solution « biologique » ne sont bien avancées. Capturer le carbone est coûteux, le stocker est difficile, il ne reste pas beaucoup de place pour planter des forêts et on préserve difficilement les forêts existantes. Plutôt que de discuter les solutions qui essaient de régler le problème en bout de chaîne, on va donc se concentrer dans ce chapitre sur l'amont. D'où viennent les émissions ? Est-il possible de les réduire, voire de les supprimer intégralement ?

Résumé

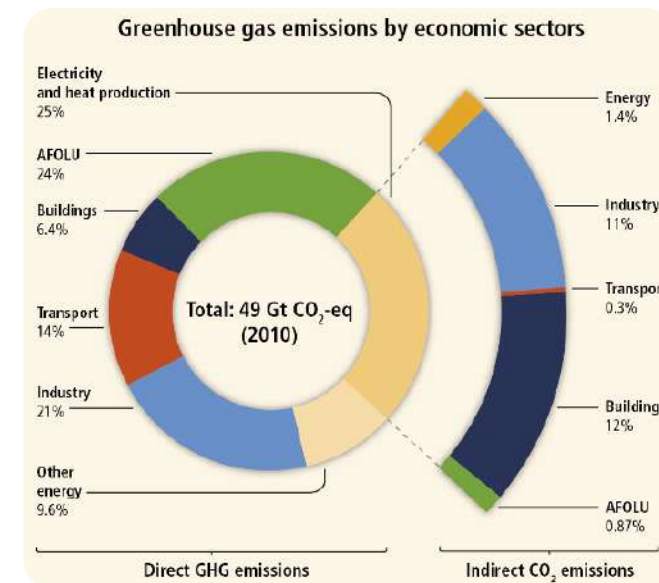
- Si l'on stabilise les émissions de CO₂ au niveau actuel, le budget permis pour respecter les Accords de Paris sera épuisé en 2036.
- À un tel horizon et avec un tel budget, le changement de trajectoire ne viendra pas de l'épuisement des réserves d'énergies fossiles.

2

Etat des lieux : les secteurs d'émission

2.1 Répartition par secteur

Voici, extraite du rapport 2014 du GIEC, la répartition des émissions de GES par secteur d'activité. Tous les GES sont inclus, mais la somme est exprimée en équivalent CO₂.



Quels sont les secteurs qui émettent le plus ?

- l'AFOLU (24%), c'est-à-dire, comme on l'a vu, l'utilisation des sols : il ne s'agit pas seulement des émissions directes, dues à l'agriculture et l'élevage, mais aussi de la destruction des puits de carbone, par la déforestation et la dégradation des terres agricoles qui relâchent du carbone.
- l'électricité et le chauffage (25%). Chauffage et climatisation sont répertoriés dans l'un ou l'autre des deux segments « *buildings* » du graphique, suivant qu'ils sont ou non électriques. On a vu dans le chapitre précédent que l'électricité provient toujours d'un processus amont tel que la combustion de charbon ou la captation du rayonnement solaire par des panneaux photovoltaïques, ce qui explique qu'elle soit comptée comme émissions « indirectes » de GES. Dans les différents usages de l'électricité, on voit que 10 % au moins des émissions de GES proviennent du chauffage ou de la climatisation, d'où l'intérêt d'isoler les bâtiments.

Nous voyons aussi apparaître un secteur un peu mystérieux, responsable de 10 % des émissions : le secteur « *other energy* ». Vérification faite, il s'agit de « la production d'énergie, hors électricité ». Effectivement, il faut plusieurs processus de transformation pour rendre les sources d'énergie disponibles et exploitables. Les énergies que nous puisons dans la nature sont des énergies primaires, et ne peuvent que rarement être utilisées directement. Ce n'est pas du pétrole que l'on met dans les moteurs, c'est de l'essence, du diesel, du fuel ou du kérosène.

Entre l'énergie à la source (primaire) et l'énergie mise à disposition de l'utilisateur (finale), il y a une industrie, qui est elle-même très importante et très émissive. Dans les économies modernes, elle représente environ 7% du PIB.

Entre le pétrole et le plein à la pompe, il y a l'industrie pétrolière, qui se charge de la prospection, de l'extraction, du transport (par navires pétroliers, ou pipe-lines), du raffinage et de la distribution.

Entre le charbon et la centrale thermique, il y a l'extraction à la mine (le temps des galeries où rampaient les mineurs est terminé, aujourd'hui ce sont d'immenses mines à ciel ouvert), et le transport en train.

Entre le gaz et le chauffage, il y a le transport, par gazoducs où circule le gaz sous pression ou par navires gaziers où le gaz est liquéfié.

Pour avoir une idée concrète de la puissance de ces industries, et de la dimension de leurs installations, nous vous recommandons vivement d'aller voir les photos d'Edward Burtynski³, section « *Oil* ». Vous pourrez également jeter un coup d'oeil sur les sections « *Mines* », « *Quarries* » (carrières) et « *Tailings* » (les *tailings* sont les lacs artificiels qui contiennent les résidus chimiques qui ont servi à extraire le métal du minerai). Ces photos donnent aussi une idée de l'impact de ces industries sur leur environnement local.

Dans la production d'énergie non électrique, il faut également intégrer l'hydrogène. Il peut être utilisé comme un carburant, souvent considéré comme « vert » (en brûlant, il produit de la vapeur d'eau et non du CO₂), mais qui a le défaut de ne pas exister à l'état libre sur la planète Terre.⁴ En d'autres termes, ce n'est pas une énergie primaire. Il faut le produire à partir d'autre chose, et à l'heure actuelle c'est surtout à partir du méthane CH₄. En combinant une molécule de méthane CH₄ et deux molécules d'eau H₂O, on obtient quatre molécules d'hydrogène H₂... et une molécule de gaz carbonique CO₂ ! Utiliser de l'hydrogène n'évite donc pas d'émettre du CO₂ si l'on considère le procédé dans son ensemble.

³ — Voir : <https://www.edwardburtynsky.com/projects/photographs>

⁴ — L'hydrogène peut être utilisé comme carburant soit dans des moteurs où il est brûlé, soit dans des piles électriques. S'il était à l'état « libre » dans la nature, cela signifierait qu'on pourrait directement récupérer des atomes ou des molécules d'hydrogène « pur », sans autres types d'atomes dont il faudrait le dissocier. Dans le méthane CH₄ au contraire, il y a bien des atomes d'hydrogène, mais cela demande de l'énergie de les isoler de l'atome de carbone C auquel ils sont liés.

Résumé

- † On peut regrouper les émissions de GES par secteurs d'émission, en rapportant tout à un équivalent en tonne de CO₂.
- † Les deux premiers secteurs d'émission sont ceux de la production d'électricité et les usages du sol.
- † La production (extraction, transformation, transport) d'énergie secondaire, et notamment de l'électricité, à partir des énergies primaires compte à elle seule pour 10% des émissions totales.

3

La réduction des émissions de GES : quels leviers actionner ?

Nous en arrivons donc à la question centrale : est-il possible de réduire nos émissions de GES ? Où concentrer nos efforts ? On peut décomposer la question en cinq :

1. Est-il possible de *remplacer* les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie ? C'est la question de la **transition énergétique**.
2. Est-il possible de *mieux utiliser* les combustibles fossiles ? C'est la question de **l'amélioration des rendements énergétiques**.
3. Est-il possible de *réduire* les émissions de GES provenant d'autres sources que l'utilisation des combustibles fossiles ? Il s'agit essentiellement des AFOLU, et c'est donc la question de la déforestation et de la **transition agricole**.
4. Est-il possible de *mieux consommer* l'énergie ? Cela signifierait produire autre chose avec d'autres usages, plutôt que produire autrement. C'est la question de **l'économie « verte »**, de moins ou mieux consommer.
5. Est-il possible de *capter* le carbone à l'émission, ou d'avoir des **émissions négatives**, c'est-à-dire d'extraire et de séquestrer le carbone de l'atmosphère ? C'est l'objet de recherches actives, et le GIEC compte beaucoup dessus, mais nous n'en dirons rien ici parce que ces techniques en sont encore à un stade embryonnaire.



4

La transition énergétique

4.1. Les énergies de substitution

Il s'agit tout simplement de remplacer les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie, qui n'émettent pas de GES ou en émettent moins. Si nous reprenons la liste des énergies primaires donnée dans le chapitre précédent et que nous conservons les énergies peu émettrices, nous trouvons comme candidates :

- la biomasse
- le vent
- l'eau courante
- le rayonnement solaire
- l'uranium.

Nous allons faire le tour des énergies proposées comme alternatives aux fossiles et discuter de leurs limites.⁵

Commençons par **l'industrie nucléaire**. Elle assure environ 10% de la production d'électricité dans le monde, mais 75% en France.⁶ C'est

⁵ — Le lecteur intéressé pourra se reporter au site de Jean-Marc Jancovici <https://jancovici.com/category/transition-energetique/> pour approfondir toutes ces questions.

⁶ — Les autres pays européens qui utilisent le plus l'énergie nucléaire dans leur mix électrique sont la Slovaquie (54% du mix), la Belgique (52%), la Hongrie (51%) et la Suède (40%). La moyenne s'établit à 26%. Source : <https://www.forumnucleaire.be/theme/dans-le-monde/lunion-europeenne>

une industrie extractive, comme l'industrie du charbon, du pétrole, ou du gaz, qui repose sur l'exploitation d'une ressource finie, en l'occurrence un isotope rare de l'uranium⁷, appelé U235. Son épuisement est prévu pour les 50 à 100 prochaines années. Il existe des solutions techniques permettant de faire appel à l'isotope le plus commun, U 238, qui représente 99% de l'uranium terrestre, grâce aux « surgénérateurs », mis en service en France (Superphénix) et dans d'autres pays (Russie, Chine) avec des succès mitigés.

L'avantage de l'énergie nucléaire est de ne pas émettre de CO₂ en fonctionnement. Mais en contrepartie elle fait courir des risques considérables, notamment liés aux conséquences possibles d'un accident et au stockage des déchets radioactifs. Ces risques peuvent être réduits par des mesures de sécurité appropriées, mais plus on les réduit, plus cela augmente les coûts de production. Tout le débat sur le nucléaire tourne autour de la question de savoir s'il y a un niveau de risque acceptable, et si la production d'électricité nucléaire est rentable à ce niveau-là. Ainsi, l'Allemagne a décidé en 2011 de fermer toutes ses centrales nucléaires d'ici 2022. A l'heure actuelle, il n'en reste que six en fonctionnement. Dans le même temps, la France mettra en service un réacteur de nouvelle génération type EPR en 2024. Le débat est donc ouvert et à creuser.

Venons-en à la **biomasse**. Elle continue à être utilisée sous forme de bois, qui sert à chauffer et à cuire les aliments dans de grandes parties du monde. Plus récemment sont apparus les biocarburants. Que

⁷ — Un isotope est une "version" d'un atome. Les atomes sont tous constitués de trois types de particules élémentaires : positons et neutrons dans le noyau, et électrons qui « gravitent » autour. L'atome d'hydrogène est l'atome qui a exactement 1 électron et 1 positon. L'oxygène a 8 positons, 8 neutrons et 8 électrons. Mais il existe aussi d'autres « versions » plus rares de l'oxygène qui ont 9 neutrons, voire 10. Ces différentes versions sont appelées les « isotopes » de l'oxygène.

l'on brûle de l'éthanol⁸ ou de l'essence, on émet à peu près la même quantité de GES. Comment donc peut-on prétendre que remplacer l'essence par de l'éthanol diminuerait les émissions ? La réponse ne va pas de soi et nous apparaît discutable. L'argument est que l'éthanol en question est produit à partir de cannes à sucre, de palmiers à huile ou de maïs, c'est-à-dire de végétaux qui ont d'abord retiré du carbone de l'air, et dont la décomposition, si on ne les récolte pas, ou la consommation, si on les récolte, renverra de toutes façons le carbone dans l'atmosphère. Ainsi, les employer comme carburant met à profit le cycle naturel du carbone végétal.

C'est vrai, mais le problème est que cela fait un usage de plus pour ces ressources végétales et que cela se fera aux dépens des usages existants, sauf à mettre en culture des terres supplémentaires, c'est-à-dire à déforester. De fait, l'apparition des biocarburants au début du siècle a eu un impact considérable sur les prix du soja, du maïs et du sucre, les faisant décoller de 10 à 20%.⁹

L'énergie hydraulique est connue et utilisée depuis longtemps. Au Moyen Âge, toutes les rivières étaient équipées de moulins. Plus récemment, on a construit des barrages pour produire de l'électricité. A l'heure actuelle, 12,5% de l'électricité produite en France est d'origine hydraulique. Comme discuté dans le précédent chapitre, on utilise des barrages pour stocker l'électricité : quand on en a trop, on actionne des pompes qui vont chercher l'eau en contrebas et qui la remontent dans le barrage. Ceci dit, beaucoup de sites sont déjà équipés. Par ailleurs, l'installation de barrages de retenue pose des problèmes de gestion de l'eau en aval, notamment pour l'agriculture, qui deviennent

⁸ — L'éthanol est une molécule composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène qu'on catégorise parmi les « alcools », et dont la combustion permet de libérer de l'énergie. On peut l'obtenir en faisant fermenter des plantes comme les betteraves ou la canne à sucre.

⁹ — Source : <https://www.federalreserve.gov/pubs/ifdp/2009/967/ifdp967.htm>

de plus en plus aigus à mesure que les effets du dérèglement climatique se font sentir.

4.2 Les défis de l'éolien et du solaire

L'espoir repose donc beaucoup sur l'éolien et sur le solaire. Ce sont des énergies de flux, qui reposent sur un courant inépuisable, le vent dans un cas et le rayonnement solaire dans l'autre, par opposition au charbon, au pétrole, au gaz et à l'uranium, qui sont des stocks d'énergie, produit sur des centaines de millions d'années mais finis et qui seront donc un jour épuisés. Une énergie de flux a l'avantage d'être accessible indéfiniment mais on a vu qu'il se posait d'autres problèmes : est-elle disponible où on veut quand on veut ? Et peut-on régler sa puissance ?

L'éolien et le solaire sont utilisés pour produire de l'électricité. Ce sont des énergies :

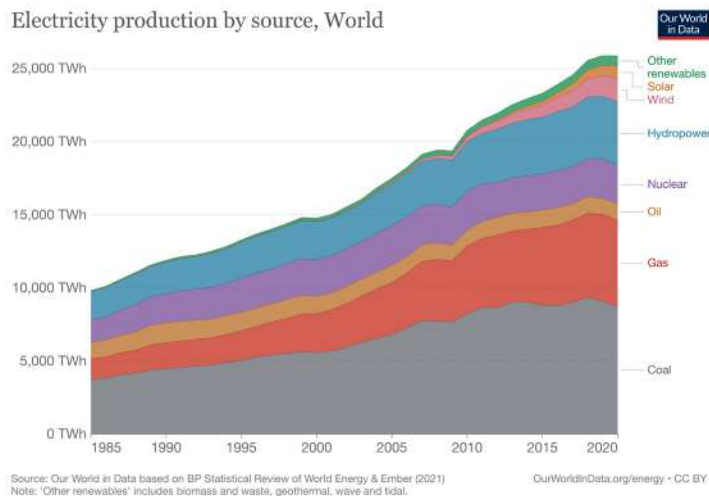
- intermittentes : elles ne sont pas disponibles tout le temps. Le solaire est déjà indisponible tout la nuit. On est donc certain au départ qu'il ne fonctionnera que la moitié du temps, au mieux.
- non pilotables : on ne sait pas quand elles le seront.
- non réglables : quand il y en a, il peut y en avoir trop ou pas assez.

Leur insertion dans le réseau électrique pose des problèmes qui restreignent beaucoup leur efficacité. En tant qu'énergies intermittentes et non-pilotables, on peut parfaitement concevoir qu'elles fassent défaut ensemble au plus mauvais moment. Que fait-on si, par exemple, il n'y a pas de vent sur l'Europe la nuit de Noël ?

On ne connaît que deux solutions : soit maintenir en service des centrales thermiques ou nucléaires, pour compléter l'électricité fournie par l'éolien ou le solaire quand il n'y en a pas assez, soit stocker l'électricité produite quand il y en a trop. Il y a donc deux défis technologiques

à relever : améliorer les modes de production d'électricité renouvelable d'une part, les capacités de stockage d'autre part.

La technologie des éoliennes et du photovoltaïque a fait des progrès rapides, et l'électricité produite coûte de moins en moins cher. Le graphique suivant¹⁰ montre l'essor des renouvelables dans la production d'électricité. L'éolien et le solaire représentent aujourd'hui 10% de la production mondiale, alors qu'ils n'ont fait leur apparition qu'autour de 2005. Le nucléaire est passé de 15% à 10% durant la même période. Notez enfin que l'énergie renouvelable la plus importante, et de loin, reste l'hydroélectrique, qui, aujourd'hui comme en 2005, représente 16% de la production mondiale.



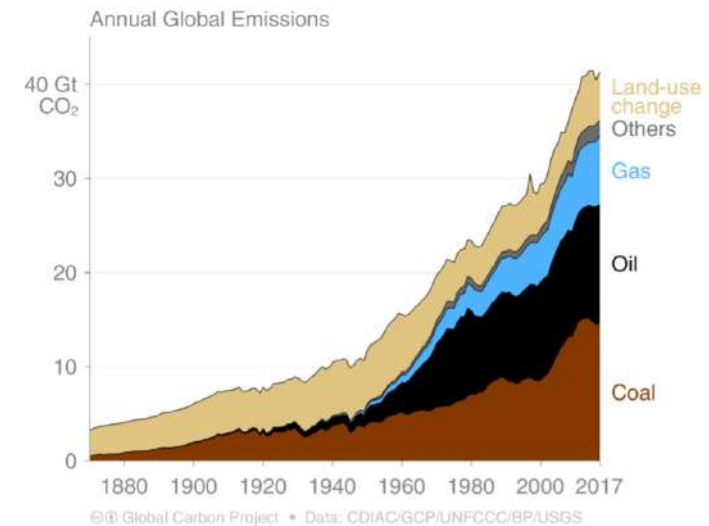
¹⁰ — Source : OWID, <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>

4.3 Substitution ou addition ?

Même si les problèmes techniques liés à l'utilisation d'énergies renouvelables étaient tous résolus, on se heurterait à un dernier problème de taille, de nature économique et politique : est-ce que les énergies renouvelables remplaceraient les énergies fossiles, ou est-ce qu'elles viendraient juste en complément ?

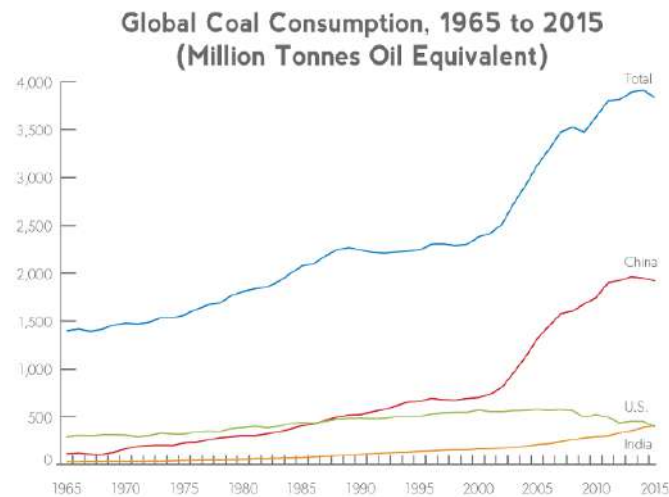
L'idée sous-jacente, bien entendu, c'est qu'elles les remplaceraient, et que les émissions de GES seraient diminuées d'autant. Mais ce n'est nullement assuré ! En pratique, l'histoire nous montre au contraire que chaque fois qu'une nouvelle source d'énergie a été découverte et exploitée, on a continué à exploiter les autres. C'est un exemple du paradoxe de Jevons que nous allons voir plus loin : l'énergie nouvelle crée de nouveaux besoins en énergie !

Reprenons un graphique que nous avons déjà vu. Les émissions de GES dans le monde depuis 1850, réparties par source :



Oubliez l'histoire et le réchauffement, et observez ce graphique : quelle période qualifieriez-vous d'âge d'or du charbon ? C'est-à-dire : pendant quelles décennies a-t-on émis le plus de GES par la combustion de charbon ? Et pour le pétrole et le gaz naturel ? La réponse est trois fois la même : 2000-2017 !

On voit que le pétrole ne remplace pas le charbon, et que le gaz ne remplace pas le pétrole. Au contraire, on pourrait dire que le charbon (utilisé principalement pour la production d'électricité) est le combustible du futur ! Sa consommation a plus que doublé ces cinquante dernières années, comme le confirme le graphique suivant :



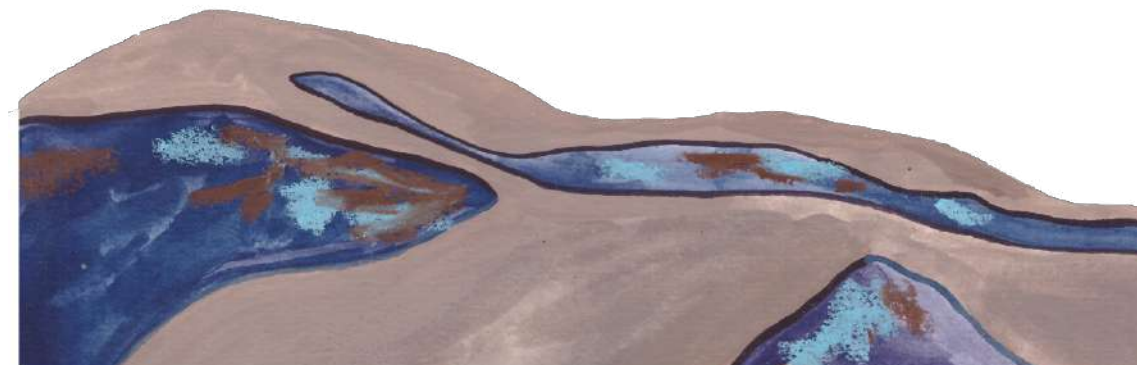
IER

On voit que, si le charbon est en déclin modéré aux États-Unis, il est loin de l'être sur le plan mondial, où il alimente l'essor des industries chinoises et indiennes. Bien que nos imaginaires européens l'associent plus volontiers à la première révolution industrielle, le charbon est une énergie très moderne !

Le défi technologique à relever n'est donc pas tant de produire de l'électricité à partir de sources renouvelables que de moins puiser aux sources anciennes. Le but n'est pas de produire de l'électricité en plus, mais de moins brûler de carburants fossiles, et il faut que l'électricité renouvelable vienne remplacer les carburants fossiles là où ils sont utilisés.

Résumé

- ♦ L'essentiel de l'énergie utilisée provient encore des carburants fossiles
- ♦ Plusieurs sources d'énergie sont des alternatives moins émissives que les carburants fossiles mais elles possèdent toutes des limites contraignantes.
- ♦ Le nucléaire pose des problèmes de gestion des déchets radioactifs, d'extraction durable d'uranium et de risque d'accidents de grande ampleur.
- ♦ L'hydraulique est une source importante, mais il est difficile de construire de nouveaux barrages et ils interfèrent avec d'autres usages de l'eau.
- ♦ Les biocarburants ont un impact carbone discutable et augmentent les prix des denrées alimentaires.
- ♦ L'éolien et le solaire sont intermittentes, non-pilotables et non-réglables, et nous n'avons pas encore de solutions de stockage utilisables à grande échelle.
- ♦ Il ne suffit pas de produire davantage d'électricité en exploitant des sources renouvelables, il faut diminuer l'utilisation des sources fossiles.



5

L'amélioration des rendements

5.1 La fausse bonne idée ?

Pour réduire l'utilisation des carburants fossiles ? Améliorons les rendements des moteurs ! C'est une solution qui semble évidente : une voiture qui fait 8 litres aux 100¹¹ consomme moins qu'une voiture qui fait 12 litres aux 100, et si on pouvait, d'un coup de baguette magique, remplacer toutes les voitures actuelles par des voitures moins gourmandes en carburant sans rien changer aux usages, on diminuerait d'autant les émissions de ce secteur.

Malheureusement en pratique ce n'est pas vrai car d'autres effets entrent en jeu. Du point de vue de l'utilisateur, une voiture plus sobre est aussi une voiture plus économique. Si le prix du carburant est à 1 euro le litre, une voiture qui fait 12 litres aux 100 coûte 12 centimes au kilomètre, et une voiture qui en fait 8 en coûte 8. Le propriétaire sera donc incité à l'utiliser davantage (et il s'en privera sans doute d'autant moins qu'il le fera avec bonne conscience, puisqu'il a une voiture « propre »).

De plus l'amélioration des rendements relatifs à la consommation de carburant va souvent de pair avec une amélioration de la fabrication des voitures : c'est alors le prix d'achat qui va baisser, et on aura des voitures plus économiques à l'usage et moins chères à l'achat, qui vont conquérir un public plus large.

¹¹ — On dit "8 litres aux 100" pour signifier qu'avec une charge normale, la voiture consomme 8 litres d'essence pour parcourir 100 kms.

In fine, on aura davantage de voitures roulant davantage, et la consommation globale va augmenter.

5.2 L'effet rebond

C'est ce qu'on appelle *l'effet rebond*, et historiquement il est parfaitement attesté. Rappelez-vous les premières machines à vapeur, qui consommaient tellement de charbon qu'on ne pouvait les installer que dans les mines. Combien en existait-il ? Quelques dizaines ou quelques centaines. Plusieurs dizaines d'années plus tard, les machines à vapeur font tourner toute l'industrie textile britannique, des locomotives sillonnent le pays par milliers, et des navires à vapeur traversent les océans. Les rendements se sont améliorés, chaque machine consomme bien moins, mais la consommation globale de charbon explose.

L'arrivée du pétrole a permis la généralisation de l'automobile : en 2020, rien qu'en France, il y avait 38,2 millions de voitures particulières en circulation. A l'échelle mondiale, les voitures particulières à elles seules consomment le quart de la production pétrolière. Et l'amélioration des rendements énergétiques ne va pas toujours dans le sens de la réduction de la consommation, comme en témoigne le succès des SUV : plus grands et plus lourds que les voitures ordinaires, ils consomment en définitive davantage.¹²

Prenons un autre exemple. Une des conséquences de la révolution industrielle a été la révolution de l'éclairage. Avant 1800, il n'était pas question d'éclairage public : qui s'aventurait dans les rues de Paris ou de Londres la nuit le faisait à ses risques et périls, portant son flambeau avec lui et de préférence avec une bonne escorte. Au tournant du siècle on découvre le gaz d'éclairage, extrait de la houille, et on installe des réverbères dans les rues, avec des allumeurs qui passent tous les

¹² — Source : <https://www.iea.org/commentaries/growing-preference-for-suvs-challenges-emissions-reductions-in-passenger-car-market>

soirs et tous les matins. Bruxelles, en 1833, est la première grande ville à inaugurer ce système. Après, bien sûr, il y aura l'électricité, l'ampoule à incandescence, puis les néons et les LED d'aujourd'hui. Les rendements énergétiques ont explosé, et corrélativement, les prix ont baissé. Entre 1800 et 2000, le prix de l'unité de lumière (le lumen) a été divisé par 3000, mais la consommation de lumen a été multipliée par 40 000.



Paris, 1905, un allumeur de réverbères

Source : <https://i.pinimg.com/originals/fd/58/62/fd58622d88978addbc-fa6fb83508a8eb.jpg>

Le fait que l'amélioration des rendements, et le progrès technique en général, augmente la consommation d'énergie plutôt que de la

diminuer, est également connu sous le nom de paradoxe de Jevons, du nom d'un économiste britannique, William Jevons (1836-1882), qui l'avait le premier démontré dans un livre précurseur, *The coal question*, publié en 1865, en plein dans la révolution industrielle.

Résumé

- ♦ Améliorer les rendements énergétiques d'une machine ne suffit pas à garantir que la consommation d'énergie liée à l'usage de cette machine va baisser.
- ♦ En pratique on observe très fréquemment deux effets rebonds : de meilleurs rendements incitent à un plus grand usage des usagers existants, et attirent plus d'usagers.

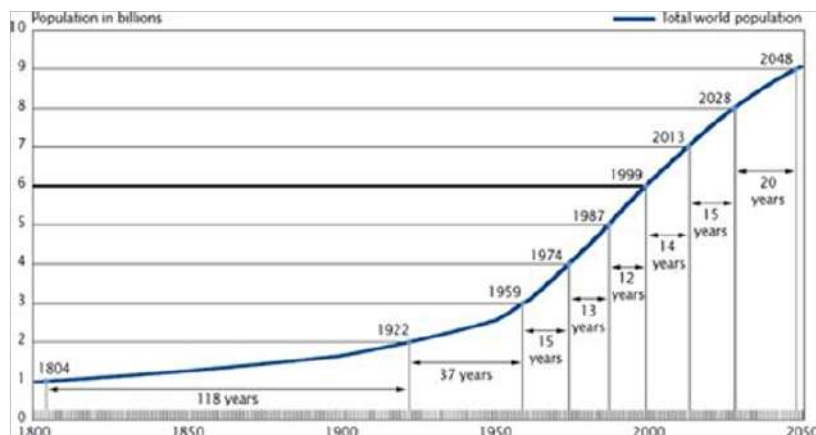


6

L'usage des sols

6.1 Satisfaire des besoins alimentaires en croissance exponentielle

En 1800, la population mondiale atteint un milliard d'individus. Il lui a fallu des dizaines de milliers d'années pour atteindre ce chiffre. Mais à partir de là l'évolution s'accélère : le deuxième milliard est atteint 120 ans après, et en 2020 nous sommes 7,8 milliards sur cette planète. Comme les tendances démographiques sont très lourdes (les taux de naissance et de décès ne varient que très lentement), on peut extrapoler et affirmer que, sauf catastrophe majeure, nous serons 9 milliards au milieu du siècle.



La révolution industrielle est indubitablement la cause de cette explosion de la population, grâce aux progrès de la médecine certes, mais surtout grâce à l'amélioration des conditions de vie (accès à l'eau

courante, hygiène publique). Mais comment l'alimentation a-t-elle pu suivre ?

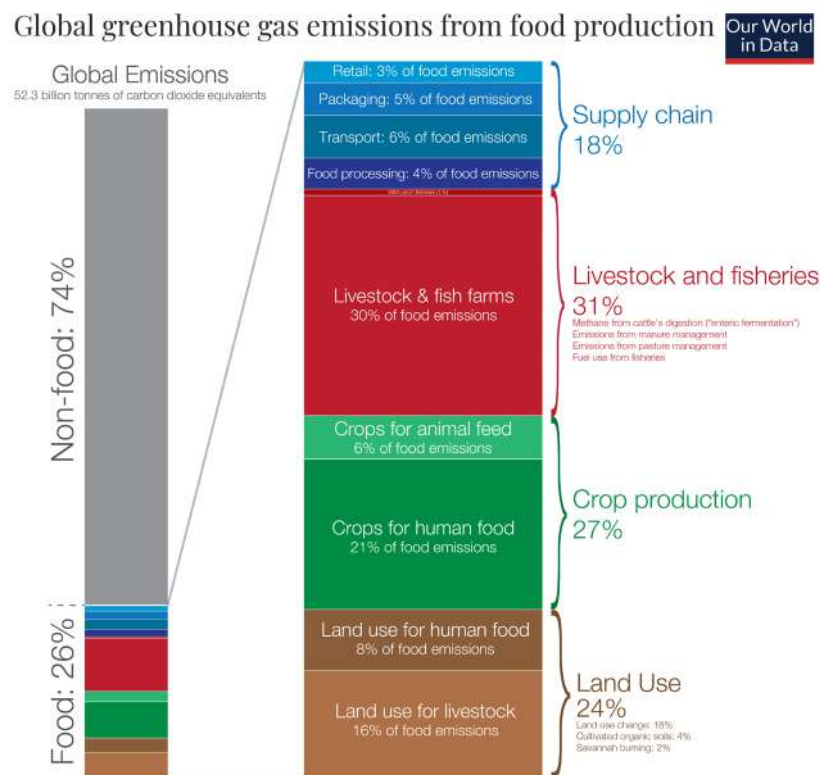
6.2 L'industrialisation de l'agriculture

La réponse tient en deux temps : d'une part, il y a l'extension des terres agricoles, d'autre part, l'industrialisation de l'agriculture. Les prairies de l'Amérique du Nord et d'Australie ont été transformées en champs de céréales à mesure que la colonisation s'étendait vers l'intérieur des terres. Ce processus atteint ses limites vers 1900, et c'est l'industrialisation qui vient prendre le relais. La première guerre mondiale donne un coup de fouet à l'industrie mécanique (production de camions et de tanks) et à l'industrie chimique (production d'explosifs et de gaz de combat) : les travaux des champs seront dorénavant effectués par des machines agricoles, les engrais organiques fournis par l'élevage seront remplacés par des engrais industriels, on exterminera les insectes prédateurs et les champignons parasites par des pesticides. On voit ainsi naître l'industrie agroalimentaire, qui fournit les agriculteurs en machines, en semences, en engrais, en pesticides, et qui achète leur production pour l'écouler sur les marchés internationaux.

Cette évolution de l'agriculture pose aujourd'hui des problèmes considérables : épuisement et artificialisation des sols, perte de la biodiversité naturelle et création d'organismes génétiquement modifiés aux impacts risqués, destruction des cycles naturels (les semences commercialisées sont stériles, les engrais industriels interfèrent avec les cycles du phosphore et de l'azote), pollution chimique et perturbateurs endocriniens (pesticides) ... Nous allons nous concentrer ici sur ses conséquences pour le réchauffement climatique : pourquoi le secteur agricole est-il un si grand émetteur de GES ? Comment se fait-il d'ailleurs que l'agriculture émette des GES ?

6.3 Les émissions de GES de l'agriculture

Le graphique ci-dessous¹³ montre que l'agriculture est responsable de 26% des émissions de GES :



Il y a bien sûr les émissions directes de CO₂, liées à l'industrialisation : utilisation de machines, d'engrais et de pesticides (qu'il faut fabriquer),

¹³ — Source : OWID <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food#environmental-impacts-of-food-and-agriculture>

transport des récoltes vers les lieux de consommation (souvent distants de milliers de kilomètres).

Mais le principal responsable est l'élevage. Les ruminants, dont les bovins et les moutons, émettent en effet du méthane. C'est dû à leur physiologie : ils ne digèrent pas directement l'herbe qu'ils broutent, ce sont des bactéries qui la décomposent pour eux, et qui émettent du méthane durant le processus. L'agriculture est responsable de 40% des émissions de méthane dans le monde,¹⁴ et cela ne fait que s'amplifier à mesure que la demande de viande augmente. Or nous avons vu que le méthane est un GES 25 fois plus puissant que le CO₂, quoique moins persistant.

A cela il faut rajouter les émissions indirectes. Pour nourrir 8 milliards de personnes, bientôt 9, on déforeste : la forêt amazonienne, qui est un gigantesque puits de carbone, disparaît pour faire place aux plantations de soja. Les terres arables existantes disparaissent au profit de l'urbanisation, et celles qui restent s'épuisent progressivement et deviennent moins fertiles.¹⁵ Enfin, à mesure que la végétation disparaît ou s'appauvrit, les sols cessent d'absorber du CO₂ et en relâchent.

Concluons sur un bilan. 38% de la surface terrestre est consacrée à l'agriculture, dont les deux tiers en pâtures pour le bétail et le tiers en culture.¹⁶ Ce sont autant de terres qui ne captent pas de carbone par des végétaux pérennes. Le secteur agricole représente plus du quart

¹⁴ — https://ourworldindata.org/grapher/methane-emissions-by-sector?country=-OWID_WRL

¹⁵ — En termes d'artificialisation, la France est dans la moyenne européenne. Pour construire des logements, des routes ou des infrastructures commerciales, l'équivalent de la superficie d'un département est bétonné tous les 10 ans, soit un terrain de foot toutes les 5 minutes. Source : Rapport France Stratégie « Zéro artificialisation nette » ; Site Planestoscope <https://www.planestoscope.com/sols/2024-l-artificialisation-des-sols-en-france.html>

¹⁶ — Source : OWID <https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture>

des émissions de GES d'origine humaine, et l'élevage à lui seul en fait le tiers, soit 8% des émissions globales. En outre, rappelez-vous que les émissions dues à l'élevage se font sous forme de méthane, et celui-ci disparaît de l'atmosphère en une dizaine d'années. Si l'on diminuait fortement l'élevage, on cesserait d'ajouter du méthane dans l'air, et au bout d'une dizaine d'années on verrait la teneur de l'atmosphère en GES diminuer ! Cela dégagerait aussi des ressources alimentaires, d'une part parce qu'un bœuf absorbe au cours de sa vie 25 fois plus de calories qu'il n'en restitue sous forme de viande, et d'autre part parce que les cultures dédiées à l'alimentation animale pourraient être utilisées directement pour l'alimentation humaine.

Résumé

- † La population mondiale a augmenté de façon exponentielle : nous étions 200 millions en l'an 400, 1,5 milliard en 1900, nous sommes 7,7 milliards en 2020. Nous serons probablement 9,5 milliards en 2050.
- † L'industrialisation de la production agricole a largement soutenu cette croissance.
- † Aujourd'hui, la principale source d'émissions dans le secteur agricole est l'élevage : par les émissions de méthane des ruminants et par l'importance des terres cultivées pour l'alimentation du bétail.
- † Les autres sources sont le déboisement, et l'artificialisation et les traitements des sols.

7

L'économie verte, ou comment agir sur la consommation ?

7.1 Agir sur la demande

On n'élève pas des ruminants pour le plaisir, mais pour répondre à une demande alimentaire. Si on diminue la demande de viande ou de lait, la population de ruminants baissera en proportion, ainsi que les émissions de GES. C'est une loi générale : les industries polluantes produisent pour répondre à une demande, même si elles consacrent des budgets publicitaires importants pour susciter celle-ci.

Nous avons vu que les leviers de l'amélioration des rendements et l'exploitation de nouvelles sources d'énergie étaient fortement limités si l'on voulait respecter les objectifs de l'accord de Paris, moins de 2°C de réchauffement en 2100. Si l'on prend ces objectifs au sérieux sans miser sur les techniques de capture carbone encore peu développées, on devra agir sur la production industrielle et agricole, en la déplaçant vers des produits non polluants, c'est-à-dire en définitive agir sur la demande et modifier notre consommation.

Cela peut signifier de réduire directement et quantitativement notre consommation de biens. On peut imaginer renouveler moins fréquemment sa garde-robe par exemple. Modifier sa consommation peut aussi passer un changement d'usages (se partager une voiture grâce aux services de covoiturage par exemple, sans nécessairement moins se déplacer) et un changement de mode de vie (réparer ses objets,

ce qui implique de prendre du temps à se former au bricolage ou de trouver un atelier de réparation proche de chez soi, à partir d'objets initialement conçus pour être réparables). Les modes de vie étant collectivement et culturellement déterminés, cela n'ira pas sans des changements de modèles, d'imaginaires culturels et de normes sociales.

7.2 Le cas de l'élevage et des régimes végétariens

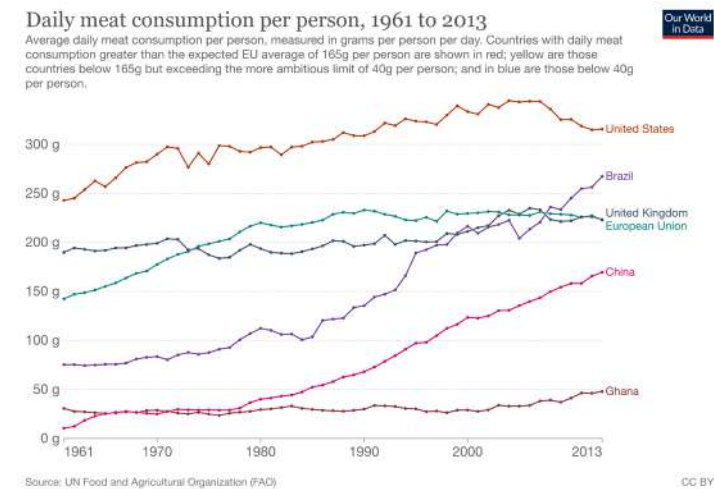
Prenons le cas de l'élevage, qui est exemplaire. Comme nous l'avons vu, manger moins de viande et de laitages, et donc déplacer la consommation vers un régime végétarien, permettrait de réduire considérablement les émissions de GES. Mais est-ce si simple ? Qu'est-ce que cela nécessite exactement ?

Pour vous en faire une idée, pensez à des exemples autour de vous : vous-mêmes, des amis ou des connaissances, qui ont diminué leur consommation de viande. Comment ce changement de comportement a été perçu par leur entourage ? Ont-ils dû élaborer eux-mêmes un nouveau régime ou bien avaient-ils déjà observé ailleurs des menus végétariens imitables ? Est-ce que le critère financier a joué ? Existait-il des restaurants ou des magasins alimentaires à proximité de leur domicile qui avaient une offre adaptée ? Cela a-t-il facilité leur choix ? Comment justifient-ils leur décision auprès des autres ? Est-ce qu'elle revêt pour eux une dimension morale ? Comment ont-ils été sensibilisés au sujet ? Est-ce que d'autres personnes de leur entourage ou de leur groupe social ont suivi les mêmes évolutions ?

Une telle analyse nous révèle qu'il ne s'agit jamais de décision purement individuelle, sur des critères moraux individuels. Beaucoup de paramètres affectant nos choix sont l'objet de décisions collectives, au sein de différents types d'organisation et à différentes échelles. Vous ne décidez pas seul d'avoir un magasin alimentaire proche de chez vous qui contienne des produits végétariens. L'alimentation a également une dimension sociale et culturelle très forte. Pas simple de refuser le burger ou le couscous au poulet aux repas en famille ou

entre amis ! Dans beaucoup de sociétés, manger de la viande est un signe de réussite, dont on cherche à faire profiter ses proches. Cela explique pourquoi l'on constate que la consommation de viande, qui baisse actuellement légèrement dans les pays riches, augmente dans les pays pauvres.

Le graphique ci-dessous¹⁷ montre l'évolution de la consommation de viande par personne dans le monde et dans divers pays. On verra qu'au niveau mondial elle a doublé depuis 1961, et comme entretemps la population est passée de 3 milliards à 8, la consommation globale de viande a été multipliée par plus de 5.



Consommation de viande par personne, entre 1961 et 2013

Par ailleurs, l'alimentation est une industrie, qui ne subit pas la demande passivement, et qui est capable d'investir pour l'orienter dans une direction qui lui est avantageuse. La publicité, et plus générale-

¹⁷ — Source : OWID <https://ourworldindata.org/grapher/daily-meat-consumption-per-person?tab=chart>

ment l'information que l'on capte sur ce que nous pouvons manger, sont des leviers puissants pour influencer les comportements.

Enfin, le tout se passe dans un cadre légal et réglementaire qui peut être modifié suivant les procédures et les aléas de l'action politique. Par exemple en 2018 en France, la loi « Egalim » a fixé un objectif de « 50% de produits durables ou sous signes d'origine et de qualité (dont des produits bio) dans la restauration collective publique à partir du 1er janvier 2022 ». Les enfants français allant manger à la cantine en 2022 n'auront pas les mêmes repères et habitudes alimentaires que la génération qui les a précédés.

En conclusion, au-delà de l'exemple de l'alimentation, on voit qu'agir sur la consommation est un problème complexe, qui requiert une action à plusieurs niveaux : sur les individus, sur les entreprises, et sur l'État. Les moyens pour cela sont divers : incitations économiques, interdits juridiques, modes de gouvernance des entreprises et de l'État,...

Résumé

- ✦ Un levier puissant pour réorienter la production consiste à changer la demande.
- ✦ Cela nécessite d'agir à différents niveaux, et la plupart des leviers d'action relèvent de décisions collectives.



Conclusion

Nous avons identifié différents leviers sur lesquels on peut agir pour diminuer les émissions de GES. Il y a la transition agricole, qui offre le double avantage d'un impact rapide, puisqu'elle agirait notamment sur le méthane dont la durée de vie est bien inférieure à celle du dioxyde de carbone, avec des effets bénéfiques que nous n'avons pas discutés ici sur la biodiversité et la santé. Il y a aussi l'amélioration des rendements et la transition vers d'autres sources d'énergie, bien que l'histoire nous alerte sur le fait que ces deux leviers puissent au contraire entraîner une augmentation de la consommation globale. Pour éviter cet effet, il faudra changer nos habitudes.

Bref, pour lutter contre le réchauffement climatique, il faut agir sur les modes de consommation tout autant que sur les modes de production, et cela passe par une mobilisation de tous les acteurs : individus, entreprises, État, associations, etc. Cela requiert également une action coordonnée : il n'y a pas qu'un levier d'action, comme on l'a vu, il y en a plusieurs, agissant sur la production comme sur la consommation, et tout cela nécessite un plan d'ensemble cohérent, un scénario de transition. En proposer un va bien au-delà des ambitions de ce cours d'introduction, mais il en existe plusieurs, et le lecteur intéressé pourra se reporter par exemple au scénario Afterres¹⁸ en ce qui concerne

18 — <https://afterres2050.solagro.org/>



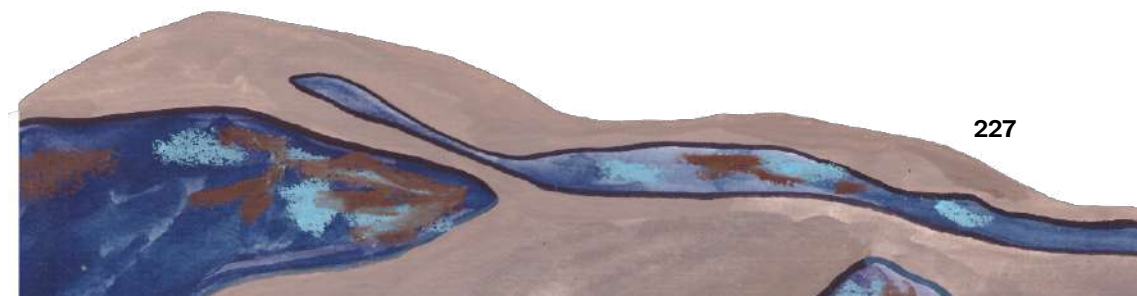
l'agriculture, ou aux scénarios du Shift Project¹⁹, de RTE²⁰ ou de NegaWatt²¹ pour l'ensemble de l'économie.

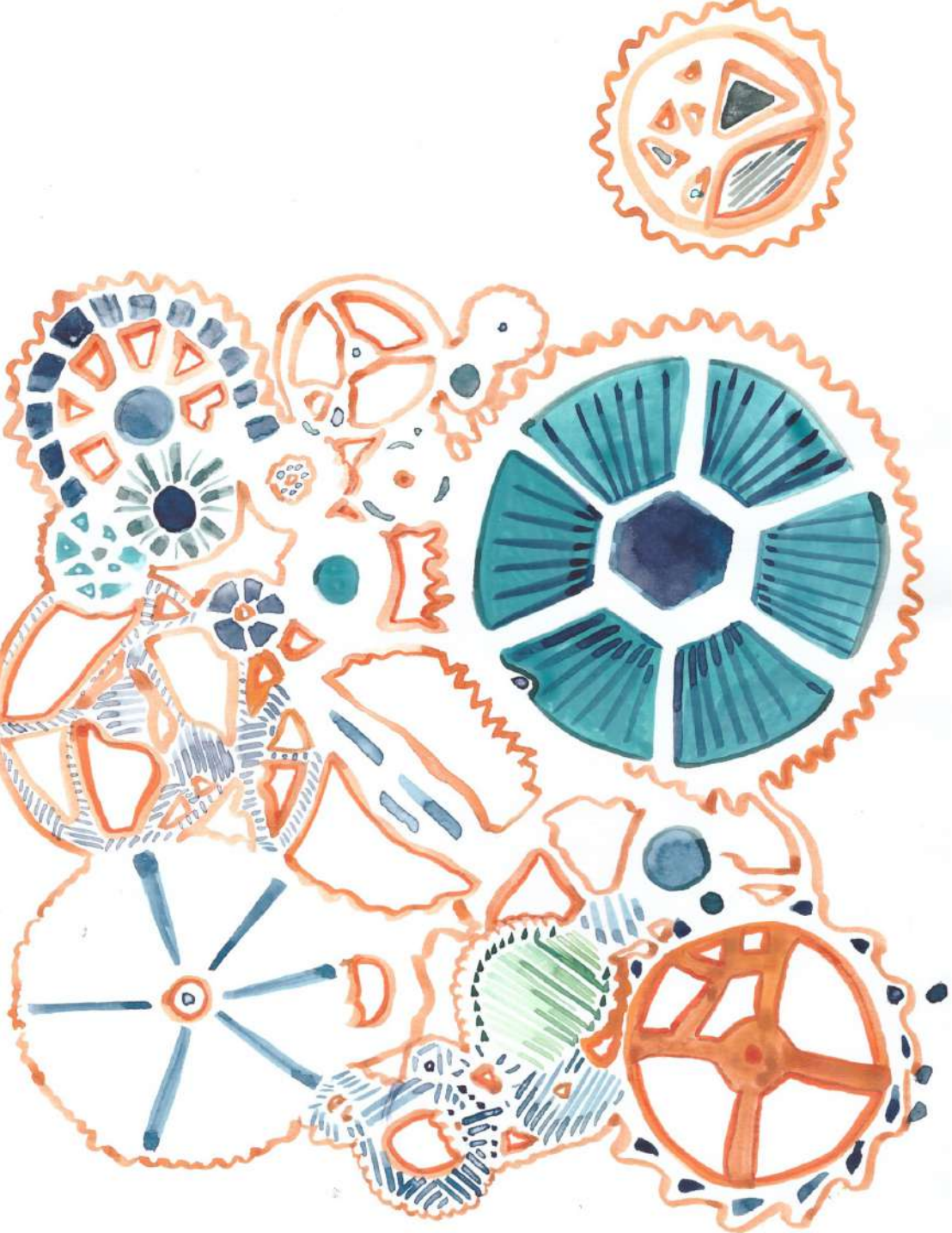
Enfin, il faut savoir quel but on se donne. Plusieurs types d'organisation sociale sont compatibles avec les objectifs de l'accord de Paris, certains très inégalitaires, d'autres moins : vers lequel souhaite-t-on se diriger ? Ces décisions transcrivent de véritables choix de société, qui soulèvent des questions de justice et d'éthique. Rappelez-vous du récent mouvement politique des Gilets Jaunes en France : l'argument de justice sociale dans la répartition du coût des politiques environnementales était au centre des revendications. Choisir un scénario, c'est aussi choisir la société où l'on souhaite vivre demain et pour laquelle on est prêt à se mobiliser dès aujourd'hui.

19 — <https://theshiftproject.org/crises-climat%e2%80%89-plan-de-transformation-de-leconomie-francaise/>

20 — <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

21 — <https://www.negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>





9

**Brève histoire sociale des
émissions de GES**

1ère partie —
La révolution industrielle



Préambule

Pourquoi des sciences sociales dans un cours sur le climat

Depuis le début de ce cours, nous avons étudié les grands équilibres physico-biologiques qui régulent le climat et la vie sur Terre et montré comment ils se sont modifiés en quelques siècles. Peut-on s'en tenir là ? Pensez-vous que les sujets écologiques se résument à des discussions entre physiciens, chimistes et biologistes ? Qu'il suffise de parler d'effet de serre, de biodiversité et de scénarios du GIEC pour comprendre la situation et passer à l'action ?

Nous pensons que non. L'être humain est sans conteste un acteur majeur de ces transformations, et il faut aussi chercher à le comprendre. Ne parler que de physique et de biologie, en oubliant les sciences sociales, c'est-à-dire l'histoire, l'anthropologie, l'économie, la politique, la sociologie ou encore le droit, ce serait comme décrire le fonctionnement du corps humain en ne parlant que du cœur et de la circulation sanguine, en oubliant l'exercice, l'alimentation et le mental. Cela expliquerait peu, et soignerait encore moins.

Pour comprendre l'action des hommes, il faut comprendre ce qui les fait agir : les idées sont importantes ! Les mythes et les croyances de nos sociétés, leurs hiérarchies internes, leurs systèmes d'échange et de valeurs façonnent le rapport des hommes entre eux et avec le reste de cette planète. Croire par exemple que les arbres ou les sources abritent un esprit, comme l'enseigne la mythologie antique, ou qu'un clan entier descende d'un ancêtre animal, le totem, comme le croient les tribus de chasseurs-cueilleurs qui subsistent encore aujourd'hui, n'est pas une simple lubie sans conséquence matérielle. Qui voudrait abattre un chêne centenaire au risque que son esprit se venge un jour ? Pour les membres du clan, tuer un animal totemique est un acte

qui ne peut être entrepris à la légère et sans raisons graves. De telles croyances ne sont-elles pas un moyen pour ces sociétés de préserver les ressources collectives, comme le font dans les nôtres les lois et les réglementations ?

Inversement, des croyances et des systèmes de valeurs peuvent avoir un effet destructeur sur les conditions de vie d'une société. L'effet de serre est lié à l'exploitation des carburants fossiles qui a certainement permis l'essor de sociétés de consommation et d'abondance. Ce modèle s'est largement diffusé sur toute la planète. Mais est-ce l'exploitation des carburants fossiles qui a provoqué la course à la prospérité matérielle, ou est-ce la course à la prospérité matérielle qui a provoqué l'exploitation des carburants fossiles ? Est-ce le pétrole qui a créé la société de consommation, ou est-ce la société de consommation qui a provoqué l'exploitation massive du pétrole ? Savez-vous par exemple que les premiers systèmes d'exploitation et de production industriels sont apparus au 15^{ème} siècle, dans les colonies portugaises de Madère et Sao Tomé, pour répondre à la demande européenne de sucre ? C'était bien avant la découverte et l'exploitation du charbon, et l'énergie nécessaire était fournie par des esclaves. La société de consommation a donc existé avant le pétrole, et le pétrole lui a ouvert de nouveaux horizons (voitures, avions, plastiques). L'un ne va pas sans l'autre, comme l'œuf ne va pas sans la poule, et il faut donc les étudier ensemble.

L'objectif des deux chapitres qui suivent est de vous donner à voir les systèmes d'organisation du monde qui ont permis la combustion incontrôlée des carburants fossiles et donc le réchauffement climatique. Mais l'Histoire n'est pas linéaire. Elle s'étire en longueur et parfois soudainement s'accélère. Elle semble tantôt prédéterminée, tantôt imprévisible. Elle est en tout cas toujours faite de forces multiples et complexes, et nous ne pourrions pas rendre ici justice à cette complexité. Nous procéderons donc par « coups de projecteur » sur les temps forts et les idées principales qui sont à l'origine des bouleversements environnementaux actuels. Ce récit par « capsule » est fortement centré sur les puissances occidentales, Europe puis États-Unis, car

ce sont elles qui ont créé, puis imposé au monde entier, les systèmes économiques et politiques à l'origine du réchauffement climatique et de la perte de biodiversité.

Vous verrez que les équilibres sociaux qu'étudient les sciences humaines sont tout aussi déterminants dans l'histoire récente du climat et de la biodiversité que les équilibres physico-biologiques. On ne peut songer à modifier les seconds sans modifier les premiers. Pour répondre aux défis environnementaux du 21ème siècle, il ne suffit pas de solutions techniques (améliorer l'isolation des bâtiments ou les rendements énergétiques des voitures, réintroduire des abeilles dans les champs), il faut aussi changer les modes de production et les valeurs individuelles et sociales, les représentations collectives et les fondements du contrat social, et donc faire appel à l'inventivité des ingénieurs, des économistes, des juristes, des philosophes, et sans doute plus encore à la créativité et à la motivation des citoyens. Comme le disait l'ethnologue David Graeber, « la vérité ultime et cachée du monde est que c'est quelque chose que nous faisons, et que nous pourrions tout aussi bien faire autrement ».¹

¹ — Cité par David Wengrow, dans le *Guardian* du 31/10/21





Introduction

Ce premier chapitre couvre la période qui va de 1500 à 1950, avec la révolution industrielle et les premières émissions de GES. Durant ces quatre siècles et demi, le monde change davantage que dans les deux millénaires précédents. Une paysanne française du 16ème siècle n'aurait guère été dépaysée si on l'avait ramenée quinze siècles en arrière. Elle aurait retrouvé une société rurale et communautaire, des pratiques agricoles pratiquement inchangées, dans un monde où l'espérance de vie dépassait à peine 40 ans et où plus d'un enfant sur deux mourait avant d'atteindre l'âge de 5 ans. Mais elle ne trouverait pas sa place dans la France d'aujourd'hui, où l'espérance de vie dépasse 80 ans et où l'agriculture représente 1,5 % de l'emploi total. Les idées et les institutions qui nous sont familières, comme le marché mondial ou le bilan financier de l'exploitation, lui seraient incompréhensibles, et elle ne reconnaîtrait pas les campagnes, profondément transformées par l'industrialisation de l'agriculture.

Pourquoi partir de 1500 ? Parce que le 16ème siècle est celui des découvertes de Galilée et aussi celui de la colonisation du Nouveau Monde. Ces deux événements feront la prospérité de l'Europe et dessineront le monde d'aujourd'hui. Les découvertes de Galilée marquent le début de la science moderne, qui permettra la révolution industrielle et assurera la supériorité technique et militaire de l'Europe. La colonisation de l'Amérique, puis des autres continents, assurera à l'industrie européenne les ressources et les débouchés nécessaires à son fonctionnement, grâce à la création de marchés mondialisés, détruisant au passage les structures sociales et commerciales traditionnelles. Ce sont ces marchés, englobant toute la planète, qui ont permis l'essor de la production industrielle à partir de 1850, et particulièrement à partir de 1950, entraînant avec eux les émissions de GES dont nous subissons aujourd'hui les premières conséquences.

Questions pour s'échauffer

- En 1800, en France, quelle était la proportion d'enfants qui mouraient avant cinq ans ?

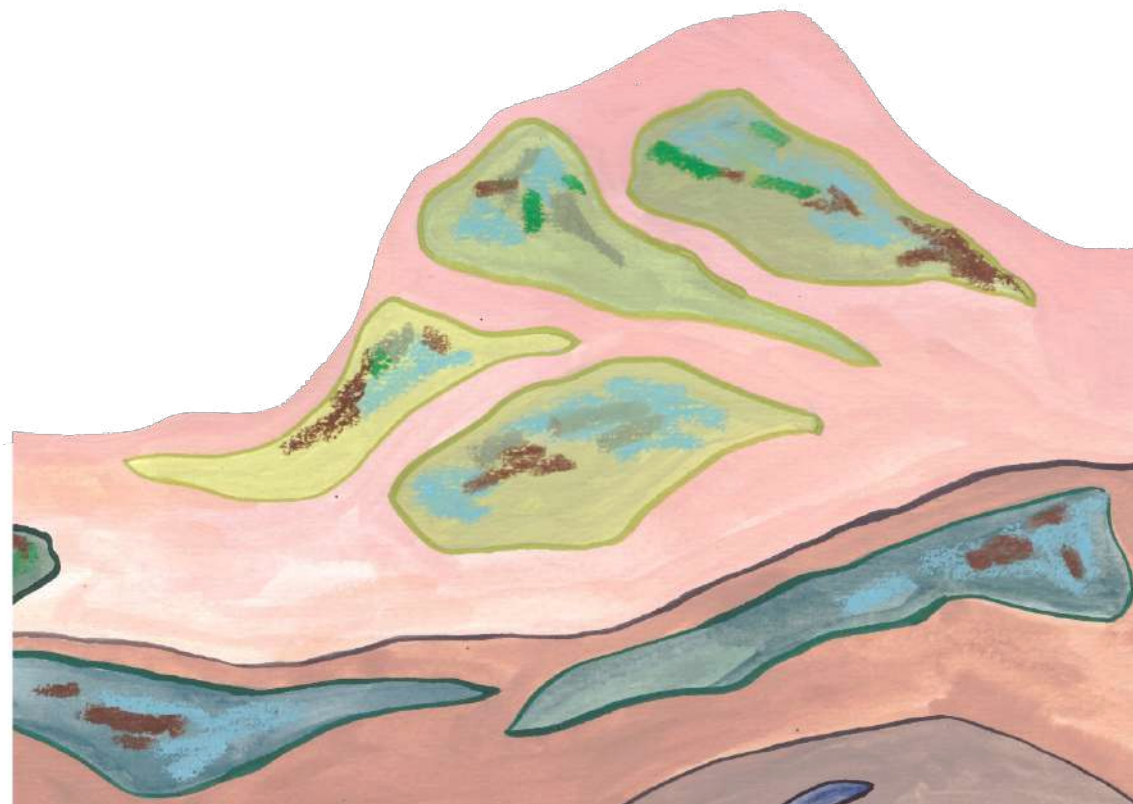
Réponse : 4 sur 10

- La canne à sucre et le coton sont-elles des plantes américaines ?

Réponse : la canne à sucre non, elle a été importée de Guinée et acclimatée ; le coton, oui.

- Qui a écrit « Les richesses naturelles sont inépuisables car sans cela nous ne les obtiendrions pas gratuitement » ?

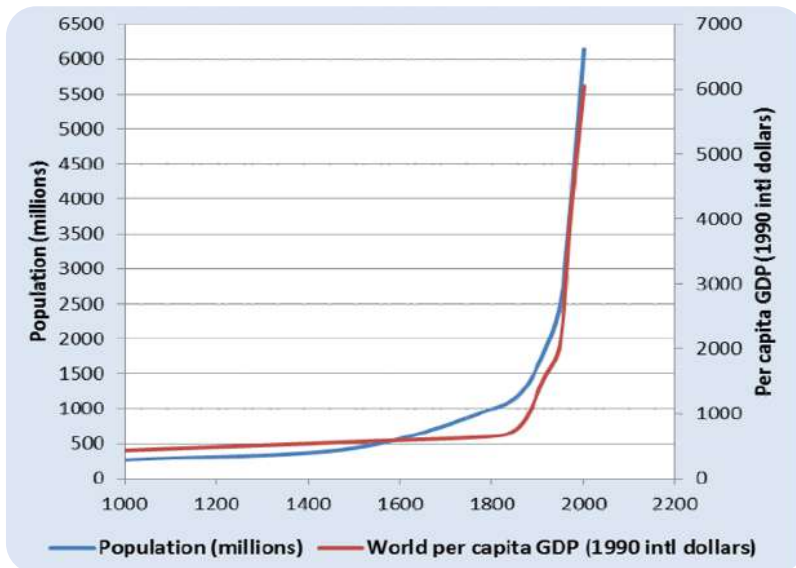
Réponse : Jean-Baptiste Say, dans son Traité d'économie politique (1803)



1

Les transformations des conditions de vie

Alors que s'est-il passé à partir du 16ème siècle ? Jugez-en d'abord par vous-mêmes en observant ces graphiques :

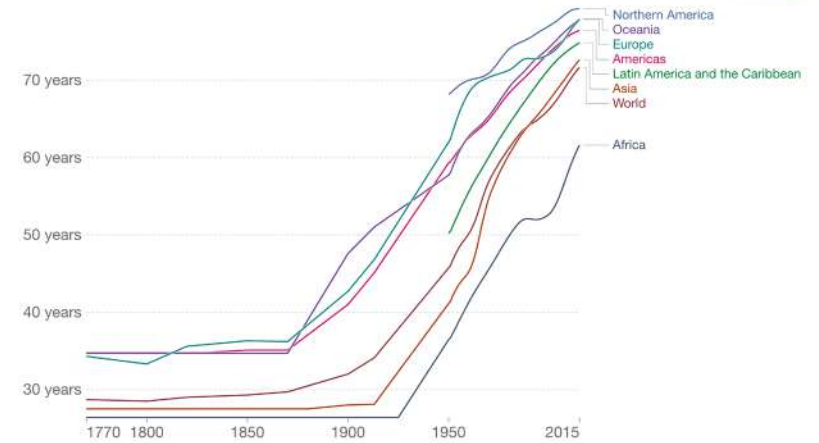


Graphique 1 : Population Mondiale et PIB depuis l'an 1000

Source : Research Gate¹

1 — https://www.researchgate.net/figure/World-Population-and-Per-Capita-GDP-PPP-1000-AD-to-2001-Data-from-17_fig2_49599352

Life expectancy, 1770 to 2015



Source: Riley (2005), Clio Infra (2015), and UN Population Division (2019) OurWorldInData.org/life-expectancy - CC BY
Note: Shown is period life expectancy at birth, the average number of years a newborn would live if the pattern of mortality in the given year were to stay the same throughout its life.

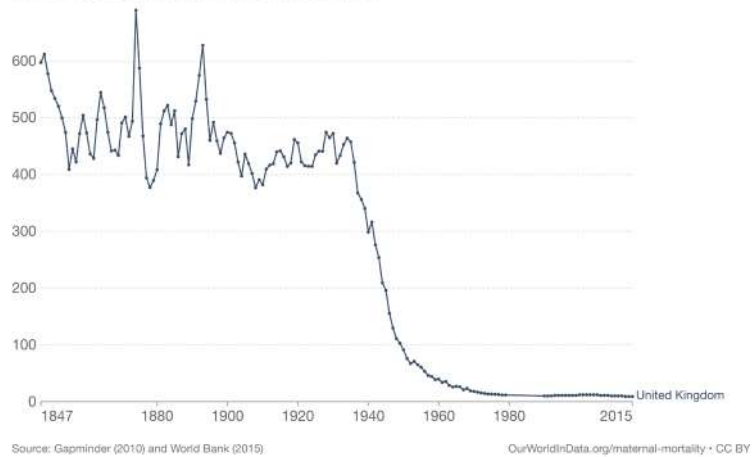
Graphique 2 : Évolution de l'espérance de vie dans le monde depuis 1770

Source : OWID



Maternal Mortality Ratio, 1847 to 2015

The maternal mortality ratio is the number of women who die from pregnancy-related causes while pregnant or within 42 days of pregnancy termination per 100,000 live births.



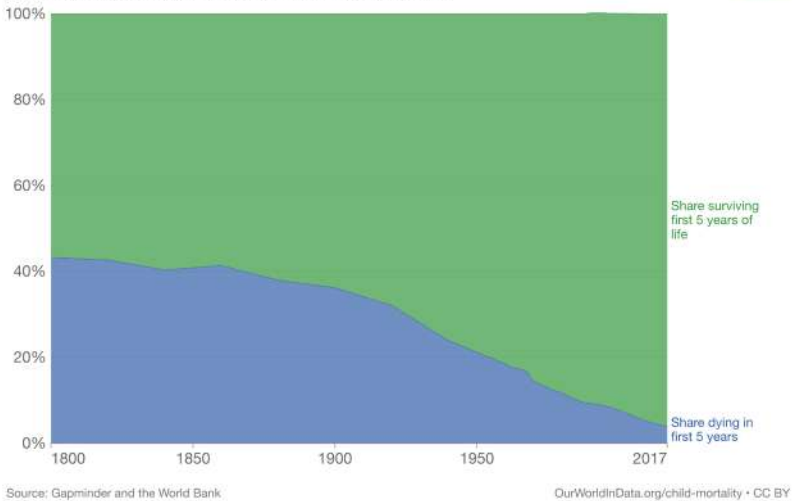
Graphique 3 : Évolution du taux de mortalité en couches en Angleterre pour 100 000 naissances depuis 1850

Source : OWID

Lecture : En 1850 au Royaume-Uni, il y avait 500 décès de la mère en couches pour 100 000 naissances, soit un décès toutes les 200 naissances.

Global child mortality

Share of the world population dying and surviving the first 5 years of life.



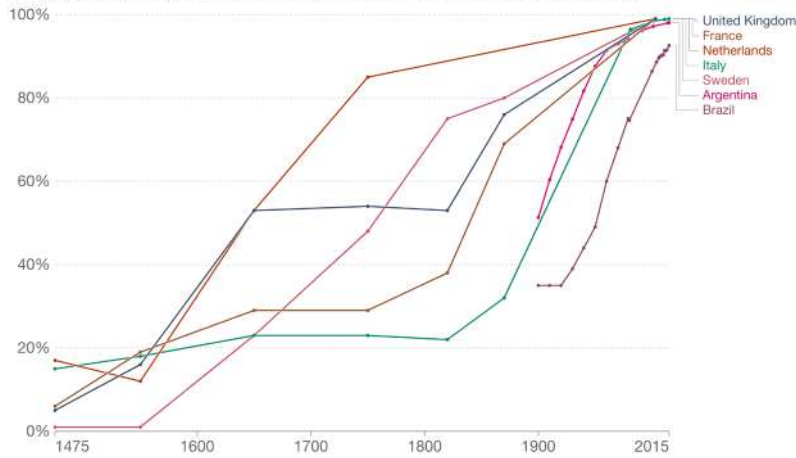
Graphique 4 : Évolution du taux mondial de mortalité infantile (avant 5 ans) depuis 1800

Source : OWID



Literacy rate, 1475 to 2015

Estimates correspond to the share of the population older than 14 years that is able to read and write.



Source: WDI, CIA World Factbook, & other sources
OurWorldInData.org/literacy • CC BY
Note: Specific definitions and measurement methodologies vary across countries and time. See the 'Sources'-tab for more details.

Graphique 5 : Évolution des taux d'alphabétisation dans 7 pays du monde depuis 1500

Source : OWID

Lecture : En 1750 aux Pays-Bas (Netherlands), près de 85% de la population savait lire et écrire.

Pendant des siècles, la population mondiale a stagné, ainsi que les niveaux de vie, et brusquement tout explose ! C'est ce qu'on voit sur le graphique 1. Notez que la courbe rouge montre le PIB *par habitant* ! Pour obtenir le PIB global il faut multiplier les deux courbes, et le décollage serait encore plus remarquable.

N'est pas moins impressionnante la considérable amélioration de l'espérance de vie (graphique 2), en partie grâce à la baisse de la mortalité en couches et de la mortalité infantile (graphiques 3 et 4). Ces améliorations se reflètent aussi dans le taux d'alphabétisation (graphique

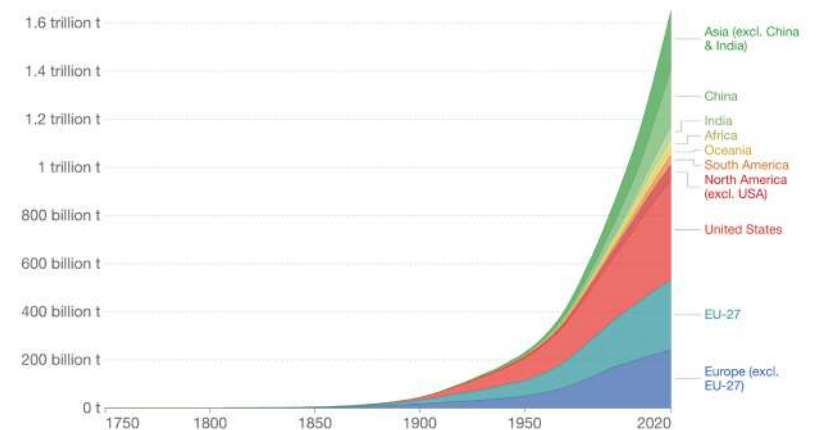
5), qui décolle dans les pays européens à partir de la deuxième moitié du 16^{ème} siècle.

En 1800, sur dix bébés nés vivant en France, quatre mouraient avant cinq ans. On imagine les conséquences de ces chiffres sur la vie des femmes : on multipliait les naissances pour pallier la mortalité infantile, et chaque accouchement mettait en péril la vie de la mère. C'est ce que montre le graphique 3 : jusqu'en 1940 en Angleterre, plus de 4 accouchements sur 1000 se terminaient par la mort de la mère.

Le visage des sociétés européennes a donc visiblement et profondément changé, suivi progressivement des autres pays du globe. Et pendant ce temps-là...

Cumulative CO₂ emissions by world region

Cumulative carbon dioxide (CO₂) emissions by region from the year 1750 onwards. Emissions are based on territorial emissions (production-based) and do not account for emissions embedded in trade. This measures CO₂ emissions from fossil fuels and cement production only – land use change is not included.



Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Graphique 6 : Évolution des émissions de CO₂ cumulées dans le monde depuis 1800

Source : OWID

Lecture : En 2017, le stock cumulé de CO₂ émis sur le territoire des pays de l'Union Européenne (EU-28) atteignait environ 350 milliards de tonnes.

Pendant ce temps-là, les émissions de CO₂ décollent. La répartition des émissions par pays est instructive. Le premier émetteur, et même le seul pendant longtemps, est le Royaume-Uni. A la fin du 19^{ème} siècle, il est rejoint par les États-Unis, qui deviennent prépondérants durant tout le 20^{ème} siècle. Après 1950, les émissions des États-Unis et des pays européens augmentent de manière exponentielle, et ils sont rejoints par d'autres, comme la Russie, l'Inde et la Chine.

Au bilan, les émissions mondiales cumulées passent d'à peu près rien en 1800 à plus de 200 milliards en 1950, puis explosent jusqu'à 1 580 milliards de tonnes cumulées en 2017. Pendant les 70 ans qui ont suivi 1950, en l'espace d'une vie humaine, on a donc émis 7 fois plus de CO₂ que pendant les 150 ans qui ont précédé. C'est ce qu'on peut appeler une phase d'accélération, et elle est visible sur d'autres indicateurs, comme la population mondiale, qui passe de 2,58 milliards en 1950 à 7,71 en 2019. Elle justifie que nous séparions notre étude en deux parties : avant et après 1950.

Le reste du cours va brosser l'histoire économique, politique et idéologique qui se cache derrière ces courbes. Il ne s'agira pas de tout raconter, bien sûr, mais de mettre en relief les facteurs-clés du développement de nos sociétés qui expliquent les bouleversements environnementaux que nous rencontrons aujourd'hui.

Résumé

- ♦ Les conditions de vie humaine ont profondément changé depuis le 16^{ème} siècle, dans les pays européens et progressivement dans les autres pays du monde.
- ♦ Ces changements sont notamment caractérisés par un allongement considérable de la durée de vie et une explosion de la population mondiale.
- ♦ Les émissions de CO₂ ont suivi une évolution parallèle, aussi bien au niveau mondial que par pays.



2

1500 – 1800 : l'essor de l'Europe et les premiers systèmes industriels

Pourquoi remonter en 1500 ? Parce qu'à lieu le premier changement majeur dans l'organisation mondiale de la production et du pouvoir qui nous intéresse : la création de marchés mondialisés par les pays européens, grâce auxquels ils commercialisent certaines denrées comme le sucre et le coton, produites dans les nouvelles colonies américaines, transformées en Europe et distribuées partout dans le monde. Mais pour produire des marchandises et les distribuer, il faut de l'énergie. D'où des circuits commerciaux plus complexes : on va chercher l'énergie à sa source, on la transporte aux lieux de production, puis on transporte la matière première en Europe pour transformation, et enfin on distribue le produit fini de par le monde, à la faveur d'un marché mondialisé. Quelle a été la source d'énergie disponible avant la révolution industrielle ? L'esclavage, utilisé pour extraire l'or et l'argent des mines américaines et pour produire le sucre et le coton. C'est bien l'esclavage qui a structuré les échanges commerciaux en Atlantique pendant les trois siècles et demi qui ont séparé la découverte de l'Amérique et la révolution industrielle.

2.1. L'expansion européenne vers les Amériques et l'esclavage de masse

En 1492, Christophe Colomb débarque aux Antilles, dont il prend possession au nom de la reine Isabelle de Castille. Les Européens, Espagnols et Portugais d'abord, Français et Britanniques ensuite, vont conquérir et exploiter ce qu'ils appellent le « nouveau » continent.

Le schéma d'exploitation est inédit à plus d'un égard. D'abord parce que l'arrivée des colons entraîne la disparition des sociétés amérindiennes et le dépeuplement du continent, par les maladies importées ou par l'action militaire.² Ensuite parce que ces colons vont mettre en place, sur ces terres qu'ils s'approprient, une organisation complexe articulant de multiples étapes de production, d'investissements financiers et d'échanges commerciaux à l'échelle de plusieurs continents. Enfin, parce que ces échanges sont destinés à satisfaire de nouveaux besoins, à commencer par le sucre.

² — Voir notamment Pierre Clastres *La société contre l'état* (1974), ou l'article https://en.wikipedia.org/wiki/Population_history_of_indigenous_peoples_of_the_Americas. On estime que la population de l'Amérique, qui se situait entre 50 et 100 millions d'habitants en 1500, serait tombée à moins de 5 millions en un siècle. Certains historiens voient dans le petit âge glaciaire qui affecte l'Europe au 16^{ème} siècle la conséquence du dépeuplement de l'Amérique : la disparition des amérindiens aurait entraîné la disparition des champs cultivés au profit de la forêt, dont la croissance aurait absorbé le CO₂ atmosphérique et entraîné une baisse significative des températures. Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Petit_%C3%A2ge_glaciaire

Le sucre³

Au Moyen Âge, le sucre est encore un produit de luxe en Europe, importé d'Orient. En 1226, le roi Henri III d'Angleterre demande au maire de Winchester s'il serait possible de lui procurer 3 livres de sucre pendant la grande foire annuelle. Mais la colonisation de Madère par les Portugais et l'implantation par ceux-ci d'une véritable industrie de la canne à sucre change la donne. De produit de luxe, le sucre devient un produit de consommation courante. Durant le 16^{ème} siècle, il se banalise, et la consommation par tête en Grande-Bretagne passe de 5 à 25 livres par personne au cours du 17^{ème} siècle. Les ressources de Madère, en bois notamment, sont épuisées, et la production se déplace vers le Nouveau Monde.

La canne à sucre n'est pas une plante américaine : il faut l'implanter, quitte à remplacer les espèces végétales locales, les cultures vivrières⁴ et les équilibres naturels associés. La production de sucre nécessite quant à elle énormément de main d'œuvre et d'eau pour l'irrigation et du bois pour faire distiller le sirop. On met alors en place les premiers processus industriels : suites de différentes étapes de production requérant d'investir un capital initial conséquent et de diviser le travail. La rationalisation de ce processus conduit à l'invention des plantations, grandes propriétés consacrées à la monoculture et organisées comme le seront les futures usines.

Comme les plantes, la main d'œuvre est importée : ce sont les esclaves. En 1800 il y a 500 000 esclaves à Saint-Domingue, et on y produit 80 000 tonnes de sucre par an. C'est le fameux commerce triangulaire, auquel participent les grands ports de Liverpool ou de Nantes dont les navires vont chercher les esclaves en Afrique, traversent l'Atlantique pour les vendre aux planteurs d'Amérique, et reviennent en Europe chargés de sucre. L'industrie du sucre apparaît ainsi comme le berceau du capitalisme moderne, car on y voit pour la première fois ses principes fondateurs à l'œuvre : importance du capital investi et division du travail dans un cadre d'échanges mondialisés.

Résumé

- ♦ 1500 marque le début de la domination de l'Europe sur l'ordre mondial dans les champs militaires, politiques et économiques.
- ♦ Les matières premières qui intéressent les Européens, sucre puis coton, remplacent les anciennes cultures vivrières et sont produites dans des plantations, avant d'être transportées en Europe où elles seront transformées et commercialisées.
- ♦ Le sucre est le produit emblématique du modèle émergent : un système de production industriel de nouveaux biens de consommation pour l'Europe, organisé et rationalisé à l'échelle de plusieurs continents.
- ♦ Ce modèle repose sur l'exploitation des esclaves transportés d'Afrique et des terres amérindiennes, quitte à supprimer les cultures et écosystèmes locaux, naturels ou sociaux.

2.2. En route vers l'exponentielle

Au terme de cette première séquence, vous auriez raison de vous interroger. Certes, certaines caractéristiques de ce système économique et politique se rapprochent du monde moderne que nous connaissons. Mais nous n'y sommes pas encore, et la consommation de sucre n'aurait pas suffi à elle seule à doubler l'espérance de vie en Europe. Que s'est-il passé ?

³ — Le lecteur intéressé pourra se reporter à Patel & Moore *A History of the World in Seven Cheap Things*, (2018), ch. 3

⁴ — Cultures locales dont vivent les populations locales.



Cette interrogation avait été portée et formalisée à la fin du 17^{ème} siècle par un pasteur et économiste anglais Thomas Malthus qui s'opposait aux *Poor Laws*, systèmes d'assistance publique aux plus pauvres. Son *Essai sur le Principe de Population* (1798) est une référence classique dans l'histoire de la pensée économique car il pose avec simplicité la question suivante : qu'est-ce qui détermine et limite la croissance d'une population ? Sa réponse a aussi le mérite de la clarté : les ressources alimentaires à disposition. Pour Malthus, la croissance de la population ne peut venir que d'une augmentation des rendements alimentaires des terres existantes ou de l'exploitation de nouvelles terres.

Cette réponse semble de bon sens à l'aune des siècles précédents, et rend inenvisageable toute augmentation exponentielle de la population. Avec des terres finies, la production alimentaire ne pourrait pas suivre. Tout dépassement du niveau d'équilibre de la population serait stoppé, soit directement par des épisodes de famine ou de malnutrition, soit indirectement parce que la société limiterait sa propre croissance en retardant l'âge du mariage ou en utilisant la contraception. Dans les deux cas, cela entraînerait un retour à une population moins nombreuse. Selon ce raisonnement, il n'y a donc pas d'équilibre social possible où la population perçoit un surplus matériel qui lui permet de croître et où les travailleurs sont payés au-delà du minimum vital. D'où l'opposition de Malthus aux *Poor Laws* : accorder une aide aux pauvres ne fait, au mieux, que retarder une échéance inévitable, et, au pire, aggrave la situation, car ceux-ci sont ainsi encouragés à fonder une famille, et leurs enfants iront grossir le nombre d'indigents qu'il faudra soutenir !

Toute l'évolution ultérieure de l'économie mondiale va contredire les idées de Malthus : la population humaine a augmenté de manière exponentielle sans rencontrer de limites, et les travailleurs des pays européens ont vu leur niveau de vie augmenter bien au-delà du minimum vital. Plutôt que sur la seule agriculture traditionnelle tirée par l'énergie de flux qu'est l'énergie solaire, le développement depuis 1850 est basé sur l'exploitation des énergies de stock, réserves extraordinaires

concentrées et accumulées sur Terre pendant des centaines de millions d'années : charbon puis pétrole. Ces énergies vont, entre autres, permettre de transformer l'agriculture en véritable industrie reposant sur l'utilisation systématique des machines, des engrais et des pesticides. Parallèlement, les systèmes économiques, juridiques et idéologiques se sont modifiés, accélérant le développement des techniques basées sur ces nouvelles sources d'énergie et leur contribution à l'amélioration des conditions de vie. C'est ce que nous allons voir plus en détail dans les sections qui suivent.

Résumé

- ♦ Selon Malthus, il n'est pas possible que la population croisse durablement car elle est contrainte par les terres disponibles et la productivité agricole, qui sont limitées.
- ♦ Le problème de l'alimentation a été résolu d'une manière que Malthus ne pouvait pas prévoir : découverte et exploitation des énergies de stock, et transformations concomitantes des systèmes économiques, juridiques et idéologiques.

2.3. La mise en valeur de la nature

Une discipline de pensée va prendre une place particulière dans les évolutions idéologiques qui accompagnent cette première réorganisation du monde : c'est l'économie, la « science lugubre »⁵ chargée de répartir la rareté, comme Malthus avait commencé à le concevoir. Caractéristique de la science économique émergente : la nature y est considérée comme une somme de ressources disponibles à l'usage de l'homme. L'économiste français Jean-Baptiste Say en est un porte-parole éloquent. Dans son cours de 1828, il écrit : « Les richesses naturelles sont inépuisables car sans cela nous ne les obtiendrions pas

5 — “The dismal science”, comme l'a nommée l'historien écossais Thomas Carlyle au 19^{ème} siècle.



gratuitement. Ne pouvant être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques ».

Avant 1500, le principal problème des États était de nourrir les populations : l'immense majorité de celles-ci étaient rurales, et ces civilisations paysannes se savaient dépendantes d'une nature souvent avare et parfois hostile. Dès ses débuts, l'économie proclame au contraire l'autonomie de l'activité humaine, qui s'affranchit de la vieille sujétion à la nature. Cette dernière n'est plus un partenaire incommode et difficile : c'est une friche à mettre en valeur, une mine de ressources inépuisables à exploiter.

La civilisation occidentale introduit ici l'idée nouvelle qu'il faut « mettre en valeur » la nature. Cela revient à agir pour conférer une valeur que la nature n'a pas en elle-même, au contraire des visions portées par exemple par les civilisations traditionnelles chinoise ou japonaise où la nature a une valeur intrinsèque. Descartes, dans le *Discours de la Méthode* (1637), invitait à utiliser les découvertes scientifiques pour « nous rendre comme maîtres et possesseurs de la nature », notamment pour la « conservation de la santé ».

Dans son *Traité du gouvernement civil* (1690), le philosophe John Locke écrit à son tour qu'« un lopin de terre, dans l'Amérique encore vierge, alors même qu'il serait tout aussi fertile qu'un lopin comparable en Angleterre, vaudrait mille fois moins, si nous calculions tout le profit qu'en recevrait un Indien si on l'évaluait et le vendait sur place ». La conclusion, dans son esprit, est claire : il faut mettre en valeur l'Amérique jusqu'à ce que deux terres analogues puissent rapporter la même chose et donc valoir le même prix. Les systèmes de propriété, notamment foncière, doivent aider à optimiser cette exploitation. La plupart des conditions naturelles (eau, air, biodiversité...) indispensables à la vie humaine ne sont pas prises en compte dans ces approches : ce sont des facteurs de production gratuits !

Résumé

- ♦ La culture occidentale, influencée par la science économique émergente, transforme son rapport à la nature au tournant du 16^{ème} siècle.
- ♦ Celle-ci est vue comme un gisement de ressources gratuites sans valeur intrinsèque, sur lesquelles on peut et on doit agir pour en maximiser la valeur économique.

2.4. Un discours moralisateur

« Mettre en valeur » la nature, c'est la mettre à notre service. Pour un chrétien, c'est aussi se conformer à l'injonction biblique adressée à Adam : « Soyez féconds et multipliez-vous, remplissez la terre et soumettez-la. Soyez les maîtres des poissons de la mer, des oiseaux du ciel, et de tous les animaux qui vont et viennent sur la terre » (Genèse, 1.28).

Pour Locke, et pour les héritiers du christianisme, mettre en valeur la nature est donc un véritable devoir moral. Ne pas le faire, c'est-à-dire ne pas exploiter jusqu'au bout les possibilités offertes à l'ingéniosité humaine par l'exploitation des ressources naturelles, c'est faire preuve de paresse, et en définitive pécher contre Dieu qui a les a mises à notre disposition. Cela ne vous surprendra pas qu'Adam Smith, père de la théorie économique moderne et célèbre pour son livre sur *La richesse des nations* (1776), ait écrit d'abord une *Théorie des sentiments moraux* (1759).

C'est ensuite dans *La richesse des nations* que l'on trouve décrite pour la première fois la fameuse « main invisible » du marché, censée faire converger les égoïsmes individuels motivés par le profit vers le bien-être collectif. Dans une formule célèbre, Smith écrit que « ce n'est pas de la bienveillance du boucher, du boulanger ou du brasseur que nous attendons notre dîner, mais de l'attention qu'ils portent à leur propre intérêt. Nous nous adressons non à leur humanité mais à leur égoïsme, et nous ne leur parlons jamais de nos besoins mais de leur avantage ». Smith opère ici une séparation radicale entre les activités marchandes



où l'appât du gain est la seule règle qui tienne, et le reste des activités humaines où bienveillance et autres sentiments moraux trouvent leur place. On peut se permettre d'être généreux et compatissant, mais cela n'a pas sa place en affaires !

Que reste-t-il alors, une fois évacués de la sphère économique les sentiments moraux ? Il reste « la propension à troquer, marchander et échanger », qui, d'après Smith, « est commune à tous les hommes et ne se rencontre dans aucune autre espèce animale ». Elle suffit selon lui à fonder l'harmonie universelle, grâce à une institution nouvelle, le marché, dont la « main invisible » accordera miraculeusement les intérêts des uns et des autres, à condition qu'on lui laisse le champ libre. Il est important de noter ici qu'aucun anthropologue ni aucun psychologue n'a trouvé trace de cette propension « naturelle » à troquer. Le ressort commun des échanges dans les sociétés primitives semble bien plutôt être le don et le contre-don : je te donne quelque chose aujourd'hui, je n'attends rien en échange immédiatement, mais nous restons en relation, et pour que cette relation continue dans la durée, il faudra que tu me rendes la pareille un jour pas trop lointain.

Pourtant l'image s'impose, et la recherche du gain sera considérée par beaucoup comme la motivation principale, sinon unique, des individus dans le champ économique, à laquelle il est utile de donner libre cours. Tout au long du 19^{ème} siècle, la Grande-Bretagne s'ingéniera ainsi à créer de toutes pièces un cadre réglementaire et un marché fonctionnant suivant les principes d'Adam Smith.

Résumé

- ♦ La science économique s'élabore en s'appuyant sur un cadre moral, ancré dans la culture bourgeoise européenne du 18^{ème} siècle.
- ♦ Adam Smith, figure influente de la science émergente, introduit une séparation entre la vie des affaires, où l'on se doit de rechercher le gain sans état d'âme, et la vie privée, où l'on peut se permettre d'être généreux et compatissant.
- ♦ Selon Smith, c'est en recherchant leur profit individuel maximum que les individus contribuent le mieux au bien-être de tous.



3

1800 – 1950 : la révolution du charbon

3.1. Une source d'énergie pour actionner les machines

À partir de 1800, apparaît une nouvelle source d'énergie : le charbon. Le charbon était exploité depuis longtemps, notamment pour le chauffage et la métallurgie, en concurrence avec le bois. Mais l'épuisement des forêts crée des besoins nouveaux, et encourage l'exploitation systématique des mines de charbon. Les premières machines à vapeur sont justement inventées pour extraire l'eau qui s'infiltrait dans les galeries des mines. Ce n'est qu'à mesure que leurs rendements s'améliorent qu'on a pu employer ces machines à d'autres usages, et les lancer sur les rails, puis sur les navires.



Une locomotive 140 C et son tender

Source : Wikipedia⁶

Lecture : Ce type de locomotive a été utilisé par la SNCF, compagnie de chemins de fer française, entre 1920 et 1950. On notera la présence, derrière la locomotive, du tender, wagon spécial qui transporte le charbon et l'eau nécessaires au fonctionnement de la machine. Dans l'habitacle, deux personnages, le mécanicien et le chauffeur, ce dernier pelletant le charbon dans la chaudière.

Le 19^{ème} siècle est le siècle de la Grande-Bretagne, où les mines de charbon sont faciles à exploiter et près des ports, rendant le charbon acheminable par transport maritime. La flotte marchande mondiale passe de 9 millions de tonnes en 1850 à 35 en 1900, dont 60 % sous pavillon britannique.

6 — <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47094072>

Les lignes maritimes structurent le monde : c'est l'époque des grands empires coloniaux, anglais et français, drainant les ressources du monde vers l'Europe, et les redistribuant sous forme de produits finis. Le chemin de fer structure les nations : en 1869 la ligne transcontinentale relie la côte Est des États-Unis à la côte Ouest, et en 1916 le transsibérien relie Moscou à Vladivostok. Le réseau ferré mondial passe de 100 000 km en 1860 à 1 000 000 en 1920. Pour donner une idée des capacités de transport atteintes, notons qu'en quinze jours, entre le 2 et le 17 août 1914, l'Allemagne transporte plus de trois millions d'hommes sur ses frontières, avec leur équipement, leur cavalerie, et leur artillerie.

La Grande-Bretagne, l'Inde et le coton

A partir du 17^{ème} siècle, le coton commence à concurrencer la laine en Europe. L'Inde et son climat ensoleillé alternant saisons sèche et humide en est le principal producteur et transformateur. À telle enseigne qu'en 1724 la Grande-Bretagne instaure des droits de douane contre les tissus indiens pour en ralentir l'importation et développer sa propre industrie textile. La machine à vapeur de Watt (1769) permet alors d'actionner des fileuses mécaniques, et la filature de coton (« *cotton mill* ») devient le prototype de l'usine moderne, autour de laquelle se constituent des quartiers ouvriers qui vivent dans des conditions misérables. Au début du 19^{ème} siècle, les cotonnades (tissus en coton) représentent 42 % des exportations britanniques.

La conquête de l'Inde à partir de 1757 assure à l'industrie britannique un marché captif : l'industrie textile locale disparaît, et l'Inde n'a plus pour seul rôle que de produire du coton brut. Les industriels britanniques imposent même que les variétés de coton locales soient remplacées par du coton américain, plus solide, mais plus gourmand en eau et épuisant les sols beaucoup plus vite. Les vêtements en coton annoncent aussi un nouveau rapport à la consommation matérielle : il s'agit d'objets jetables, dont on pourra changer plusieurs fois au cours de sa vie, chose impensable pour un paysan anglais deux cents ans plus tôt.

La réorganisation économique entre l'Inde et la Grande-Bretagne autour du coton est caractéristique du nouvel ordre mondial. Mise sous tutelle politique, l'Inde ne produit plus que la matière première, et c'est la Grande-Bretagne qui tire l'essentiel de la valeur ajoutée en la transformant et en adaptant le cadre juridique des échanges. Et malgré les avantages comparatifs initiaux de l'Inde, deux cents ans plus tard, la Grande-Bretagne a pris une avance industrielle, économique et politique considérable, qui n'est plus guère rattrapable.

Au sein des pays industrialisés, le progrès technique transforme profondément les modes de vie. Citons deux exemples : la généralisation de l'éclairage public et des horloges. Pendant des siècles, les humains se sont levés et couchés avec le soleil : on ne pouvait guère travailler dans l'obscurité, et ni les chandelles ni les bougies ne fournissaient un éclairage suffisant. Tout cela change avec la révolution industrielle. En 1817, Bruxelles sera la première ville au monde dont les rues seront éclairées la nuit, grâce au « gaz de ville », produit à partir du charbon. Les allumeurs de réverbères passent tous les soirs pour les allumer et tous les matins pour les éteindre. A partir de 1850, les réverbères seront éclairés au pétrole, et à partir de 1870 à l'électricité (plus besoin d'allumeurs). Dans les maisons, l'éclairage se généralise également, grâce aux lampes à huile. L'huile de baleine, fabriquée à partir de leur graisse, est la meilleure, celle qui fume le moins, et c'est donc pour éclairer les maisons que l'on chasse les baleines sur toutes les mers du globe. Heureusement pour les baleines, on découvre que le pétrole, convenablement distillé (« pétrole lampant »), éclaire encore mieux ! On peut dire que le pétrole a sauvé les baleines, avant qu'on ne lui trouve beaucoup d'autres usages.





L'allumeur de réverbères

Source : <https://i.pinimg.com/originals/e5/de/38/e5de38a2aaa7f1b1d53ca830864c-35ce.jpg>

Grâce aux progrès de l'éclairage, les hommes sont désormais capables de travailler la nuit. Dans les usines qui apparaissent avec la révolution industrielle, les propriétaires imposent de travailler à heure fixe, indépendamment du lever ou du coucher du soleil. Les horaires font désormais partie du contrat de travail, ce qui est une nouveauté. Dorénavant on ne payera plus les ouvriers à la tâche, mais à l'heure. C'est le travail salarié, qui est la forme la plus répandue du travail dans nos sociétés industrielles, mais qui est en fait une nouveauté, et qui n'aurait pas été possible sans une autre invention : l'horloge. Dorénavant, lire l'heure au soleil ne suffit pas, il faut « savoir l'heure » pour aller au tra-

vail et en repartir ! En même temps que l'éclairage public, on voit donc se généraliser les horloges publiques, en général sur les mairies et sur les gares, et les cloches de l'église ou la sirène de l'usine annoncent l'heure qu'il est.

L'utilisation du charbon et l'amélioration des moteurs fournissent le surplus matériel que Malthus n'attendait pas, auquel viennent s'ajouter la mise en place de systèmes de santé et d'hygiène publiques, ainsi que les progrès de la médecine et du droit du travail. Les nouvelles usines demandent des ouvriers et le 19ème siècle est celui d'un exode rural massif dans les pays européens. Des systèmes de santé et d'hygiène publics sont créés dans les villes insalubres dont la population a explosé. C'est l'heure du tout-à-l'égout à Londres, une révolution sanitaire autant qu'olfactive ! En 1858 encore, les chaleurs estivales avaient fait remonter de la Tamise les odeurs nauséabondes des excréments humains et des déchets industriels, au point qu'on y cherchait l'origine des dernières épidémies de choléra et que les parlementaires eux-mêmes n'avaient pu tenir séance ! Construire une infrastructure aussi importante qu'un système d'égouts impliquait de creuser en profondeur, démolir au besoin, travailler le fer, ... autant de choses que rendait justement réalisables la puissance des nouvelles machines à vapeur.





Illustration du magazine Punch, juillet 1858

Source : Wikipedia « The Great Sink » (https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Stink)

Lecture : Un ouvrier utilise de la chaux pour masquer l'odeur de la Tamise. En effet, les rideaux du Parlement anglais étaient imbibés de chlorure de chaux pour essayer de masquer l'odeur.

Résumé

- ✦ Le charbon permet une nouvelle révolution industrielle, dans laquelle le Royaume-Uni est pionnier.
- ✦ Le produit emblématique est le coton : produit en Inde mais transformé au Royaume-Uni, à des conditions commerciales qui avantageaient largement ce dernier, a fortiori une fois l'Inde devenue colonie britannique.
- ✦ De nouveaux systèmes sociaux, réglementations et infrastructures publiques sont créés, améliorant progressivement les mauvaises conditions de vie des populations urbaines et ouvrières.

3.2. Transformation des institutions

Le 19^{ème} siècle voit ainsi exploser le commerce international, y compris sur les ressources alimentaires. Le grain est importé en Angleterre depuis l'Amérique du Nord, et même d'Australie. Si le parlement anglais rehausse en 1815 les taxes sur les céréales importées pour protéger son agriculture (*Corn Laws*), il prend la décision inverse quarante ans plus tard et lève les barrières douanières. Suivant les principes d'Adam Smith, et de son successeur économiste David Ricardo, il fait le pari des exportations industrielles et des « avantages comparatifs » : importer les ressources alimentaires moins chères de l'étranger, quitte à perdre son autosuffisance alimentaire et appauvrir, au moins à court terme, les travailleurs agricoles. En contrepartie, puisque les prix de la nourriture sont bas, les salaires ouvriers peuvent être maintenus bas, donc compétitifs, et on peut valoriser à l'export les produits industrialisés à plus forte valeur ajoutée.

Le nouvel ordre mondial est imagé dans la peinture suivante, installée en 1778 dans les locaux de la *East India Company*, entreprise qui détenait le monopole du commerce britannique avec l'Inde. Elle représente Britannia (le Royaume-Uni personnifié) en position élevée, recevant les tributs de l'Inde (une couronne entourée de rubis et de perles) et de la Chine (des porcelaines et du thé), pendant qu'une troupe de coolies portant des ballots de marchandise s'avance vers elle sous la houlette de Mercure, dieu du commerce. Et quant au vieillard barbu du premier plan, vous l'avez déjà vu : c'est Old Father Thames, la Tamise ! Ce tableau illustre bien les rapports de domination sous-tendant le nouveau système économique.





The East offering her riches to Britannia

Source : <https://greatgameindia.com/the-east-offering-her-riches-to-britannia/>

L'ensemble du droit se transforme pour soutenir ce nouveau système économique et géopolitique. À l'échelle mondiale, la Grande-Bretagne cherche à supprimer les barrières douanières et les obstacles institutionnels qui limitent l'accès aux ressources naturelles, de manière à en créer un marché mondialisé. À l'échelle nationale, les *Enclosure Laws* privatisent les terres communales anglaises, auparavant gérées en commun par les habitants locaux, comme l'a décrit l'économiste Karl Polanyi dans *La Grande Transformation* (1944).

La propriété privée

L'évolution du droit et des institutions accompagne toujours l'évolution des idées et de la société. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, la propriété privée apparaît comme un droit fondamental, et les hommes se définissent, non plus par ce qu'ils sont, mais par ce qu'ils possèdent. Voici l'article 2 de la Déclaration des Droits de l'Homme de 1789, texte fondateur tiré de la Révolution Française et marqué par les origines bourgeoises du mouvement : « Le but de toute association politique est la conservation des droits naturels et imprescriptibles de l'Homme. Ces droits sont la liberté, la propriété, la sûreté, et la résistance à l'oppression ». Notez que la propriété vient après la liberté, mais avant la sûreté !

C'est extraordinairement nouveau par rapport aux sociétés antérieures, du Moyen Âge par exemple, dans lesquelles la terre ne peut appartenir qu'à la collectivité, représentée ou incarnée par le souverain. Le serf ne possédait pas la terre qu'il cultivait, pas plus que le seigneur ne possédait son fief (en 1523 en France, le roi François 1er confisqua pour trahison toutes les terres du connétable de Bourbon !). À la place de la propriété foncière telle que nous la concevons aujourd'hui prévalait un réseau de droits différenciés autour de la terre. Ainsi, en Angleterre, la Charte des Forêts de 1215 accordait à tous les hommes libres du royaume qui n'avaient pas de propriété personnelle l'accès libre aux forêts et l'usage de ce qu'elles produisaient : bois, gibier, eau, fruits. La même charte interdisait de clôturer les terres cultivées, afin que puissent s'exercer au bénéfice d'autrui des droits multiples, comme celui de faire paître le bétail sur la terre une fois la récolte enlevée.

L'histoire rurale de l'Angleterre à partir du 15^{ème} siècle est celle d'une longue régression de ces droits collectifs au profit d'une conception exclusive de la propriété privée. L'industrie du drap est prospère, et les commerçants cherchent des terres pour faire paître leurs moutons. Ils obtiennent du Parlement des « *enclosure acts* », ⁷ édits imposant la clôture des terres et la disparition des droits collectifs. Le mouvement se poursuivra jusqu'à la disparition totale de ces droits, vers 1830. Le dispositif législatif est complété par des lois très répressives contre le vagabondage, ⁸ qui expulsent les personnes qui ne peuvent pas démontrer de moyens d'existence. Les pauvres des campagnes se trouvent donc chassés vers les villes, où ils rencontrent une nouvelle réalité : le travail salarié.

Le travail salarié ⁹

Le travail salarié date de la révolution industrielle. Dans toutes les sociétés antérieures, l'artisan est payé à la pièce et le paysan vit de sa récolte. Nul, sinon eux-mêmes, ne dispose de leur temps. Leur travail, d'ailleurs, ne se distingue guère de la vie de famille : l'artisan travaille chez lui, bien souvent en famille, et la ferme n'est jamais loin des bêtes et des champs. Il y a bien des gens qui ne sont pas maîtres de leur temps, et que l'on surveille pour vérifier qu'ils ne le perdent pas, mais ce sont des esclaves : on les emploie dans les mines ou dans les plantations, et ils sont séparés de leur famille.

Dans les usines qui se créent en Angleterre, hommes, femmes et enfants sont au contraire payés à l'heure et travaillent à heure fixe. Ils pointent à l'usine ou à la mine le matin, et rentrent le soir dans leurs taudis. Leur condition s'améliorera avec le temps, mais ce qui ne changera pas, c'est la forme du travail. Celui-ci n'est plus quelque chose qui fait intimement partie de la vie, et qui implique toute la famille, mais quelque chose que l'on fait hors de chez soi et du cadre familial, et qu'on ne fait que pour subvenir à ses besoins. La vraie vie commence quand on rentre chez soi ou, au siècle suivant, quand on part en vacances. La dissociation entre la nature et l'homme, caractéristique de la modernité européenne, se traduit finalement par une dissociation au sein même de l'individu, entre le travail qu'il effectue et sa vie personnelle. Le professionnel ne doit pas laisser transparaître l'individu, avec ses qualités et ses défauts, ses sentiments et ses opinions : bref, tout ce qui est important pour lui et le rend différent des autres.

La révolution industrielle et la constitution d'un marché mondial pour exploiter les ressources naturelles et écouler les produits fabriqués a nécessité des quantités immenses de capitaux. Il fallait de l'argent pour construire les voies ferrées, les flottes commerciales et militaires, les usines et les machines. Si ces capitaux ont pu être rassemblés et consacrés aux investissements, c'est grâce à une innovation juridique qui a fondamentalement changé le monde de l'entreprise : l'invention de la « SARL », société par actions à responsabilité limitée (joint stock company limited en anglais). Jusqu'au 19^{ème} siècle, les entreprises commerciales étaient sous un régime légal proche de la propriété privée : le propriétaire de l'entreprise était responsable des dommages causés par celle-ci, et les diverses formes d'actionariat qui existaient déjà consistaient à partager entre actionnaires les droits et les responsabilités.

Cela change au cours du 19^{ème} siècle, où l'actionnaire n'est plus propriétaire que de ses actions, et où sa responsabilité s'arrête au prix de celles-ci : le pire qui puisse lui arriver, c'est qu'elles ne valent plus rien. Cette décharge de responsabilité a beaucoup contribué à attirer les capitaux privés dans les entreprises les plus risquées. Dans

⁷ — Voir Polanyi (op. cit.) ou Wikipedia : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47094072>

⁸ — Voir <https://en.wikipedia.org/wiki/Vagrancy>

⁹ — Pour en savoir plus, voir David Graeber, *Bullshit Jobs* (2018), p. 84-92, ou Patel&Moore *A History of the World in Seven Cheap Things*, (2018), ch. 3.

les grandes catastrophes industrielles contemporaines, que ce soit la catastrophe de Bhopal en 1984 ou l'accident nucléaire de Fukushima en 2011¹⁰, les actionnaires ne pâtissent que dans la mesure où leurs actions perdent de la valeur, alors que s'ils étaient propriétaires de l'entreprise, ils seraient responsables sur leurs deniers propres et risqueraient par exemple la prison pour de tels accidents. Cela encourage les investissements risqués : qui investirait dans le nucléaire s'il fallait dédommager les victimes d'un accident ? Mais en contrepartie, le risque pris par la collectivité n'est pas pris ou peu en charge : au pire, on liquide la compagnie responsable, ce qui signifie que l'indemnisation est limitée à la valeur de celle-ci. Que vaut aujourd'hui TEPCO en comparaison des dommages causés par l'accident de Fukushima ?¹¹

Le 19^{ème} siècle est marqué par un autre changement qu'il est important de mentionner : l'abolition de l'esclavage, de part et d'autre de l'Atlantique. En parallèle de protestations des communautés d'esclaves (dont l'épisode le plus abouti fut la révolte des esclaves de la colonie française Saint Domingue), les sociétés abolitionnistes, souvent d'inspiration religieuse, mènent des campagnes actives en écho aux idées portées par le mouvement des Lumières. Dès 1807 la Grande-Bre-

10 — En décembre 1984 eut lieu une fuite de gaz dans une usine de fabrication de pesticides à Bhopal, dans le centre de l'Inde, qui fit près de 4 000 morts directs et plus de 500 000 victimes indirectes. Voir : https://en.wikipedia.org/wiki/Bhopal_disaster. Sur l'accident plus récent de la centrale nucléaire de Fukushima, voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucl%C3%A9aire_de_Fukushima

11 — Adam Smith lui-même, dans *La richesse des nations*, avait prédit à la fois les avantages que le nouveau système donnerait aux investisseurs, et les inconvénients qui en découleraient pour l'entreprise. D'une part, « cette exemption totale de soucis et de risques, au-delà d'une certaine somme, encourage nombre de personnes à s'aventurer dans des sociétés par actions, alors qu'en aucun cas elles n'auraient risqué leur fortune comme associés dans une entreprise ». Mais d'autre part, les dirigeants de sociétés par action, comme ils gèrent les fonds d'autrui, n'y apporteront pas le même soin que si c'était leur propre argent, si bien que l'on peut attendre d'eux de « la négligence et la profusion » : négligence pour ce qui concerne l'intérêt de la compagnie, profusion en ce qui concerne leurs propres avantages.

tagne interdit la traite des noirs et durant le siècle suivant la Royal Navy pourchassera les navires négriers de toutes nations au large de l'Afrique ! Si ces actions ont pu servir les intérêts économiques de l'Angleterre en rivalité avec l'empire colonial français, cela constitue un cas historique important où les nations se sont mutuellement contraintes, influencées et alignées pour supprimer une activité économiquement rentable pour certains, en s'appuyant entre autres sur des raisons éthiques.

Résumé

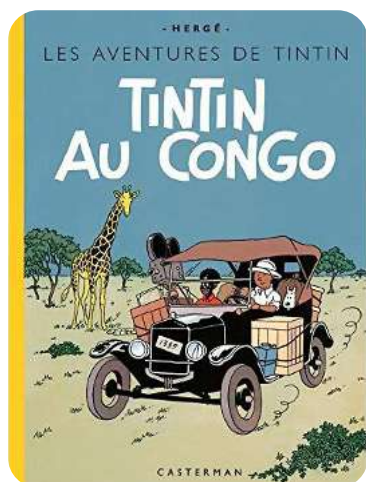
- † L'évolution du droit anglais accompagne la révolution industrielle du charbon.
- † La levée des barrières douanières facilite les échanges internationaux, quitte à perdre une partie de l'autosuffisance alimentaire en compensant par l'export de produits manufacturés.
- † Le droit de la propriété individuelle prend le pas sur le droit des « communs », notamment avec les *Enclosure Laws*.
- † L'invention de la société par actions à responsabilité limitée permet l'essor du capitalisme financier et favorise la prise de risque par les entreprises privées.
- † L'abolition de l'esclavage au cours du 19^{ème} siècle constitue un exemple historique où des motivations éthiques contribuent à la suppression à l'échelle internationale d'une activité économique encore rentable pour certains.

3.3. L'éthos capitaliste et l'idéal du progrès

Au 16^{ème} siècle, c'était l'évangélisation qui permettait aux Européens de justifier la colonisation du Nouveau Monde et l'exploitation de ses ressources humaines et matérielles : les bénéfices matériels qu'ils en tiraient n'étaient que la récompense méritée du salut éternel qu'ils apportaient à des populations qui, sans eux, n'auraient jamais connu le christianisme. Au 19^{ème} siècle, c'est la mise en valeur de la nature qui jouera ce rôle justificateur, avec quelques variantes suivant les pays.



En Amérique, les États-Unis iront en un demi-siècle de la côte Est à la côte Ouest (la Californie rejoint l'Union en 1850), annexant au passage une bonne partie des colonies espagnoles du Mexique, sous couvert de la doctrine dite de « destinée manifeste » suivant laquelle c'est leur mission évidente et quasi-divine de mettre en valeur tout le continent américain. En France, Jules Ferry, défenseur de l'éducation publique et fervent apôtre de l'expansion coloniale, déclare à la tribune du parlement en 1885 : « il y a pour les races supérieures un droit, parce qu'il y a un devoir pour elles. Elles ont le devoir de civiliser les races inférieures ». Mettre en valeur la nature ne suffit pas : il faut aussi mettre les indigènes en mesure de participer au nouvel ordre mondial, La mission d'éducation que la République assume en France se prolonge tout naturellement par une mission de civilisation dans les colonies. Pour se replonger dans l'atmosphère de cette époque, il suffit de relire *Tintin au Congo* (1931), et de préférence l'édition originale.¹²



¹² — Pour rendre justice à Hergé, notons que quelques années plus tard il publiera *Le Lotus Bleu*, (1935), qui montre les dessous de la présence européenne et japonaise en Chine.

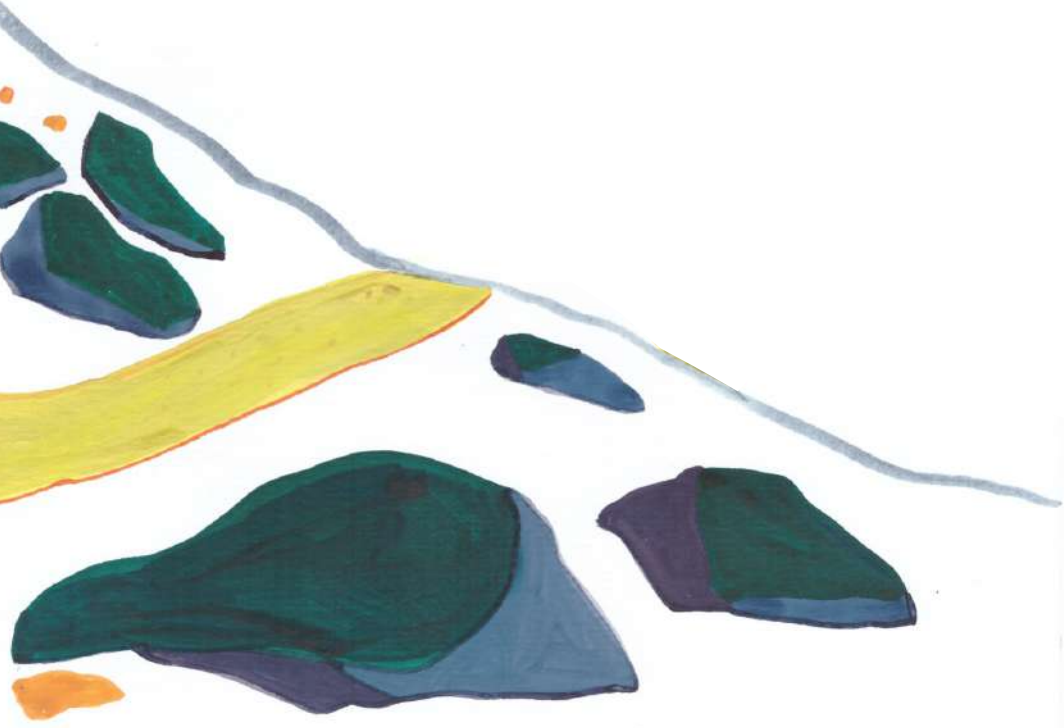
En quatre siècles, le paradis chrétien promis aux indigènes est devenu un paradis matériel, où la main invisible du marché remplace la providence divine. Le conquistador accompagné de missionnaires est devenu un homme d'affaires à la recherche de profits. Cette évolution a été analysée par le sociologue allemand Max Weber dans *L'éthique protestante et l'esprit du capitalisme* (1904), où il explique comment le calvinisme, en voyant dans la réussite matérielle du croyant un indice de la faveur divine, a favorisé l'apparition d'un type d'hommes, austères dans leur vie privée, mais hommes d'affaires avisés et entreprenants, recherchant le profit non pour eux-mêmes ou pour acheter leur salut, mais pour le réinvestir dans l'entreprise. Ce sont les premiers capitalistes, et leurs successeurs rechercheront le profit pour lui-même et non pas comme billet pour un autre monde.



Le Prêteur et sa femme, de Quentin Metsys

Résumé

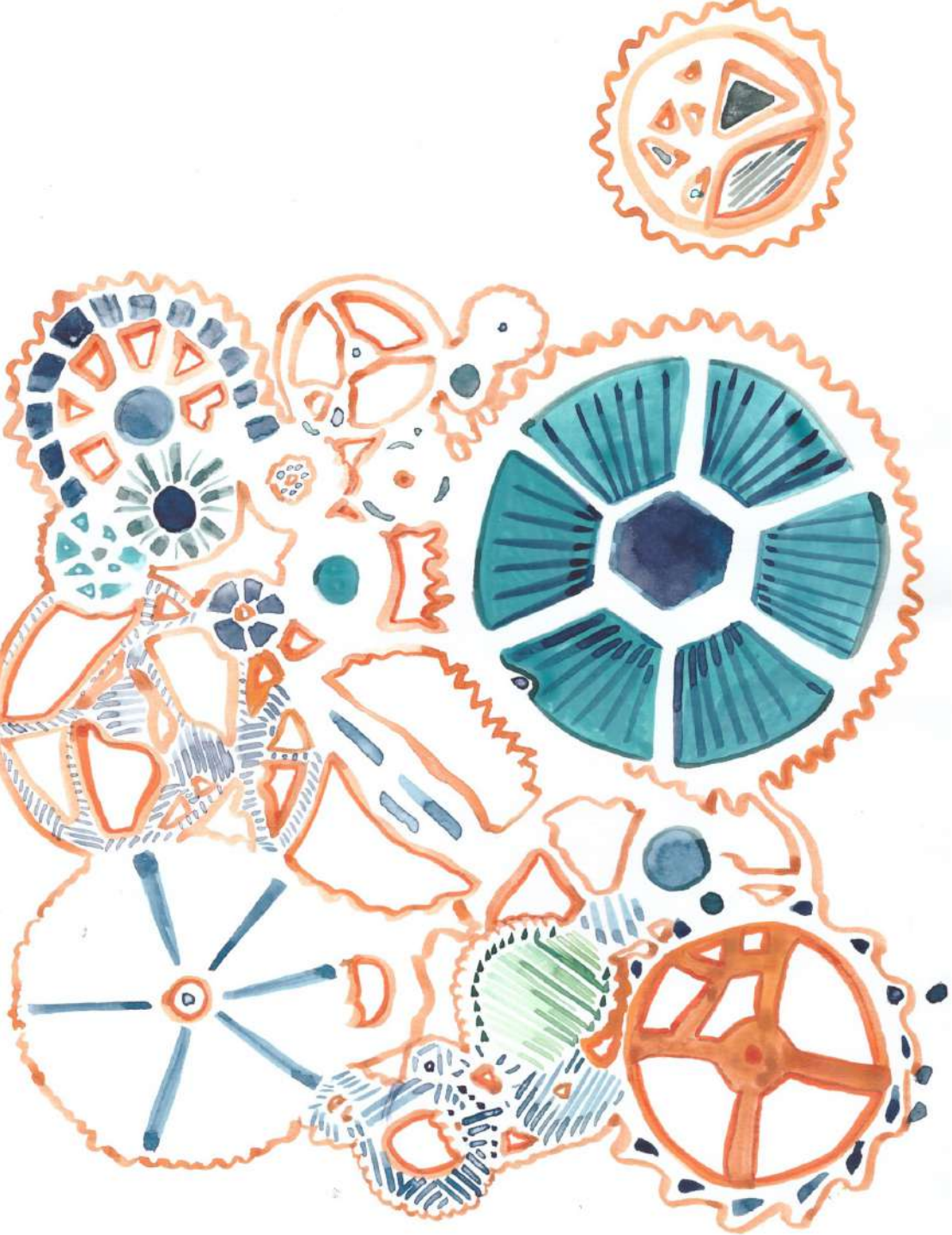
- Le cadre idéologique et moral soutenant la colonisation et les nouveaux systèmes de production ne repose plus sur l'évangélisation et la perspective du salut éternel, mais la croyance dans le progrès.
- Par le biais du calvinisme apparaît un nouvel éthos décrit par Max Weber valorisant la prospérité matérielle et la réussite professionnelle : celui du capitaliste qui réinvestit ses profits non pas dans sa consommation personnelle mais dans son entreprise.



Conclusion

L'Europe et les États-Unis abordent le 20^{ème} siècle dans l'euphorie du progrès. Progrès matériel, qui met le monde entier à la portée de Londres ou de Paris par des lignes régulières de navires ou de chemins de fer. Progrès humain, qui se manifeste par les progrès de la médecine et l'allongement de l'espérance de vie. Progrès scientifique, avec la domestication de l'électricité, et la naissance de la théorie économique. L'homme ne cherche plus son salut dans l'au-delà, mais cherche le bonheur dans la prospérité matérielle, et la main invisible qu'évoque Adam Smith doit orchestrer harmonieusement les rapports humains dans le champ économique.

Et pendant ce temps-là : les émissions de CO₂ d'origine humaine atteignent 6 milliards de tonnes en 1950, et la teneur en CO₂ de l'atmosphère, qui oscillait autour de 280 ppm dans les temps historiques jusqu'en 1800, passe à 311 ppm en 1950. À cette même date, l'exploration de la planète est terminée : il n'y a plus de taches blanches sur les cartes, et l'influence humaine se fait sentir sur tous les écosystèmes de la planète, jusque dans les profondeurs des océans.



10

**Brève histoire sociale des
émissions de GES**

2ème partie —
La Grande Accélération



Introduction

La teneur en CO₂ de l'atmosphère est passée de 284 ppm en 1500 à 310 ppm en 1950. Elle est de 420 aujourd'hui. En 70 ans, la concentration de CO₂ a donc augmenté 4,2 fois plus que pendant les 450 années précédentes ! C'est la période dite de la "Grande Accélération", où justement tout accélère : le PIB mondial est multiplié par 22 entre 1950 et aujourd'hui, la population mondiale par 3 et les émissions annuelles de CO₂ par 6 (elles passent de 6 milliards de tonnes par an à 36,5).¹

Pourquoi et vers quoi cette course effrénée ? Il est d'autant plus important d'apporter des réponses à cette question que le mouvement d'accélération se poursuit encore aujourd'hui. Hormis la pandémie de Covid-19, ni les crises financières ni les accords de Paris n'ont pour l'instant infléchi cette accélération. Identifier les moteurs de cette accélération est indispensable si l'on veut infléchir la trajectoire.

¹ — Voir <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
Noter que le total des émissions de GES, atteint 50 millions de tonnes d'équivalent CO₂ : le CO₂ représente donc 72 % des émissions.

Questions pour s'échauffer

- En 1913, la première usine de fabrication de nitrate d'ammonium est inaugurée en Allemagne, au siège historique de BASF. Le procédé est destiné à booster la croissance des plantes en leur apportant de l'azote. Au cours des 4 années suivantes, la production est entièrement rachetée pour un tout autre usage : lequel ?

Réponse : La production est rachetée par l'armée allemande pour produire des explosifs de guerre.

- De quelle couleur sont les homards ?

Réponse : Bleus ! La raison pour laquelle nous les imaginons rouges, et qu'on les représente ainsi dans les livres pour enfants et les dessins animés, est que nous sommes habitués à les voir dans l'assiette une fois bouillis, comme beaucoup d'autres aliments et objets qui nous arrivent déjà transformés.

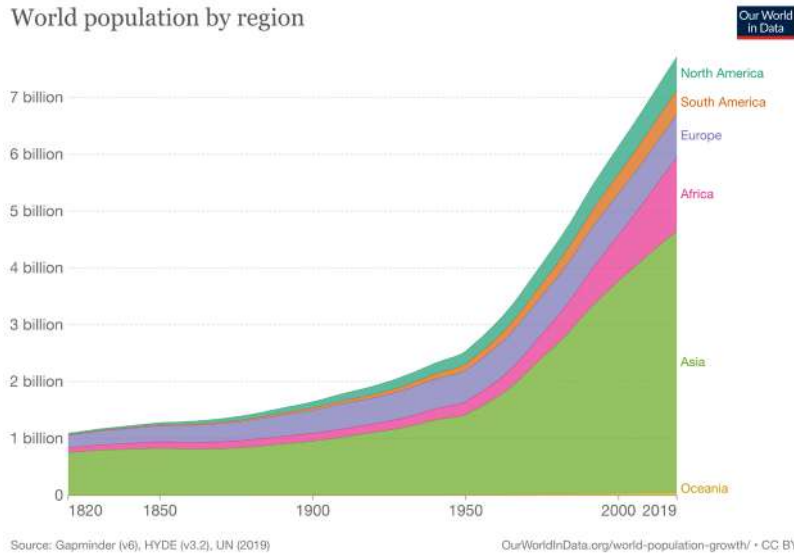


1

La « Belle Époque » des énergies fossiles

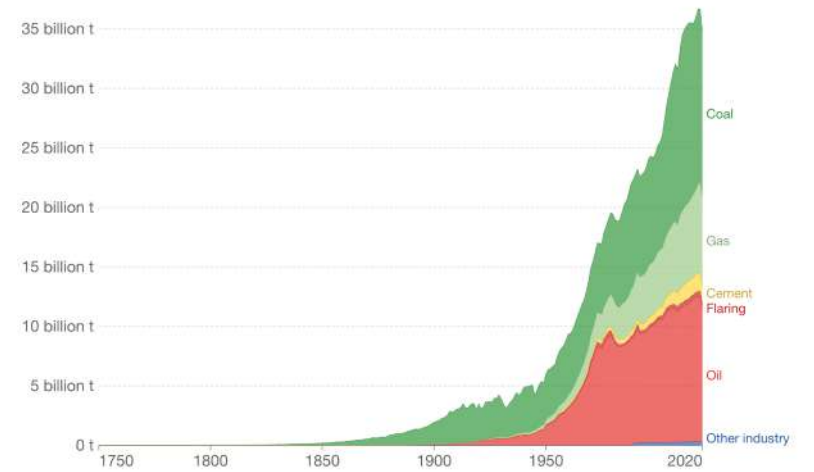
Revenons d'abord aux graphiques introductifs de la leçon précédente.

World population by region



CO₂ emissions by fuel type, World

Annual carbon dioxide (CO₂) emissions from different fuel types, measured in tonnes per year.



Croissance de la population mondiale et émissions de CO₂

Source : OWID

À partir de 1945, le monde se lance dans une croissance sans précédent, qui explose tous les indicateurs. La population mondiale passe de 2,37 milliards à 7,8 entre 1945 et 2020, le PIB mondial est inférieur à 10 000 milliards de dollars en 1950 et dépasse 100 000 en 2013. Il ne s'agit pas là de chiffres abstraits et immatériels. Au contraire ! Le PIB compte des objets (et des services) et la population... des corps vivants à nourrir.

Cette croissance matérielle inédite repose sur une véritable débauche d'énergie et de matières premières. Alors que, dans la première moitié du 20ème siècle, la consommation d'énergie fossile augmentait de 1,7% par an, elle augmente de 4,5% par an dans la seconde. Entre 1950 et 1970, la consommation de minerais est multipliée par 3, de même



que celle de matériaux de construction.² Les émissions annuelles de GES croissent au même rythme : les émissions annuelles de CO₂, par exemple, passent de 6 milliards de tonnes en 1950 à 36,5 en 2019.

1.1. L'énergie du pétrole

Le héros de cette Grande Accélération, c'est le pétrole. Le pétrole était connu et exploité depuis le milieu du 19^{ème} siècle, notamment pour éclairer : ce sont les lampes à pétrole, qui remplacent les bougies et les chandelles. Mais son essor commence véritablement en 1905, quand Henry Ford lance la production de masse d'un véhicule automobile fonctionnant à l'essence.

Le pétrole offre d'énormes avantages par rapport au charbon : plus concentré en énergie, plus facile d'utilisation (il est liquide, il coule des réservoirs, plus besoin de chauffeurs pour pelleter le charbon dans les chaudières des navires ou des locomotives), plus facile à transporter (pipe-lines au lieu de trains interminables), et surtout plus facile d'extraction. Les carburants liquides dérivés du pétrole, essence, diesel, kérosène, s'imposent ainsi rapidement dans les transports, et deviennent un instrument incontournable de la puissance, et notamment de la puissance militaire.

Ce n'est d'ailleurs pas sans conséquence sociale. L'exploitation d'une mine de charbon nécessite des mineurs, prompts à réaliser qu'ils disposent là d'un moyen de pression. Historiquement, les mineurs ont toujours été à la pointe du mouvement ouvrier. Un puits de pétrole, une fois ouvert, ne nécessite que quelques ingénieurs pour ouvrir ou fermer les vannes si bien qu'on peut voir dans la fermeture des mines de charbon en Europe une des raisons du déclin du mouvement ouvrier.

2 — Voir Bonneuil et Fressoz, *L'événement anthropocène*, chapitre 10.

1.2. L'addition des énergies fossiles

Entre 1950 et 2018, la consommation mondiale de pétrole passe ainsi de 0,47 millions de tonnes-équivalent-pétrole (tep) à 4,7, soit une multiplication par 10 ! Mais ce héros n'est pas seul sur scène. Comme nous l'avons vu dans les leçons précédentes sur l'histoire de l'énergie, la consommation de charbon est elle aussi passée de 1,08 à 3,8 millions de tep entre 1950 et 2018, soit une multiplication par 3. Et l'on voit arriver un troisième carburant fossile, le gaz, presque insignifiant en 1950, avec 0,17, qui vient concurrencer le pétrole en 2018, avec 3,2.

Quoique le pétrole y ait tenu un rôle central, la Grande Accélération est donc la « Belle Époque » des énergies fossiles dans leur ensemble. Le pétrole n'a pas supplanté le charbon : il l'a remplacé dans certains usages, comme les transports, mais il l'a cantonné dans d'autres, notamment la production d'électricité. Le gaz n'a pas supplanté le pétrole : il le remplace dans certains usages, comme la production d'électricité ou le chauffage, et la chimie. Dans la production d'électricité actuelle, charbon, pétrole et gaz sont tous utilisés pour répondre à des besoins différents : générateurs diesel pour les besoins individuels ou les installations de secours, centrales à charbon installées près des mines, centrales à gaz faciles à mettre en marche aux heures de pointe.

Résumé

- ♦ L'explosion de la population et des émissions de CO₂ après 1950 marque l'entrée dans une phase d'accélération.
- ♦ Ces deux explosions sont intimement liées à une consommation sans précédent des ressources terrestres, et notamment des énergies fossiles, pétrole en tête, dont la consommation est multipliée par 10 en 70 ans.

2

Nouvelles puissances militaires, nouveaux systèmes industriels

2.1. Le choix de la reconversion des puissances de guerre

En 1950, l'Europe sort de deux guerres mondiales dévastatrices. Angleterre, France, Allemagne : les vieux pays dominants du 19^{ème} siècle sont affaiblis et largement à reconstruire. Au contraire, deux nouvelles puissances ont pris le dessus : les États-Unis et l'URSS. La géopolitique mondiale des décennies d'après-guerre est donc bien différente de celle du siècle précédent, et se structure autour de la rivalité États-Unis / URSS, sans empires coloniaux en tant que tels, mais avec des zones d'influence et d'ingérence bien identifiées.

Mais alors que les pays européens doivent être reconstruits, les pays vainqueurs, notamment les États-Unis et l'URSS, se retrouvent avec un immense capital mobilisé sous forme d'industries de guerre. Entre 1939 et 1944, le PIB des États-Unis a augmenté de 60 % !³ Que faire de ces immenses capacités industrielles ? Que faire de ces centaines d'usines, de ces nouveaux matériaux dont on a développé les usages, de tous ces savoirs perfectionnés pour les besoins militaires, de ces

nouvelles expertises, et des importants intérêts économiques en place ? La réponse a été de les reconvertir vers des usages civils, quitte à créer de nouveaux besoins.

On a toujours l'impression que le progrès est inéluctable et que sa voie est toute tracée. « On ne lutte pas contre le progrès ! » entend-on. Au contraire, bien souvent la voie choisie pour le développement dépend de circonstances historiques et de décisions politiques qui auraient pu être différentes. En l'occurrence, la reconversion des industries de guerre dans le monde de 1950 fut une décision politique stratégique et explicite.

Cette politique générale a profondément structuré des secteurs-clefs, énergie, transport et agriculture en tête. Nous n'aurions pas de nucléaire civil s'il n'y avait pas eu de nucléaire militaire : en 1945, aux États-Unis, le projet Manhattan employait plus de 100 000 personnes. Quelques années après, en 1951, la première centrale nucléaire entrait en service aux États-Unis. De même, les usines qui fabriquaient des camions, des navires et des avions pour les besoins des armées se sont tournées vers les besoins des civils. Ces besoins n'existaient pas à l'époque, les civils avaient bien d'autres chats à fouetter, et il a fallu les susciter et les encourager. C'est en 1944 par exemple, qu'il a été décidé de ne pas taxer le carburant utilisé par les avions, lors la convention dite « de Chicago », toujours en vigueur aujourd'hui, dont le but était d'encourager les gens à prendre l'avion en diminuant le prix du billet, et qui crée une distorsion de concurrence considérable entre ce mode de transport, très émetteur de GES, et les autres. Mais l'exemple le plus frappant de reconversion des industries de guerre se trouve dans une direction inattendue : l'agriculture.

³ — Source : OWID. Le PIB passe de 1 470 Milliards en 1939 à 2 360, en dollars constants.

Résumé

- ♦ La reconversion des industries de guerre après 1950, assurant une continuité des techniques et des intérêts économiques passés, fut un choix politique explicite.
- ♦ Trois secteurs clés s'en sont trouvés particulièrement transformés : énergie, transport et agriculture.

2.2. Le cas de l'agriculture

Pendant quarante ans, entre 1950 et 1990, le taux de croissance de la population se maintient au-dessus de 1,5 % par an. Il faut donc nourrir cette population en expansion. Entre 1961 et 2017, la production mondiale de céréales (y compris le riz) passe ainsi de 0,8 milliards de tonnes à 2,7 milliards.⁴ Sur la même période, les rendements à l'hectare augmentent : ils sont multipliés par 2,4 pour le blé, 1,5 pour le riz et 2 pour le maïs.⁵

Cet exploit est réalisé par l'industrialisation de l'agriculture. En quelques décennies, les tracteurs remplacent le travail humain et animal : les animaux de trait disparaissent des campagnes. Mais ce n'est pas tout : les nitrates et l'ammoniac dont les plantes ont besoin ne leur sont plus fournies par les bactéries du sol, mais leur sont apportées directement sous forme d'engrais, fabriqués industriellement.⁶ Enfin, recourant aux herbicides et insecticides, l'agriculteur partage de moins en moins son champ avec d'autres plantes et des insectes. Mais

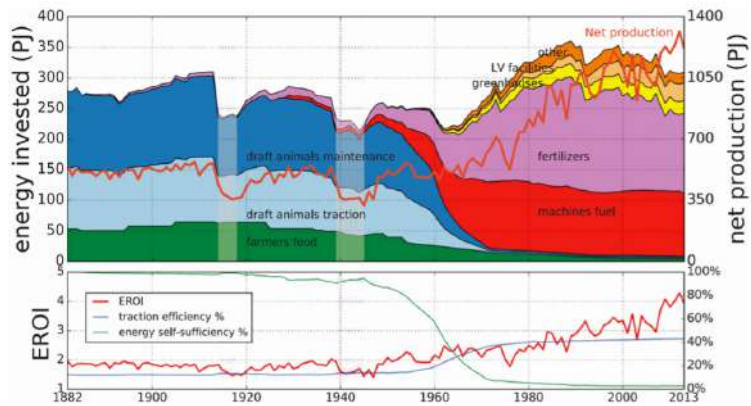
⁴ — Source : OWID <https://ourworldindata.org/search?q=world+cereal+production>

⁵ — Source : OWID <https://ourworldindata.org/crop-yields>

⁶ — Le nitrate d'ammonium était utilisé sous forme d'acide nitrique dans les explosifs de guerre et en tant qu'engrais agricole dit « minéral », fournissant l'azote nécessaire à la croissance des plantes. C'est le même produit qui déclencha la gigantesque explosion de l'entrepôt du port de Beyrouth le 4 août 2020.

tous ces produits, du diesel des machines agricoles aux pesticides, nécessitent beaucoup d'énergie fossile. La figure ci-dessous compare l'énergie fournie au champ sous forme de travail et d'intrants à l'énergie recueillie sous forme de calories alimentaires : le rapport des deux (EROI) double entre 1950 et 2013, passant de 2 à 4, alors que la production est multipliée par 3.





Évolution de l'énergie investie et de l'énergie récupérée (net production) par la production agricole française depuis 1882. Les dépenses énergétiques correspondent à l'alimentation des paysans (farmer food) et des animaux de trait (draft animals) séparée entre énergie nécessaire aux travaux (traction) et énergie nécessaire à l'entretien des bêtes (maintenance), aux carburants pour les machines agricoles (machines fuel), à la fabrication des engrais azotés, phosphatés et potassiques (fertilizers), au chauffage de serres (greenhouses), au fonctionnement des bâtiments d'élevage et des machines associées (LV facilities), à la fabrication des produits phytosanitaires et à l'irrigation (others). Les évolutions du taux de retour énergétique (EROI), de l'efficacité énergétique des travaux mécaniques (traction efficiency) et de l'autonomie énergétique des fermes (energy self-sufficiency) sont indiquées dans le graphique du bas.

Figure issue de Harchaoui et Chatzimpiros (2018)^[8].

Profil énergétique d'une ferme moyenne en France

Source : Les Greniers d'Abondance⁷

7 — <https://resiliencealimentaire.org/lempreinte-energetique-du-systeme-alimentaire/#post-12761-endnote-ref-3>

Les plantes et l'azote

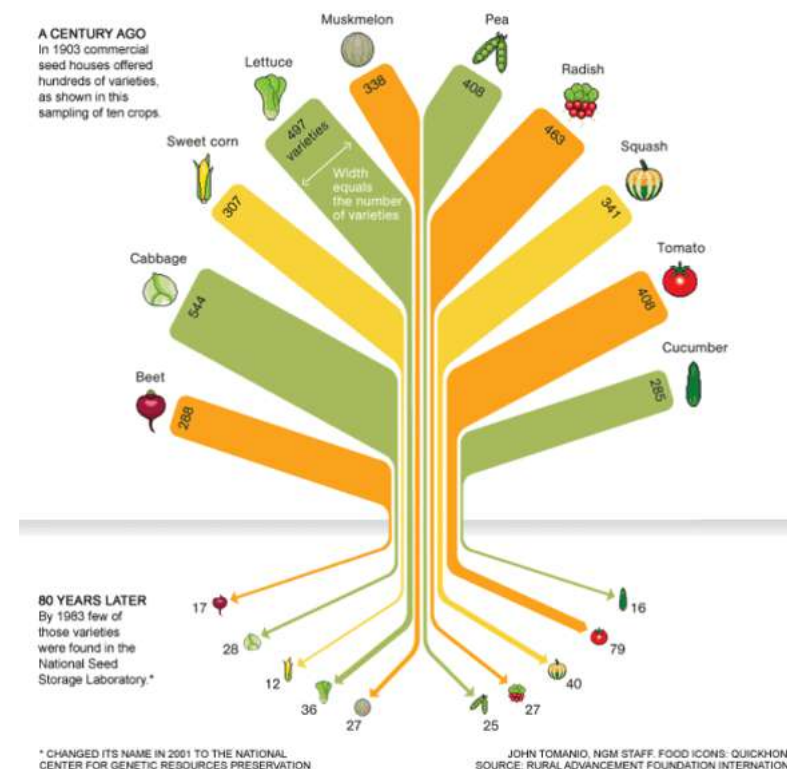
Grâce à la photosynthèse, les plantes emmagasinent l'énergie solaire sous forme de matière organique. Celle-ci est constituée de molécules particulières, les protéines, qui sont de longues chaînes associant des atomes de carbone, mais aussi d'azote et d'autres atomes. Sans azote, pas de protéines, donc pas de matière organique. L'azote est abondant dans l'air, mais sous la forme N_2 , qui est très stable, et donc inassimilable par les plantes. Ce sont les bactéries du sol qui font le travail, et libèrent l'azote sous la forme d'ammoniac (NH_3) ou de nitrate (NO_3), assimilables par les plantes. D'où l'intérêt de certaines cultures, comme les légumineuses, dont les racines comportent des nodosités où les bactéries vivent en symbiose avec la plante et libèrent dans le sol l'ammoniac et le nitrate.⁸ Longtemps les paysans ont cherché à apporter directement aux sols les composés azotés qui leur manquaient. On épandait dans les champs du fumier ou du goémon, et au 19^{ème} siècle, on allait jusqu'à chercher du guano dans les îles Chincha ou des nitrates natifs dans le désert d'Atacama. Mais la situation change avec la mise au point du procédé industriel Haber-Bosch qui permet de synthétiser l'ammoniac à partir de l'azote de l'air et d'hydrogène, grâce à des pressions (200 atm) et des températures (500°C) élevées. Le procédé est très gourmand en carburants fossiles, ne serait-ce que parce que l'hydrogène nécessaire est obtenu en craquant le méthane, mais en raison du faible prix de ceux-ci, il reste économiquement avantageux. A l'heure actuelle, on estime que la production d'ammoniac mobilise 3 à 5% de la production mondiale de gaz naturel et 1 à 2% de la production mondiale d'énergie.⁹

L'industrialisation de l'agriculture s'étend à toute la filière alimentaire, en amont comme en aval, de la fourniture des semences (le plus souvent brevetées), des engrais, des pesticides et des machines, au trans-

8 — Pour plus de détails, voir Matthieu Calame « Comprendre l'agroécologie », ch. 1 http://docs.eclm.fr/pdf_livre/220ManuelAgroecologie.pdf

9 — Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9_Haber

port des produits, à leur transformation et à leur distribution. À l'heure actuelle, en France, six enseignes assurent 70% de la distribution de produits alimentaires, en Allemagne c'est 85% et en Grande-Bretagne 93,5%.¹⁰ L'industrie alimentaire et le commerce international se sont concentrés sur quelques produits alimentaires standardisés, facilement traçables, reconnaissables par les consommateurs et optimisés pour les intrants. Sur 6000 espèces de plantes cultivées pour l'alimentation, 200 sont commercialisées, et neuf assurent à elles seules les 2/3 de la production mondiale en poids : la canne à sucre, le maïs, le blé, le riz, les pommes de terre, le soja, l'huile de palme, la betterave à sucre et le manioc.¹¹ Sur les productions restantes, comme les fruits et les légumes, on observe une réduction importante des variétés cultivées :



Comparaison des variétés maraîchères disponibles à l'achat aux États-Unis en 1903 et des variétés restantes en 1983

Source : John Tomanio, National Geographic

Lecture : Alors que les agriculteurs américains pouvaient choisir entre 497 variétés de laitues à planter en 1903, on ne retrouvait en 1983 que 36 d'entre elles au Centre National de Préservation des Ressources Génétiques.

Une conséquence de l'augmentation des rendements à l'hectare est l'augmentation spectaculaire de la consommation de viande : les excédents agricoles sont tels qu'on a pu s'en servir pour alimenter les animaux ! En 2013, par exemple, sur 227 millions de tonnes de soja

¹⁰ — Voir Mathieu Calame, « Enraciner l'agriculture », PUF, p.166

¹¹ — FAO, The State of the World's Diversity for Food and Agriculture, <https://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf>

produits de par le monde, 11 seulement étaient destinés à l'alimentation humaine, le reste allant aux animaux ou aux biocarburants.¹² De même, on estime que 60% au moins de la production de maïs va à l'alimentation animale. Le résultat est que la production de viande dans le monde, toutes espèces confondues, a été multipliée par 5 à l'échelle mondiale entre 1960 et 2018.¹³ En ce qui concerne les bovins, on est passé de 29 à 73 millions de tonnes, ce qui, compte tenu du fait qu'un kilo de bœuf consommé représente 100 kilos d'équivalent CO₂ émis, est une contribution significative à l'effet de serre.¹⁴

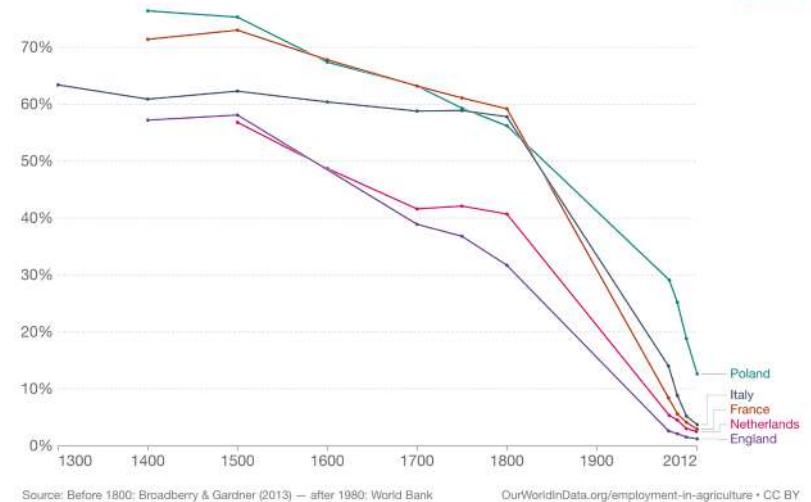
L'industrialisation de l'agriculture est un facteur de transformation sociale majeure, qui avait débuté lors de la révolution industrielle du charbon et se confirme durant la seconde moitié du 20ème siècle : les machines agricoles sont d'autant plus performantes que les surfaces à traiter sont importantes et homogènes, ce qui pousse à la constitution de grandes exploitations par le remembrement des terres, et donc à la transformation des paysages (disparition des haies et des mares) et à la dépopulation des campagnes. En 200 ans, la part de l'emploi agricole dans l'emploi total passe ainsi de plus d'un tiers à moins de 5% dans presque tous les pays d'Europe. Ce sont ces populations paysannes déplacées des campagnes qui ont alimenté en ouvriers les usines de la révolution industrielle.

¹² — OWID : https://ourworldindata.org/grapher/soybean-production-and-use?country=~OWID_WRL

¹³ — OWID : <https://ourworldindata.org/meat-production>

¹⁴ — OWID : <https://ourworldindata.org/meat-production#global-meat-production>

Share of the labor force working in agriculture



Évolution de la part de la population active dans l'agriculture dans 5 pays européens depuis 1300

Source : OWID

Ce déplacement de populations des campagnes vers les villes a aussi été contraint en Europe par des moyens juridiques (disparition des communs, lois contre le vagabondage, etc.). En Inde, par exemple, il n'a pas eu lieu et l'agriculture emploie encore la moitié de la population, soit 650 millions de personnes. La surface moyenne par exploitation est de 55 ha en France et 1,2 ha en Inde. Les méthodes agricoles sont les mêmes : il faut payer les tracteurs, les engrais et les pesticides qui permettent d'augmenter la production. On y arrive en France, notamment grâce au soutien financier de la PAC (Politique Agricole Commune de l'Union Européenne), mais pas en Inde : pas étonnant que les suicides d'agriculteurs s'y multiplient et que d'immenses manifestations de paysans aient bloqué New Delhi pendant des mois durant l'année 2020.

A l'échelle mondiale, cependant, c'est le dépeuplement des campagnes qui s'impose. Entre 1960 et 2020, dans le monde, la proportion urbaine de la population passe de 34 à 56 %¹⁵ : à l'heure actuelle, plus d'un être humain sur deux vit dans une ville, bien loin des autres espèces vivantes animales et végétales qui partagent la planète avec lui, et peu conscient des grands cycles naturels qui lui permettent de respirer et de s'alimenter.

Dans ce schéma industrialisé d'après-guerre, l'agriculture est devenue un contributeur majeur à l'effet de serre. On a vu que d'après le GIEC, le quart des émissions mondiales de GES en 2014 provenaient ainsi de la production alimentaire,¹⁶ notamment via les émissions de méthane dues à l'élevage (les ruminants rotent !) ou à la culture de riz, à la fabrication et à l'utilisation d'engrais synthétiques (qui émettent notamment du protoxyde d'azote) et au CO₂ émis par les machines agricoles. Il faut aussi y rajouter les effets de la déforestation, qui permet d'accroître les surfaces arables mais détruit de la matière organique dont le carbone est rejeté dans l'atmosphère.

Mais l'impact de l'agriculture ne se limite pas aux émissions de GES. Le système agro-alimentaire affecte aussi les équilibres naturels par son emprise géographique : il y a 1000 ans, moins de 4% de la surface terrestre (hors glaciers et zones arides) étaient utilisés pour l'agriculture. Ce chiffre est estimé à 50% aujourd'hui,¹⁷ dont les trois quarts pour la pâture et l'alimentation du bétail, ce qui a naturellement réduit les espaces disponibles à la faune et la flore sauvage. Si l'on regarde la biomasse des mammifères, par exemple, hors humains, seuls 6% sont encore sauvages. Il y a donc un impact majeur sur la biodiversité, encore accentué par l'utilisation des produits dits « phytosanitaires », conçus pour éliminer les insectes, les plantes ou les champignons nui-

¹⁵ — Voir <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>

¹⁶ — OWID : <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions-food>

¹⁷ — OWID : <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food?country=>

sibles aux cultures, mais qui ne sont nullement sélectifs et ont donc un effet destructeur bien plus large.

Résumé

- ♦ Héritière des technologies de guerre, l'agriculture s'est industrialisée et mécanisée : on ne produit plus à la force des bras et des animaux de traits mais grâce aux tracteurs et aux engrais azotés, tous produits à partir de l'énergie du pétrole.
- ♦ Les rendements à l'hectare ont considérablement augmenté au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, dégageant un surplus qui a permis entre autres d'accroître la consommation de viande animale.
- ♦ L'agriculture industrialisée est aujourd'hui responsable d'environ 1/3 des émissions de GES, et a un impact considérable sur la biodiversité.

2.3. Nouvelle révolution industrielle

La gestion rationnelle et quantifiée

La guerre moderne est avant tout un problème logistique. Réussir le débarquement de Normandie, par exemple, impliquait de déposer 24 000 hommes en quelques heures sur cent kilomètres de plage, d'assurer les renforts et les ravitaillements pendant quelques semaines, et pour cela d'organiser les rotations de 7000 navires et autant d'avions.

On peut mesurer les progrès accomplis en prenant l'exemple des *Liberty ships*, cargos armés polyvalents de 3500 tonnes. Au cours des cinq années de guerre, les États-Unis en ont construit 2710, mais alors qu'il fallait 230 jours pour en construire un en 1941, la moyenne était descendue à 42 jours en 1945, le record étant établi à moins de 5 jours. La logistique, c'est-à-dire l'organisation de la production, devient un domaine de recherche à part entière, où les mathématiques jouent un rôle crucial : on ne s'en remet plus au flair ou à l'expérience du gestionnaire, on définit des indicateurs de performance quantifiés, et on



cherche à les maximiser. C'est la naissance du concept d'optimisation, qui quittera rapidement le domaine de la logistique pour se répandre dans toutes les disciplines de gestion, et qui se révélera central pour la théorie économique néo-classique.

Le PIB : nouvel indicateur-boussole des politiques

Dans les champs économique et politique, la recherche d'optimisation quantifiée fait émerger une nouvelle boussole : c'est le PNB, produit national brut, devenu ultérieurement PIB, produit intérieur brut. Le PIB est un indicateur quantifié qui mesure la valeur monétaire des biens matériels produits dans un pays au cours d'une année, diminuée de la valeur totale des biens matériels utilisés, et donc détruits, dans le processus de production. Par exemple, la contribution d'un Liberty ship au PIB est la valeur du bateau, diminuée de la valeur des matériaux utilisés.

La théorie économique néo-classique devient durant la seconde moitié du 20ème siècle un véritable auxiliaire du gouvernement et promeut l'utilisation du PIB pour orienter les politiques économiques vers la profusion matérielle. Tous les États calculent leur PIB et cherchent à le faire croître le plus rapidement possible. A partir de 1970, c'est le triomphe des idées néo-classiques en économie. Ses principaux champions sont Friedrich von Hayek (1899-1992) et Milton Friedman (1912-2006), très engagés dans la bataille intellectuelle contre le socialisme. Les idées de libéralisation des échanges et l'instauration de la libre concurrence sont consacrées par des traités internationaux et institutions fondatrices comme le marché unique de l'Union Européenne ou l'Organisation Mondiale du Commerce.

Notez que par définition, dans le PNB ou le PIB, ce qui ne coûte rien ne compte pas. En dernière analyse, la construction d'un bateau utilise des minerais plus ou moins rares, et crée de la pollution, ne serait-ce que par des émissions de GES. Mais les GES ne figurent pas dans le PIB tant qu'il ne coûte rien de les émettre, et quant aux minerais, ils ne figurent que par leur coût d'extraction : le charbon, le fer ou l'or

qui sont dans le sous-sol ne coûtent rien en eux-mêmes et celui qui en trouve un morceau sur son chemin peut se pencher et le mettre dans sa poche. La seule chose qui coûte, c'est de les trouver et de les extraire. La nature est considérée comme un réservoir dans lequel on peut puiser librement, premier arrivé premier servi. Et avec la libéralisation et la mondialisation des échanges, les activités de production, transformation, consommation et rejet des déchets sont dispersées dans des pays différents, ce qui rend encore moins visible l'impact de la production sur les systèmes naturels.

Le PIB tient donc peu compte de l'état de la planète, et pas beaucoup plus de l'état de la société. Le bien-être individuel et collectif ne dépend en effet pas seulement de la consommation totale de ressources matérielles, mais de la qualité et de la bonne répartition de celles-ci, ainsi que de règles de vivre ensemble qui puissent permettre dignité, reconnaissance et épanouissement de chacun. Si l'objectif raisonnable d'une politique économique est de faire croître le bien-être collectif, ou tout au moins de le maintenir sur le long terme, cela implique de préserver les ressources naturelles et les bonnes conditions de vivre ensemble. Le PIB n'est donc pas un indicateur adapté à cet objectif : il peut parfaitement croître alors que les ressources naturelles se dégradent et que la société s'enfonce dans le mal-être.

Résumé

- ♦ La guerre favorise l'émergence d'une science de la gestion quantifiée et mathématisée.
- ♦ Le PIB s'impose comme boussole des politiques économiques.
- ♦ Le PIB valorise l'augmentation de la production matérielle et ne prend pas en considération les impacts sur la nature ni l'état de la société.
- ♦ La science économique affirme sa place de conseil aux gouvernements, et encourage la création d'institutions politiques internationales et d'accords favorisant le libre-échange des marchandises et des capitaux.



3

De nouveaux modes de vie

Qu'en est-il des transformations sociales ? Pour introduire le chapitre précédent, nous faisons l'expérience de pensée de voyager dans le temps avec une paysanne de la Renaissance et imaginions qu'elle n'aurait pas été trop dépaycée si on l'avait ramenée quinze siècles en arrière. Plongée dans le monde d'aujourd'hui, elle serait au contraire complètement déboussolée.

C'est parce que nous vivons aujourd'hui très différemment des générations qui nous ont précédés : rythmes de vie, types de travail, rapport au travail, repères culturels et idéologiques se sont profondément transformés. Songez à ce que vous êtes habitués à trouver dans votre assiette et à la façon dont vous avez obtenu cette nourriture (probablement pas en plantant et récoltant vous-mêmes vos carottes). Songez aux droits des femmes, au nombre d'enfants dans votre famille et aux personnes avec qui vous partagez votre foyer (probablement pas vos parents ni vos grands-parents, encore moins les animaux que vous élevez pour vous en nourrir). Songez à votre espérance de vie et à la différence entre des sociétés où 45 ans est un âge record et celles où plus de la moitié de la population a dépassé ce cap. Songez à la place de la religion et aux autorités morales dans votre vie, aux repères que vous donne la science et au rôle que vous pensez devoir jouer en politique. Songez aux outils techniques avec lesquels vous travaillez et vivez au quotidien. Songez enfin au périmètre géographique dans lequel vous avez la possibilité et l'habitude de vous déplacer.

Tout cela est radicalement différent de l'expérience d'une personne d'il y a 500 ans et c'est ce qu'on peut appeler une métamorphose sociale. Dans la suite de cette partie, nous allons présenter quatre caractéristiques de nos sociétés modernes, importantes pour comprendre les bouleversements écologiques actuels : la production massive de déchets, le rapport aux objets manufacturés, le rapport distancié à la planète, et enfin la conception de l'individu.

téristiques de nos sociétés modernes, importantes pour comprendre les bouleversements écologiques actuels : la production massive de déchets, le rapport aux objets manufacturés, le rapport distancié à la planète, et enfin la conception de l'individu.

3.1. Nouveaux matériaux, nouveaux déchets

PIB, traités de libre échange, marché unique... : l'objectif affiché de ces nouveaux paradigmes économiques et politiques était l'aisance matérielle pour le plus grand nombre. On peut dire que le succès a été au rendez-vous ! Entre 1950 et 2018, le PIB par tête est multiplié par 4,5 alors même que la population mondiale est multipliée par 3,25. Cela veut dire qu'une masse énorme d'objets fabriqués est déversée sur la population, et se retrouve ensuite, plus ou moins rapidement, dans la nature sous la forme de déchets.

Parmi ceux-ci, on trouve des molécules qui n'ont jamais existé auparavant sur la planète Terre, et que les cycles naturels s'avèrent incapables de décomposer. La production cumulée de plastique, par exemple, est passée de 2 millions de tonnes en 1950 à 270 en 2010,¹⁸ dopée par la vogue des produits jetables. La même année, on produisait 275 millions de tonnes de déchets (provenant en grande partie des fabrications antérieures), dont 25 % étaient recyclés, 20 % incinérés, et 55 % rejetés dans la nature où ils s'accumulent.¹⁹ Aujourd'hui, les plages les plus reculées de la planète, comme Henderson Island dans le Pacifique Sud, sont jonchées de déchets en plastiques, dont certains sont âgés de cinquante ans et plus, et dans certaines zones océaniques la densité du plastique est six fois celle du plancton.

¹⁸ — OWID : <https://ourworldindata.org/grapher/global-plastics-production>

¹⁹ — OWID : <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

3.2. Des objets manufacturés et éphémères

Il faut bien que les sociétés absorbent toute cette production, et pour cela il faut que les individus consomment. Le temps où les individus se bornaient à satisfaire des besoins élémentaires (se nourrir, se loger, se vêtir) est bien révolu, et toute une industrie, la publicité, se développe pour créer de nouveaux besoins (aller au cinéma, voyager, changer de garde-robe) et inciter à les satisfaire. Du même coup, le rapport aux objets change. Alors que le statut social avait été pendant longtemps déterminé par la naissance ou la communauté d'appartenance, il peut désormais se gagner aussi par les possessions matérielles.

Et comme la production ne diminue pas, la consommation doit suivre : un objet chasse l'autre. Comme le dit Jean Baudrillard, au début de son livre *La société de consommation* (1977) : « Nous vivons le temps des objets : je veux dire que nous vivons à leur rythme et selon leur succession incessante. C'est nous qui les regardons aujourd'hui naître, s'accomplir, et mourir, alors que, dans toutes les civilisations antérieures, c'étaient les objets, instruments ou monuments pérennes, qui survivaient aux générations d'homme ».

L'environnement quotidien des habitants des pays développés et d'une part grandissante des pays émergents est principalement peuplé d'objets manufacturés et éphémères, et non plus d'êtres vivants, plantes ou animaux. Les objets de la nature eux-mêmes nous arrivent transformés, ne serait-ce que lorsqu'on achète une carotte, déjà lavée, triée, souvent emballée, toujours transportée, parfois déjà cuisinée. La nature est ainsi rejetée loin de nos préoccupations quotidiennes, à plus forte raison quand on habite en ville. Difficile dans un contexte pareil de mesurer la perte de biodiversité ou la pollution permanente que constituent les emballages plastiques de notre nourriture.

3.3. S'affranchir des limites planétaires

Cette mise entre parenthèse de la nature dans le quotidien trouve son pendant dans les nouveaux imaginaires. La seconde moitié du 20^{ème}

siècle est l'époque de la « conquête spatiale » : après avoir atteint la Lune, on envisage de coloniser Mars. En termes d'énergie disponible, la maîtrise du nucléaire ouvre un champ des possibles qui semble illimité. Les nouvelles méthodes agricoles quant à elles confortent l'idée que l'homme s'est rendu « maître et possesseur de la nature », suivant le vœu de Descartes. Il en a dompté la puissance et la met en valeur, a exploré la planète tout entière et la surplombe. En somme, il s'est affranchi des limites terrestres.

La responsabilité de l'humanité est alors de « manager la planète Terre », en utilisant bien sûr les méthodes scientifiques de gestion mises au point depuis 1950. Un titre comme *Manuel d'utilisation pour le vaisseau spatial Terre*, écrit par Buckminster Fuller en 1969, résume bien l'esprit du temps, et la prise de distance de l'homme avec son milieu naturel. Déjà Descartes considérait les animaux comme des machines ; c'est maintenant la planète tout entière qui en est une, et les êtres humains en sont les passagers et les pilotes : ils n'en font pas partie.



Il y a bien quelques voix discordantes. En 1972, une équipe de scientifiques du MIT publie un rapport intitulé *Les limites à la croissance*, connu sous le nom de « rapport Meadows », qui prédit un effondrement des économies mondiales au 21^{ème} siècle si les tendances sont maintenues (si l'on suit le « business as usual »). L'originalité de ce rapport est qu'il est basé un modèle mathématique de l'économie mondiale tenant compte de l'épuisement des ressources naturelles et du coût de la pollution, et sur des simulations numériques, alors même que les ordinateurs étaient encore de grosses machines lentes et difficiles à programmer. Ce rapport causa un certain émoi, mais fut vite rejeté par les économistes influents, Friedrich Hayek en tête, selon lesquels le marché ne manquerait pas de régler le problème en agissant sur les prix. Le rapport fut enterré, la fête continua, mais il avait posé sous une forme moderne la vieille question de Malthus : comment une croissance infinie serait-elle possible dans un monde fini ?

3.4. L'homme au service de l'économie

A la coupure entre l'homme et le monde, héritage de la Renaissance, la modernité en ajoute une autre, toute nouvelle, au sein de la personne : la séparation de la consommation et de la production. Pendant longtemps le travail avait été considéré comme une valeur positive, qui servait notamment à marquer une position sociale. On reprenait d'ailleurs le métier de ses parents (notaire, boulanger, agriculteur...) et cela conférait un statut dans la communauté.

Pour la théorie économique néo-classique, héritée de Jean-Baptiste Say et d'Adam Smith, l'individu est avant tout un consommateur qui n'arrive jamais à satiété, qui ne travaille que pour gagner l'argent nécessaire à satisfaire ses envies, et qui ne se sent lié aux autres que par les contrats, explicites ou implicites, qu'il a passés avec eux, le rôle de l'État étant de les faire respecter. Dans cette approche, les entreprises sont des organisations dont le seul objectif est de faire du profit : c'est le meilleur moyen, par des échanges marchands et partant d'une répartition des richesses donnée, de servir au plus grand nombre de

consommateurs possible les produits qu'ils désirent et à moindre coût. Une certaine définition de l'optimum social, en somme.

Dans cette modélisation du monde, les valeurs classiques de l'éthique, comme la justice, ou de la citoyenneté, comme la solidarité, sont évaluées comme superflues, voire dangereuses. Friedrich Hayek n'hésite pas à intituler un de ses livres *Le mirage de la justice sociale* (1977). Gary Becker, prix Nobel d'économie exerçant à l'université de Chicago, modélise quant à lui le comportement humain comme une série de calculs et revendique l'universalité de cette approche jusqu'au domaine le plus intime de la vie privée dans son *Traité de la famille* (1993).²⁰

La Grande Accélération, aboutit donc, non seulement à une explosion de la production industrielle et de son emprise sur la nature, mais à une théorie cohérente et complète, qui va de l'analyse des comportements individuels aux recommandations macroéconomiques, dont la première est de faire croître le PIB. Dans ce cadre théorique, le moteur de cette croissance est la recherche du profit pour les entreprises, et de la prospérité matérielle pour les individus. Le processus identifié par Max Weber touche à son terme : la référence à la religion est abandonnée et la prospérité matérielle est dorénavant recherchée pour elle-même. « *Greed is good* » proclame le héros du film *Wall Street* (1987) : la cupidité (comme moyen individuel et collectif de maximiser la production matérielle) est bonne.

²⁰ — Dans un livre qui influença profondément la pensée économique, *The Economic Approach to Human Behavior* (1978), Gary Becker illustre sa théorie du comportement individuel calculateur de nombreux exemples de la vie quotidienne.



Résumé

- ♦ Les modes de vie ont radicalement changé au cours des 200 dernières années, et plus rapidement encore au cours de la deuxième moitié du 20ème siècle.
- ♦ La consommation d'objets matériels satisfaisant des besoins toujours renouvelés par la publicité a entraîné une aisance matérielle et une production de déchets d'ampleur inédites, qui relègue les êtres vivants naturels à l'arrière-plan de la vie quotidienne.
- ♦ Les imaginaires collectifs sont marqués par l'affranchissement des limites planétaires, tant en termes d'espace accessible que de puissance et de domination des phénomènes naturels.
- ♦ Les héritiers de Jean-Baptiste Say et d'Adam Smith ont construit une théorie économique, dite « néo-classique », suivant laquelle les êtres humains sont avant tout des consommateurs, qui ne sont liés que par leur intérêt individuel.
- ♦ Suivant cette théorie, les entreprises n'ont à se donner pour objectif que de maximiser leur profit financier.

Conclusion

Comment les choses peuvent-elle (ou non) changer ?

Nous voilà au terme de notre voyage-express pour saisir les principales transformations sociales des 500 dernières années à l'origine des bouleversements écologiques du 21ème siècle. Des ouvrages entiers sont consacrés à chacun des sujets abordés, et certainement en avons-nous négligé d'autres, pourtant importants. Tout cela en ayant conscience que les sciences sociales font davantage débat que les sciences expérimentales comme la physique ou la biologie (du moins pour ce que nous avons besoin d'en dire dans ce cours !).

Avec quoi repartons-nous ?

D'abord avec la certitude que systèmes techniques (sources d'énergie, méthodes de production, outils) et systèmes sociaux (modèles économiques, cadres juridiques, courants idéologiques) sont indissociables. Sans pétrole ou gaz naturel, probablement pas d'explosion du PIB mondial. Sans commerce international catalysé par la levée des barrières douanières, probablement pas d'explosion du PIB non plus ! Et par analogie : sans recherche sur les énergies renouvelables, pas de réduction du réchauffement climatique. Mais sans incitation économique à réduire les émissions de CO₂ (comme une taxe carbone ou un marché volontaire de crédits carbone), pas de réduction du réchauffement non plus !

L'Histoire brossée dans ces deux chapitres se révèle par ailleurs faite à la fois de grandes lois et régularités, mais aussi de décisions humaines inattendues et aux grandes conséquences, et nous pouvons apprendre des deux. Du côté des régularités à garder à l'esprit pour s'attaquer aux dérèglements environnementaux, nous avons vu par



exemple que les sources d'énergie se cumulent et ne se supplantent pas. Le pétrole n'a pas remplacé le charbon, le gaz n'a pas remplacé le pétrole. Au contraire, les consommations de charbon, de pétrole et de gaz ont toutes augmenté au cours du 20ème siècle. Autre régularité instructive : l'amélioration des rendements a toujours entraîné une augmentation et non une diminution de la consommation.

Mais l'Histoire est aussi mue par des décisions humaines aux lourdes conséquences qui ne semblent ni prédéterminées, ni prévisibles, ni entièrement intentionnelles. Il en est ainsi du PIB comme boussole des politiques publiques. Rien ne l'y destinait : il avait été conçu pour piloter une industrie de guerre. Pourtant, toute la période de la Grande Accélération a été guidée par la recherche de la croissance du PIB. Puisque celui-ci n'est pas ancré dans des indicateurs de bien-être et qu'il ne tient compte ni de la déplétion des ressources naturelles (épuisement des mines et des terres arables, extinction des espèces vivantes), ni des nuisances associées à la quantité de biens fabriquée (pollution, émissions de GES), ni de la distribution des richesses et de ses conséquences sociales, il n'est pas étonnant que les considérations environnementales se concilient aujourd'hui difficilement avec les politiques économiques.

Mais nous pouvons aussi formuler cette idée autrement : choisir aujourd'hui une autre boussole amènera d'autres grandes conséquences ! Plus généralement, c'est justement parce qu'on peut apprendre des régularités historiques et prendre des décisions humaines aux grandes conséquences qu'agir a du sens. Nous ne sommes pas désarmés devant le dérèglement climatique et la perte de biodiversité, nous pouvons tout à fait infléchir le cours des choses. Les choses furent infléchies au moment de l'abolition de l'esclavage sous l'action combinée de militants, courants idéologiques, incitations économiques, rivalités politiques, innovations techniques.²¹ Elles le furent à nouveau dans la

seconde moitié du 20ème siècle, par la création d'un marché mondialisé et la transformation des modes de vie qui l'a accompagnée. Elles le seront encore à mesure que s'enclenchera la transition écologique, et il vous reviendra de savoir où et comment y contribuer !

21 — Voir <https://www.lhistoire.fr/le-si%C3%A8cle-des-abolitionnistes>



Conclusion

Notre époque est marquée par l'accélération. En 1970, nous étions deux fois moins d'habitants sur la Terre. Internet n'existait pas, il n'y avait ni smartphones, ni GAFAM, ni traders. La planète aussi change, et elle change même très vite. Ce n'est pas la première fois que le climat se réchauffe et que des espèces s'éteignent, mais c'est la première fois que cela se passe sur quelques dizaines d'années seulement, plutôt que sur des centaines de milliers.

Peut-être pourrions-nous nous arrêter là, et laisser les choses suivre leur cours. Certains biologistes disent que l'espèce humaine a fait le travail qu'elle devait faire en tant qu'espèce, qu'elle a occupé tout l'espace écologique que ses qualités propres et son industrie lui ont ouvert, qu'elle rencontre maintenant les limites de cet espace, et qu'il lui arrivera ce qui est arrivé avant elles à toutes les espèces proliférantes : la pénurie de moyens de subsistance (aliments, eau potable, air respirable, terres arables, minerais) ainsi que les pandémies favorisées par l'accroissement et l'entassement de la population, qui conduiront à un effondrement de celle-ci. Certains économistes considèrent que les individus sont motivés uniquement par leur intérêt personnel bien compris, ce qui rend difficile toute action collective sur un problème de l'ampleur des bouleversements environnementaux actuels, et nous condamne à l'impuissance.

Vraiment ?

Ces scénarios sont certes possibles, mais ce ne sont pas les seuls. Le monde est complexe et les scénarios les plus simples ne sont pas les plus probables. Les êtres humains ne sont pas des animaux comme les autres, et au cours de leur histoire ils ont montré qu'ils étaient capables de renverser le cours des choses. L'abolition de l'esclavage, soutenue par des campagnes menées par quelques activistes au nom de l'éthique et d'une certaine conception de l'humanité, a triomphé alors qu'elle affrontait des intérêts économiques et politiques en place importants. Nous sommes à un moment semblable de l'histoire, où certains intérêts économiques et politiques en place s'accrochent au « Business as usual », alors que nos sociétés sont traversées de forces de changement grandissantes qui poussent vers le sevrage des énergies fossiles et la restauration des cycles naturels. Sur quoi peuvent-elles s'appuyer pour motiver un tel changement ?

1. Vivre !

Vouloir vivre, c'est la condition-même de l'existence, c'est le degré zéro de la réflexion. C'est le point commun des êtres vivants, qui tous luttent pour leur survie. Darwin en a fait une science, Spinoza en a fait une philosophie : « Toute chose veut persévérer dans l'être »¹ écrit-il. C'est ce désir de vivre qui nous fait nous lever tous les matins pour affronter la journée, et nous pousse à réaliser nos rêves et nos ambitions.

Mais qui est ce « nous » ? Le célèbre poème de John Donne (1572-1631) apporte un éclairage fondamental :

¹ — Voir Spinoza, Ethique, III, Prop. 6



<i>No man is an island,</i>	Personne n'est une île
<i>Entire of itself.</i>	Repliée sur elle-même
<i>Each is a piece of the continent,</i>	Chacun est un bout de continent,
<i>A part of the main.</i>	Un morceau du tout.
<i>If a clod be washed away by the sea,</i>	Si la mer emporte une motte de terre,
<i>Europe is the less.</i>	L'Europe en est diminuée.
<i>As well as if a promontory were.</i>	Comme si c'était un promontoire.
<i>As well as if a manor of thine own</i>	Comme si c'était ta maison
<i>Or of thine friend's were.</i>	Ou celle de ton ami.
<i>Each man's death diminishes me,</i>	La mort de tout homme est une perte pour moi
<i>For I am involved in mankind.</i>	Car je participe à toute l'humanité.
<i>Therefore, send not to know</i>	C'est pourquoi, quand sonne le glas,
<i>For whom the bell tolls,</i>	N'envoie jamais demander pour qui.
<i>It tolls for thee.</i>	Il sonne pour toi.

Les auteurs de ce cours, formés dans la tradition occidentale et à la théorie économique néo-classique, ont tendance à faire de l'individu une île repliée sur elle-même : il pourrait vivre seul, comme Robinson Crusoé. Mais c'est une grave erreur : c'est la société qui fait de nous des êtres humains. Descartes, au début du *Discours de la Méthode*, le dit ainsi : « nous avons tous été enfants avant d'être hommes ». Quatre siècles plus tard, l'anthropologue David Graeber écrit « il faut en général beaucoup de travail pour faire d'un nouveau-né une personne — quelqu'un qui a un nom, des relations sociales (mère, père, ...) et une demeure, quelqu'un envers lequel d'autres ont des responsabilités, et dont on peut attendre qu'un jour il ait lui-même des responsabilités

envers elles ».² Dans les sociétés occidentales, ce travail est en grande partie le rôle de l'État, à travers l'état civil et l'éducation. Mais pas seulement : il y a la famille, les copains et les copines, les réseaux sociaux, qui transmettent les valeurs du groupe social. Une fois l'âge adulte atteint, le processus continue : la publicité nous oriente dans ce que nous allons désirer, et les médias dans ce que nous allons penser.

Le lien social est donc fondamental dans la construction de l'individu. Il existe plusieurs manières pour les sociétés de le construire et de l'entretenir. Dans beaucoup de sociétés, dont la société chinoise classique, les rites jouent un rôle essentiel. Dans les sociétés occidentales, depuis l'empire romain, c'est le droit qui prime : c'est lui qui fait du nouveau-né un adulte majeur et responsable, une personne juridique, insérée dans un tissu de droits et d'obligations réciproques.

Que ce soit par les rites ou par le droit, la société nous oblige à reconnaître que nous sommes solidaires, que nous avons des obligations les uns envers les autres, et que le sentiment d'empathie que nous éprouvons envers autrui n'est pas seulement normal, mais est une obligation. Le droit peut ainsi contraindre, et l'obligation juridique est inconditionnelle : *pacta sunt servanda*, c'est-à-dire « il faut respecter les engagements ».

2. Vivre collectivement

L'Histoire montre que certaines sociétés n'ont pas démontré ce même sens du vouloir-vivre. Avez-vous en tête le sort des indigènes de l'île de Pâques ? Ils sont arrivés sur une île luxuriante, et en quelques siècles ils l'ont entièrement déboisée. Sans bois, plus possible de faire de canots, plus possible de quitter l'île ou même de pêcher. C'est une population misérable qu'ont trouvée les navigateurs européens, vivant au milieu des statues renversées.³ La société pascuane s'est littéralement sui-

² — « The utopia of rules », Melville House, 2015, p. 51

³ — Voir https://www.persee.fr/doc/jso_0300-953x_1998_num_107_2_2053.

cidée en détruisant son environnement. Alors quels sont les moyens qui permettent de faire remonter le vouloir-vivre au niveau collectif ?

Trop souvent on ne pense qu'aux incitations financières, c'est-à-dire qu'on s'imagine que pour que les gens fassent quelque chose, ou ne le fassent pas, il faut qu'ils y trouvent leur intérêt. Mais il y a bien d'autres moyens d'action, des normes culturelles à l'arsenal juridique, par lesquels notre société peut manifester ses préoccupations profondes é, comme son désir de survie. Suivant une expression ancienne, mais célèbre, « on lie les bœufs par les cornes, et les hommes par la parole. »⁴ Voilà des ressorts et un levier d'action à ne pas oublier pour agir dans les bouleversements climatiques en cours !

L'une des oppositions classiques à la capacité de s'orienter collectivement tient à « la tragédie des communs », selon l'expression de l'écologue américain Garrett Hardin. Prenant l'exemple de deux paysans exploitant la même parcelle de terrain pour y faire brouter leurs vaches, celui-ci analyse les difficultés du partage d'une ressource limitée et libre d'accès : il lui semble inévitable que chacun surexploitera la ressource pour maximiser son profit individuel (faire brouter davantage de vaches même si cela ne donne pas assez de temps à l'herbe pour repousser). On retrouve la même tension entre entreprises ou pays qui, collectivement, auraient intérêt à modérer leurs émissions de GES mais, individuellement, les laissent croître pour augmenter leur production.

Économiste célèbre, Elinor Ostrom, a apporté un contre-éclairage essentiel à cette idée. Formée à la sociologie, l'anthropologie et à l'observation de terrain, elle fait observer que souvent, dans la vraie vie, les deux paysans se parlent ! Ils se connaissent, peuvent discuter du danger que fait courir une surexploitation de la ressource et concevoir des règles de fonctionnement pour aligner leurs intérêts plus

4 — Voir Antoine Loysel, 1607.

durablement. En d'autres termes, la rationalité, tant individuelle que collective, n'est pas innée ni inaltérable : elle se construit, et les sociétés humaines mobilisent de nombreux cadres (religieux, culturels, juridiques, éthiques...) pour se créer des règles de comportement individuelles et collectives qui préservent "au mieux" leurs intérêts dans le temps long. Le faire entre entreprises ou pays est évidemment un immense défi, mais il n'est pas vain !

En outre, l'éthique et le droit sont liés à l'idéal de justice. Et au cri de « c'est injuste ! » on a soulevé des foules et fait des révolutions. Est-ce que cela vous choque que les hommes gagnent 28,5% de plus que les femmes, dont 9 % à poste et compétences égales ?⁵ Que le PIB par habitant soit de 63 000 \$ aux États-Unis et de 1 000 \$ en République Démocratique du Congo⁶ ou qu'en 2017, les 8 personnes les plus riches du monde possédaient autant que les 3,6 milliards les plus pauvres ?⁷

Il y a aussi des inégalités devant le réchauffement climatique, qu'on pourrait considérer injustes. D'après le GIEC, si l'on veut avoir deux chances sur trois de maintenir le réchauffement à 2°C ou moins en 2100, il ne reste plus que 900 milliards de tonnes à émettre d'ici là. Cela veut dire que les générations présentes ont dépensé le capital des générations futures sans demander leur avis. Et dès aujourd'hui, les riches émettent beaucoup plus que les pauvres. Les pays les plus riches abritent 50 % de la population mondiale, mais sont responsables de 86 % des émissions de CO₂. Si ces inégalités vous choquent, c'est que vous vous sentez solidaires de tous les êtres humains, y compris de ceux qui ne sont pas encore nés et vous pourrez faire levier de ce sentiment d'injustice.

5 — <https://www.oxfamfrance.org/inegalites-et-justice-fiscale/comprendre-et-combattre-inegalites-femmes-hommes/>

6 — https://www.inegalites.fr/L-inegalite-des-revenus-dans-le-monde?id_theme=26

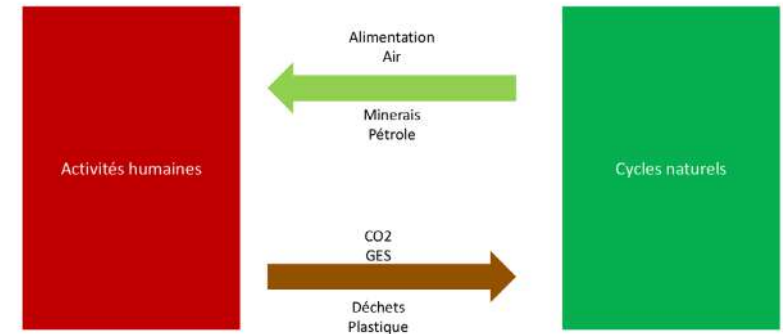
7 — <https://policy-practice.oxfam.org/resources/an-economy-for-the-99-its-time-to-build-a-human-economy-that-benefits-everyone-620170/>

Ce qui est considéré comme injuste et suscite l'indignation varie d'un individu à l'autre, mais le droit constitue un socle, qui fige en quelque sorte les valeurs d'une société, et qui permet à ses membres de travailler ensemble pour une certaine idée du bien collectif. Cette représentation commune change avec le temps et en fonction des pays, ce qui lui permet de s'adapter à de nouvelles situations. On peut travailler à la faire évoluer, mais tant qu'elle est en vigueur elle s'impose à tous, car le droit peut faire appel à la force, pour imposer ses décisions. Notez que la force en question est aujourd'hui presque exclusivement nationale : il existe un droit international, avec ses tribunaux, mais ils ne disposent pas du pouvoir de contrainte, et leurs décisions n'ont en conséquence d'autre pouvoir contraignant que la bonne volonté des États chargés de les appliquer.

Finalement, les crises environnementales — réchauffement climatique et perte de biodiversité en tête — nous poussent à reconsidérer nos valeurs et notre idéal de justice. Reste ensuite à les inscrire dans le droit pour les faire monter au niveau de la société et en faire des moyens d'action collective.

3. Vivre dans la nature

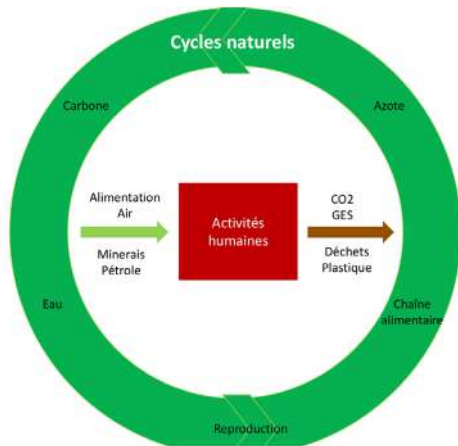
Pour vivre véritablement en êtres humains, il nous faut encore intégrer une dernière idée essentielle. Pas plus que les individus dans la société, les sociétés humaines ne sont des îles repliées sur elles-mêmes, vivant indépendamment du reste des non-humains. Ce sont plutôt des clairières dans une vaste jungle, où elles puisent et échangent des ressources et d'où le danger peut sortir à tout moment. Nous ne vivons pas de la nature, nous vivons dans la nature ! En Occident, nous avons vécu pendant des siècles en mettant d'un côté une société humaine existant par elle-même, et de l'autre une nature dans laquelle elle peut puiser et rejeter à volonté.



Durant la Grande Accélération, les pays occidentaux ne se sont intéressés qu'à la boîte rouge de gauche, en cherchant à la faire fonctionner de plus en plus vite, et sans tenir compte des flux entrants et sortants qu'elle prélevait et qu'elle rejetait dans le grand cycle de la vie planétaire.

À voir cette image, on croirait que nous envoyons nos déchets sur la Lune ! Non : c'est ici-bas que cela se passe.

Pour revenir sur Terre, il faut remplacer cette image simpliste par celle d'une humanité insérée dans de multiples cycles naturels, dont elle dépend pour son existence. Ce sont des flux qui lui ramènent ce qu'elle rejette, qu'elle modifie très rapidement, mais qu'elle est encore très loin de comprendre dans toute leur complexité. Puisque les crises sur lesquelles s'ouvre le 21^{ème} siècle montrent que le modèle dissocié précédent a atteint ses limites, il faudra trouver d'autres règles de fonctionnement mieux adaptées à ces grands cycles et prenant en compte la dépendance entre humains et non-humains. Éviter par exemple de s'en remettre au marché mondialisé pour résoudre les problèmes qu'il a lui-même créé, ou de penser que la recherche exclusive du profit conduira les entreprises à repenser leur chaîne de production pour reconstituer les stocks qu'elles prélèvent et pour diminuer les déchets qu'elles rejettent.



4. Les voies et les forces de changement

Renouveler les motivations des uns et des autres implique donc d'agir sur l'éducation, la culture et le cadre juridique. Le droit va devoir évoluer pour refléter les nouvelles valeurs qui apparaissent à mesure que les citoyens prennent conscience de l'ampleur de la crise, et que les nouvelles générations affirment de plus en plus fort leur volonté de vivre. Les États vont devoir mettre au premier plan les préoccupations environnementales, ne serait-ce que pour préserver leur territoire et la vie de leurs citoyens, et les traduire dans la loi. Les entreprises vont devoir intégrer dans leurs critères de performance d'autres préoccupations que la valeur de leurs actions, et les États d'autres indicateurs que le PIB. Le modèle actuel de l'entreprise, orienté vers des profits financiers à court terme, devra changer pour associer d'autres acteurs, orientés vers la survie à long terme, et l'État devra contraindre l'industrie à réduire les émissions de GES et à préserver la biodiversité, par exemple en introduisant une taxe carbone dans le cadre d'une réforme générale de la fiscalité.

Observons que le droit actuel a hérité du droit romain une faiblesse congénitale : il ne règle que les relations entre les personnes humaines.

Les animaux, les plantes, les choses, n'en font pas partie. Jusqu'à tout récemment, les responsables d'une marée noire, par exemple, ne pouvaient être poursuivis que dans la mesure où celle-ci lésait les intérêts d'une personne, un ostréiculteur par exemple, dont la récolte était détruite : la pollution de la plage ou la destruction des oiseaux de mer n'intéressaient pas le droit. Le droit est donc appelé à évoluer sur ce plan-ci, et il le fait d'ailleurs déjà, de manière variée suivant les pays : en France, c'est par l'introduction progressive de la notion de préjudice écologique, en Nouvelle-Zélande et au Canada, c'est en accordant à des rivières la personnalité juridique. Cela ne résout pas toutes les questions (qui peut porter plainte ? qui peut parler au nom de la rivière ?), mais ce n'est qu'un début.

Enfin, derrière tout cela, bien sûr, il y a des mouvements citoyens, portés notamment mais pas uniquement par les jeunes générations. Certains d'entre nous croient revivre la révolution numérique de la dernière décennie du 20ème siècle (eh oui, l'internet a moins de trente ans !). Cette révolution s'est passée très vite, et très peu de responsables et experts l'avaient vue venir ! Elle est venue d'en bas, portée par des jeunes, des chercheurs, des pionniers, des marginaux, qui avaient compris la situation et proposaient de nouvelles pistes pour l'avenir, prenant de cours la vieille génération. Sans doute que c'est cela qui se passera une fois de plus. Poussées par le désir de vivre, les jeunes générations réinventeront l'avenir, vers une économie durable et solidaire, fondée sur le désir de justice et le respect de la nature.



