

Guillaume Blanc et Camille Noûs

PHYSIQUE ET ENJEUX DE SOCIÉTÉ

*Radioactivité, réchauffement climatique,
énergie, ondes électromagnétiques et santé*



Physique et enjeux de société
Radioactivité, réchauffement climatique, énergie,
ondes électromagnétiques et santé

Illustration de couverture :

Extrait de la figure 3.7 illustrant le rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère.

Crédit : Julia Fraud, <http://www.julia-fraud.com/>



Physique et enjeux de société

Radioactivité, réchauffement climatique, énergie, ondes électromagnétiques et santé

Guillaume BLANC

 <https://orcid.org/0000-0003-4109-726X>

Université Paris Cité, Université Paris Saclay, CNRS,
Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie, IJCLab,
91405 Orsay, France

Camille Noûs

Laboratoire Cogitamus

Université Paris Cité 2023





<https://doi.org/10.53480/physique-societe.b046>

ISBN : 978-2-7442-0207-0 (imprimé)
ISBN : 978-2-7442-0208-7 (pdf)

© Guillaume BLANC 2023



Ouvrage publié sous licence Creative Commons Attribution License CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve que la publication originale soit correctement citée : BLANC Guillaume & Noûs Camille, *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.b046>

La licence CC BY s'applique à l'ensemble de l'ouvrage sauf mentions contraires.

- La licence CC BY ne s'applique pas aux images reproduites avec la permission d'un tiers et soumises au droit d'auteur. Les images concernées sont identifiables par la mention en légende, du symbole © suivi de la désignation de l'ayant droit.
- Si une image est soumise à un autre régime de licence, celui-ci est mentionné en légende.

	https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/
	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/
	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
CC0 (domaine public)	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/
Licence Ouverte	https://www.etalab.gouv.fr/licence-ouverte-open-licence/

Note de l'éditeur : cet ouvrage comporte un ensemble d'hyperliens vers des pages de sites internet. Leur validité ainsi que l'accès aux informations correspondantes ont été contrôlés en date du 1er février 2023.

Pourquoi Camille Noûs ?

« Camille Noûs » est un consortium scientifique créé début 2020 par le collectif de chercheur·euse·s ROGUEESR¹ pour affirmer le caractère collaboratif et ouvert de la création et de la diffusion des savoirs, sous le contrôle de la communauté académique². Cette personnalité incarne le caractère collectif de la production scientifique et dans le cas présent de sa diffusion. Camille Noûs est appelé·e à signer l'ensemble des publications scientifiques mais aussi les documents permettant la diffusion des connaissances scientifiques, tel cet ouvrage.

Camille Noûs se veut ainsi l'antithèse de la course individualiste et managériale aux indicateurs quantitatifs bibliométriques comme le *h-index*³.

Ce manuel est le fruit d'un travail de bibliographie et d'agrégation de connaissances de longue haleine, dans le but de mieux les partager avec, en particulier, les étudiant·e·s. Je souhaite que Camille Noûs le co-signe, d'une part parce que le savoir présenté est également le fruit d'une lente et collective construction ; d'autre part parce que malgré le travail que ces supports demandent, un cours, un manuel de cours, comme n'importe quelle production de matériel d'enseignement, ne sont pas reconnus comme productions scientifiques en tant que telles. Or la synthèse méthodique des connaissances sur un sujet particulier contribue pourtant à l'édifice commun de production et de diffusion du savoir. À ce titre, il me paraît légitime à la fois que ce type de contribution soit reconnu à sa juste valeur, et que Camille Noûs, en tant qu'incarnation du caractère collectif du savoir produit, en soit également l'auteur et l'autrice⁴.

Guillaume Blanc

1. Voir <http://rogueesr.fr/>

2. Voir <http://www.cogitamus.fr/>

3. Le *h-index* est un indice bibliométrique permettant de quantifier à la fois le nombre de publications d'un chercheur et le nombre de citations par d'autres travaux de ces mêmes publications. Cela, en niant toute qualité à la production scientifique.

4. Camille Noûs n'est pas généré·e, et incarne tout autant la chercheuse, le chercheur, l'enseignante-chercheuse que l'enseignant-chercheur. Plutôt réticent à utiliser jusque-là l'écriture dite *inclusive*, mais surtout l'un de ses avatars, le point médian « · », le podcast *Écriture inclusive : pourquoi tant de haine ?* de la linguiste Laélia Véron dans la série *Parler comme jamais* sur *Binge Radio* (<https://www.binge.audio/podcast/parler-comme-jamais/ecriture-inclusive-pourquoi-tant-de-haine>) m'a finalement convaincu du bien-fondé de la démarche.

Remerciements

Je remercie l'UFR de Physique de l'université Paris-Diderot (puis Université Paris Cité) de m'avoir permis de dispenser le cours dont est tiré ce manuel. Je me rends compte qu'il a orienté, au fil des années, nombre de réflexions qui ont petit à petit changé mon activité de recherche. De l'étude de l'énergie noire à l'aide de galaxies lointaines, j'en suis venu aux transitions écologiques, entre énergie grise et empreintes environnementales. Une démonstration éclatante de la synergie entre enseignement et recherche, l'un et l'autre se nourrissant mutuellement, y compris en ce qui concerne les enseignements de Licence.

J'ai essayé d'appliquer l'évaluation par les pairs pour ce manuel, même si l'exercice est singulier et peu valorisé, en tout cas sur une autre dimension que le processus classique et nécessaire de revue pour la publication de nouveaux résultats scientifiques. Je remercie ainsi les collègues qui ont bien voulu relire tout ou une partie de l'ouvrage, à différents stades de son élaboration, et qui m'ont ainsi fait des retours ayant permis de l'améliorer substantiellement : Jérémy Attard (collectif CORTECS), Sandra Bouneau (laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie), Sylvain David (laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie), Jean-Louis Dufresne (laboratoire de météorologie dynamique), Catherine Even (laboratoire de physique des solides d'Orsay), Dominique Gosset (département des matériaux pour le nucléaire, CEA Saclay), Yves le Dréan (Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail), Stéphane Plaszczyński (laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie), Sébastien Wurth (laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie), Pascal Yiou (laboratoire des sciences du climat et de l'environnement).

Je remercie également les différentes promotions d'étudiant-e-s qui m'ont permis d'améliorer ce document grâce à leurs remarques et questions, les discussions que nous avons pu avoir.

Malgré tout, subsistent nécessairement des erreurs : je m'en excuse, elles sont évidemment de mon seul fait.

Je remercie Christophe Pion du service des bibliothèques d'Université Paris Cité qui a choisi mon manuel de cours pour une première édition de monographie au sein d'une plateforme expérimentale d'édition scientifique numérique.

Je remercie également l'équipe éditoriale, Maxence Larrieu et Vincent Colpin qui ont fait un travail colossal pour rendre ce document publiable, qui ont su me pousser avec délicatesse pour éviter que le processus ne s'éternise. Quand on élabore naïvement ce type de ressource pédagogique, il y a beaucoup de notions, comme celle de licence, de forme, d'illustrations, de références, qui passent facilement à la trappe par méconnaissance. J'ai ainsi appris qu'il pouvait y avoir tout un univers entre un document pédagogique présenté aux étudiants, et un livre publié. Merci, enfin, à Julia Fraud qui a accepté de travailler avec un physicien et ses contraintes parfois en dehors de la réalité artistique mais qui a réussi à rendre cet ouvrage un peu moins austère par son talent.

Introduction

BLANC Guillaume & NOÛS Camille, Introduction, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.eab7ff>



Un constat

Nous vivons à une époque où la science et la technologie dominent les différentes strates de notre société. Et pourtant, de nombreuses croyances perdurent, la foi en la science paraît s'effriter au profit d'un certain dogmatisme, la faute, peut-être entre autres, à l'amalgame entre la science qui est une somme de connaissances, et la technologie qui est l'application que l'humanité en fait, mais aussi à un certain anti-conformisme qui voudrait se démarquer des réalités ou vérités considérées comme dominantes. Les médias (radio, télévision, presse, internet) regorgent d'informations peu fiables, colportent des nouvelles fausses, souvent alarmistes, prétendent au relativisme¹ malgré le consensus scientifique.

L'université forme des citoyen·ne·s avec une certaine culture scientifique, un « bagage » standard dans les principaux domaines où œuvrent les enseignant·e·s-chercheur·euse·s. Néanmoins, on peut se rendre compte que des étudiant·e·s en master de physique évoquent certaines idées trouvées dans les médias, comme par exemple les machines à énergie libre, sans le recul critique que leur formation aurait dû leur apporter. Il semble manquer une clef pour utiliser les connaissances accumulées dans une approche critique.

Qu'est-ce que l'esprit critique ?

Il y a différents aspects dans « l'esprit critique » : une formation universitaire de physique fournit aux étudiant·e·s des outils pour critiquer² des résultats liés à la physique, ordres de grandeur, logique d'une démonstration « théorique », homogénéité des expressions mathématiques, adéquation entre les modèles et les expériences, incertitudes expérimentales, etc. Cet outillage est nécessaire à tout·e scientifique.

Néanmoins, un·e citoyen·ne éclairé·e doit aussi être capable d'interagir en société de manière rationnelle, c'est-à-dire comprendre les débats de société et y participer en connaissance de cause. Les deux aspects de l'esprit critique, scientifique et citoyen, sont souvent disjoints, les scientifiques possèdent le premier, ont des facilités pour le second, mais pas toujours. Un·e citoyen·ne non scientifique, sans connaître la science, peut œuvrer en société avec un esprit

1. Le relativisme a pour postulat que toutes les formes de connaissances se valent et qu'il n'existe pas de vérité absolue : les différents points de vue se valent et sont équivalents, ils sont donc subjectifs. Richard Dawkins critique le relativisme de manière sarcastique dans son livre *Le fleuve de la vie : Montrez-moi un relativiste culturel à 30 000 pieds et je vous montrerai un hypocrite. Les avions sont construits selon les principes scientifiques et ils fonctionnent. Ils restent en l'air et ils vous amènent à une destination choisie. Ce que ne font pas les avions construits selon des spécifications tribales ou mythologiques tels que les avions factices des cultes Cargo dans les clairières de la jungle ou les ailes d'Icare en cire d'abeille.*

2. Critiquer s'entend ici dans le sens d'*Exercer son intelligence à démêler le vrai du faux, le bon du mauvais, le juste de l'injuste en vue d'estimer la valeur de l'être ou de la chose qu'on soumet à cet examen.* Et non dans le sens qui consiste à *Émettre, formuler des jugements défavorables, d'une façon systématique ou occasionnelle* (source : CNRTL, <https://www.cnrtl.fr/definition/critiquer>).

critique, tout au moins au sein des débats ne nécessitant pas de connaissances scientifiques pointues.

Se forger un esprit critique citoyen nécessite d'une part de prendre conscience d'un certain nombre d'aspects liés à notre psychologie, les « biais ³ cognitifs » : notre cerveau est entraîné à prendre des décisions en permanence, sans réfléchir. Mais ce faisant, dans certaines situations, il se trompe. Il faut donc en avoir conscience pour pouvoir faire machine arrière et enclencher un processus de réflexion permettant de prendre alors la « bonne » décision (Kahneman 2012). Le psychologue Olivier Houdé définit l'intelligence comme l'inhibition de nos automatismes ⁴.

Il existe par ailleurs de nombreux autres mécanismes au sein de la société qui peuvent engendrer et propager des fausses informations : l'amplification des flux d'information par l'intermédiaire d'internet, une défiance envers les institutions officielles, ou encore les marchands de peur et de doute, entre autres.

L'esprit critique (Caroti 2020) pourrait ainsi se résumer à l'appréciation d'une information par rapport aux faits sur lesquels elle repose. Cela est vrai dans n'importe quelle situation, en particulier journalistique. Cette appréciation n'est possible qu'en ayant connaissance des faits. En science – comme dans tous les autres domaines – cela n'est possible qu'avec les connaissances adéquates.

Souvent la notion d'esprit critique s'apparente à celle de scepticisme. Être sceptique devant un résultat est un état d'esprit sain pour le scientifique. Mais on ne peut pas être systématiquement sceptique et vérifier toute information. Le mathématicien Henri Poincaré dans l'introduction de son ouvrage *La science et l'hypothèse* (Poincaré 1917) mentionne que : *Douter de tout ou tout croire, ce sont deux solutions également commodes, qui l'une et l'autre nous dispensent de réfléchir*. L'esprit critique est donc une situation au milieu de ces deux postures extrêmes, qui nécessite un travail de recherche et de réflexion.

Des connaissances pour les débats de société

Se faire une idée objective quand une technologie ou un domaine scientifique sont amenés dans le débat public, souvent par médias interposés, parce que cette technologie ou ce domaine scientifique ont des applications en termes de santé, de politique, etc., n'est pas aisé, chacun ajoutant des éléments souvent peu objectifs et se référant à son univers dogmatique. Il est donc nécessaire de savoir comment la science produit de la connaissance, comment fonctionne le processus de publication scientifique, quelle est l'échelle de temps de cette production, à savoir, quand un résultat peut-il être considéré comme relativement sûr, comment se référer à cette production scientifique, si on peut lui faire confiance, dans quelle mesure, etc. Avoir une connaissance de cette méthode scientifique, de ce qu'est une science, par rapport à une non-science ou une pseudo-science est donc important. Savoir que la science est réfutable, qu'elle procède petit à petit par une succession d'essais et d'erreurs pour construire méthodiquement un ensemble de connaissances est primordial pour pouvoir comprendre les ingrédients d'un champ de connaissance scientifique.

La controverse scientifique est nécessaire à la construction de la science, comme l'est l'erreur : le débat permet de mettre à l'épreuve de la méthode les idées et les résultats. La controverse scientifique est ainsi une discussion argumentée au sein des scientifiques experts d'un domaine. La science se construit, en partie, dans le débat entre pairs. En revanche la controverse sociétale fait se rencontrer une multitude d'acteurs de la société avec différents niveaux d'expertise. Le débat n'est plus à niveau d'expertise égal, mais se trouve dévoyé et biaisé par des croyances ou des dogmes personnels.

3. Le terme « biais » a une connotation péjorative, vue comme un défaut, un travers. Il ne s'agit pas ici de cela, mais des écarts de raisonnement par rapport à la moyenne : ce que l'on appelle « biais cognitifs » sont des processus de prise de décision qui fonctionnent de manière optimale dans l'immense majorité des situations.

4. Voir par exemple l'émission *Les Savanturiers* sur France Inter le 11 mai 2019 (<https://www.franceinter.fr/emissions/les-savanturiers/les-savanturiers-11-mai-2019>)

La science est au cœur de nombreuses controverses sociétales, impliquant souvent des « risques » pour la santé ou l'environnement. Citons par exemple les OGM, les pesticides, les ondes électromagnétiques, les nanotechnologies, la vaccination, la radioactivité. Il y a également des controverses autour d'enjeux scientifiques déterminants pour l'avenir de la société, comme l'énergie, le réchauffement climatique, la biodiversité, les pollutions, etc. Il y a également des controverses autour de croyances liées à la culture scientifique, citons ce qui tourne autour du dessein intelligent, des moteurs à énergie libre, de l'astrologie, de la terre plate, des croyances alléguées à la Lune, etc.

Pour prendre part au débat il devrait être nécessaire d'avoir un minimum de culture scientifique dans le domaine en question, faute de quoi il ne peut y avoir de discussion et seules des positions doctrinaires, par définition non argumentées, peuvent exister. Dans les controverses sociétales faisant appel aux sciences physiques, nous nous focaliserons sur la radioactivité, le réchauffement climatique, l'énergie dans la société et les émissions de gaz à effet de serre, et enfin les ondes électromagnétiques et la santé.

Il faut néanmoins puiser avec précaution dans la « culture » scientifique. Dans les domaines où la connaissance est en construction, quand la science est en train de se faire, le corpus du savoir impliqué doit être utilisé avec circonspection. C'est en particulier vrai quand il s'agit de science liée à une technologie touchant à l'environnement et/ou à la santé, comme les pesticides. Il convient dans ce cas, comme dans d'autres, similaires, de ne pas prendre pour argent comptant les connaissances pré-digérées de certaines sources vulgarisatrices. Il a été montré que certains industriels peu scrupuleux pouvaient instiller du doute dans une connaissance établie en produisant un savoir minimisant les effets néfastes de leurs produits, amenant ainsi doute et confusion au sein d'un consensus scientifique. Cette stratégie de marchandisation du doute a été mise en place par les industries du tabac, et reprise par d'autres secteurs par la suite (chimie et pluies acides, CFC – chlorofluorocarbures – et trou dans la couche d'ozone...), dont le secteur pétrolier pour discréditer le consensus scientifique autour du réchauffement climatique (Oreskes & Conway 2012 ; Bonneuil *et al.* 2021). Elle a ensuite évolué pour utiliser – à leur insu ou non – les vulgarisateurs de tout poil, vidéastes, blogueurs, associations, pour disséminer leurs idées. Cela semble fonctionner très bien en particulier dans le domaine des pesticides (Andreotti & Noûs 2020 ; Foucart *et al.* 2020 ; Laurens 2019)⁵.

Il convient donc de choisir soigneusement les « passeurs de science », et, de manière générale, de se référer à la production primaire de savoir, c'est-à-dire les publications scientifiques dans les revues à comité de lecture.

Genèse

Ce manuel est issu d'un cours qui a vu le jour en septembre 2014 dans un cadre optionnel pour des étudiant·e-s en troisième année de Licence de physique à l'université Paris Diderot (devenue depuis Université Paris Cité). Il s'agit de 13 séances de 1 h 30. Au cours de 9 sessions (2014-2022), environ 240 étudiant·e-s ont suivi ce cours. Les trois premières années, les séances étaient un mélange de cours formels sur diapositives avec quelques exercices et discussions. La quatrième année, les étudiant·e-s devaient étudier le cours (sous forme de version papier des diapositives) chez eux pour améliorer les espaces de discussion et de travaux dirigés lors des séances. Pour la cinquième année, en 2018, j'ai écrit la première version de ce document, pour faciliter ce travail. De fait, les séances ont pu être pleinement dédiées à des exercices, des études de documents et des discussions ou débats.

Le fond a également beaucoup évolué par rapport aux débuts, la prise de recul quant à ces sujets est effectivement permanente, et une certaine remise en cause doit s'opérer continuellement.

5. Voir également le billet de blog : *La guerre de la raison*, Guillaume Blanc, décembre 2020, <http://gblanc.fr/spip.php?article751>.

La forme du cours dispensé a, elle, peu évolué. Outre le cours en lui-même, les étudiant-e-s doivent travailler sur un projet de recherche bibliographique. Un sujet à explorer en binôme est choisi dans une liste prédéfinie, avec au préalable une formation à recherche documentaire dispensée par les formateur-ric-e-s du service des bibliothèques. Ces projets permettent d'explorer des thématiques peu ou pas abordées dans le cours.

L'idée initiale de ce cours provient du constat que les médias (internet, radio, télé, presse écrite...) nous abreuvent d'informations souvent erronées sur certaines sciences physiques ou sur certaines technologies ayant trait à la physique comme le « nucléaire », le réchauffement climatique, l'effet des ondes électromagnétiques sur la santé, etc. Ces mêmes médias (en particulier internet) sont également prompts à propager certaines croyances autour, par exemple, des moteurs surnuméraires, de l'astrologie, de la sourcellerie, etc. La lecture du livre de Gérald Bronner *La démocratie des crédules* (Bronner 2013) m'avait servi de fil conducteur pour élaborer le premier chapitre. À l'époque, en 2014, il y avait peu d'ouvrages autour de l'esprit critique, et la thèse de Bronner paraissait séduisante. Depuis, les études autour de l'esprit critique ont fleuri, tout comme les ouvrages grand public autour de ces questions. Les critiques aussi. Après tout, comme nous le verrons dans le chapitre 1, la science progresse par étapes, par essais et erreurs : le débat et la critique sont au cœur de l'élaboration des connaissances scientifiques. La thèse de Gérald Bronner selon laquelle la propagation des croyances serait due en grande partie à internet commence à être battue en brèche (Attard 2021 ; Factsory 2021). Les tenants d'un enseignement de l'esprit critique à l'école sont également critiqués (Pontcerq 2022) notamment car la *méthode* employée est décorrélée de toute discipline (Farina *et al.* 2017 ; Farina *et al.* 2018 ; Attali *et al.* 2019), de tout savoir, comme une *compétence* transversale, et ce alors même que des disciplines comme les sciences cognitives ou la psychologie sociale sont à un stade de leur existence où les connaissances qu'elles élaborent autour de la notion d'esprit critique sont peu consolidées (voir la figure 1.3, page 23). Une *méthode* permettant de distinguer une page internet fiable d'une page non fiable décorrélée de tout savoir et de toute connaissance sur le sujet traité ne permet pas de conclure.

[...] C'est parce que nous sommes, via internet, en effet confrontés à une masse de textes et d'images dont il est difficile de juger de la fiabilité, qu'il devrait être nécessaire de savoir toujours plus, et dans un nombre de domaines toujours plus grand – si l'on veut être en mesure de diminuer autant que possible le risque d'être trompés. (Pontcerq 2022)

Ceci peut être élégamment illustré en regardant la page web de l'association des climato-réalistes⁶. Cette association regroupe des scientifiques de renom, elle publie des articles qui singent parfaitement les codes de la science, avec force références, argumentaires, etc. Sans connaissances *a priori* sur le climat et le réchauffement climatique, il est aisé d'y voir des idées en apparence solides. Ce n'est qu'en les confrontant avec les véritables connaissances scientifiques, notamment les rapports du GIEC, que l'on peut s'apercevoir de la fausseté des arguments avancés. Le « réalisme » prétendu, ou le « scepticisme scientifique » loué, sont ainsi dévoyés au profit d'une idéologie mortifère (car semant le doute sur un sujet de société d'une grande importance) niant le réchauffement climatique d'origine anthropique.

Essayer de comprendre les éléments de la discussion scientifique sur laquelle des décisions sociétales doivent être prises est un acte démocratique très fort : on passe d'un monde de croyance, à la merci de quelques personnalités dominantes, à un monde où chacun peut faire des choix éclairés. (Yiou 2015)

6. <https://www.climato-realistes.fr/>

Je voulais ainsi donner un bagage de connaissances minimales dans quelques domaines permettant d'en comprendre les enjeux et de se faire une opinion éclairée sur les débats de société qui en découlent : il s'agit des chapitres 2, 3 et 5, concernant la radioactivité, le réchauffement climatique et l'effet des ondes électromagnétiques sur la santé, respectivement. Néanmoins, je me suis rapidement rendu compte que cela ne suffisait pas, et qu'il fallait quelques éléments sur la méthode. J'ai donc élaboré le premier chapitre autour de la méthode scientifique.

Public visé

Cet ouvrage s'adresse à des étudiant-e-s scientifiques. Idéalement physicien-ne-s, mais ce n'est pas une condition impérative. Il s'adresse aussi à des enseignant-e-s souhaitant traiter de l'une ou l'autre de ces questions.

Objectifs

Les objectifs de ce manuel sont d'une part de donner quelques notions de physique sur des thématiques que l'on retrouve fréquemment dans les médias. D'autre part de comprendre comment la science se construit, et de donner des éléments pour aiguiser son esprit critique et utiliser internet le mieux possible.

L'idée est surtout de donner des *bases* qui, je l'espère, permettront ensuite d'approfondir les différentes notions présentées. J'ai essayé de donner des références nombreuses pour permettre cela : l'esprit critique ne s'aiguise pas ponctuellement à coups de livres et de cours, il n'y a pas de recette miracle, il faut l'entraîner en permanence.

Limites

Dans ce livre ne seront abordés (succinctement) que certains problèmes sociétaux liés à la physique ainsi que quelques notions permettant d'aiguiser son esprit critique.

Ne sera donc pas abordé ce qui concerne d'autres domaines de la science : gaz de schiste, OGM, créationnisme, pseudo-médecines, pesticides, pollutions chimiques, etc.

Néanmoins, les quelques clefs que je donne, en particulier dans le premier chapitre, devraient permettre de creuser ces autres sujets pour en avoir une idée éclairée. Attention, parvenir à cela n'est jamais immédiat, et demande du temps et du travail. Mais internet est aussi un outil utile dans ce cadre.

Plan

Le manuel se divise en cinq parties : la méthode scientifique, la radioactivité, le réchauffement climatique, l'énergie et le CO₂, les ondes électromagnétiques. Le chapitre sur l'énergie et le CO₂ ne fait pas partie du cours initial, il a été ajouté par souci de cohérence.

La méthode scientifique, internet, le principe de précaution

Il s'agit ici de définir ce qu'est la science et comment se construit la connaissance scientifique. La méthode scientifique est évoquée succinctement sans entrer dans les différents courants épistémologiques. La différence entre une connaissance scientifique et une connaissance non scientifique est néanmoins discutée. Quelques outils pour analyser un effet ou un phénomène sont proposés, provenant de la zététique, cette « science » qui vise à analyser selon le prisme de la méthode scientifique les phénomènes paranormaux. Quelques croyances sont évoquées succinctement : astrologie, sourcellerie, propriétés alléguées à la Lune, moteurs surnuméraires. Une mise en garde est faite sur l'utilisation d'internet, en particulier comme outil de propagation des croyances et de confortation des idées (biais de confirmation). Cette partie se termine sur une courte analyse du principe de précaution et de la notion de risque.

La radioactivité

Cette partie présente quelques notions de physique nucléaire sur les désintégrations radioactives, sur l'interaction des rayonnements ionisants avec la matière et en particulier la matière vivante. Des notions de radioprotection sont abordées, pour comprendre la différence entre l'activité d'un matériau radioactif, mesurée en becquerels et la dose reçue par un individu, mesurée en sieverts. Diverses applications de la radioactivité sont ensuite présentées, comme son utilisation en radiothérapie ou en contrôle non destructif. Enfin, la dernière section est consacrée au fonctionnement d'une centrale nucléaire.

Le réchauffement climatique

Enjeu environnemental majeur en ce XXI^e siècle, il semble indispensable que tout·e citoyen·ne, et *a fortiori* des étudiant·e·s en sciences, aient quelques notions sur la machine climatique, l'effet de serre, et le réchauffement climatique (Jouzel 2022). C'est pourquoi cette thématique figure dans ce cours. Seules quelques notions physiques sont abordées, comme le rayonnement et l'équilibre thermique.

L'énergie et le CO₂

En lien avec le chapitre précédent sur le réchauffement climatique, l'énergie est un enjeu majeur de nos sociétés. Concept physique par excellence, ce chapitre le décline dans ses liens avec la société actuelle. Sans oublier le lien avec le climat et les émissions de gaz à effet de serre.

Les ondes électromagnétiques et la santé

L'impact des ondes électromagnétiques sur la santé humaine fait également couler beaucoup d'encre dans les médias. Ce chapitre fait le point sur cette problématique.

Chapitre 1

La méthode scientifique

BLANC Guillaume & NOÛS Camille, La méthode scientifique, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.3224b0>



Dans ce premier chapitre, nous allons voir ce qu'est la science, comment elle se construit. Puis nous verrons quelques notions de zététique, une science qui s'intéresse aux croyances diverses et variées, et qui a construit quelques outils pour aiguïser son esprit critique. Nous parlerons de la toile (le web) et de la façon d'y faire une recherche documentaire. Enfin, nous dirons quelques mots sur une poignée de croyances toujours vivaces, pour finir sur la notion de risque et le principe de précaution.

1.1 Comment se fait la science ?

Après avoir défini la science, nous allons voir comment elle se construit. Ce domaine de réflexion autour de la science est une branche de la philosophie appelé épistémologie. Nous ne présentons ici qu'une approche vulgarisée de cette discipline.

1.1.1 Science et technologie

La science, du latin *scientia* signifiant « connaissance », est ce que l'on sait pour l'avoir appris, ce que l'on tient pour vrai au sens large, l'ensemble de *connaissances*, d'études d'une valeur universelle, caractérisées par un objet (domaine) et une *méthode* déterminés, et fondés sur des relations objectives vérifiables. (Dictionnaire Le Robert)

Mais la *science* peut désigner ses débouchés, à savoir les applications technologiques (bombe, GPS, smartphone, OGM, etc.).

Pourtant, les deux aspects sont fondamentalement différents :

- La science est une somme de connaissances, donc par essence elle ne peut être ni bonne ni mauvaise.
- La technologie est souvent une application (humaine) de la connaissance scientifique acquise. Elle est ce que l'humain décide d'en faire.

1.1.2 Les domaines scientifiques

Tentons une liste (exhaustive ?) des différents domaines de la science :

- Sciences « exactes »
 - Sciences de la nature
 - > Sciences de la vie et de l'environnement (biologie, écologie, médecine, etc.)
 - > Sciences de la Terre et de l'Univers (astrophysique, géophysique, climatologie, etc.)
 - > Sciences de la matière (physique, chimie, etc.)

- Sciences formelles
 - > Mathématiques
 - > Logique
 - > Informatique théorique
- ➔ Sciences humaines et sociales
 - > Histoire
 - > Anthropologie
 - > Sociologie
 - > Linguistique
 - > Économie
 - > Psychologie
 - > etc.

Il s'agit là d'une classification, on pourrait en imaginer d'autres. Par exemple, la physique se retrouve non seulement dans les « sciences de la matière » tout comme la chimie, mais également dans les « sciences de la Terre et de l'Univers » (géophysique, astrophysique); et même dans les sciences de la vie (biophysique) et de l'environnement (climatologie).

Chaque domaine fait appel à des connaissances, des outils théoriques et expérimentaux ou des méthodes parfois spécifiques, avec plus ou moins de porosité entre eux.

Il y a également un lien entre sciences exactes et sciences humaines, en particulier dans les études liées à l'environnement (voir par exemple le Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain¹ – LIED – rattaché à Université Paris Cité, qui abrite des biologistes, des physicien-ne-s, mais aussi des économistes et des sociologues).

La pluridisciplinarité consiste à juxtaposer plusieurs disciplines différentes autour d'un même sujet d'étude, comme par exemple le réchauffement climatique. L'interdisciplinarité consiste à entrecroiser les disciplines autour d'un même sujet, afin d'aborder un problème souvent complexe (comme le réchauffement climatique, encore) avec différents regards et approches. La transdisciplinarité va au-delà en faisant s'enrichir mutuellement les disciplines impliquées, dont les frontières deviennent ainsi floues.

1.1.3 Qu'est-ce que la physique?

En tant que physicien·ne ou étudiant·e en physique, on peut se demander également, qu'est-ce que la physique? Et quelle est la différence avec sa proche cousine, la chimie?

Le dictionnaire, selon celui que l'on regarde, nous dit :

- ➔ Pour la physique :
 - *Science qui a pour objet l'étude de la matière et de ses propriétés fondamentales* (Trésor de la Langue Française²).
 - *Science qui étudie par l'expérimentation et l'élaboration de concepts les propriétés fondamentales de la matière et de l'espace-temps* (Larousse).
- ➔ Pour la chimie :
 - *Partie des sciences physiques qui a pour objet la constitution et les réactions de la matière* (Trésor de la Langue Française³).
 - *Partie des sciences physiques qui étudie la constitution atomique et moléculaire de la matière et les interactions spécifiques de ses constituants* (Larousse).

1. <http://www.lied-pieri.univ-paris-diderot.fr/>

2. <https://www.cnrtl.fr/definition/physique>

3. <https://www.cnrtl.fr/definition/chimie>

Il n'est donc pas simple de trouver une distinction claire entre la physique et la chimie. On voit souvent (sur internet) que la chimie étudie les transformations de la matière. Mais il faut préciser qu'il s'agit de transformations au niveau atomique ou moléculaire. Parce que la physique couvre aussi certaines transformations de la matière – les transformations nucléaires...

Dans le film *Les Palmes de M. Schutz* de Claude Pinoteau (1997), adapté de la pièce de théâtre de Jean-Noël Fenwick (scénario par Richard Dembo, Claude Pinoteau et Jean-Noël Fenwick), qui s'inspire d'un passage de la vie et du travail de Pierre et Marie Curie, on voit Marie Curie interprétée par Isabelle Huppert expliquer à Georgette (Marie-Laure Descoureaux), la nourrice de sa fille :

Quand quoi que ce soit qui n'est pas un être vivant est en activité, un volcan, un nuage, de l'eau qui bout, une bûche qui brûle, ou c'est de la physique ou c'est de la chimie [...] [Une pomme de terre qui bout] ça c'est un phénomène physique. Retirez la pomme de terre, coupez le feu, le phénomène s'arrête. Ça c'est de la physique. En revanche, si vous plongez ce morceau de craie dans du vinaigre, ça bouillonne aussi; et si vous retirez la craie, ça continue à bouillonner tant qu'il reste du vinaigre sur la craie. C'est une transformation, ça c'est de la chimie. Avec la radioactivité, la question était de savoir si c'était de la physique ou de la chimie. Et bien c'est de la physique. Qu'on le mouille avec n'importe quoi, qu'on le mélange, qu'on le chauffe, qu'on le refroidisse, l'uranium continue à « yoyoter » comme dit M. Schutz, c'est-à-dire à rayonner invariablement, sans baisse ni interruption. Ça c'est de la physique.

Jean Perdijon dans son ouvrage *La formation des idées en physique, du phénomène à la théorie* (Perdijon 2007) rappelle que « physique » vient d'un mot grec signifiant « nature ». Jusqu'au XVIII^e siècle elle était la *philosophie naturelle* c'est-à-dire l'étude du *monde extérieur et des lois de son évolution*. Il propose la définition suivante :

La physique étudie, par l'expérimentation et l'élaboration de concepts, la matière et le rayonnement en relation avec l'espace et le temps.

Pour Feynman (1963),

La physique est la plus fondamentale des sciences, celle qui contient le plus de choses et elle a eu un effet profond sur tout le développement scientifique.

1.1.4 La méthode scientifique

À l'origine

La science se construit avec méthode. La méthode scientifique est une démarche d'investigation (volonté d'explorer et de comprendre) similaire à l'investigation journalistique ou policière. Cette démarche n'est pas apparue du jour au lendemain, elle s'est construite petit à petit au cours de l'histoire de l'humanité; elle est issue d'une suite d'essais et d'erreurs corrigées. L'outil final obtenu est performant, il a fait preuve de son efficacité pour comprendre le réel (Machon 2015).

Initialement, la démarche scientifique était basée uniquement sur l'observation et le raisonnement (nécessaire mais non suffisant). Par exemple, les grecs s'interrogeaient sur la nature des constituants élémentaires de toute chose. Plusieurs théories s'affrontaient sur des bases purement rhétoriques (celle des quatre éléments d'Empédocle : eau, terre, air, feu, celles des « atomes », particules élémentaires « insécables » de Démocrite...).

La science moderne débute avec l'introduction de l'expérimentation et de l'instrumentation permettant la mesure de propriétés physiques : il s'agit là d'une **quantification** nécessaire pour discriminer des hypothèses contradictoires. La quantification est garante d'objectivité (jusqu'à un certain point, celui de l'interprétation des résultats) et permet d'obtenir des relations entre les grandeurs qui modélisent un phénomène (Machon 2015).

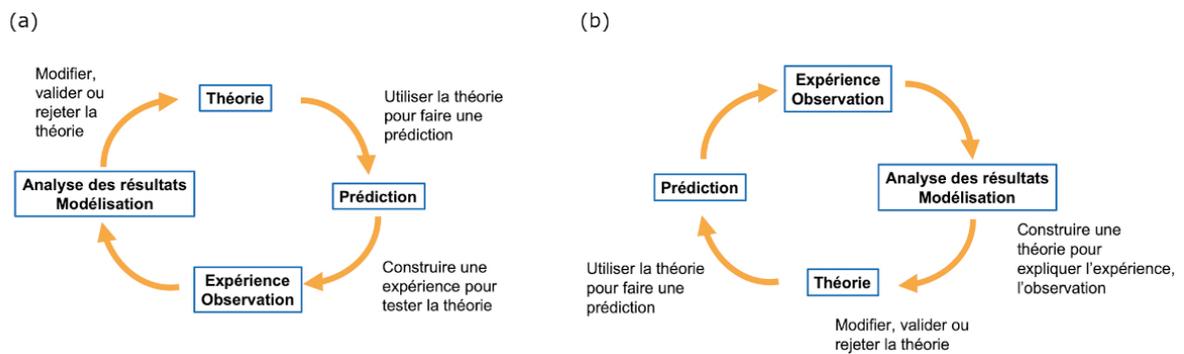


FIGURE 1.1 – Illustrations de possibles démarches scientifiques. Par exemple, le point de départ peut être l'élaboration d'une théorie (a), ou encore une observation (b). Ces schémas reflètent une logique courante, notamment en physique ; la réalité est néanmoins plus variée et complexe.

La démarche

La démarche d'investigation scientifique fait ainsi le lien entre le **rationalisme**, *doctrine selon laquelle toute connaissance vient de principes pouvant a priori être logiquement formulés, ne dépendant pas de l'expérience et dont nous avons une connaissance raisonnée et innée*⁴ et l'**empirisme**, *méthode qui ne s'appuie que sur l'expérience concrète, particulière*⁵. On peut grossièrement schématiser le processus à partir d'une situation de départ que serait un questionnement ou une observation, comme illustré à la figure 1.1. Le questionnement initial (ainsi que l'observation) entraîne une réflexion pour proposer des explications (conformément aux outils de l'esprit critique – voir section 1.2), puis une **expérimentation** afin de discriminer entre les hypothèses alternatives, dans le but de privilégier celle qui est la plus vraisemblable (jusqu'à preuve du contraire).

Les différentes hypothèses doivent rendre compte du phénomène étudié et doivent avoir des implications (prédictions) se démarquant les unes des autres. Ces **prédictions** doivent être **testables** et le cas échéant réfutées ou confirmées.

L'expérimentation ou l'observation comme concept clef

Il s'agit ensuite de mettre en place des **expériences** pour vérifier ou infirmer les prédictions de chaque hypothèse. Les expériences doivent être choisies avec soin pour être discriminantes. Elles devront être bien menées, exemptes d'artefacts, de facteurs non contrôlés (pouvant modifier ou interférer avec le résultat). Sinon, on risque d'observer un phénomène qui n'a rien à voir avec la cause annoncée (une corrélation ne signifie pas forcément causalité, voir section 1.2.5).

Une étape importante dans ce processus est la **reproductibilité** : les expériences réalisées ou les observations effectuées doivent pouvoir être reproduites pour que le résultat soit validé. Ce concept de reproductibilité (Hocquet 2020 ; Attard 2020) peut être évident dans certaines disciplines comme la physique expérimentale, mais moins dans certains domaines observationnels. Par exemple, dans la discipline de l'astrophysique qui étudie l'univers dans son ensemble, non seulement il n'est pas possible de faire des expériences (créer un autre univers en laboratoire), mais faire des observations sur un autre univers n'est pas possible non plus. De surcroît nous devons l'étudier de l'intérieur.

L'expérience se termine par une observation d'un phénomène, par une mesure quantitative d'une donnée. Ce qui distingue une science observationnelle (comme l'astrophysique) d'une science expérimentale (comme la physique des matériaux) est que dans le premier cas, il n'est pas possible de modifier les paramètres permettant d'aboutir à l'observation. En revanche, il est parfois possible d'observer de nombreuses configurations d'un même phénomène aboutissant

4. Source : CNRTL, <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/rationalisme>.

5. Source : CNRTL, <http://www.cnrtl.fr/definition/empirisme>.

à des observations différentes (par exemple la mort d'une étoile devenant supernova en astrophysique).

Par la suite d'autres faits ou résultats permettent d'étayer ou de rejeter le schéma interprétatif : ce sont les faits qui valident la théorie et non l'inverse. Si un nombre important de faits s'interprète de manière rationnelle avec cette explication, celle-ci devient alors la meilleure façon de comprendre cette partie-là de la nature, jusqu'à preuve du contraire. Les scientifiques n'ont pas besoin d'avoir accès à toutes les facettes d'un phénomène, de faire toutes les expériences imaginables pour en donner une explication satisfaisante. Toutefois, il existe des expériences plus cruciales que d'autres. Une explication satisfaisante ne signifie pas qu'elle soit vraie dans l'absolu, c'est seulement la meilleure explication pour un phénomène donné à un moment donné. Ce que Victor Hugo, dans *L'art et la science* (Hugo 1993), résume ainsi :

La science est l'asymptote de la vérité. Elle approche sans cesse et ne touche jamais.

Un nouveau fait peut permettre à l'explication d'évoluer. Par exemple, la gravitation universelle de Newton est supplantée par la relativité d'Einstein, ce qui n'empêche pas la théorie de Newton de rester valide dans certains domaines.

Une infinité de « méthodes » ?

La réalité est plus complexe, il peut exister plusieurs théories à discriminer (comme sur la nature de l'énergie noire en cosmologie), il se peut qu'il soit impossible de faire une expérience (astronomie, climatologie, géophysique...), on a donc recours à l'observation (et à la classification, puis modélisation, et éventuellement prédiction jusqu'à ce qu'une nouvelle observation vienne confirmer ou infirmer le modèle ou la théorie), il ne suffit pas toujours d'une seule mesure ou observation pour confirmer ou infirmer une théorie (climatologie...) etc.

Il n'y a pas **une** méthode, recette universelle, par laquelle la science se construit, mais de nombreuses façons de procéder. Néanmoins, quelques traits principaux peuvent être retenus. Ainsi les sciences tendent à faire preuve (Rasplus 2014) :

- d'objectivité (regard critique perpétuel, collectif et impersonnel),
- de rigueur (multicontrôles),
- de remise en question (évaluation anonyme par les pairs).

Une connaissance scientifique est ainsi une construction méthodique autour de faits observationnels ou expérimentaux. Ce que résume Henri Poincaré dans *La science et l'hypothèse* (Poincaré 1917) :

On fait la science avec des faits comme une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierre n'est une maison.

Qu'est-ce que la « vérité » ?

La science cherche à comprendre comment la nature (au sens large : des constituants de la matière à la psychologie humaine) fonctionne. Par des expériences elle déduit les lois qui régissent le monde. Mais ces lois sont des théories élaborées éventuellement avec un langage spécifique (comme les mathématiques dans nombre de domaines scientifiques) qui tentent d'expliquer une partie de ce monde, avec des variables, des hypothèses sous-jacentes. La complexité de la réalité « physique » de l'univers qui nous entoure n'est qu'imparfaitement reproduite et comprise par la science. L'objectif de celle-ci est d'approcher cette réalité au plus près. Néanmoins, il est probable que cette approche ne sera jamais qu'asymptotique, comme le mentionne Victor Hugo dans son texte.

La vérité scientifique se distingue ainsi de cette réalité physique. La science repose sur un socle solide qui n'est pas remis en question, à savoir, typiquement, les connaissances qui sont enseignées jusqu'au premier cycle universitaire. L'existence des atomes ne fait pas débat tout comme la notion de cellule ; la Terre est certainement ronde à une certaine échelle ; un courant électrique génère un champ magnétique, etc. Mais ces notions (l'atome, la cellule, la rotondité de la Terre, le champ magnétique...), comme tant d'autres sont des représentations que nous avons faites de la réalité. Même si ce sont des vérités scientifiques.

La science se construit ainsi sur ce piédestal, lentement. Certaines avancées deviennent des briques du socle, d'autres sont réfutées et oubliées.

Voici ce que dit Feynman (1963) de cette notion de vérité scientifique :

Chaque fragment de l'ensemble de la nature n'est en fait qu'une simple *approximation* de la vérité totale ou de ce que nous croyons être à l'heure actuelle la vérité totale. En fait tout ce que nous savons n'est qu'une approximation parce que *nous savons que nous ne connaissons pas encore toutes les lois*. De ce fait, les choses doivent être apprises seulement pour être désappries ensuite ou, plus probablement, pour être corrigées. Le principe de la science, sa définition, pour ainsi dire, est ce qui suit : *toute notre connaissance est à l'épreuve de l'expérience*. L'expérience est seul juge de la « vérité » scientifique.

Réfutable ou pas réfutable ?

Le concept de « réfutabilité » (Attard 2020 ; Chalmers 1990 ; Juignet 2015) est un concept clef dans la démarche scientifique. On peut même s'en servir pour définir ce qu'est une science. Ce concept a été mis en avant par le philosophe britannique Karl Popper (Rakotoarison 2014). Réfuter quelque chose : *repousser ce qui est affirmé par une démonstration argumentée qui en établit la fausseté*⁶. Un concept est alors dit « scientifique » s'il peut être *réfuté*, c'est-à-dire si on peut en établir la fausseté, par des arguments, par des observations, par des expériences... Ou encore s'il peut être *testé*. Ainsi une théorie scientifique, le résultat d'une expérience ou d'une observation ne sont *vrais* que jusqu'à preuve du contraire. Même si certains concepts, comme l'existence des atomes par exemple, sont indubitablement vrais.

Ce concept de réfutabilité ou de falsifiabilité n'est évidemment pas un critère de scientificité *absolu* : il y a des exceptions, il y a des théories épistémologiques différentes ou plus élaborées. Il s'agit néanmoins d'un critère particulièrement intéressant d'un point de vue pédagogique, parce qu'il est relativement simple à comprendre, et qu'il permet de séparer en grande partie ce qui relève du domaine scientifique de ce qui n'en relève pas.

1.1.5 Qui sont les scientifiques ?

Les scientifiques cherchent à comprendre comment fonctionne le monde par le prisme de la science. Il peut s'agir d'amateur·rice·s (citoyen·e·s éclairé·e·s) ou de chercheur·euse·s professionnelle·s. En France, un·e chercheur·euse en sciences peut faire de la recherche à plein temps dans un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) comme le CNRS, l'INSERM, l'INRAE, l'INRIA, etc., ou dans un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) comme le CEA. Ou bien elle/il peut être enseignant·e-chercheur·euse (dans un établissement d'enseignement supérieur, comme l'université) avec une charge d'enseignement. Au CNRS, par exemple, il y a des chargé·e·s de recherche, des directeur·rice·s de recherche. À l'université, il y a des maître·sse·s de conférences, des professeur·e·s des universités. Elles et ils sont fonctionnaires. Les enseignant·e·s-chercheur·euse·s sont les « profs » à l'université, leur mission d'enseignement est statutairement de 192 heures devant les étudiant·e·s, chaque année.

6. Source : CNRTL, <https://www.cnrtl.fr/definition/réfutable>.

Elles et ils font également de la recherche. Notons que faire de la recherche n'implique pas forcément de produire des connaissances scientifiques : cela peut être dans d'autres domaines⁷ que ceux de la science (arts, langues, philosophie, théologie, architecture, etc.).

Il y a également des étudiant·e·s qui préparent le diplôme du doctorat, avec ou sans charge d'enseignement (vacation ou monitorat), des titulaires du doctorat en « post-doc », sorte de CDD de la recherche, souvent sans charge d'enseignement, des ATER (Attaché·e·s Temporaires d'Enseignement et de Recherche), qui sont l'équivalent des enseignant·e·s-chercheur·euse·s mais en CDD (toujours après un doctorat).

1.1.6 Le processus de publication d'un résultat scientifique

La revue par les pairs

Le résultat d'une expérience, d'une théorie, d'un modèle, d'une observation *doit* être publié dans un journal spécialisé. Il existe un grand nombre de revues dans chaque domaine de la science. Par exemple en astrophysique : *Astronomy and Astrophysics*, *Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *New Astronomy*. Il existe également quelques revues généralistes comme *Nature* ou *Science*. Ces journaux sont dits « à comité de lecture ».

Dans quasiment tous les domaines des sciences de la nature, la langue de publication est l'anglais (la science est internationale, elle s'est mondialisée bien avant le reste de la société!).

Un article est *soumis* à une revue; un comité éditorial demande à des scientifiques (deux, typiquement) ayant le même domaine de compétence (et si possible pas de lien avec les auteurs de l'article) de lire l'article afin de décider s'il répond aux canons de la science et mérite d'être publié. Il s'agit de *l'évaluation par les pairs*, qui est généralement anonyme.

Les questions typiques auxquelles doivent répondre les relecteur·rice·s (*referees*) (Ramus 2014) sont :

- La question scientifique et les hypothèses qui sont faites sont-elles claires et bien posées?
- La méthode utilisée est-elle appropriée pour répondre à la question posée?
- Les analyses des données sont-elles appropriées?
- Les conclusions tirées sont-elles conformes aux résultats obtenus?
- L'article, sous sa forme actuelle, est-il suffisamment clair et détaillé pour permettre à d'autres chercheur·euse·s de reproduire ces travaux?

Ce processus *fondamental* permet d'avoir des publications de qualité, il est le garant de la méthode scientifique.

Un résultat scientifique publié n'est pas pour autant gravé dans le marbre! La science est un processus long, qui demande de refaire les expériences, de vérifier, de contrôler, de valider, de refaire les observations, etc. D'autant plus que certains articles sont publiés dans des revues peu regardantes sur la qualité (dites revues prédatrices); la preuve en a été faite avec un canular d'une poignée de scientifiques (qui a consisté à publier un papier bidon et hilarant dans une de ces revues – Huet 2020 ; Rochoy 2020).

Les articles scientifiques honnêtes emploient souvent le conditionnel, et il faut du temps pour qu'un résultat soit considéré comme sûr. La science avance lentement.

7. Voir par exemple les différents domaines universitaires dans les sections disciplinaires du Conseil national des universités : https://fr.wikipedia.org/wiki/Conseil_national_des_universités ou les différents instituts du CNRS : <https://www.cnrs.fr/fr/la-recherche>.

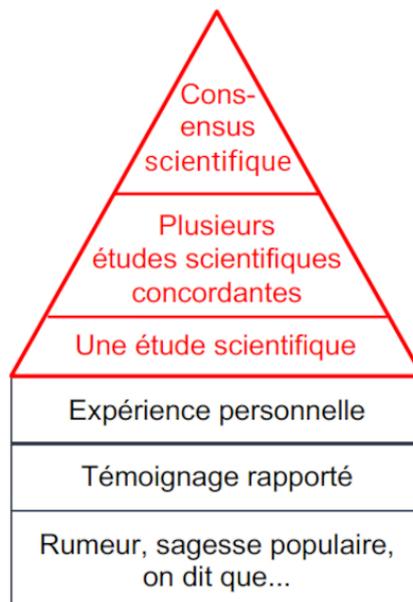


FIGURE 1.2 – Illustration des différents niveaux de preuves scientifiques : seule la partie rouge a un sens.

L'échelle des preuves

On peut définir une hiérarchie des preuves scientifiques, comme illustré à la figure 1.2. Si un témoignage, un ressenti personnel, une rumeur n'ont aucun poids, une seule étude en a moins qu'une multitude d'études distinctes concluant dans le même sens. Les méta-analyses font le bilan d'un grand nombre d'études, comme le GIEC le fait sur le climat dans ses rapports. Mais parfois une seule étude permet d'avoir une preuve raisonnable, comme par exemple la première observation directe des ondes gravitationnelles par les observatoires interférométriques.

1.1.7 Consensus et controverses

Le *consensus* scientifique représente la position sur laquelle la plupart (mais pas forcément tous) des scientifiques spécialisés dans un domaine se mettent d'accord, à un moment donné.

Le consensus scientifique n'est, en lui-même, pas un argument scientifique, et *il ne fait pas partie de la méthode scientifique*. Le consensus n'est donc pas synonyme de vérité⁸. L'inverse est vrai, en revanche : la « vérité » scientifique fait souvent consensus.

L'histoire des sciences montre que certains consensus se sont finalement révélés faux, comme par exemple le caractère fixe et immuable de la croûte terrestre, et ce malgré la théorie de la dérive des continents, reprise par Wegener en 1915, mais à laquelle les géologues n'ont adhéré que dans les années 1950! Il est donc sain que tous les scientifiques n'adhèrent pas à un consensus, ce qui permet de le tester.

Une *controverse* scientifique peut être définie comme un débat amical (ou non) opposant des personnalités de la communauté scientifique ou ses observateurs (sociologues des sciences, journalistes...) sur un point de théorie scientifique ou sur les faits historiques ou philosophiques devant être associés à cette théorie.

8. La vérité scientifique n'est pas synonyme de vérité absolue et ne représente pas forcément la réalité physique, même si elle tend à s'en approcher. Elle peut s'avérer fautive, puisque réfutable. Mais il n'est pas possible de prouver qu'elle est absolument et définitivement vraie.

On peut citer par exemple la mémoire de l'eau⁹ ou la fusion froide¹⁰, controversées en leur temps, réfutées à l'heure actuelle.

Attention cependant : il ne faut pas confondre une controverse *scientifique* et une controverse *publique*; en effet, les scientifiques qui débattent le font dans leur domaine de compétence, ce qui n'est en général pas le cas lors d'une controverse sur un sujet scientifique mais qui arrive dans la société (par exemple le réchauffement climatique¹¹ ou les effets des ondes électromagnétiques sur la santé).

1.1.8 L'erreur fait partie de la méthode

La science étant une construction humaine, la perception de la réalité, des phénomènes, des expériences et des résultats peuvent varier et engager des controverses sur leurs interprétations (Rasplus 2014).

L'erreur fait partie intégrante de la méthode scientifique, elle est source de progrès et de savoir. La science progresse en permanence par essais et erreurs. Se tromper permet parfois de découvrir des choses que l'on n'avait pas imaginées *a priori*. On parle de « sérendipité »¹². Par exemple, en 1928, le biologiste britannique Alexandre Fleming découvre par accident que de la moisissure évite le développement des bactéries. Il découvre ainsi la pénicilline¹³, premier antibiotique. De même, le physicien français Henri Becquerel découvre la radioactivité¹⁴ inopinément en 1896. L'histoire des sciences regorge de telles découvertes.

Pour illustrer cela, on peut citer Ramunni (2012) :

Si l'on a peur de se tromper, alors on risque de rester trop ancré dans la « science normale » et de ne jamais changer de conception. Il n'y aurait pas de révolution en science, mais simplement de l'évolution.

Ou encore Victor Hugo (*L'art et la science*) (Hugo 1993) :

La science va sans cesse se raturant elle-même. Ratures fécondes.

La science et sa démarche sont ainsi sujettes aux erreurs, mais toute erreur peut être corrigée, c'est ce qui fait l'essence même de la réfutabilité.

La figure 1.3 tente de résumer la complexité et la diversité du processus d'élaboration de la connaissance scientifique.

9. La mémoire de l'eau est le nom donné en 1988, au cours d'une controverse médiatique, à une hypothèse du chercheur, médecin immunologue, Jacques Benveniste selon laquelle l'eau qui a été en contact avec certaines substances conserve une empreinte de certaines propriétés de celles-ci alors même qu'elles ne s'y trouvent statistiquement plus. (Source : Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Mémoire_de_l'eau)

10. L'expression médiatique fusion froide désigne des réactions supposées nucléaires à température et pression ambiante. La plus connue est celle qui semble être une fusion nucléaire réalisée selon des techniques dérivées d'une expérience réalisée par Martin Fleischmann et Stanley Pons en mars 1989. [...] Lorsque l'eau est électrolysée dans un vase entouré d'un calorimètre, il est possible de vérifier la loi de conservation de l'énergie en utilisant les théories de l'électricité, de la thermodynamique et de la chimie : l'énergie électrique en entrée, la chaleur accumulée dans le vase, l'énergie chimique stockée, et la chaleur s'échappant du vase s'équilibrent parfaitement. Lorsque la cathode est constituée de palladium, et lorsque l'eau est remplacée par de l'eau lourde, on s'attend aux mêmes transferts d'énergie. Fleischmann et Pons observèrent dans leurs expériences que, dans certains cas, la quantité de chaleur mesurée par le calorimètre semblait plus grande que prévue. Lorsqu'ils ont calculé la densité de puissance sur base du volume de la cathode, ils ont obtenu une valeur trop grande pour être explicable par une réaction chimique. Ils en conclurent provisoirement que l'effet pouvait être nucléaire, malgré l'absence de preuves expérimentales. (Source : Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_froide)

11. Une étude du consensus scientifique sur le réchauffement climatique a été faite, entre autres, par Cook *et al.* (2016), qui montre qu'entre 90 % et 100 % des scientifiques spécialistes du climat adhèrent au consensus depuis plus de 15 ans. D'un autre côté, un sondage en septembre 2019 (Bouchet-Petersen 2019) montre que 85 % des Français-e-s considèrent le dérèglement climatique comme « une réalité », et 84 % considèrent que ce dérèglement est dû à « l'activité humaine sur la Terre ».

12. Voir, par exemple : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sérendipité>.

13. Voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Alexander_Fleming.

14. Voir, par exemple : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radioactivité#Histoire>.

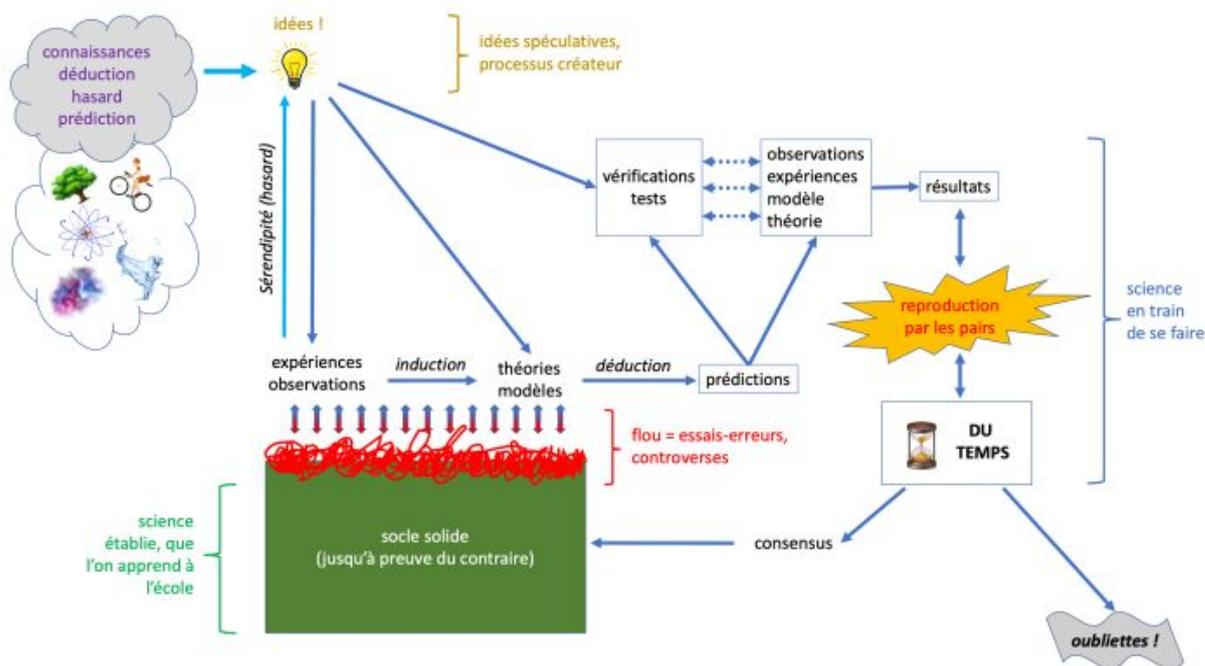


FIGURE 1.3 – La construction de la connaissance scientifique est finalement un joyeux fouillis, mais on y trouve néanmoins un soubassement méthodique rigoureux.

1.1.9 La capitalisation de la science

Il y a des limites à ce schéma qui sont dues à la capitalisation de la science : les chercheur·euse·s du monde entier sont soumis·e·s à une pression croissante au fil des années pour publier toujours plus, ce qui amène à des dérives qui contreviennent à la déontologie, comme la fraude (manipulation des résultats, typiquement) (Arnold 2014). Le modèle économique des revues scientifiques est également plus que discutable (Althaus 2019) : des éditeurs privés peu scrupuleux en situation de monopole prennent les chercheur·euse·s en otage en les faisant payer pour publier, pour ensuite vendre à prix d'or les revues aux bibliothèques des universités¹⁵. Les chercheur·euse·s étant généralement financé·e·s par les contribuables pour faire leur travail. Il y a bien d'autres dérives humaines, souvent liées à une croissance ingérable (« toujours plus ») qui ternissent cette image, comme des idéologies, des intérêts privés, etc., et peuvent biaiser voire fausser intentionnellement des résultats.

1.2 Quelques méthodes autour de l'esprit critique

1.2.1 La zététique

Le mot vient du grec qui signifie « chercher ». Il a été mis au goût du jour par Henri Broch qui a notamment créé un laboratoire de zététique¹⁶ au sein de l'université de Nice en 1998. La zététique cherche à comprendre (ou à réfuter) les phénomènes para-normaux¹⁷ à l'aide

15. Par exemple des éditeurs commerciaux comme Elsevier (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Elsevier>) ou Wiley (<https://onlinelibrary.wiley.com/>) auraient voulu faire payer l'utilisation de figures issues d'articles scientifiques – parfois même anciens! – publiés dans des revues leur appartenant, pour leur reproduction dans cet ouvrage en accès ouvert.

16. <http://sites.unice.fr/site/broch/lab0.html>

17. Ensemble de phénomènes qui ne sont ni observables ni explicables scientifiquement, comme les ovnis, les fantômes, les esprits, la télékinésie, etc.

de la méthode scientifique (expérimentation, modélisation, etc.) : elle va mettre à l'épreuve une connaissance. Henri Broch la définit comme *l'art du doute* mais cette appellation n'est pas correcte, car la zététique est une science puisqu'elle en utilise les méthodes¹⁸, et non un art, qui, par essence, n'est pas une science. On pourrait donc qualifier la zététique de « science du doute » ?

La zététique a développé un certain nombre d'outils permettant d'éviter de tomber dans différents pièges de croyances ou pseudo-sciences. Elle recommande de *penser avec ordre et méthode, en tenant à distance dogmes*¹⁹, *préjugés et idées reçues* (source : Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Zététique>).

Plus qu'une science, la zététique est un ensemble de méthodes à visée pédagogique dans la sensibilisation à l'esprit critique.

1.2.2 Comprendre le monde qui nous entoure

La zététique va mettre en œuvre trois outils principaux pour interpréter et comprendre la nature et en particulier les phénomènes « para-normaux » : l'observation, la réflexion et l'expérience. *L'observation recueille les faits, la réflexion les combine, l'expérience vérifie le résultat de la combinaison.*²⁰

La façon dont ces trois moyens sont mis en œuvre est tout aussi importante : *Il faut que l'observation de la nature soit assidue, que la réflexion soit profonde, et que l'expérience soit exacte.*²¹

1.2.3 Sciences et pseudo-sciences

La science diffère fondamentalement des autres champs de connaissance (arts, religions, etc.) : que ces connaissances soient vraies ou fausses, peu importe, la question n'a même aucun sens. *La science est tout simplement le seul mode de connaissance permettant de comprendre l'univers qui nous entoure. [...] La science est en fait tout simplement le seul domaine qui intègre un processus auto-correctif de découverte.* (Broch 2008a). La science a également une portée universelle : le monde physique et les sociétés dans lesquels nous vivons doivent beaucoup à la science et à la technologie. On ne peut pas en dire autant d'autres champs de la connaissance (religions, pseudo-sciences...) :

Si les épidémies de peste ont désormais presque disparu, on peut difficilement supposer que les prières et aspersion d'eau bénite y soient pour quelque chose... (Broch 2008a)

Une **pseudo-science** n'est pas seulement un domaine de connaissance qui ne fait pas preuve d'auto-correction des erreurs (*i.e.* une non-science), c'est une non-science qui voudrait se prendre pour une science ! Les pseudo-sciences sont dangereuses parce que (Broch 2008a) :

- leurs spéculations, données fausses ou inventées sont présentées comme résultats de recherches scientifiques ;
- elles corrompent *l'esprit* de la science (la méthodologie qui la caractérise) ;
- elles sont accessibles au plus grand nombre, puisqu'elles ne demandent strictement aucun travail (contrairement à la science qui nécessite des années d'études), faisant ainsi percevoir les sciences véritables comme élitistes ;

18. Un bémol cependant, car aucune des analyses « zététiques » du laboratoire de zététique de Nice (<http://www.unice.fr/zetetique/>), fondé par Henri Broch (et désormais fermé) n'a été publié dans des revues scientifiques à comité de lecture, court-circuitant ainsi un échelon fondamental de la méthode scientifique, celui de la revue par les pairs, comme en témoigne le livre grand public Charpak & Broch (2002). Voir aussi Andreotti & Noûs (2020), p. 24.

19. *Un dogme est une affirmation considérée comme fondamentale, incontestable et intangible par une autorité politique, philosophique ou religieuse.* (Source : Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Dogmatique>)

20. D'après Diderot, *Pensées sur l'interprétation de la nature. Aux jeunes gens qui se disposent à l'étude de la philosophie naturelle* (1753), cité par Broch (2008b), p. 31.

21. id.

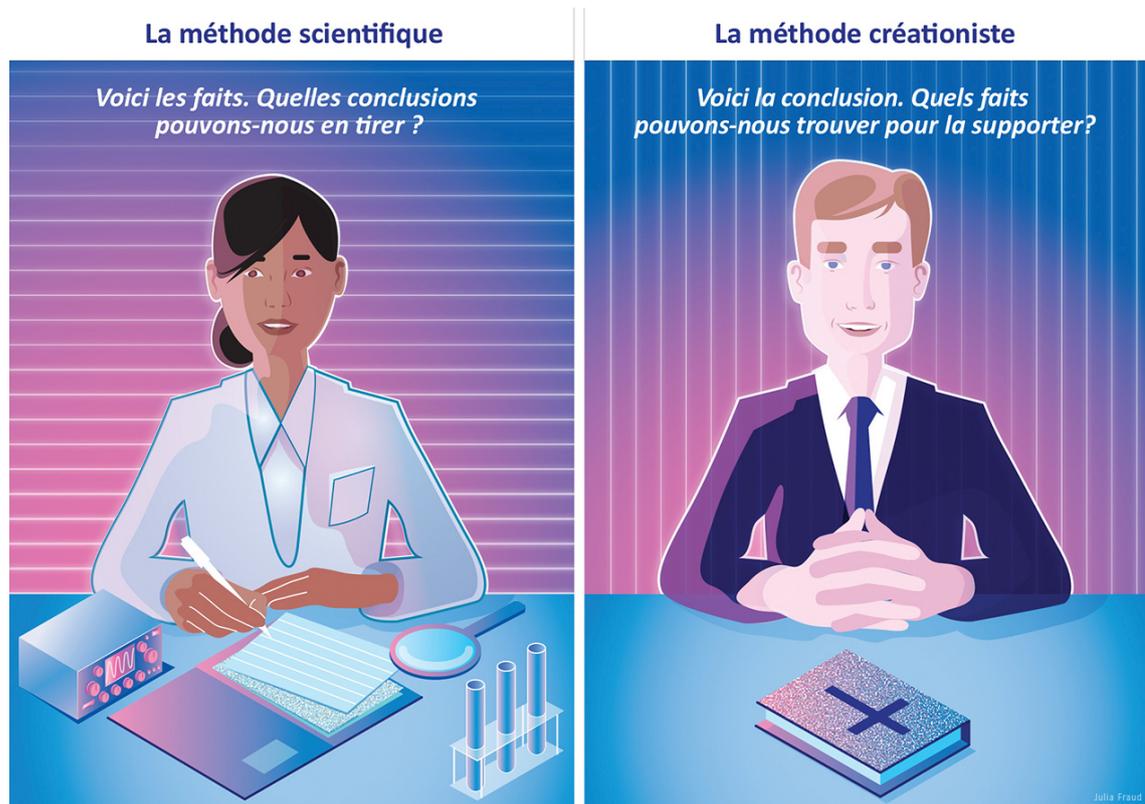


FIGURE 1.4 – Méthode scientifique et méthode créationniste! Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

- elles reçoivent le soutien de groupes de pression puissants (sectes...) et un accueil chaleureux de la part de certains médias de masse (course au scoop sensationnel, intérêt à ce que l'esprit critique du public ne se développe pas...).

1.2.4 Croyances

Une **croyance** est l'adhésion à une thèse considérée comme vérité sans tenir compte des faits ou de l'absence de faits confirmant ou infirmant cette thèse. *Une croyance par définition s'appuie sur un principe d'autorité et de certitude* (Yeganefar 2013).

Une croyance est capable d'écarter les faits (voir figure 1.4) qui ne vont pas dans son sens. Elle ne se base pas, contrairement à la science, sur les règles de la logique. Quand la logique n'est pas respectée, tout un chacun peut exprimer ses conclusions comme des vérités!

Entre deux théories pour expliquer un fait, la science choisira celle avec le moins d'hypothèses (principe de parcimonie ou du rasoir d'Ockham²²) :

Si une vitre est cassée et qu'un caillou est retrouvé à l'intérieur, il n'y aura peut-être pas besoin de faire l'hypothèse qu'un esprit a déposé le caillou dans la pièce et que le père-noël était ivre ce jour-là. (Yeganefar 2013).

Les croyances, les pseudo-sciences n'obéissent pas au critère de réfutabilité, car en général elles ont été réfutées.

22. *Le principe du rasoir d'Ockham* (d'après le philosophe franciscain Guillaume d'Ockham (XIV^e siècle)) *consiste à ne pas utiliser de nouvelles hypothèses tant que celles déjà énoncées suffisent, à utiliser autant que possible les hypothèses déjà faites, avant d'en introduire de nouvelles, ou, autrement dit, à ne pas apporter aux problèmes une réponse spécifique, ad hoc, avant d'être (pratiquement) certain que c'est indispensable, sous peine de risquer d'escamoter le problème, et de passer à côté d'un théorème ou d'une loi physique.* (Source : Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Rasoir_d'Ockham)

1.2.5 Règles d'or de la zététique

Dans son livre *Comment déjouer les pièges de l'information*, Henri Broch (Broch 2008b) liste de manière détaillée et exhaustive différentes facettes de la zététique, qu'il nomme « règles d'or » ou effets de présentation. Il faut considérer ces quelques « règles » comme des règles de bonne conduite dans le labyrinthe de la connaissance.

Ces « règles » et « effets » zététiques aux noms imaginés imaginés par Henri Broch se retrouvent (sous d'autres appellations) dans le recueil des « moisissures argumentatives » du collectif Cortec²³. Il y a souvent des biais cognitifs ou des erreurs de logique derrière ces raisonnements fallacieux. On les retrouve également sous l'appellation « sophismes ». Un sophisme²⁴ est un raisonnement qui semble correct et rigoureux, mais qui se révèle illogique, donc faux, pour peu que l'on prenne le temps de s'y pencher pour en comprendre les étapes. Contrairement au paralogisme, qui est un raisonnement erroné, mais de bonne foi, le sophisme cherche à tromper l'interlocuteur sciemment.

Une belle histoire (ou scénario) *n'est pas une loi* (ou une preuve). Par exemple, les gravures préhistoriques présentes sur de nombreux rochers affleurant dans la vallée des Merveilles dans le massif du Mercantour font l'objet de nombreuses interprétations²⁵ qui résonnent sympathiquement, mais les faits archéologiques ne sont pas au rendez-vous pour les étayer.

Quantité n'est pas qualité ou mille-feuille argumentatif : une collection d'anecdotes ne constitue pas une preuve scientifique. Ce n'est pas parce qu'il y a de nombreux témoignages d'OVNIS que les extraterrestres en visite existent ! Cet argument est à relier à la loi de Brandolini²⁶ qui stipule que : *La quantité d'énergie nécessaire pour réfuter du baratin est beaucoup plus importante que celle qui a permis de le créer.*

Ce n'est pas parce que c'est écrit que c'est exact : le corollaire est qu'il faut toujours vérifier l'origine de l'information. En sciences, l'origine est le ou les articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, c'est-à-dire ayant bénéficié d'une évaluation par les pairs.

L'analogie n'est pas une preuve : ce n'est pas parce que la Lune provoque les marées qu'elle provoque quelque chose chez l'individu à la naissance ou qu'elle fait pousser les tomates.

L'absence de preuve n'est pas la preuve de l'absence : lorsqu'on n'a pas la preuve de quelque chose cela ne signifie pas que cette chose est inexistante. Par exemple, personne n'a encore vu de magnifiques licorne blanche dans son jardin. Cela ne signifie nullement que la licorne n'existe pas quelque part sur Terre ; sa probabilité d'existence est toutefois extrêmement faible, et il est donc inutile, pour l'instant, de créer un nouveau domaine de recherche comme la licornologie...

La non-impossibilité n'est pas un argument d'existence ou renversement de la charge de la preuve. Ce n'est pas parce qu'on ne peut pas prouver que quelque chose n'existe pas, que cette chose existe nécessairement !

Un exemple est le concept de la thèse de Russell. Bertrand Russell (1872-1970) est un philosophe britannique spécialiste de logique et du fondement des mathématiques²⁷. Dans son texte *Is There a God?* (Russell 1997), voici ce que l'on peut lire :

23. <https://cortecs.org/language-argumentation/moisissures-argumentatives/>

24. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sophisme>

25. https://fr.wikipedia.org/wiki/Vallée_des_Merveilles#Des_interprétations_isolées_et_controversées

26. Voir par exemple : <https://bonpote.com/loi-de-brandolini-doit-on-repondre-aux-cons/>.

27. On pourra lire le roman graphique de Apóstolos K. Doxiádis et Christos H. Papadimitriou, *Logicomix* (2008), sur sa vie et son œuvre.

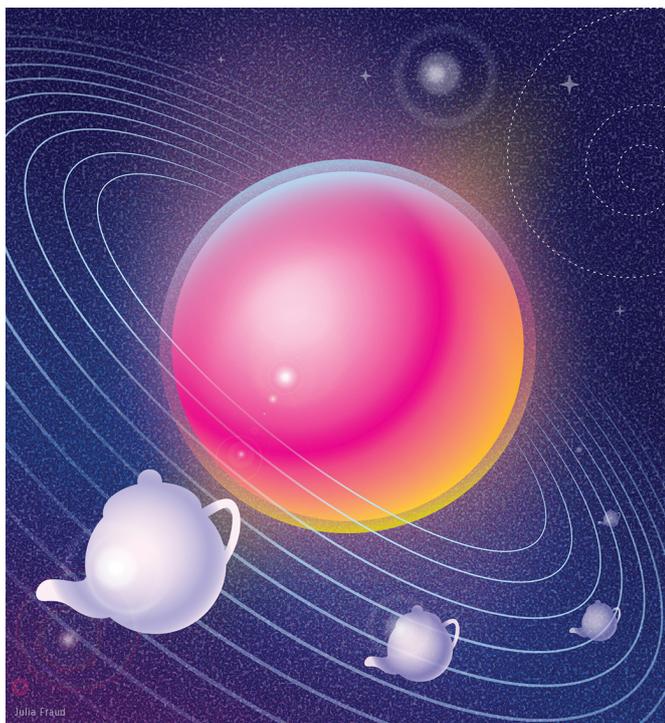


FIGURE 1.5 – La théière de Russell. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

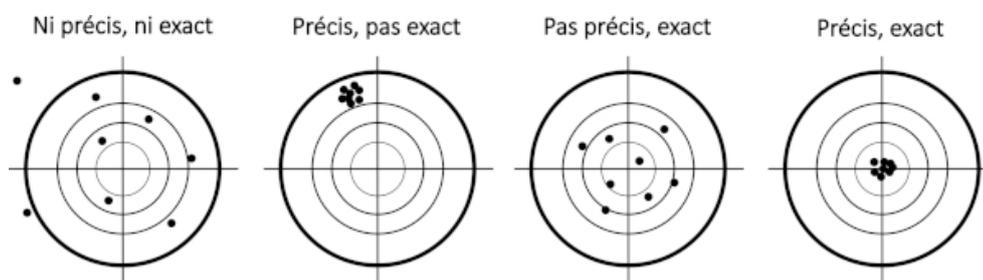


FIGURE 1.6 – Illustration de la différence entre précision et exactitude.

De nombreuses personnes orthodoxes parlent comme si c'était le travail des sceptiques de réfuter les dogmes plutôt qu'à ceux qui les soutiennent de les prouver. Ceci est bien évidemment une erreur. Si je suggérais qu'entre la Terre et Mars se trouve une théière de porcelaine en orbite elliptique autour du Soleil, personne ne serait capable de prouver le contraire pour peu que j'aie pris la précaution de préciser que la théière est trop petite pour être détectée par nos plus puissants télescopes. Mais si j'affirmais que, comme ma proposition ne peut être réfutée, il n'est pas tolérable pour la raison humaine d'en douter, on me considérerait aussitôt comme un illuminé. Cependant, si l'existence de cette théière était décrite dans des livres anciens, enseignée comme une vérité sacrée tous les dimanches et inculquée aux enfants à l'école, alors toute hésitation à croire en son existence deviendrait un signe d'excentricité et vaudrait au sceptique les soins d'un psychiatre à une époque éclairée, ou de l'Inquisiteur en des temps plus anciens. (figure 1.5)

Ce n'est pas parce que c'est précis que c'est exact! Attention à la limite de précision d'un calcul ou d'une mesure. En effet, le résultat d'un calcul, par exemple, peut être précis avec beaucoup de chiffres significatifs, mais faux... (figure 1.6).

Il vaut mieux faire une analyse globale ou statistique que de regarder les cas individuellement.

Par exemple, des analyses statistiques pourraient montrer que l'astrologie fonctionne en étudiant les corrélations entre prédictions des astrologues et réalités des personnalités des individus. Ce type d'analyse a été faite (Biraud & Zarka 1998 ; Carlson 1985), pour montrer (depuis quelques décennies!), que l'astrologie ne fait pas mieux que le hasard.

Autre exemple, la croyance que la Pleine Lune influence les naissances. De nombreuses études se penchent sur des statistiques de naissance en fonction des phases de la Lune (Arliss *et al.* 2005 ; Morton-Pradhan *et al.* 2005 ; Staboulidou *et al.* 2008), et ne relèvent aucune corrélation significative.

Se montrer prudent dans l'interprétation des faits : *Ce précepte général, qui est une des bases de la méthode expérimentale, c'est le doute; et il s'exprime en disant que la conclusion de notre raisonnement doit toujours rester dubitative quand le point de départ ou le principe n'est pas une vérité absolue* (Bernard 2013).

Par exemple, le « suaire de Turin » a été daté au carbone 14 du Moyen-Âge ; une interprétation faite a été de dire que le suaire avait été contaminé par le carbone récent. Sauf qu'un calcul simple²⁸ montre qu'il aurait fallu une masse de carbone de plusieurs fois la masse du suaire pour fausser les mesures.

La nature est sûre : on n'a pas besoin de croire en la gravitation pour en observer les effets !

Principe de parcimonie : entre diverses explications possibles, celle qui est la plus vraisemblable, la plus simple est préférée. On parle encore de rasoir d'Ockham. Ce n'est pas un théorème, ce n'est pas une pierre angulaire de la méthode scientifique, mais simplement un principe de simplicité ou d'économie.

Une théorie scientifique est testable, réfutable.

Le bizarre, l'improbable... est probable! Des événements inhabituels sont en fait probables sur un laps de temps important et/ou sur un nombre important de cas.

L'erreur est humaine, mais pas en permanence : même un astrologue sans aucun pouvoir fera nécessairement, de temps en temps, des prédictions justes.

La compétence réelle de l'informateur est fondamentale : la personne qui affirme quelque chose le fait-elle dans son domaine de compétence? Le corollaire est l'argument d'autorité qui fait que l'on fait confiance à une argumentation en fonction de son origine plutôt qu'en fonction de son contenu. Les médias font régulièrement appel à des experts pour avoir des avis circonstanciés. Il faut simplement faire attention au champ de compétence des experts en question. Un géophysicien fameux qui nie le réchauffement climatique sur un plateau télé est loin de ses compétences, il utilise l'argument d'autorité pour assoir son idéologie.

Effet boule de neige : accumuler les détails dans un récit de n-ième main...

28. Voir : http://www.unice.fr/zetetique/articles/HB_suaire_C14.html.

Effet *bipède* : prendre l'effet pour la cause – *l'existence des pantalons prouve que Dieu a voulu que nous soyons des bipèdes*. Par exemple, d'après le créationnisme, certains phénomènes vivants sont si bien conçus et si complexes qu'il est impossible qu'ils se soient produits naturellement, par hasard, sans un concepteur intelligent ; donc ce concepteur existe nécessairement²⁹. On le nomme également effet Pangloss ou raisonnement panglossien, c'est le raisonnement à rebours.

Effet *petits ruisseaux* : les petits oublis (ou erreurs) permettent des grandes théories...

Par exemple pour le 11 septembre 2001 : des incendies dans des gratte-ciels de structure totalement différente ont été utilisés pour « démontrer » que les tours n'auraient pas dû s'effondrer... Bien sûr, on oublie de dire à chaque fois que des structures en béton armé résistent bien mieux en cas d'incendie que des structures en acier.

Autre exemple, la loi de Titius-Bode en astronomie : énoncer une loi générale à partir de données peu fiables ou peu nombreuses : distance des planètes du Système solaire = $d = 4 + 3 \times 2^n$ où d est la distance en dixième d'unité astronomique, n vaut $-\infty$ pour Mercure, 1, 2, 3, 4 et 5 pour les planètes suivantes... Cependant ce calcul n'est plus valide pour Uranus, Neptune... Il n'y a pas de fondement physique, c'est un artefact numérique.

À propos de la théorie d'Yves Rocard sur la sourcellerie : les expériences sont mal faites, les données sont manipulées *a posteriori* pour coller aux idées préconçues...

Effet *cerceau* : admettre au départ ce que l'on va ensuite prouver (raisonnement circulaire).

Effet *puits* ou effet Barnum : faire un discours profond – creux – est efficace : il a été montré que le pouvoir persuasif de déclarations totalement vagues et générales était supérieur aux descriptions pourtant appropriées et précises. On retrouve cet effet un peu partout dans différentes croyances, comme l'astrologie, la graphologie, la voyance, etc. C'est lui qui fait qu'un horoscope très général donne l'impression de s'appliquer à son propre cas.

Effet *impact* : utiliser le poids des mots, la connotation. Nombre de marchands de peur utilisent un vocabulaire spécialement choisi pour choquer au-delà du raisonnable et propager des inquiétudes.

Effet *cigogne* : confondre corrélation et causalité (on a vu la population des cigognes augmenter conjointement avec celle des humains dans une région donnée... Les cigognes apporteraient-elles les nouveaux-nés?) Ce n'est pas parce que deux variables sont corrélées qu'elles ont un lien de cause à effet. Par exemple, la consommation de chocolat d'un pays est corrélée avec le nombre de ses prix Nobel (Messerli 2012) : manger du chocolat nous rendrait-il plus intelligent ou tout du moins plus apte à faire de grandes découvertes? En fait, c'est plutôt parce qu'un pays est riche qu'il consomme du chocolat et qu'il a une recherche de qualité, donc des prix Nobel... On peut trouver toutes sortes de corrélations, le site web <http://www.tylervigen.com> en recense un certain nombre (comme le fait que le nombre de personnes qui se noient chaque année dans une piscine est corrélé au nombre de films dans lesquels l'acteur Nicolas Cage apparaît chaque année!).

29. Différents modèles ont vu le jour au cours de l'histoire pour expliquer l'évolution des espèces. Les principaux sont :

- le transformisme de Jean-Baptiste Lamarck, qui dit que les organismes s'adaptent à leur milieu ;
- l'évolutionnisme de Charles Darwin, qui avance que l'évolution se fait par sélection naturelle. En d'autres termes, ce sont les organismes les mieux adaptés à leur environnement, grâce à de nouvelles mutations, qui survivent et transmettent leurs gènes ;
- le néodarwinisme, qui conserve le concept de sélection naturelle, mais qui précise en plus que l'évolution est graduelle et que les changements évolutifs par mutation sont soit de type anagenèse (une nouvelle lignée remplace une ancienne), soit de type cladogenèse (deux nouvelles lignées se scindent à partir d'une lignée ancestrale) ;
- les équilibres ponctués de Stephen Jay Gould et Niles Eldredge ne diffèrent du précédent modèle que sur un point : les espèces évolueraient lors de périodes ponctuelles séparées par des périodes stagnantes, et non de manière graduelle.

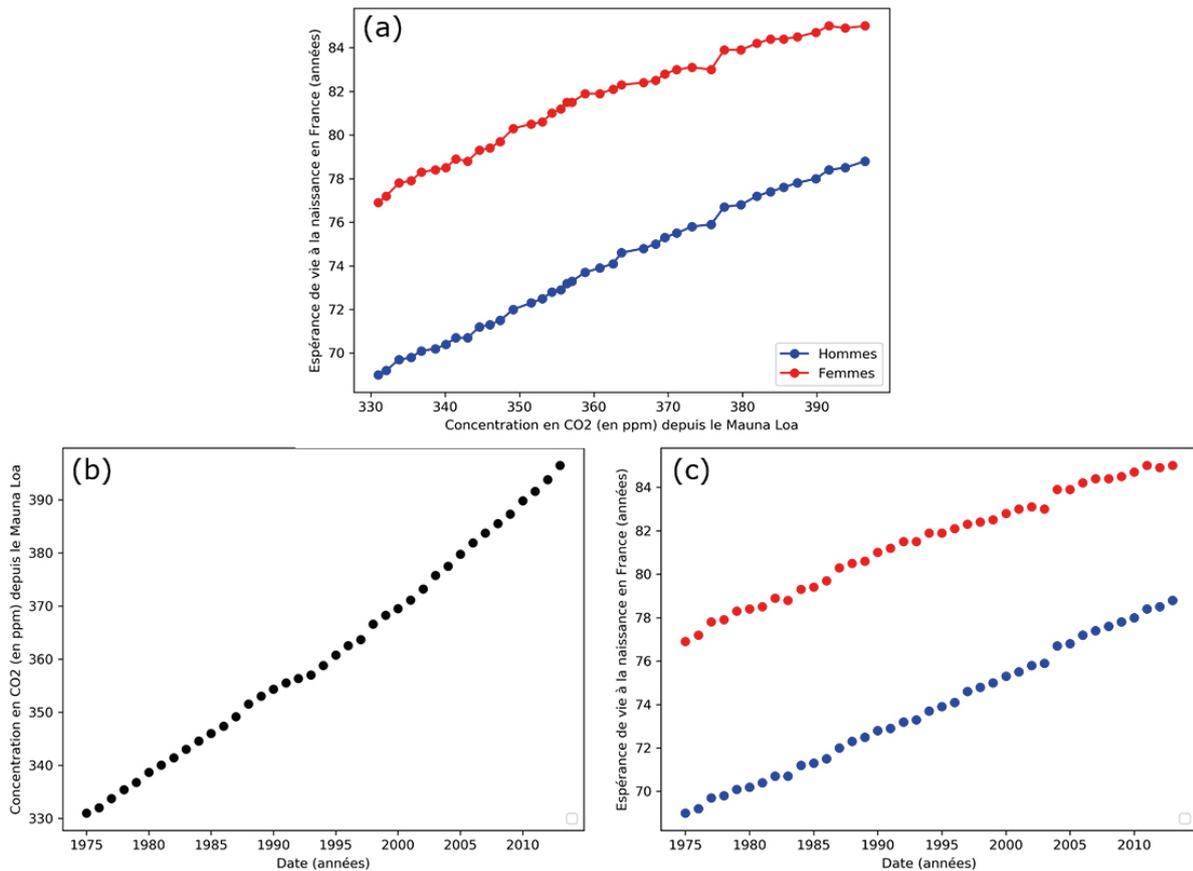


FIGURE 1.7 – Illustration de la corrélation entre le taux de CO_2 dans l’atmosphère et l’espérance de vie. (a) L’espérance de vie à la naissance en France pour les hommes (en bleu) et pour les femmes (en rouge), en fonction de la fraction de gaz carbonique mesurée au Mauna Loa. (b) Concentration en gaz carbonique mesurée chaque année à l’observatoire du Mauna Loa (Hawaï). (c) Espérance de vie à la naissance en France pour les hommes (en bleu) et pour les femmes (en rouge).

Autre exemple : le CO_2 dans l’atmosphère serait-il bénéfique pour la santé (figure 1.7)? Les deux croissent avec le temps, mais pour des raisons différentes : les progrès de la médecine et de l’hygiène pour l’un, les rejets de gaz carbonique dus à la combustion des énergies fossiles pour l’autre.

Effet paillason : faire un choix trompeur des mots utilisés. (« Des scientifiques disent que... » se transforme quelquefois en « Les scientifiques disent que... » ; un petit changement d’une lettre qui modifie en fait profondément le sens...). Cet effet est largement utilisé dans les médias : souvent le conditionnel de la science s’y transforme en certitude.

1.3 Internet

1.3.1 Qu’est-ce qu’internet ?

Internet tel que nous le connaissons est un outil formidable qui a vu le jour au CERN en 1989 (World Wide Web, pages en HTML, URL et protocole HTTP... standards développés par des informaticiens du CERN, Tim Berners-Lee et Robert Cailliau) suite à des développements depuis les années 1960, notamment ARPANET (1969), le premier réseau, développé au départ pour faciliter les communications entre chercheur·euse·s.

Il s'agit d'un vaste réseau informatique sans centre névralgique composé d'une multitude de sous-réseaux, publics ou privés, autonomes. Le « web » n'est qu'une application d'internet, il y a aussi le courrier électronique, les communications instantanées, le *peer-to-peer*... La communication sur internet se fait par paquets qui sont transmis séparément. Les données à transmettre (texte, images, son, vidéo...) sont ainsi découpées en « paquets » contenant un entête avec les informations nécessaires pour acheminer et reconstituer les données.

Un réseau informatique est un ensemble d'équipements (ordinateurs, imprimantes, objets connectés, routeurs³⁰, serveurs³¹ reliés physiquement entre eux – directement ou non – par l'intermédiaire de câbles dans lesquels circulent des signaux électriques (ondes électromagnétiques), d'ondes électromagnétiques micro-ondes (wifi) ou de fibres optiques dans lesquelles circulent des ondes électromagnétiques lumineuses.

En 1993 apparaît le premier navigateur web avec images et interactivité, Mosaic. En 1994, le premier moteur de recherche, Lycos, puis Altavista en 1994. Supplantés par Google en 1998. Wikipédia arrive en 2001, Facebook en 2004.

1.3.2 Diffusion du savoir

La propagation du savoir s'est d'abord faite oralement, puis par l'écriture manuscrite sur divers supports (rouleaux de papyrus, -5000 ans, puis de parchemin, -200 ans av. J.-C.). Le codex, ancêtre du livre actuel, apparaît à la fin de l'Antiquité (vers le III^e siècle). Le papier, inventé en Chine un peu avant J.-C., remplace progressivement le parchemin en occident à partir du VIII^e siècle. La révolution arrive vers 1450 avec la possibilité de reproduire les livres en plusieurs exemplaires par l'imprimerie mise au point par Gutenberg. Le savoir se propage en parallèle par l'éducation, de l'école à l'université. Désormais, internet (depuis le début des années 1990) s'est ajouté à l'équation. L'accessibilité au savoir pourrait être un enjeu fondamental de notre avenir démocratique.

L'introduction du rapport de l'UNESCO de 2005, *Vers les sociétés du savoir*, stipule :

À présent, la diffusion des nouvelles technologies et l'avènement de l'internet comme réseau public paraissent ouvrir de nouvelles chances pour élargir cet espace public du savoir. Serions-nous désormais dotés des moyens qui permettraient un accès égal et universel à la connaissance, et un authentique partage? Celui-ci devrait alors être la clé de voûte de véritables sociétés du savoir qui soient source d'un développement humain et durable. (UNESCO 2005, p. 17)

Pour accéder à ce programme, il faut en premier réduire la « fracture numérique » c'est-à-dire l'inégalité d'accès aux sources du savoir, donc internet. Le même rapport (UNESCO 2005, p. 47) précise : *La transformation d'une information en savoir suppose un travail de réflexion. En tant que telle une information n'est qu'une donnée brute, la matière première de l'élaboration du savoir.* Car les processus de diffusion de l'information, en particulier sur internet, ne sont pas tous sélectifs ni « digérés », ce qui pose un certain nombre de problèmes.

L'avènement d'internet engendre effectivement un *libéralisme cognitif* (Bronner 2011) : les produits du savoir ne subissent pas de taxation ou d'interdiction étatique (démocratie); cela est rendu possible par les innovations technologiques (internet en est la manifestation emblématique).

30. Un routeur est un appareil permettant aux « paquets » d'être acheminés vers leur destination.

31. Un serveur est un appareil fournissant des services à des clients, comme le stockage de pages web, de bases de données, de courriers électroniques...

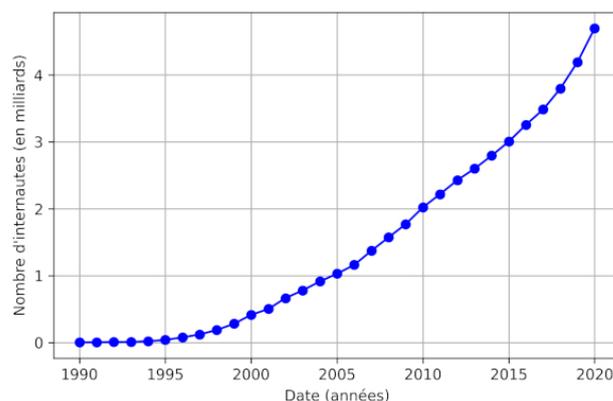


FIGURE 1.8 – Évolution du nombre d'internautes (en milliards) dans le monde en fonction du temps. Un utilisateur d'internet ou internaute est défini par l'Union Internationale des Télécommunications comme toute personne ayant accédé à internet depuis n'importe quel endroit au cours des trois derniers mois. Cela peut se faire à partir de n'importe quel type d'appareil connecté (ordinateur, téléphone mobile, console de jeux, télévision numérique, etc.).

1.3.3 Internet comme support du savoir

L'accès à internet dans le monde croît très rapidement (figure 1.8) : en 2015, 3 milliards d'internautes, soit 42 % de la population ; en 2020, 4,7 milliards d'internautes, soit 59 % de la population³² : plus de la moitié de la population est connectée³³ ! Ce qui se traduit par un recul des autres supports de l'information (journaux, radios, télévisions).

Est-ce un problème ?

Quand j'ai écrit ce cours en 2014 et la première version de ce document en 2018, la partie sur internet provenait de l'ouvrage du sociologue Gérard Bronner (Bronner 2013), qui proposait une explication séduisante à la propagation irraisonnée des croyances diverses et variées à une époque où la science et la technologie dominent la société. Cette thèse avançait qu'internet permettant un déploiement exponentiel de la quantité d'information disponible, celle-ci serait forcément, en moyenne, de moindre qualité. Comme tout un chacun peut publier ses élucubrations très facilement sur la toile, il n'y a pas de vérification *a priori* de la véracité de ces informations. Comme les tenants de croyances diverses ont du temps et de la motivation pour partager leurs connaissances, ils le font, et provoquent ainsi de nombreuses adhésions à leurs idées. Idées qui sont en général séduisantes pour l'esprit, car elles demandent un effort cognitif relativement faible pour être comprises. Cette « théorie » de Gérard Bronner m'a instantanément séduit, je l'ai intégrée à mon cours. Pourtant, elle reste une théorie, elle n'est pas prouvée, cela peut être une explication mais qui semble désormais très minoritaire par rapport à d'autres (Attard 2021).

Vérification de l'information

Le contrôle de l'information se fait *a posteriori* sur internet (Wikipédia, etc.) contrairement aux médias traditionnels où elle est contrôlée *a priori*. Mais conformément à la méthode de production de la science, où le contrôle est fait *a posteriori* par les pairs.

Sur internet tout un chacun peut publier ce qu'il souhaite : partage de connaissances, d'idéologies, etc. La vérification n'est généralement pas possible compte tenu de la quantité

32. Par ailleurs estimée à 8,011 milliards en janvier 2023. Voir <http://www.worldometers.info/fr/population-mondiale/>.

33. Source : <https://ourworldindata.org/internet>

d'information. C'est notamment vrai dans le domaine de la vulgarisation scientifique, où des vulgarisateurs « amateurs », sans forcément avoir été formés à la science et à la méthode scientifique ouvrent blogs et chaînes de vidéo pour raconter la science. Ce qui était le pré carré des journalistes scientifiques auparavant est devenu ouvert grâce au web. Avec des avantages (certains vulgarisateurs sont très bons et permettent au public de mieux comprendre la science) et des inconvénients (le manque de méthode peut faire dire ou écrire des choses, qui peuvent être graves selon le domaine scientifique). Ainsi Foucart *et al.* (2020) et Andreotti & Noûs (2020), entre autres, pointent un dévoiement d'une partie de cette vulgarisation au profit savamment calculé de « marchands de doute »³⁴, sur certains sujets ayant trait à des problématiques environnementales, notamment. Il faut donc choisir avec soin les vulgarisateurs de la toile, et ce n'est pas forcément un choix facile à effectuer. En revanche, les journalistes scientifiques et savamment formés pour cela, restent une valeur sûre.

L'exemple de Wikipédia

Cette encyclopédie participative est assez incroyable : je la consulte presque quotidiennement, et c'est souvent le point de départ que j'utilise pour découvrir un sujet, les références et les liens sont souvent utiles et pertinents pour aller plus loin³⁵. Même pour les cours que je dois faire à l'université, Wikipédia s'avère un outil très utile. Pourtant il a longtemps été décrié dans le milieu universitaire³⁶.

Et même encore maintenant, on peine à le citer dans les outils encyclopédiques de base pour réaliser une bibliographie. Mais un système encyclopédique basé sur « la revue par le public », c'est-à-dire un système d'auto-correction des erreurs basé sur celui de la science (revue par les pairs), a pourtant tout pour plaire. De fait (Cummings 2020) : *La connaissance évaluée par les pairs est le moteur de croissance de la compréhension humaine, avec une profondeur presque illimitée, mais la connaissance évaluée par le public fournit le point d'entrée à cette profondeur pour le plus grand nombre de personnes. Les connaissances évaluées par le public tentent de traduire, d'interpréter et de contextualiser les connaissances évaluées par les pairs pour les masses.* Il faut évidemment, évaluer les forces et les faiblesses d'un tel système (tout comme la revue par les pairs de la production scientifique)!

Prenons deux exemples. D'une part l'article « homéopathie » de Wikipédia³⁷ est exhaustif, il traite non seulement de l'histoire du concept mais aussi de son manque d'efficacité validé par des études scientifiques. Le même article « homéopathie » sur l'encyclopédie Universalis³⁸ est rédigé par un unique auteur, historien, qui écrit dans l'introduction : *Traiter sereinement de l'homéopathie n'est pas chose aisée, tant elle est et a été l'objet de controverses. Pour les uns, elle n'est qu'une tromperie, au mieux un usage de placebo³⁹ qui ne mérite pas le nom de médecine, et doit être reléguée au rang des rites conjuratoires. Pour les autres, elle est une médecine efficace, sans effets secondaires, qui prend en compte l'individu dans sa globalité et son individualité.* Ce relativisme n'est pas tolérable dans une encyclopédie qui se veut objective. La revue par le public de la page

34. De nombreuses études ont trait à ces marchands de doute que l'on regroupe sous le terme d'agnostologie (voir : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Agnostologie>).

35. Voir par exemple : http://www.questiondebonsens.quebec.ca/wikipedia_pourquoi.html

36. <http://www.francoisguite.com/2008/05/des-professeurs-duniversite-utilisent-wikipedia/>

37. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Homéopathie>

38. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/homeopathie/>

39. L'effet placebo est un procédé thérapeutique n'ayant pas d'efficacité propre mais agissant néanmoins par des processus psychologiques. Dans le cas d'un médicament, celui-ci ne contient pas de principe actif. Il est utilisé en recherche médicale pour les groupes contrôles pour tester l'efficacité de nouveaux médicaments. Il est néanmoins remis en question par certaines études récentes, comme celle de Hróbjartsson & Gøtzsche (2010) qui conclut : *Nous n'avons globalement identifié aucun effet clinique important associé aux interventions placebos. Néanmoins, dans certains contextes, les interventions placebos peuvent avoir un impact sur les résultats rapportés par les patients, en particulier la douleur et les nausées, mais il est difficile de distinguer les effets rapportés par les patients d'un éventuel biais de notification. Les effets sur la douleur variaient (négligeables à cliniquement importants), y compris parmi les essais présentant un faible risque de biais. La variabilité des effets du placebo pouvait s'expliquer en partie par les variations observées en termes de mise en œuvre des essais et d'information des patients.*

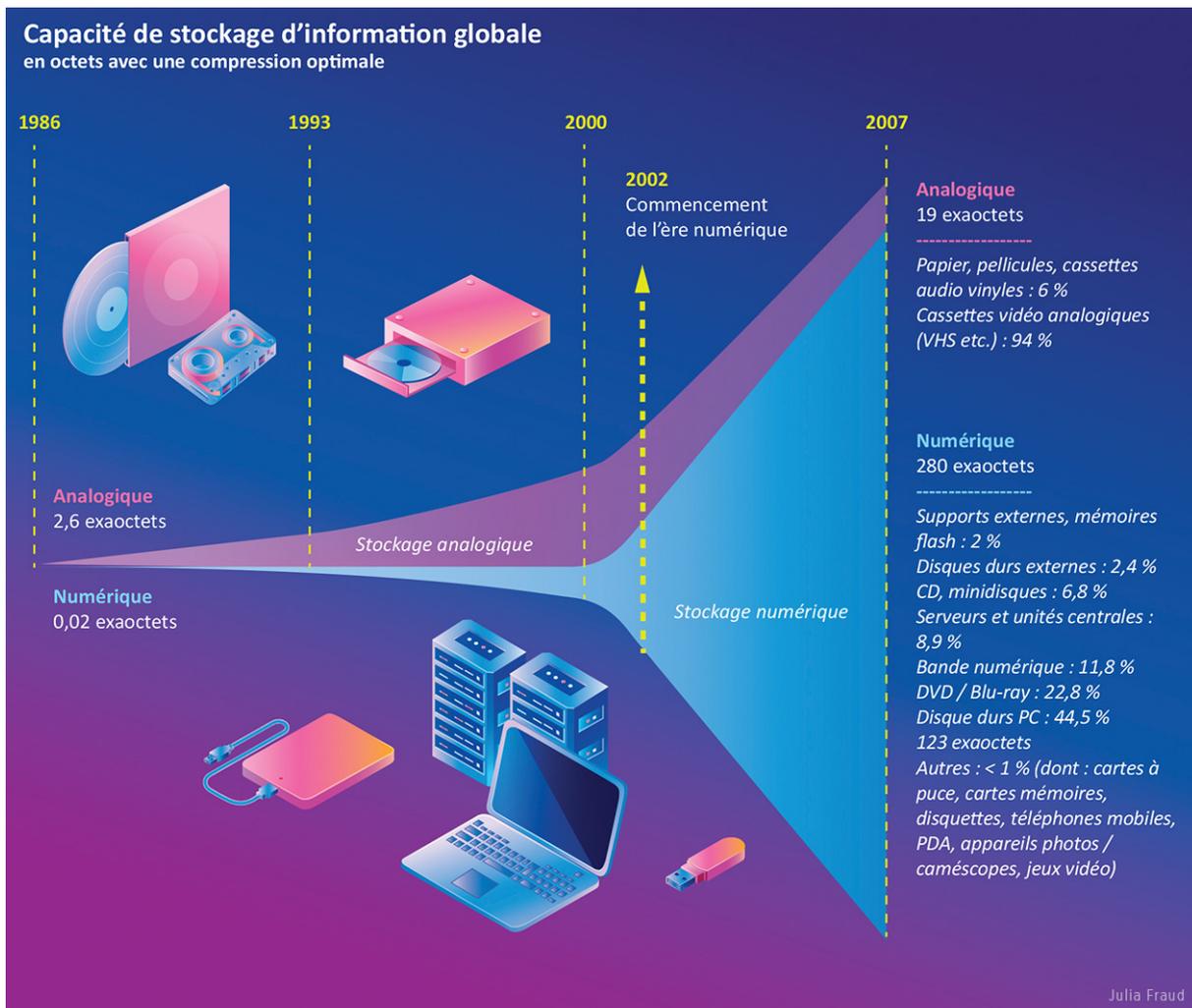


FIGURE 1.9 – Évolution de la quantité d'information disponible dans le monde, avec la part de l'analogique et du numérique. Données : Hilbert & López (2011). Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Wikipédia permet ainsi d'aboutir à une connaissance beaucoup plus objective et référencée, dans ce cas, tout au moins, que pour l'encyclopédie classique.

Le deuxième exemple concerne la présence de notices bibliographiques de personnalités fictives⁴⁰, des canulars, en somme. Ainsi la page du militaire et explorateur de Jean-Noël Savelli⁴¹ (1853-1917) en est un exemple. Cette page a été créée en octobre 2006⁴², en avril 2013, une référence bibliographique apparaît, un obscur volume référencé par Gallica⁴³, dans lequel je ne parviens pas à trouver le nom de Savelli. Le nom n'apparaît pas dans les promotions de l'École Navale de Brest⁴⁴; il y a bien une rue Charles-Marie Savelli⁴⁵ à L'Île-Rousse, mais ce n'est pas le bon prénom... La véracité de l'existence de ce fameux Jean-Noël Savelli sent le roussi tant les erreurs (volontaires?) sur sa biographie sont importantes! Des recherches plus poussées pourraient permettre d'établir la nature exacte de ce personnage (fictif ou pas?). Le processus de revue n'a pas encore fait son œuvre!

40. Voir aussi : https://en.wikipedia.org/wiki/Reliability_of_Wikipedia#False_biographical_information

41. https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Noël_Savelli

42. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Jean-Noël_Savelli&action=history

43. <https://gallica.bnf.fr>

44. <http://ecole.nav.traditions.free.fr/promotions.htm>

45. <https://www.qwant.com/maps/place/street:osm:way:244263570?client=search-ia-maps-address>

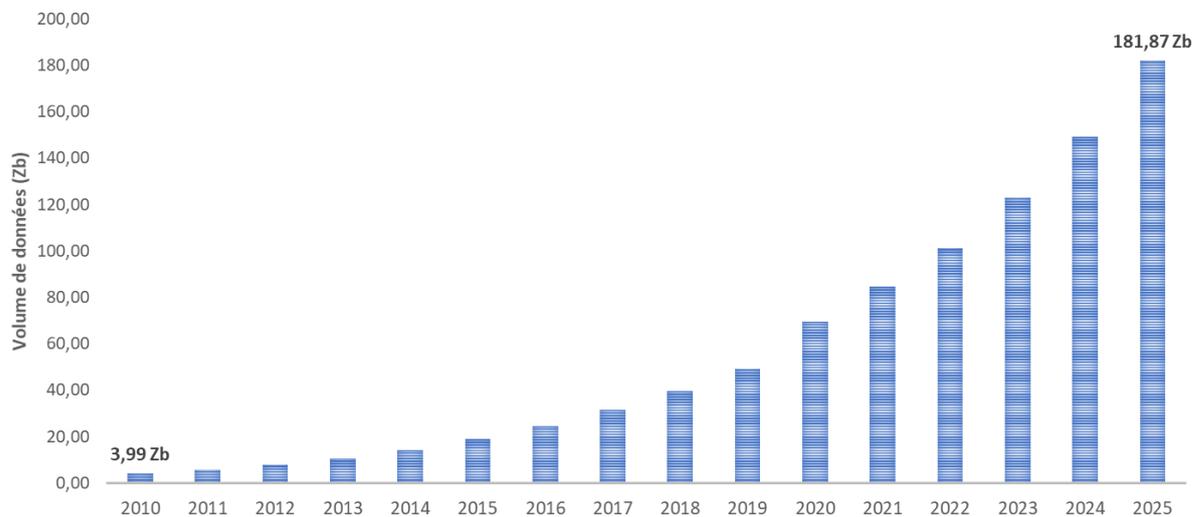


FIGURE 1.10 – Évolution passée et prévisionnelle de la taille de la sphère des données globales (le volume de données créées et répliquées est exprimé en zétabytes – Zb). Données : © IDC (<https://www.idc.com>), Worldwide IDC Global DataSphere Forecast, 2022-2026 : Enterprise Organizations Driving Most of the Data Growth (IDC US49018922, May 2022). Voir aussi Reinsel *et al.* (2018).

1.3.4 Le biais de confirmation

Il désigne la tendance naturelle qu’ont les personnes à privilégier les informations qui confirment leurs idées préconçues ou leurs hypothèses (sans considération pour l’authenticité de ces informations) et/ou d’accorder moins de poids aux hypothèses jouant en défaveur de leurs conceptions. Le biais de confirmation est sans doute déterminant dans les processus qui pérennisent les croyances.

1.3.5 Le marché de l’information

La quantité d’information (figure 1.9) produite sur notre planète en cinq ans, au tournant du XXI^e siècle, a été quantitativement supérieure à l’ensemble de l’information imprimée⁴⁶ depuis

Gutenberg (1450) (à savoir quelques exaotets – 1 Eo = 10⁹ Go) (Siméon 2012).

En 2018, la quantité de données produite était estimée à 33 zettaoctets⁴⁷ (Reinsel *et al.* 2018) (figure 1.10). En 2020, nous produisons 2,5 exaotets de données chaque jour. En deux jours nous produisons autant de données que tout ce qui a été produit entre le début de la culture humaine et 2003 ! Ce qui fait environ 1 zettaoctet par an. . . Et cette quantité croît !

Ces données sont diverses et variées, les mails que nous échangeons, les images et vidéos postées sur internet, mais aussi les données issues de capteurs en tous genres (météo, climat, caméras de surveillance. . .), les échanges sur les réseaux sociaux, etc.

Au passage, la science est une grande génératrice de données (télescopes, accélérateurs de particules, capteurs du climat et de la météo, mais aussi simulations numériques). Par exemple l’observatoire Vera Rubin va produire environ 20 téraoctets de données chaque nuit (soit l’équivalent de 20 disques durs de 2018, et ce pendant 10 ans entre 2023 et 2033. Donc 60 pétaoctets au total ! Évidemment, d’ici là, à côté de tout le reste, cela semblera ridicule. Jusqu’à il y a peu,

46. Le nombre de livres ayant été imprimés a été estimé en 2010 à 130 millions (voir par exemple : <https://mashable.com/2010/08/05/number-of-books-in-the-world>). Une page imprimée recèle environ 2 ko d’information (texte et image). Le nombre de page moyen d’un livre est estimé à 200. Soit 400 ko, en moyenne, par livre. Ainsi, l’ensemble des livres imprimés représente environ 50 To de données.

47. zetta est le préfixe pour 10²¹, donc 1 Zo correspond à 10²¹ o soit 10⁹ To, donc un milliard de disques durs de taille actuelle (2018); exa (E) est le préfixe pour 10¹⁸; péta (P) est le préfixe pour 10¹⁵.

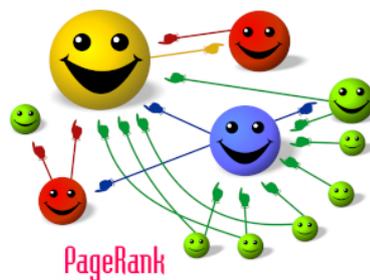


FIGURE 1.11 – Illustration du *PageRank*. Source : Wikipédia, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PageRank-hi-res.jpg>. CC BY-SA.

la science générant les plus grosses quantités de données (accélérateur LHC et expériences de physique des particules, par exemple), mais la notion de « big data » est en train de s'écouler depuis la sphère scientifique vers la société.

1.3.6 Recherche d'information sur internet

Pour rechercher de l'information sur internet, on utilise un « moteur de recherche » qui est une application web permettant de trouver une page web à partir d'une requête sous forme de mots-clés. Actuellement le monopole des recherches sur internet est détenu par Google (90 % des recherches en France en mai 2017⁴⁸). Il existe néanmoins des alternatives⁴⁹.

Comment fonctionne un moteur de recherche ?

Le principe de base est qu'un certain nombre de logiciels sont dédiés au parcours systématique du web en suivant récursivement les liens, afin d'indexer le contenu des pages web, dans de grandes bases de données, par l'intermédiaire de « mots-clés ». Enfin, un algorithme de recherche permet à partir de mots-clés tapés par l'utilisateur d'affiner les résultats retournés par ces vastes bases de données.

Par exemple, Google utilise une mesure de la popularité d'une page web pour améliorer les performances de son algorithme de recherche. Il s'agit du *PageRank* : chaque site est noté en fonction de sa popularité (mesure établie à partir du nombre de liens pointant vers le site, liens pondérés par la popularité des sites dont ils sont issus) (figure 1.11).

Un site a donc d'autant plus de chances d'être visité qu'il a un *PageRank* élevé puisqu'il va arriver en tête dans les recherches effectuées par Google.

1.3.7 Motivation des croyants

D'après Bronner (2011).

1. Sur internet, les croyants sont généralement plus motivés que les non-croyants pour exprimer leur point de vue.

Un conspirationniste, par exemple, cherchera à retenir quelques-uns des arguments qui permettent de croire que les attentats du 11 septembre ont été fomentés par la CIA. Le non-croyant sera souvent dans une posture d'indifférence, il refusera la croyance, mais sans avoir besoin d'une autre justification que la fragilité de l'énoncé qu'il révoque.

48. Source : *Les parts de marché 2017 des moteurs de recherche en France et dans le monde !* Vincent Brossas, 7 juin 2017, <https://www.leptidigital.fr/webmarketing/seo/parts-marche-moteurs-recherche-france-monde-11049/>.

49. Voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_moteurs_de_recherche

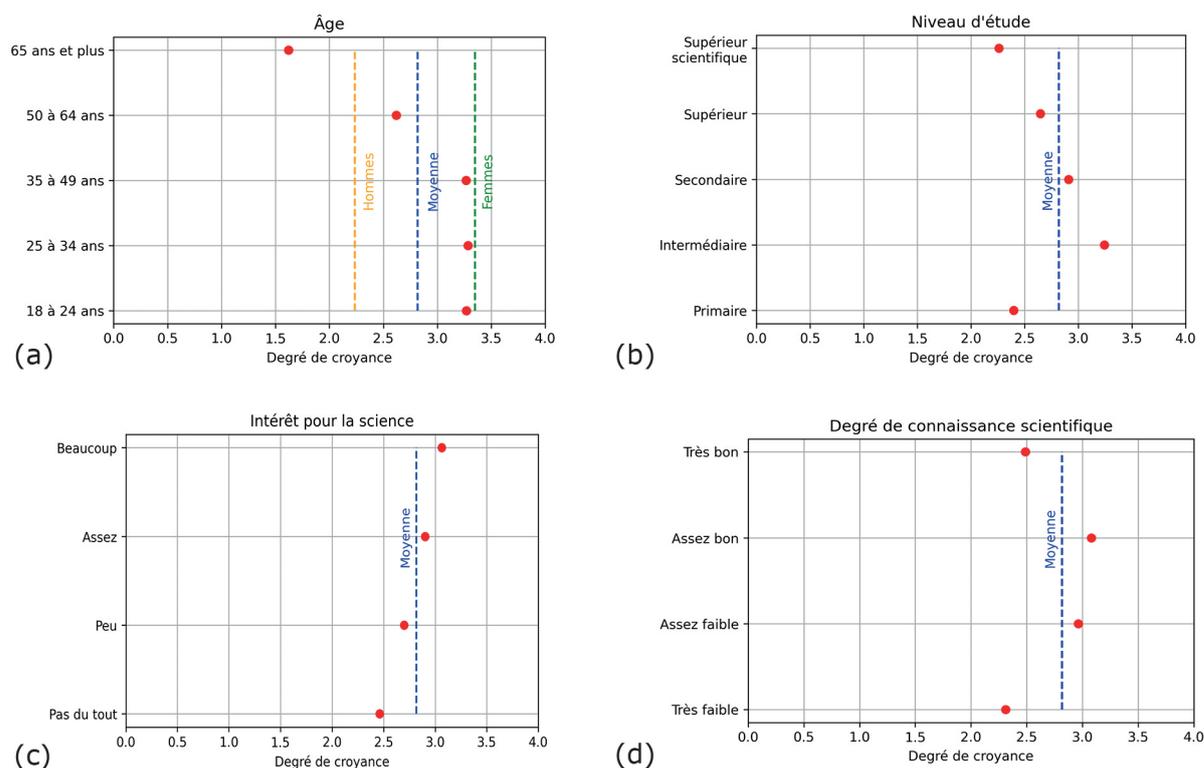


FIGURE 1.12 – Illustration des résultats d'un sondage analysé par Boy (2002). Degré de croyance aux para-sciences (astrologie, divination, télépathie) en fonction : (a) de l'âge et du sexe; (b) du niveau d'études; (c) de l'intérêt pour les sciences; (d) des connaissances scientifiques.

2. Ceux qui seraient en mesure d'opposer des arguments robustes aux allégations des croyants n'ont pas beaucoup d'intérêt à le faire.

Par exemple, dans le cas de l'astrologie, les astronomes peuvent facilement faire la promotion de certaines des raisons qui conduisent à trouver les propositions astrologiques douteuses, mais la plupart du temps, ils ne se sentent pas plus qu'agacés par les allégations astrologiques, celles-ci ne représentent aucun danger pour eux, les combattre serait chronophage et sans intérêt institutionnel.

C'est aussi vrai pour d'autres médias qu'internet (livres, journaux...), mais internet amplifie le processus dans la mesure où il réduit considérablement les coûts de l'offre : tout le monde peut s'exprimer très facilement sur le net, c'est moins évident dans une revue ou dans un livre.

1.3.8 La propagation des croyances

Internet n'est probablement pas le principal vecteur des croyances, contrairement à une idée reçue.

On pourrait penser que l'éducation de tous, la transmission du savoir scientifique à l'école et à l'université est un frein essentiel à ces diffusions des *fake news*⁵⁰. Ce n'est pourtant pas si évident car il a été montré à partir de sondages auprès d'échantillons représentatifs de la population (Boy & Michelat 1986 ; Boy 2002) qu'un niveau d'études élevé ne signifiait pas être moins crédule, comme le montre la figure 1.12b. La figure 1.12 montre en outre que l'intérêt pour les sciences est corrélé positivement avec le degré de croyances dans les para-sciences (astrologie,

50. Quand j'ai démarré ce cours en 2014 le terme n'existait pas. Les *fake news* ou infox ont été popularisées en 2016 lors de l'élection de Donald Trump aux États-Unis. Depuis lors une quantité invraisemblable d'études et d'ouvrages sur cette question est parue.

divination, télépathie). Et que seule une bonne culture scientifique permet de diminuer ce degré de croyance. Une étude (parmi d'autres) américaine (Drummond & Fischhoff 2017) montre également que sur certains sujets les croyances sont corrélées avec l'identité religieuse et/ou politique des individus, indépendamment des connaissances et de l'éducation scientifiques.

De fait, des études récentes (Osmundsen *et al.* 2021 ; Attard 2021) montrent que la polarisation politique joue un grand rôle dans le partage des croyances sur les réseaux sociaux : ce serait donc nos conceptions politiques qui nous incitent à partager des contenus faux ou manifestement faux, même si les personnes sont capables de faire la différence entre le vrai et le faux. La véracité des partages n'étant pas le critère principal sur ces réseaux. Les croyances dans les théories farfelues (comme la Terre plate) ou les théories du complot ne tiennent que par leur caractère hors système, ou contre le « système » ; les biais cognitifs n'ont pas forcément un grand rôle (Attard 2021).

Une des façons, probablement, de freiner ce genre de diffusion est non seulement de transmettre le « savoir » scientifique mais également d'enseigner des méthodes permettant d'aiguiser l'esprit critique.

1.4 Quelques croyances tenaces

1.4.1 Les effets allégués à la Lune

Plus de naissances lors de la pleine Lune ?

Une croyance populaire voudrait que le nombre de naissances soit plus important lors des nuits de pleine Lune. Il est facile d'étudier statistiquement cet effet avec les bases de données de naissances. De fait, certaines études semblent observer des effets marginaux observés (moins de 10 %) en fonction des phases (cependant pas de pic lors de la pleine Lune), mais qui dépendent des bases de données utilisées, aussi grandes soient-elles ! Voir, par exemple : Caton & Wheatley (1998) ; Gans & Leigh (2015).

Faut-il planter ses tomates en fonction des phases de la Lune ?

Autre croyance tenace, qui fait la fortune de certaines revues de jardinage peu scrupuleuses, celle qui imagine que la Lune a un effet sur la croissance des plantes (Blanc 2006). Cet effet, qui n'a jamais été observé, pourrait être soit d'origine gravitationnelle tout comme la Lune soulève l'eau des océans lors des marées, soit d'origine lumineuse : la lumière de la pleine Lune pourrait alors permettre la photosynthèse. En fait, la *force de marée* engendrée par la Lune est proportionnelle à la taille de l'objet (pour la Terre, 12 800 km de diamètre, la marée est de 1 m de hauteur en moyenne) ; pour un objet de taille métrique, la marée est indécélable. De même, l'éclairement de la pleine Lune est d'environ 2 mW/m^2 ; or la photosynthèse nécessite 10 000 fois plus de lumière pour se faire... Aucune « expérience » ne montre d'effet significatif (voir par exemple Dorion & Mouchotte 2012).

Peut-on prendre un « coup de Lune » ?

La quantité de lumière issue de la Lune, qui n'est que le reflet de la lumière du Soleil, est $1/500\,000^{\text{e}}$ fois celle du Soleil. L'indice UV correspondant est de 0,00002... (sachant que l'échelle des indices UV va de 1 à 10, les indices 1 et 2 ne nécessitent aucune protection).

1.4.2 Les machines « surnuméraires »

Un moteur surnuméraire est un concept pseudo-scientifique de machine qui voudrait produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Or ce type d'appareil, s'il existait, violerait le principe de conservation de l'énergie ou premier principe de la thermodynamique. Postulat en



FIGURE 1.13 – Machine à mouvement perpétuel imaginaire : gravure sur bois réalisée vers 1660, considérée comme la première tentative de représenter un tel dispositif. CC0.

mécanique classique, on peut le démontrer à l'aide du théorème de Noether. En effet, l'invariance par translation dans le temps des lois physiques (relativité du temps), se traduit par la conservation de l'énergie. Donc une machine surnuméraire *ne peut pas* exister !

De même que le mouvement perpétuel (figure 1.13) ne peut pas exister : il y a toujours des frottements (mécaniques, magnétiques...) qui dissipent l'énergie : un système en mouvement soi-disant perpétuel fini toujours par s'arrêter... Même les mouvements planétaires ne sont pas perpétuels : de l'énergie est en effet dissipée par effets de marée.

1.4.3 L'astrologie

L'astrologie (Biraud & Zarka 1998) postule une relation entre les astres et les aptitudes, les comportements humains. Pour prouver scientifiquement une telle relation, soit on l'explique théoriquement, soit on l'observe (mesures et analyse statistique). Cette influence n'est explicable en aucune manière, par aucune des interactions connues (gravitation, rayonnement). Si l'astrologie « marche », alors on n'a aujourd'hui pas la moindre idée de « comment ça marche ». Reste la possibilité de l'observer.

C'est aux astrologues de prouver que l'astrologie marche et non aux astronomes – ou autres scientifiques – de prouver qu'elle ne marche pas⁵¹... Or il y a déjà de très nombreuses expériences, toutes négatives, qui tentent de prouver une telle relation.

51. Ce qui, au passage, est logiquement impossible : on ne peut pas prouver que quelque chose n'existe pas dans l'absolu. *On ne peut pas prouver théoriquement l'impossibilité d'une relation entre deux phénomènes*, seule la méthode statistique permet de montrer une éventuelle absence de relation (Biraud & Zarka 1998). Par exemple, je ne peux pas prouver que je ne suis pas Dieu. En revanche, si je l'étais, je pourrais le prouver, il me suffirait de faire un petit miracle.



FIGURE 1.14 – Un sourcier du XVIII^e siècle dans un livre français sur les superstitions. CC0.

1.4.4 La sourcellerie

Un sourcier (figure 1.14) est une personne qui recherche (et prétend trouver!) de l'eau souterraine en utilisant une baguette ou un pendule.

L'efficacité des sourciers n'a jamais pu être démontrée scientifiquement, des expériences réalisées dans des conditions rigoureuses, dites « en double aveugle », ont montré que les sourciers ne faisaient pas mieux qu'un choix au hasard...

Expérience en « double aveugle »

Dans les domaines où l'humain intervient (comme en médecine, sociologie...) dans toute sa complexité et sa diversité, on prend ce paramètre en compte dans les expériences et les études : deux groupes sont constitués (avec chacun le ou les sourciers et le ou les techniciens indiquant le protocole à suivre), par exemple l'un avec une source d'eau cachée à proximité (groupe test), l'autre sans source (groupe contrôle), mais ni les sourciers ni les techniciens ne savent dans quel groupe ils sont. La levée du voile n'est faite qu'après le traitement statistique des données. Il s'agit ainsi d'une expérience en « double aveugle » : ni les cobayes ni les techniciens ne savent s'ils sont dans le groupe test ou dans le groupe de contrôle.

1.4.5 Expérimenter la validité d'une pseudo-science/croyance

De nombreuses expériences prétendant montrer tel ou tel effet (astrologie, sourcellerie, mais aussi dangerosité des ondes de la téléphonie mobile, de vivre à proximité des centrales nucléaires, des OGM, etc.) ne respectent pas toujours les conditions fondamentales de rigueur pour garantir la validité scientifique de l'analyse des résultats (Biraud & Zarka 1998) :

1. définir rigoureusement le protocole expérimental avant l'expérience et s'y tenir ;
2. vérifier le caractère significatif des résultats obtenus (tests de confiance, analyse des biais possibles, etc.) ;
3. s'engager à publier tous les résultats obtenus, clairement et sous contrôle.

1.5 Le principe de précaution

1.5.1 Danger et risque

Il y a de nombreuses façons de définir la notion de risque selon le domaine (scientifique, juridique, etc.) dans lequel on se place. Nous adopterons les définitions suivantes, qui distinguent la notion de danger de celle de risque :

Danger : la façon dont un objet, une substance ou une situation est susceptible de causer du dommage (à une personne, à un bâtiment, à l'environnement...). C'est, par exemple, un produit toxique dans une usine, un manteau de neige instable en montagne, etc.

Exposition : la présence d'une victime potentielle et son éloignement par rapport au danger déterminent le niveau du risque.

Risque : la combinaison entre la probabilité que des effets dommageables surviennent réellement et la gravité de leurs conséquences réelles.

On peut résumer lapidairement :

$$\text{Risque} = \text{fonction} (\text{Danger}, \text{Exposition}, \text{Gravité})$$

Si l'exposition est nulle, malgré un danger qui peut être important, alors le risque encouru sera nul. Un exemple est illustré à la figure 1.15.

Autre exemple : en montagne, l'hiver, le danger d'avalanche de neige guette l'alpiniste. Si celui-ci reste chez lui, le danger subsiste mais l'exposition est nulle. S'il s'aventure en montagne dans ces conditions, il s'expose au danger. Mais il peut maîtriser le risque qu'il prend en limitant son exposition s'il peut connaître les pentes dangereuses, en renonçant à celles-ci. Ou bien en limitant la gravité d'un accident (dommage) en s'équipant du matériel adéquat (détecteur de victime d'avalanche, pelle, sonde, moyen de communication, etc.).

De façon plus mathématique (mais sommaire), on peut définir le risque r comme la conséquence (ou la gravité) C d'un événement multiplié par la probabilité d'occurrence p de cet événement.

$$r = p \times C$$

L'estimation des risques⁵² a beaucoup d'importance dans différents domaines : travail, assurance, société (risque sanitaire, environnemental), etc. Il n'est pas toujours facile de les évaluer de manière quantitative correctement.

1.5.2 Le principe de précaution

Cette section est basée en grande partie sur Bronner & Géhin (2008).

Considérons trois notions indispensables et complémentaires (d'après Wikipédia : *principe de précaution*⁵³).

52. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/évaluation_des_risques

53. https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_de_précaution



FIGURE 1.15 – Illustration de la différence entre danger et risque : observer des requins nager depuis le bord ne présente aucun risque (mais le danger est présent), tandis que nager au milieu des requins est risqué. Source : <https://www.efsa.europa.eu/>. © Autorité européenne de sécurité des aliments.

La **prudence** vise les risques avérés, ceux dont l'existence est démontrée ou suffisamment connue, de façon empirique, pour que l'on puisse en estimer la fréquence d'occurrence. Le fait d'être probabilisable rend le risque assurable. Exemples : l'utilisation de produits tels que l'amiante, jouer à la roulette russe, la consommation de vins et autres alcools, la cigarette.

La **prévention** vise les risques avérés, ceux dont l'existence est démontrée ou connue empiriquement sans toutefois qu'on puisse en estimer la fréquence d'occurrence. Exemples : le risque nucléaire, le risque de rupture de barrage. L'incertitude ne porte pas sur le risque, mais sur sa probabilité de réalisation. L'absence de probabilités rend le risque inassurable par l'industrie classique de l'assurance.

La **précaution** vise les risques dont ni l'ampleur ni la probabilité d'occurrence ne peuvent être calculées avec certitude, compte tenu des connaissances du moment. Exemples : les organismes génétiquement modifiés, les émissions électromagnétiques des téléphones portables, la robotique, le génie génétique, les nanotechnologies.

Au-delà d'un principe philosophique, le principe de précaution autorise les pouvoirs publics à prendre les mesures nécessaires pour faire face à des risques éventuels, alors même que l'on ne dispose pas des connaissances scientifiques nécessaires pour en établir l'existence (Larrère & Larrère 2001). Il est donc passé de statut philosophique à statut juridique. En effet, la *Charte de l'Environnement* inscrite dans la Constitution Française en 2005 stipule que : *l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable*. Ce principe applicable à l'environnement s'étend également à la santé publique et à la sécurité alimentaire (sang contaminé, « vache folle », etc.).

D'après Larrère & Larrère (2001),

[...] ce qui différencie la prévention de la précaution, c'est que la première relève d'un calcul d'optimisation en avenir incertain, quand la seconde est une procédure de décision en avenir controversé. Les risques auxquels s'applique le principe de précaution n'étant pas prouvés, leur présomption même est sujette à caution. Le principe de précaution revient à suspendre la décision d'introduire une innovation (ou à l'encadrer de mesures préventives dont on ne sait pas encore si elles seront nécessaires), le temps de réduire l'incertitude concernant l'existence d'un risque et de l'évaluer. Or, ce temps est aussi celui de laisser se développer, et se résoudre, les controverses scientifiques concernant les risques encourus. Le principe de précaution n'est donc pas un outil d'aide à la décision. Son objet est d'inviter la recherche scientifique à réduire l'incertitude, son ambition d'articuler science et politique en prenant acte de la diversité des régimes de la rationalité.

De fait, la société recherche un « risque zéro », c'est-à-dire une absence totale de risque, que ni la science ni la technologie ne peuvent garantir (les bénéfiques sont souvent exclus du débat). Ce principe est ainsi souvent invoqué devant certaines avancées technologiques (OGM, ondes électromagnétiques de la téléphonie mobile, nucléaire, vaccination, agriculture...) et peut constituer une entrave à l'innovation et à l'accumulation de connaissances.

1.5.3 Mathématisation du principe de précaution

On peut quantifier le compromis entre les bénéfices B d'une innovation et les coûts C associés (qui peuvent être de divers ordres : financiers, humains, etc.) comme le fait que :

$$(p_1 \times B) + (p_2 \times C) > 0$$

avec :

$B > 0$ = bénéfices de l'application d'une innovation ;

$p_1 > 0$ = probabilité que cette application tienne ses promesses ;

$C < 0$ = coût de l'innovation ;

$p_2 > 0$ = probabilité que ce que l'on craint se réalise.

Un exemple intéressant

Dans leur livre *L'inquiétant principe de précaution*, Gérald Bronner et Étienne Géhin (Bronner & Géhin 2008) reviennent sur l'entrave que représente le principe de précaution institutionnalisé pour l'innovation. À propos de la balance entre bénéfice et coût d'une innovation, ils prennent l'exemple de l'aspartame (pp. 47-48) :

Prenons par exemple, le cas de l'aspartame. Il s'agit de l'ester méthylique d'un dipeptide, molécule constituée de l'association de deux acides aminés. C'est une substance non nutritive qui a une saveur sucrée 200 fois supérieure à celle du sucre. On doit sa découverte à un hasard expérimental survenu en 1965. Les avantages que présentent cette substance sont évidents. Pourtant, certaines voix ont commencé à s'élever pour dire que garder la ligne était un objectif louable mais qu'en l'occurrence le prix à payer serait exorbitant. En effet une étude italienne⁵⁴ prétendait avoir montré que la consommation de ce produit pouvait favoriser l'apparition de tumeur cancéreuse chez le rat. Dans ces conditions, la conclusion que l'on devait tirer de la formule $(p_1 \times B) + (p_2 \times C)$ s'imposait. Ainsi, même si l'on pouvait accorder à coup sûr (p_1) que l'aspartame nous permettait de consommer moins de sucre (B), ce qui peut être considéré, en moyenne, comme bénéfique pour la santé, on craignait (p_2) que celui-ci soit cancérogène (C). Il paraissait donc évident que le coût exorbitant rendait parfaitement anecdotiques les avantages attendus du produit. [...] Il se trouve que cette expérimentation italienne fut invalidée par la communauté scientifique, notamment par l'AESA (Agence Européenne de Sécurité des Aliments), parce que les biais du protocole étaient si importants qu'ils interdisaient de prendre au sérieux les résultats obtenus⁵⁵. Dès lors, les termes de la formule précédente ne sont plus exactement les mêmes : p_2 en particulier pouvant être considéré comme provisoirement nul, il n'y a pas de raison de se méfier de ce produit. C'est là que l'énigme sociologique commence : malgré ce démenti unanime de la communauté des experts, et sur un sujet à propos duquel le sens commun n'a aucune compétence, il reste une suspicion concernant l'aspartame. Il n'est pas rare de rencontrer des individus qui s'abstiennent d'en consommer ou vous conseillent de ne pas le faire, avec cet argument que l'innocuité du produit ne serait pas démontrée. Internet est un outil intéressant pour sonder non l'état de l'opinion, mais la facilité avec laquelle on rencontre une thèse sur le marché des idées.

54. Soffriti et al. (2006), *First experimental demonstration of the multipotential carcinogenic effects of aspartame administered in the feed to Sprague-Dawley rats*, Environ Health Perspect., 114, pp. 379-385. <https://doi.org/10.1289/ehp.8711>.

55. EFSA (1996), *Opinion of the Scientific Panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC) related to a new long-term carcinogenicity study on aspartame*. EFSA-Q-2005-122, The EFSA Journal, 356, pp. 1-44. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2006.356>

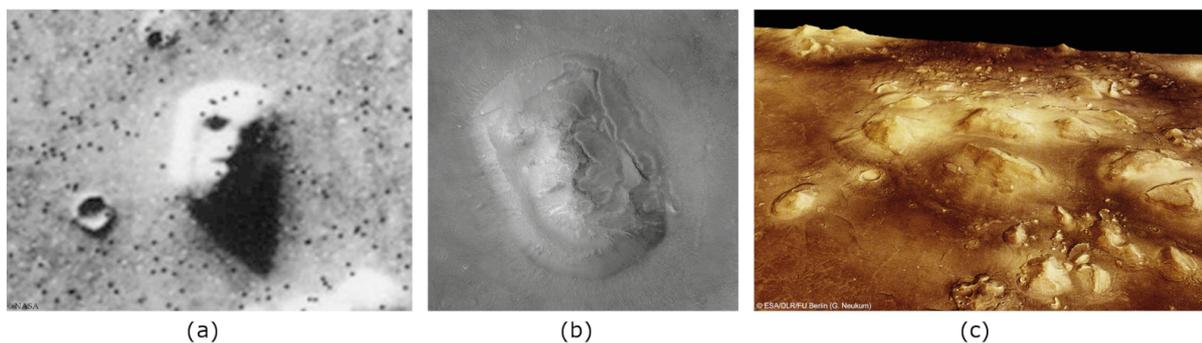


FIGURE 1.16 – Le « visage de Mars » au cours du temps! Un relief martien nommé « Cydonia Mensae ». (a) Cliché pris par la sonde Viking 1 en juillet 1976. © NASA/JPL-Caltech. (b) Image par la sonde Mars Global Surveyor en 2001. CC0. (c) Image par la sonde *Mars Express* en 2006. Source : ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum), https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Belgium_-_Francais/Cydonia_Le_visage_de_Mars. CC BY-SA.

J’ai présenté cet exemple dans ce cours pendant 4 ans, faisant confiance⁵⁶ aux auteurs du livre, notamment Gerald Bronner dont j’ai eu l’occasion de lire d’autres écrits⁵⁷. Néanmoins, en rédigeant ce cours, je suis allé voir un peu plus loin, et simplement en consultant la page web correspondante de Wikipédia⁵⁸, on se rend compte que la controverse persiste dans le monde académique, de nouvelles études mettent en cause l’aspartame en 2010, 2013, ou encore 2014⁵⁹.

La science avance donc doucement, plus doucement que ne le voudrait la société, qui tire des conclusions erronées (dans un sens ou dans l’autre) d’études sérieuses mais partielles. Le chapitre de l’aspartame n’est probablement pas encore refermé, comme l’ont cru les auteurs du livre cité plus haut.

1.5.4 Biais cognitifs liés à l’estimation des risques

Les biais cognitifs

Les psychologues et les sociologues étudient notre façon de penser et de raisonner, il s’avère que nous sommes parfois soumis à des erreurs de traitement de de l’information, que l’on appelle « biais » (Berthet 2018). Le modèle de Kahneman (2012), stipule que nous fonctionnons avec un système cognitif relevant du réflexe et de l’intuition (*système 1*), et avec un système complémentaire, le *système 2*, de la réflexion. Faire fonctionner le système 2 demande un effort, on l’évite la plupart du temps. Et parfois, par paresse cognitive, notre système 1 court-circuite notre système 2. À ce moment-là, on parle de *biais cognitif*⁶⁰.

Par exemple, les illusions d’optique⁶¹ comme les paréidolies, qui consistent à « voir » un visage ou une forme familière dans un paysage, un rocher, un nuage, etc. L’une des plus célèbre est le visage de Mars (figure 1.16).

56. Même si la citation dans leur livre d’un site web malhonnête comme « preuve » de l’existence de scénarios alternatifs au réchauffement climatique m’a conduit à penser que tout n’était pas à prendre pour argent comptant dans cet ouvrage ; sa lecture reste instructive, mais à considérer *avec précaution* !

57. Par ailleurs de plus en plus controversés !

58. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Aspartame#Controverse>

59. Voir par exemple : Fagherazzi *et al.* (2013), et <https://presse.inserm.fr/les-boissons-light-associees-a-une-augmentation-du-risque-de-diabete-de-type-2/6541/>

60. Pour une liste de nombreux biais répertoriés et étudiés, voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais_cognitif.

61. Il en existe des livres entiers ; un seul exemple, éloquent, l’échiquier d’Adelson : https://fr.wikipedia.org/wiki/Échiquier_d'Adelson.

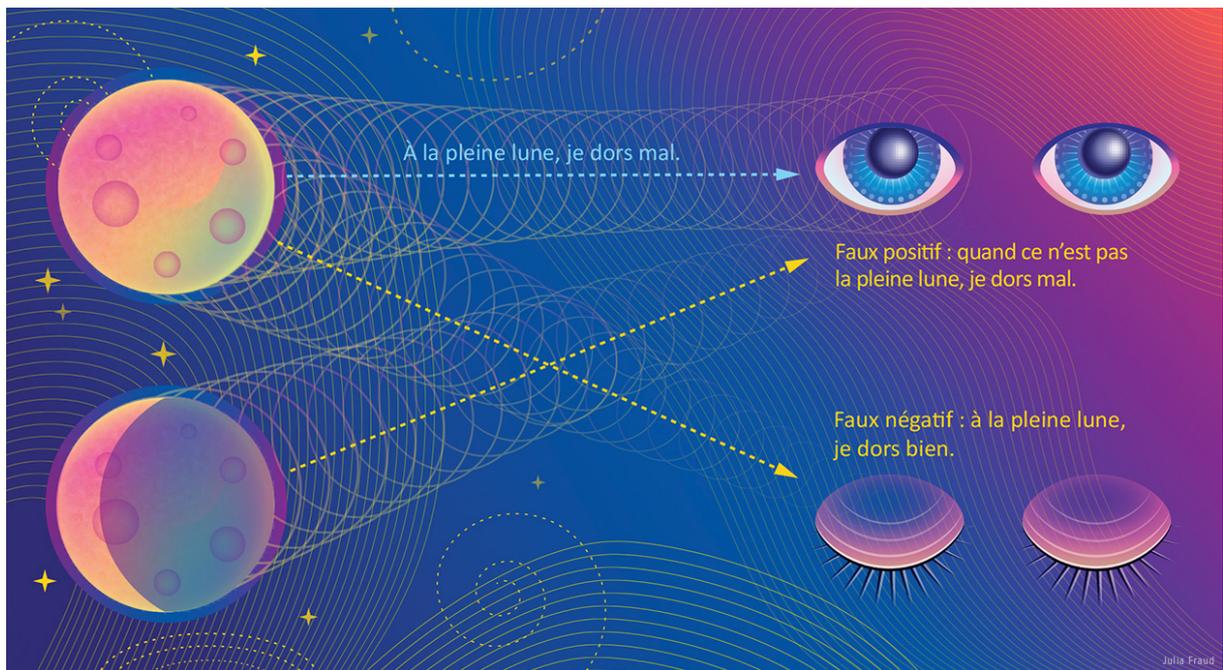


FIGURE 1.17 – Illustration du biais de confirmation : influence de la pleine Lune sur le sommeil. On peut avoir l'impression que la pleine Lune nous empêche de dormir parce que parfois, en cas d'insomnie, on constate qu'elle brille. Mais on oublie qu'on peut aussi ne pas bien dormir lorsqu'elle n'est pas pleine, ou encore dormir même si elle est pleine! Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Un biais particulièrement important dans l'explication de la propagation des croyances est le biais de confirmation. Nous y sommes tous soumis, cela consiste à privilégier (inconsciemment) les informations qui confirment nos idées préconçues (figure 1.17).

Sur-estimation des faibles probabilités

De nombreux travaux de psychologie montrent que nous avons tendance à sur-estimer les faibles probabilités et à sous-estimer les fortes probabilités (voir figure 1.18). Ce biais cognitif est amplifié quand ces probabilités sont associées à un risque (Blondel 2003).

On a tendance à vouloir un risque zéro, quitte à vouloir payer le prix fort pour y parvenir. D'où des coûts (financiers) déraisonnables pour la société, compte tenu des gains en matière de risque.

Par exemple : un nouveau processus de dépistage de l'hépatite C (cadre des dons du sang), plus efficace que les précédents, mais d'un coût sans commune mesure (l'année de vie gagnée est estimée à 55 millions d'euros à comparer avec ce qu'on investit en sécurité routière ou traitement du cancer du sein de l'ordre de 8000 euros par année de vie gagnée!), accepté par le gouvernement contre l'avis des experts, pour satisfaire l'opinion publique⁶².

L'opinion publique pèse fortement sur la décision politique, ce qui n'est pas illégitime en démocratie. La difficulté naît de ce que ses préférences ne vont pas toujours dans le sens de l'intérêt général, notamment lorsqu'elle est victime d'une erreur cognitive si répandue et si bien installée, la surestimation des faibles probabilités, que même le prestige de certains experts ne peut la contrebalancer sur le marché des idées. (Bronner & Géhin 2008, p. 60)

62. Cité par Bronner & Géhin (2008), p. 58-59; Jean-Yves Nau, *Le gouvernement renforce la sécurité transfusionnelle contre l'avis des experts*, Le Monde, 17 octobre 2000.

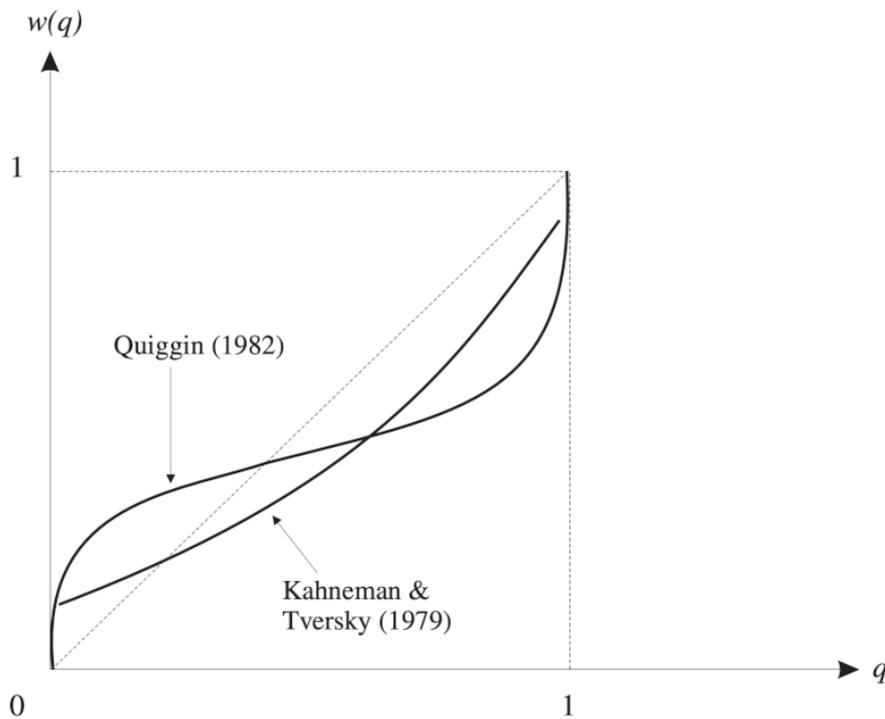


FIGURE 1.18 – Courbe des probabilités perçues selon deux modèles qui permettent de quantifier la surévaluation des faibles probabilités et la sous-évaluation des fortes probabilités. Source : Blondel (2003). © Direction générale du Trésor.

Les coûts sans les bénéfices

Dans l'exemple ci-dessus,

La non-application de ce dépistage comportait, certes, des risques de contamination supérieurs pour la population des transfusés, mais elle permettait aussi de consacrer l'argent économisé à des actions de santé publique permettant de sauver des vies en plus grand nombre. (Bronner & Géhin 2008, p. 61)

Il y a une idéologie derrière ce type de décision : peu importe le coût, seul le résultat compte... De fait, on prête plus facilement attention à une perte qu'à un gain de valeur équivalente. On a ainsi tendance à se focaliser sur un seul aspect du problème, à savoir les coûts, en l'oubliant l'autre partie, les bénéfices. Et donc le débat public est biaisé !

Décisions humaines face à l'incertitude

Dans une situation d'incertitude, de choix risqué, la théorie de l'utilité espérée développée en 1944 par Von Neumann & Morgenstern (1944) stipule que nous opérons un choix en calculant les probabilités d'occurrence des principaux choix disponibles, et en maximisant une valeur attendue, rationnelle, l'utilité. Pourtant, les humains ne se comportent généralement pas de manière rationnelle (Kahneman 2012). Des émotions comme la peur peuvent ainsi avoir une grande importance dans nos décisions (Chanel *et al.* 2020). Il convient donc d'en tenir compte dans certains arbitrages.

La perception des risques

Pour les raisons évoquées jusque-là, l'idée que nous nous faisons d'un risque (sanitaire, environnemental, etc.) est souvent distordue par notre cerveau qui biaise notre perception.

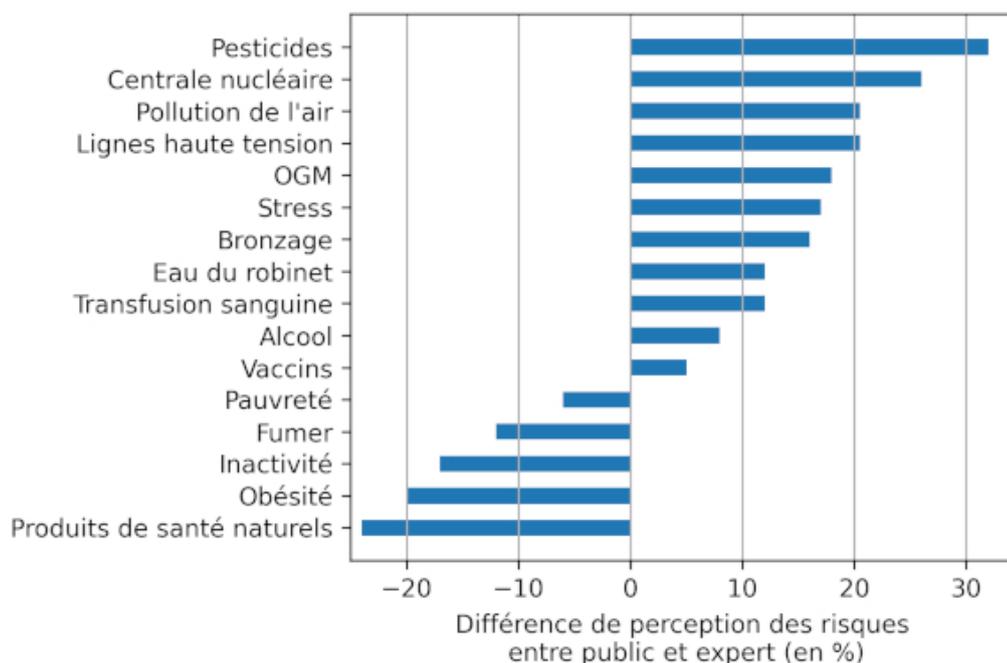


FIGURE 1.19 – La perception des risques pour la santé par le public canadien selon les différences entre le public et les experts. Les valeurs positives représentent une perception plus élevée des risques par le public; les valeurs négatives représentent une perception plus élevée des risques par les experts. Données : Krewski *et al.* (2012).

Il est possible d'essayer de quantifier l'écart entre notre perception et une réalité plus objective, comme la perception d'experts (figure 1.19, voir aussi Fiolet 2019).

1.5.5 La responsabilité des médias professionnels

Il existe de nombreux exemples d'études réalisées par des scientifiques ou des associations (publiées ou pas dans des revues à comité de lecture), qui prétendent avoir découvert ou estimé un « risque » (souvent pour l'environnement ou la santé) lié à telle ou telle technologie (OGM, vaccins, nucléaire, ondes électromagnétiques...). La peur faisant vendre, les médias (presse, télé, radio...) s'empressent de publier le communiqué correspondant et de dissertar *ad infinitum* sur le sujet (sans forcément aller lire le papier (scientifique) lui-même, d'ailleurs). Or, quand il se trouve que l'étude scientifique en question ne respectait pas certaines règles rigoureuses de la démarche scientifique, et/ou qu'elle n'est pas reproductible par les pairs, un démenti est publié dans la même revue. Mais la quasi-totalité du temps, celui-ci passe inaperçu dans les médias. Résultat, la population reste convaincue que les OGM provoquent le cancer (voir, par exemple, Huet 2018), que vivre à côté d'une ligne THT rend malade (Gouhier *et al.* 2008), que certains vaccins donnent des maladies graves⁶³, etc.

Depuis quelques années les médias se dotent de cellules pour traquer les fausses informations⁶⁴. On peut citer Les Décodeurs au Monde⁶⁵, Vrai ou Fake de France Info⁶⁶ ou encore Check News de Libération⁶⁷.

63. Voir : <http://blogs.univ-poitiers.fr/n-yeganefar/2013/03/10/vaccination-consequences-funestes-de-la-peur/>

64. Voir une liste ici : <https://www.leprogres.fr/societe/2020/04/08/cinq-sites-pour-vous-aider-a-demasquer-les-fake-news>

65. <https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/>

66. <https://www.francetvinfo.fr/vrai-ou-fake/>

67. <https://www.liberation.fr/checknews/>

Si les *fake news* semblent sous contrôle au moins des principaux médias, qu'en est-il de sujets comme le réchauffement climatique? La couverture médiatique de cette catastrophe en cours n'est actuellement pas à la hauteur des enjeux de compréhension et d'action⁶⁸. Les événements climatiques dus au réchauffement ne sont généralement pas traités comme dramatiques (notamment pour les canicules⁶⁹), ce qu'ils sont, ou comme ayant un lien direct avec le réchauffement (comme les tempêtes et les inondations).

Néanmoins, les journalistes et les médias commencent à prendre conscience de leur rôle fondamental pour la diffusion des connaissances⁷⁰.

1.5.6 Instiller le doute

Dans le domaine des technologies, nous avons vu que les « marchands de peur » avaient largement pignon sur rue. Il en est d'autres, les marchands de doute, dont l'action est largement dénoncée et documentée (voir par exemple : Oreskes & Conway 2012).

Les marchands de doute sont des industriels qui produisent de la science pour discréditer les effets néfastes de leurs produits en les relativisant. La stratégie fut mise au point par les marchands de tabac quand ils virent s'accumuler les preuves scientifiques de la toxicité de leurs produits. Ils ont ainsi pu retarder la prise de conscience collective du public et des décideurs politiques en semant le champ scientifique d'études minimisant l'impact du tabac tout en suggérant d'autres causes possibles pour les cancers observés. La stratégie a fonctionné à merveille, même si, *in fine*, la « vérité » scientifique ne peut plus être dissimulée. Mais le doute est instillé dans les esprits. La même stratégie a été adoptée par l'industrie pétrolière envers le réchauffement climatique pour créer ce mouvement climatosceptique mortifère qui perdure et continue de retarder la prise de décision politique. Ainsi que sur d'autres thématiques comme les pluies acides, le trou dans la couche d'ozone ou les pesticides.

L'enquête journalistique relatée dans Foucart *et al.* (2020), tout comme l'étude de Andreotti & Noûs (2020) accusent ainsi les industriels des pesticides, notamment mais pas seulement, d'avoir changé de stratégie depuis 15-20 ans en faisant relayer leurs messages de communication et d'instillation du doute envers le grand public pour minimiser les impacts de leurs produits sur la santé humaine et la biodiversité, par les défenseurs (souvent auto-proclamés) de la science, et autres associations rationalistes comme l'AFIS⁷¹. L'un des relais entre les défenseurs de la science et ces industriels serait les agences sanitaires (Factsory 2019).

La solution est de s'appuyer sur les références primaires qu'est la littérature scientifique issue de journaux à comité de lecture, et non sur les rapports des agences, qui peuvent être biaisés. Les « passeurs de science », vulgarisateurs ou journalistes scientifiques, dans ces domaines doivent ainsi être choisis avec soin.

68. Voir par exemple : <https://bonpote.com/2e-rapport-du-giec-les-medias-encore-une-fois-pas-au-niveau/>

69. Voir : <https://bonpote.com/bikinis-enfants-qui-jouent-dans-leau-peut-on-mieux-illustrer-les-canicules/>

70. Voir *La Charte pour un Journalisme à la Hauteur de l'Urgence Écologique* : <https://chartejournalismeeecologie.fr/>

71. L'AFIS est l'Association Française pour l'Information Scientifique – <https://www.afis.org/>.

Chapitre 2

Nucléaire et radioactivité

BLANC Guillaume & Noûs Camille, Nucléaire et radioactivité, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.d8819d>



Ce chapitre se propose de donner quelques notions succinctes de physique nucléaire pour comprendre ce qu'est la radioactivité, comprendre les grandes lignes de l'interaction des rayonnements ionisants, qu'ils soient issus de la radioactivité ou d'autres sources (désexcitation, fission, etc.), avec la matière et en particulier la matière vivante. Nous évoquerons alors la radioprotection et ses unités spécifiques. Nous terminerons avec quelques applications des rayonnements ionisants, et avec les principes de fonctionnement d'une centrale nucléaire.

2.1 Éléments de physique nucléaire

2.1.1 Introduction

Quand on parle du « nucléaire » dans les médias, on fait référence à la production d'énergie électronucléaire dans les centrales, et à toutes les problématiques annexes (déchets, prolifération, etc.). En physique, le « nucléaire » fait référence au noyau atomique. D'ailleurs la production d'énergie électronucléaire est issue d'une réaction « nucléaire » dite de *fission*. Il s'agit de la physique nucléaire, celle qui étudie les propriétés du noyau atomique ainsi que les réactions nucléaires. Le « nucléaire » des médias fait également référence à la *radioactivité* qui est une propriété physique des noyaux atomiques instables.

2.1.2 Un peu de physique nucléaire

Le noyau atomique

Le noyau atomique est constitué de neutrons et de protons qui sont les nucléons, eux-mêmes constitués de quarks et gluons, particules « élémentaires ». Les protons ont une charge électrique positive ($+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, où e est la charge élémentaire) tandis que les neutrons sont neutres. Un noyau atomique a donc une charge positive.

On définit :

- Z est le **numéro atomique**, à savoir le nombre de protons (et d'électrons de l'atome neutre); il caractérise un élément.
- N est le **nombre de neutrons**, il peut varier pour un même élément.
- $A = Z+N$ représente le nombre total de nucléons; c'est le **nombre de masse**; c'est aussi la masse molaire de l'élément en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ avec une très bonne approximation¹.
- Un noyau avec un couple (Z, N) donné est un **nucléide**.

1. Le nombre de masse correspond à peu près à la masse atomique ou masse molaire d'un atome car un nucléon a à peu près une masse molaire de 1 g/mol. Simplement parce que l'unité de quantité de matière du système international d'unités, la mole, était définie jusqu'en 2019 comme le nombre d'atomes dans 12 g de carbone 12. Depuis 2019, la mole est définie comme la quantité de matière d'un système contenant exactement $6,02214076 \cdot 10^{23}$ entités élémentaires. Cette définition est très proche de l'ancienne, ce qui fait que la masse molaire du carbone 12 est toujours de 12 g/mol mais désormais avec une incertitude de mesure expérimentale (de $4,5 \cdot 10^{-10}$). Donc les autres éléments ont une masse molaire proche de leur nombre de masse en g/mol. Proche et non égale car la masse d'un noyau atomique n'est pas égale à la somme des masses de ses constituants (protons et neutrons) à cause de l'énergie de liaison.

Un noyau atomique a donc une charge $+Ze$. Un atome est électriquement neutre, il contient donc un cortège de Z électrons de charge $-e$.

On représente le nucléide X de la façon suivante : A_ZX . Depuis 2016, la tableau périodique contient 118 éléments (IUPAC 2016). Fin 2020, 3312 nucléides avaient été découverts², dont 256 stables (correspondant à 80 éléments)³.

Un *isotope* est un nucléide avec le même nombre de protons (donc un même élément chimique), mais un nombre de neutrons différent. Par exemple : ${}^1_1\text{H}$ (hydrogène), ${}^2_1\text{H}$ (deutérium) et ${}^3_1\text{H}$ (tritium) sont trois isotopes de l'hydrogène.

Quelques ordres de grandeur

- Masse : on utilise souvent l'**électron-volt** (eV) qui est l'énergie d'un électron accéléré sur une différence de potentiel de 1 V soit : $e \times (1 \text{ V}) = 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. C'est une unité de masse en raison de l'équivalence masse-énergie $E = mc^2$; la masse moyenne d'un nucléon est $1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
- Taille : le rayon d'un noyau (considéré comme sphérique⁴) peut être approximé par $R = 1,1 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ m}$, où A est le nombre de masse. L'ordre de grandeur est ici le *fermi* ou femtomètre (fm) = 10^{-15} m soit la taille d'un atome divisée par 100 000.

Le tableau 2.1 donne quelques ordres de grandeur.

Énergie de liaison

L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie qu'il faut lui *fournir* pour séparer tous ses constituants. C'est donc l'*opposé* d'une *énergie potentielle d'interaction* qui est l'énergie à fournir pour transporter les nucléons au repos à l'infini jusqu'à former un noyau.

L'énergie totale d'un nucléide au repos (énergie de masse) est donnée par :

$$E^{\text{reposit}}(A, Z) = m_{{}^A_ZX}c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - E_L$$

où c est la vitesse de la lumière, $m_{{}^A_ZX}$ est la masse du nucléide, m_p est la masse d'un proton, m_n est la masse d'un neutron et E_L est l'énergie de liaison. Ainsi, on a :

$$E_L = (Zm_p + Nm_n - m_{{}^A_ZX})c^2 > 0$$

où l'on voit que l'énergie de liaison est la différence entre l'énergie de masse du nucléide et celle de chacun de ses constituants : la masse d'un noyau atomique est *inférieure* à la somme des masses des nucléons qui le constituent.

L'ordre de grandeur des énergies de liaison nucléaires est le MeV (tandis que les énergies de liaison des électrons dans un atome sont exprimées en eV ou keV), voir le tableau 2.2.

La figure 2.1 montre que, hormis pour les noyaux les plus légers, on a : $E_L/A \sim 8 \text{ MeV}$. Il faut donc dépenser environ 8 MeV pour extraire un nucléon du noyau. Cette figure montre que les noyaux les plus stables sont ceux autour du minimum de l'énergie potentielle (ou autour du maximum de l'énergie de liaison) : le noyau le plus stable (le plus lié) est le fer 56 au minimum de la courbe. Les noyaux très légers ou très lourds sont moins liés.

2. Voir : <https://people.nsl.msui.edu/~thoennes/isotopes/index.html>.

3. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Isotope_stable

4. Il s'agit là d'une approximation.

	masse (MeV/c ²)	rayon (m)
atome (⁴ ₂ He)		$1,28 \cdot 10^{-10}$
noyau (⁴ ₂ He)	3738,4	$\sim 1,74 \cdot 10^{-15}$
électron	0,511	$< 10^{-22}$
proton	938,272	$0,88 \cdot 10^{-15}$
neutron	939,565	? ($\sim 10^{-15}$)

TABLE 2.1 – Masses et tailles des constituants atomiques. Notons que l'électron est une particule élémentaire, stable. Le proton et le neutron ne sont pas élémentaires (composés de quarks) : le premier est stable à l'état libre, tandis que le neutron est instable à l'état libre (hors du noyau), sa demi-vie est de 15 min.

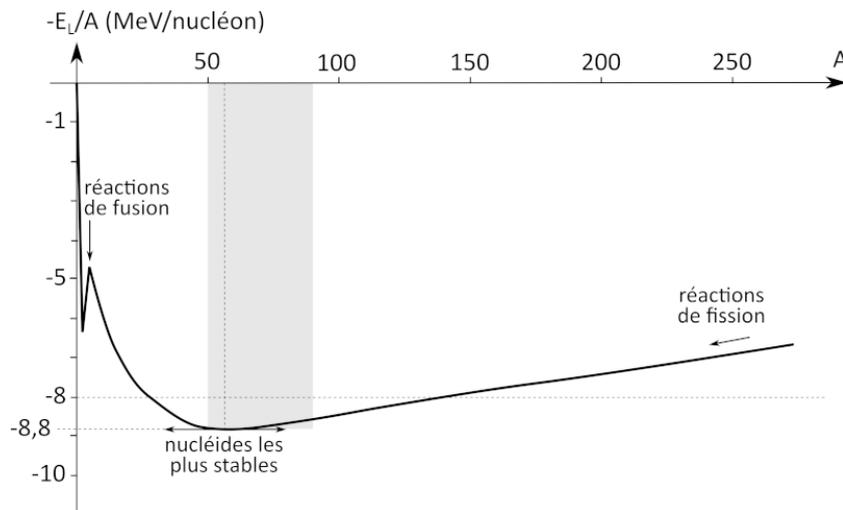


FIGURE 2.1 – Opposé de l'énergie de liaison (ou énergie potentielle d'interaction des nucléons) moyenne par nucléon ($-E_l/A$) en fonction du nombre de nucléons A dans le noyau (courbe d'Aston).

Si on casse un noyau très lourd en deux (réaction de **fission** nucléaire), les morceaux sont plus liés (énergie de liaison par nucléon plus importante), donc une partie de l'énergie de liaison du gros noyau est évacuée : la réaction est **exothermique**. Inversement, fusionner deux noyaux lourds nécessite un apport d'énergie, par exemple sous forme d'énergie cinétique à l'aide d'un accélérateur.

Si on arrive à fondre (fusionner) deux noyaux légers entre eux (réaction de **fusion** nucléaire), ils vont former un noyau plus lourd, qui sera plus lié, donc une partie de l'énergie de liaison des deux noyaux légers est évacuée : la réaction est **exothermique**.

Les interactions en jeu

Deux forces antagonistes sont à l'œuvre pour maintenir l'édifice des nucléons au sein du noyau :

- La *force électromagnétique* (ou électrostatique dite force de Coulomb) qui engendre une répulsion des protons entre eux (chargés positivement) à longue portée.
- La *force nucléaire forte* qui lie les nucléons – les quarks plus exactement – entre eux (s'ils sont très proches, car c'est une force à très courte portée, de l'ordre de 1,5 fm), avec une intensité $\sim 10^2$ plus forte que l'interaction électromagnétique.

	Énergie de liaison des électrons dans l'atome (MeV)	Énergie de liaison des nucléons dans le noyau (MeV)
${}^1_1\text{H}$	0,000014	0
${}^2_1\text{H}$	0,000014	2,225
${}^4_2\text{He}$	0,000079	28,295
${}^7_3\text{Li}$	0,00019	39,244
${}^{16}_8\text{O}$	0,0020	127,617
${}^{35}_{17}\text{Cl}$	0,012	298,20
${}^{57}_{26}\text{Fe}$	0,034	499,90
${}^{235}_{92}\text{U}$	0,69	1783,17

TABLE 2.2 – Comparaison entre l'énergie de liaison des électrons dans l'atome et l'énergie de liaison nucléaire pour quelques éléments et isotopes.

Les autres interactions connues sont :

- La *force faible*, responsable de la radioactivité β . Elle change la saveur des quarks et donc la nature – neutron ou proton – des nucléons, mais ne provoque pas d'état lié comme les autres interactions. Sa portée est typiquement 100 fois plus faible que celle de l'interaction forte. Son intensité est typiquement 10^4 fois moins forte que l'interaction électromagnétique aux énergies de l'ordre du MeV, mais elle est du même ordre de grandeur – de l'ordre d'une centaine de GeV (interaction électrofaible).
- La *force gravitationnelle*, négligeable dans les interactions nucléaires.

Selon sa quantité de protons et de neutrons, un noyau atomique peut être en équilibre parfait auquel cas il est stable. Si son équilibre est imparfait, il est instable. Il va modifier spontanément sa structure interne pour revenir vers la stabilité. Il émet alors un rayonnement particulière : il est radioactif. Le terme de « rayonnement » est trompeur car il ne s'agit pas (uniquement) de rayonnement électromagnétique (comme pour un atome instable qui émet des photons pour revenir à la stabilité), mais aussi d'émission de particules (matière ou photons).

La vallée de stabilité

La représentation des différents noyaux connus dans un graphe représentant le nombre N de neutrons en fonction du nombre Z de protons permet de mettre en évidence la ligne ou courbe de stabilité, peuplée par les noyaux stables (en noir à la figure 2.2a).

La forme courbée de la vallée de stabilité résulte des contributions des deux forces à l'œuvre au sein du noyau : la force forte et la force électromagnétique. La première tend à favoriser $N = Z$ (donc sur la diagonale), tandis que la seconde favorise $N = A$ et tend à maximiser le nombre de neutrons. Si on constate un excès de neutrons pour $Z \gtrsim 20$, c'est parce que l'interaction électromagnétique, répulsive entre les protons, cesse d'être négligeable (Valentin 1986).

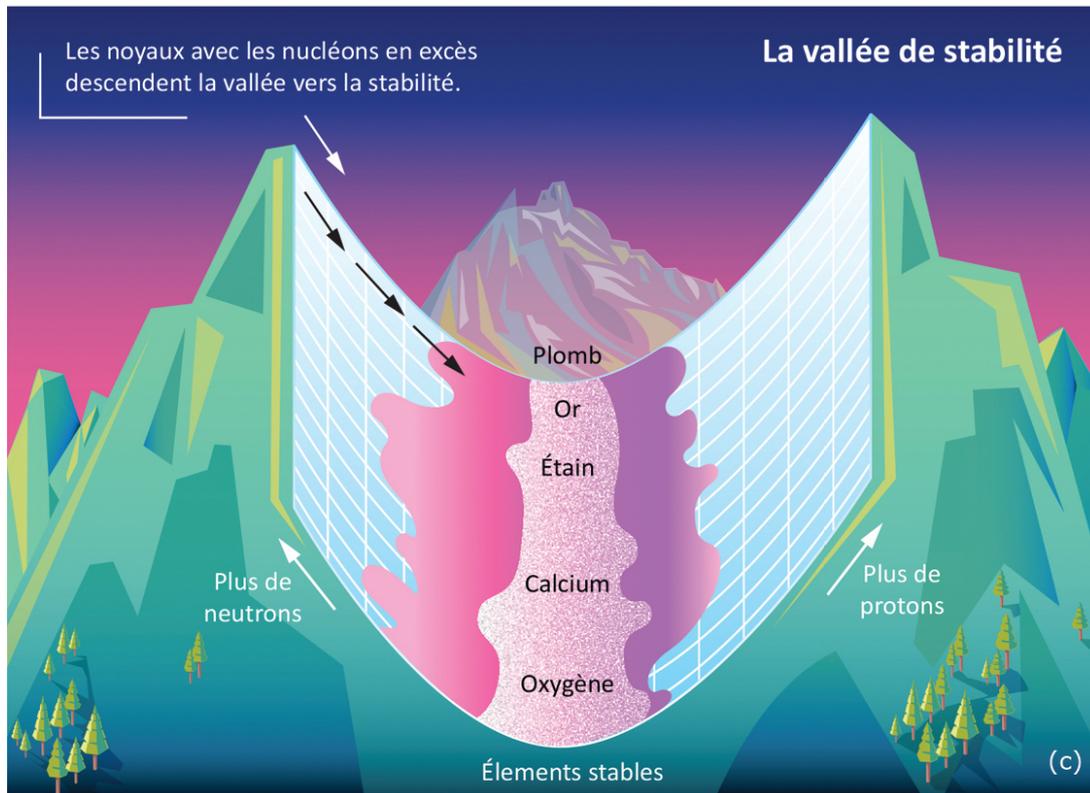
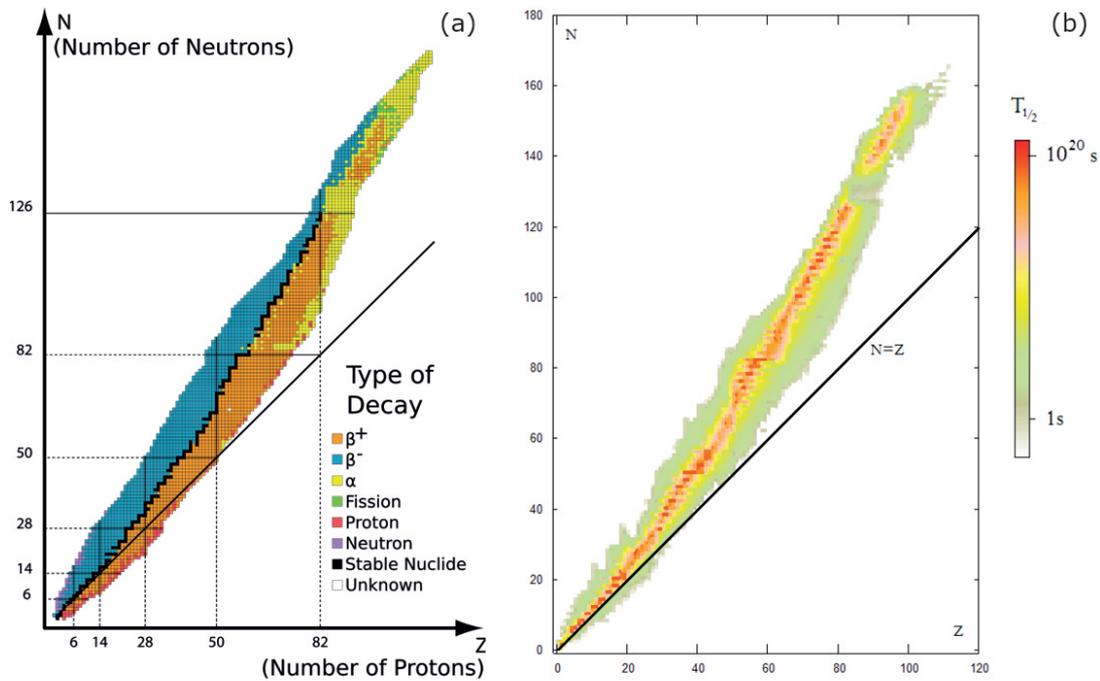


FIGURE 2.2 – Illustrations de la vallée de stabilité des noyaux atomiques. (a) Représentation du nombre de neutrons en fonction du nombre de protons pour les nucléides connus. Les couleurs représentent le type de radioactivité par lequel les noyaux instables se désintègrent. Source : Wikipédia/Napy1kenobi. CC BY-SA. (b) Représentation du nombre de neutrons en fonction du nombre de protons pour les nucléides connus. Les couleurs représentent la période de désintégration radioactive en secondes : les noyaux stables sont en rouge! CC0. (c) Schéma illustrant le fait que les noyaux trop riches en neutrons ou en protons par rapport au « standard » de la stabilité vont devoir se désintégrer. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Sur la figure 2.2a, au-dessus des noyaux stables, on trouve en bleu les noyaux trop riches en neutrons. Ces noyaux reviennent vers la ligne de stabilité par désintégration β^- , qui transforme au sein du noyau un neutron en proton. Au-dessous des noyaux stables, on trouve en orange les noyaux trop riches en protons. Ces noyaux reviennent vers la ligne de stabilité par désintégration β^+ ou par capture électronique, qui transforme au sein du noyau un proton en neutron. Les noyaux lourds riches en protons vont revenir vers la ligne de stabilité par désintégration α (en jaune). Enfin, les noyaux très lourds (en vert) fissionnent spontanément en donnant naissance à des produits de désintégration légers (généralement radioactifs car en dehors de la vallée de stabilité).

Loi de décroissance radioactive

Les noyaux *instables* vont donc émettre un rayonnement énergétique sous forme de particules ou de photons. L'instant précis de la désintégration d'un noyau isolé est impossible à prévoir. On peut seulement lui associer une probabilité de se désintégrer spontanément pendant une unité de temps.

On définit la **constante radioactive** λ (en seconde⁻¹) comme la probabilité de désintégration d'un noyau par unité de temps. C'est une propriété physique d'un nucléide indépendante des conditions physico-chimiques de l'atome correspondant.

On ne peut pas connaître précisément l'évolution temporelle d'un seul noyau instable ; en revanche, on peut connaître statistiquement l'évolution d'un grand nombre de noyaux issus d'un même nucléide.

Ainsi, pour N noyaux instables à un instant initial, il en disparaît λN au bout d'une unité de temps (typiquement la seconde). Pendant un intervalle de temps dt ce sont donc $\lambda N dt$ noyaux qui disparaissent, ou encore :

$$-dN = N(t) - N(t + dt) = \lambda N dt$$

soit :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.1)$$

ou encore :

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt$$

En intégrant cette équation différentielle, on obtient :

$$-\ln N = \lambda t + \text{Cte}$$

Avec la condition initiale suivante : à $t = 0$, on a $N(0) = N_0$, on obtient que $\text{Cte} = -\ln N_0$, d'où

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

ou encore :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Le nombre de noyaux instables décroît ainsi de manière exponentielle au cours du temps.

Le produit λN est aussi la **vitesse de désintégration** ($-dN/dt$) d'une quantité déterminée d'une substance radioactive. On l'appelle l'**activité** \mathcal{A} de cette substance :

$$\mathcal{A} = \lambda N \quad (2.3)$$

On a donc :

$$\mathcal{A}(t) = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

où \mathcal{A}_0 est l'activité à $t = 0$.

L'activité d'un radionucléide se mesure en becquerels (Bq). Un Bq étant une désintégration par seconde. C'est une unité assez faible qui nécessite l'emploi de multiples : MBq, GBq ou TBq, par exemple.

Période radioactive

La caractérisation la plus commode de la durée de vie d'un ensemble de nucléides identiques est la *période radioactive ou demi-vie*⁵ T , à savoir la durée au terme de laquelle la moitié du nombre initial N_0 de noyaux s'est désintégrée.

Ainsi :

$$N(t = T) = N_0/2 \text{ avec } \ln \frac{N_0}{N} = \lambda t$$

soit :

$$\ln 2 = \lambda T$$

d'où :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ donc } N(t) = N_0 e^{-t \ln 2 / T} \quad (2.4)$$

Par exemple, la période radioactive du carbone 14 est de 5730 ans ; celle de l'uranium 238 est de 4,5 milliards d'années, ce qui signifie que la moitié de l'uranium 238 initialement présent à la naissance la Terre a disparu.

Le nombre de nucléides d'un élément radioactif diminue d'un facteur ~ 1000 toutes les 10 périodes ($N_0/2^{10} = N_0/1024$).

Les périodes des éléments radioactifs connus actuellement vont de $0,07 \mu\text{s}$ (actinium 217) à $1,5 \cdot 10^{24}$ ans (tellure 128).

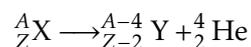
2.1.3 Les différentes radioactivités

Les noyaux instables se désintègrent en émettant une ou des particules qui sont spécifiques à la nature du noyau émetteur. L'énergie de liaison perdue dans le réarrangement du noyau se retrouve en partie dans l'énergie cinétique des particules émises.

On observe en majorité les différentes émissions suivantes :

→ Désintégration α

Il s'agit de l'émission spontanée d'un noyau d'hélium 4 par certains noyaux lourds ($A > 200$) :

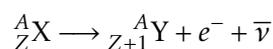


La particule α émise (noyau d'hélium) a une énergie cinétique de l'ordre de 6 MeV en moyenne (moins de 10 MeV). La particule α émise a une énergie bien définie, le spectre énergétique de noyaux émetteurs α est donc un spectre de raies.

La radioactivité α est régie par l'interaction nucléaire forte.

→ Désintégration β

Il s'agit de l'émission spontanée d'un électron (particule β^-) ou d'un positon (particule β^+) :



où e^- est un électron et $\bar{\nu}$ est un anti-neutrino ; dans cette réaction un neutron est transformé en proton.

5. La dénomination de *demi-vie* est ambiguë, car elle ne signifie pas que la durée de vie est le double de cette valeur !



où e^+ est un positon et ν est un neutrino; dans ce cas, c'est un proton qui est transformé en neutron.

Les énergies cinétiques de Y , e^+ , e^- , ν , $\bar{\nu}$ sont en général de l'ordre du MeV. Ces énergies se répartissent sur l'ensemble des particules émises, l'énergie des électrons ou positons émis n'est pas définie, le spectre énergétique des électrons est donc continu.

Les particules ν et $\bar{\nu}$, neutrino et anti-neutrino, sont des particules de faible masse interagissant très peu avec la matière.

L'émission β est régie par l'interaction faible.

→ Émission γ

Il s'agit de l'émission spontanée d'un photon γ émis par un noyau dans un niveau d'énergie « excité », c'est-à-dire au-dessus du niveau fondamental. Son énergie est bien définie et est de l'ordre de 0,1 à 1 MeV, tandis que les photons émis dans les transitions atomiques ont au plus une énergie de l'ordre du keV. Le spectre énergétique des photons émis est un spectre de raies.

L'émission de photons γ est régie par l'interaction électromagnétique.

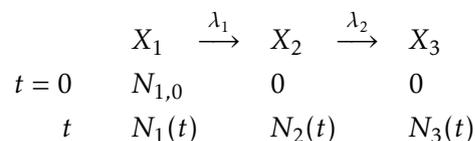
Ces différentes radioactivités sont illustrées à la figure 2.3. Il existe d'autres façons plus marginales pour certains noyaux de se désintégrer : conversion interne, capture électronique, fission spontanée...

Rapport d'embranchement

Certains radionucléides peuvent se désintégrer de différentes façons. On peut mesurer et donc tabuler les probabilités qu'ils ont de se transformer par telle ou telle voie. Par exemple, la figure 2.4 montre que le bismuth 212 a 64 % de chances de se désintégrer par émission d'un β et 36 % de chances de se désintégrer en émettant un α .

Filiations radioactives

La désintégration d'un noyau radioactif ne donne pas nécessairement un noyau stable, mais peut conduire à un noyau lui-même radioactif qui est son fils et qui aura des descendants dont le dernier sera stable. Pour deux corps en filiation, il est assez simple de calculer analytiquement les quantités des descendants à chaque instant. En revanche, pour plus de deux corps, c'est bien plus compliqué, mais faisable numériquement. Par exemple, dans le cas :



où λ_1 est la constante radioactive caractérisant le noyau X_1 et λ_2 est la constante radioactive caractérisant le noyau X_2 . On peut calculer analytiquement l'évolution de chacune des quantités $N_1(t)$, $N_2(t)$ et $N_3(t)$ des nucléides X_1 , X_2 et X_3 , respectivement, en fonction du temps.

Radioactivité naturelle

Dans la nature on trouve environ 50 isotopes radioactifs. La moitié se trouvent sur notre planète depuis sa formation car leur durée de vie est suffisamment longue (quelques milliards d'années). Il s'agit notamment de l'uranium, du thorium et de leurs descendants. L'autre moitié est fabriquée en permanence par la collision des rayons cosmiques avec les atomes de la haute atmosphère, comme le carbone 14.

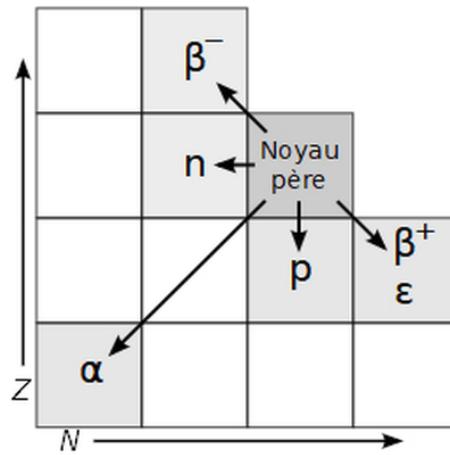


FIGURE 2.3 – Illustration des différentes radioactivités sur un graphe du nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z : radioactivités α , β^- , radioactivité β^+ , capture électronique ϵ (ou désintégration β inverse), émission de neutrons n et de protons p . Source : Wikipédia/Ariel Provost. CC BY-SA.

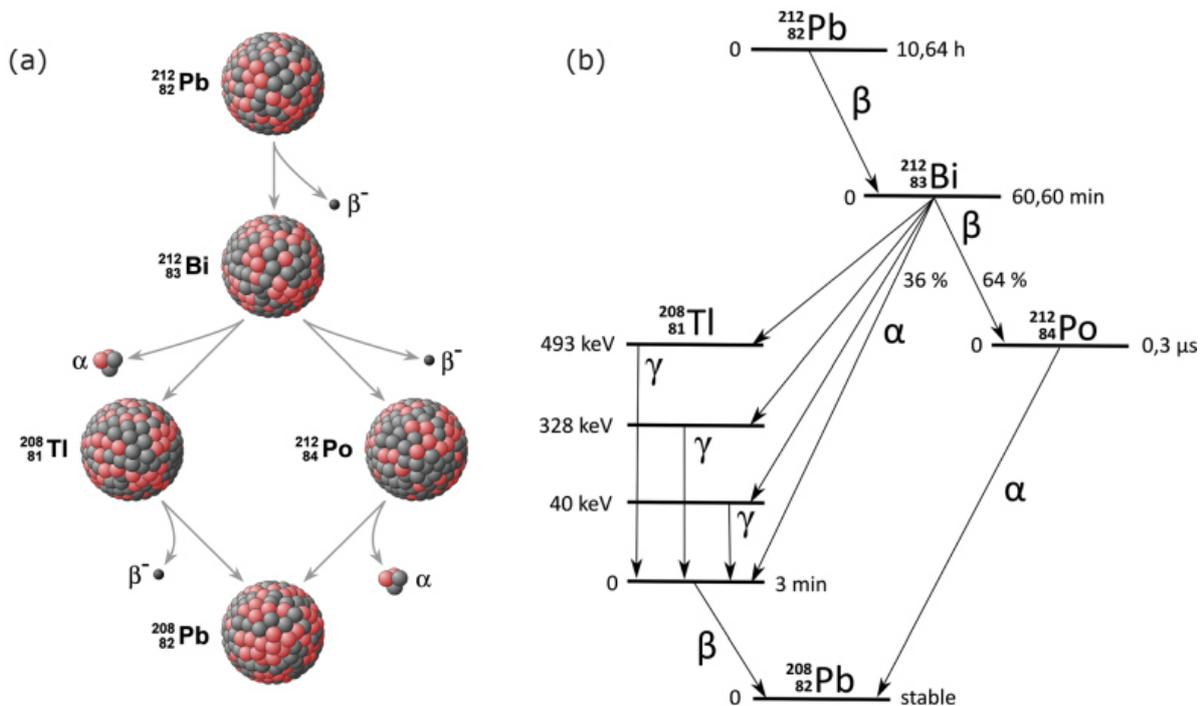


FIGURE 2.4 – Exemple de la filiation du plomb 212. (a) Sous forme de schéma. Source : Eugene Alvin Villar (2008), <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Seav>. CC BY-SA. (b) Sous forme de graphe. Les données sur les différents isotopes connus sont tabulées sous cette forme, avec les énergies des différents niveaux, les périodes, les probabilités de désintégration.

Un mètre carré de sol (sur 1 m de profondeur) recèle en moyenne 70 000 Bq de potassium 40, et reçoit chaque seconde 2500 atomes de tritium et 22 000 atomes de carbone 14. Le corps humain renferme lui aussi du carbone 14 (environ 50 Bq/kg), et du potassium 40 (environ 60 Bq/kg).

2.2 Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

On considère ici différents rayonnements « ionisants », c'est-à-dire capables d'arracher un ou plusieurs électrons et de produire un ion :

- les particules émises par la radioactivité : α , β , γ (à l'exception des neutrinos);
- les neutrons que l'on trouve dans l'environnement d'une centrale nucléaire, mais pas seulement : à proximité des sources primaires de neutrons⁶, ou des accélérateurs de particules;
- les rayons X fréquemment utilisés en médecine (radiographie, scanner, etc.), en recherche avec la diffraction par rayons X (comme sur le synchrotron Soleil), ou à proximité des accélérateurs (rayonnement de freinage ou *bremsstrahlung* en allemand qui est un rayonnement électromagnétique généré par le ralentissement de particules chargées).

La matière est celle qui se trouve sur la trajectoire de ces particules, elle peut être inerte ou vivante.

2.2.1 Introduction

La matière rencontrée est composée d'atomes (électriquement neutres) qui sont constitués de noyaux chargés positivement, lourds (constitués de quelques nucléons à quelques centaines de nucléons) et d'électrons, beaucoup plus nombreux (autant que les protons), légers (environ 1/1830 la masse d'un nucléon) et chargés négativement.

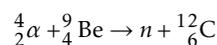
On peut classer ces interactions selon différents critères.

- Selon *la nature du rayonnement* :
 - flux de particules matérielles douées de masses au repos,
 - flux de photons (de masse nulle).
- En fonction de *la cible* (noyaux ou électrons) :
 - particules chargées : les interactions de type coulombiennes⁷ sont plus fréquentes avec les électrons qu'avec les noyaux,
 - particules neutres (neutrons) : elles dissipent leur énergie cinétique efficacement lors de collisions avec les noyaux (et par capture pouvant induire des fissions),
 - les photons : les effets sont différents selon qu'ils rencontrent les électrons ou les noyaux.
- Selon *l'effet sur le milieu* (biologie, radioprotection) :
 - rayonnement ionisant (dont l'énergie est suffisante pour arracher un électron aux atomes du milieu rencontré),
 - rayonnement non ionisant.

Remarques :

1. L'énergie d'ionisation est l'énergie minimale nécessaire pour détacher complètement un électron orbital des atomes ou molécules du milieu irradié à savoir $\sim 11,5$ à $14,5$ eV compte tenu des principaux atomes rencontrés (H, C, N et O)⁸.

6. Comme le mélange américium, émetteur α , et béryllium :



Ce type de source est utilisé pour différentes applications comme l'amorçage des réactions de fission dans un réacteur nucléaire, en recherche, etc.

7. L'interaction coulombienne est la force $F(r)$ entre deux particules de charges q_1 et q_2 : $F(r) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{1}{r^2}$, où r est la distance entre les deux particules et ϵ_0 est la permittivité du vide.

8. Pour les énergies d'ionisation de tous les éléments, voir par exemple :

https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_d'ionisation#Valeurs_numériques_des_énergies_d'ionisation.

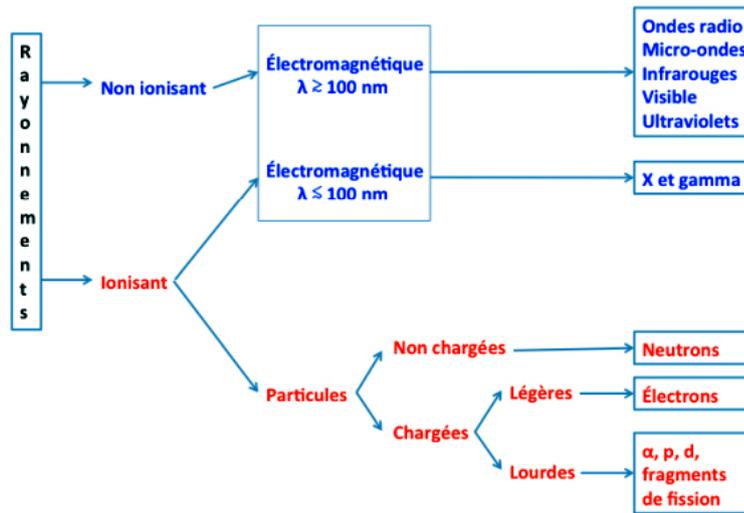


FIGURE 2.5 – Résumé schématique des différents rayonnements, particulaires ou non, ionisants ou non.

2. **Tous les rayonnements particulaires dont il est question ici sont ionisants.**⁹

3. Les rayonnements électromagnétiques ionisants sont ceux de longueur d'onde inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ (X et γ) ou d'énergie¹⁰ supérieure à 12 eV.

La figure 2.5 résume le paysage des différents rayonnements, particulaire ou non, ionisant ou non.

Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est émis par la matière. Il est lié au mouvement des charges électriques qui la composent (électrons pour les atomes, nucléons pour les noyaux atomiques). Toute charge en mouvement crée en tout point de l'espace un champ électrique et un champ magnétique, perpendiculaires, qui se propagent à vitesse constante dans le vide ($c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), à savoir une onde électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique (voir figure 2.6) est caractérisé par son énergie $E = h\nu$ où $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck et ν la fréquence de l'onde :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.5)$$

Soit :

$$E_{(\text{eV})} \simeq \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \times 10^{-9}} \times \frac{1}{\lambda} \simeq \frac{1240}{\lambda_{(\text{nm})}} \quad (2.6)$$

Atténuation des photons

L'affaiblissement d'un faisceau de photons monoénergétiques sur une cible formée d'un matériau dépend de :

- l'épaisseur de la cible ;
- la nature et l'état physique de la cible ;

9. Il est bien évident que de nombreuses particules élémentaires énergétiques ne sont pas ionisantes : neutrinos, muons, etc.

10. Voir l'équation (2.5).

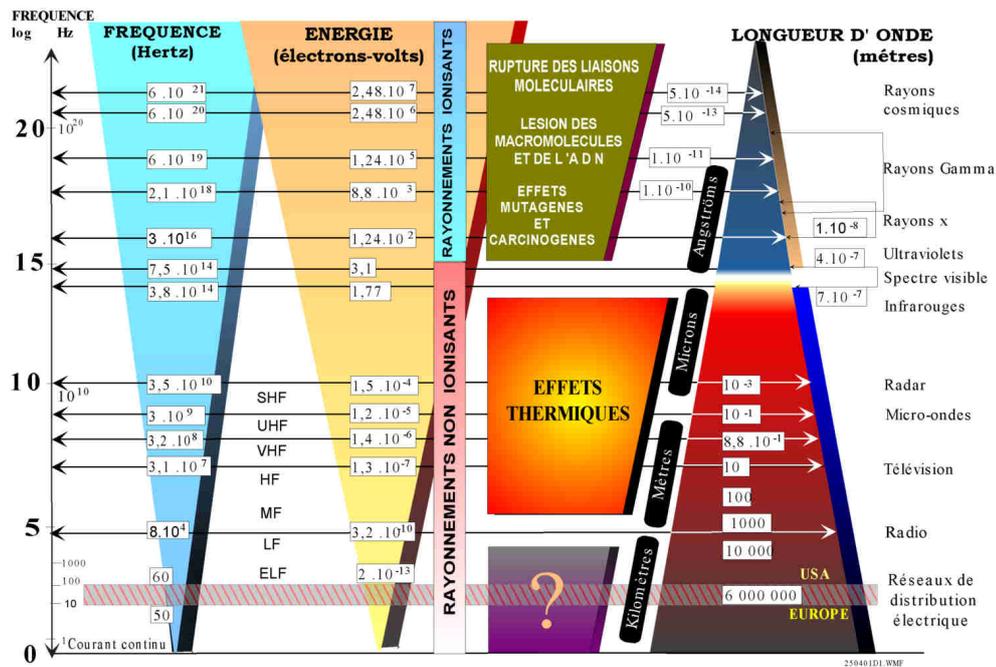


FIGURE 2.6 – Illustration des différents domaines du spectre électromagnétique avec le caractère ionisant ou non des photons correspondants. Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conclu_spectre.jpg. CC BY-SA.

→ l'énergie et le nombre des photons incidents.

Le nombre ($-dN$) de photons éliminés du faisceau après une épaisseur dx de cible est proportionnel au nombre N de photons incidents et à dx :

$$-dN = \mu N dx$$

où μ dépend du matériau de la cible et de l'énergie des photons incidents.

En intégrant :

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}, \quad (2.7)$$

où N_0 est le nombre de photons incidents, $N(x)$ est le nombre de photons restant après la traversée de l'épaisseur x , et μ est le **coefficient d'atténuation linéique** (en m^{-1}). L'atténuation d'un faisceau de photons dépend ainsi exponentiellement de l'épaisseur de matériau.

On définit également la couche de demi-atténuation (CDA ou $X_{1/2}$) qui est l'épaisseur de matière dans laquelle la moitié des photons ont disparu :

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Le coefficient d'atténuation linéique μ dépend aussi de l'état physique du matériau (liquide ou vapeur, par exemple), c'est pourquoi on tabule généralement la grandeur μ/ρ (coefficient massique d'atténuation), ρ étant la masse volumique de l'écran. On trouvera quelques valeurs de ces quantités pour quelques matériaux utilisés en radioprotection, dans le tableau 2.3.

Le tableau 2.3 montre que pour des photons de 1 MeV, on a $\mu/\rho \sim 0,07 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, donc $CDA \sim 10/\rho$ (cm). Si on veut une atténuation d'un facteur $32 = 2^5$, il faut traverser 5 fois la couche de demi-atténuation, soit une épaisseur de : $e_{32} = 50/\rho$ (cm). Ce qui correspond à environ 50 cm d'eau ou bien 4,4 cm de plomb.

C'est pourquoi dans un cabinet de radiologie médicale (les rayons X sont moins énergétiques que les rayons γ : 10 à 150 keV), on se protège avec des boucliers en plomb.

	Pb	Fe	eau	béton ordinaire
μ (cm ⁻¹)	0,79	0,47	0,07	0,15
CDA (cm)	0,88	1,47	9,90	4,62
ρ (g·cm ⁻³)	11,30	7,85	1,00	2,30
$\frac{\mu}{\rho}$ (cm ² ·g ⁻¹)	0,07	0,06	0,07	0,065

TABLE 2.3 – Quelques valeurs du coefficient d'atténuation linéique μ , de la couche de demi-atténuation, CDA, de la masse volumique ρ et du coefficient massique d'atténuation μ/ρ pour quatre matériaux généralement utilisés en radioprotection et pour un faisceau de photons γ de 1 MeV.

Rayonnement particulaire

Le « rayonnement » particulaire est typiquement un faisceau de particules projectiles qui sont caractérisées par :

- leur charge électrique (multiple entier de la charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C),
- leur masse au repos m_0 ,
- leur énergie totale $E = mc^2 = m_0c^2 + E_c$, où E_c est leur énergie cinétique.

On distingue les *particules chargées* (et parmi elles, celles qui sont lourdes : protons, deutons, α , fragments de fission chargés positivement, de celles qui sont légères : électrons), ralenties par interactions coulombiennes avec les électrons des atomes de la matière irradiée, et les *neutrons* qui vont n'interagir qu'avec les noyaux des atomes de la matière.

Ralentissement des particules chargées lourdes

Il faut des dizaines de milliers d'interactions coulombiennes avec des électrons pour ralentir les particules. Chaque électron rencontré reçoit une toute petite fraction de l'énergie de la particule incidente.

Par exemple une particule α émise par le radium 226 a une énergie de 4,78 MeV et va communiquer à un électron une énergie maximale de 2,6 keV : il faut donc près de 2000 interactions pour l'épuiser ! L'électron recevant une partie de l'énergie de la particule incidente peut soit être éjecté de l'atome (et éventuellement ioniser d'autres atomes à son tour), soit changer d'orbite excitant ainsi l'atome cible.

Parcours moyens dans la matière

Plus concrètement, on peut définir la distance moyenne parcourue par des particules dans la matière par des lois empiriques.

Ainsi le parcours dans l'air de particules α d'énergie entre 4 et 10 MeV, dans les conditions normales de température et de pression (CNTP, c'est-à-dire à une température de 0 °C et une pression de 1 atm) :

$$R_{(\text{cm})}^{\alpha} = 0,32 \times E_{(\text{MeV})}^{1,5}$$

Pour des protons¹¹ de 10 à 200 MeV, dans l'air (CNTP) :

$$R_{(\text{cm})}^p = 1,8 \times E_{(\text{MeV})}^{1,8}$$

11. Il existe un type de radioactivité où certains noyaux instables se désintègrent en émettant un proton, mais elle est marginale. Les protons sont plus souvent produits au cours de réactions nucléaires.

La règle de Bragg permet d'extrapoler, pour un type de particule donné, à partir d'un matériau (1), dans un autre matériau (2) :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}},$$

où $R_{1,2}$ est le parcours moyen pour dans les matériaux (1) et (2), $\rho_{1,2}$ est leur masse volumique et $A_{1,2}$ le nombre de masse de leurs constituants.

Ralentissement des électrons

Les électrons sont assez souvent relativistes : pour que leur vitesse soit telle que $v > 0,1 \times c$ (limite relativiste), il faut que leur énergie (cinétique) soit $E > 50$ keV. Tandis que pour être relativistes, des protons doivent avoir une énergie $E > 90$ MeV, et des α , $E > 350$ MeV!

De plus, les électrons sont de masse égale à celle des particules rencontrées (cortèges électroniques des atomes).

Ainsi :

- les **électrons de faible énergie** perdent de l'énergie par ionisation et excitation du milieu traversé, avec une déviation importante de la direction initiale (contrairement aux particules lourdes) ;
- les **électrons de grande énergie** perdent leur énergie par rayonnement (électromagnétique) de freinage (*bremsstrahlung*) du fait de la décélération subie lors de leur passage dans le champ coulombien du noyau.

Pour les électrons émis par radioactivité, relations empiriques suivantes s'appliquent (attention aux unités!) (Foos 2009) :

- pour $E_{\max\beta} < 0,8$ MeV : $R_{\beta(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})} = 0,407 \times (E_{\max\beta(\text{MeV})})^{1,38}$
- pour $0,8 < E_{\max\beta} < 3,7$ MeV : $R_{\beta(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})} = 0,542 \times (E_{\max\beta(\text{MeV})}) - 0,133$

où $E_{\max\beta(\text{MeV})}$ est l'énergie *maximale* des électrons émis par la radioactivité β (en MeV).

On obtient des longueurs (parcours moyens) en divisant par la masse volumique :

$$L_{(\text{cm})} = \frac{R_{\beta(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})}}{\rho(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})}$$

Effet Tcherenkov

Quand des particules chargées se déplacent dans un milieu transparent à la lumière, à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu (c/n), un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement Tcherenkov¹² est émis : le passage de la particule chargée induit une polarisation électrostatique sur les molécules du milieu. Comme la particule se déplace plus rapidement que les ondes électromagnétiques, les dipôles induits n'ont pas le temps de se relaxer immédiatement, ils s'accumulent, et c'est en se relaxant collectivement qu'ils émettent un rayonnement continu, polarisé, dont l'intensité décroît avec la longueur d'onde (d'où la lumière bleue) (Jackson 2021).

Dans l'eau, il faut que les électrons aient une énergie supérieure à 0,26 MeV pour qu'un rayonnement Tcherenkov apparaisse, ce qui est fréquent (contre 478 MeV pour des protons, beaucoup moins fréquent).

Cet effet est responsable de la coloration bleutée prise par l'eau des piscines de stockage de sources radioactives.

12. Voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Vavilov-Tcherenkov.

Ralentissement des neutrons

Les neutrons ne sont pas produits par la radioactivité mais par des réactions nucléaires comme les réactions de fission dans les réacteurs nucléaires.

Ils ont deux principaux processus d'interaction avec la matière.

- Par **diffusion** conduisant à une modification de la trajectoire et à une perte d'énergie pour le neutron incident; elle peut être :
 - ▶ **élastique** si toute l'énergie perdue se retrouve sous forme d'énergie cinétique du noyau choqué; plus la masse du noyau choqué est proche de celle du neutron, plus celui-ci perdra d'énergie;
 - ▶ **inélastique** si une partie de l'énergie sert à exciter le noyau.
- Par **capture** (favorisée pour les neutrons thermiques, $E < 1$ eV), où le neutron incident est absorbé par le noyau choqué, qui se désexcite ensuite par émission d'un photon γ .

C'est pourquoi, pour se protéger des neutrons, on utilise des matériaux de faible masse atomique, contenant beaucoup d'hydrogène, comme l'eau ou le béton.

Rayonnement	Profondeur de pénétration matière solide	matériaux de Z faible	matériaux de Z élevé
α	10-20 microns		
β	quelques mm		
neutron	quelques 10 cm	forte absorption	faible absorption
γ	quelques 10 cm	faible absorption	forte absorption

TABLE 2.4 – Résumé des différentes façons d'absorber des particules selon leur nature et celle du matériau absorbant.

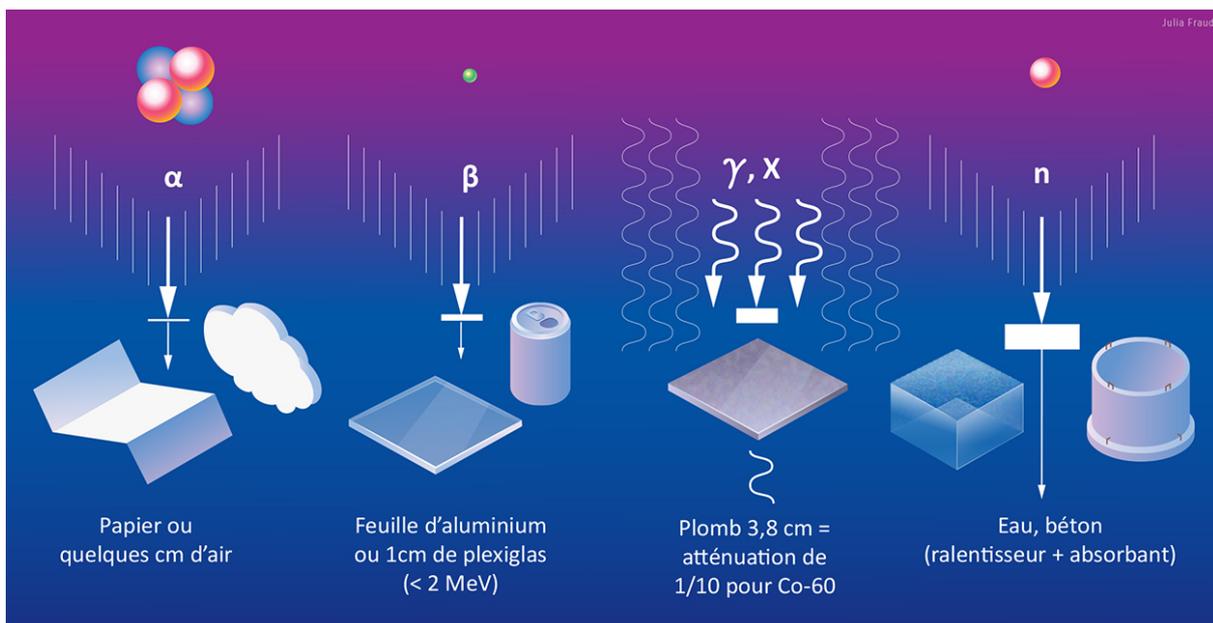


FIGURE 2.7 – Illustration des différentes façons d'absorber des rayonnements ionisants. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Résumé

Le tableau 2.4 et la figure 2.7 résument les différentes façons d'absorber des particules selon leur nature et celle du matériau absorbant. Ainsi, si on veut se protéger des neutrons, il faut utiliser des matériaux de faible masse atomique comme le béton, l'eau, la paraffine. Et au contraire, si on veut se protéger des γ , il faudra plutôt utiliser des matériaux denses, comme le plomb. Les particules chargées sont beaucoup moins pénétrantes, on peut donc s'en protéger plus facilement.

2.2.2 Effet des rayonnements ionisants sur la matière

Nous avons vu jusque-là comment on pouvait freiner, arrêter ou absorber des rayonnements avec différents types de matériaux, selon la nature du rayonnement. Voyons maintenant quel est l'effet de ces rayonnements qui pénètrent dans la matière sur celle-ci, et en particulier dans le cas de la matière vivante et de l'être humain.

De manière générale, on peut résumer les effets des rayonnements sur la matière de la façon suivante :

- Dans les gaz : on va avoir ionisation du gaz le long de la trajectoire des particules.
- Dans les liquides : on va généralement avoir ionisation puis induction de réactions chimiques avec recombinaison entre et/ou formation de radicaux ¹³.
- Dans les solides : on va avoir des perturbations cristallines (défauts, discontinuités dans l'ordre cristallin...).

2.2.3 Effet des rayonnements ionisants sur la matière vivante et radioprotection

On distingue :

- L'exposition **externe** lorsque la source radioactive se trouve à l'extérieur de l'organisme, sur la peau ou les vêtements. Elle peut être éliminée par déshabillage et par une douche.
- l'exposition **interne** lorsque la source radioactive se retrouve dans l'organisme par *inhalation*, *ingestion*, ou qu'elle franchit la barrière cutanée lors d'une contamination d'une blessure ou plaie.
- L'**irradiation** est la pénétration d'un rayonnement à l'intérieur de la matière, inerte ou vivante (et donc accompagnée d'un dépôt d'énergie). On parle d'irradiation chronique si celle-ci est continue dans le temps (comme celle provenant des rayons cosmiques) ou ponctuelle (comme lors d'un examen radiologique).
- La **contamination** (radioactive) a lieu quand une substance radioactive se dépose sur un support (inerte ou vivant). On parle de contamination *chronique*, si celle-ci est continue dans le temps (comme l'inhalation du radon contenu dans l'air) ou *ponctuelle* (comme l'ingestion d'eau contaminée).

Si la source radioactive se trouve à l'extérieur du corps des personnes exposées, il suffit de les éloigner (la quantité d'énergie reçue décroît comme le carré de la distance pour une source isotrope, selon l'angle solide de la personne exposée) ou d'écranter la source pour stopper l'exposition.

Si la source est interne, on peut essayer d'utiliser des capteurs chimiques pour fixer les éléments radioactifs et les éliminer par les voies naturelles.

Les effets entre exposition externe et interne sont différents selon la nature du rayonnement. Le rayonnement α a un parcours d'environ 40 μm dans les tissus humains : sur la peau, c'est l'épaisseur de la « peau morte » ; dans le corps, il atteint directement les tissus vivants et l'irradiation peut être importante. Le rayonnement β , comme les rayons X de faible énergie, ont

13. Un radical ou radical libre est une espèce chimique avec un ou plusieurs électrons non appariés sur la couche externe ce qui en fait une espèce très instable et très réactive chimiquement.

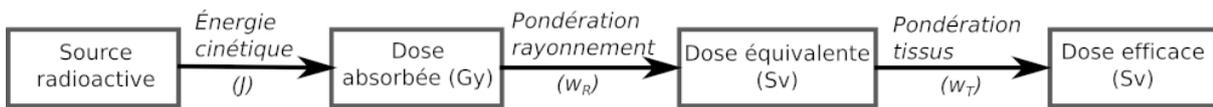


FIGURE 2.8 – Illustration des différentes notions de dose radioactives.

un pouvoir pénétrant plus important et peuvent ainsi irradier fortement la peau. Les photons X énergétiques et γ , comme les neutrons, vont traverser le corps et irradier en profondeur.

Les dégâts des rayonnements ionisants sur la matière vivante vont de la création de radicaux libres au sein de la cellule qui conduira à une altération des bases nucléiques de l'ADN (faible irradiation) à la destruction des cellules (irradiation intense). Le patrimoine génétique de la cellule peut ainsi être modifié et conduire à des cancers.

Notion de doses radioactives

On quantifie les effets des radiations sur les êtres humains à l'aide de la notion de dose. Il y a plusieurs subtilités dans cette notion (voir la figure 2.8).

Tout d'abord, on parle de **dose absorbée**, D , qui est la quantité moyenne d'énergie \bar{E} absorbée par unité de masse dm de matière irradiée :

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (2.8)$$

Elle s'exprime en *gray* (Gy) : $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. C'est une dose *physique* qui ne tient pas compte de la nature inerte ou vivante de la matière exposée.

Il y a également le **débit de dose** qui est la dose de radiation absorbée par unité de temps (s'exprime en gray par seconde).

La notion de *dose absorbée* ne tient pas compte des effets biologiques.

Pour tenir compte des effets des rayonnements sur la matière vivante (le corps humain), on introduit les notions de *dose équivalente* et de *dose efficace*.

Pour cela, la dose absorbée (physique) est transposée en une *dose absorbée moyenne* $D_{T,R}$ dans le volume d'un organe ou d'un tissu T due à un rayonnement de type R (Nénot 2009).

On définit ainsi :

→ La **dose équivalente** dans un tissu ou un organe H_T par :

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.9)$$

où w_R est le facteur de pondération (sans unité) pour le rayonnement R . La somme est calculée pour l'ensemble des rayonnements impliqués. Le tableau 2.5 et la figure 2.9 donnent les valeurs de w_R pour différents rayonnements.

→ La **dose efficace** D_{eff} est la somme pondérée des doses équivalentes reçues par les tissus :

$$D_{\text{eff}} = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.10)$$

où w_T est le facteur de pondération (sans unité) pour l'organe ou le tissu T . On a : $0 < w_T < 1$ et $\sum_T w_T = 1$. Le facteur w_T est donné au tableau 2.6.

Les valeurs des facteurs de pondération sont déterminées empiriquement (Nénot 2009).

La dose équivalente ne concerne donc qu'un tissu ou organe T , la dose efficace concerne le corps entier. Elles s'expriment toutes les deux en sievert (Sv), sachant que physiquement on a : $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, moyennant les facteurs de pondération exprimés ci-dessus, sans unités.

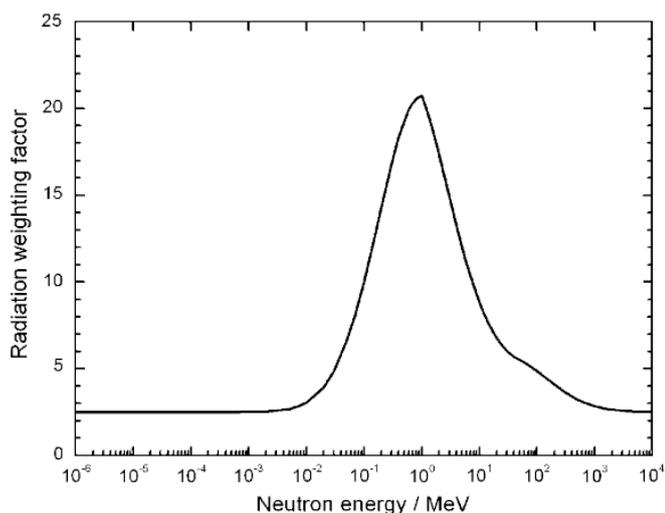


FIGURE 2.9 – Facteur de pondération w_R pour un rayonnement de neutrons en fonction de l'énergie des neutrons. Source : ICRP (2017). © ICRP.

Nature du rayonnement	Facteur de pondération (w_R)
Photons	1
Électrons et muons	1
Protons	2
Particules α , fragments de fission	20
Neutrons	fonction continue

TABLE 2.5 – Facteur de pondération w_R lié à la nature du rayonnement permettant d'obtenir la dose équivalente à partir de la dose absorbée. Il est sans unité. Pour les neutrons, voir la figure 2.9. D'après Nénot (2009).

Tissu	Facteur de pondération tissulaire (w_T)
gonades	0,20
moelle osseuse	0,12
colon	0,12
poumons	0,12
estomac	0,12
vessie	0,05
seins	0,05
foie	0,05
œsophage	0,05
thyroïde	0,05
peau	0,01
surface osseuse	0,01
reste	0,05
TOTAL	1,00

TABLE 2.6 – Facteur de pondération lié à la nature du tissu touché (w_T) permettant d'obtenir la dose efficace à partir de la dose équivalente. Il est sans unité, et la somme de tous les facteurs doit faire 1. D'après Foos (2009).

Radionucléide	Mode d'incorporation	Facteur de dose (en mSv · kBq ⁻¹)	
		3 mois	adulte
Iode 131	Ingestion	0,48	0,022
Césium 137		0,011	0,013
Uranium 238		0,14	0,045
Iode 131	Inhalation	0,072	0,0074
Césium 137		0,0088	0,0046
Uranium 238		1,9	0,5

TABLE 2.7 – Extrait d'un tableau de facteurs de dose pour les membres du public (jeune enfant et adulte) pour quelques radionucléides, d'après Eckerman *et al.* (2012), tableaux F.1 et G.1.

Le sievert

Le sievert sert à quantifier le risque stochastique induit sur la santé des sujets par de faibles rayonnements : risque supplémentaire de décéder un jour d'un cancer, risque de transmettre un jour une mutation grave à un descendant. On peut utiliser le sievert pour exprimer de faibles expositions, par exemple pour la radioprotection des travailleurs et du public dans des conditions normales. (Source : Wikipédia)

La notion de dose équivalente ou de dose efficace n'est pas valable pour les fortes doses ($\geq 0,25$ Gy ; $\geq 0,25$ Sv) car alors des effets *déterministes* (effets de seuil) apparaissent de manière certaine sur les tissus.

Pour les faibles irradiations, les risques sont *stochastiques* : les effets n'apparaissent pas de manière certaine.

Le gray et le sievert sont deux unités « homogènes » que l'on peut néanmoins difficilement comparer, à cause des facteurs de pondération sans dimension w_R et w_T qui interviennent dans la définition des doses équivalente et efficace qui, elles, s'expriment en sieverts. Le tableau 2.5 montre effectivement qu'un gray de particules α est ~ 20 fois plus cancérigène qu'un gray de photons ou d'électrons.

Facteur de dose : du becquerel au sievert

On peut se demander comment on « passe » d'une activité (en becquerels) à une dose efficace reçue (en sieverts). On définit ainsi un *facteur de dose* qui s'exprime en Sv · Bq⁻¹, comme la dose efficace (en Sv) correspondant à l'ingestion ou l'inhalation de 1 Bq d'un radionucléide donné. Le facteur de dose ne concerne ainsi que les expositions internes. On ne peut pas évaluer d'expositions externes à l'aide de ces facteurs.

Le facteur de dose est calculé à l'aide de simulations prenant en compte un grand nombre de facteurs : biocinétique (absorption, rétention, distribution, excrétion des radionucléides dans un organisme vivant), type de radionucléide, voie d'incorporation (répartition dans les organes), période, etc. On distingue dans ces calculs l'exposition externe¹⁴ et l'exposition interne¹⁵.

Le tableau 2.7, qui donne quelques exemples de facteurs de dose, montre qu'un adulte reçoit une dose de 1 mSv s'il inhale, par exemple, 135 000 Bq d'iode 131 (β^-) ou 2000 Bq d'uranium 238 (α).

14. Dans l'exposition externe, la dose reçue dépend de très nombreux paramètres (caractéristiques de la source, position de l'individu, écrans de protection...).

15. Dans l'exposition interne, on a une relation complexe entre l'activité et la dose efficace qui dépend du radionucléide (physico-chimie + type de rayonnement émis), du mode d'incorporation (ingestion ou inhalation) et de l'âge de l'individu.

2.2.4 Effet de la dose reçue

Les effets produits d'une dose radioactive reçue peuvent être ¹⁶ :

- stochastiques (aléatoires) pour des faibles doses d'irradiation et dans le cas où la cellule a réussi à se réparer mais de manière incomplète, entraînant ainsi des modifications de sa fonction;
- déterministes pour des doses plus fortes, entraînant la mort de la cellule à plus ou moins court terme.

La limite entre effets stochastiques et effets déterministes se trouve autour de 100 mSv. Au-delà, les études, en particulier le suivi de dizaines de milliers de survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki ont montré que le risque de cancers augmente. En deçà, les études n'ont pas établi de façon indiscutable l'existence d'une relation entre dose de rayonnements et risque de cancers ou maladies non cancéreuses notamment en raison des incertitudes qui accompagnent ce type d'étude. Une étude récente (David *et al.* 2021) semble montrer (ceci restant à confirmer) qu'une exposition à un rayonnement de fond (naturel) plus élevé aurait des effets bénéfiques sur la santé (en termes de longévité et de réduction de risque de cancer).

C'est pourquoi cette valeur de 100 mSv a été choisie pour définir schématiquement le domaine des « faibles doses » ¹⁷.

Les études actuelles sur les « faibles » doses ne permettent pas d'exclure ni d'affirmer l'existence de risques pour les êtres vivants. Des recherches sont en cours, mais il est difficile d'attribuer les causes d'un cancer à telle ou telle exposition (radioactivité, génétique, environnement, etc.) de manière certaine. Cela nécessite des études longues avec un grand nombre de sujets pour avoir une réalité statistique. Il est clair que l'extrapolation des effets des fortes doses ne reflète pas du tout la réalité.

La limite réglementaire (en vertu du principe de précaution) pour la population de la dose annuelle admissible d'expositions d'origine artificielle (sauf celle reçue à des fins médicales) est fixée à 1 mSv par Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Ce seuil a été fixé de manière à gérer les risques avec un coût acceptable. Pour les travailleurs, le seuil maximal recommandé est de 20 mSv par an.

Les effets déterministes d'une forte dose sont les suivants ¹⁸ :

- 1 Sv = nausées, vomissements, perte de cheveux,
- 3 à 5 Sv = hémorragie et infection, apparition d'érythème sur la peau, stérilité permanente des ovaires (testicules > 5 Sv),
- 5 Sv = dose létale pour 50 % des personnes exposées,
- 10 Sv = dose létale pour 100 % des personnes exposées (en quelques jours),
- 30 Sv = mort en quelques heures.

Le tableau 2.8 donne les valeurs de l'activité pour quelques substances courantes. Le tableau 2.9 donne quelques valeurs de la dose équivalente reçue dans différentes circonstances. Le tableau 2.10 donne quelques valeurs de doses ponctuelles reçues pour certains examens médicaux.

16. Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radioprotection>.

17. Tiré du site de l'IRSN : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/rayonnements-ionisants-effets-radioprotection-sante/effets-sanitaires-faibles-doses/Pages/1-comprendre-faibles-doses-rayonnements-ionisants.aspx#.Y-DQLi-ZO3A>.

18. https://fr.wikipedia.org/wiki/échelles_et_effets_de_doses_de_radiation.

Eau de mer	13 Bq/L
Poisson	100 Bq/kg
Corps humain	100 Bq/kg
Pomme de terre	150 Bq/kg
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Café	1000 Bq/kg
Cendre de charbon	2000 Bq/kg
Engrais phosphatés	5000 Bq/kg
Sol granitique	8000 Bq/kg
Combustible usé en sortie de réacteur nucléaire	10^{14} Bq/kg

TABLE 2.8 – Valeurs de l'activité pour quelques substances.

Radioactivité naturelle annuelle en France (moyenne)	2,3 mSv
Passager d'un vol Paris-New-York	0,03 mSv
Un jour en station orbitale à 400 km d'altitude	1 mSv
Mission de 9 jours sur la Lune (Apollo 14)	11 mSv
Une cigarette	5 à 10 μ Sv

TABLE 2.9 – Quelques exemples de doses équivalentes.

Panoramique dentaire	0,01 mSv
Radiographie des poumons	0,1 mSv
Mammographie	1,0 mSv
Rachis lombaire	1,5 mSv
Scintigraphie thyroïdienne	0,24 mSv
Scanner abdominal	10 mSv
Examen TEP-scanner corps entier	20 mSv

TABLE 2.10 – Quelques exemples de doses ponctuelles reçues lors de certains examens médicaux (ordres de grandeur).

La figure 2.10 montre la dose équivalente annuelle moyenne à laquelle un individu, en France, est exposé. Cette dose, d'environ 4,5 mSv se décompose en 2,3 mSv d'origine naturelle¹⁹ et 2,2 mSv d'origine artificielle²⁰.

Dose ponctuelle ou dose étalée dans le temps? Chaque année, nous recevons, en France, en moyenne 2,3 mSv rien que par la radioactivité naturelle. À 43 ans, on atteint un cumul d'environ 100 mSv.

On sait peu de choses sur la « Remise à Zéro » : au bout de combien de temps peut-on remettre le compteur à zéro? Le peut-on seulement? La réponse dépend de nombreux facteurs

19. Le radon est un gaz émanant surtout des roches granitiques et volcaniques; tous ses isotopes sont radioactifs, leurs périodes vont de quelques heures à quelques jours. Il est produit par la désintégration de l'uranium 238; en France, en moyenne, on a ~ 90 Bq/m³, tandis qu'en Bretagne, on a : ~ 120 Bq/m³.

Le rayonnement provenant du sol, provient en particulier des sols granitiques.

Le rayonnement cosmique est provoqué par les particules énergétiques qui proviennent du Soleil ou du cosmos et qui viennent heurter les molécules de l'atmosphère créant ainsi des nucléides radioactifs, comme le carbone 14.

20. Voir *L'exposition à la radioactivité en France*, IRSN, 2016, http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/Documents/IRSN_Infographie-Exposition-population_201609.pdf.

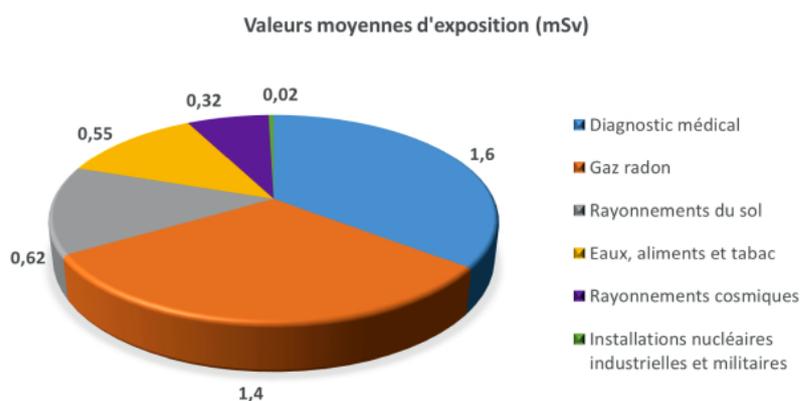


FIGURE 2.10 – Dose équivalente annuelle moyenne en France. Données : IRSN 2016.

(dose ponctuelle, autres facteurs biologiques, chimiques...) ²¹ ! Néanmoins, une dose reçue d'un seul coup est plus nocive que si elle est reçue étalée sur une longue période.

2.3 Application des rayonnements

Les applications de la radioactivité sont vastes et souvent méconnues ; elles sont pourtant à la pointe de la recherche, de la médecine, de l'industrie et de l'innovation.

L'utilisation de radioéléments est étroitement liée à leur production. On peut produire des isotopes radioactifs de différentes manières :

- irradiation neutronique d'isotopes stables dans des réacteurs nucléaires de recherche ou de puissance (cobalt 60 ou iridium 192 de période longue) ;
- séparation chimique des produits de fission issus des réacteurs de puissance (césium 137, strontium 90, krypton 85 ou iode 131) ;
- irradiation d'isotopes stables par des particules chargées d'énergie élevée (α , deutons, protons, ions lourds, etc.) dans des cyclotrons (éléments de courte période comme le carbone 11, l'oxygène 15, le fluor 18 ou l'azote 13).

Selon l'utilisation que l'on veut en faire, le type de rayonnement que l'on souhaite, la durée de vie, etc., on peut produire différents radioéléments. Dans la suite, on présente quelques applications en recherche scientifique ou industrielle de l'utilisation de la radioactivité.

Analyse par activation

L'analyse par activation consiste à bombarder un échantillon avec un rayonnement approprié (neutrons, protons, α , deutons ou γ , voir la figure 2.11). Le matériau bombardé est alors « excité » : les noyaux le constituant vont se désexciter en émettant un rayonnement, le plus souvent un rayonnement γ . On mesure le spectre (voir figure 2.12) de ces radiations émises, ce qui permet l'identification des noyaux sources et leur dosage. Cette méthode d'investigation est non destructrice, sachant que les détecteurs actuels permettent de déceler la désintégration de quelques noyaux seulement.

Elle permet également de réaliser des dosages ou d'identifier des composés en faible quantité.

21. Voir, par exemple : <http://www.laradioactivite.com/site/pages/cumuldesdoses.htm>.

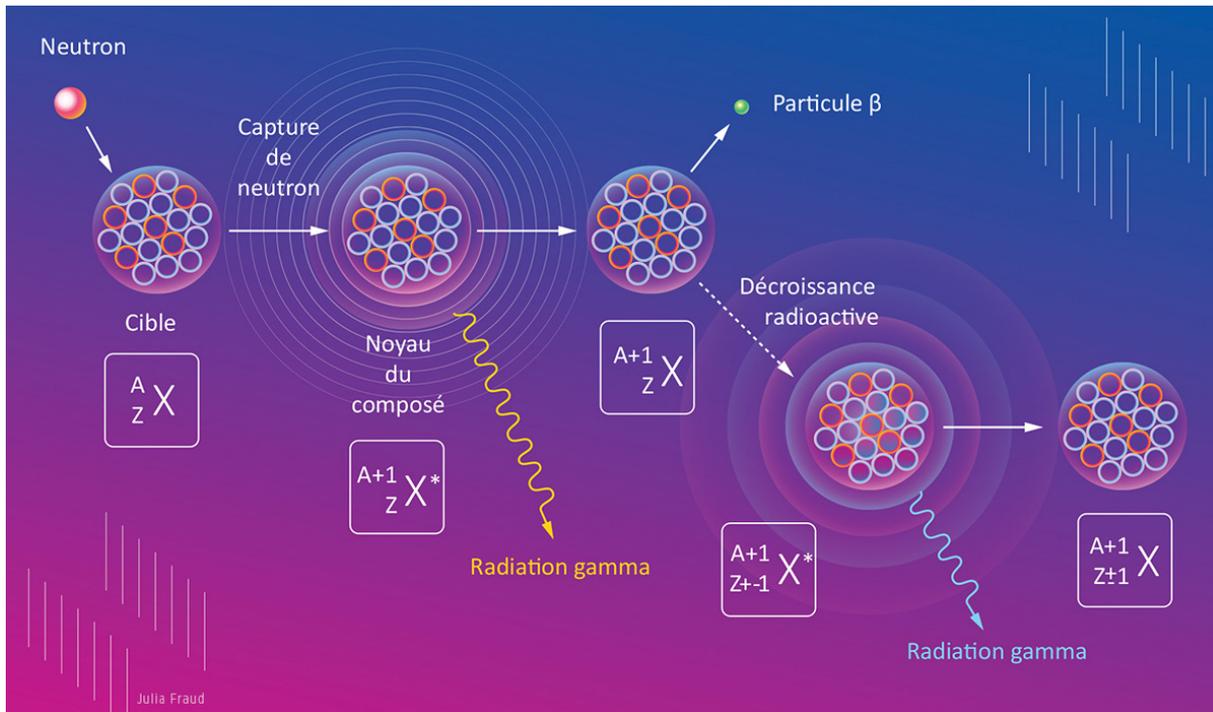


FIGURE 2.11 – Illustration d’une chaîne de réactions possible pour l’analyse d’une cible par activation neutronique. Ce sont les photons γ émis (PGAA = *Prompt Gamma Activation Analysis*; NAA = *Neutron Activation Analysis*) qui sont mesurés comme à la figure 2.12. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

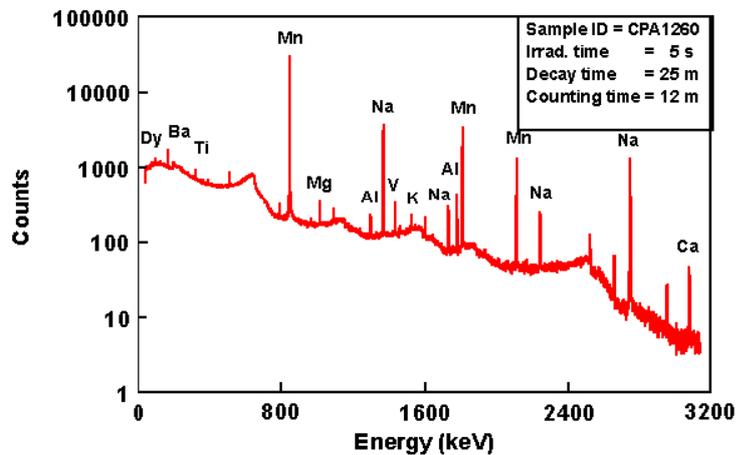
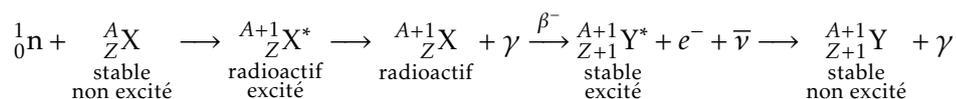


FIGURE 2.12 – Spectre γ montrant différents éléments à courtes périodes mesurés dans un échantillon de poterie irradié pendant 5 secondes, qui a décré pendant 25 minutes et dont on a compté les photons pendant 12 minutes avec un détecteur HPGe (germanium hyperpur). Source : https://archaeometry.missouri.edu/naa_technical.html. © University of Missouri.

Exemples d’utilisation de l’analyse par activation :

- analyse de micro-météorites, d’œuvres d’art...
- industrie chimique : détection d’impuretés (fabrication de corps très purs),
- biologie : dosage des oligo-éléments,
- dosage des composants des alliages en métallurgie,
- dosage des dopants dans les semi-conducteurs,
- etc.

Un exemple consiste à bombarder une cible avec des neutrons selon la réaction suivante :



Cette chaîne de réactions est schématisée à la figure 2.11.

Analyse par traceurs

L'analyse par traceurs consiste à ajouter dans une solution une quantité donnée d'isotopes radioactifs, et d'attendre que ces éléments se diluent et soient répartis de manière homogène dans tout le volume du liquide. On prélève alors un échantillon de fluide et on mesure son activité. Cela permet des mesures de masses, de volumes, de concentrations.

On peut ainsi suivre l'évolution et le comportement de composés impliqués dans des réactions ou processus physiques, chimiques, métaboliques...

Par exemple, on peut doser l'insuline dans le sang en la marquant avec de l'iode 125 ; on peut mesurer le volume sanguin.

Médecine nucléaire – radiothérapie

Les premières applications de la radioactivité datent de 1903, elles utilisaient la désintégration du radium 226, fraîchement découvert, pour traiter les tumeurs cancéreuses.

Le traitement des affections cancéreuses se fait en utilisant l'effet de destruction cellulaire sélective par certains rayonnements : irradiation externe avec une source ponctuelle ou un accélérateur ; irradiation interne directement au voisinage de l'organe atteint ; et d'autres techniques spécifiques.

En France, près de 50 % des cancers ont été traités au moyen de ces techniques nucléaires en 2016²². Environ 40 % des cancers guéris le sont grâce aux effets thérapeutiques des radioéléments²³.

Médecine nucléaire – diagnostic in vivo

On peut également utiliser la radioactivité en médecine nucléaire non pour traiter mais pour diagnostiquer.

Le principe de la scintigraphie (figure 2.13) est de détecter des radiotraceurs spécifiques préalablement injectés dans l'organisme humain qui vont se fixer sur les organes à examiner sans perturber les processus métaboliques. On peut ensuite visualiser le fonctionnement de l'organe à traiter (ou à étudier) en suivant le trajet du radioélément dans le corps (thyroïde avec l'iode, os avec le technétium 99m²⁴ qui a la propriété de s'y fixer, etc.).

22. Voir : Institut National du Cancer - La radiothérapie. <http://lesdonnees.e-cancer.fr/Themes/Soins/La-radiotherapie>.

23. *La radiothérapie guérit 40 % des cancers*, Le Figaro, 8 octobre 2015, <http://www.lefigaro.fr/flash-actu/2015/10/08/97001-20151008FILWWW00204-la-radiotherapie-guerit-40-des-cancers.php>.

24. Le technétium 99m est un isomère nucléaire du technétium 99, c'est-à-dire un noyau dans un état d'énergie d'excitation particulier. Il se désexcite en émettant un photon γ avec une période de 6 h pour donner du technétium 99, qui a lui, une période de 211 000 ans.

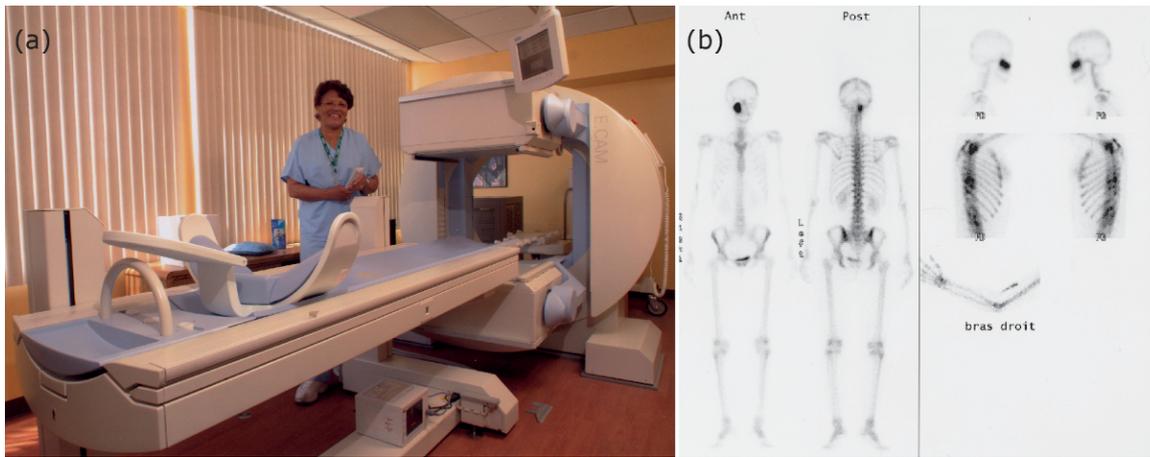
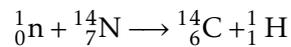


FIGURE 2.13 – Scintigraphie. (a) Gamma caméra à scintigraphie. Cet appareil fait l'imagerie des photons γ . Source : Wikipédia/Brendaïcm. CC BY-SA. (b) Résultat d'une scintigraphie osseuse : on injecte au patient du technicium 99m qui est radioactif γ et qui a la particularité de se fixer sur les os. L'image de ce patient montre l'intensité de l'émission γ que les médecins interprètent comme des métastases osseuses. CC0.

Datation (carbone 14)

Les rayons cosmiques (essentiellement des protons ainsi que quelques α , électrons, γ , neutrinos...) viennent heurter les molécules de la haute atmosphère ce qui engendre un flux de neutrons qui va, entre autres, rencontrer des noyaux d'azote, principal composant de l'atmosphère :



On obtient ainsi du ${}^{14}_6\text{C}$ qui est radioactif (tandis que les isotopes ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{12}_6\text{C}$ sont stables). Les êtres vivants échangent en permanence du carbone avec leur environnement (photosynthèse, métabolisme...), donc la proportion de ${}^{14}\text{C}$ qu'ils contiennent est la même que celle observée dans l'atmosphère.

Lorsqu'un organisme meurt, il cesse d'absorber du ${}^{14}\text{C}$. Donc celui-ci décroît radioactive-ment. La mesure de son activité à un instant ultérieur permet ainsi de dater l'instant de sa mort.

La période du ${}^{14}\text{C}$ est de 5730 ans. Ce procédé permet donc de dater les événements relativement récents en archéologie ou géologie (jusqu'à $\sim 50\,000$ ans). Il a été mis au point par Libby (1946), à qui il a valu de recevoir le prix Nobel de chimie en 1960.

D'autres nucléides sont utilisés pour dater d'autres époques des temps géologiques : par exemple le thorium 232 (émetteur α de période 14 milliards d'années) ou le potassium 40 (émetteur β^- de période égale à 1,3 milliard d'années).

Traceurs en sciences de l'environnement

On peut également utiliser les radionucléides présents naturellement (fossiles ou produits présents en permanence dans l'atmosphère), ou les radionucléides artificiels rejetés par les essais nucléaires ou l'industrie nucléaire pour mesurer différents flux en sciences de l'environnement (voir par exemple la figure 2.14). Ou bien, injecter volontairement des radionucléides dans le milieu.

Les principales applications sont :

- l'hydrologie souterraine (évaluation des réserves d'eau, contrôle des nappes aquifères, etc.);

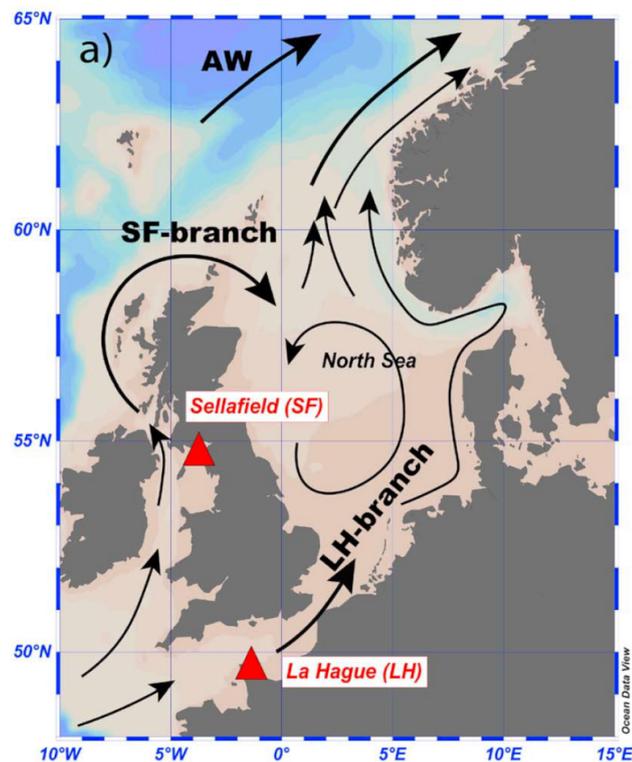


FIGURE 2.14 – Carte montrant l’emplacement des deux usines européennes de retraitement de Sellafield (SF) et de La Hague (LH) rejetant de l’iode 129 et de l’uranium 236 servant de traceurs pour les courants qui sont représentés schématiquement dans la mer du Nord. Tiré de Casacuberta *et al.* (2018). © American Geophysical Union.

- l’hydrologie de surface (mesure de débits, contrôle de la dispersion des polluants, détection de fuite sur les barrages, étude des courants marins à l’aide, par exemple, des rejets de La Hague...);
- la sédimentologie dynamique (mesure des déplacements des sédiments, opérations de curage et dragage, charriage sous-marin, etc.).

Applications industrielles

- **Contrôle non destructif par gammagraphie** (émetteurs γ , iridium 192 et cobalt 60) – même principe que la radiographie X, mais pour des matériaux denses : contrôle de corrosion, d’entartrage, d’intégrité, d’homogénéité, de remplissage, de positionnement, d’assemblage, de qualité de divers matériaux (fonte, bétons...). Voir les figures 2.15 et 2.16.
- **Contrôle non destructif** : avec des **électrons** pour les matériaux en feuillets minces comme le papier, les billets de banque, les manuscrits anciens, ou les matières plastiques ; avec des **neutrons** pour les matériaux légers hydrogénés (caoutchouc, explosifs, matières plastiques, colles...).
- **Jauges radiométriques** : mesures de niveaux (sans contact), contrôle de remplissage automatique (pots de yaourt, paquets de lessive, briquets, bouteilles de gaz...) ou de vidange de réservoir (sable, ciments, minerais...), mesures d’épaisseur, de densité, de distance, d’humidité, de concentration, etc.
- **Traceurs industriels** : visualisation des flux avec des applications très vastes.
- **Sources lumineuses** : cadrans lumineux, signaux lumineux des issues de secours (tritium).

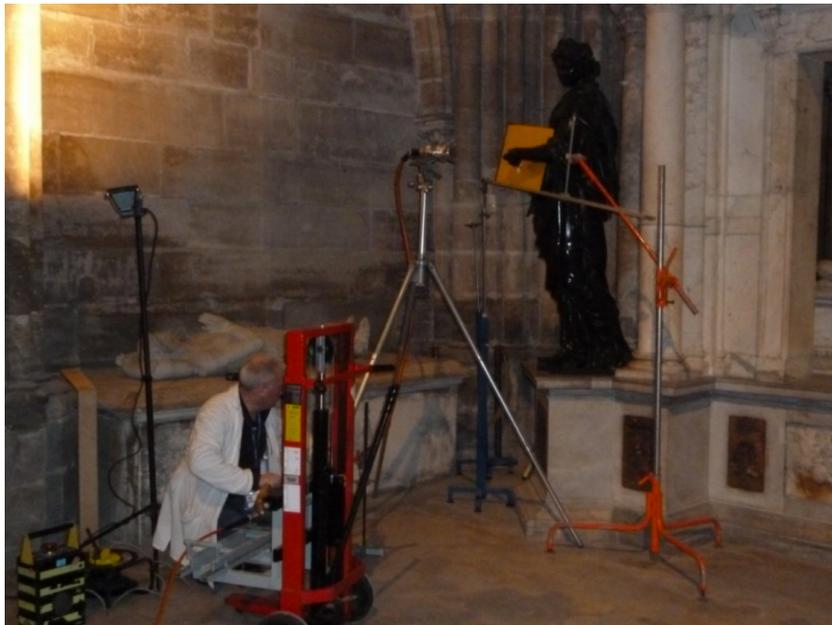


FIGURE 2.15 – Vue générale du chantier montrant le tir réalisé sur le bras gauche de la statue personnifiant la vertu cardinale de la *Prudence*, sur le monument funéraire d’Henri II et de Catherine de Médicis à la basilique Saint Denis. Source : Castelle (2016). © Manon Castelle.

- **Sources d’énergie** : sondes spatiales (générateur thermoélectrique à radioisotope ²⁵), stations météo isolées, installations sous-marines...
- **Radiotraitement chimique** : modification des propriétés ou des caractéristiques de certains matériaux issus de l’industrie chimique (dopage du silicium pour la microélectronique, par exemple).
- **Conservation des œuvres d’art** : destruction des microorganismes qui dégradent les œuvres (comme, par exemple, les champignons qui infestaient la momie de Ramsès II traitée par le CEA en 1976).
- **Traitement des eaux usées.**
- **Stérilisation et décontamination microbiologique** : matériel médico-chirurgical, emballages, liquides, produits pulvérulents, etc.
- **Amélioration des espèces végétales** : radiomutagenèse, phénomène mis en évidence en 1927.
- **Éradication d’espèces nuisibles** : radiostérilisation d’individus mâles (préserve l’environnement par rapport à l’usage classique d’insecticides ; inconvénient : coût).
- **Traitement des denrées agro-alimentaires** : allongement de leur durée de conservation, assainissement, réduction des pertes des récoltes stockées.

25. Un générateur thermoélectrique à radioisotope est un système permettant de produire de l’énergie électrique à partir de la production de chaleur dégagée par la radioactivité d’un radioélément (comme le plutonium). Pour ce faire il utilise un dispositif à semiconducteur (couples thermoélectriques) utilisant l’effet Seebeck pour convertir la chaleur en électricité. Ce type de système est utilisé dans les sondes spatiales comme celle qui a exploré Saturne, Cassini-Huyghens.



FIGURE 2.16 – Radiographie gamma de la partie droite du buste et de la main gauche de la statue de la *Prudence* (voir figure 2.15). L'épaisseur de la paroi métallique varie de 8 à 18 mm dans le bras et de 25 à 40 mm dans la tête. Source : Castelle (2016). © C2RMF.

2.4 Production d'énergie nucléaire

2.4.1 Énergie chimique et énergie nucléaire

L'essence produit de l'énergie par réaction chimique :



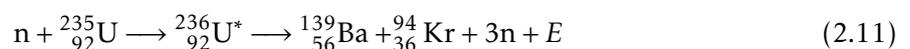
1 kg d'essence fournit 50 MJ d'énergie.

L'uranium produit de l'énergie par fission en récupérant l'énergie de liaison des noyaux. 1 kg d'uranium naturel enrichi (combustible des centrales) fournit 0,05 g d'énergie, soit 5000 GJ... 1 kg d'uranium fournit ainsi 10^5 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence !

2.4.2 Réaction de fission

La fission induite consiste à fragmenter un noyau lourd en plusieurs morceaux (souvent deux) à l'aide d'un neutron.

Par exemple (parmi différentes possibilités), on a la réaction :



où E est l'énergie libérée et U^* est un noyau d'uranium excité, c'est-à-dire dans un niveau d'énergie non fondamental.

L'énergie de liaison est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour en séparer tous les nucléons. Les noyaux lourds sont moins liés que les noyaux plus légers (voir figure 2.1) : un noyau lourd qui se casse en deux (fission) libère une partie de son énergie de liaison.

Avec les énergies de liaison par nucléon pour les différents noyaux impliqués dans la réaction de fission ci-dessus, on a :

$$E \simeq 139 \times 8,3 + 94 \times 8,8 - 235 \times 7,6 \simeq 195 \text{ MeV} \quad (2.12)$$

Les neutrons emportent chacun environ 2 MeV d'énergie cinétique (tandis qu'une réaction chimique délivrera une énergie de l'ordre de l'électronvolt par molécule). Le reste (~ 189 MeV) se retrouve dans l'énergie cinétique des fragments.

2.4.3 Fissile ou fertile ?

Un **noyau fissile** est un noyau qui peut subir une fission nucléaire sous l'effet de neutrons (lents ou rapides). Le seul noyau fissile existant à l'état naturel est l'*uranium 235* ; tous les autres sont produits artificiellement.

Un **noyau fertile** est un noyau qui peut produire un isotope fissile par capture d'un neutron, directement ou après une décroissance β . Les deux seuls isotopes fertiles présents dans la nature sont l'*uranium 238* (qui donne de l'*uranium 239*, instable, puis du *plutonium 239*, fissile) et le *thorium 232* (qui donne du *thorium 233*, instable, puis de l'*uranium 233*, fissile).

L'*uranium* naturel contient (en masse) 99,3 % d'*uranium 238* (fertile) et seulement 0,7 % d'*uranium 235* (fissile). La période de l'*uranium 235* étant de 710 millions d'années, et celle de l'*uranium 238* de 4,5 milliards d'années, la proportion d'*uranium 235* dans l'*uranium* naturel varie au cours du temps : lors de la formation du système solaire, il y a 4,6 milliards d'années, elle était de 14 %.

2.4.4 Réaction en chaîne

La capture d'un neutron par un noyau lourd peut donc donner une fission. Mais le noyau peut aussi se désexciter en émettant des γ (capture radiative). Ce processus concurrence la fission, comme par exemple la réaction :



Pour savoir quel est le régime énergétique des neutrons incidents donnant une fission, on parle de probabilité de réaction ou encore de *section efficace*. On la note généralement σ ; la section efficace d'une réaction nucléaire s'exprime en barn avec $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$.

On définit également le nombre η de neutrons de fission qui pourront être disponibles pour provoquer une nouvelle réaction. Si $\eta > 1$, alors il pourra y avoir réaction en chaîne, c'est-à-dire qu'une réaction initiale va générer des neutrons qui vont eux-mêmes permettre la fission de nouveaux noyaux.

Les neutrons produits par une réaction de fission telle que la réaction (2.11) ont une énergie de l'ordre de 2 MeV. Ils sont dits « rapides ». Or le tableau 2.11 montre que la section efficace de réaction de fission de l'*uranium 235* avec des neutrons rapides est peu élevée (1,3 barn) d'une part, et que la section efficace de capture de ces neutrons rapides par l'*uranium 238* est du même ordre de grandeur (2,4 barns). Comme l'*uranium* naturel contient 140 fois plus d'*uranium 238*, un neutron sera principalement capturé par l'*uranium 238* et ne servira donc pas à la fission. En revanche, à basse énergie le rapport des sections efficaces : $\sigma_f(235)/\sigma_\gamma(238)$ vaut environ 215 ce qui devient plus favorable pour la fission en compensant la faible proportion d'*uranium 235*.

Il est donc préférable de ralentir les neutrons produits par la fission, afin qu'ils deviennent « thermiques » pour maximiser leurs chances de produire de nouvelles fissions et induire ainsi une réaction en chaîne.

Néanmoins, même aux énergies thermiques, la réaction de fission de l'*uranium 235* est toujours un peu en compétition avec la capture radiative²⁶. Pour l'*uranium* naturel, le nombre

26. La capture radiative est la capture d'un neutron par le noyau, suivie de l'émission d'un photon γ .

	σ_f (barn)	σ_γ (barn)	ν	η
Neutrons thermiques ($E \sim 0,025$ eV)				
$^{235}_{92}\text{U}$	582	108	2,5	2,1
$^{238}_{92}\text{U}$	0	2,7	0	0
$^{239}_{94}\text{Pu}$	750	300	2,9	2,1
Neutrons rapides ($E \sim 2$ MeV)				
$^{235}_{92}\text{U}$	1,3	0,10	2,5	2,3
$^{238}_{92}\text{U}$	0,5	2,4	2,9	0,5
$^{239}_{94}\text{Pu}$	2	0,1	2,9	2,7

TABLE 2.11 – Tableau donnant les sections efficaces des réactions de fission σ_f et de désexcitation par émission de γ (capture radiative), σ_γ , pour différents noyaux. On donne également les paramètres ν du nombre moyen de neutrons par fission et η le nombre de neutrons produits par neutron absorbé pour ces réactions. Données : Basdevant *et al.* (2002).

Noyau	Absorption thermique	Nombre de chocs
	σ_a relative	n
H	1	15
D	$1,5 \cdot 10^{-3}$	20
C	10^{-2}	92
O	$8,5 \cdot 10^{-4}$	121

TABLE 2.12 – Tableau donnant la probabilité d'absorption des neutrons σ_a et le nombre de chocs n pour thermaliser un neutron rapide, pour différents noyaux modérateurs.

η de neutrons « de fission » est de 1,36 pour une énergie thermique²⁷. Pour de l'uranium 235 pur, il serait de 2,1 (voir le tableau 2.11). Il faut donc enrichir l'uranium pour augmenter la proportion d'uranium 235. Avec un taux d'enrichissement de 3 %, le facteur η vaut 1,9, car la différence entre les rapports de sections efficaces de fission et de captures radiatives devient alors plus favorable pour une proportion d'uranium fissile plus grande.

Pour réduire l'énergie des neutrons émis par les réactions de fission, on utilise un matériau *modérateur*, qui va absorber le trop plein d'énergie des neutrons. Comme ceux-ci interagissent par chocs sur les noyaux, des noyaux légers sont nécessaires pour maximiser le transfert d'énergie (chocs élastiques) : par exemple de l'hydrogène, du deutérium ou du carbone.

Un bon modérateur est un matériau qui absorbe peu de neutrons (pour en laisser un maximum induire des réactions de fission) et qui les ralentit rapidement. Le tableau 2.12 montre que si l'hydrogène (H) ralentit les neutrons rapidement (en seulement 15 chocs), en revanche il a l'inconvénient de capturer parfois des neutrons pour former du deutérium.

27. Pour un mélange d'uranium 238 et d'uranium 235, le nombre η de neutrons produits par un neutron absorbé dans le combustible est donné par :

$$\eta = \nu \times \frac{N_{235}\sigma_f(235)}{N_{235}\sigma_f(235) + N_{235}\sigma_\gamma(235) + N_{238}\sigma_\gamma(238)}$$

où ν est le nombre moyen de neutrons émis par fission, soit 2,47; N_{235} et N_{238} sont les nombres de noyaux d'uranium 235 et 238 respectivement, par unité de volume; $\sigma_f(235)$ est la section efficace de fission pour l'uranium 235, $\sigma_\gamma(235)$ et $\sigma_\gamma(238)$ sont les sections efficaces de capture radiative de l'uranium 235 et 238.

2.4.5 Les principaux types de réacteurs

Compte tenu des données précédentes (en fonction notamment du combustible, du matériau modérateur et du fluide caloporteur), on peut imaginer différentes sortes de réacteurs pour récupérer l'énergie de la fission.

- Les **réacteurs à uranium naturel** fonctionnent avec des neutrons thermiques. Le modérateur ne peut être de l'eau car l'hydrogène capture trop facilement les neutrons, et l'uranium naturel contient trop peu d'uranium 235 fissile; le carbone a un pouvoir ralentisseur moins grand. L'eau lourde (D₂O) est le meilleur modérateur, mais présente un prix de revient élevé. Ce type de réacteur est désormais obsolète et en cours de démantèlement. En France, les réacteurs de technologie UNGG (uranium naturel graphite gaz) développés dans les années 1950 furent utilisés pour produire du plutonium militaire et de l'électricité. La technologie soviétique RBMK, impliquée dans l'accident de Tchernobyl en 1986 (et modifiée depuis), utilise de l'uranium légèrement enrichi et du graphite comme modérateur.
- Les **réacteurs à uranium enrichi**. L'uranium naturel contient 0,7 % de ²³⁵U; un enrichissement à 3 % permet d'utiliser le graphite (C) ou l'eau légère comme modérateur (filière à eau pressurisée – REP – ou encore à eau bouillante – REB – comme les réacteurs de la centrale de Fukushima). Les réacteurs de 3^e génération, comme l'EPR (*Evolutionary Power Reactor*), s'appuient sur cette technologie; la différence vient d'une sécurité et d'une rentabilité économique accrues.
- Les **réacteurs à neutrons rapides** fonctionnent sans modérateur et utilisent le plutonium 239 qui engendre plus de neutrons réactifs avec des neutrons rapides (voir le tableau 2.11). Le plutonium est produit à partir de l'uranium 238. Si le combustible est mélangé avec de l'uranium naturel, les neutrons produits permettent ainsi de régénérer le combustible. Actuellement trois réacteurs de cette technologie sont en fonctionnement et produisent de l'électricité dans le monde – deux en Russie et un en Chine. Plusieurs expérimentations ont pris fin. Tous sont refroidis par du sodium liquide. En France, le réacteur *Phénix*, s'est arrêté en 2010 (après 36 années de fonctionnement), tout comme *Superphénix* en 1996, par décision politique.

Ces technologies datent des années 1950-1960. Des recherches sont effectuées sur de nouvelles technologies de production d'électricité nucléaire, il s'agit de la génération IV²⁸. Les objectifs sont d'améliorer la sûreté, de brûler les stocks de plutonium, de minimiser les déchets, d'économiser les ressources naturelles, de diminuer les coûts de construction et d'exploitation. La maturité technique est espérée à l'horizon 2030. Six concepts, parmi les plus prometteurs, sont retenus :

- réacteur nucléaire à très haute température;
- réacteur à eau supercritique;
- réacteur nucléaire à sels fondus (RSF);
- réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz;
- réacteur à neutrons rapides à caloporteur plomb;
- réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium.

Le projet français ASTRID faisait partie de la dernière catégorie avant d'être abandonné.

28. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Forum_international_Génération_IV et <https://www.gen-4.org/gif/>

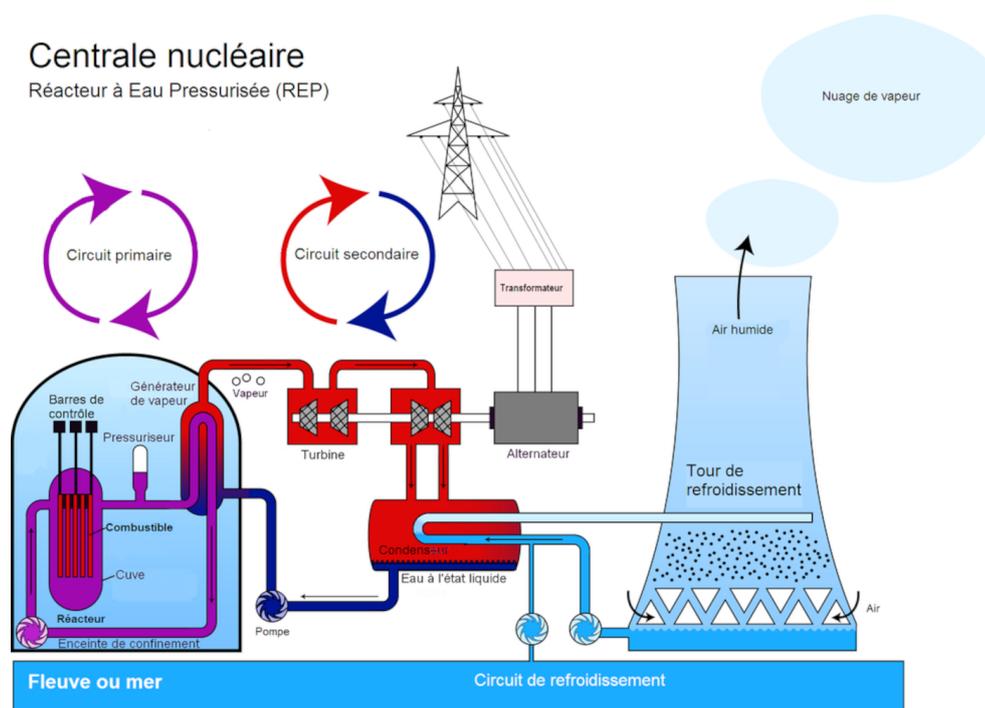


FIGURE 2.17 – Schéma d'une centrale à eau pressurisée. Source : Wikipédia / Steffen Kuntoff/Enr-v/Cjp24.

2.4.6 Les réacteurs à eau pressurisée

La filière des réacteurs à eau pressurisée (REP) est la filière la plus répandue dans le monde. La totalité des 56 réacteurs²⁹ français sont des REP avec des puissances variant entre 880 MW et 1500 MW.

L'eau sous pression (150 bars pour rester en phase liquide malgré la température élevée) est à la fois le modérateur et le fluide caloporteur. Le combustible est constitué de pastilles de dioxyde d'uranium enrichi (à 3 %) en ^{235}U .

Une centrale nucléaire à eau pressurisée est constituée de trois circuits d'eau indépendants. Le circuit primaire (en violet à la figure 2.17) dans lequel baigne le réacteur est en contact avec les crayons de combustible; c'est l'eau qu'il contient qui récupère l'énergie de la fission (fluide caloporteur et modérateur). L'eau y est activée par les neutrons et peut contenir des produits radioactifs (tritium); elle entre à une température de 295 °C et ressort à 340 °C avec un débit de 17 m³/s.

Ce circuit primaire échange (sans mélange) son énergie calorifique avec un circuit secondaire (en bleu et rouge à la figure 2.17) qui va permettre la fabrication d'électricité grâce à des turbines couplées à des alternateurs. L'échangeur produit de la vapeur d'eau à 275 °C et 60 bars. Le refroidissement de ce circuit se fait grâce à un circuit tertiaire (en bleu à la figure 2.17) en contact avec une source froide (tour de refroidissement – voir figure 2.18, rivière ou mer).

Les principales caractéristiques d'un REP de 900 MW (34 réacteurs parmi les 48 en France) sont :

- Efficacité thermodynamique³⁰ ~33 % (1000 MW électrique nécessitent 3000 MW thermique); le circuit secondaire fonctionne selon le cycle moteur de Rankine.

29. Depuis juin 2020 et l'arrêt de deux réacteurs de la centrale de Fessenheim. Les 56 réacteurs se trouvent répartis dans 18 centrales nucléaires.

30. L'efficacité attendue de l'EPR est de 35 %, grâce à une augmentation de la pression du circuit secondaire et donc de sa température.



FIGURE 2.18 – Les tours aéroréfrigérantes de la centrale nucléaire de Dampierre-en-Burly dans le Loiret. Cette centrale comporte 4 réacteurs de 900 MW. Les quatre tours mesurent 165 m de haut sur une base de 131 m de diamètre. Ces tours servent de source froide, pour refroidir l'eau du circuit secondaire, afin de limiter le réchauffement du fleuve (Loire) à proximité (les centrales en bord de mer sont dépourvues de telles tours). L'eau du circuit de refroidissement (tertiaire) y est injectée sous forme de gouttelettes, l'air qui y circule du bas vers le haut (effet cheminée), se réchauffe à leur contact et se charge d'humidité. Il s'échappe par le haut, emportant quelques gouttelettes qui forment les panaches blancs que l'on peut voir. Les tours sont en béton de forme hyperboloïde pour mieux supporter le poids de l'eau qui ruisselle et pour faciliter la convection naturelle par effet Venturi. Crédit photo : Guillaume Blanc.

- Le réacteur contient 75 tonnes de combustible (dioxyde d'uranium ou mélange de dioxyde d'uranium et de plutonium – MOX).
- Le combustible est enfermé dans 151 km de crayons de 1 cm de diamètre en zircaloy, un alliage de zirconium (157 assemblages de 264 crayons de 3,66 m)³¹.
- Rapport de modération ~ 3 (rapport entre le volume des crayons et le volume d'eau (modérateur de neutrons)³².
- Le flux de neutrons est d'environ $10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Le combustible tient trois ans avant de devenir trop empoisonné par les produits de fission (qui absorbent les neutrons); pour le produire, cela nécessite 156 t d'uranium naturel (contenant 1,1 t de ^{235}U).

On pilote³³ un réacteur avec des barres de contrôle qui absorbent les neutrons (alliage de cadmium, indium, argent, carbure de bore). Au fil du temps le combustible s'appauvrit en matière fissile et s'enrichit en produits de fission radioactifs qui absorbent les neutrons mais ne donnent pas de fission. Au départ les barres de contrôle sont plongées dans le réacteur, puis peu à peu relevées au fur et à mesure que le combustible vieillit. Au bout d'un certain temps, le combustible n'est plus assez riche pour faire diverger (c'est-à-dire amorcer la réaction en

31. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Réacteur_à_eau_pressurisée

32. UO_2 a une masse volumique de $11\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, le cœur a donc un volume de 6 m^3 , le volume d'eau est donc de 18 m^3 , soit 24 m^3 en tout, ce qui fait un rayon de 1,8 m!

33. La réalité est évidemment plus complexe. On peut effectivement noter que quand la température augmente, la densité de l'eau baisse, donc l'efficacité de modération diminue, et le réacteur ralentit : c'est un paramètre clé pour la sûreté! Et le plus gros de l'absorption s'opère avec du bore qu'on injecte dans l'eau du circuit primaire, les barres de commande ne jouant qu'en ajustement. Le pressuriseur permet de réguler le couple pression / température.

chaîne) le réacteur. On l'arrête alors, pour décharger le combustible usagé et le remplacer par du neuf.

Sur 100 kg de combustible originel (97 kg d'uranium 238 et 3 kg d'uranium 235), il reste, après 3 ans d'utilisation :

- 1 kg d'uranium 235 (2 kg ont fissionné);
- 95 kg d'uranium 238 (2 kg se sont transformés en plutonium 239);
- 1 kg de plutonium 239 (sur les 2 kg produits, 1 kg a fissionné);
- 3 kg de produits de fission.

Environ 5 g ont été purement transformés en énergie ($E = mc^2$, soit 450 TJ!).

2.4.7 Masse critique

La **masse critique** est la masse de matériau fissile à partir de laquelle une réaction de fission s'auto-entretient; au-delà de cette masse, elle diverge (bombe). La masse critique de ^{235}U est de 48 kg, celle de ^{239}Pu est de 10 kg. Mais ce n'est pas pour autant qu'un réacteur nucléaire équivaut à 1500 bombes atomiques : pour qu'il y ait divergence et donc explosion, il faut que la masse critique soit disposée sphériquement et entourée de réflecteurs neutroniques efficaces. Un réacteur ne peut en aucun cas exploser nucléairement !

Dans un réacteur nucléaire, on contrôle la réaction en chaîne avec des barres absorbantes (de neutrons) qui sont plus ou moins insérées au cœur du réacteur. Dans une bombe, au contraire, on veut faire diverger la réaction jusqu'à l'explosion. Il faut donc au moins une masse critique de matériau fissile.

Chapitre 3

Le réchauffement climatique

BLANC Guillaume & NOÛS Camille, Le réchauffement climatique, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.ac4025>



L'objectif de cette partie est d'aborder quelques notions physiques sur le réchauffement climatique. Les grands principes physiques régissant le climat sur Terre nous amèneront à comprendre comment l'équilibre énergétique de la planète peut être perturbé et engendrer le réchauffement que l'on observe et que l'on analysera.

3.1 Comprendre le climat terrestre

3.1.1 Météo ou climat ?

La météorologie et la climatologie étudient tous deux essentiellement la dynamique des phénomènes atmosphériques (nuages, précipitations, vents, etc.). Cette dynamique est étudiée à partir de paramètres physiques observés (pression, température, humidité, vitesse du vent, etc.) en différents lieux géographiques et de leur évolution dans le temps. Cette évolution spatio-temporelle se modélise physiquement à l'aide des équations différentielles de la mécanique des fluides (l'équation de Navier-Stokes, entre autres). Ces équations ont la particularité d'être non-linéaires, et donc solvables uniquement numériquement. Quand elles servent à décrire un système complexe et dissipatif (avec des frottements, comme la viscosité) comme l'atmosphère, l'évolution du système devient très sensible aux conditions initiales : une variation très petite dans celles-ci peut engendrer des états finaux complètement différents. On dit que l'atmosphère ainsi modélisée est un *système chaotique*¹ (voir, par exemple Royer & Nicolis 1994). L'échelle de temps sur laquelle on peut faire une prédiction sur le futur d'un système dynamique chaotique est la durée de Liapounov² qui est de quelques jours pour le système atmosphérique. Cet « horizon prédictif » explique pourquoi il n'est pas possible de prévoir le temps qu'il va faire en un lieu donné au-delà de quelques jours³.

La météorologie s'intéresse ainsi à une trajectoire dans l'espace des paramètres de l'atmosphère (une seule « réalisation » !), ainsi qu'à l'interaction entre ces paramètres pendant les événements observés. L'échelle de temps est typiquement celle de la durée de Liapounov.

1. Si Thompson avait noté en 1957 la difficulté de faire des prévisions avec l'atmosphère à cause de sa sensibilité aux conditions initiales (Thompson 1957), Lorenz a montré en 1963 qu'un système d'équations physiques (liées à la convection) pouvait devenir chaotique (Lorenz 1963). Ce qui a effectivement été démontré plus tard. Ce n'est que dans les années 1990 que l'on a montré que les équations gouvernant la dynamique de l'atmosphère avaient un comportement chaotique (voir par exemple Lions *et al.* 1997).

2. Dont l'inverse est l'*exposant de Liapounov*, défini comme le taux d'éloignement de deux trajectoires aux conditions initiales très proches.

3. Néanmoins les progrès des ordinateurs et de la compréhension des phénomènes météorologiques permettent de faire des calculs de plus en plus compliqués, et surtout avec une résolution de plus en plus fine. Ainsi la durée de prédiction des prévisions météorologiques est passée de 3 jours dans les années 1990 (avec une fiabilité de 80 %), à 7 jours aujourd'hui (Pegion 2020). Des recherches sont poursuivies pour ouvrir cet horizon à l'échelle du mois avec des méthodes combinant les modèles météorologiques et climatiques.

La climatologie, quant à elle, s'intéresse à l'ensemble des trajectoires possibles dans l'espace des paramètres, d'une manière statistique (processus aléatoire), et ce sur des échelles de temps bien plus grandes (mois, saisons, années, décennies, siècles, millénaires, etc.).

On peut résumer de manière un peu lapidaire ce qui précède par deux différences fondamentales entre météorologie et climatologie, à savoir, d'une part l'échelle spatio-temporelle (jours / décennies, local / global), d'autre part le caractère probabiliste (un seul tirage) pour les prévisions météo contre le caractère statistique (beaucoup de tirages) de la climatologie.

Donc, ce n'est pas parce qu'un été a été pluvieux en France qu'il en est de même à l'échelle de la planète; ce n'est pas parce qu'un été a été glacial en France que le réchauffement climatique a plié bagages...

La météo (temps au quotidien en un lieu donné) est capable d'absorber des variations jusqu'à 10–20 °C d'un jour à l'autre pour un lieu donné. Pour le climat, une variation de 0,1 °C (à l'échelle de la planète) est déjà énorme⁴ !

3.1.2 La modélisation numérique du climat

La compréhension des phénomènes atmosphériques, sur le long terme (climat) ou sur le court terme (météo), repose principalement sur des principes physiques, comme les équations de la dynamique des fluides, sur celles des transferts radiatifs, sur la thermodynamique. Mais aussi sur la chimie de l'atmosphère, des océans, sur l'évolution biologique de la biosphère, etc. Nous nous concentrerons dans cet ouvrage sur la partie physique.

Le système océan-atmosphère étant composé de fluides différents (gaz, liquides), de compositions variables en fonction de l'endroit où l'on regarde et de l'instant que l'on considère, qui interagissent entre eux et avec la biosphère, le relief, etc., qui sont animés différemment selon l'échelle spatiale que l'on considère, une telle modélisation est nécessairement très complexe.

Les sciences du climat, comme les sciences de la Terre de manière assez générale (et contrairement à la plupart des autres sciences physiques comme la physique nucléaire, qui peuvent faire l'objet d'expériences dans lesquelles on peut faire varier certains paramètres), et les sciences de l'Univers, sont des sciences observationnelles : il n'est – généralement – pas possible de faire une expérience en laboratoire avec un nombre réduit de paramètres pour en déduire l'impact de chacun d'eux. On ne peut, par exemple, pas comparer une Terre avec un peu plus de CO₂ et une Terre avec une atmosphère telle qu'elle était au début du XX^e siècle ! Il faut donc en déduire les grandes lois qui régissent un tel système en l'observant, en le modélisant, en faisant des prédictions, qui permettront, par comparaison avec les observations d'affiner le modèle, pour éventuellement le valider avec une précision raisonnable.

Modèle climatique : comment et pourquoi ?

Un modèle est une représentation simplifiée des phénomènes physiques dans le but de répondre à des objectifs donnés (comprendre, prévoir...); les principales étapes de la construction d'un modèle numérique sont :

1. le choix des objets et des phénomènes à prendre en compte ;
2. faire les approximations physiques adéquates et/ou nécessaires ;
3. formuler le problème mathématiquement ;
4. le discrétiser pour le résoudre numériquement ;
5. réaliser la programmation informatique pour ce faire.

4. Pour mémoire, lors de la dernière glaciation, la température moyenne à la surface de la planète était de 5 à 6 °C inférieure à la température actuelle; la surface des océans était 130 m plus basse.

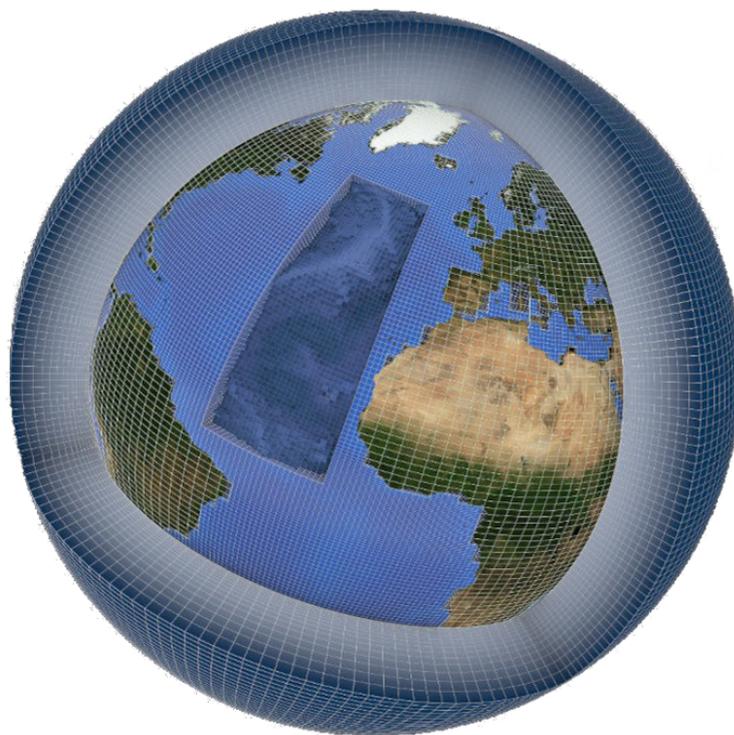


FIGURE 3.1 – Maillage à trois dimensions de l’atmosphère terrestre : l’atmosphère et l’océan sont divisés en cellules virtuelles au sein desquelles sont effectués les calculs. © CEA/CNRS/Météo-France 2019 – réalisation Animea Studio.

On effectue ensuite une réalisation du problème (c’est-à-dire une simulation) à partir d’un état initial avec des conditions aux limites (que se passe-t-il à la frontière du domaine – de la grille – ainsi exploré ?). L’analyse statistique de nombreuses réalisations (par exemple, la simulation de l’évolution du climat de 1850 à 2100 sous l’effet d’un accroissement des gaz à effet de serre)⁵ permet d’augmenter la confiance dans le résultat de la simulation.

L’atmosphère terrestre est désormais simulée dans les trois dimensions de l’espace. La figure 3.1 montre un exemple de cette discrétisation de l’atmosphère terrestre : les calculs sont effectués dans chaque petite « boîte » pour chaque pas de temps, avec les conditions aux limites correspondant aux mailles adjacentes. Ils sont ensuite propagés dans les mailles « suivantes ». Plus les boîtes sont petites (donc plus la résolution est grande), plus les résultats seront précis (mais cela n’augure pas de leur exactitude ! Voir figure 1.6), mais plus les calculs seront longs et les besoins de mémoire importants. Une simulation informatique est donc un compromis entre cette précision et le temps de calcul.

3.1.3 La machine climatique

La partie visible du climat se joue dans l’atmosphère, mais c’est un peu comme la partie émergée de l’iceberg. De fait, l’océan, fortement couplé à l’atmosphère, joue un rôle prépondérant, même si celui-ci est moins « visible ».

La source d’énergie de la « machine climatique » est le rayonnement électromagnétique provenant du Soleil.

5. Tiré de Jean-Louis Dufresne, *Bilan énergétique de la Terre et rôle de l’effet de serre*, 2009, diapositives. http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/IUFM_Creteil/Dufresne_bil_serre_terre.pdf

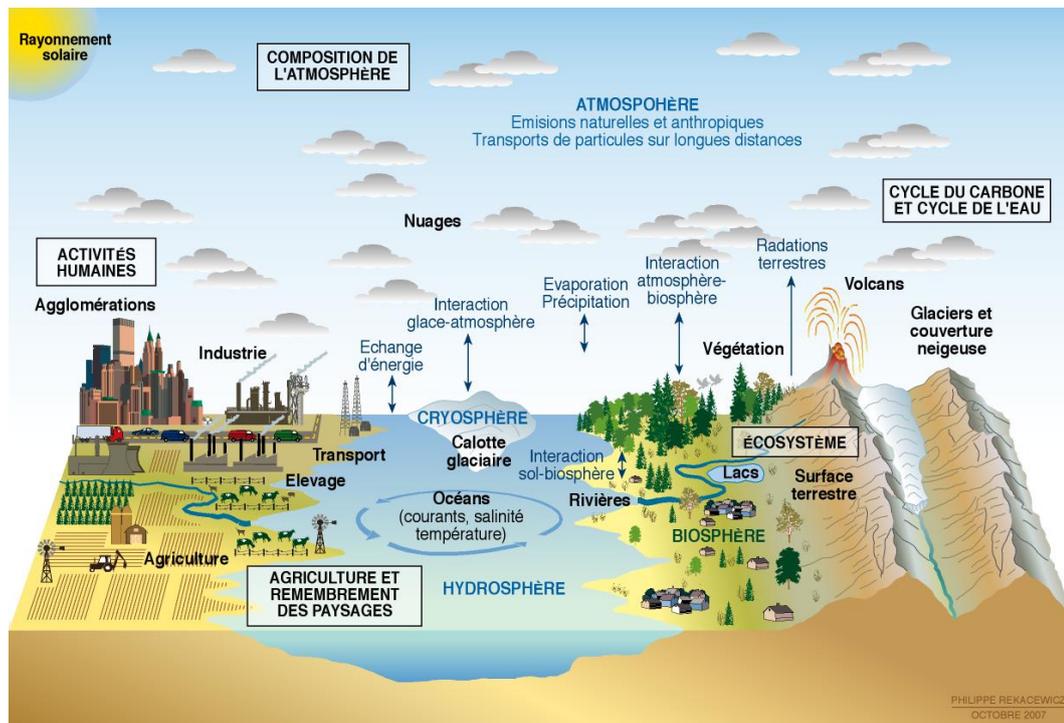


FIGURE 3.2 – Schéma illustrant les différents acteurs du climat, qui ne se limitent pas à l'atmosphère. © Philippe Rekacewicz (cartographie, conception et réalisation), <https://visionscarto.net>, 2007.

À cela s'ajoutent de nombreux autres acteurs (voir figure 3.2) :

- la biosphère ;
- les activités humaines ;
- la cryosphère (les glaces) ;
- différentes molécules (gaz à effet de serre, etc.) ;
- etc.

Le tout étant interconnecté ! Nous nous limiterons ici à exposer quelques notions concernant la physique de l'atmosphère (et, dans une moindre mesure, des océans), afin d'avoir une compréhension succincte du climat et du réchauffement climatique.

3.1.4 L'atmosphère terrestre

L'atmosphère se concentre sur quelques kilomètres d'épaisseur (90 % de sa masse est dans les 16 premiers kilomètres), ce qui paraît dérisoire par rapport à la taille de la Terre, dont le rayon est de 6371 km (figure 3.3).

La figure 3.4 montre les différentes couches de l'atmosphère. Les phénomènes météorologiques et le climat concernent pour l'essentiel la plus basse couche, la troposphère qui s'étend jusqu'à 8 à 15 km d'altitude en moyenne selon la latitude et la saison. La température y décroît en moyenne de 6,4 °C tous les 1000 m d'altitude. La pression de 1013 hPa en moyenne au niveau de la mer diminue jusqu'à environ 200 hPa à 10 km d'altitude.

Au-delà se trouve la stratosphère qui s'étend jusqu'à environ 50 km d'altitude (soit, en termes de pression, d'environ 200 hPa jusqu'à environ 1 hPa). La température est constante dans la basse stratosphère puis augmente. La limite entre la troposphère et la stratosphère est la tropopause.

La troposphère est le siège de mouvements convectifs, tandis que la stratosphère est stable dynamiquement (stratification verticale). La partie haute contient la couche d'ozone qui nous protège du rayonnement ultraviolet du Soleil.



FIGURE 3.3 – Vue de l’atmosphère terrestre depuis l’espace : une fine couche d’air concentrée dans 16 km d’épaisseur (pour les 90 % de sa masse). CC0.

Gaz	Fraction du volume
<i>Abondance constante</i>	
Azote (N ₂)	78,08 %
Oxygène (O ₂)	20,95 %
Argon (Ar)	0,93 %
Néon (Ne)	0,0018 %
Hélium (He)	0,0005 %
Krypton (Kr)	0,00011 %
Xénon (Xe)	0,000009 %
<i>Abondance variable</i>	
Vapeur d’eau (H ₂ O)	4,0 % (maximum aux tropiques) 0,00001 % (minimum au pôle Sud)
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,04 % (augmente de ~ 0,5 % par an)
Méthane (CH ₄)	~ 0,00018 % (augmente)
Hydrogène (H ₂)	~ 0,00006 %
Protoxyde d’azote (N ₂ O)	~ 0,00003 %
Monoxyde de carbone (CO)	0,000009 %
Ozone (O ₃)	~ 0,000001 % - 0,0004 %

TABLE 3.1 – Composition de l’atmosphère. L’abondance (ou fraction molaire) est le nombre de molécules du gaz considéré par rapport au nombre de molécules d’air dans un certain volume.

L’atmosphère est essentiellement composée de diazote à 78 % et de dioxygène à 21 % (en nombre). Dans le pourcent restant, on trouve essentiellement des gaz rares (argon, néon, hélium, krypton, xénon), des gaz à effet de serre (vapeur d’eau, dioxyde de carbone, méthane, etc.), comme indiqué dans le tableau 3.1.

La masse totale⁶ de l’atmosphère est d’environ $5,14 \cdot 10^{18}$ kg. La masse moyenne de vapeur d’eau qu’elle contient est d’environ $1,3 \cdot 10^{16}$ kg soit 0,001 % de la masse totale d’eau sur Terre.

6. La force F exercée par toute l’atmosphère sur la surface de la Terre est :

$$F = P \times S$$

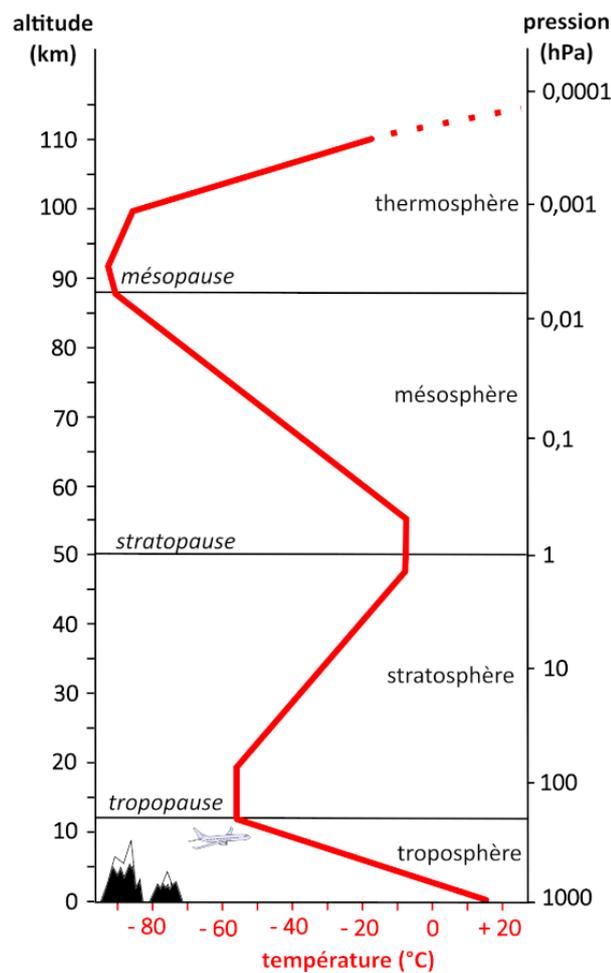


FIGURE 3.4 – Profil vertical schématisé de la température dans les différentes couches de l’atmosphère, en fonction de l’altitude et de la pression, pour les latitudes moyennes. Adapté de *Couches de l’atmosphère*, asaphon, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Couches_de_l'atmosphere.png. CC BY-SA.

La masse volumique de l’air est de $1,292 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à $T = 273,15 \text{ K}$ et $P = 1013,25 \text{ hPa}$.

La pression de l’air à la surface de la planète (1013 hPa) est à peu près équivalente au poids d’une colonne d’air de masse 1 kg sur une surface de 1 cm^2 . Ce qui équivaut à une colonne d’eau de 10 m de hauteur. L’eau contenue dans l’atmosphère « pèse » seulement 2 g sur cette surface (soit une hauteur d’eau de 2 cm). L’eau contenue dans un nuage correspond à une hauteur de 1 mm sur cette surface (soit environ 0,1 g !).

La vapeur d’eau, contrairement aux autres gaz du mélange atmosphérique, présente une concentration très variable dans le temps et dans l’espace. Les météorologues la traitent de manière spécifique : il y a l’atmosphère *sèche* d’un côté, et la vapeur d’eau de l’autre.

où P est la pression atmosphérique (10^5 Pa) et S la surface de la Terre. On a également :

$$F = m \times g$$

où m est la masse de l’atmosphère et g ($9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) est l’accélération de la pesanteur. Ce qui donne :

$$m = \frac{PS}{g}$$

soit :

$$m = \frac{101300 \times 4\pi \times (6371 \cdot 10^3)^2}{9,8} \approx 5,27 \cdot 10^{18} \text{ kg}$$

3.1.5 Les océans

Les mers et océans représentent une surface d'environ $361 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ soit 70,8 % de la surface terrestre. Leur volume est d'environ $1,37 \cdot 10^9 \text{ km}^3$, et leur profondeur moyenne est de 3700 à 3800 m. Ils contiennent 96 % de la masse d'eau sur Terre (sous forme liquide). La masse volumique de l'eau de mer est d'environ $1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ en surface; la masse totale des eaux océaniques est d'environ $1,4 \cdot 10^{21} \text{ kg}$, soit 0,023 % de la masse totale de la Terre !

Le thermostat de la Terre

La quantité d'énergie (sous forme de chaleur) δQ nécessaire pour élever la température T d'un matériau donné de dT est donnée par :

$$\delta Q = C_p dT = mc_p dT \quad (3.1)$$

où m est la masse du matériau en question, C_p est sa capacité calorifique (ou capacité thermique, elle s'exprime en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), c'est-à-dire sa capacité à élever sa température de dT avec l'apport de chaleur δQ ; c_p est la capacité calorifique massique (en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).

La capacité calorifique massique de l'eau est : $c_p^{\text{eau}} \simeq 4180 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Tandis que pour l'air elle est de : $c_p^{\text{air}} \simeq 1000 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Il faut donc 4 fois plus d'énergie pour élever la température de 1 K de 1 kg d'eau de mer que pour 1 kg d'air. La quantité d'énergie thermique nécessaire pour élever la température de toute l'atmosphère de 1 K est donc la même que celle nécessaire pour élever la température de 1 K des 2,5 m superficiels de l'océan.

Les océans ont une masse d'eau importante, eau qui possède une capacité calorifique élevée, ce qui leur confère une grande inertie thermique⁷. La température de l'océan varie très peu : la température de la couche superficielle de 300 m a seulement augmenté de 0,3 °C depuis 1950, contre 0,6 °C à la surface.

Échelles de temps

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère correspond à une couche d'eau liquide qui ferait 24 mm d'épaisseur si elle était uniformément répartie à la surface de la Terre ! Le taux

7. L'inertie thermique d'un matériau caractérise le temps mis par un matériau à atteindre l'équilibre thermique suite à une perturbation de cet équilibre. On quantifie cette inertie par la diffusivité thermique D du matériau :

$$D = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

et par son effusivité thermique E :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c_p}$$

où λ est la conductivité thermique du matériau (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ est la masse volumique (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et c_p est la capacité calorifique massique (en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$). Ainsi pour l'eau et l'air, on a les valeurs données par le tableau suivant :

	Air	Eau
λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,0262	0,6
ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1,292	1025
c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1000	4180
E ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$)	33,85	$25,7 \cdot 10^5$
D ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$

La diffusivité de l'eau est un facteur 145 plus faible que celle de l'air, son effusivité 76 000 fois plus élevée. La diffusivité quantifie la vitesse de diffusion de la chaleur dans un matériau : plus la diffusivité est faible, plus le matériau va mettre de temps à atteindre l'équilibre thermique. L'effusivité quantifie la vitesse avec laquelle un matériau absorbe la chaleur : plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe de la chaleur sans élever notablement sa température. Par rapport à l'air, l'eau océanique diffuse beaucoup plus lentement la chaleur, qu'elle va par ailleurs absorber sans vraiment se réchauffer. D'où l'importante inertie thermique des océans.

d'évaporation à la surface des océans est de $502\,800\text{ km}^3$ par an, ce qui équivaut à une couche d'eau de 1 m à la surface de la Terre, soit environ un taux de 2,7 mm par jour. On en déduit que le temps moyen de résidence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est de $24/2,7 \sim 9$ jours. Ce que l'on peut comparer avec le temps de résidence des eaux dans les différentes couches des océans :

- quelques jours en surface ;
- quelques siècles en profondeur.

L'océan se trouve ainsi être le principal régulateur du climat mondial, avec de surcroît des échanges radiatifs, mécaniques, gazeux et d'eau continuels avec l'atmosphère. Il absorbe, stocke et transporte dans son mouvement l'énergie thermique du Soleil en affectant la température et la circulation de l'atmosphère.

3.1.6 La source d'énergie : le Soleil

La puissance reçue

La Terre reçoit son énergie essentiellement du Soleil (une fraction négligeable – 0,01 % – provenant du centre de la Terre due à la radioactivité de l'uranium, du thorium et du potassium, voir l'annexe D). Une fraction de l'énergie incidente par unité de temps (puissance incidente) P_i est absorbée (P_a) et sert à chauffer la surface (au sens large, comprenant l'atmosphère et l'hydrosphère : l'eau sur Terre et celle des océans, qu'elle soit liquide ou solide) de la Terre, qui va ainsi rayonner dans l'espace une énergie (perdue) par unité de temps ou puissance P_p due à sa température.

Si on suppose qu'elle est à l'équilibre thermique (c'est-à-dire que sa température est constante dans le temps), alors la puissance absorbée par la surface terrestre est égale à la puissance perdue :

$$P_a = P_p \quad (3.2)$$

La constante solaire (qui n'est en fait pas tout à fait constante⁸, voir Fröhlich 2006) est la quantité d'énergie solaire reçue à une unité astronomique (ua)⁹ du Soleil, pendant l'unité de temps (1 s), sur une surface de 1 m^2 perpendiculairement aux rayons du Soleil (c'est donc une densité de puissance surfacique).

La puissance absorbée

Le rayonnement du Soleil varie dans le temps¹⁰ (il augmente sur des échelles de 10^8 à 10^9 ans) et il est modulé par le cycle solaire de 11 ans (Fröhlich 2006). La constante solaire *moyenne* vaut : $I_0 = 1365,4 \pm 1,3\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (mesure faite depuis l'espace).

La puissance solaire incidente reçue par la Terre est donc égale à :

$$P_i = \pi R^2 I_0 \quad (3.3)$$

où R est le rayon de la Terre (voir figure 3.5).

Toute cette puissance n'est pas absorbée, une partie est directement réfléchiée vers l'espace (réflexion par les nuages, les océans, les zones de végétation, etc.). On définit l'*albédo* α d'une surface :

$$\alpha = \frac{\text{énergie ou puissance réfléchiée}}{\text{énergie ou puissance incidente}} \quad (3.4)$$

8. La variation de l'*irradiance* – puissance rayonnée par unité de surface – solaire varie faiblement, de l'ordre de 0,1 % aux échelles de temps en jeu ici, sur une période de l'ordre de 11 ans. Cette période correspond au cycle solaire lié à l'activité convective et magnétique des couches externes du Soleil.

9. L'unité astronomique est une unité de distance qui vaut exactement $149\,597\,870\,700\text{ km}$, ce qui correspond à peu près à la distance moyenne de la Terre au Soleil.

10. Il varie également sur une année, car la Terre n'est pas sur une orbite circulaire, mais elliptique : sa distance au Soleil varie.

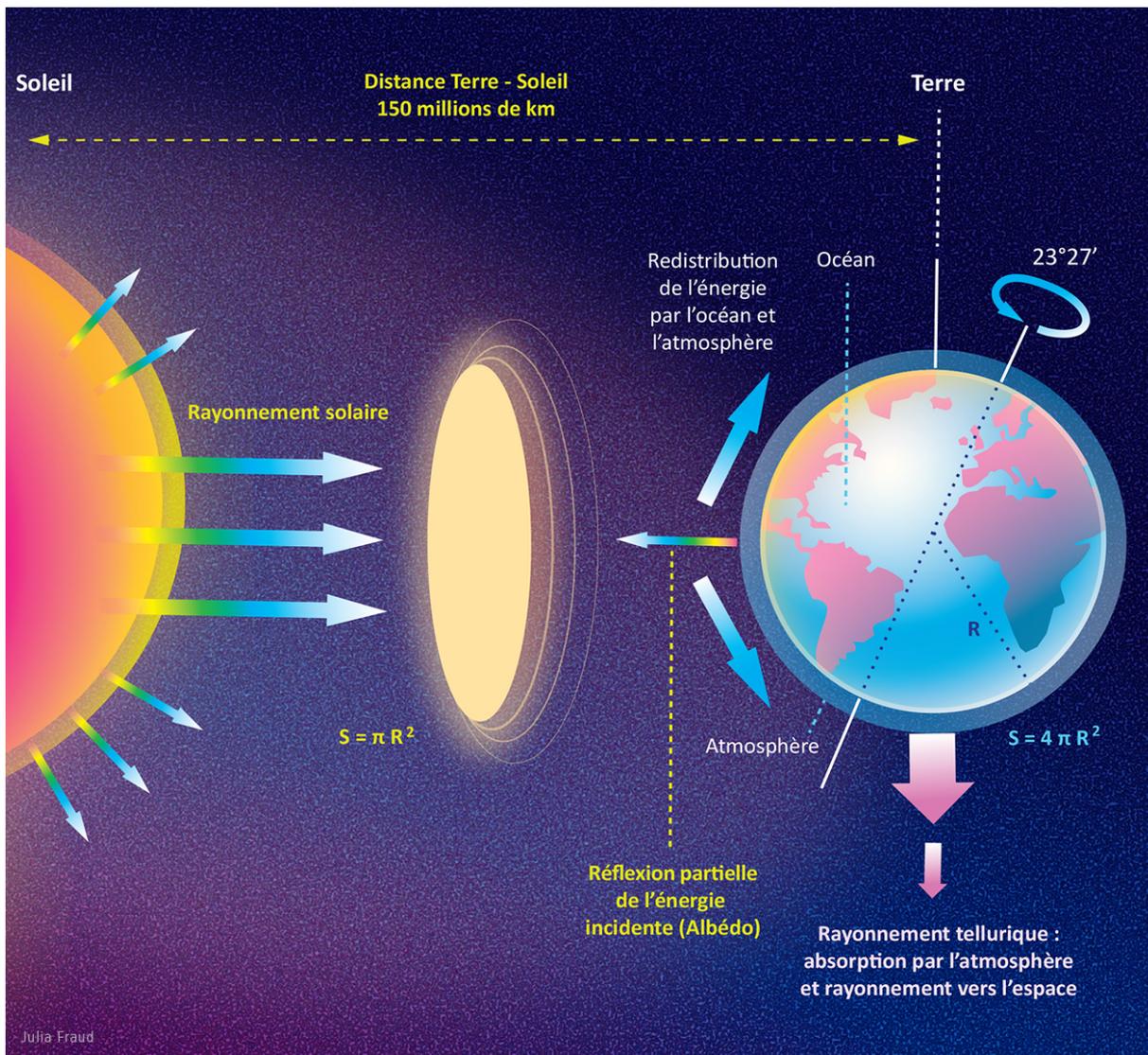


FIGURE 3.5 – Illustration du rayonnement électromagnétique solaire intercepté par la Terre. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

α est donc un nombre sans dimension compris entre 0 et 1. On a ainsi :

- $\alpha = 1$ pour une surface parfaitement réfléchissante (miroir parfait);
- $\alpha = 0$ pour une surface parfaitement absorbante (corps noir).

L'albédo moyen¹¹ de la Terre (mesuré depuis l'espace) est environ : $\alpha_T = 0,3$ (voir figure 3.6) :

$$\alpha_T = \frac{P_i - P_a}{P_i} \quad (3.5)$$

La puissance absorbée par la Terre est donc :

$$P_a = (1 - \alpha_T)P_i = (1 - \alpha_T)\pi R^2 I_0 \quad (3.6)$$

Une distribution géographique inégale

L'énergie solaire incidente n'est pas répartie de manière homogène sur toute la planète, principalement à cause de la sphéricité de la Terre, avec donc plus d'énergie reçue au niveau

11. À noter que l'albédo moyen de la Terre diminue significativement au cours du temps (Goode *et al.* 2021).

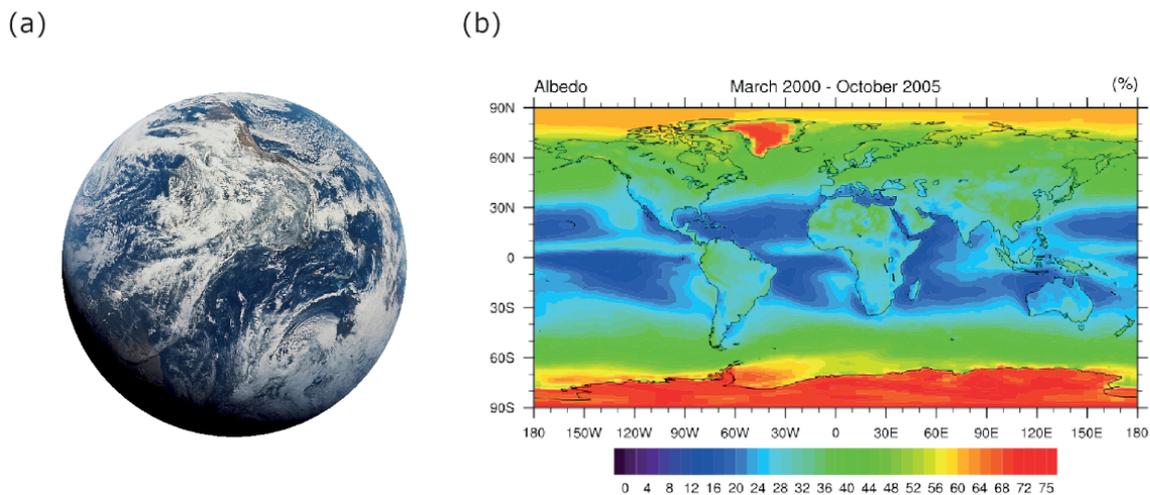


FIGURE 3.6 – L'albédo de la Terre. (a) La Terre vue de l'espace : une planète relativement « brillante » ! CC0. (b) Cartographie de l'albédo moyen (sur une période de 5 ans) à la surface de la Terre : les cultures ont un albédo de 0,15 à 0,25; les forêts de 0,05 à 0,25; les mers de 0,05 à 0,15; la neige de 0,4 à 0,9 et les nuages de 0,3 à $\geq 0,8$. Consécutivement, l'albédo moyen de la Terre est d'environ 0,3. Source : <https://sandrolubis.wordpress.com/2012/04/29/mean-annual-of-global-outgoing-terrestrial-radiation-from-toa-clear-sky/>. © Sandro Lubis.

des tropiques qu'au niveau des pôles (figure 3.7). La constante solaire (environ $1365 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) correspond à une incidence normale, donc sur un disque de surface πR^2 . En considérant que la surface de la Terre vaut $4\pi R^2$, la puissance solaire se répartit ainsi, en moyenne sur une rotation de la Terre et en moyenne sur toute sa surface, selon le rapport $\frac{\pi R^2}{4\pi R^2} = \frac{1}{4}$. Soit $\frac{1365}{4} \approx 341 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, ce qui correspond (à peu près) à la valeur du rayonnement incident à la figure 3.13.

L'inégale répartition géographique du rayonnement incident induit un déséquilibre énergétique qui provoque des mouvements atmosphériques et océaniques. Ces mouvements atmosphériques (circulation méridienne organisée en « cellules ») et océaniques (circulation de surface due à la rotation de la Terre, et circulation profonde due, entre autres, aux différences de densité des masses d'eau liées à leurs température et salinité) redistribuent ainsi l'énergie depuis les régions de basse latitude jusqu'aux hautes latitudes. Les flux énergétiques de l'équateur vers les pôles sont du même ordre de grandeur entre l'atmosphère et l'océan, à savoir de $5 \cdot 10^{15} \text{ W}$ à $6 \cdot 10^{15} \text{ W}$.

3.1.7 Les lois du rayonnement

Pour comprendre l'effet de serre, il faut comprendre le bilan radiatif de la Terre. Nous allons donc construire un petit modèle radiatif. Avant cela, nous allons voir quelques notions indispensables sur le rayonnement électromagnétique.

Le transfert de la chaleur d'un milieu chaud vers un milieu froid peut se faire selon trois processus physiques distincts :

- La **conduction**, dans un milieu matériel, sans transfert de matière (propagation de l'énergie cinétique d'agitation thermique des atomes ou molécules).
- La **convection**, dans un milieu matériel, avec transfert de matière dans un champ gravitationnel (force d'Archimède) – essentiellement dans les liquides et les gaz.

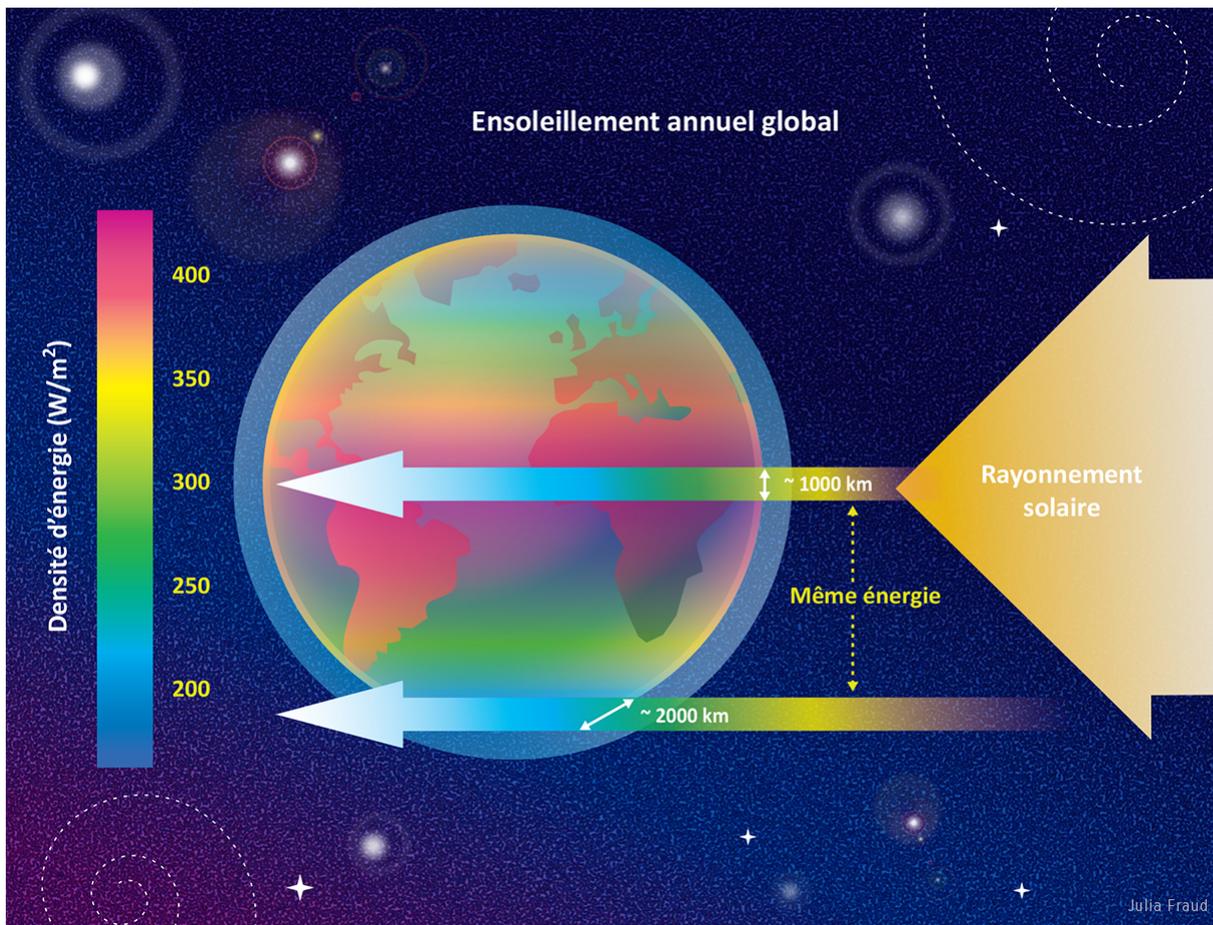


FIGURE 3.7 – Différence de rayonnement solaire incident, au sommet de l’atmosphère, maximum aux tropiques, minimum au niveau des pôles. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

→ Le **rayonnement**, émission de photons par tous les corps ayant une température non nulle, pourvu que le milieu environnant leur soit transparent (donc y compris dans le vide).

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique en fonction de leur température. La physique modélise cela avec le concept de corps noir. Un **corps noir** est un corps qui absorbe, sans la réfléchir ni la diffuser, toute l’énergie électromagnétique qu’il reçoit ; c’est un « objet » idéal dont le spectre d’émission électromagnétique ne dépend que de sa température.

Un tel « corps noir » reçoit donc de l’énergie. Quand il se trouve à l’équilibre avec son milieu environnant, il perd forcément de l’énergie. Si ce n’était pas le cas, sa température augmenterait indéfiniment. . . Ce qui est irréaliste ! Un corps noir réémet donc l’énergie qu’il a absorbé sous forme de rayonnements électromagnétiques. L’énergie ainsi réémise dépend de sa température.

Le modèle du corps noir est basé sur les lois de la mécanique quantique (nécessité de quantifier l’énergie des photons pour expliquer les observations) et de la mécanique statistique (les photons forment un gaz de bosons).

Loi de Stefan-Boltzmann

La densité surfacique de puissance $\frac{dP}{dS}$ émise par un corps noir est donnée par :

$$\frac{dP}{dS} = \sigma T^4 \quad (3.7)$$

où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan, et T est la température (en kelvin : K).

Loi de Wien

La longueur d'onde (λ_m) au maximum d'émission du spectre du corps noir est donnée par :

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (3.8)$$

Ainsi le soleil ($T = 5778 \text{ K}$) a son maximum d'émission à $0,5 \mu\text{m}$ soit la longueur d'onde du rayonnement visible auquel nos yeux sont sensibles.

Un être humain ($T = 37 \text{ }^\circ\text{C}$) a son maximum d'émission à $9,3 \mu\text{m}$ (infrarouge thermique).

Loi de Planck

Le spectre du rayonnement électromagnétique émis par un corps noir est donné par :

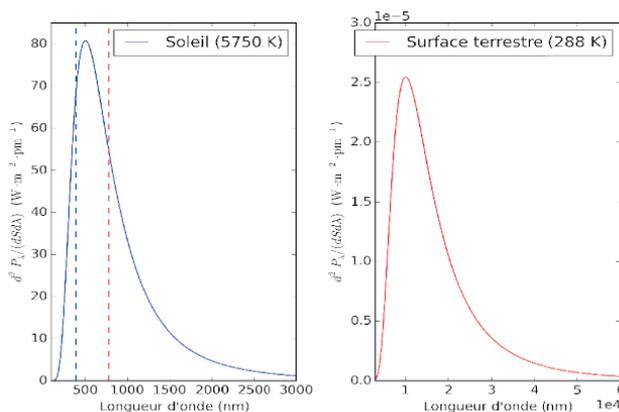
$$\frac{d^2 P}{dS d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (3.9)$$

(unité : $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$) avec :

- h la constante de Planck, $h = 6,62617 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
- c la vitesse de la lumière, $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- k la constante de Boltzmann, $k = 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$;
- λ la longueur d'onde (en m);
- T la température (en K).

Le modèle du spectre du corps noir ne dépend ainsi que de la température. Il est représenté à la figure 3.8 pour la température du Soleil (5750 K) et celle de la surface terrestre (288 K). La surface sous la courbe 3.8 représente la puissance totale émise par unité de surface (donnée par ailleurs par la loi de Stefan-Boltzmann qui n'est autre que l'intégrale sur toutes les longueurs d'onde de la loi de Planck). On retrouve également la longueur d'onde d'émission maximale donnée par la loi de Wien.

(a)



(b)

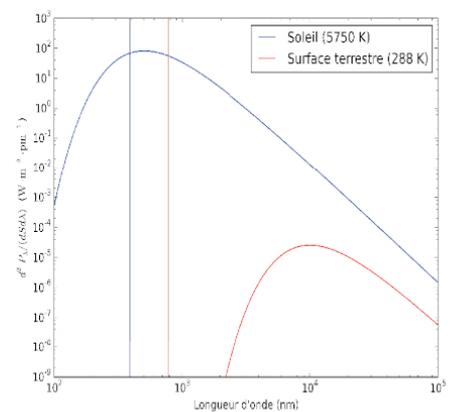


FIGURE 3.8 – Spectres de corps noirs en fonction de la longueur d'onde en nm. Sur les deux figures, les limites de l'intervalle correspondant à la lumière visible sont indiquées par deux traits verticaux bleu et rouge. (a) Spectre (densité surfacique de puissance par unité de longueur d'onde) de corps noir pour un corps à la température du Soleil (5750 K) à gauche et pour un corps à la température moyenne de la surface terrestre (288 K) à droite, en fonction de la longueur d'onde (en nm). (b) Spectre de corps noir pour la température du Soleil (5750 K) et de la surface terrestre (288 K), en échelle logarithmique, en fonction de la longueur d'onde en nm.

Corps réel

Les corps réels ne se comportent pas comme des corps noirs, qui sont des corps idéaux. On peut souvent modéliser l'émission spectrale d'un corps réel en *corrigeant* le spectre du corps noir par un coefficient sans dimension, l'émissivité $\varepsilon(\lambda, T)$. L'approximation du *corps gris* suppose que ε soit une constante pour un matériau donné. La loi de Stefan-Boltzmann s'écrit alors :

$$\frac{dP}{dS} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.10)$$

Par ailleurs pour un corps à l'équilibre thermique, l'émissivité est égale à l'absorptivité ou coefficient d'absorption. C'est la loi du rayonnement de Kirchhoff.

3.2 L'effet de serre

Pour comprendre l'effet de serre, construisons un petit modèle radiatif de la Terre. Cette section s'appuie sur Courtier (2010) et Burde (2004).

3.2.1 Un modèle radiatif sans atmosphère

Dans un premier temps, on suppose que la Terre n'a pas d'atmosphère.

On suppose que la puissance reçue par la Terre du Soleil se répartit rapidement uniformément à la surface de la Terre.

On suppose que la température moyenne à la surface de la Terre est constante.

La Terre rayonne donc vers l'espace comme un corps noir (quasi-parfait), elle perd ainsi une puissance :

$$P_p = 4\pi R^2 \varepsilon_{\text{surf}} \sigma T^4 \quad (3.11)$$

où R est le rayon de la Terre, $\varepsilon_{\text{surf}}$ est l'émissivité de la surface de la Terre, σ est la constante de Stefan et T est la température à la surface de la Terre.

Établissons le bilan énergétique de la Terre avec ces hypothèses. La différence entre la puissance absorbée P_a (apport) et la puissance perdue P_p (perte) sert donc à réchauffer la Terre (accumulation) :

$$\text{Apport} - \text{Perte} = \text{Accumulation} \quad (3.12)$$

L'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un corps de 1 K dépend de la nature de ce corps, de sa masse, de son volume... Il s'agit de la *capacité thermique* C_T (unité : $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$).

L'énergie nécessaire pour faire passer la température d'un corps de capacité thermique C_T de T à $T + dT$ est donc $C_T dT$. La puissance associée est : $C_T \frac{dT}{dt}$.

Si C_{Terre} est la capacité thermique de la Terre, on a :

$$P_a - P_p = C_{\text{Terre}} \frac{dT}{dt} \quad (3.13)$$

Soit, compte tenu des équations (3.6) et (3.11) :

$$(1 - \alpha_T) \pi R^2 I_0 - 4\pi R^2 \varepsilon_{\text{surf}} \sigma T^4 = C_{\text{Terre}} \frac{dT}{dt} \quad (3.14)$$

En supposant que la Terre est en équilibre thermique, à la température T_{eq} , on a $\frac{dT}{dt} = 0$, donc :

$$(1 - \alpha_T) \pi R^2 I_0 - 4\pi R^2 \varepsilon_{\text{surf}} \sigma T_{\text{eq}}^4 = 0 \quad (3.15)$$

Les différents flux énergétiques sont schématisés à la figure 3.9.

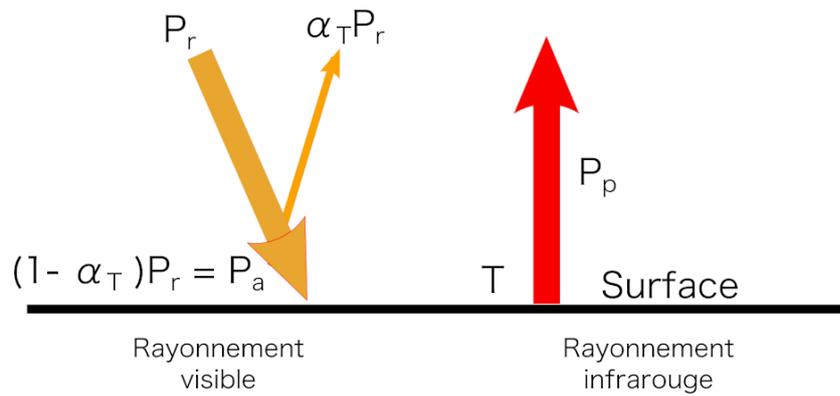


FIGURE 3.9 – Représentation schématique des différents flux d'énergie (ou de puissance) pour le modèle sans atmosphère. P_r est la puissance reçue du Soleil (voir équation 3.3), P_a est la puissance absorbée par la Terre (voir équation 3.6), P_p est la puissance perdue par la Terre par rayonnement (voir équation 3.11).

On en déduit la température à la surface de la Terre $T_{\text{éq}}$ (supposée uniforme et constante) :

$$T_{\text{éq}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T) I_0}{4 \varepsilon_{\text{surf}} \sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.16)$$

Avec un albédo $\alpha_T = 0,3$, une émissivité de la surface terrestre¹² de $\varepsilon_{\text{surf}} = 0,95$ et une constante solaire $I_0 = 1365,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, on obtient : $T_{\text{éq}} = 258 \text{ K} = -15 \text{ °C}$. La Terre est donc un bon congélateur !

Quelques remarques sur ce résultat :

- Si on prend $I_0 = 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (valeur admise aujourd'hui, voir Kopp & Lean 2011), la température $T_{\text{éq}}$ baisse de 0,1 %...
- Si on change l'albédo de $\pm 0,012$ (ce qui correspond aux incertitudes de différentes mesures – voir Bender *et al.* 2006), la température d'équilibre varie de 1 K soit 0,4 %.
- Notre modèle pêche probablement quelque part ; est-il trop simple ?

De fait, l'hypothèse d'une Terre sans atmosphère est trop rude : sans atmosphère, il ne peut y avoir d'effet de serre !

3.2.2 Un modèle avec une couche d'atmosphère

Essayons de faire un modèle un peu plus réaliste en incluant une couche d'atmosphère. Pour garder une certaine simplicité, on la modélise comme une seule couche d'air (sans épaisseur), de température uniforme, au-dessus de la surface de la Terre.

12. La surface terrestre étant essentiellement composée d'eau, on peut assimiler son émissivité à celle de l'eau.

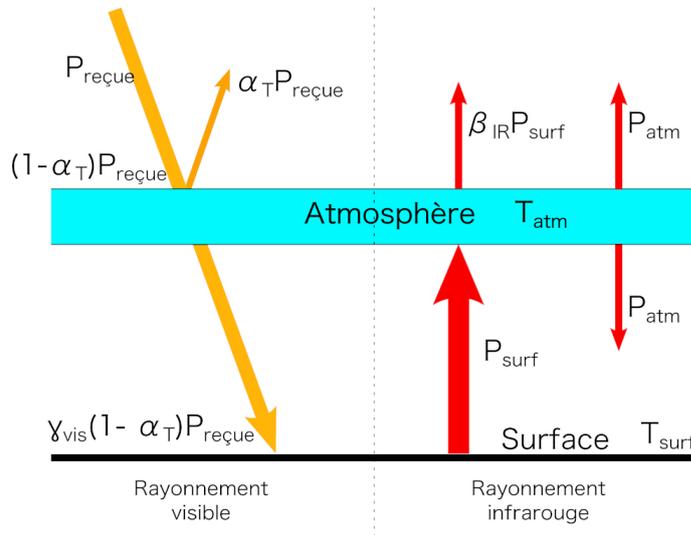


FIGURE 3.10 – Schéma des différents flux de rayonnements dans le modèle à une couche d’atmosphère. Les différents symboles sont expliqués dans le texte.

On suppose que :

- l’atmosphère est en fait partiellement *transparente* au rayonnement solaire avec un coefficient de transmission γ_{vis} ;
- l’albédo de la surface de la Terre est toujours $\alpha_T = 0,3$;
- l’atmosphère est partiellement opaque au rayonnement infrarouge, avec un coefficient de transmission β_{IR} . Donc son coefficient d’absorption, égal à son émissivité ϵ_{IR} est : $\epsilon_{\text{IR}} = 1 - \beta_{\text{IR}}$.

Les différents flux de rayonnement sont :

- la puissance solaire arrivant au sol qui vaut désormais $P_{\text{absorbée}} = \gamma_{\text{vis}}(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}}$;
- la puissance rayonnée par la surface de la Terre qui vaut toujours : $P_{\text{surf}} = 4\pi R^2 \epsilon_{\text{surf}} \sigma T_{\text{surf}}^4$, mais une partie est absorbée par la couche d’atmosphère ; la puissance transmise vers l’espace sera donc $\beta_{\text{IR}} P_{\text{surf}}$;
- l’atmosphère elle-même, qui est à une certaine température T_{atm} et va donc rayonner, à la fois vers l’espace et vers le sol, une puissance $P_{\text{atm}} = 4\pi R^2 \epsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{atm}}^4$.

Ces différents flux sont représentés schématiquement à la figure 3.10.

On peut considérer trois sous-systèmes, $\{ \text{Terre} + \text{atmosphère} \}$, $\{ \text{atmosphère} \}$ ou encore $\{ \text{surface terrestre} \}$ et écrire les équations de conservation de l’énergie à l’équilibre pour chacun d’eux.

Considérons d’abord le système $\{ \text{Terre} + \text{atmosphère} \}$ à l’équilibre thermique. L’équation de conservation de l’énergie (ou de la puissance, ici) :

$$\text{puissance reçue} = \text{puissance perdue} \quad (3.17)$$

se traduit ainsi par :

$$(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} = \beta_{\text{IR}}P_{\text{surf}} + P_{\text{atm}} \quad (3.18)$$

Puis le système $\{ \text{atmosphère} \}$ à l’équilibre thermique :

$$(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} + P_{\text{surf}} = \gamma_{\text{vis}}(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} + \beta_{\text{IR}}P_{\text{surf}} + 2P_{\text{atm}} \quad (3.19)$$

et enfin, le système $\{ \text{surface terrestre} \}$ à l’équilibre thermique :

$$\gamma_{\text{vis}}(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} + P_{\text{atm}} = P_{\text{surf}} \quad (3.20)$$

On cherche P_{surf} , qui nous donnera T_{surf} , et P_{atm} qui nous donnera T_{atm} .
En additionnant (3.18) et (3.20), on obtient :

$$\gamma_{\text{vis}}(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} + (1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} = (1 + \beta_{\text{IR}})P_{\text{surf}} \quad (3.21)$$

Soit :

$$P_{\text{surf}} = \frac{(1 + \gamma_{\text{vis}})(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}}}{(1 + \beta_{\text{IR}})} \quad (3.22)$$

Que l'on reporte dans (3.18) :

$$\begin{aligned} P_{\text{atm}} &= (1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} - \beta_{\text{IR}}P_{\text{surf}} \\ &= (1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}} - \beta_{\text{IR}} \frac{(1 + \gamma_{\text{vis}})(1 - \alpha_T)P_{\text{reçue}}}{(1 + \beta_{\text{IR}})} \\ &= \frac{(1 - \alpha_T)(1 - \beta_{\text{IR}}\gamma_{\text{vis}})}{(1 + \beta_{\text{IR}})} P_{\text{reçue}} \end{aligned}$$

Avec : $P_{\text{reçue}} = \pi R^2 I_0$, $P_{\text{atm}} = 4\pi R^2 \varepsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{atm}}^4$ et $P_{\text{surf}} = 4\pi R^2 \varepsilon_{\text{surf}} \sigma T_{\text{surf}}^4$, on obtient :

$$T_{\text{atm}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)(1 - \beta_{\text{IR}}\gamma_{\text{vis}})}{(1 + \beta_{\text{IR}})} \times \frac{I_0}{4\varepsilon_{\text{IR}}\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)(1 - \beta_{\text{IR}}\gamma_{\text{vis}})}{(1 - \beta_{\text{IR}}^2)} \times \frac{I_0}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.23)$$

avec : $\varepsilon_{\text{IR}} = 1 - \beta_{\text{IR}}$; ainsi que :

$$T_{\text{surf}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)(1 + \gamma_{\text{vis}})}{(1 + \beta_{\text{IR}})} \times \frac{I_0}{4\varepsilon_{\text{surf}}\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.24)$$

Pour calculer numériquement les valeurs de ces températures, il nous faut les valeurs des coefficients de transmission de l'atmosphère dans le visible et dans l'infrarouge. On vérifie que si la couche d'atmosphère est totalement transparente dans le visible (donc : $\gamma_{\text{vis}} = 1$) et totalement transparente dans l'infrarouge (donc : $\beta_{\text{IR}} = 1$), on retrouve l'expression de la température de surface (3.16) obtenue avec le modèle sans atmosphère (courbe verte en tirets de la figure 3.11).

Le coefficient de transmission de l'atmosphère dans l'infrarouge est $\beta_{\text{IR}} = 0,1$ en raison des nuages et de la vapeur d'eau : l'atmosphère est très opaque dans l'infrarouge, dont elle absorbe 90 % du rayonnement à cette longueur d'onde; donc $\varepsilon_{\text{IR}} = 1 - \beta_{\text{IR}} = 0,9$. Le coefficient de transmission de l'atmosphère dans le visible est $\gamma_{\text{vis}} = 0,7$ car l'atmosphère absorbe environ 30 % de la lumière solaire¹³. Et on a toujours $\varepsilon_{\text{surf}} = 0,95$.

On obtient ainsi :

$$T_{\text{atm}} = 250 \text{ K} = -23 \text{ °C}$$

$$T_{\text{surf}} = 284 \text{ K} = 11 \text{ °C}$$

La température moyenne observée à la surface du globe est de 15 °C. Notre modèle simple donne un résultat assez proche. Il est néanmoins fortuit car de nombreux processus ne sont pas pris en compte, dont certains ne sont pas radiatifs¹⁴. De plus il est basé sur une hypothèse forte : une couche mince *isotherme* d'atmosphère... Il donne néanmoins une bonne idée

13. Ces valeurs sont issues de Courtier (2010); un autre cours (Burde 2004) donne des valeurs de $\gamma_{\text{vis}} = 0,9$ et $\beta_{\text{IR}} = 0,2$, ce qui se traduit par $T_{\text{atm}} = 232 \text{ K} = -41 \text{ °C}$ et $T_{\text{surf}} = 286 \text{ K} = 13 \text{ °C}$; de fait ces valeurs de transmission doivent être entourées d'une certaine incertitude.

14. Notamment les transferts thermiques par conduction dans l'air et par convection, souvent dénotés « chaleur sensible », mais aussi la quantité de chaleur déposée dans l'atmosphère par la liquéfaction de la vapeur d'eau (chaleur latente).

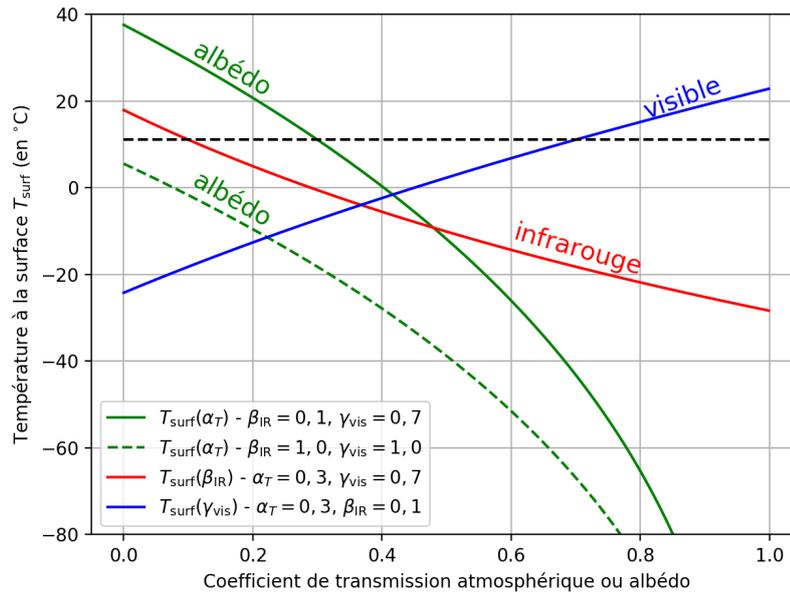


FIGURE 3.11 – Évolution de la température d'équilibre à la surface (3.24) en fonction de chacun des paramètres, albédo, coefficients de transmission dans le visible et dans l'infrarouge, à chaque fois en laissant les deux autres paramètres fixes à leur valeur nominale. La courbe en tirets verts montre l'albédo pour une atmosphère totalement transparente. Le trait pointillé horizontal donne la valeur de la température de surface obtenue pour les valeurs nominales des trois paramètres.

de ce qu'est l'*effet de serre* : la température moyenne plus grande que sans l'effet de serre dépend surtout du fait qu'il y a absorption d'une grande partie du rayonnement thermique dans l'infrarouge.

L'effet de serre est donc primordial pour maintenir une température moyenne « tempérée » à la surface de la Terre, une des conditions pour y maintenir la vie.

La figure 3.11 montre comment évolue la température de surface T_{surf} en fonction des différents paramètres : albédo, coefficients de transmission dans le visible et dans l'infrarouge. On constate que plus l'atmosphère est transparente dans le visible (γ_{vis} grand) ou opaque dans l'infrarouge thermique (β_{IR} petit), plus la température croît. L'effet de l'albédo est beaucoup plus marqué : plus il est faible (surface absorbante), plus la température d'équilibre est élevée : sans atmosphère (cas où $\beta_{\text{IR}} = 1$ et $\gamma_{\text{vis}} = 1$), pour une planète de type corps noir ($\alpha_T = 0$), la température moyenne à la surface serait d'environ 5 °C. Et inversement : si toute l'énergie incidente est réfléchiée vers l'espace, la Terre ne peut qu'être très froide ! Si $\alpha_T = 0,6$, qui est l'albédo de la glace, la température d'équilibre serait de $-26 \text{ °C} < 0$, donc la glace demeurerait stable¹⁵. La courbe d'albédo en pointillés montre le cas sans atmosphère (ou alors atmosphère totalement transparente) du modèle précédent : on retrouve la température d'équilibre de -18 °C pour $\alpha_T = 0,3$.

La figure 3.12 illustre les différents échanges d'énergie radiative entre le Soleil, l'atmosphère et la surface terrestre à l'état d'équilibre dans le cadre du modèle à une couche étudié. L'effet de serre résultant vaut alors : $369,3 - 36,9 - 202 = 130,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

15. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_boule_de_neige.

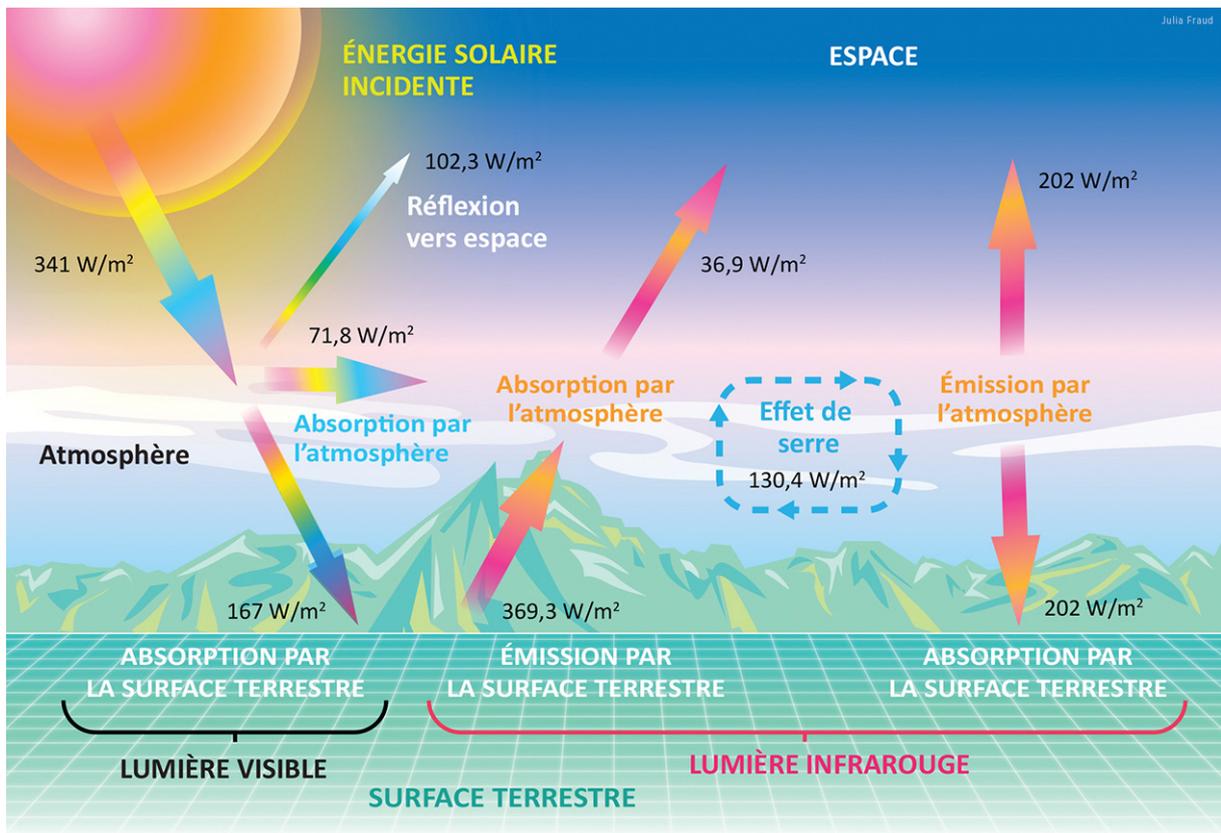


FIGURE 3.12 – Illustration des différents échanges radiatifs entre la surface terrestre et l'atmosphère pour le modèle à une couche à l'équilibre. Voir Trenberth *et al.* (2009). Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

3.2.3 Échanges radiatifs réels

La figure 3.12 présente les échanges radiatifs au sein de l'atmosphère dans le cadre du modèle simplifié étudié. La figure 3.13 montre les différents flux radiatifs et énergétiques au sein de l'atmosphère tels qu'ils sont à l'équilibre thermique (sans réchauffement climatique), de manière légèrement simplifiée. Contrairement au modèle à une couche, l'atmosphère n'émet pas de manière symétrique vers le sol et vers l'espace. On peut comprendre cela en ajoutant des couches d'atmosphère au modèle précédent (Courtier 2010) : les basses couches sont à une température plus importante que la couche supérieure, donc leur émission de rayonnement (d'après la loi de Stefan-Boltzmann) sera plus importante que pour la partie supérieure.

Par ailleurs, l'équilibre purement radiatif ne suffit pas à décrire les échanges d'énergie dans l'atmosphère, il faut tenir compte d'un transfert thermique depuis le sol par conduction ($17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Ainsi que de la chaleur latente de l'eau ($80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) : au niveau du sol, l'eau prélève de l'énergie pour s'évaporer (l'évaporation de l'eau est un processus physique endothermique), avant de s'élever et de la restituer au niveau des nuages en se condensant (inversement, la condensation de l'eau est exothermique).

Ainsi l'effet de serre se traduit par le bilan : $396 - 40 - 200 = 156 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.2.4 Stabilité de l'équilibre

Nous allons regarder si l'équilibre énergétique à la surface de la Terre tel que décrit par ce modèle à une couche d'atmosphère est stable sous l'effet d'une perturbation. On peut imaginer ajouter beaucoup d'énergie d'un coup dans l'atmosphère. Nous allons regarder ce qui se passe si on augmente la concentration en CO_2 (par exemple). Il s'agit une question extrêmement complexe, mais on peut néanmoins en cerner l'idée.

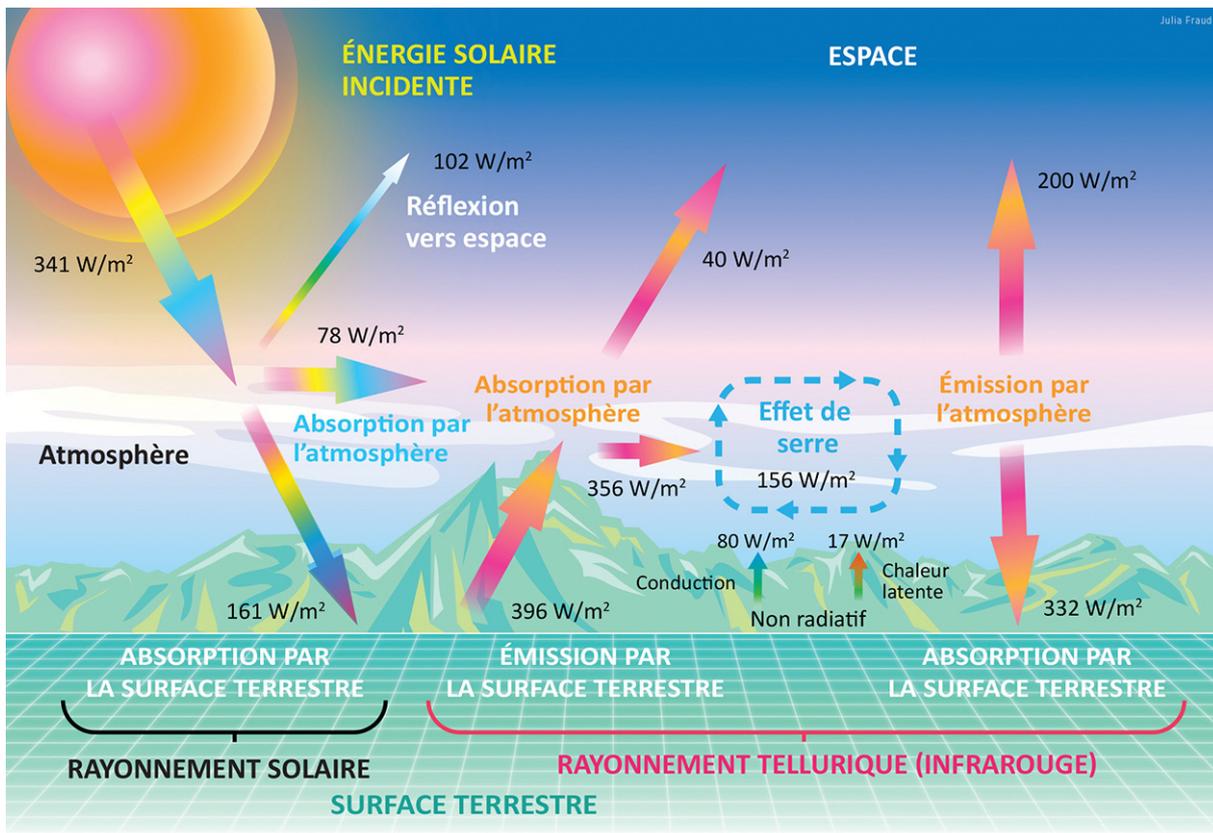


FIGURE 3.13 – Illustration des différents échanges radiatifs entre la surface terrestre et l’atmosphère. Voir Trenberth *et al.* (2009). Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Dans le modèle à une couche d’atmosphère, la température de surface s’écrit (équation 3.24) :

$$T_{\text{surf}}^4 = \frac{(1 - \alpha_T)(1 + \gamma_{\text{vis}})}{(1 + \beta_{\text{IR}})} \times \frac{I_0}{4\sigma}$$

Prenons le logarithme de cette expression :

$$4 \ln T = \ln(1 - \alpha_T) + \ln(1 + \gamma_{\text{vis}}) - \ln(1 + \beta_{\text{IR}}) + \ln(I_0/4\sigma)$$

On différentie :

$$4 \frac{dT}{T} = -\frac{d\alpha_T}{1 - \alpha_T} + \frac{d\gamma_{\text{vis}}}{1 + \gamma_{\text{vis}}} - \frac{d\beta_{\text{IR}}}{1 + \beta_{\text{IR}}} \quad (3.25)$$

La constante solaire I_0 étant... constante !

L’augmentation de la quantité de CO_2 ou plus généralement de gaz « à effet de serre » diminue la transmission de l’atmosphère dans l’infrarouge thermique (le coefficient β_{IR} dans les équations) (voir figure 3.24).

Reprenant l’équation différentielle précédente (3.25), pour une variation $\Delta\beta_{\text{IR}}$ de la transmission atmosphérique dans l’infrarouge, on a :

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{4} \frac{\Delta\beta_{\text{IR}}}{1 + \beta_{\text{IR}}}$$

Donc si β_{IR} décroît, $\Delta\beta_{\text{IR}} < 0$ donc $\Delta T > 0$ et donc la température croît : on obtient un « réchauffement climatique ». L’augmentation de l’opacité de l’atmosphère dans l’infrarouge provoque ainsi un déplacement de l’équilibre thermique. Or, comme nous le verrons c’est ce que l’on observe, cette augmentation de l’opacité étant provoquée par une augmentation de la quantité des gaz à effet de serre dans l’atmosphère.

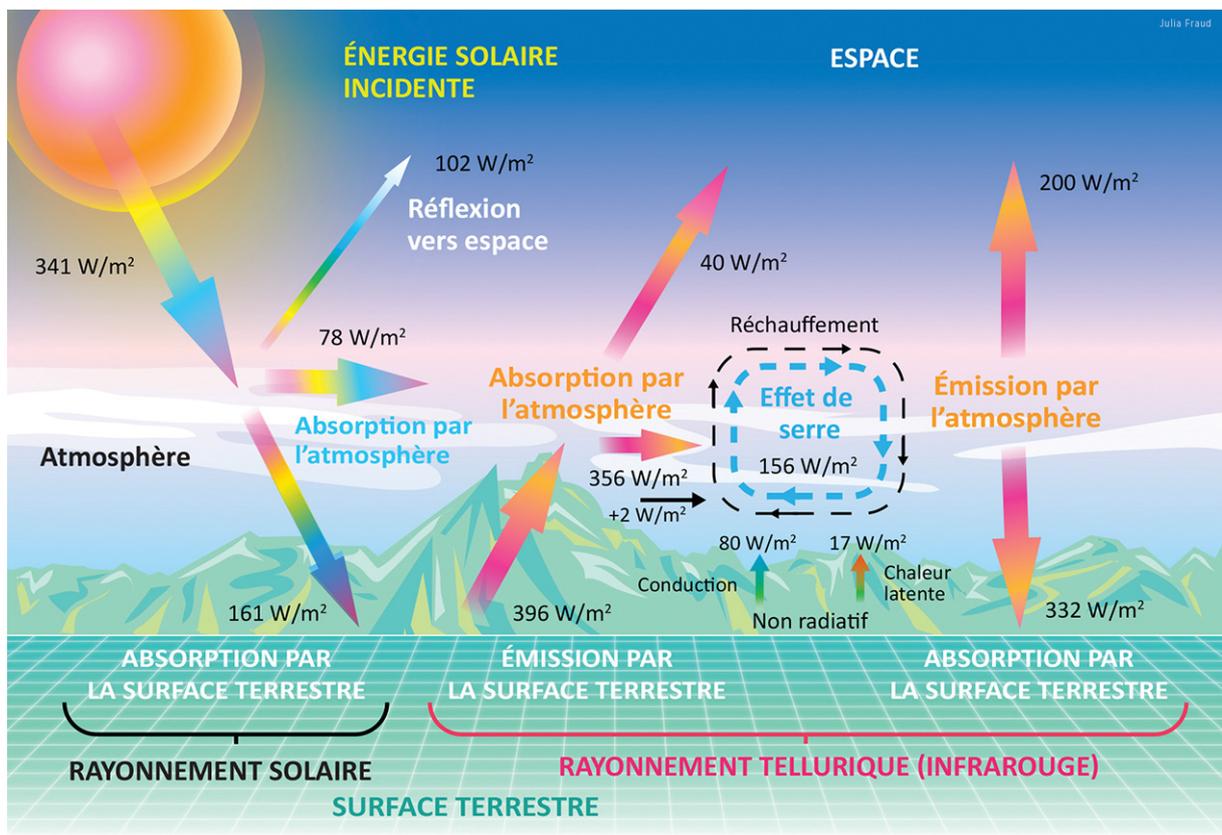


FIGURE 3.14 – Illustration des différents échanges radiatifs entre la surface terrestre et l'atmosphère, en tenant compte du réchauffement décalant l'équilibre. Voir Trenberth *et al.* (2009). Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

3.2.5 Réchauffement climatique

Actuellement, l'atmosphère terrestre n'est plus à l'équilibre. Les rejets anthropiques de gaz à effet de serre provoquent une augmentation de leur concentration dans l'atmosphère. Ce qui accroît le phénomène de l'effet de serre et provoque une accumulation d'énergie dans la basse atmosphère, engendrant un décalage de l'équilibre thermique d'environ $+2,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, comme illustré à la figure 3.14.

3.2.6 Forçages radiatifs

Beaucoup de paramètres interviennent dans la machine climatique, certains ayant un effet renforçant le réchauffement, d'autres au contraire le diminuant.

On parle de *forçages radiatifs* : *forçage* car il s'agit d'une perturbation de l'état d'équilibre du système climatique ; *radiatif* car ces effets modifient l'équilibre entre rayonnement entrant (solaire) et sortant (terrestre). Les forçages sont donnés de manière algébrique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

La figure 3.15 montre les principaux forçages radiatifs estimés et reportés dans le rapport du GIEC (GIEC 2013)¹⁶ : les gaz à effet de serre (dioxyde de carbone : CO₂, méthane : CH₄, protoxyde d'azote : N₂O, hydrocarbures halogénés, etc.), qui provoquent un forçage positif ; l'ozone, en particulier troposphérique¹⁷ (issu des activités humaines) provoquant un forçage positif, la modification de l'albédo de la surface de la Terre liée aux activités humaines avec un léger forçage négatif. Les aérosols (fines particules en suspension dans l'atmosphère) et les

16. Voir l'annexe A.

17. L'ozone stratosphérique constitue la couche d'ozone qui filtre le rayonnement ultraviolet issu du Soleil ; cet ozone-là est détruit par les activités humaines.

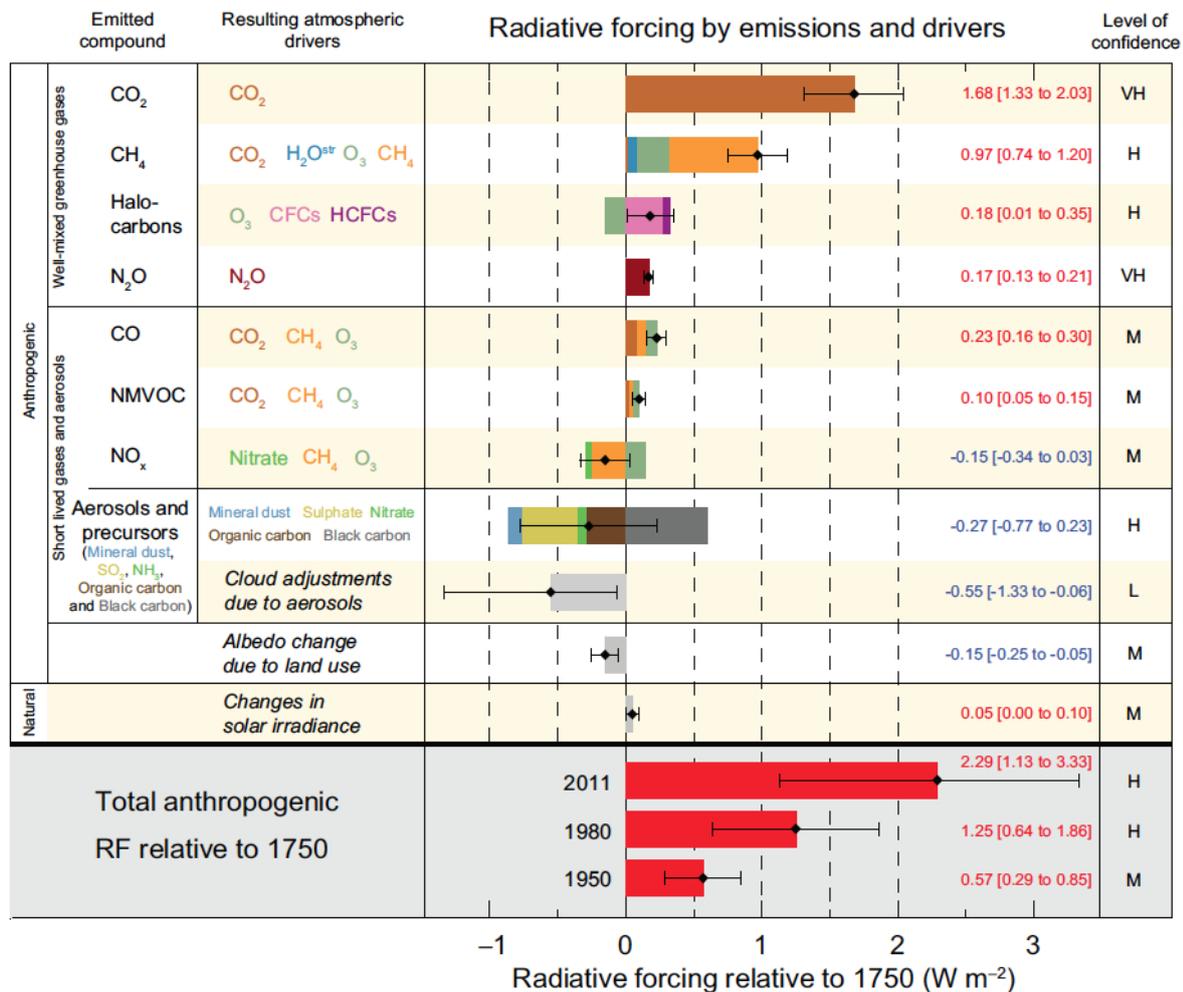


FIGURE 3.15 – Forçages radiatifs moyens globaux du système climatique en 2011, par rapport à 1750, déterminés dans le cadre des travaux du GIEC (GIEC 2013). © Intergovernmental Panel on Climate Change.

nuages provoquent un forçage négatif. Les changements dans les flux d'énergie issus du Soleil (irradiance solaire) sont négligeables par rapport aux forçages issus des activités anthropiques. Cette figure indique les incertitudes sur chacun des forçages présentés.

3.2.7 Rétroactions

Si une composante climatique est modifiée par le changement climatique, et que ce changement induit en retour un effet sur le climat, on parle de *rétroaction* (*positive* ou *négative* selon que l'effet induit a tendance à augmenter le réchauffement ou au contraire à le diminuer).

Une rétroaction sur un mécanisme ou un processus exprime le fait que le résultat agit sur la cause en altérant ainsi la réponse du système (*rétroaction positive* si la réponse est amplifiée, *négative* si elle est diminuée). Elle est présente dans de nombreuses disciplines (psychologie, biologie, physique, électronique, automatique...).

En physique, l'*effet Larsen* est un exemple de **rétroaction positive** : si un microphone (récepteur) est placé trop près d'un haut-parleur (amplificateur), le son émis par le haut-parleur est capté par le microphone, qui le transmet amplifié au haut-parleur... L'intensité du son peut diverger et provoquer un son très désagréable pour l'auditoire.

Ce mécanisme est utilisé en régulation (automatique), comme dans le fonctionnement d'un thermostat.

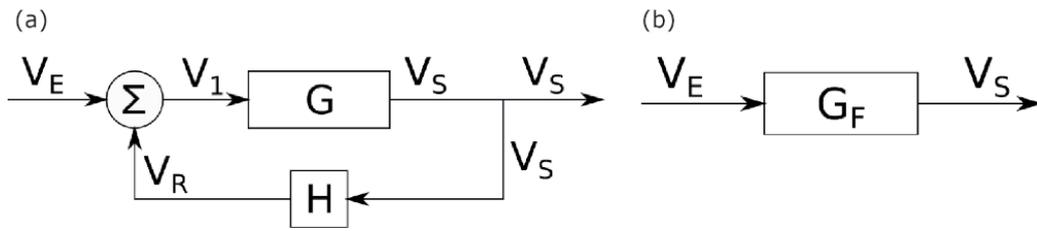


FIGURE 3.16 – Boucle de rétroaction générale schématisée. (a) Schéma simple de boucle de rétroaction. (b) Gain effectif entre signal d'entrée et signal de sortie.

Boucle de rétroaction

La figure 3.16a montre un schéma simple de boucle de rétroaction avec un système de gain G , tel que :

$$G = \frac{\text{signal de sortie}}{\text{signal d'entrée}} = \frac{V_S}{V_1} \quad (3.26)$$

où V_1 est le signal d'entrée du système, et V_S le signal de sortie.

Un signal d'entrée V_E reçoit un signal rétroactif V_R prélevé sur le signal de sortie V_S . On a :

$$V_1 = V_E + V_R \quad (3.27)$$

Avec :

$$V_S = G \times V_1 \quad (3.28)$$

où G est la fonction de transfert. Le signal V_R sortant de la boucle de rétroaction H est :

$$V_R = H \times V_S \quad (3.29)$$

Soit :

$$V_S = G \times V_1 = G \times (V_E + V_R) = G \times (V_E + H \times V_S), \quad (3.30)$$

soit :

$$V_S \times (1 - G \times H) = G \times V_E \quad (3.31)$$

D'où :

$$V_S = \frac{G}{1 - G \times H} V_E \quad (3.32)$$

On définit le gain effectif (figure 3.16b) :

$$G_F = \frac{V_S}{V_E} = \frac{G}{1 - G \times H} \quad (3.33)$$

Ainsi : $V_S = G_F V_E$.

Sans rétroaction, c'est-à-dire $H = 0$, on a : $G_F = G$. Pour une rétroaction négative, $H < 0$, on a : $GH < 0$ et $0 \leq G_F \leq G$. Pour une rétroaction positive, $H > 0$, soit : $1 \geq GH \geq 0$, on a $G_F > G$.

Si le système a plusieurs rétroactions indépendantes H_i , elles sont reliées en parallèle au système, et on a : $V_R = \sum_i H_i V_S$, soit :

$$V_S = \frac{G}{1 - \sum_i H_i G} V_E \quad (3.34)$$

Le flux radiatif net (solaire absorbé moins terrestre rayonné) F au sommet de l'atmosphère est nul à l'équilibre. Une perturbation extérieure, comme par exemple une augmentation de la concentration du CO_2 va introduire une diminution du flux net soit : $\Delta F < 0$ (diminution du rayonnement thermique au sommet de l'atmosphère). Donc la température de surface de

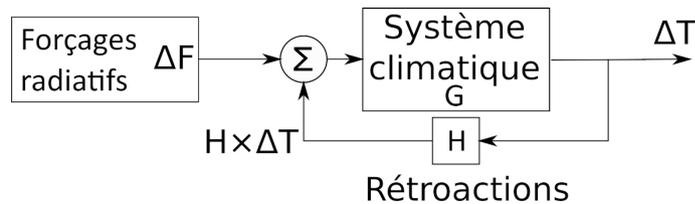


FIGURE 3.17 – Schématisation de la rétroaction climatique.

la Terre va croître de ΔT pour compenser (forçage thermique). On peut ainsi voir la machine climatique comme un système à rétroactions : le forçage radiatif ΔF est le signal d'entrée (V_E), l'anomalie de température (par rapport à une valeur moyenne) ΔT est le signal de sortie (V_S). On peut ainsi écrire :

$$\Delta T = G_F \times \Delta F \quad (3.35)$$

où G_F est la fonction de transfert déterminée par la machine climatique (figure 3.17).

Un exemple de rétroaction positive est la rétractation de la surface enneigée consécutive au réchauffement (fonte précoce, enneigement moindre, etc.). Cela entraîne un albédo plus important car la neige reflète davantage la lumière solaire que le sol non enneigé. Et donc une absorption plus importante de l'énergie solaire. Et plus de réchauffement...

Autres exemples de rétroactions :

→ Effets renforçant le réchauffement (rétroactions positives) :

- L'augmentation de la température entraîne plus de vapeur d'eau dans l'air (augmentation du processus d'évaporation et l'air chaud peut contenir plus d'humidité que l'air froid), donc une transmission dans l'infrarouge plus faible, et donc une augmentation de la température.
- Une température plus élevée entraîne la fonte du pergélisol (sol gelé en permanence dans les hautes latitudes) qui libérerait ainsi le méthane qu'il contient (puissant gaz à effet de serre), augmentant ainsi le réchauffement.
- Etc.

→ Effets diminuant le réchauffement (rétroactions négatives) :

- L'augmentation de la température de la Terre entraîne des pertes par rayonnement plus importantes (loi de Stefan-Boltzmann), et donc une diminution de la température.

L'effet des nuages (positif ou négatif) est difficile à déterminer. Ils constituent de ce fait une grande source d'incertitude.

La plupart des rétroactions connues actuellement sont positives : plus la Terre s'échauffe, plus elle s'échauffe...

3.2.8 Effet de serre et stratosphère

Le rayonnement visible issu du Soleil n'étant que peu absorbé par l'atmosphère, il atteint la surface de la Terre qu'il réchauffe. Les basses couches de la troposphère sont chauffées par *en-dessous*. L'air chauffé se dilate et devient moins dense que l'air environnant, il s'élève sous l'effet de la force d'Archimède. Tandis qu'il prend de l'altitude, sa pression baisse, donc il se dilate pour égaliser sa pression avec l'air environnant. Cela nécessite du travail ($-PdV$) qui est puisé dans son énergie interne. Ce faisant, sa température diminue. L'air va s'élever jusqu'à ce que sa température soit la même que celle de l'air environnant, à savoir environ -55 °C au niveau de la tropopause. L'air froid, en haut, effectue le trajet inverse, il descend vers le sol. Il s'agit donc d'un mouvement de matière et d'énergie, la convection, qui va mélanger la troposphère.

Si l'atmosphère ne recevait pas d'énergie solaire, sa température continuerait de baisser au-delà de la tropopause. En fait, comme la stratosphère, au-dessus de la tropopause, contient des molécules d'ozone, elle va absorber le rayonnement solaire (ultraviolet) par l'intermédiaire de la photodissociation de l'ozone. Ce faisant, sa température augmente pour atteindre quasiment 0 °C au sommet. Le fait que sa température croisse avec l'altitude inhibe la convection et rend la stratosphère stable, stratifiée en couches et peu mélangée.

Faisons un bilan radiatif sur la stratosphère.

Densité de puissance qui entre :

- A_{O_3} , la puissance absorbée par unité de surface par l'ozone (issue du rayonnement ultraviolet du Soleil),
- $P_{\text{tropo}} = \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{tropo}}^4$, le rayonnement issu de la troposphère (couche du dessous), à la température moyenne T_{tropo} de la troposphère avec l'émissivité $\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}}$ dans l'infrarouge thermique.

Densité de puissance qui sort :

- $P_{\text{strato}} = \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \sigma T_{\text{strato}}^4$, vers le bas, la troposphère et vers le haut, l'espace, où T_{strato} est la température moyenne de la stratosphère, et $\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}}$ l'émissivité de la stratosphère dans l'infrarouge thermique.

Ce bilan est schématisé à la figure 3.18.

À l'équilibre, on a :

$$A_{O_3} + P_{\text{tropo}} = 2P_{\text{strato}} \quad (3.36)$$

Soit :

$$A_{O_3} + \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{tropo}}^4 = 2\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \sigma T_{\text{strato}}^4 \quad (3.37)$$

D'où on tire T_{strato} :

$$T_{\text{strato}} = \left(\frac{A_{O_3} + \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{tropo}}^4}{\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.38)$$

L'émissivité¹⁸ $\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}}$ de la troposphère dans l'infrarouge est d'environ 0,9 car ($\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} = 1 - \beta_{\text{IR}}$), mais elle est très petite pour la stratosphère $\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \ll 1$.

L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans la troposphère va diminuer la transmission dans l'infrarouge, donc augmenter le coefficient d'absorption et donc l'émissivité. Si la concentration des gaz à effet de serre augmente dans la troposphère, elle augmente dans les mêmes proportions dans la stratosphère¹⁹ (voir par exemple Diallo *et al.* 2017). Donc l'émissivité qui en résulte varie dans le même sens :

$$d\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} = d\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} = d\varepsilon_{\text{IR}} > 0 \quad (3.39)$$

Quel est l'effet d'une telle variation sur la température troposphérique ? Pour le savoir, différencions l'équation (3.38) :

$$\begin{aligned} 4 \frac{dT_{\text{strato}}}{T_{\text{strato}}} &= \frac{\sigma T_{\text{tropo}}^4 d\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}}}{A_{O_3} + \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{tropo}}^4} - \frac{d\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}}}{\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}}} \\ &= \frac{\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \sigma T_{\text{tropo}}^4 d\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} - (A_{O_3} + \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{tropo}}^4) d\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}}}{\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} (A_{O_3} + \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{strato}}^4)} \\ &= \frac{(\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \sigma T_{\text{tropo}}^4 - A_{O_3} - \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{tropo}}^4) d\varepsilon_{\text{IR}}}{\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} (A_{O_3} + \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}} \sigma T_{\text{strato}}^4)} \end{aligned}$$

18. À l'équilibre thermique, l'émissivité est égale à l'absorptivité (loi de Kirchhoff). Ici β_{IR} a été défini comme la transmission de la troposphère dans l'infrarouge.

19. Le mélange se fait notamment par convection dans la troposphère et par une circulation atmosphérique entre la troposphère et la stratosphère (circulation de Brewer-Dobson) qui « apporte » les gaz à effet de serre jusque dans la stratosphère.

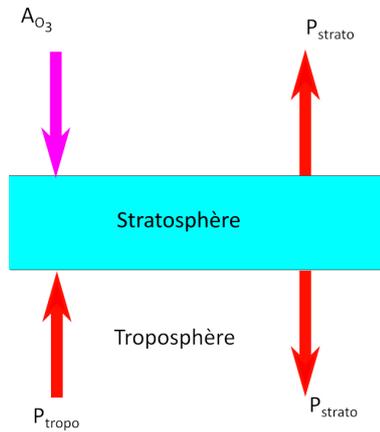


FIGURE 3.18 – Bilan énergétique sur la stratosphère.

Or comme $d\varepsilon_{\text{IR}} > 0$ et $\left[(\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} - \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}}) \sigma T_{\text{tropo}}^4 - A_{\text{O}_3} \right] < 0$ car $\varepsilon_{\text{IR}}^{\text{strato}} \ll \varepsilon_{\text{IR}}^{\text{tropo}}$, on a :

$$\frac{dT_{\text{strato}}}{T_{\text{strato}}} < 0 \quad (3.40)$$

donc $dT_{\text{strato}} < 0$: la température de la stratosphère diminue !

En quelques mots, les gaz à effet de serre, bien qu'en très faible quantité dans l'atmosphère, par rapport à l'oxygène et l'azote, sont les régulateurs de l'énergie thermique rayonnée par la surface terrestre, puisqu'ils ont la propriété d'intercepter et de réémettre le rayonnement thermique reçu. Dans la stratosphère, ils font l'interface entre la basse atmosphère (troposphère) et le vide spatial, en émettant un rayonnement infrarouge permettant de maintenir l'atmosphère terrestre à l'équilibre thermique. Si on augmente la capacité de rayonnement vers l'espace de la stratosphère en augmentant le nombre de molécules de gaz à effet de serre (donc leur concentration), on augmente les pertes d'énergie thermique, et la température résultante diminue.

L'autre façon de réduire la température de la stratosphère est de diminuer sa capacité à absorber le rayonnement solaire, en diminuant le nombre de molécules d'ozone.

3.2.9 Les gaz à effet de serre

Nous avons vu que la surface de la Terre absorbait une partie du rayonnement solaire conduisant à son réchauffement, ce qui lui permet d'atteindre une température d'équilibre moyenne autour de 288 K (15 °C). La loi de Wien (équation 3.8) nous dit qu'elle va alors rayonner autour de 10 μm . Ce rayonnement est absorbé en grande partie par l'atmosphère (figure 3.19).

En effet, l'atmosphère contient des gaz qui ont la particularité d'absorber le rayonnement électromagnétique dans l'intervalle de longueur d'onde où la surface de la planète rayonne. Or, à l'équilibre thermique, un corps qui absorbe une certaine quantité de rayonnement, réémet la même quantité de rayonnement aux mêmes longueurs d'onde²⁰, lequel va, en partie, « réchauffer » la surface (une partie s'échappe dans l'espace, voir la figure 3.14)... D'où l'effet de serre (voir section 3.2.2).

L'effet de serre « naturel » est constitué d'une puissance rayonnée par la surface de la Terre de $396 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ à laquelle on retranche la puissance rayonnée vers l'espace globalement par la Terre au sommet de l'atmosphère ($240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), ce qui donne $156 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Sur ces $156 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 19 %, soit $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, sont dus aux nuages, le reste ($126 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) est dû à l'absorption par les gaz à effet de serre naturellement présents dans l'atmosphère : vapeur d'eau, gaz carbonique, ozone, méthane et protoxyde d'azote (voir le tableau 3.2). En plus de cet effet de serre « naturel »

20. Il s'agit de la loi du rayonnement de Kirchhoff (1859).

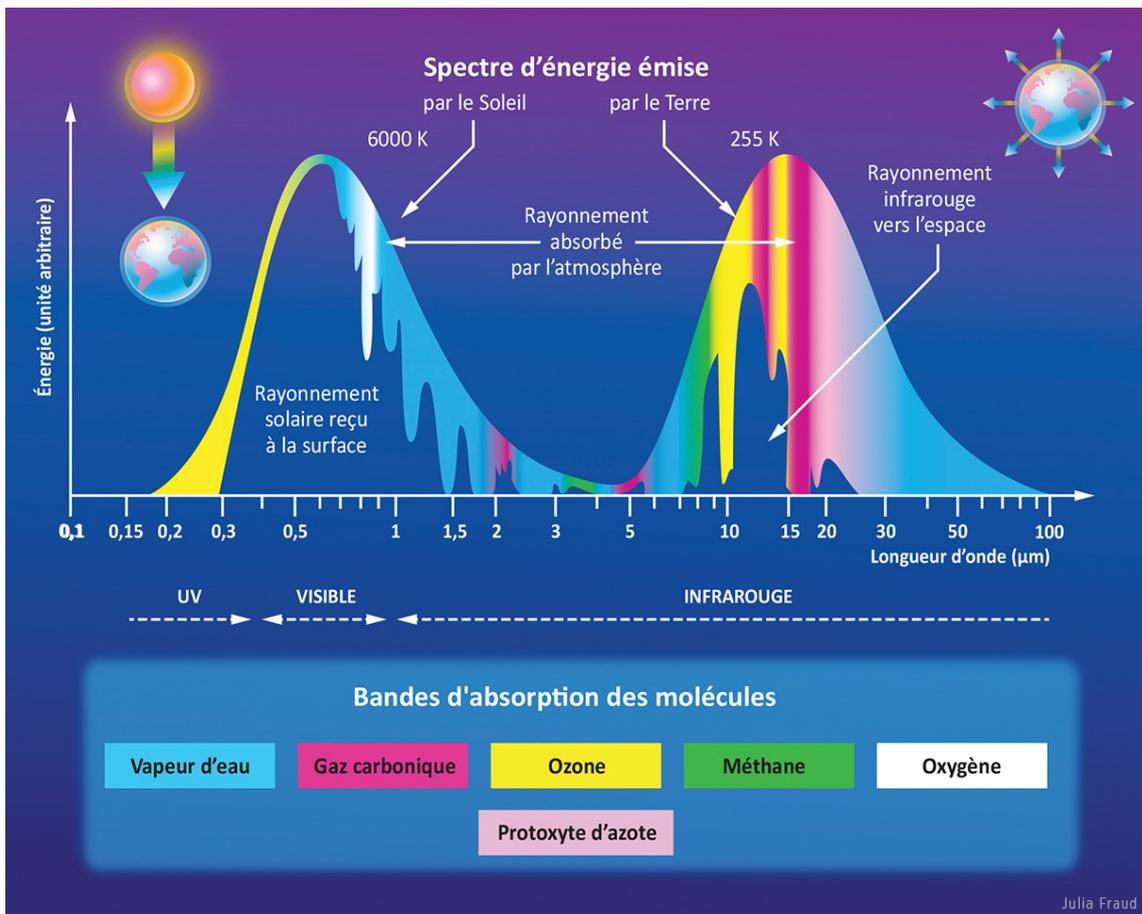


FIGURE 3.19 – Énergie rayonnée par le Soleil et par la Terre en fonction de la longueur d'onde (spectre). Le spectre du Soleil est maximum dans la bande visible, l'enveloppe représente le spectre de Planck; dans la partie droite, dans le proche infra-rouge, la courbe de Planck est déformée par des raies et des bandes d'absorption (vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère de la Terre essentiellement). Le spectre du rayonnement solaire effectivement reçu à la surface de la Terre est en bleu foncé à l'intérieur de la courbe. La partie droite de la figure représente le spectre d'émission de la Terre, qui est maximum dans l'infrarouge thermique (autour de 10 à 15 μm); ce spectre est très déformé par les nombreuses bandes d'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère : vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane, protoxyde d'azote... Ce sont les « gaz à effet de serre ». Voir Delmas *et al.* (2007). Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

on constate un réchauffement climatique attribué à un effet de serre « additionnel » dû aux activités humaines, à hauteur de $+2,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($+2,72^{+0,76}_{-0,76} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en 2019 par rapport à 1750 – GIEC 2021), causé par l'ajout dans l'atmosphère de gaz à effet de serre (voir le tableau 3.2 et la figure 3.20).

Les effets de ces gaz sur l'effet de serre ne sont pas équivalents. On peut les comparer par leur temps de résidence moyen dans l'atmosphère, et surtout par leur pouvoir de réchauffement global (*global warming potential*).

C'est une estimation de l'influence d'un gaz sur l'effet de serre par rapport à un gaz de référence. Il dépend des propriétés radiatives des gaz mais aussi de leurs temps de résidence dans l'atmosphère. Ainsi le pouvoir de réchauffement global (PRG) du gaz i par rapport au gaz de référence r pour l'horizon temporel T est donné par (GIEC 2007, chapitre 2, p. 210) :

$$\text{PRG}_{i,r}(T) = \frac{\int_0^T a_i C_i(t) dt}{\int_0^T a_r C_r(t) dt} \quad (3.41)$$

Effet de serre naturel $155 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$				
nuages $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	gaz $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$			
	H_2O $75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	CO_2 $32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	O_3 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ $7,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
	60 %	26 %	8 %	6 %
19 %	48 %	21 %	6 %	5 %
Effet de serre additionnel (anthropique) $+2,26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$				
gaz $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$			autre (autres gaz, aérosols, nuages) $-0,74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
CO_2 $1,68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	CH_4 $0,97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	CFC $0,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	N_2O $0,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
56 %	32 %	6 %	6 %	

TABLE 3.2 – Les différentes contributions (absolues et relatives) à l'effet de serre naturel et additionnel. D'après la figure 3.15 ainsi que Delaygue (2002).

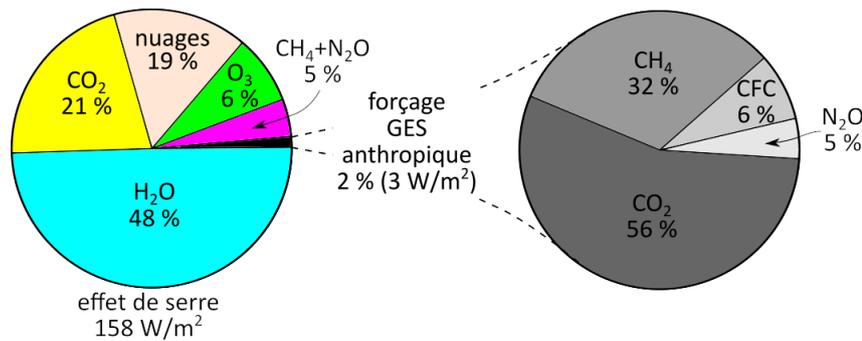


FIGURE 3.20 – Illustration des différentes contributions à l'effet de serre. Pour l'effet de serre additionnel (anthropique), seuls sont pris en comptes les gaz à effet de serre (GES).

	Temps de résidence (années)	Efficacité radiative ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ppb}^{-1}$)	PRG pour différents horizons		
			20 ans	100 ans	500 ans
CO_2	> 100	$1,4 \cdot 10^{-5}$	1	1	1
CH_4	12	$3,7 \cdot 10^{-4}$	72	25	7,6
N_2O	114	$3,03 \cdot 10^{-3}$	289	298	153
CF_4	50 000	0,10	5210	7390	11 200

TABLE 3.3 – Temps de résidence moyen (temps caractéristique de décroissance exponentielle), efficacité radiative (ppb = parties par milliard), et pouvoir de réchauffement global pour différents horizons temporels. Tiré de GIEC (2007), chapitre 2.

où $a_{i,r}$ est l'efficacité radiative du gaz i,r et $C_{i,r}(t)$ est la concentration du gaz i,r à l'instant t en réponse à l'émission d'une unité de masse de ce gaz à l'instant $t = 0$. Notons que le produit de l'efficacité radiative par la concentration donne le forçage radiatif du gaz considéré.

Par convention (depuis le protocole de Kyoto), l'horizon temporel est fixé à 100 ans, et le gaz de référence est le CO_2 . Le tableau 3.3 donne quelques valeurs du PRG pour quelques gaz.

Le tableau 3.3 montre que l'émission dans l'atmosphère de 1 kg de méthane aura le même effet radiatif en moyenne pendant un siècle que l'émission de 25 kg de dioxyde de carbone !

3.2.10 Absorption du rayonnement par les molécules

Vibration des molécules

Les photons ultraviolets (dont l'énergie est de quelques électronvolts à quelques dizaines d'électronvolts) cassent les liaisons covalentes (dont l'énergie de liaison est de quelques électronvolts ou quelques centaines de kilojoules par mole). Les photons du domaine visible ne sont quasiment pas absorbés par les molécules de l'atmosphère, seulement diffusés par elles. Dans l'infrarouge thermique (autour de $\sim 10 \mu\text{m}$), l'émission terrestre est bien plus importante que l'émission solaire. Ces photons, d'énergie moindre que les photons visibles, vont être absorbés par certaines molécules pour les faire vibrer. Ces vibrations sont quantifiées et se font donc selon différents modes dépendant de la molécule considérée.

Dans l'infrarouge lointain et le millimétrique (les micro-ondes), au-delà de $20 \mu\text{m}$, l'énergie des photons permet d'activer les niveaux de rotation de la molécule, qui sont eux aussi quantifiés (Legras *et al.* 2000).

Absorption en infrarouge

Le diazote et le dioxygène, par exemple, ont cette capacité de vibrer. Néanmoins, comme ce sont des molécules diatomiques symétriques, ces vibrations ne modifient pas leur moment dipolaire, elles n'absorbent donc pas dans l'infrarouge thermique. Heureusement, sinon l'effet de serre rendrait la planète invivable !

Les molécules diatomiques symétriques n'ont pas de moment dipolaire permanent, il ne peut donc y avoir de transition électromagnétique entre des niveaux d'énergies vibrationnels. Sans transition possible, il n'y a ni absorption ni émission : ces molécules sont inactives en infrarouge (Chaquin 2020, chapitre 9). En revanche, une molécule polyatomique (comme celle de CO_2) peut avoir un moment dipolaire intrinsèque nul, mais un moment dipolaire induit non nul, ce qui lui permet d'absorber en infrarouge. En effet, pour qu'une molécule absorbe le rayonnement infrarouge, son moment dipolaire doit varier lorsqu'elle vibre.

Moment dipolaire électrique

Le moment dipolaire $\vec{\mu}$ est défini pour un dipôle électrostatique, constitué de deux charges électriques ($+q$ et $-q$) placées à une distance d l'une de l'autre, comme :

$$\vec{\mu} = q \times \vec{d} \quad (3.42)$$

où q est la charge électrique (en coulomb) et \vec{d} est le vecteur distance entre les deux charges du dipôle, orienté de la charge négative vers la charge positive. Dans une liaison covalente entre deux atomes pour former une molécule, dans le cas de deux atomes de nature différente (on parle de différence d'électronégativité, l'électronégativité étant la capacité des atomes à attirer le nuage électronique), les nuages électroniques sont déformés par la présence de la liaison moléculaire, ce qui génère une dissymétrie de répartition des charges et induit ainsi un moment dipolaire permanent. Cela se généralise aux molécules polyatomiques, comme dans le cas de la molécule d'eau (figure 3.21a).

Le fait qu'une molécule ait un moment dipolaire permanent n'est pas une condition nécessaire pour qu'elle absorbe le rayonnement infrarouge. En revanche, si ce n'est pas le cas, son moment dipolaire induit par la vibration (dans ce cas nécessairement asymétrique) doit varier avec la vibration pour que ce rayonnement soit effectivement absorbé.

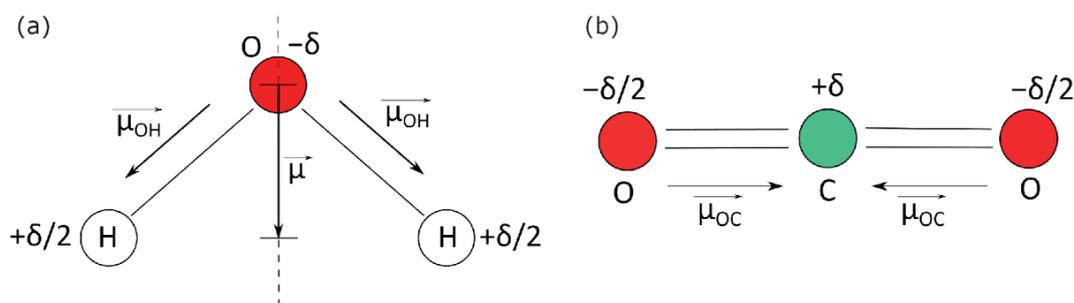


FIGURE 3.21 – Moment dipolaire et molécules H₂O et CO₂. (a) H₂O, molécule dipolaire. Le barycentre des charges + est sur l'atome d'oxygène, tandis que celui des charges - est entre les deux atomes d'hydrogène. Le moment dipolaire total $\vec{\mu}$ est la somme (vectorielle) des moments dipolaires des deux couples OH. (b) CO₂, molécule apolaire. Le barycentre des charges + est confondu avec celui des charges -. Le moment dipolaire résultant, somme vectorielle des moments dipolaires des deux couples OC, est nul.

Autres molécules

Les principaux gaz à effet de serre sont des molécules qui absorbent le rayonnement infrarouge dans l'intervalle spectral d'émission de la surface de la Terre, soit environ 5 à 50 μm (voir figure 3.19).

C'est le cas pour certaines molécules diatomiques asymétriques (hétéronucléaires), comme CO, NO ou HBr. Néanmoins, ces composés sont extrêmement réactifs chimiquement, ils résident très peu de temps dans l'atmosphère, trop peu pour avoir une action sur l'effet de serre (ce sont d'ailleurs des gaz toxiques)²¹.

3.2.11 Exemple de la molécule de CO₂

La molécule de dioxyde de carbone (ou gaz carbonique) est constituée d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène de part et d'autre. C'est une molécule linéaire. Elle n'a pas de moment dipolaire permanent (figure 3.21b). Elle se trouve sous forme de gaz à température ambiante et à pression atmosphérique.

Le nombre de bandes d'émission (ou d'absorption) du rayonnement infrarouge par la molécule va dépendre de son nombre de degrés de liberté de vibration²².

Chacun des N atomes d'une molécule polyatomique non linéaire a trois degrés de liberté de translation : selon l'axe x , selon l'axe y et selon l'axe z . Cela fait $3N$ degrés de liberté pour une molécule. Parmi ces $3N$ degrés de liberté, trois correspondent à une translation de la molécule entière le long des trois axes, et trois correspondent à une rotation de la molécule autour de chacun des axes. Ceci laisse $3N - 6$ degrés de liberté de vibration. On démontre qu'il existe précisément $3N - 6$ modes normaux de vibration pour une molécule composée de N atomes.

Une molécule linéaire comme celle de dioxyde de carbone possède seulement $3N - 5$ modes normaux de vibration car elle a seulement deux degrés de liberté en rotation : la rotation autour de l'axe inter-atomique possède un moment d'inertie nul et ne met donc en jeu aucun échange d'énergie (la rotation d'un angle quelconque autour de cet axe produit une molécule non distinguable de celle qui lui a donné naissance).

Avec $N = 3$ atomes, la molécule de CO₂ a donc $9 - 5 = 4$ modes de vibration :

- 1 mode d'élongation antisymétrique (à gauche sur la figure 3.22) ;
- 1 mode d'élongation symétrique qui est inactif car la molécule reste symétrique (au milieu à la figure 3.22) ;

21. On peut consulter le site « WebBook de Chimie du NIST » (<https://webbook.nist.gov/chemistry/>) qui fournit un certain nombre de données sur chacune de ces molécules, dont leur spectre infrarouge.

22. Voir par exemple : F. Fuster, MC 410 : *Chimie physique et théorique*, 2005. Support de cours. http://www.lct.jussieu.fr/pagesperso/fuster/MC410/cours_2_MC410.pdf.

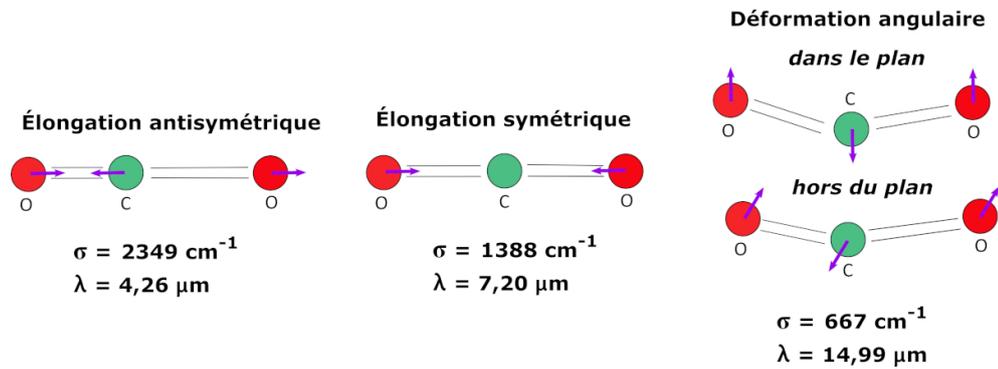


FIGURE 3.22 – Illustration des différents modes de vibration de la molécule de dioxyde de carbone avec le nombre d'onde $\sigma = 1/\lambda$ et la longueur d'onde λ associées.

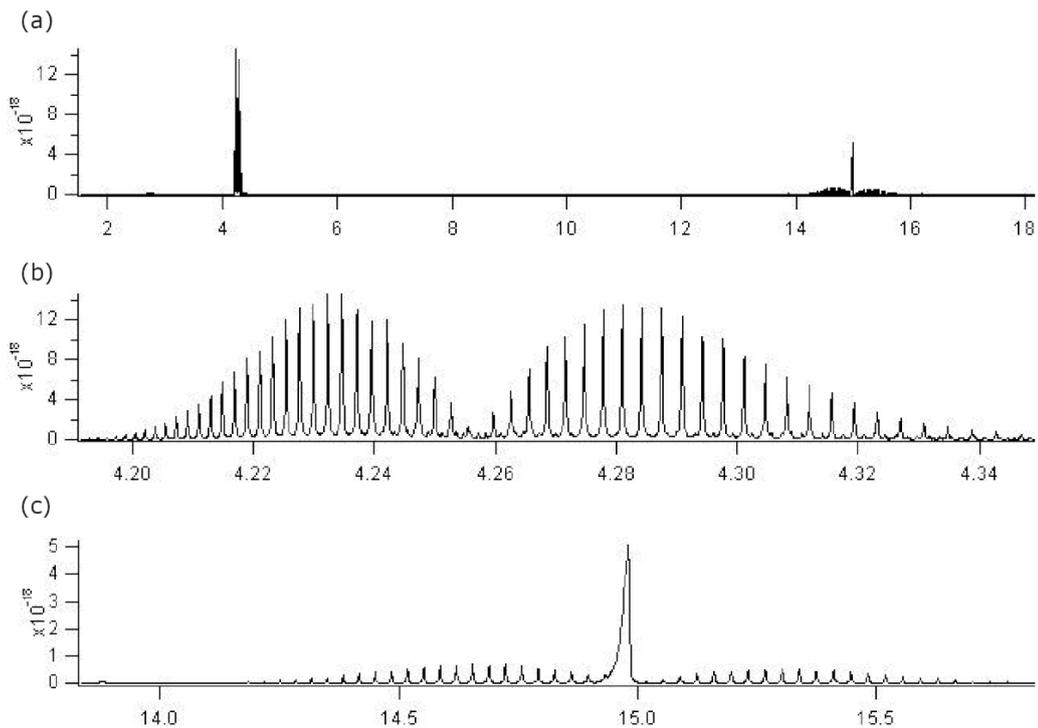


FIGURE 3.23 – Spectres d'émission en vibration du dioxyde de carbone dans l'infrarouge thermique. L'intensité de l'émission est en ordonnée, la longueur d'onde est en abscisse, en μm . Ces spectres sont obtenus par la *Virtual Planetary Laboratory Molecular Spectroscopic Database* : <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2pnnlimagesmicrons.htm>. (a) Spectre d'émission du CO_2 en μm en longueur d'onde. (b) Agrandissement sur la bande de vibration en étirement asymétrique à $4,26 \text{ }\mu\text{m}$. (c) Agrandissement sur la bande de vibration en flexion à $14,99 \text{ }\mu\text{m}$.

- 1 mode de flexion dans le plan (à droite sur la figure 3.22);
- 1 mode de flexion hors du plan, dégénéré avec le précédent : les deux sont indiscernables (à droite sur la figure 3.22).

On a donc finalement deux longueurs d'onde d'émission des modes de vibration de la molécule autour de $4,26 \text{ }\mu\text{m}$ et $14,99 \text{ }\mu\text{m}$ (ces longueurs d'onde sont déterminées par le calcul, mais on peut observer le spectre d'absorption en laboratoire, et donc les mesurer). La figure 3.23 montre le spectre observé correspondant. L'agrandissement (figures 3.23b et 3.23c) sur les deux bandes montre la complexité de la quantification des modes vibrationnels.

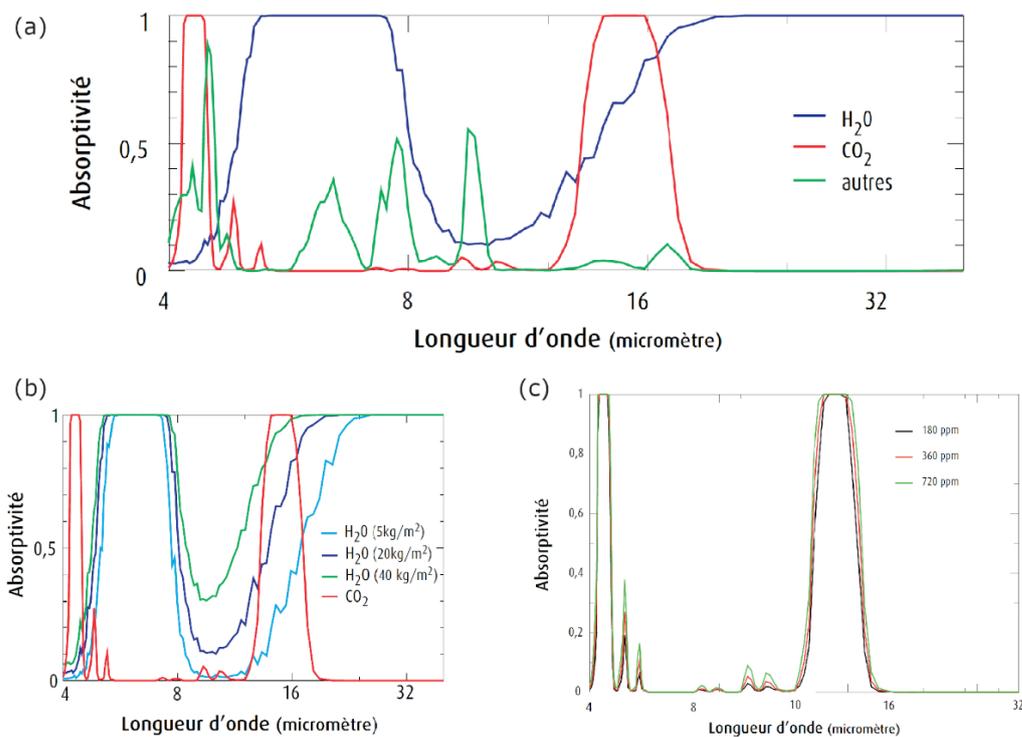


FIGURE 3.24 – La dépendance spectrale de l’absorptivité (absorption du rayonnement sur toute la hauteur de l’atmosphère; l’absorptivité vaut 1 quand tout le rayonnement émis par le sol est absorbé par l’atmosphère avant d’atteindre l’espace) des principaux gaz à effet de serre dans la gamme de longueurs d’onde dans laquelle se situe l’essentiel du rayonnement émis par la surface de la Terre. (a) Absorptivité pour les deux principaux gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone et la vapeur d’eau. (b) Dépendance spectrale de l’absorptivité de la vapeur d’eau pour différentes valeurs de colonne d’eau dans l’atmosphère : la valeur moyenne est de $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. (c) Dépendance spectrale de l’absorptivité pour trois valeurs de la concentration du CO₂ dans l’atmosphère. La valeur actuelle est $> 400 \text{ ppm}$. (a)-(c) Source : Dufresne & Treiner (2011). © La Météorologie, <https://lameteorologie.fr/>

Effet de la saturation des bandes d’absorption

La figure 3.24a montre l’absorptivité (absorption du rayonnement sur toute la hauteur de l’atmosphère; l’absorptivité vaut 1 quand tout le rayonnement émis par le sol est absorbé par l’atmosphère avant d’atteindre l’espace) en fonction de la longueur d’onde pour les deux principaux gaz à effet de serre, la vapeur d’eau et le dioxyde de carbone.

Les figures 3.24b et 3.24c montrent l’absorptivité respectivement de la vapeur d’eau et du dioxyde de carbone pour différentes concentrations dans l’atmosphère centrées sur la valeur moyenne pour la vapeur d’eau et proche de l’actuelle pour le dioxyde de carbone. On constate que les bandes d’absorption de la vapeur d’eau ne sont globalement pas saturées, c’est-à-dire que leur absorptivité est inférieure à 1. Tandis qu’au contraire, les bandes d’absorption du dioxyde de carbone sont saturées (leur absorptivité vaut 1) sur toute l’épaisseur de l’atmosphère.

On peut donc considérer que l’émission du rayonnement terrestre vers l’espace ne se fait pas à la surface du sol mais à une certaine altitude lui permettant de traverser une couche d’atmosphère suffisamment faible pour que les raies du CO₂ ne soient pas saturées (Dufresne & Treiner 2011). Cette altitude d’émission de l’infrarouge vers l’espace augmente au fur et à mesure de l’accumulation des gaz à effet de serre dans l’atmosphère : la photosphère infrarouge de la Terre grandit petit à petit.

3.3 Observations du réchauffement climatique

3.3.1 Notion de température moyenne

La température est une notion clef pour comprendre le climat et le réchauffement climatique. La température est une grandeur physique qui mesure l'énergie interne (au sens thermodynamique) d'un système. L'énergie interne d'un système physique est la somme de l'énergie cinétique microscopique de ses constituants, de l'énergie potentielle associée à toutes les forces intérieures et de l'énergie de masse des particules. Dans le cas d'un gaz parfait²³, sans interaction, seule l'énergie cinétique de ses molécules constitue son énergie interne. Dans ce cas, la température T , en kelvin, s'exprime selon :

$$\frac{\varepsilon_c}{N} = \frac{3}{2}k_B T \quad (3.43)$$

où ε_c/N est l'énergie cinétique moyenne du centre de masse de chaque particule, N est le nombre de particules (identiques) du gaz et $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann. La température est donc une mesure indirecte de l'agitation thermique de la matière.

Quand on parle de réchauffement climatique, la notion sous-jacente de température est évidemment fondamentale. Les climatologues (et les météorologues) mesurent des températures atmosphériques (et océaniques, entre autres) un peu partout à la surface du globe (mais aussi en altitude), et ce un peu tout le temps. Certaines régions sont moins bien échantillonnées que d'autres. À partir de ces mesures éparses (et non-uniformes) dans l'espace et dans le temps, il s'agit de construire des températures *moyennes* dans l'espace (par exemple sur l'ensemble de la surface de la planète) et dans le temps (sur des périodes d'un mois, d'un an, etc.). La température résultante n'a pas de réalité physique, il s'agit d'un indicateur statistique. La complexité de cette analyse de reconstruction d'une température globale, fait qu'une valeur *absolue* de la température moyenne à la surface de la Terre est difficile à obtenir avec précision. En revanche, la variation de cette grandeur sur une échelle de temps donnée, par rapport à une référence donnée, peut être obtenue avec une grande précision (Planton 2020). Les climatologues la qualifient d'*anomalie* de température.

3.3.2 Augmentation de la température moyenne

On constate depuis plusieurs décennies que la température moyenne annuelle (sur toute la surface de la Terre) des basses couches (premiers mètres, c'est-à-dire à l'intérieur de la couche limite) de l'atmosphère augmente de façon importante, et ce depuis le milieu du XIX^e siècle environ, et après une période de relative stabilité de 10 000 ans (fin de la dernière glaciation). La figure 3.25 montre l'« anomalie de température » c'est-à-dire l'écart de température par rapport à la moyenne des années 1961 à 1990, en fonction du temps, pour la période 1850-2012. Une version plus récente est visible à la figure 3.26, avec une courbe de lissage montrant la tendance moyenne sans équivoque.

Mais on mesure également que si la température de la troposphère augmente, celle de la stratosphère diminue (figures 3.27a et 3.27b), comme on peut le prédire avec un bilan énergétique simple (voir section 3.2.8).

Il s'agit là d'une signature relativement²⁴ ferme de l'origine anthropique du réchauffement. Si ce réchauffement était d'origine uniquement solaire, l'ensemble de l'atmosphère se réchaufferait, comme en témoigne la figure 3.28 en haut à gauche (a). L'effet du forçage dû aux gaz à effet de serre est visible sur la figure du milieu à gauche (c), où la troposphère se réchauffe, mais la basse stratosphère se refroidit. Les volcans, en insufflant des quantités de dioxyde de

23. Le modèle du gaz parfait a pour hypothèses que les molécules constituant le gaz sont ponctuelles et n'interagissent entre elles que par collisions élastiques. L'air atmosphérique obéit à ces conditions avec une bonne approximation.

24. Même s'il y a quelques limites, car les observations ne sont pas aussi nombreuses dans la stratosphère que dans la basse troposphère, et d'autres phénomènes sont susceptibles de la refroidir. . .

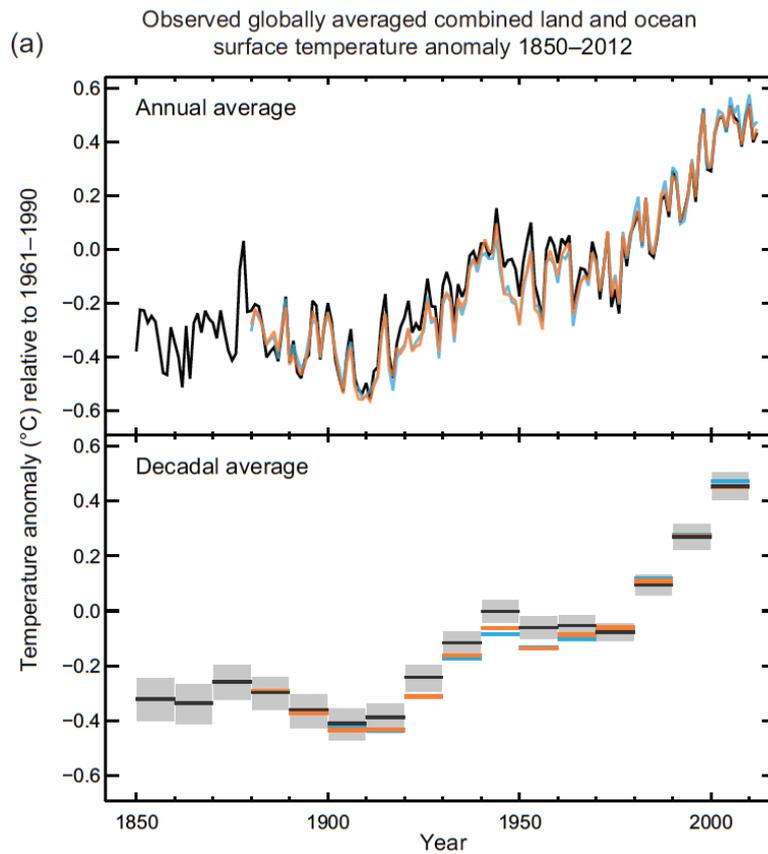


FIGURE 3.25 – Anomalies moyennes observées de la température de surface (terres et océans) entre 1850 et 2012 à partir de trois jeux de données, par rapport à la période 1961–1990. En haut, moyennes annuelles; en bas, moyennes décennales. Source : GIEC (2013). © Intergovernmental Panel on Climate Change.

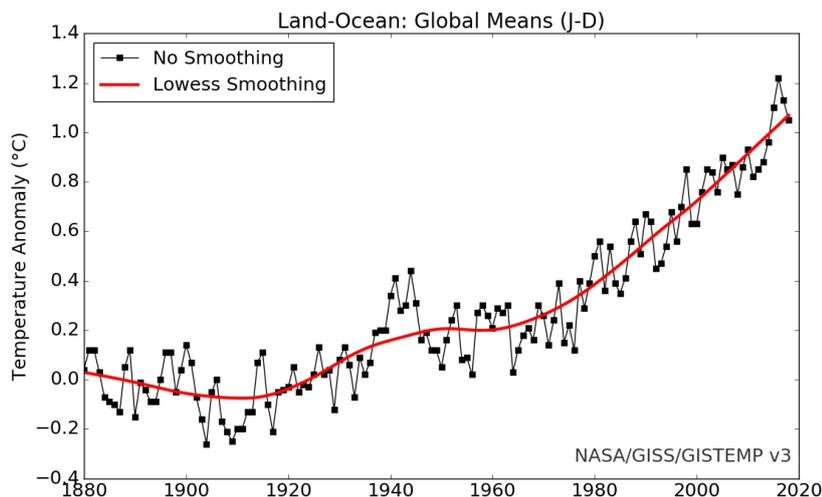


FIGURE 3.26 – Anomalies moyennes observées de la température de surface (terres et océans) entre 1880 et 2018 à partir de trois jeux de données, par rapport à la période 1951–1980. Les points reliés montrent les données année par année tandis que la courbe rouge est une moyenne « lissée » et glissante sur une période de 20 ans. Source : https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/customize.html

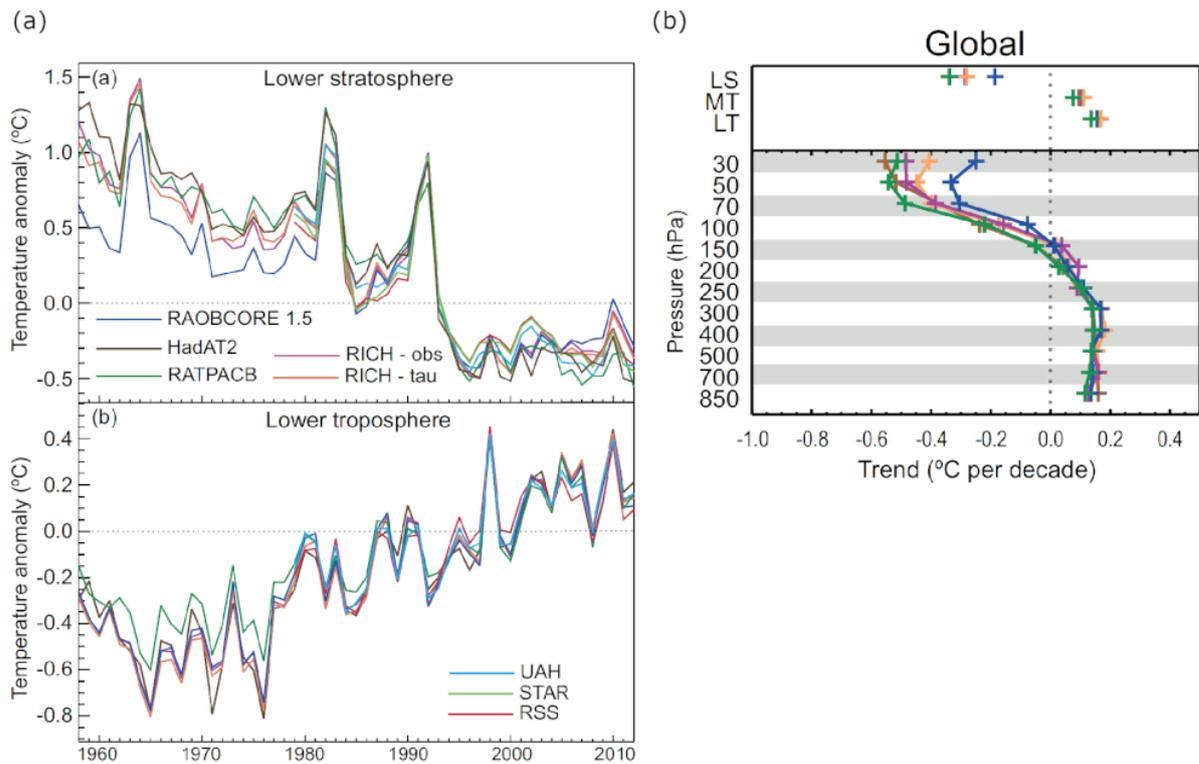


FIGURE 3.27 – Température mesurée dans la stratosphère. (a) Anomalie de température moyenne annuelle dans la basse stratosphère (en haut) et dans la basse troposphère (en bas), par rapport à la période 1981–2010, et ce pour différents lots de données. (b) Profil de température vertical moyen pour le globe sur une période 1958–2010, obtenu à partir de radiosondes, pour différents lots de données. L'échelle verticale est en pression : 850 hPa correspond à peu près à 2 km d'altitude, 200 hPa environ à 12 km d'altitude qui est la limite entre la troposphère et la stratosphère, et 20 hPa pour environ 23 km d'altitude. Source : GIEC (2013). © Intergovernmental Panel on Climate Change.

souffre dans la stratosphère qui se transforment en aérosols (gouttelettes d'acide sulfurique) qui réfléchissent le rayonnement solaire, entraînent le réchauffement de celle-ci, au détriment de la troposphère qui voit alors moins de rayonnement solaire et se refroidit (figure 3.28 en haut à droite (b)).

3.3.3 Évolution de la proportion de gaz à effet de serre

L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe est corrélée avec l'augmentation de la proportion de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (voir la figure 3.29).

En 2018, la concentration du CO_2 dans l'atmosphère est de 405 ppm. Cette concentration s'accroît d'environ 2 ppm chaque année ²⁵.

L'atmosphère est composée essentiellement d'azote (à 78 % en nombre) et d'oxygène (à 21 % en nombre). Et de plein d'autres gaz (dont les gaz à effet de serre) dans le 1 % restant (voir le tableau 3.1). La masse molaire de l'azote (N_2) est de 28 g/mol, celle de l'oxygène (O_2) est de 32 g/mol. La masse molaire moyenne de l'air atmosphérique est donc : $M_{\text{air}} = 0,21 \times 32 + 0,78 \times 28 = 29$ g/mol. La masse totale de l'atmosphère est de $5,148 \cdot 10^{18}$ kg. La masse molaire du CO_2 est de 44 g/mol.

Une ppm de CO_2 correspond à une molécule de CO_2 pour 10^6 molécules d'air. Ou bien à 1 mole de CO_2 pour 10^6 moles d'air. Ce qui fait 44 g de CO_2 pour $29 \cdot 10^6$ g d'air. Donc pour la masse totale de l'atmosphère, on a : $7,81 \cdot 10^{12}$ kg = $7,81 \cdot 10^9$ t de CO_2 . Ou 7,81 Gt de

25. Voir le site de l'observatoire du Mauna Kea qui fait ces mesures depuis le début des années soixante-dix : <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> et https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_gr.html.

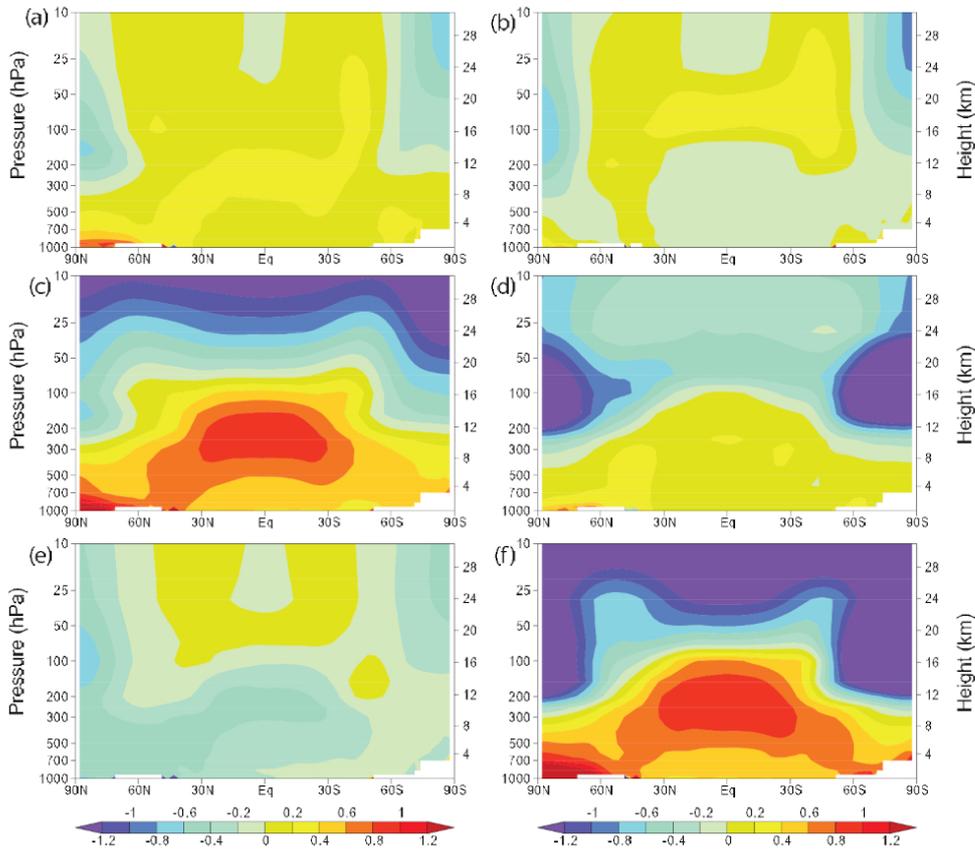


FIGURE 3.28 – Variation des températures atmosphériques moyennes entre 1890 et 1999 en degrés par siècle simulée pour : (a) le forçage solaire, (b) les volcans, (c) les gaz à effet de serre, (d) les variations d’ozone troposphérique et stratosphérique, (e) les sulfates et (f), la somme de tous les forçages. L’échelle verticale est en hPa à gauche et en km à droite. Source : GIEC (2007). © Intergovernmental Panel on Climate Change.

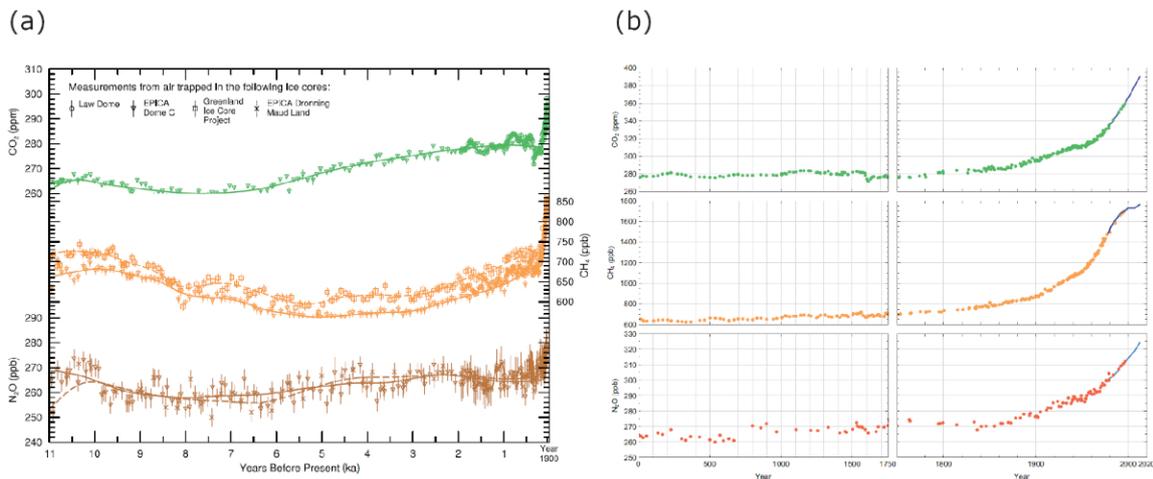


FIGURE 3.29 – Évolution de la proportion des gaz à effet de serre : CO_2 , CH_4 et N_2O . *ppm* signifie « partie par million » soit une molécule pour 10^6 molécules du mélange « air » ; *ppb* signifie partie par milliard, soit une molécule pour 10^9 molécules d’air. (a) Holocène. Reconstruction à partir des carottes de glace (Antarctique). Source : GIEC (2013), p. 483. (b) Période historique. Points colorés : mesures depuis les carottes de glace, traits bleus : mesures atmosphériques directes. Source : GIEC (2013), p. 493. © Intergovernmental Panel on Climate Change.

CO₂ (1 Gt = une gigatonne, un milliard de tonnes). On peut aussi exprimer cela en masse de carbone, comme c'est parfois le cas dans la littérature. Comme une mole de carbone pèse 12 g, 1 g de CO₂ équivaut à $12/44 = 0,273$ g de carbone. Ainsi, 1 ppm, c'est 7,81 Gt de CO₂ ou bien 2,13 Gt de carbone.

Avant l'ère industrielle, l'atmosphère recelait 280 ppm de CO₂. Aujourd'hui, elle en contient 140 ppm de plus. Qui correspondent donc à 300 Gt de carbone ou 1093 Gt de CO₂ équivalent. L'humanité a rejeté 680 Gt de carbone²⁶ entre 1850 et 2021 (Evans 2021). Elle rejette environ 44 milliards de tonnes de CO₂ chaque année (et ce chiffre va en augmentant), soit environ 12 Gt de carbone.

Mais le compte n'y est pas entre les ppm dans l'atmosphère et ce que nous avons rejeté (Treiner 2015). En fait plus de la moitié du CO₂ que nous émettons est absorbé dans des « puits », qui sont principalement les océans, et les sols comprenant la végétation. Ces deux puits se partagent les 57 % du CO₂ émis²⁷. « Seulement » 43 % se retrouve ainsi dans l'atmosphère. Donc $0,43 \times 680 = 293$ Gt de C. On retrouve bien nos 140 ppm en plus (300 Gt de C).

L'augmentation de la quantité des gaz à effet de serre est donc causée par les activités humaines.

Oxygène et dioxyde de carbone dans l'atmosphère

On peut mesurer l'évolution de la quantité d'oxygène dans l'atmosphère. Ce n'est pas une mesure aisée, car comme il y en a beaucoup, contrairement au dioxyde de carbone, les petites variations sont noyées dans la masse : il s'agit de mesurer des variations de l'ordre du millièmième. On mesure²⁸ plus facilement le rapport O₂/N₂.

La figure 3.30 reporte une telle mesure, effectuée à l'observatoire du Mauna Loa à Hawaï. La quantité mesurée est le rapport O₂/N₂ relativement à une référence :

$$\delta\left(\frac{\text{O}_2}{\text{N}_2}\right) = \left[\frac{\left(\frac{\text{O}_2}{\text{N}_2}\right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{\text{O}_2}{\text{N}_2}\right)_{\text{référence}}} - 1 \right] \cdot 10^6 \quad (3.44)$$

La référence est de l'air échantillonné dans les années 1985 et stocké en laboratoire²⁹. L'unité de mesure de cette quantité est le « per meg » qui indique un changement du rapport O₂/N₂ : si l'échantillon a le même rapport O₂/N₂ que la référence, alors δ vaut zéro ; si le rapport est plus petit que celui de la référence, alors $\delta < 0$. Actuellement, comme le montre la figure 3.30, $\delta\left(\frac{\text{O}_2}{\text{N}_2}\right) < 0$. En 2019, une variation de -700 per meg indique que le rapport O₂/N₂ est 0,000700 fois plus petit depuis les années 1980. Un « per meg » de moins indique une molécule d'oxygène sur 10⁶ en moins. Ou encore une molécule d'oxygène en moins sur $4,8 \cdot 10^6$ molécules d'air, soit 0,21 ppm.

26. Le rapport du GIEC exprime cette quantité en PgC, soit en péta-grammes de carbone. On se demande pourquoi les climatologues utilisent ces unités -- gramme ou tonne -- qui ne sont pas dans le système international, plutôt que des téra-kilogrammes : Tkg.

27. Sur les émissions de carbone (par l'intermédiaire du CO₂), 68 % provient de la combustion des carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz) et de la production de ciment, le reste, 32 % provient de la déforestation. 43 % du total se retrouve dans l'atmosphère ; les océans, les sols et la végétation absorbent 57 % de nos émissions.

28. Par exemple par des techniques d'interférométrie basées sur des variations relatives de l'indice de réfraction de l'air (Keeling *et al.* 1998).

29. Voir : <http://scripps2.ucsd.edu/units-and-terms.html>.

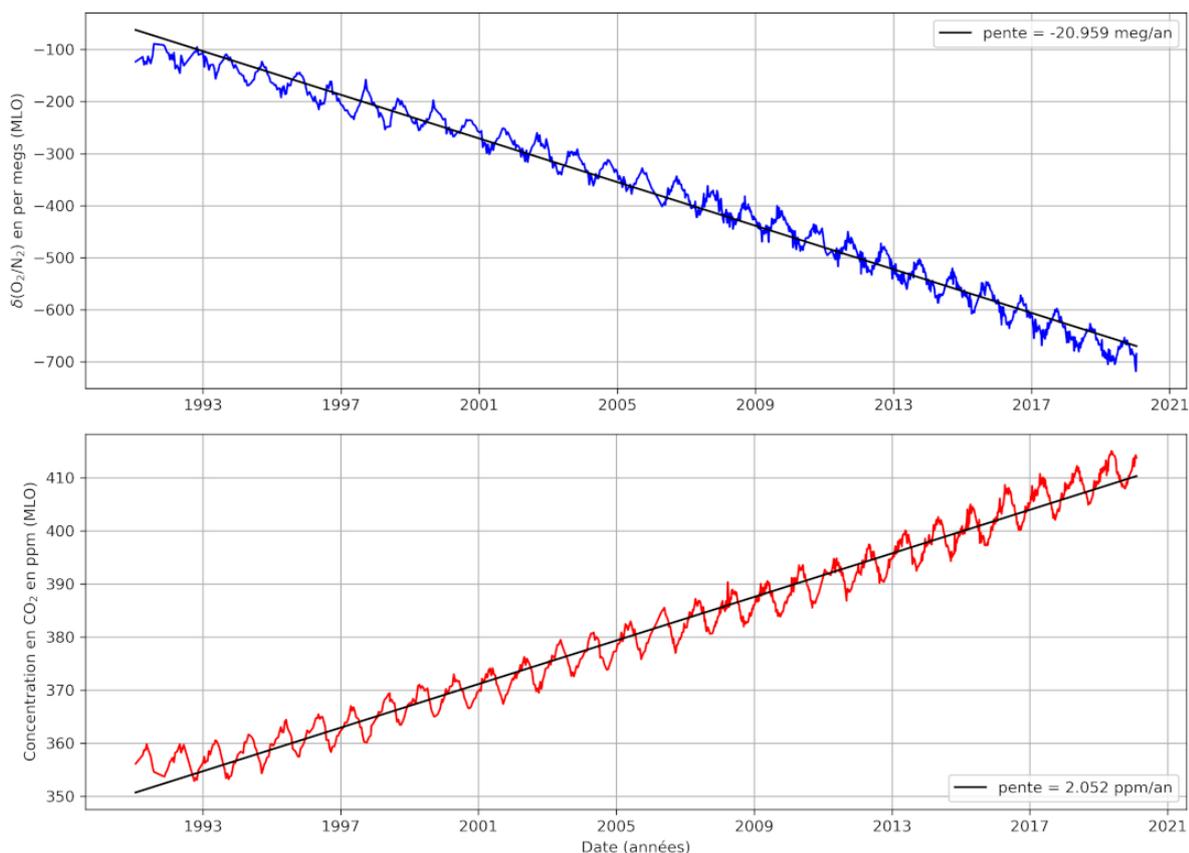


FIGURE 3.30 – Évolution des concentrations de dioxygène et de dioxyde de carbone dans l’atmosphère mesurées à l’observatoire du Mauna Loa (MLO – Hawaï). Les données sont issues de la page : <http://scrippso2.ucsd.edu/osub2sub-data.html>.

Une variation du rapport O_2/N_2 peut indiquer une variation de la quantité d’oxygène et/ou d’azote. L’air contient environ 20,9 % (en nombre) de dioxygène et 78,1 % de diazote. Comme l’air contient beaucoup plus d’azote que d’oxygène, et parce que les sources et les puits naturels de l’azote sont beaucoup plus petits que ceux de l’oxygène, les variations du rapport O_2/N_2 reflètent essentiellement les variations de O_2 ³⁰.

Le nombre de molécules d’oxygène diminue ainsi d’environ 21 per meg par an.

Sachant que la masse totale de l’atmosphère est de $5,14 \cdot 10^{18}$ kg, et que la masse molaire moyenne de l’air vaut $29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, l’atmosphère contient $1,77 \cdot 10^{20}$ moles de gaz. Le dioxygène (20,9 % en nombre) compte donc pour $3,7 \cdot 10^{19}$ moles. Ainsi, ce sont $(21 \cdot 10^{-6}) \times (3,7 \cdot 10^{19}) = 7,8 \cdot 10^{14}$ moles de dioxygène qui disparaissent chaque année.

Chaque année environ $9,5 \text{ GtC} = 35 \text{ GtCO}_2$ sont rejetées par la combustion d’énergies fossiles (voir la figure 4.46b, p. 207). Cela correspond à un nombre de moles de CO_2 de $7,9 \cdot 10^{14}$ (dont 45 % se retrouve dans l’atmosphère).

30. La production d’oxygène par les plantes durant la phase de photosynthèse diurne compense la consommation d’oxygène durant la phase de respiration, nocturne. Le bilan est donc nul. On observe néanmoins à la figure 3.30 une variation saisonnière à la fois du taux d’oxygène et de celui de dioxyde de carbone, en opposition : la production de CO_2 est maximale au printemps, minimale à l’automne, et inversement pour l’ O_2 . À l’échelle de la planète lorsque la photosynthèse l’emporte sur la respiration (au printemps-été), la concentration en CO_2 diminue au niveau planétaire. Inversement, la concentration en CO_2 diminue durant la période automne-hiver lorsque la respiration l’emporte sur la photosynthèse.

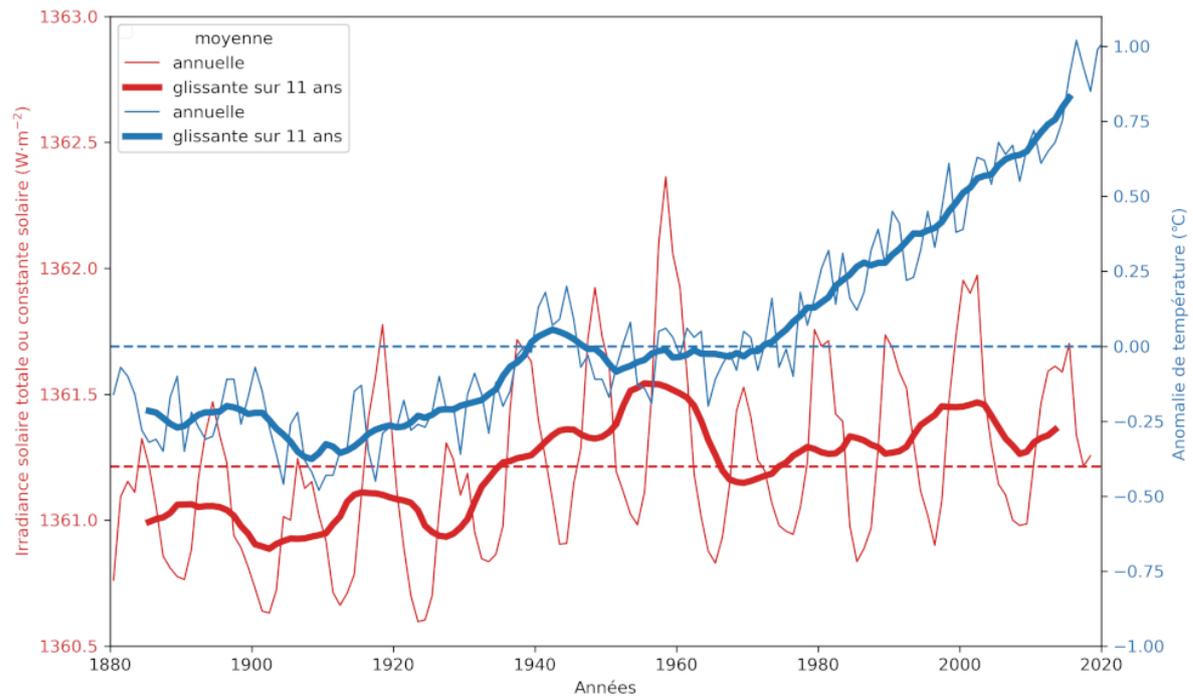


FIGURE 3.31 – Anomalie de température moyenne de la basse troposphère (GISTEMP v4 – <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>) par rapport à la période de référence 1951–1980 et irradiance solaire totale (données SATIRE-T, tirées de https://spot.colorado.edu/~kopp/TSI/#TSI_data_record). Les deux jeux de données sont représentés entre 1880 et 2020, avec une moyenne annuelle et une moyenne glissante sur 11 ans. Le trait en pointillés rouge indique la moyenne de l’irradiance solaire totale sur la période considérée ; le trait en pointillés bleu indique l’origine de l’anomalie de température considérée. Données : https://climate.nasa.gov/climate_resources/189/graphic-temperature-vs-solar-activity/.

Le rapport :

$$\frac{\text{Nombre de moles d'O}_2 \text{ qui disparaissent}}{\text{Nombre de moles de CO}_2 \text{ qui sont générées}} = \frac{7,8 \cdot 10^{14}}{7,9 \cdot 10^{14}} \sim 1$$

permet d’en déduire que cela correspond à peu près à la perte d’oxygène nécessaire pour la combustion de produits carbonés³¹ (énergies fossiles).

3.3.4 Réchauffement et irradiance solaire

La source de l’énergie du climat étant le Soleil, il est légitime de regarder si l’évolution de la puissance surfacique solaire reçue (irradiance solaire ou constante solaire) ne pourrait pas expliquer le réchauffement de la planète. L’irradiance solaire fluctue selon un cycle d’une période d’environ 11 ans, qui est expliqué par l’interaction entre le champ magnétique solaire et les écoulements qui ont lieu dans les couches superficielles en lien avec la rotation de l’étoile (Strugarek *et al.* 2017). Néanmoins, les variations de cette « constante solaire » sont de moins de 0,1 %, et ne peuvent en aucun cas expliquer le réchauffement troposphérique terrestre observé. De surcroît, la corrélation visible à la figure 3.31 entre anomalie de température de l’atmosphère et irradiance solaire jusqu’au milieu du XX^e siècle disparaît ensuite.

31. La combustion d’un alcane en C_n nécessite $(3n + 1)/2$ molécules de O_2 et produit n molécules de CO_2 (voir l’équation de combustion (4.24) p. 205). Le rapport O_2/CO_2 varie ainsi entre 2 (pour $n = 1$) et $3/2$ (pour $n \rightarrow +\infty$).

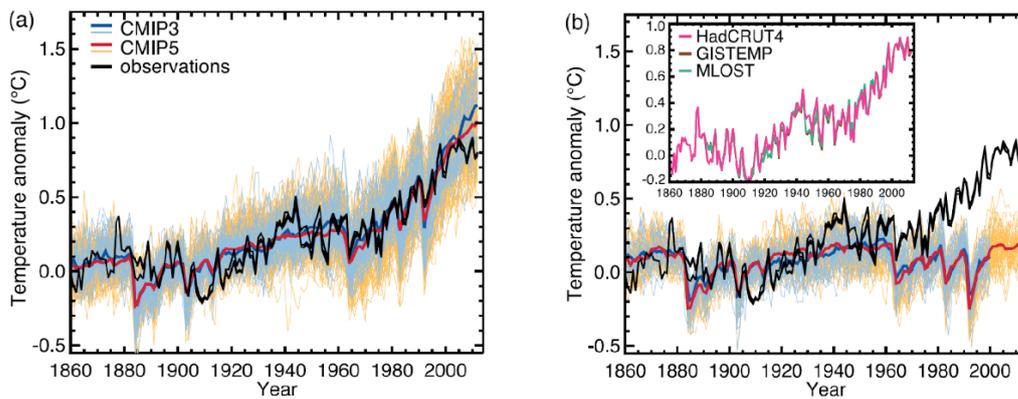


FIGURE 3.32 – Trois estimations observationnelles de l’anomalie de température de surface moyenne globale (courbes noires), par rapport à la période 1880–1919, comparées à deux modèles dont les moyennes sont données en bleu et rouge. (a) Modèles avec le forçage naturel et anthropique (gaz à effet de serre et aérosols). (b) Modèle avec le forçage naturel seulement (activité solaire, éruptions volcaniques...). Source : GIEC (2013). © Intergovernmental Panel on Climate Change.

3.3.5 Origine anthropique

Mais les gaz à effet de serre sont-ils pour autant responsables de l’augmentation de la température moyenne ?

Cette question a fait couler beaucoup d’encre. Les climatologues répondent désormais avec certitude que oui, la corrélation est causale, le réchauffement climatique est le résultat de l’augmentation de la quantité de gaz à effet de serre dans l’atmosphère, car ils comprennent parfaitement celui-ci.

Plusieurs indices concordants apportent une réponse positive à la question :

- Les simulations climatiques peuvent se permettre d’« éteindre » certains phénomènes pour en comprendre l’importance dans le résultat obtenu. Ainsi, en ne prenant pas en compte les gaz à effet de serre émis par les êtres humains, elles ne parviennent pas à reproduire les observations des dernières décennies. La figure 3.32a montre que les observations de l’anomalie de température auxquelles on superpose différents modèles reproduisent relativement bien ce que l’on observe. Ces modèles incluent le forçage anthropique, c’est-à-dire principalement l’augmentation des gaz à effet de serre dans l’atmosphère. Si on supprime cette partie dans ces modèles, on obtient la figure 3.32b sur laquelle les modèles divergent par rapport aux observations à partir des années 1970.
- L’irradiance solaire ne peut expliquer le réchauffement observé (figure 3.31).
- Le refroidissement observé de la stratosphère ne peut pas être expliqué par autre chose qu’une augmentation de concentration des gaz à effet de serre (voir section 3.3.2).
- Par ailleurs, la rapidité de la variation de la température est sans précédent dans l’histoire géologique. La concentration en CO_2 augmente de plus de 2 ppm par an, tandis que la température moyenne s’accroît de 0,2 °C chaque décennie (GIEC 2018).

3.3.6 Le niveau des océans

En plus de l’augmentation de la température moyenne de l’atmosphère à la surface de la Terre, on observe une rapide montée du niveau moyen des océans (voir figure 3.33) : $+ 20 \pm 0,5$ cm en 117 ans (1901–2018), avec un taux moyen annuel de $+ 3,7 \pm 0,5$ mm/an entre 2006 et 2018. Ce taux s’accroît, il était de 1,3 mm/an entre 1901 et 1971, de 1,9 mm/an entre 1971 et 2006.

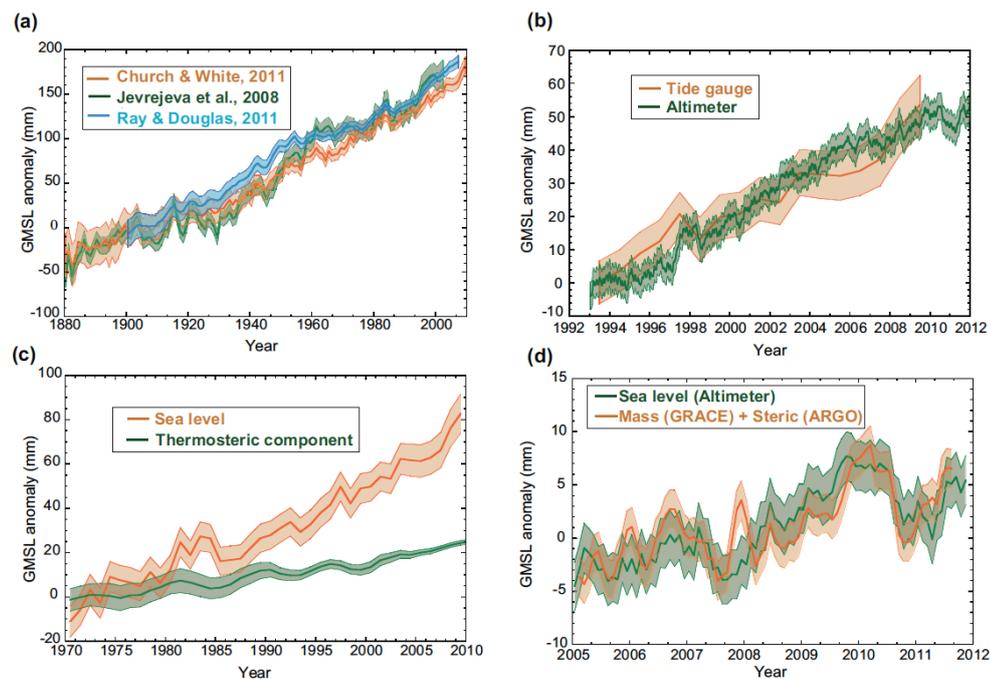


FIGURE 3.33 – Évolution du niveau moyen des mers sur différentes périodes. Source : GIEC (2013), p. 287. © Intergovernmental Panel on Climate Change.

Du fait de leur grande masse et de leur inertie thermique, les océans peuvent emmagasiner de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur. Ils vont ainsi absorber 91 % de l'excédent d'énergie (voir figure 3.34) dû au réchauffement, tandis que les surfaces continentales en récupèrent environ 5 %, la fonte des glaces en nécessite 3 % et l'atmosphère en absorbe 1 %. En conséquence de quoi l'eau se réchauffe et se dilate; d'où une expansion thermique et donc une augmentation du niveau des mers. Ce phénomène contribue pour 50 % de l'augmentation du niveau des océans. Le reste de l'augmentation du niveau des mers se décompose en :

- 22 % provenant de la fonte des glaciers ;
- 20 % provenant de la fonte des calottes polaires (Groenland et Antarctique – la banquise arctique flottant sur la mer ne contribue pas à la montée des eaux même si elle fond) ;
- 8 % provenant des changements dans les stockages d'eau continentaux (lacs...).

L'océan absorbe par ailleurs de grandes quantités de CO_2 , environ 30 % des émissions anthropiques depuis 1870.

3.3.7 Les événements extrêmes

Les événements extrêmes (voir la figure 3.35) sont ainsi qualifiés car leurs paramètres climatiques (température, pression, quantité de précipitations, vitesse du vent...) ont des valeurs qui sont loin des valeurs moyennes (dans le temps et éventuellement dans l'espace).

Par exemple les tempêtes avec des vents violents, les vagues de chaleur avec des températures élevées, les vagues de froid, les inondations, etc. Des « extrêmes » dans une région peuvent ne pas l'être ailleurs : une canicule en France aura une autre définition en Arizona. Ces événements climatiques extrêmes dépendent ainsi de l'endroit où ils ont lieu sur la planète (Yiou 2015).

Jusqu'à récemment il n'était pas possible d'attribuer une cause à un événement climatique ou météorologique isolé. Mais depuis quelques années, les scientifiques sont en mesure de le faire pour des phénomènes extrêmes relativement simples : extrêmes de chaleur et de froid,

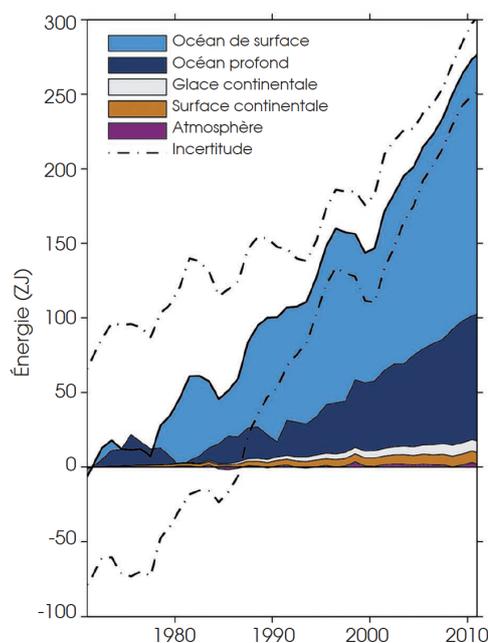


FIGURE 3.34 – Courbe d’accumulation de l’énergie en ZJ (1 zétajoule = 10^{21} J) par rapport à 1971 et calculée entre 1971 et 2010 pour les différentes composantes du système climatique terrestre. Le réchauffement océanique (exprimé ici en tant que changement du contenu de chaleur) domine. L’océan des couches de surface (couleur bleu clair, couche de 0 à 700 m de profondeur) contribue de manière prépondérante. L’océan profond (couleur bleu foncé; couche d’eau en-dessous de 700 m) contribue lui aussi de manière très importante. La fonte de la glace continentale (en gris clair), les surfaces continentales (en orange) et l’atmosphère (violet) contribuent de manière bien moins importante. L’incertitude des estimations est représentée en contour discontinu. Tiré de Speich *et al.* (2015). © Océan et Climat, <https://ocean-climate.org/>

précipitations extrêmes et sécheresse³². Ce domaine émergent de la science du climat s’appelle *l’attribution des événements extrêmes*.

Par exemple, la vague de chaleur qui a frappé l’ouest du Canada en juin 2021, avec des records de températures comme à Lytton à plus de 50° de latitude nord (latitude de Lille !) frôlant les 50 °C (figure 3.36).

La science de l’attribution conclut notamment que (Philip *et al.* 2021) :

- « Sur la base des observations et la modélisation, l’apparition d’une vague de chaleur avec des températures maximales quotidiennes telles qu’observées dans la zone 45-52 ° N, 119-123 ° W, était quasiment impossible sans un changement climatique d’origine humaine. »
- « Les températures observées étaient si extrêmes qu’elles se situent bien au-delà de la fourchette des températures historiquement observées. Il est donc difficile de quantifier avec certitude la rareté de l’événement. Dans l’analyse statistique la plus réaliste, l’événement est estimé à environ 1 sur 1000 ans dans le climat actuel. »

La fréquence et l’intensité de ces événements dans une région donnée, peut, quant à elle, être évaluée d’un point de vue statistique. Ainsi, les scientifiques montrent que la fréquence des vagues de chaleur augmente, ainsi que leur intensité; inversement, les vagues de froid ont tendance à diminuer. Pour les précipitations intenses et les sécheresses, cela dépend des régions.

32. Voir le site : <https://www.worldweatherattribution.org/>

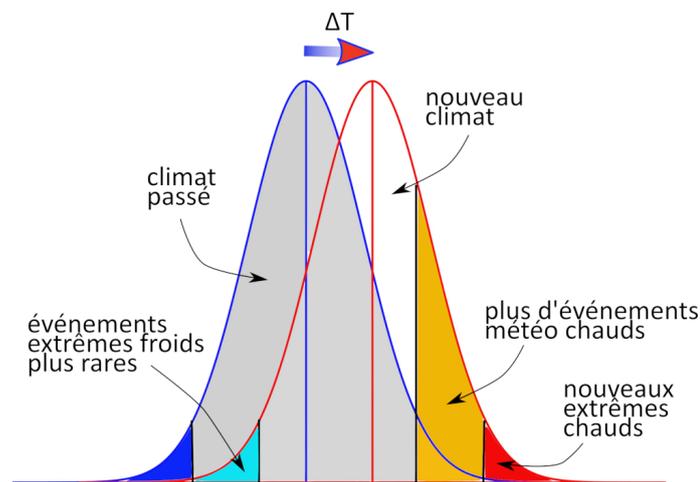


FIGURE 3.35 – Illustration de l'augmentation statistique des événements extrêmes dans un climat en moyenne plus chaud.

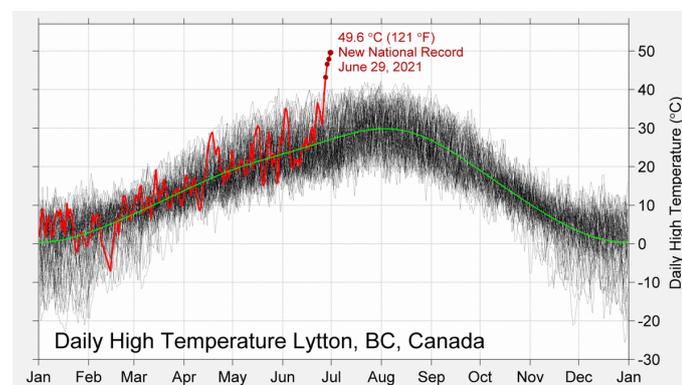


FIGURE 3.36 – Températures quotidiennes à Lytton, Canada (latitude : 50 ° 14' N), de 1880 à 2021, les quatre nouveaux records enregistrés les 26-29 juin 2021 étant indiqués par des points rouges. Source : Berkeley Earth, <https://berkeleyearth.org/the-pacific-northwest-heatwave-in-context/>.

La proportion de cyclones de forte intensité a augmenté depuis 40 ans à cause du réchauffement climatique. La fréquence de ces événements ne semble pas varier significativement à l'échelle du siècle³³.

3.3.8 En résumé...

On peut résumer de manière factuelle le réchauffement climatique par les données suivantes (GIEC 2021) :

- Température moyenne de l'atmosphère à la surface de la Terre due à l'effet de serre, sans réchauffement : $T_{\text{surf}} \simeq +15 \text{ °C}$.
- Anomalie moyenne de la température de l'atmosphère à la surface de la Terre : $\Delta T_{\text{effet de serre}} = +1,09^{+0,11}_{-0,14} \text{ °C}$ sur la période 2011–2022 par rapport à 1850–1900.

33. Contrairement aux idées reçues, le réchauffement de la surface des océans n'entraîne pas d'augmentation du nombre de cyclones. Les simulations climatiques montrent que le nombre global de cyclones tropicaux devrait rester stable, voire enregistrer une légère baisse à l'avenir. Elles montrent, en revanche, une tendance à l'intensification des phénomènes les plus violents avec le réchauffement climatique. Il y a deux raisons qui peuvent l'expliquer : le cyclone peut pomper plus d'énergie dans l'océan du fait de la hausse de la température de surface ; une atmosphère plus chaude contient plus d'humidité, ce qui génère davantage de pluies lors des événements extrêmes. D'ici à la fin du siècle, on s'attend à des phénomènes plus puissants, associés à des pluies plus intenses, d'environ 20 % supérieures aux moyennes actuelles. (Guaric 2020).

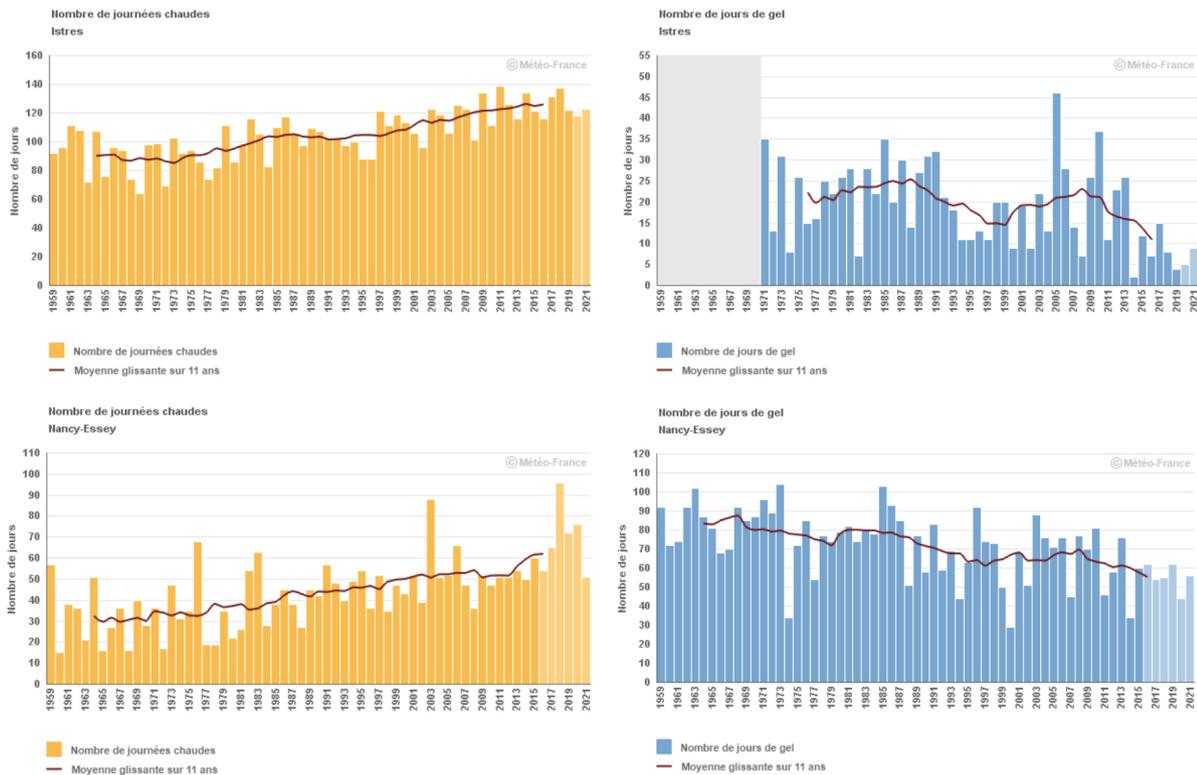


FIGURE 3.37 – Quelques mesures de températures moyennes en France depuis 1959 par Météo France à Nancy-Essey et Istres. (a) Évolution du nombre annuel de journées estivales ($T > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le nombre de journées chaudes (température maximale supérieure à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) est en augmentation sur toute la métropole avec des nuances régionales. Cette hausse, évaluée sur la période 1961-2018, est souvent comprise entre quatre et six jours par décennie avec un minimum de un jour par décennie sur le littoral Nord Atlantique et un maximum de huit jours par décennie sur les régions méridionales. (b) Évolution du nombre annuel de journées de gel. Le nombre de jours de gel observé en France est assez différent selon les régions et présente de fortes variations d'une année sur l'autre. Sur la période 1961-2010, une diminution est observée sur toutes les régions : les diminutions sont moins marquées sur les zones côtières où le nombre annuel de jours de gel est faible, les diminutions les plus fortes sont observées dans le nord-est et le centre du pays; dans les autres régions la baisse est comprise entre deux et quatre jours par décennie. Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>. © Météo France.

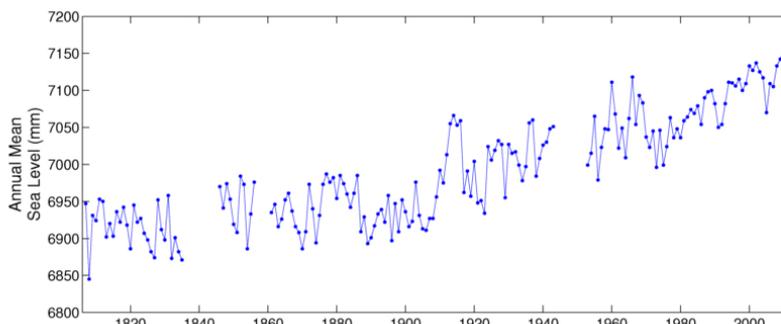


FIGURE 3.38 – Moyenne annuelle du niveau de la mer à Brest depuis le début du XIX^e siècle. Source : "Tide Gauge Data", accédé le 04/10/2022, <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>. © Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL).

L'anomalie est plus importante à la surface des continents (1,59 °C) qu'à la surface des océans (0,88 °C).

- Taux actuel (2020) d'augmentation de l'anomalie de température moyenne à la surface de la Terre : environ +0,22 °C/décennie.
- Effet de serre « normal » $\Delta P = +159 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (puissance stockée dans l'atmosphère, les continents et les océans).
- Effet de serre additionnel (2020) $\Delta P_{\text{réchauffement}} = +2,72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Concentration de CO₂ dans l'atmosphère à l'époque pré-industrielle : 280 ppm.
- Concentration de CO₂ dans l'atmosphère aujourd'hui (2019) : 410 ppm.
- Taux d'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère : environ + 2 ppm/an.
- Niveau des océans : + 20 cm en 117 ans (1901–2018), taux = 3,7 mm/an (2006–2018).

3.3.9 Et chez nous en France ?

On observe les effets du réchauffement climatique de manière locale, par exemple en France. Ainsi le nombre de journées chaudes tend à augmenter depuis plusieurs décennies, tandis que le nombre de jours de gel diminue (figure 3.37). Les mesures de hauteurs moyennes de l'océan Atlantique à Brest depuis près de deux siècles montrent également une augmentation (figure 3.38). Les mesures d'enneigement, par exemple au col de Porte dans le massif de la Chartreuse en Isère, à 1325 m d'altitude, montrent une diminution du nombre de jours d'enneigement chaque année (figure 3.39).

Les massifs montagneux, en particulier les Alpes, sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique. Il est facile d'en apprécier les conséquences dès que l'on arpente régulièrement la haute montagne. Ainsi les glaciers fondent à vue d'œil, comme en témoignent les photos du glacier Blanc dans le massif des Écrins³⁴ sur les figures 3.40a à 3.40c ; les mesures effectuées traduisent cela quantitativement à l'aide, notamment, des bilans de masse (figure 3.40c). Le bilan de masse d'un glacier consiste à mesurer l'accumulation des précipitations (hivernales) sous forme solide transformée en hauteur d'eau, à laquelle on retranche la masse de glace (transformée en hauteur d'eau) perdue par ablation (estivale).

On observe également des conséquences plus lointaines du réchauffement climatique, comme la progression vers le nord ou bien en altitude en montagne de certaines espèces de plantes ou d'animaux. Par exemple, la chenille processionnaire colonise toujours plus de territoires vers le nord (Roques 2017).

3.4 Paléoclimatologie

La paléoclimatologie est l'étude des climats du passé (figure 3.41). Elle permet de comprendre l'évolution de la Terre, mais également de mieux comprendre le climat actuel, et notamment son évolution vers un réchauffement. Elle permet également de valider les modèles climatiques, car les climats du passé ont laissé des traces observables, on peut donc quantifier un certain nombre de paramètres en remontant dans le temps.

34. Voir par exemple : <http://www.ecrins-parcnational.fr/actualite/glacier-blanc-perte-record-20-ans-mesures>.

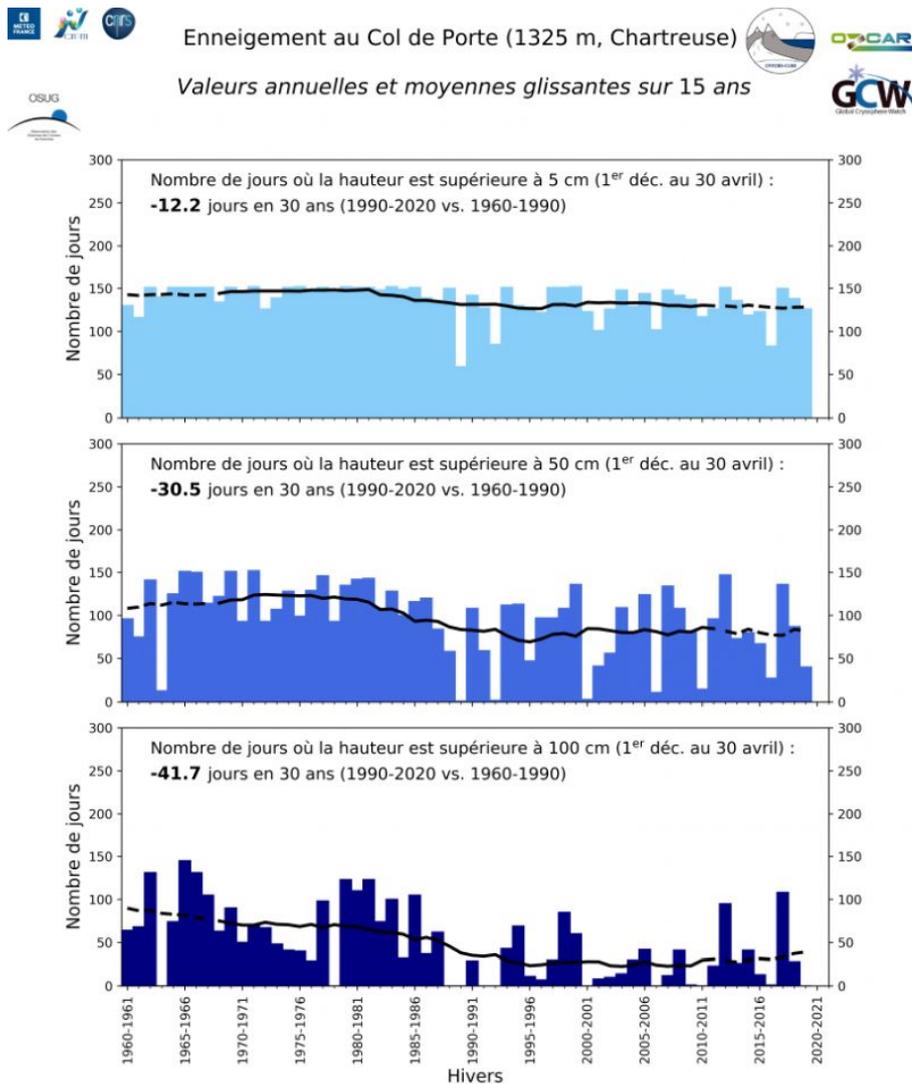


FIGURE 3.39 – Durée d’enneigement au col de Porte (1325 m, massif de Chartreuse). En 30 ans (1990–2020) : les périodes où la hauteur de neige était supérieure à 5 cm se sont réduites de 12,2 jours ; supérieure à 50 cm, de 30,5 jours ; et supérieure à 1 m, de 41,7 jours. Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-montagne-et-glaciers>. © Météo France.

3.4.1 Cycles de Milankovitch

Cette section s’appuie sur Levrard (2005) et Berruyer (2011).

Sur les 25 derniers millions d’années, on explique les variabilités climatiques (alternance de périodes froides (glaciations) d’environ 100 000 ans et de périodes chaudes (interglaciaires) d’environ 10 000 ans) par la variation séculaire des paramètres orbitaux et de la rotation de la Terre (théorie de Milankovitch – voir figure 3.44), perturbés par la présence des autres planètes et de la Lune.

Les paramètres orbitaux pertinents³⁵ (voir figure 3.42) – c’est-à-dire ceux qui entraînent une modification de la quantité de rayonnement solaire (l’insolation) parvenant sur Terre – dans l’analyse du climat sont les suivants :

- La variation de l’excentricité « e » de l’orbite de la Terre ; elle est actuellement faible (0,017), mais elle varie entre 0 (cercle) et 0,06 (ellipse). L’insolation correspondante varie avec des périodes de 100 000 et 400 000 ans (l’insolation moyenne annuelle est $\propto (1 - e^2)$).

35. On pourra regarder la vidéo sur la page : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-changement-climatique-theorie-milankovitch-prediction-confirmee-60139/>

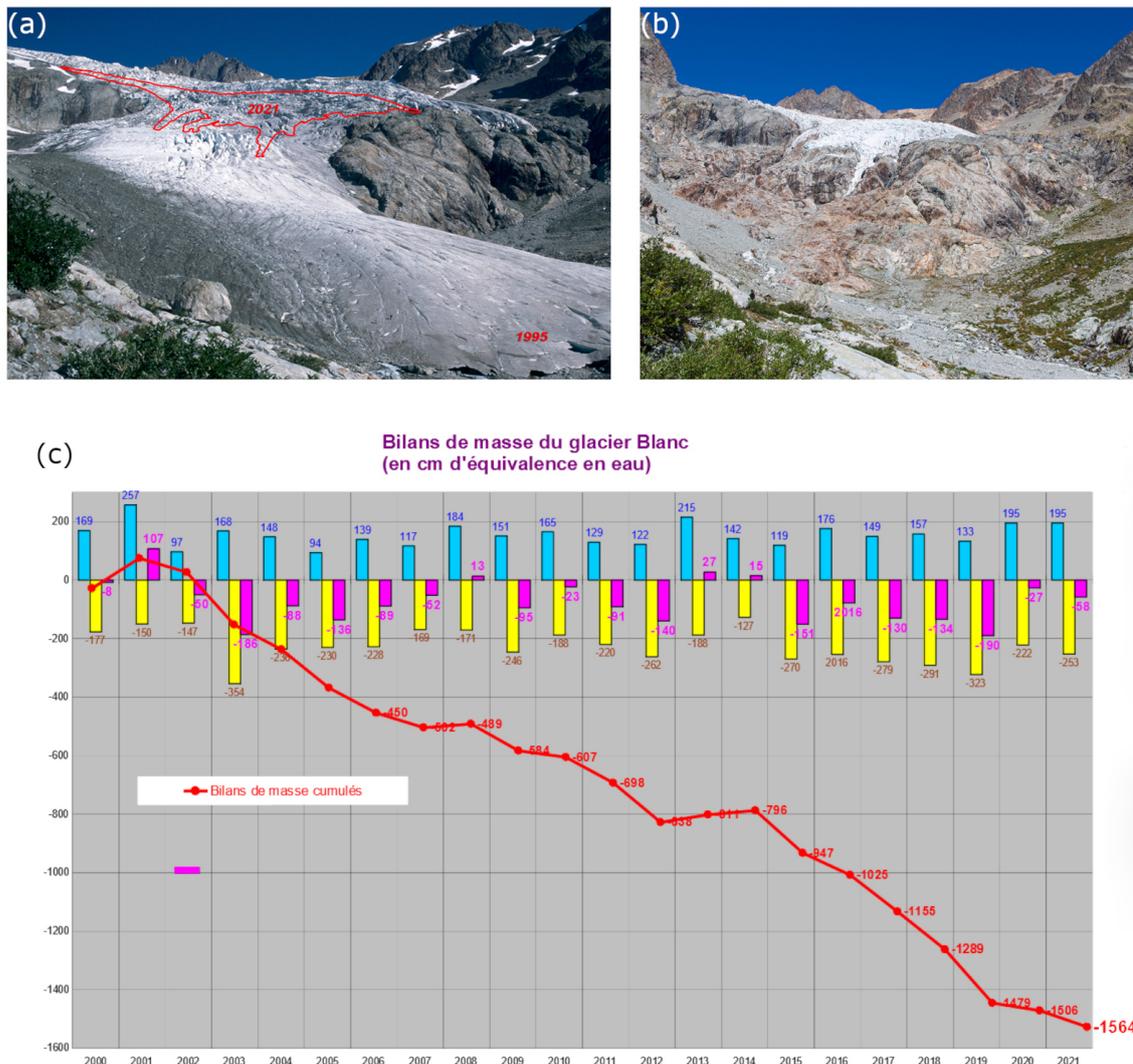


FIGURE 3.40 – Évolution visuelle et quantitative du glacier Blanc, dans le massif des Écrins, entre 1995 et 2021. (a) Photo du glacier Blanc en 1995 avec les contours du glacier en 2021 (crédit : Joël Faure - Parc national des Écrins). (b) Photo du glacier Blanc en 2019 (crédit : Thierry Maillot - Parc national des Écrins). (c) Évolution du bilan de masse (cumulé) du glacier Blanc dans le massif des Écrins entre 2000 et 2021 (crédit : service scientifique du Parc national des Écrins). (a)-(c) © Parc national des Écrins.

- ➔ L'obliquité « ε » qui est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique. Actuellement de $23^{\circ}26'$, cet angle varie à cause des perturbations des autres planètes, et du fait que la Terre est légèrement aplatie aux pôles (comme une toupie, cet axe bouge dans l'espace, c'est la précession des équinoxes, et décrit un cône en 26 000 ans). L'amplitude est d'environ $0,5^{\circ}$ autour de $23,5^{\circ}$, la période principale de ces oscillations est $\sim 41\,000$ ans.
- ➔ La précession climatique « $e \sin \omega$ » où ω est l'angle entre l'équinoxe de printemps et le périhélie, est la combinaison de l'effet de précession de l'axe de rotation et du fait que l'orbite terrestre « tourne » autour du Soleil (figure 3.43) : la position de la Terre sur l'ellipse orbitale au solstice d'été varie dans le temps (actuellement, proche de l'aphélie dans l'hémisphère nord, donc les étés et les hivers au nord sont plus tempérés, avec des étés plus chauds et des hivers plus froids au sud); les périodes sont proches de 19 000 et 23 000 ans.

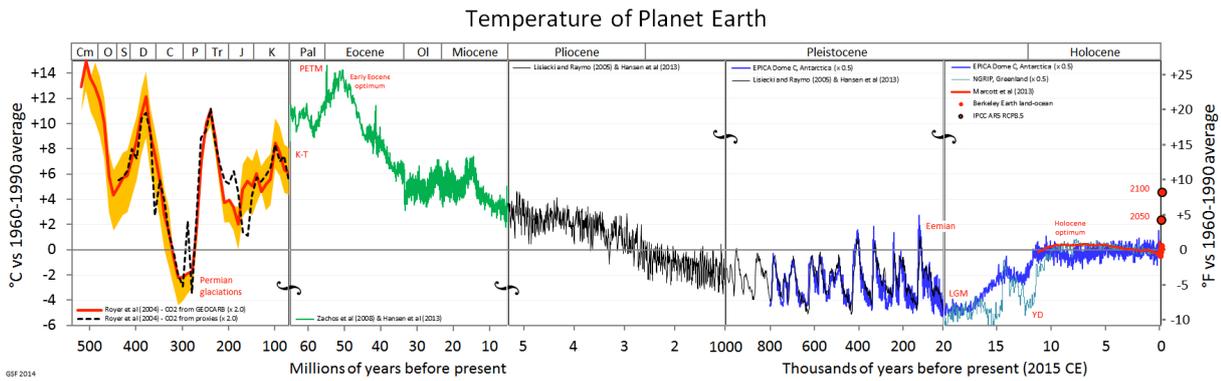


FIGURE 3.41 – Évolution de la température moyenne à la surface de la Terre sur les 500 derniers millions d’années. Source : Wikipédia/Glen Fergus, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaetemps.svg. CC BY-SA.

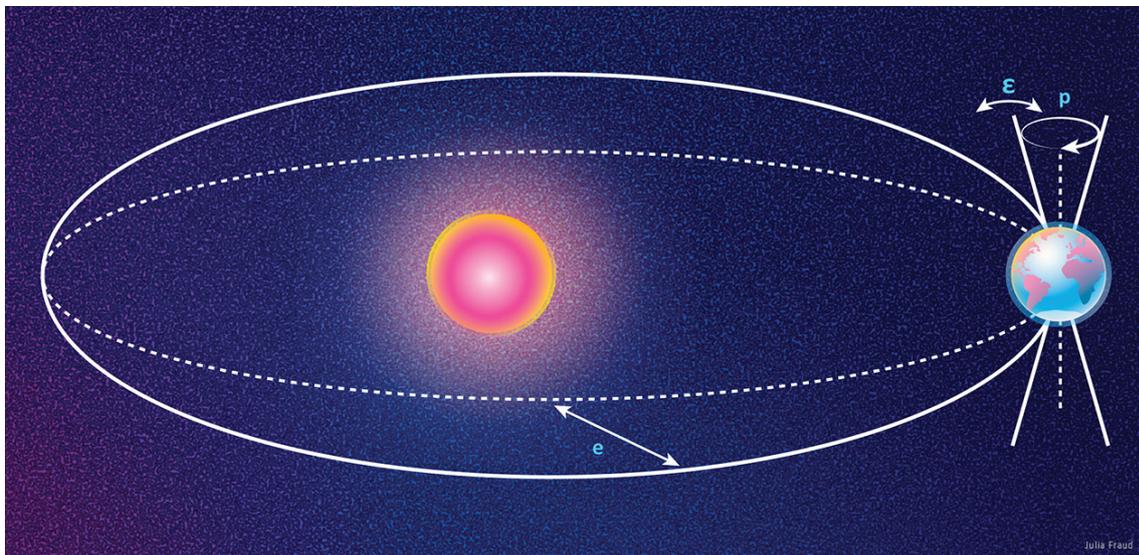


FIGURE 3.42 – Principaux paramètres orbitaux de Milankovitch, la variation de l’excentricité (*e*) de l’orbite terrestre, la précession de l’axe de rotation de la Terre (*P*) et la variation de l’inclinaison de son axe (*ε*), l’obliquité. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

La variation dans le temps de ces paramètres est représentée sur la figure 3.44. L’irradiance solaire calculée à partir de ces paramètres est également indiquée.

3.4.2 Le rapport isotopique, un indicateur du climat

Cette section s’appuie sur Jouzel & Debroise (2014), Ferroir (2012), Albarède & Thomas (2000).

Il y a différents indicateurs qui permettent de reconstruire le climat du passé. Parmi ceux qui permettent d’estimer la température de l’atmosphère passée il y a le rapport isotopique de l’oxygène ainsi défini :

$$R_{18O} = \frac{\text{nombre de noyaux d}^{18}\text{O}}{\text{nombre de noyaux d}^{16}\text{O}} \quad \text{dans un échantillon.}$$

Ces nombres de noyaux sont mesurés avec un spectromètre de masse.

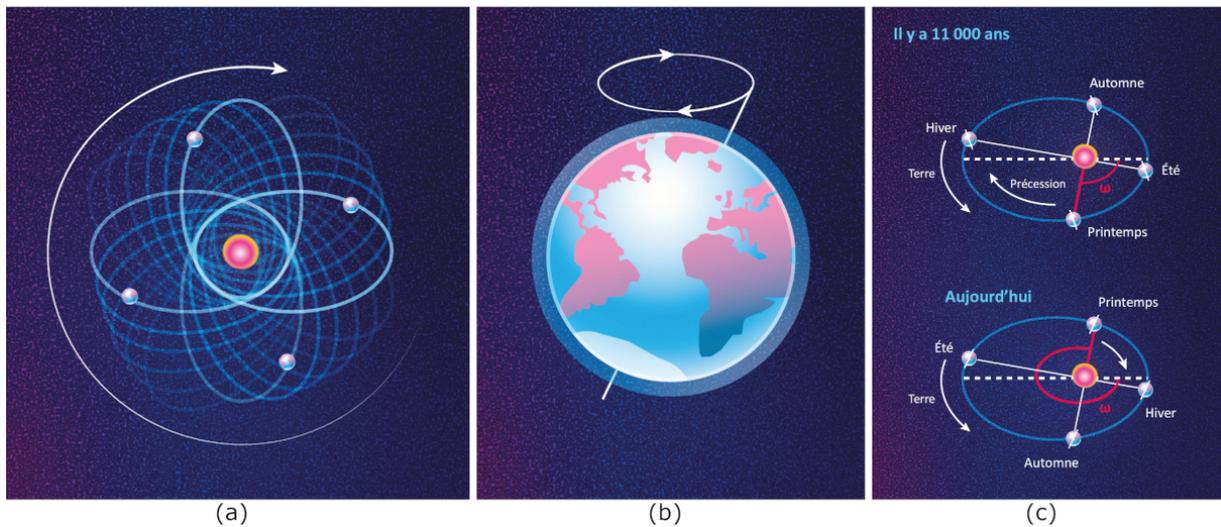


FIGURE 3.43 – Schéma illustrant la précession climatique. (a) Le grand axe de l'orbite de la Terre tourne autour du Soleil. (b) Précession de l'axe de rotation de la Terre. (c) Précession climatique, qui est une combinaison des deux précédents mouvements. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

On définit ensuite la grandeur sans dimension :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{échantillon}}^{18}\text{O} - R_{\text{standard}}^{18}\text{O}}{R_{\text{standard}}^{18}\text{O}} \times 1000$$

en pour mille (‰); $R_{\text{standard}}^{18}\text{O}$ est le rapport isotopique d'un échantillon à la composition isotopique connue (par exemple le *Vienna Standard Mean Ocean Water* qui définit de manière standard la composition isotopique de l'eau). Pour 10 000 molécules d'eau de composition « standard » on trouve 9977 molécules de H_2^{16}O , 3 molécules de H_2^{17}O et 20 molécules de H_2^{18}O . Ces trois isotopes de l'oxygène sont stables.

$$R_{\text{standard}}^{18}\text{O} = \frac{20}{10\,000} = \frac{1}{500} = 0,2 \%$$

Changement d'état dans le cycle de l'eau

Le noyau d' ^{18}O pèse plus lourd que ^{16}O car il possède deux neutrons en plus. La vaporisation de l'eau est un changement de phase endothermique. L'énergie nécessaire pour ce faire est donnée par l'enthalpie (qui est l'énergie d'une transformation thermodynamique à pression constante) de vaporisation :

$$\Delta H_{\text{vaporisation}} = m \times L_{\text{vaporisation}}$$

qui est une énergie à fournir au système où $L_{\text{vaporisation}}$ est la chaleur latente de vaporisation (en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), et m est la masse du système. La vaporisation est donc énergétiquement plus favorable pour les molécules d'eau de plus petite masse, donc pour celles contenant l'isotope ^{16}O de l'oxygène.

Inversement, la condensation est exothermique et libère l'énergie :

$$\Delta H_{\text{condensation}} = m \times L_{\text{condensation}} = -m \times L_{\text{vaporisation}}$$

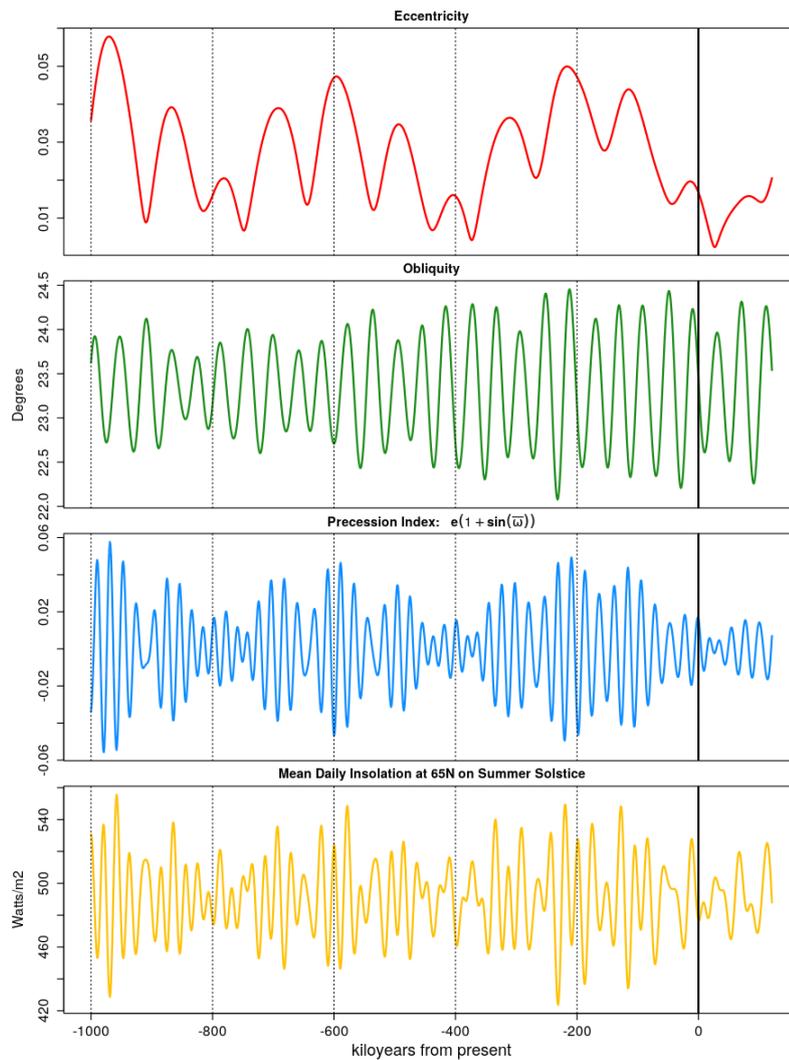


FIGURE 3.44 – Cette figure illustre les variations calculées à long terme de l'excentricité avec ses périodes de 100 000 et 400 000 ans, de l'obliquité avec sa période principale de 41 000 ans et la précession climatique avec sa période moyenne de 21 000 ans. On note que l'orbite de la Terre est en train de devenir circulaire, l'excentricité atteignant une valeur très proche de zéro d'ici 25 000 ans environ. Les variations reproduites vont de un million d'années dans le passé à 121 000 ans dans l'avenir. Tiré de <https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/>

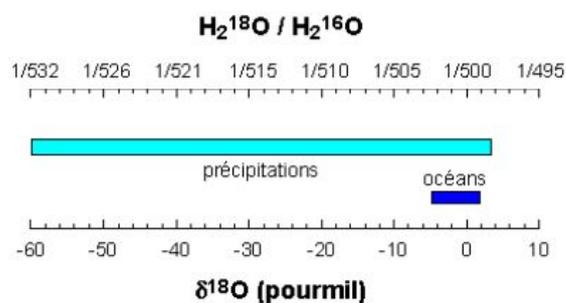


FIGURE 3.45 – Quelques plages de valeurs de l'indicateur $\delta^{18}\text{O}$ dans les océans et dans les précipitations : plus on s'éloigne des tropiques vers les pôles, plus on se déplace vers la gauche. Crédit : Gilles Delaygue, <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/fractionnement-oxygene.xml>. © Planet Terre.

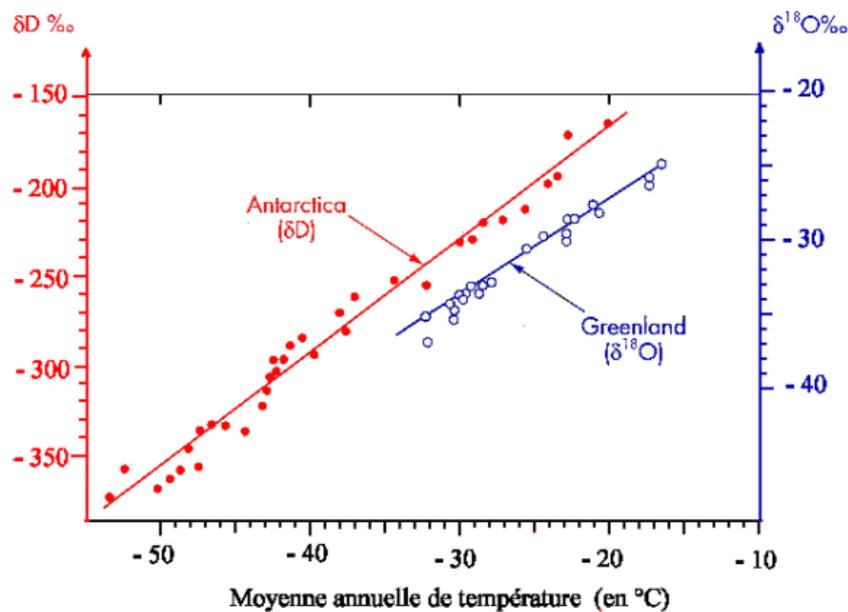


FIGURE 3.46 – Relation entre les teneurs isotopiques moyennes et la température moyenne de surface du site au Groenland et en Antarctique. Les données de l'Antarctique (Lorius & Merlivat 1975) correspondent à des teneurs en deutérium, celles du Groenland (Johnsen *et al.* 1972) à des teneurs en ^{18}O . Tiré de Jouzel *et al.* (1994). © Académie des Sciences.

Donc plus les molécules sont massives, plus la réaction sera énergétiquement favorable. Les molécules d'eau contenant l'isotope ^{18}O de l'oxygène vont ainsi condenser plus facilement.

Quand la proportion de ^{18}O diminue dans l'eau, l'indicateur $\delta^{18}\text{O}$ diminue; cet indicateur est négatif car on observe une eau moins riche en ^{18}O que l'eau « standard ».

Fractionnement isotopique dans le cycle de l'eau

Sous les tropiques, l'évaporation de l'eau des océans entraîne une composition des nuages avec une proportion d'oxygène lourd (^{18}O) plus faible, car H_2^{18}O s'évapore plus difficilement que H_2^{16}O (donc $\delta^{18}\text{O} \ll 0$).

Au cours de son voyage vers les pôles, l'eau des nuages qui se condense en pluie contient une proportion encore plus importante en ^{18}O que la vapeur, car H_2^{18}O condense plus facilement que H_2^{16}O . Au fur et à mesure des précipitations, la vapeur d'eau des nuages s'appauvrit en ^{18}O (donc $\delta^{18}\text{O}$ devient de plus en plus négatif); chaque précipitation est moins chargée en ^{18}O que la précédente. Les dernières, au niveau des pôles, contiennent le moins d' ^{18}O (donc le $\delta^{18}\text{O}$ le plus négatif – voir figure 3.45).

Plus il fait froid, plus la vapeur d'eau se condense tôt au cours de son voyage vers les pôles : plus il fait froid, moins il y a d' ^{18}O dans la glace qui s'amoncelle aux pôles (et plus $\delta^{18}\text{O} < 0$). La figure 3.46 montre la corrélation entre la température et les indicateurs isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD , où « D » est un isotope de l'hydrogène dans la molécule d'eau (eau « lourde » : HDO). Les deux indicateurs sont corrélés selon :

$$\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$$

La figure 3.47 illustre le fractionnement isotopique des précipitations entre les tropiques et les pôles, pour l'indicateur δD .

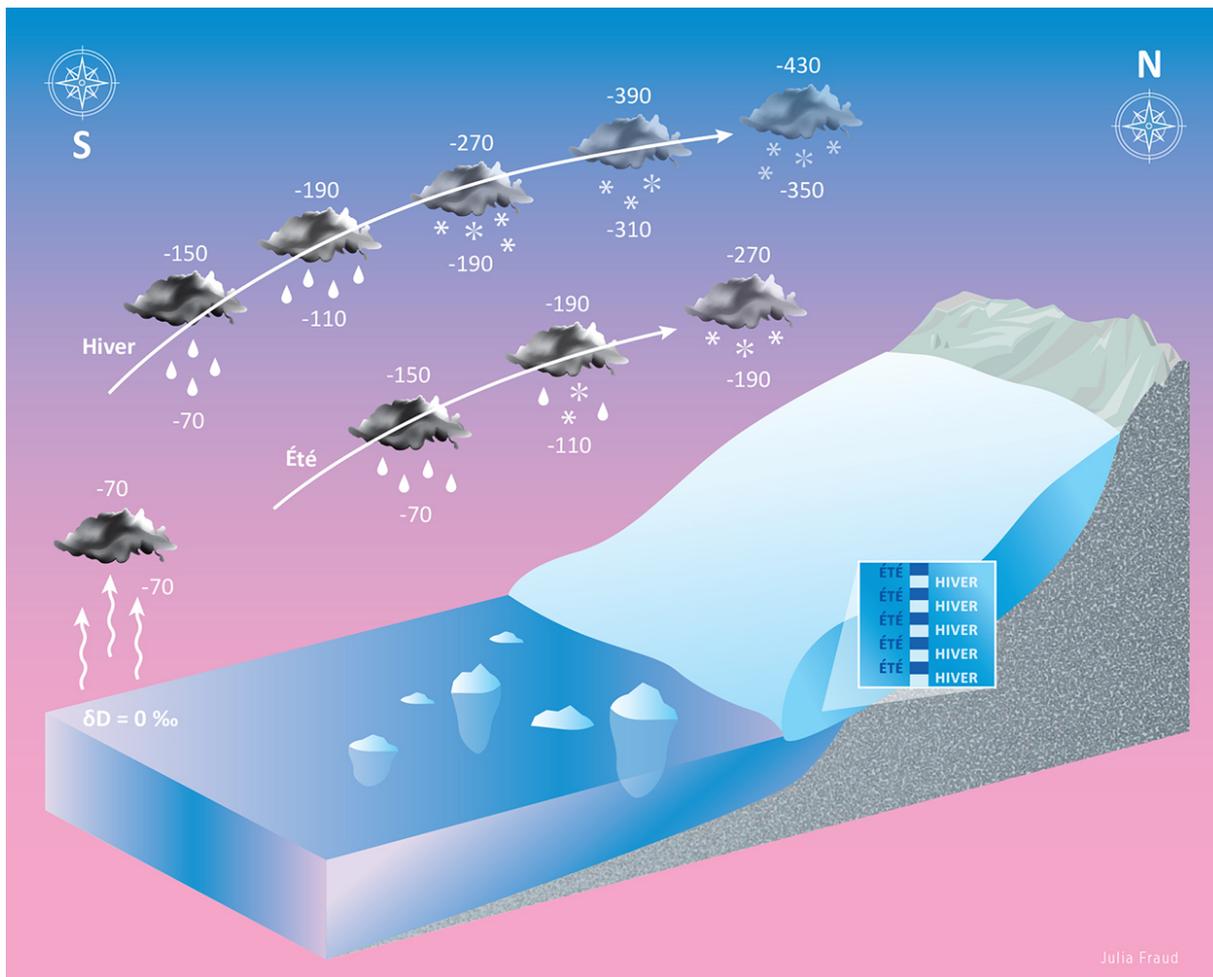


FIGURE 3.47 – Le cycle annuel de δD dans la neige et les glaces du Groenland est dû aux changements saisonniers dans la pluviométrie d'une masse d'air sur son parcours vers le Groenland. L'eau (sous forme liquide ou solide) s'allège ainsi isotopiquement au fur et à mesure de son voyage depuis les tropiques (chaud) vers les pôles (froid). Les couches dues à l'été et à l'hiver peuvent être distinguées dans la glace en mesurant δD . Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Les concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère du passé sont quant à elles mesurées dans les bulles d'air piégées dans la glace des calottes polaires (Antarctique, Groenland...), à l'aide de « carottes ». La figure 3.48 montre l'évolution de la température moyenne reconstruite, des concentrations en gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4) obtenues à partir des carottes de glace de la station Vostok, de l'indicateur $\delta^{18}O$ et de l'insolation sur les 400 000 dernières années.

3.4.3 Qui pilote qui : la température ou le CO_2 ?

Il y a bien sûr un lien étroit entre la température de l'atmosphère et la concentration en CO_2 (voir par exemple la figure 3.49). Mais s'il est admis que le réchauffement actuel est consécutif à l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, en revanche, dans le passé, le lien de causalité est plus compliqué à éclaircir : cela peut être la température qui varie suite aux variations de l'ensoleillement, qui cause ensuite des variations de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ou bien l'inverse. La figure 3.50 illustre la difficulté d'éclaircir cette causalité sur les données du passé. Parrenin (2013) suggère même que les variations entre la température et le CO_2 sont synchrones.

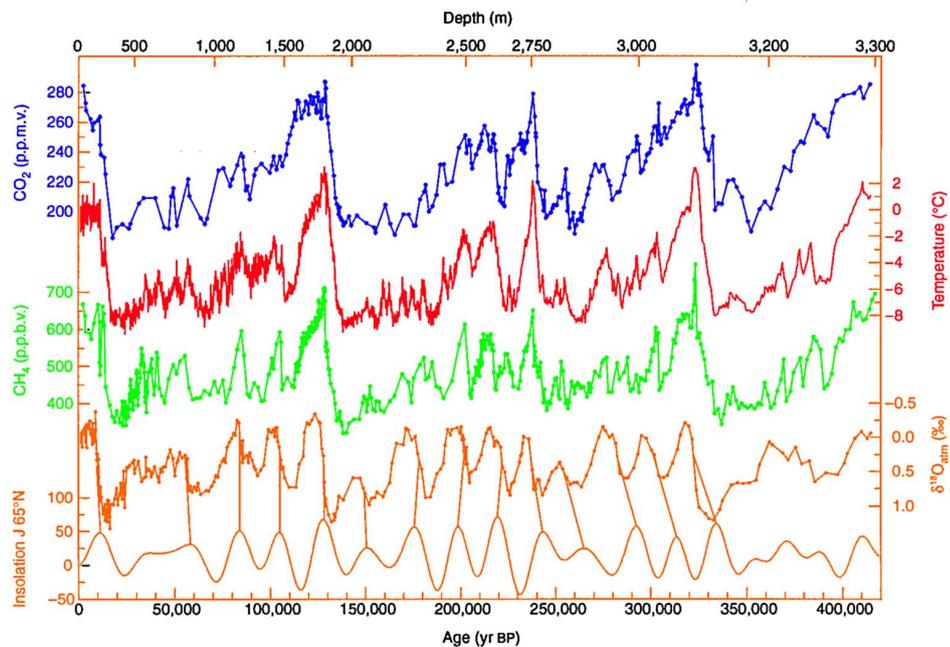


FIGURE 3.48 – Évolution de la température moyenne, des concentrations en gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4) obtenues à partir des carottes de glace de la station Vostok, de l'indicateur $\delta^{18}\text{O}$ et de l'insolation sur les 400 000 dernières années. CC0.

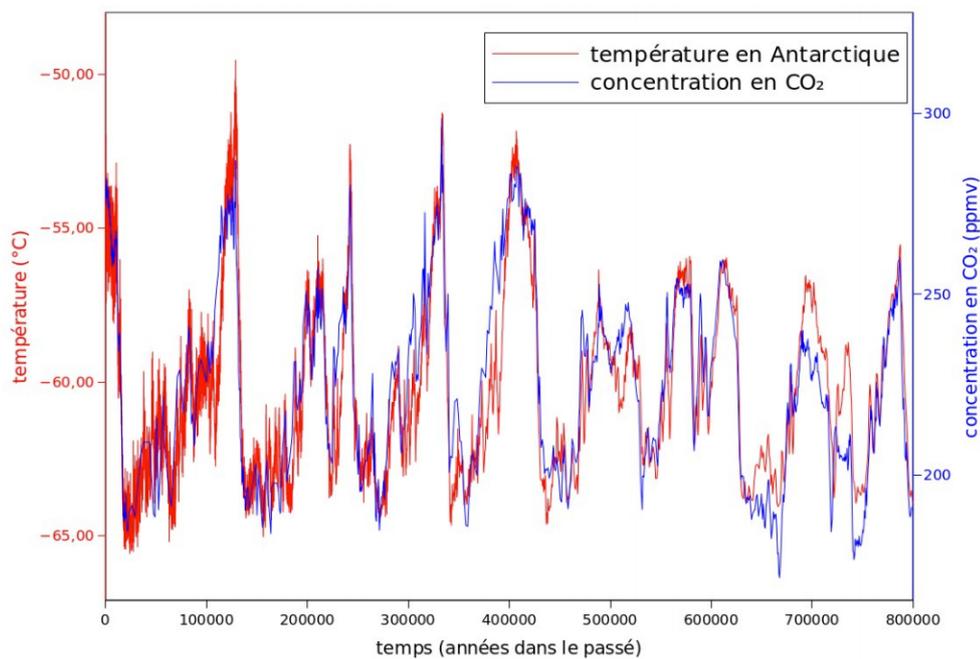


FIGURE 3.49 – Reconstructions de la température annuelle en Antarctique (en degrés Celsius) et de la concentration en CO_2 (en parties par million en volume) à partir de la carotte de glace forée à EPICA Dome C. La corrélation entre CO_2 et température est flagrante sur cette figure. D'après Parrenin *et al.* (2013). © Frédéric Parrenin.

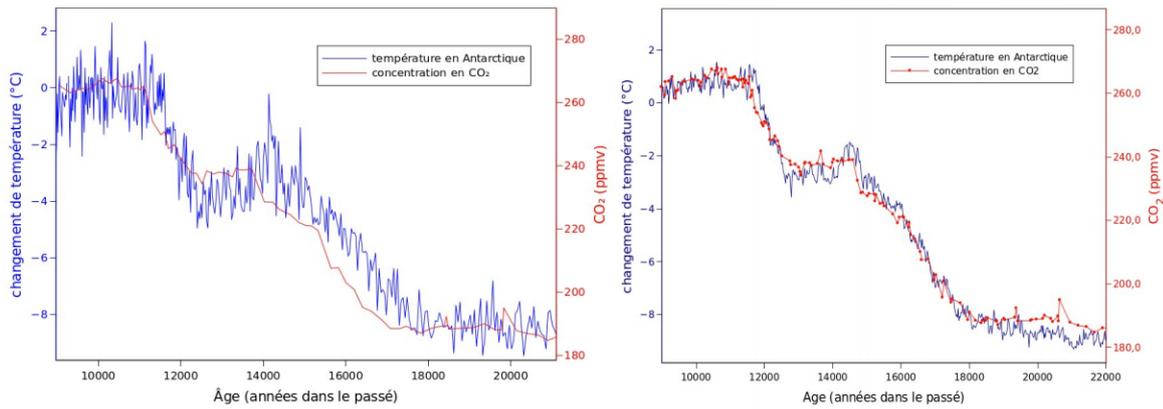


FIGURE 3.50 – Reconstructions de la concentration en CO₂ (en parties par million en volume) et de la température en Antarctique (en degrés Celsius) lors de la dernière déglaciation. Reconstructions réalisées en 2001 (à gauche) et en 2013 (à droite) après des progrès réalisés sur les reconstructions d'âge et de température. Alors que le CO₂ apparaissait en retard par rapport à la température dans l'étude de 2001, celle de 2013 les trouve quasi synchrones. D'après Parrenin *et al.* (2013), voir aussi Parrenin (2013). © Frédéric Parrenin.

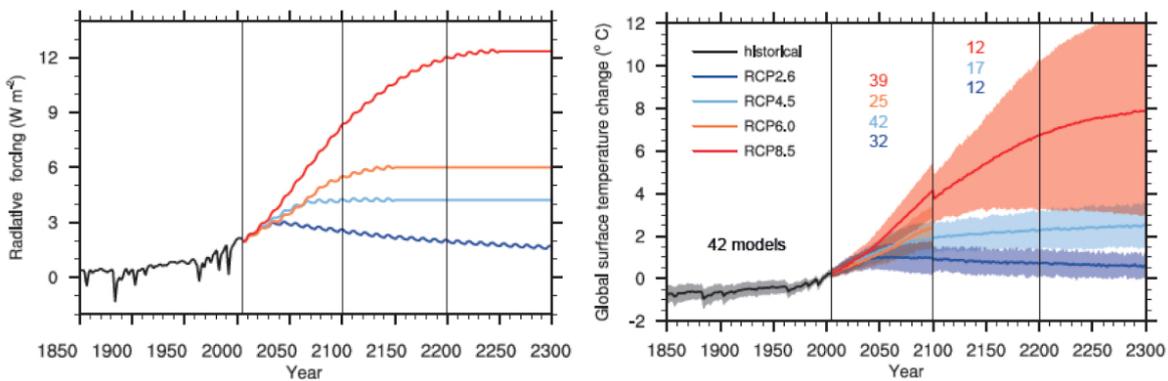


FIGURE 3.51 – À gauche, les forçages radiatifs pour les quatre scénarios RCP. À droite, l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air en surface (par rapport à 1986-2005) pour les quatre scénarios. Les nombres de couleur indiquent le nombre de modèles utilisé par scénario; la discontinuité à 2100 provient de la différence du nombre de modèles et n'est pas physique. Source : GIEC (2013), p. 89. © Intergovernmental Panel on Climate Change.

3.5 Scénarios pour le futur

Les climatologues ne peuvent pas faire de prédictions (modèles imprécis, évolution socio-économique de l'activité humaine incertaine...), mais calculent à l'aide de leurs modèles numériques des *scénarios* pour le futur, faisant telle ou telle hypothèse sur l'activité humaine.

Le rapport du GIEC de 2013 présente quatre scénarios RCP (pour *representative concentration pathway*) pour différentes trajectoires de forçages radiatifs :

- RCP2.6 = +2,6 W · m⁻² en 2100 (fortes réductions de GES)
- RCP4.5 = +4,5 W · m⁻² en 2100
- RCP6.0 = +6,0 W · m⁻² en 2100
- RCP8.5 = +8,5 W · m⁻² en 2100 (prolongation du scénario actuel)

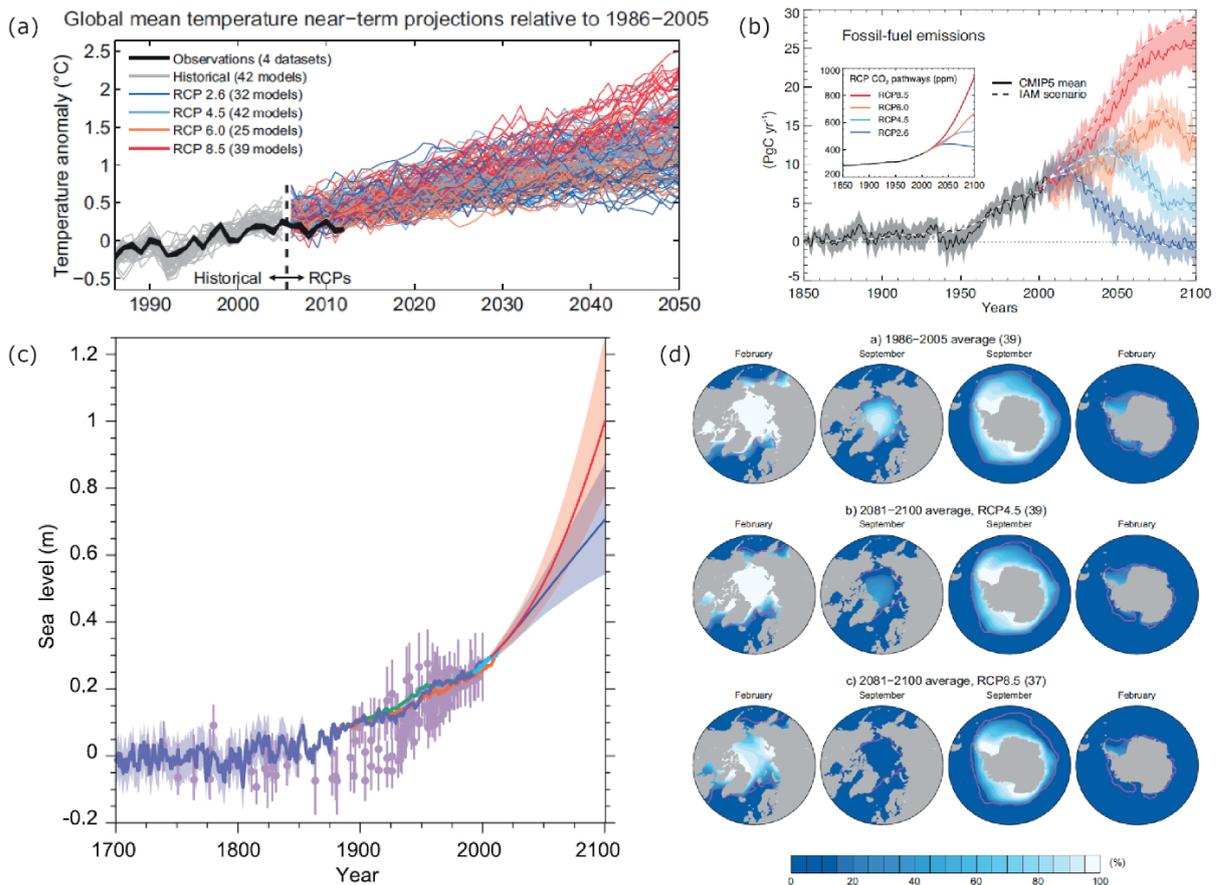


FIGURE 3.52 – Projection des scénarios RCP pour la température, les émissions de CO₂, le niveau des océans, et la taille des banquises à différentes échéances. (a) Projection de l’anomalie de température annuelle pour les quatre scénarios RCP. Source : GIEC (2013), p. 87. (b) [Prédiction de l’émission annuelle de CO₂ (en PgC/an) pour les quatre scénarios RCP. Source : GIEC (2013), p. 84. (c) Compilation de données historiques superposées aux scénarios RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (rouge), par rapport aux valeurs pré-industrielles. Source : GIEC (2013), p. 1204. (d) Concentration de la banquise (fraction de la surface océanique recouverte de glace) pour différentes périodes et différents scénarios. La ligne rose indique la limite de concentration à 15 % pour la période 1986-2005. Source : GIEC (2013), p. 1089. © Intergovernmental Panel on Climate Change.

Ces quatre scénarios sont représentés à la figure 3.51. Les prédictions sur différents observables selon ces scénarios sont indiqués en figure 3.52. Le rapport du GIEC (2021) reprend ces scénarios en les nommant SSPx-y pour *shared socio-economic pathway*, 'y' étant le forçage radiatif approximatif attendu en 2100. Ces scénarios débutent en 2015. Le rapport étudie cinq trajectoires : SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5.

Chapitre 4

L'énergie et le CO₂

BLANC Guillaume & NOÛS Camille, L'énergie et le CO₂, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.8a7076>



Ce chapitre fait le point sur le concept d'énergie dans nos sociétés ainsi que sur les émissions de dioxyde de carbone qui y sont liées en regard avec le réchauffement climatique. Seuls quelques aspects physiques sont abordés ici.

4.1 Qu'est-ce que l'énergie ?

L'énergie est un concept omniprésent dans nos sociétés mais qui reste très flou dans l'esprit du public. La physique en donne cependant une définition très précise.

Même si personne ne sait ce qu'est l'énergie « en soi », tout le monde exploite aujourd'hui cette quantité qui se conserve, tout en se transformant. (Valentin 1995)

Le terme « énergie » vient du grec *energeia* signifiant « force en action ». Le dictionnaire CNRTL¹ en ligne la définit comme la *capacité d'un corps ou d'un système à produire du travail mécanique ou son équivalent*. L'énergie est en premier lieu une grandeur physique qui permet de quantifier des changements dans un système donné.

4.1.1 Définition physique

Énergie cinétique et énergie potentielle

L'énergie permet de quantifier (et comparer) des interactions entre des phénomènes physiques très différents. C'est une grandeur qui s'exprime en joules (J). Elle a la particularité de se conserver, c'est-à-dire qu'un système ayant une certaine quantité d'énergie *conserve* cette quantité d'énergie après une transformation ou lors d'une interaction avec ou par un phénomène physique, à condition que le système soit isolé, c'est-à-dire sans interaction avec le monde extérieur.

Elle se trouve sous deux formes :

- L'énergie cinétique dont le qualificatif exprime le mouvement, quantifie l'énergie liée à la vitesse d'un système :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

où m est la masse du système considéré, v sa vitesse et E_c son énergie cinétique.

- L'énergie potentielle qui exprime la *potentialité* d'un mouvement ultérieur. Elle peut revêtir de nombreuses formes (exprimées à une constante près).
 - Énergie potentielle gravitationnelle :

$$\mathcal{E}_G = \int_V \left(-\frac{1}{4\pi G} \right) \frac{\mathcal{G}^2}{2} dV$$

1. <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/energie>

où V est le volume du système, G la constante de gravitation, \mathcal{G} le champ de gravitation ; l'énergie potentielle de pesanteur à la surface de la Terre en est dérivée :

$$\mathcal{E}_p = mg$$

où m est la masse du système et g est l'accélération de la pesanteur (terrestre).

- Énergie potentielle électromagnétique :

$$\mathcal{E}_{em} = \int_V \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) dV$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide, E est le champ électrique, μ_0 est la perméabilité du vide et B est le champ magnétique.

- Énergie potentielle de masse ou énergie de masse :

$$\mathcal{E}_m = mc^2$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

- Énergie potentielle élastique, liée à la déformation d'un matériau.
- Énergie potentielle chimique, liée à la variation du nombre de constituants d'un système.
- etc.

On peut également relier ces différentes formes d'énergie potentielle aux interactions fondamentales, gravitationnelle, électromagnétique, forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques), faible (responsable de la radioactivité β et de la fusion de l'hydrogène en hélium, entre autres).

Énergie absolue ou relative ?

Conservation

La somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un système constitue l'énergie mécanique d'un système, qui est conservée à tout instant.

Cela se traduit sous la forme d'un principe, le premier principe de la thermodynamique : l'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps. Il s'agit au départ d'un principe empirique² validé par le théorème de Noether (1915) (Rowe 2018) : comme les lois de la physique sont indépendantes du temps (donc invariantes par translation dans le temps), l'énergie est conservée.

Tout en étant conservée, l'énergie d'un système peut varier d'une forme à l'autre au gré de son évolution. Ces échanges se font par l'intermédiaire d'un travail ou d'un transfert thermique (ou quantité de chaleur).

Une force est ce qui fait changer d'état de mouvement un corps (ce qui le fait sortir de son état de mouvement inertiel) (voir par exemple Valentin 1995). Le travail élémentaire δW d'une force est le produit scalaire de cette force \vec{F} avec un petit déplacement $d\vec{r}$, le travail W entre deux points M et M' de la trajectoire d'un corps est donc :

$$W = \int_{\widehat{MM'}} \delta W = \int_{\widehat{MM'}} \vec{F}(M) d\vec{r}$$

2. L'histoire commence en 1693 quand Leibniz observe que la quantité $\frac{1}{2}mv^2 + mgh$ (somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pesanteur) est conservée pour une particule massive dans le champ de gravitation de la Terre. Par la suite, d'autres systèmes plus complexes furent étudiés et des termes additionnels furent trouvés pour maintenir la conservation de l'énergie. En 1905, Albert Einstein modifia l'expression de l'énergie cinétique et associa même une énergie à une masse stationnaire, simplement pour garder la conservation de l'énergie. Plus tard, dans les années 1930, Enrico Fermi postula l'existence du neutrino encore une fois pour garder l'énergie conservée dans les réactions nucléaires (Callen 2005).

L'échange d'une quantité de chaleur peut résulter de différents modes de transferts thermiques, la conduction (diffusion progressive de l'agitation thermique dans la matière), la convection (déplacement macroscopique de matière) ou le rayonnement (propagation d'ondes électromagnétiques).

Il est important de réaliser que dans la physique d'aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie. Nous n'avons pas de représentation comme quoi l'énergie viendrait en petits paquets d'une certaine quantité. Ce n'est pas ainsi. Cependant des formules permettent de calculer une certaine quantité numérique et lorsque nous les ajoutons toutes ensemble, cela donne « 28 » – toujours le même nombre. C'est une chose abstraite en cela qu'elle ne nous donne pas le mécanisme ou les raisons des diverses formules. (Feynman 1963)

On ne peut pas mesurer *directement* l'énergie d'un système, on peut seulement en déduire sa quantité à partir de la mesure de la variation d'une grandeur mesurable : température, vitesse, masse, intensité électrique, etc.

Énergie ordonnée et énergie désordonnée

On peut distinguer deux formes d'énergie : une énergie « ordonnée » et une énergie « désordonnée ».

- L'énergie désordonnée est associée à l'énergie thermique, qui est l'énergie liée à l'agitation thermique des constituants de la matière (énergie cinétique des particules très nombreuses aux mouvements erratiques constituant un système physique).
- L'énergie ordonnée est liée à l'énergie mécanique, cinétique³ ou potentielle (gravitationnelle, électromagnétique, élastique, chimique...) du système macroscopique.

La différence fondamentale entre ces deux sortes d'énergie est que l'on peut intégralement transformer une énergie mécanique (ordonnée) en énergie thermique (désordonnée) alors que l'inverse n'est pas possible. Ce type de transformation est en effet interdit par le second principe de la thermodynamique, qui dit que l'entropie d'un système isolé (c'est-à-dire sans contact et sans lien énergétique avec l'extérieur) ne peut qu'augmenter :

$$dS_{\text{sys}} \geq \frac{\delta Q}{T}$$

où dS_{sys} est la variation infinitésimale de l'entropie du système, δQ est la quantité de chaleur reçue par le système et T est la température du système. L'entropie s'exprime ainsi en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$.

L'entropie est liée à la notion de chaleur⁴. La chaleur est un échange d'énergie thermique entre deux systèmes physiques. Par abus de langage on associe souvent la chaleur à l'énergie thermique. L'entropie est ainsi une façon de quantifier l'état de désordre des constituants microscopiques d'un système physique. Le second principe impose un sens d'évolution de certaines transformations physiques, et de là, la notion d'irréversibilité. Les transformations réelles sont irréversibles, à cause de phénomènes dissipatifs (frottements...).

À cette hiérarchie énergétique est parfois associé le concept d'exergie (Benelmir *et al.* 2002), qui est la partie de l'énergie que l'on peut récupérer (le travail, la partie « noble » ou « ordonnée »). Son complémentaire étant nommé l'anergie. C'est un concept surtout utilisé en ingénierie et en économie de l'énergie.

3. Il s'agit ici de l'énergie liée au mouvement (ordonné) d'ensemble du système et non de celle liée aux mouvements désordonnés de ses constituants.

4. D'un point de vue microscopique, l'entropie est donnée par :

$$S_{\text{sys}} = k_B \ln \Omega$$

où k_B est la constante de Boltzmann et Ω est le nombre de configurations accessibles par les constituants élémentaires du système.

Unité d'énergie

L'énergie s'exprime en joules (J), une unité dérivée du système international d'unités : $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Il existe d'autres unités d'énergie qui sont utilisées en fonction des domaines d'activité.

- L'électron-volt (eV) est l'énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel électrique de un volt, $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Cette unité est utilisée en physique atomique et physique nucléaire.
- La calorie (cal) est l'énergie thermique nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau pure de $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ à $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ sous une pression atmosphérique de un bar, $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$. Cette unité est utilisée essentiellement en diététique (comme la Grande Calorie (Cal), $1 \text{ Cal} = 10^3 \text{ cal}$).
- Le kilowatt-heure (kW·h ou kWh) est l'énergie consommée par un appareil d'une puissance de 1000 watts pendant la durée d'une heure, $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$. Cette unité est utilisée pour quantifier l'énergie électrique dans la société.
- La tonne de TNT est l'énergie libérée par l'explosion d'une tonne de l'explosif chimique trinitrotoluène, $1 \text{ t de TNT} = 4,184 \text{ GJ}$. Cette unité est surtout utilisée dans le domaine militaire.
- La tonne-équivalent-pétrole (tep) (ou toe : *tonne of oil equivalent* en anglais) correspond à l'énergie thermique dégagée⁵ par la combustion (on parle alors de *pouvoir calorifique*) d'une tonne de pétrole « moyen », $1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ}$. Cette unité est utilisée dans l'industrie et en économie.
- Autres unités : pour le gaz, le Btu (*British thermal unit*) est utilisé ($1 \text{ tep} = 3,97 \cdot 10^7 \text{ Btu}$); pour le charbon, le tec (tonne équivalent charbon) est utilisé ($1 \text{ tep} = 1,43 \text{ tec}$; $1 \text{ tec} = 29,3 \text{ GJ}$); pour le bois, on utilise le stère, qui équivaut à 1 m^3 apparent⁶ ($1 \text{ tep} = 6,22 \text{ st}$; $1 \text{ st} = 6,7 \text{ GJ}$) (OIE 2020).

Énergie ou puissance ?

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps. Elle s'exprime en watt (W), $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$. Elle exprime la vitesse à laquelle s'effectue un transfert d'énergie.

Par exemple si je veux déplacer un tas de sable de $1,5 \text{ t}$ (cela correspond à 1 m^3 de sable, soit un tas de 70 cm de haut⁷) et le mettre dans la benne d'un camion qui se trouve à une hauteur de 1 m , ce qui représente environ une énergie de $E = mgh$, où m est la masse totale du sable ($m = 1500 \text{ kg}$), g est l'accélération de la pesanteur ($g \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) et h la hauteur sur laquelle on déplace le tas ($h = 1 \text{ m}$). Soit $E = 1500 \times 10 \times 1 = 15000 \text{ J}$.

Si on déplace le tas à raison d'une pelletée d'environ 3 kg toutes les 5 secondes, il faudra 500 pelletées pour en venir à bout en 2500 secondes soit 42 min . On aura alors développé une puissance moyenne de $15000/2500 = 6 \text{ W}$. Et c'est une cadence infernale ! Si on décide de le faire de manière plus humaine, avec une pelletée de disons 1 kg toutes les 30 secondes, cela fait 1500 pelletées, en 750 minutes soit un peu plus de 12 h , une demi-journée ! La puissance que l'on développe alors est de $15000 / 45000 = 0,33 \text{ W}$. Un engin de chantier (chargeuse sur pneus) avec un godet d'environ 2 m^3 va accomplir cette tâche en quelques secondes avec une puissance de plusieurs milliers de watts...

5. On constate ainsi qu'une tonne de pétrole contient environ dix fois plus d'énergie chimique que le TNT ! La différence d'effet entre la combustion du pétrole (peu spectaculaire !) et l'explosion du TNT tient dans le fait que dans le premier cas, la combustion est lente, tandis que dans le second, elle est rapide, il s'agit d'une détonation.

6. Compte tenu de l'espace entre les bûches, cela représente entre $0,6$ et $0,8 \text{ m}^3$ de bois selon la taille des bûches.

7. Un tas de sable (sec) est à peu près conique avec une pente de 30° , son volume V est donc :

$$V = \frac{\pi R^2 H}{3} = \pi H^3$$

où H est sa hauteur et R le rayon du disque; $R = \sqrt{3}H$.

Tout le monde peut donc déplacer un tas de sable, mais il faut être un sacré athlète pour le faire en moins d'une heure, simplement parce que la puissance mise en jeu est alors beaucoup plus élevée, même si l'énergie nécessaire reste la même.

4.1.2 L'énergie dans la société

L'énergie est présente dans tous les actes de notre vie quotidienne. Dès que quelque chose change, il y a de l'énergie qui entre en jeu. Ce n'est pas une chose ou un objet, c'est un concept qui permet de quantifier ce qui change.

Notre corps est le siège de nombreuses transformations qui utilisent (forcément) de l'énergie : nos membres bougent grâce aux muscles qui transforment de l'énergie chimique en énergie mécanique, énergie chimique issue des aliments que nous ingérons. La transformation de cette énergie, via le métabolisme, permet aussi à nos organes de fonctionner, à notre température de se maintenir constante. . .

Les objets qui nous entourent ont nécessité de l'énergie pour être fabriqués. Modifier la forme, faire changer d'état (liquide à solide, ou *vice versa* par exemple), assembler deux morceaux ou les séparer, etc., tout cela fait intervenir de l'énergie. Nous déplacer fait intervenir de l'énergie. Nous éclairer, nous chauffer, aussi.

L'énergie que nous utilisons dans la vie quotidienne se trouve sous forme d'électricité (éclairage, appareils électroménagers. . .), sous forme de pétrole transformé (gasoil, essence) pour faire fonctionner les moyens de transport, sous forme de gaz (chauffage. . .), sous forme de biomasse (nourriture, bois) pour le fonctionnement de notre corps et pour le chauffage, etc.

L'électricité est elle-même produite à partir d'uranium (centrales nucléaires), de gaz, de charbon, d'eau (barrages hydroélectriques), de vent (éoliennes), de soleil (panneaux solaires ou centrales à concentration), de biomasse (bois, déchets organiques. . .).

Nous parlerons dans ce qui suit de production et de consommation d'énergie, mais, comme nous l'avons vu, l'énergie étant conservée, elle ne peut apparaître du néant et disparaître ensuite. Elle ne peut être que transformée. La *production* d'énergie revient donc, par exemple, à transformer une énergie mécanique, par exemple dans un barrage, en énergie électrique, mais aussi en énergie thermique dans les frottements, la viscosité de l'eau, l'effet Joule, etc. La *consommation* d'énergie, par exemple d'essence dans une voiture, revient à transformer une énergie chimique en énergie mécanique (énergie cinétique), mais aussi en énergie thermique (frottements, viscosité de l'air, énergie thermique de combustion, pertes dans le moteur, etc.).

Entre la production et la consommation d'énergie, nous avons une chaîne de transformation énergétique. Par convention, en début de chaîne, l'énergie produite est appelée l'*énergie primaire*. En fin de chaîne, l'énergie consommée pour un usage donné est appelée l'*énergie utile*.

Énergie disponible

L'énergie *disponible* au sens physique du terme est l'énergie que fournit la transformation d'un système donné. Par exemple, pour les énergies fossiles, l'énergie disponible est celle qui est fournie par la réaction chimique de combustion. De même pour l'énergie nucléaire, l'énergie disponible est l'énergie de liaison des noyaux libérée lors d'une réaction de fission.

Pour l'énergie hydraulique, l'énergie disponible est l'énergie cinétique (issue de l'énergie potentielle de pesanteur) de l'eau dans les conduites forcées; pour l'énergie éolienne, c'est l'énergie cinétique du vent. Pour l'énergie issue de la biomasse, c'est l'énergie thermique obtenue par combustion de celle-ci.

Nous parlerons également de *source* d'énergie en guise de synonyme, même si cette dénomination est abusive : il ne peut y avoir création d'énergie *ex nihilo*.

Énergie primaire

L'énergie *primaire* est la forme sous laquelle une énergie est disponible après la première transformation (Bouneau 2018a ; Bouneau 2018b) : cela peut être l'énergie thermique dans le

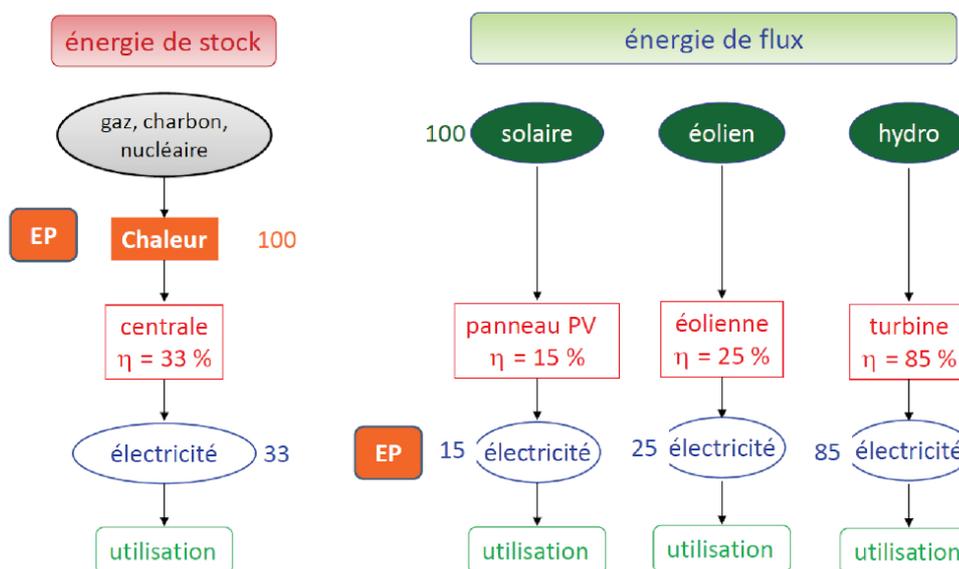


FIGURE 4.1 – Conventions définissant l'énergie primaire (EP) en fonction de la source. Le rendement des machines générant l'électricité utilisée est noté η . (a) Pour les énergies de stock. (b) Pour les énergies de flux. Source : Bouneau (2018b). © Sandra Bouneau.

cas d'une centrale thermique ou nucléaire, dans la combustion du carburant ou encore l'énergie électrique dans le cas des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques.

Il existe deux grandes familles de sources d'énergie primaire.

- Les *énergies de stock* : on puise dans une réserve de matière limitée. Ce sont les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) et le minerai d'uranium.
- Les *énergies de flux* : on prélève dans un flux d'énergie qui nous parvient continuellement, que l'on exploite ou pas (hydraulique, éolien, solaire, géothermie, biomasse). Les énergies de flux sont des énergies renouvelables⁸, car on ne consomme pas de matière dont la quantité est limitée sur Terre⁹.

Néanmoins l'énergie primaire n'est pas l'énergie disponible au sens physique, elle dépend de la source d'énergie en question selon des conventions. Ainsi pour les énergies de stock, l'énergie primaire est l'énergie thermique dégagée par les réactions de combustion ou les réactions nucléaires ; elle correspond ainsi à l'énergie disponible.

Pour les énergies de flux, l'énergie primaire est l'énergie fournie par l'installation (c'est-à-dire par la première transformation) : pour l'hydraulique, l'éolien et les cellules photovoltaïques il s'agira de l'électricité récoltée (après transformation de l'énergie cinétique de l'eau, du vent et de l'énergie électromagnétique du Soleil, respectivement) ; pour la biomasse ce sera l'énergie thermique (après combustion) ; pour la géothermie ce sera également la chaleur récupérée.

Pour les énergies de flux où l'énergie primaire correspond à l'électricité générée, l'énergie primaire ne correspond pas à l'énergie disponible, car il faut tenir compte d'un rendement de la machine permettant de transformer le flux (d'eau issu d'un barrage, d'air issu du vent, de photons issu du rayonnement solaire) en électricité (voir la figure 4.1).

8. Les énergies renouvelables sont des énergies dont les flux sont sans cesse renouvelés à l'échelle humaine : il est donc possible de les considérer comme inépuisables.

9. En revanche les dispositifs construits pour récupérer ces énergies ne sont pas, eux, renouvelables !

Énergie utile

L'énergie disponible n'est pas directement utilisable. L'énergie *utile* est donc celle qui est directement utilisée ou utilisable après transformation par des machines. La notion d'énergie utile dépend aussi de ce que l'on souhaite en faire : utile à quoi ? À chaque étape de conversion de l'énergie disponible, on a un rendement :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie disponible}} \quad (4.1)$$

Le rendement s'exprime dans le cas d'une transformation, comme la transformation thermodynamique de l'énergie thermique issue d'une centrale thermique en électricité.

Par exemple, l'énergie de fission nucléaire est transformée en électricité¹⁰ dans une centrale nucléaire dont le rendement global est d'environ 33 % (tenant compte du rendement thermodynamique de la machine, ainsi que de celui des turbines et des alternateurs). Ensuite l'électricité est transportée via des câbles, avec des pertes de l'ordre de 10 %. Elle arrive chez le consommateur qui va l'utiliser pour alimenter une ampoule à incandescence. À ce niveau, si l'utilité est l'éclairage, alors le rendement est d'environ 10 % ; si l'utilité est le chauffage, alors le rendement est d'environ 90 %. Dans le cas du chauffage, le rendement global est d'environ 27 % tandis que dans le cas de l'éclairage, le rendement global est d'environ 3 % (Bouneau 2018b).

Quand on parle d'énergie utile il faut donc bien préciser utile à quoi et à quel niveau de la chaîne de transformation et de transport elle se positionne, en tenant compte des différents rendements (machines) et des pertes (transport).

Énergie finale

L'énergie *finale* est un concept utilisé en économie pour désigner l'énergie achetée par le consommateur : électricité, essence, fioul... Il ne s'agit pas (forcément) d'énergie utile. Ainsi, pour le transport ou le chauffage, on achète de l'essence, du fioul ou du bois *avant* toute production d'énergie thermique : il s'agit donc d'énergie primaire. L'énergie utile correspondante (énergie thermique pour le chauffage, énergie mécanique pour les transports) ne sera pas la même car le rendement du moteur ou de la chaudière n'est pas pris en compte. On achète donc de l'énergie disponible. Tandis que lorsqu'on achète de l'électricité, c'est après transformation, il s'agit directement d'énergie utile (voir la figure 4.2).

Quelle définition de l'énergie ?

L'exemple de la figure 4.2 montre que la part de l'électricité dans une consommation globale de 300 unités d'énergie primaire réparties en 1/3 de chauffage, 1/3 de transport, 1/3 d'électricité dépend de la définition de l'énergie que l'on considère.

Ainsi, la part de l'électricité dans l'énergie primaire est :

$$\frac{100}{100 + 100 + 100} = 0,33.$$

La part de l'électricité dans l'énergie finale est :

$$\frac{33}{100 + 100 + 33} = 0,14.$$

La part de l'électricité dans l'énergie utile est :

$$\frac{33}{80 + 30 + 33} = 0,23.$$

10. La fission de l'uranium produit de l'énergie sous forme d'énergie thermique (énergie cinétique des fragments de fission au niveau microscopique). Cette énergie est transformée en travail (électricité) par l'intermédiaire d'une machine thermique (la centrale nucléaire).

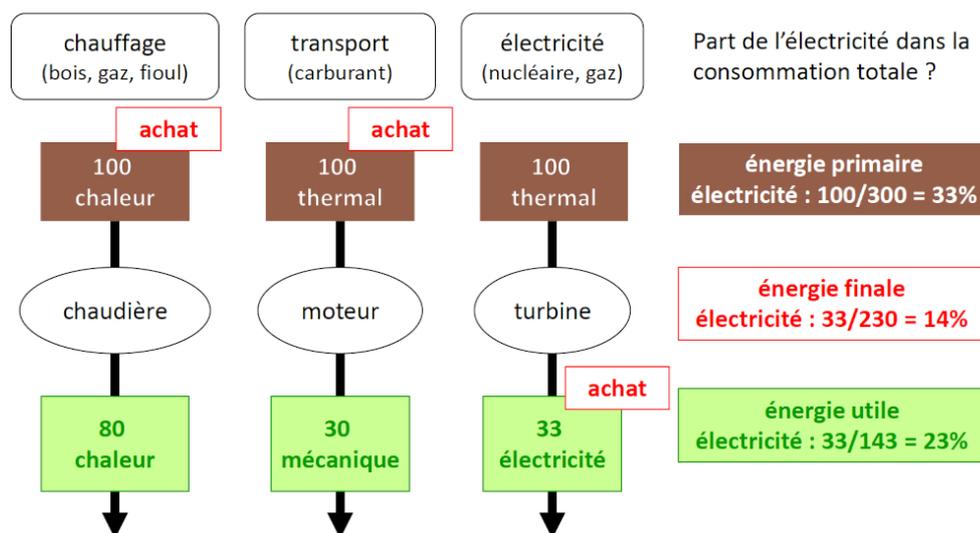


FIGURE 4.2 – L'énergie finale est celle que l'on achète, elle dépend donc du type d'énergie (Bouneau 2018b). Le concept est illustré ici pour déterminer la part de l'électricité dans la consommation totale d'énergie finale, si on suppose qu'au départ on a une quantité égale à 100 pour chacun des trois types d'énergie primaire : pour le chauffage, pour le transport et pour l'électricité. Selon que l'on parle d'énergie primaire, d'énergie utile ou d'énergie finale, le résultat n'est pas le même ! © Sandra Bouneau.

Il est facile de biaiser un discours simplement en omettant de dire de quelle définition de l'énergie il est question !

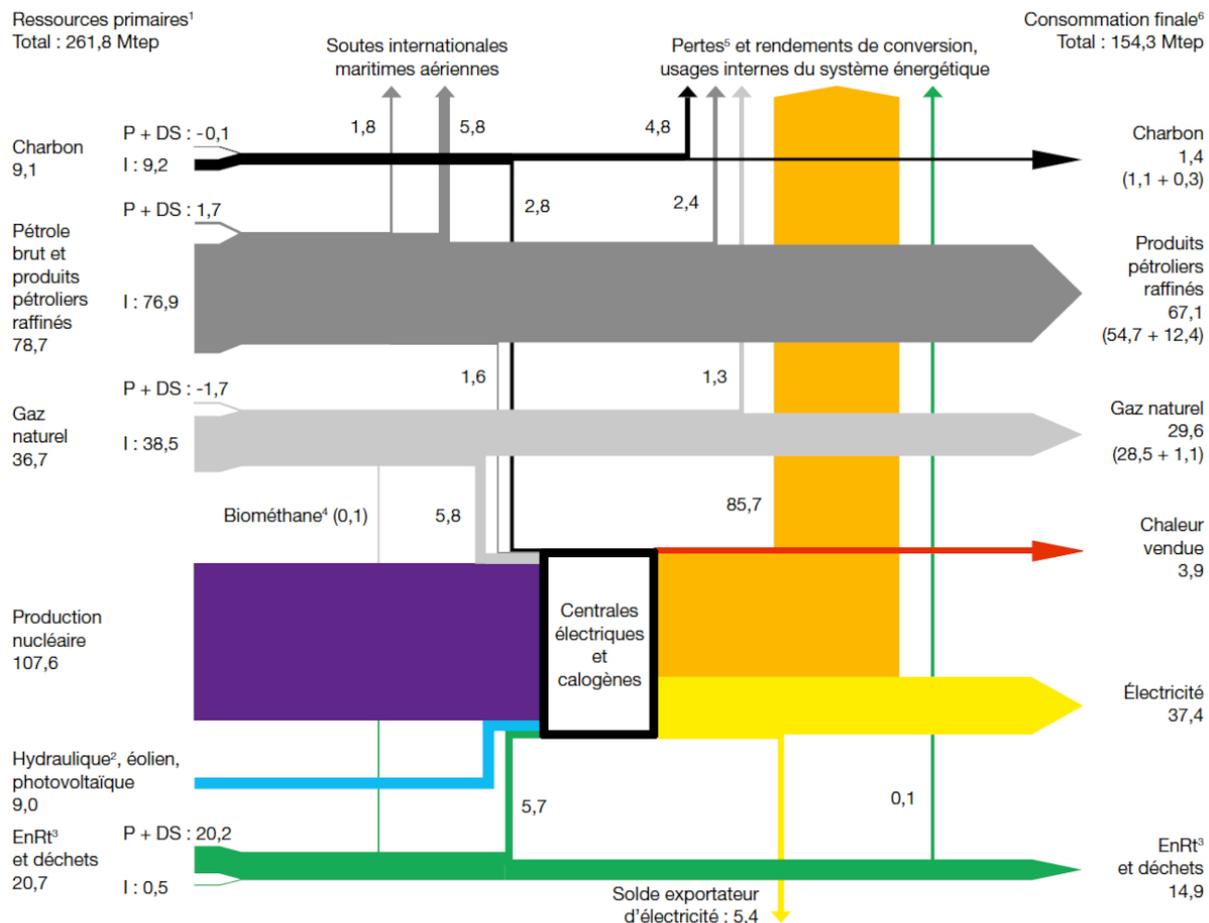
4.1.3 Exemple de la France

Prenons l'exemple de l'année 2018. Le *Commissariat général au développement durable* fournit les données nécessaires (CGDD 2019b ; CGDD 2019a ; CGDD 2020a). La figure 4.3 illustre le bilan énergétique de la France cette année-là. Les données fournies par différents rapports pourtant issus de la même source diffèrent légèrement. Par exemple, la consommation d'énergie primaire (corrigée des aléas climatiques) est donnée comme 248,9 Mtep par CGDD (2020a), 252,4 Mtep par CGDD (2019a) ; selon CGDD (2019b), la consommation primaire est de 261,8 Mtep, mais cela tient compte des exportations d'électricité (5,4 Mtep) et des « soutes aériennes et maritimes internationales » (7,6 Mtep), or $261,8 - 13 = 248,8$ Mtep. Le rapport BP (2019) donne 242,6 Mtep d'énergie primaire consommée.

Par ailleurs, notons que dans les différents rapports mentionnés, aucune incertitude n'est donnée sur l'estimation de ces chiffres, pas plus que n'est précisée la méthodologie suivie pour les obtenir.

Énergie primaire

La figure 4.3 est décryptée en annexe B. Il en ressort que les ressources en énergie primaire utilisées en France en 2018 sont de 234,9 Mtep. Cette énergie est soit importée (combustibles fossiles pour la grande majorité) soit produite sur le sol français (énergie nucléaire et énergies renouvelables essentiellement). Le rapport de la production d'énergie primaire en France, sur la consommation totale utilisée donne le taux d'indépendance énergétique du pays, qui est autour de 55 %. Néanmoins, cette définition est trompeuse, puisque la France importe la totalité de l'uranium nécessaire à la production de l'énergie nucléaire. Les seules ressources primaires « indépendantes » sont ainsi les ressources « renouvelables ».



P : production nationale d'énergie primaire. *DS* : déstockage. *I* : solde importateur.

¹ Pour obtenir la consommation primaire, il faut déduire des ressources primaires le solde exportateur d'électricité ainsi que les soutes maritimes et aériennes internationales.

² Y compris énergies marines, hors accumulation par pompage.

³ Énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique, biocarburants, pompes à chaleur, etc.).

⁴ Injections de biométhane (compté comme énergie renouvelable dans les ressources primaires) dans les réseaux de gaz naturel.

⁵ L'importance des pertes dans le domaine de l'électricité tient au fait que la production nucléaire est comptabilisée pour la chaleur produite par la réaction, chaleur dont les deux tiers sont perdus lors de la conversion en énergie électrique.

⁶ Usages non énergétiques inclus. Pour le charbon, les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel, la décomposition de la consommation finale en usages énergétiques et non énergétiques est indiquée entre parenthèses.

Source : calculs SDES, d'après les sources par énergie

FIGURE 4.3 – Bilan énergétique de la France en 2018 (en Mtep), sous la forme d'un diagramme de Sankey (diagramme de flux où la largeur des flèches est proportionnelle au flux). En 2018 la France a mobilisé une ressource primaire de 261,8 Mtep pour satisfaire une consommation finale (non corrigée des variations climatiques) de 154,3 Mtep. La différence est constituée des pertes et usages internes du système énergétique (94,3 Mtep au total), des exportations nettes d'électricité (5,4 Mtep) et du transport aérien et maritime international exclu par convention de la consommation finale (7,6 Mtep). Le diagramme illustre aussi les flux des différentes formes d'énergie transformées en électricité et/ou chaleur commercialisée (par exemple, 5,8 Mtep de gaz naturel ont été utilisées à cet effet). Source : Service des données et études statistiques (CGDD 2019b). Licence Ouverte.

Ces 234,9 Mtep d'énergie primaire servent à produire 136,7 Mtep d'énergie finale, qui se répartit entre l'électricité (37,5 Mtep soit 27,4 %) et les carburants issus des ressources fossiles (environ 99,2 Mtep soit 72,6 %). On note que la première est directement « utilisable » et constitue donc une énergie utile, tandis que les seconds doivent être transformés (par des moteurs, généralement) pour fournir une énergie (thermique, mécanique...) qui sera alors « utilisée ».

Référentiel considéré	Total (Mtep)	Nucléaire (Mtep)	Fraction d'énergie nucléaire
Électricité primaire	127,1	103,2	81,2 %
Électricité finale	37,5	30,4	81,1 %
Énergie primaire	234,9	103,2	43,9 %
Énergie finale	136,7	30,4	22,2 %
Énergie utile	~ 82	30,4	37 %

TABLE 4.1 – Part de l'électricité nucléaire en France (selon les données de 2018) selon la définition de l'énergie choisie, d'après le tableau B.1 en annexe B. La valeur pour l'énergie utile totale est obtenue en considérant une valeur moyenne pour les différents rendements (cf. tableau 4.2) selon : charbon (1,1 Mtep) \times 0,4 + pétrole (54,7 Mtep) \times 0,3 + gaz naturel (28,5 Mtep) \times 0,75 + EnRt (14,9 Mtep) \times 0,4 + électricité (37,5 Mtep) = 44,2 + 37,5 = 81,7 Mtep.

Part du nucléaire

Le tableau 4.1 donne, en guise d'exemple, la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique français en 2018 selon différentes définitions énergétiques considérées. Cela montre qu'il est nécessaire d'énoncer exactement ce dont il est question dans une argumentation, sinon, il est facile de démontrer n'importe quelle assertion avec des données chiffrées.

Électricité

L'électricité finale consommée représente 37,5 Mtep (soit 437 TWh), il a fallu 127,1 Mtep d'énergie primaire pour en arriver là, soit environ 70 % de pertes liées au transport, aux différents rendements des machines utilisées, à l'électricité « grise » utilisée pour faire fonctionner les installations de production.

4.2 Différentes classifications

4.2.1 Sources et vecteurs

Ce que l'on appelle les énergies fossiles¹¹ – issues du pétrole, du gaz naturel ou du charbon – sont des énergies thermiques produites par des réactions chimiques de combustion de ces combustibles en présence d'oxygène. L'énergie nucléaire est également de l'énergie thermique produite par une réaction de fission nucléaire d'un minéral fissile (uranium¹²). La combustion de la biomasse (bois...) produit également de l'énergie thermique.

L'énergie hydroélectrique est récupérée de l'énergie cinétique de l'eau, l'énergie éolienne est issue de l'énergie cinétique du vent. La géothermie est une énergie thermique directement tirée de la radioactivité des profondeurs terrestres. L'énergie solaire¹³ est une énergie sous forme électromagnétique (photons).

11. *Fossiles* car ces combustibles sont issus d'un processus de méthanisation – dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène – d'êtres vivants morts enfouis dans le sol depuis plusieurs millions d'années. Ils sont ainsi très riches en carbone.

12. L'uranium n'est pas produit sur Terre, il existe depuis la formation de celle-ci. Il a été synthétisé dans les supernovæ – explosions d'étoiles massives à la fin de leur vie – et dispersé dans le milieu interstellaire. Il est ensuite agrégé dans une compression du gaz interstellaire pouvant mener à l'effondrement du nuage en étoile et en système planétaire.

13. L'énergie solaire est parfois vue dans un sens plus général non seulement comme source de l'énergie photovoltaïque – les photons –, mais également de l'énergie éolienne – l'énergie du vent provient de l'énergie du rayonnement solaire intercepté par la Terre –, de l'énergie hydraulique – qui est issue du cycle de l'eau dont le moteur est également l'énergie du Soleil –, de l'énergie de la biomasse – les plantes croissent grâce à l'énergie du Soleil, encore. Et quel que part les énergies fossiles sont aussi un stock formé grâce au Soleil il y a plusieurs millions d'années...

Installation	Transformation	Rendement
Centrale nucléaire	thermique → cinétique → électricité	33 %
Centrale à charbon ou au gaz	thermique → cinétique → électricité	30–50 %
Moteur	thermique → cinétique	25–35 %
Chaudière individuelle au gaz	thermique → chaleur	60–90 %
Panneau photovoltaïque	lumière → électricité	10–20 %
turbine hydraulique	cinétique → électricité	85 %
Éolienne	cinétique → électricité	25 %
Batterie	électricité → électricité	80 %

TABLE 4.2 – Rendement de quelques installations de transformation de l'énergie (d'après Bouneau 2018a).

Ces *sources* d'énergie (énergie disponible) peuvent être transportées à l'échelle de la société (moyennant des transformations nécessaires) par l'intermédiaire de *vecteurs* qui sont l'électricité, l'énergie thermique (la chaleur) ou un carburant (essence, gasoil, fioul...). D'autres vecteurs de transport de l'énergie existent, comme l'hydrogène en train de se développer. Des vecteurs à une échelle plus locale peuvent parfois être utilisés comme les ondes électromagnétiques, l'air comprimé, etc. L'électricité est produite à l'aide d'un alternateur mis en mouvement par un mécanisme rotatif : les pâles de l'éolienne, la turbine du barrage hydroélectrique, de la centrale nucléaire ou thermique. Ou encore à partir d'énergie électromagnétique par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques. L'énergie thermique peut être récupérée directement à partir de toutes les sources citées, excepté l'énergie hydraulique, l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne (mais on peut produire de l'énergie thermique à partir de l'électricité générée).

Le vecteur est ensuite transformé en énergie consommable (énergie utile). À chaque étape (source → vecteur → consommation), l'énergie totale est conservée, mais elle ne l'est pas forcément sous la forme souhaitée : à chaque transformation est associé un rendement (équation 4.1).

Le tableau 4.2 donne l'ordre de grandeur du rendement de quelques installations de transformation de l'énergie. On constate que généralement plus de la moitié de l'énergie initialement disponible est perdue (dans le sens où elle n'est pas utilisée, car non intégralement transformée dans la forme souhaitée).

4.2.2 Puissances, facteurs de charge

Les installations et machines transformant des matières premières (pétrole, bois, chute d'eau, uranium, etc.) en énergie (thermique ou électrique) ont une capacité de produire (transformer) une certaine quantité d'énergie par unité de temps, à savoir une puissance (des joules par seconde ou watts). De même que des installations ou machines qui vont utiliser cette énergie vont le faire avec un certain flux ou puissance.

Ces installations ne fonctionnent pas à leur capacité maximale en permanence : il s'agit de la *puissance installée* (ou de la *puissance crête* dans le cas du solaire photovoltaïque). La *puissance moyenne* (dans le temps) effective permet d'en déduire le facteur de charge f :

$$f = \frac{P_{\text{moyenne}}}{P_{\text{installée}}} \quad (4.2)$$

où P_{moyenne} est la *puissance moyenne* de l'installation sur une année (énergie totale *produite* sur une année divisée par le nombre de secondes dans une année), $P_{\text{installée}}$ est la *puissance installée*, à savoir la puissance théorique lorsque l'installation fonctionne dans des conditions optimales.

On peut également exprimer le facteur de charge en termes d'énergie sur un intervalle de temps donné (une année typiquement) :

$$f = \frac{E_{\text{produite effectivement}}}{E_{\text{théorique}}}$$

Dans ce cas, $E_{\text{théorique}} = E_{\text{utile}}$ et d'après la définition du rendement (équation 4.1), on a :

$$E_{\text{produite effectivement}} = \eta \times f \times E_{\text{disponible}} \quad (4.3)$$

Par exemple pour l'électricité solaire photovoltaïque, $E_{\text{disponible}}$ est l'énergie solaire (photons) incidente, E_{utile} est l'énergie électrique que le panneau solaire est *théoriquement* capable de produire, donc l'énergie électrique maximale qu'il peut générer, et $E_{\text{produite effectivement}}$ est l'électricité effectivement produite sur la période de temps considérée, compte tenu des aléas (alternance jour-nuit, pannes, nuages, etc.).

On parle également de *puissance instantanée* qui est l'énergie *produite* pendant un court intervalle de temps (par exemple un quart d'heure), divisée par cet intervalle de temps.

4.2.3 Quelques ordres de grandeur

Un être humain absorbe chaque jour environ 2500 Cal = 2500 kcal sous forme de nourriture. Cela correspond à environ 10 MJ par jour (86 400 s), soit 121 W. Cette énergie est rejetée sous forme d'énergie thermique, car un être humain est à l'équilibre thermique (en moyenne) : l'énergie qu'il reçoit est égale à celle qu'il perd. En mettant beaucoup d'êtres humains dans une salle isolée thermiquement, la température augmente !

Un cycliste du Tour de France grimant un col développe une puissance mécanique (par l'intermédiaire de ses muscles) d'environ 400 W. Pour un être humain standard, c'est plutôt 200 W ¹⁴ !

Une ampoule à LED de même luminosité (environ 1000 lm) qu'une ampoule à incandescence de 75 W a une puissance électrique de 10 W. En une heure (3600 s) elle consomme donc 36 kJ.

La puissance surfacique reçue du soleil à la surface de la Terre est de 167 W·m⁻² (sous l'atmosphère) (voir section 3.2). C'est une moyenne sur l'ensemble de la surface terrestre et sur une année (31,6 · 10⁶ s). Ce qui fait 5,3 GJ·m⁻² sur une année.

4.2.4 Pilotable ou non pilotable

Nous avons vu que l'on peut classifier l'énergie de beaucoup de façons. Il y a notamment les énergies de flux et les énergies de stock.

Les énergies de flux nous parviennent de manière continue, il s'agit de les exploiter « au fil de l'eau » ! Ce sont des énergies dites « renouvelables », à l'échelle de leur temps d'exploitation par l'humanité : l'énergie solaire liée au flux de photons du Soleil, l'énergie éolienne liée au vent, l'énergie de la biomasse liée à la photosynthèse, l'énergie hydraulique liée au cycle de l'eau, l'énergie géothermique liée au flux d'énergie thermique issu du manteau terrestre... Les premières sont associées au rayonnement solaire (flux de photons, vents, cycle de l'eau, photosynthèse). La dernière est liée à la radioactivité de certains nucléides présents dans le manteau terrestre. L'intensité de son flux diminue au fur et à mesure de la décroissance radioactive, mais de façon imperceptible à l'échelle humaine (voir annexe D).

Les énergies de stock sont associées à une quantité finie de matières premières sur Terre. D'une part les ressources dites fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel ¹⁵), renouvelables (dans certaines conditions biophysiques, et à l'échelle du million d'années) mais bien plus lentement

14. Voir par exemple mon article de blog : *Émissions de CO₂ : vélo contre voiture*. <http://gblanc.fr/spip.php?article601>

15. Malgré son qualificatif de « naturel », il s'agit d'un gaz fossile, donc d'un *stock*.

que la vitesse à laquelle elles sont consommées. D'autre part l'énergie nucléaire provenant de la fission de l'uranium, qui est en quantité limitée sur Terre : ce qui est « utilisé » est définitivement disparu. Ces énergies de stock sont donc épuisables.

Les énergies de stock sont *pilotables*, il s'agit de la capacité de ces sources d'énergie à s'adapter à la demande, en particulier pour la production d'électricité. Certaines énergies de flux sont également pilotables, comme l'énergie hydraulique (issue des barrages) qui est d'ailleurs utilisée pour produire de l'électricité très rapidement, à l'échelle de quelques minutes, afin de réagir aux pics de consommation. L'énergie géothermique est également pilotable, le flux d'énergie thermique étant stable dans le temps. Tout comme l'énergie issue de la biomasse, puisque celle-ci peut être produite de manière continue et contrôlable.

Les centrales thermiques nucléaires ou à charbon sont certes « pilotables » mais peu à même de répondre à un pic de demande. En revanche elles sont « modulables » à l'échelle de quelques heures. Elles permettent néanmoins d'assurer la production électrique de base de manière complètement prédictible.

Les autres énergies de flux (solaire et éolien) sont *non pilotables* car leur quantité exploitable est fixée par la nature (présence de vent ou pas, flux de photons solaires liés à l'alternance jour-nuit, à la saison et à la couverture nuageuse). On ne peut pas les contrôler, seulement tenter de lisser leurs fluctuations.

4.2.5 Concentrée ou diluée

Par ailleurs, les énergies de stock sont plus concentrées que les énergies de flux. En effet, estimons la masse (Balian 2009) nécessaire pour produire 1 kWh (soit 3,6 MJ). L'énergie la plus concentrée est l'énergie nucléaire basée sur l'interaction forte. Ainsi la fission dégage 1 kWh d'énergie thermique en consommant 6 mg d'uranium naturel¹⁶ (et donc 0,04 mg d'uranium 235, fissile).

Pour fournir 1 kWh d'énergie thermique avec de l'énergie chimique¹⁷ (combustion de combustibles fossiles ou de biomasse), il faut en brûler environ 0,1 kg.

Les énergies les plus diluées sont l'énergie gravitationnelle et les énergies mécaniques. Pour produire 1 kWh dans une usine hydroélectrique (dont le rendement est environ 85 %), il faut faire chuter environ 2,5 tonnes d'eau d'une hauteur de 123 m (ce qui est, en guise d'exemple, la hauteur de chute maximale du barrage de Serre-Ponçon sur la Durance)¹⁸. Avec une éolienne, il faut récupérer toute l'énergie cinétique d'environ 20 000 m³ d'air circulant à 60 km/h, soit 24 tonnes¹⁹.

Ces écarts considérables (entre quelques microgrammes et quelques dizaines de tonnes, soit un rapport de 10¹³) font que l'emprise au sol des installations sera très différente entre une centrale nucléaire et un parc d'éoliennes.

16. Pour obtenir 1 kWh d'énergie thermique, il faut transformer en énergie une masse de : $m = E/c^2 = 3,6 \cdot 10^6 / (3 \cdot 10^8)^2 \sim 0,3 \mu\text{g}$. À combien de noyaux d'uranium 235 fissionnés cela correspond-t-il? Chaque réaction de fission (voir la section 2.4) dégage une énergie de 200 MeV. Pour obtenir 1 kWh, il faut que $1,13 \cdot 10^{17}$ noyaux d'uranium 235 fissionnent. Comme la masse d'un noyau vaut 235 fois la masse d'un nucléon ($1,66 \cdot 10^{-27}$ kg), soit : $3,9 \cdot 10^{-25}$ kg, la masse d'uranium 235 ayant fissionné est donc de $4 \cdot 10^{-8}$ kg. L'uranium naturel contient 0,7 % d'uranium 235, cela fait environ 6 mg d'uranium naturel.

17. On a 1 tep = 11,6 MWh.

18. L'énergie potentielle gravitationnelle vaut $E_p = mgh$ où m est la masse de l'eau, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur et h est la hauteur de chute.

19. L'énergie cinétique est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv^2$$

où m est la masse d'air et v sa vitesse; $\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ est la masse volumique de l'air et V le volume correspondant à la masse m . Donc :

$$E_c = 0,5 \times 1,2 \times 20\,000 \times \left(\frac{60}{3,6}\right)^2 = 3,3 \text{ MJ} \approx 1 \text{ kWh}$$

Cela suppose néanmoins que toute l'énergie de la masse d'air est prélevée par l'éolienne, et donc que la vitesse du vent est nulle derrière le rotor. On se reportera à l'annexe C pour un calcul du rendement maximal théorique d'une éolienne.

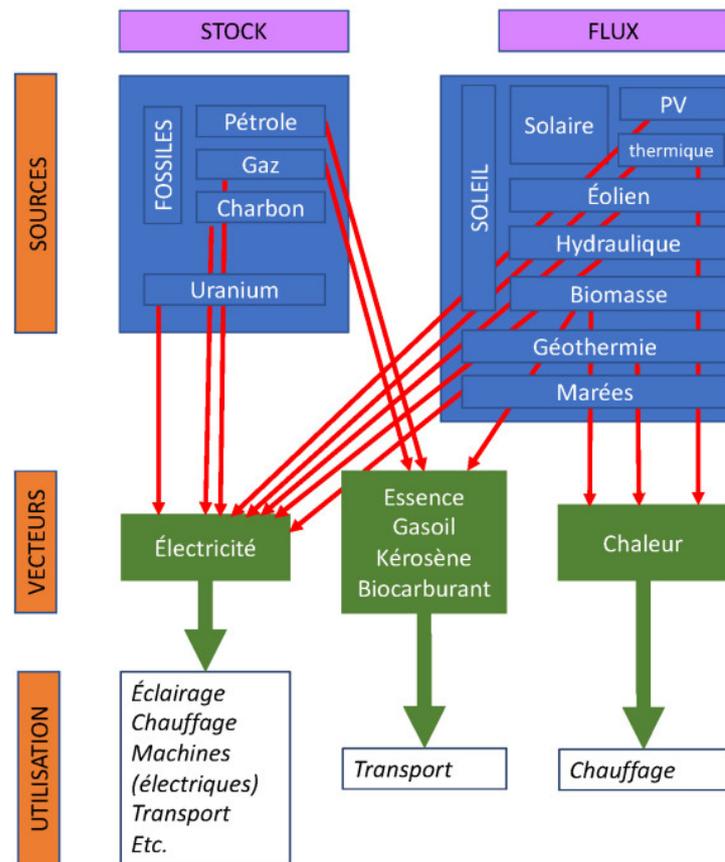


FIGURE 4.4 – Les différentes formes que revêt l'énergie. PV signifie « photovoltaïque ».

La figure 4.4 illustre les différents types d'énergie.

4.2.6 L'énergie grise et le taux de retour énergétique

On pourrait se poser la question suivante : combien faut-il d'énergie pour produire de l'énergie ? Les concepts d'énergie grise et de taux de retour énergétique répondent en partie à cette question.

L'énergie grise

L'énergie grise est la quantité d'énergie nécessaire pour produire une certaine quantité d'énergie. De manière générale, c'est la quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer n'importe quel produit manufacturé, à savoir l'énergie consommée lors du cycle de vie, à savoir de sa fabrication jusqu'au déchet final, en passant par la phase d'utilisation. L'analyse en cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée d'évaluation de l'impact environnemental selon de nombreux critères (énergie, ressources, pollutions, consommation d'eau, etc.) d'un objet manufacturé, d'un processus, d'une organisation, tout au long de son cycle de vie, selon un périmètre prédéterminé (étapes prises en compte dans l'élaboration). La figure 4.5 illustre de manière exhaustive *toute* l'énergie nécessaire dans l'ensemble de la vie d'une voiture : non seulement celle qui sert à produire et à acheminer le carburant, mais aussi celle qui sert à construire la voiture ainsi que les infrastructures qui lui permettent de rouler : routes, parkings, etc.

Cette évaluation de l'énergie grise n'est pas toujours aisée car de nombreux processus différents peuvent entrer dans le périmètre du cycle de vie (Hall *et al.* 2014).

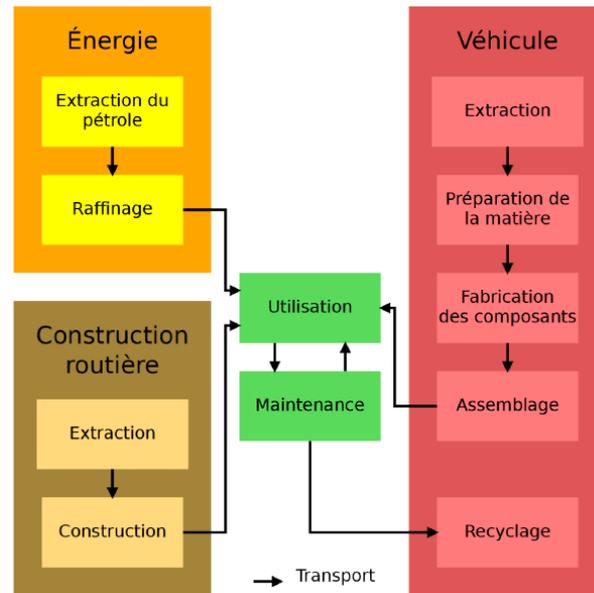


FIGURE 4.5 – Schéma illustrant l'énergie grise d'une voiture. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_grise. CC BY-SA.

Le taux de retour énergétique

Le taux de retour énergétique (TRE) ou *Energy Return On (energy) Invested* (EROI) en anglais, est le rapport entre la quantité d'énergie totale produite à partir d'une source donnée et la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie, à savoir l'énergie grise (voir, par exemple Treiner 2016) :

$$\text{EROI} = \frac{E_{\text{produite}}}{E_{\text{dépensée}}} = \frac{E_{\text{produite}}}{E_{\text{grise}}} \quad (4.4)$$

où on a :

- $E_{\text{produite}} = E_{\text{grise}} + E_{\text{utilisable}} = \text{énergie totale produite}$
- $E_{\text{dépensée}} = E_{\text{grise}} = \text{énergie utilisée pour produire } E_{\text{produite}}$
- $E_{\text{utilisable}} = \text{énergie utile pour être consommée}$

On peut ainsi réécrire (4.4) :

$$\text{EROI} = \frac{E_{\text{grise}} + E_{\text{utilisable}}}{E_{\text{grise}}} = 1 + \frac{E_{\text{utilisable}}}{E_{\text{grise}}}$$

On voit ainsi que pour une technologie produisant de l'énergie utilisable par la société, si $\text{EROI} > 1$ alors il s'agit d'une « source » d'énergie. Mais si $\text{EROI} = 1$, alors l'énergie produite sert uniquement à produire cette énergie sans gain pour la société, auquel cas : $E_{\text{utilisable}} = 0$. Par exemple, pour un processus ayant un EROI de 3, l'utilisation d'une unité d'énergie (E_{grise}) permet d'obtenir 3 unités (E_{produite}), soit un gain net de 2 unités ($E_{\text{utilisable}}$).

Autre exemple : en supposant que l'EROI du carburant est environ de 8, l'énergie grise représente donc :

$$E_{\text{grise}} = E_{\text{utilisable}} \times \frac{1}{\text{EROI} - 1} \quad \text{soit :} \quad E_{\text{grise}} \approx \frac{1}{7} \times E_{\text{utilisable}}$$

où E_{grise} est l'énergie liée à la fabrication du carburant : extraction, transport, raffinage, distribution.

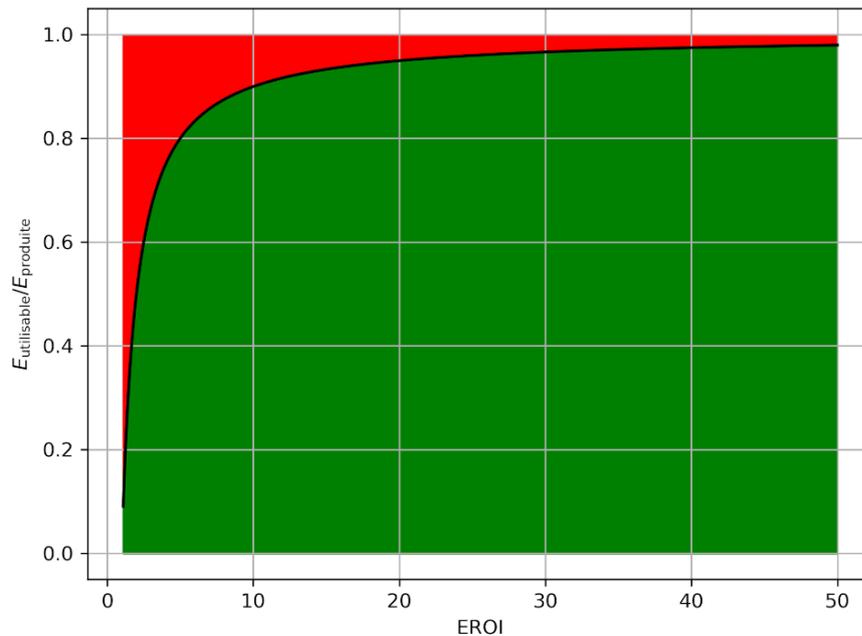


FIGURE 4.6 – Fraction d'énergie utilisable par rapport à l'énergie totale produite en fonction de l'EROI. La partie en vert représente l'énergie utilisable, la partie en rouge est l'énergie grise.

On peut exprimer la fraction d'énergie utilisable par rapport à l'énergie totale produite en fonction de l'EROI :

$$\frac{E_{\text{utilisable}}}{E_{\text{produite}}} = 1 - \frac{1}{\text{EROI}} \quad (4.5)$$

La figure 4.6 représente ainsi la fraction de l'énergie utilisable en fonction de l'EROI. Pour une valeur donnée de l'EROI, la partie en vert est la fraction d'énergie utilisable, tandis que la partie en rouge est la fraction d'énergie grise.

Dans l'exemple précédent, pour un $\text{EROI} = 8$ (carburant), on a : $E_{\text{utilisable}} = 0,875 \times E_{\text{produite}}$ ou bien $E_{\text{grise}} = 0,125 \times E_{\text{produite}}$.

Une société comme la nôtre a un $\text{EROI} \sim 20$; sous une valeur ~ 10 (Lambert *et al.* 2014), le fonctionnement de la société peut devenir problématique (on dépense trop d'énergie à essayer de produire de l'énergie).

L'EROI permet de suivre l'accessibilité technique d'une ressource au cours du temps, selon la raréfaction d'une énergie de stock ou bien selon les progrès des technologies de production. La figure 4.7 montre ainsi l'évolution de l'EROI de la production d'hydrocarbures (pétrole et gaz) aux États-Unis de 1920 à 2010, qui a diminué d'un facteur 2 environ, à cause de la raréfaction des nappes de pétrole et de la plus grande difficulté technique (et donc énergétique) à les extraire du sous-sol.

L'EROI est donc un concept clef dans la production (ou plutôt la transformation) de l'énergie pour les besoins de la société, mais il reste relativement flou dans sa définition pour être utilisé avec précaution. Il permet néanmoins d'estimer la rentabilité économique (mais non environnementale) de la production d'une source d'énergie.

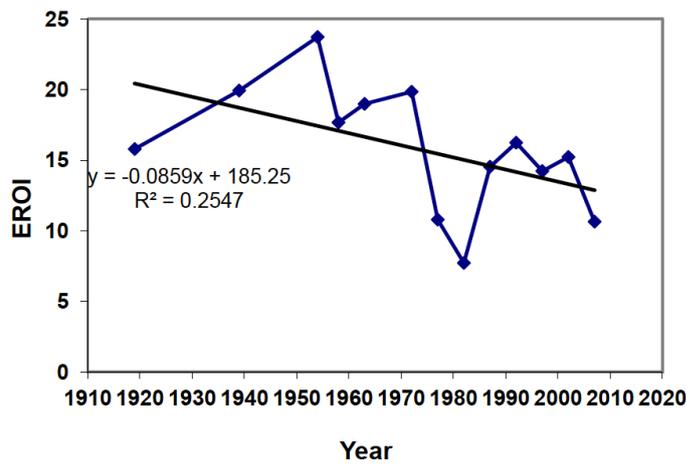


FIGURE 4.7 – Évolution de l'EROI pour la production de pétrole et de gaz aux États-Unis de 1920 à 2010. Extrait de Guilford *et al.* (2011).

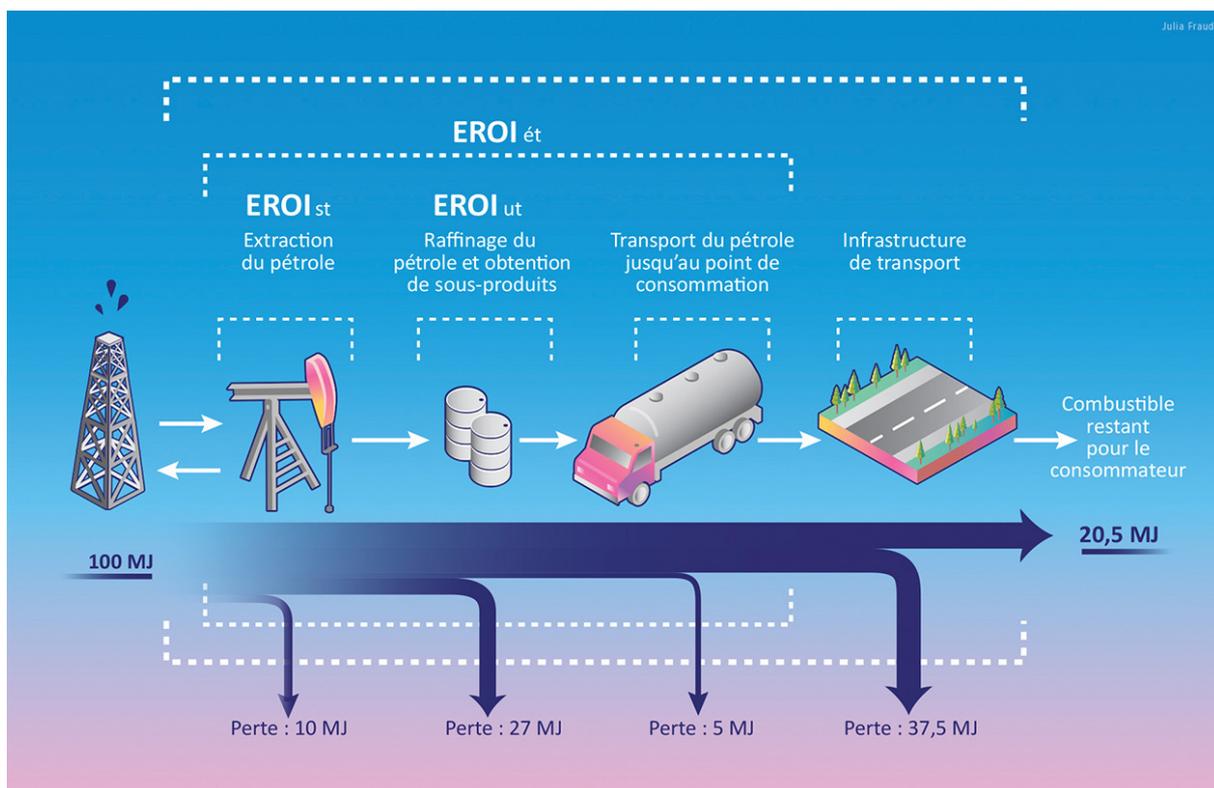


FIGURE 4.8 – Illustration de différents périmètres de calcul de l'EROI avec l'exemple du pétrole et son processus de transformation depuis le puits jusqu'au carburant utilisable (énergie utile). Le EROI standard (EROI_{st}) fait référence à l'énergie directe et indirecte utilisée pour générer le produit à la tête de puits. L'EROI au point d'utilisation (EROI_{ut}) et l'EROI étendu (EROI_{ét}) comprennent la perte d'énergie associée au traitement du pétrole lors de sa transformation de l'extraction aux carburants prêts à l'emploi. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Limites de ces concepts

La notion d'énergie grise (et donc celle d'EROI) ne tient pas compte des autres ressources (limitées) en matière²⁰ comme le sable pour le béton, les métaux comme le cuivre, l'aluminium ou le cobalt, les terres rares comme le néodyme, etc. Elle ne tient pas compte non plus des impacts environnementaux autres que ceux liés à l'énergie (à savoir l'émission de CO₂) : les pollutions notamment liées à l'extraction, et l'impact sur les paysages²¹.

Par ailleurs, la définition de l'énergie grise comme celle de l'EROI dépend du « périmètre » considéré. Le périmètre est l'ensemble des activités dont on tient compte pour déterminer l'énergie grise (Hall *et al.* 2014). Selon les estimations du périmètre considéré, il peut y avoir d'importantes différences (figure 4.8).

La figure 4.9 montre ainsi différentes estimations de l'EROI, l'une provient de Weißbach *et al.* (2013) (figure 4.9a), les deux autres (figures 4.9b et 4.9c) d'une méta-analyse de plusieurs estimations par Dale (2010). On constate qu'il y a de grosses différences entre les deux, qui dépendent de la définition de l'EROI utilisé et des contours de ce qui est mis dans le numérateur et le dénominateur de la fraction. Sur la production d'électricité nucléaire, par exemple, Hall *et al.* (2014) obtiennent un EROI de 14 à partir de 33 estimations issues de 15 publications. Tandis que Dale (2010) obtient un EROI de 9 à partir de 33 publications. Ce qui est nettement plus petit que celui obtenu par Weißbach *et al.* (2013), à savoir 75.

Un autre défaut de l'EROI est de considérer l'énergie comme un tout indivisible. L'énergie grise, quant à elle, peut séparer les différents vecteurs énergétiques (électricité, carburant, chaleur, hydrogène, par exemple), pour permettre une analyse plus fine selon les sources : la production d'un kilowatt-heure d'électricité nucléaire, par exemple, nécessite non seulement de l'électricité qui peut (éventuellement) être ponctionnée directement, mais également de la chaleur et du carburant, qui proviennent d'autres sources. Sommer les énergies grises et en soustraire le total à la production d'une source, comme le fait l'EROI, est ainsi biaisé. Néanmoins ce type d'analyse fine est beaucoup plus complexe à mettre en œuvre.

4.2.7 Le paysage énergétique mondial

Les sources de données sur l'énergie

Les données sur l'énergie présentées ici proviennent de différentes sources, pour différentes années, selon la disponibilité trouvée. Il est relativement compliqué de vérifier ces données, souvent fournies avec moult chiffres significatifs, mais sans aucune incertitude ni même information sur la façon dont elles sont obtenues. Quand on y regarde de plus près, certains rapports sont intrinsèquement incohérents. Les différentes unités absconses utilisées (tep ou Wh, entre autres) ne facilitent pas les comparaisons.

Par exemple, dans BP (2019), la consommation d'énergie primaire dans le monde est de 13 864,9 Mtep en 2018, dont 611,3 Mtep d'énergie nucléaire (primaire, c'est-à-dire d'énergie thermique). En unités physiques, cela donne respectivement $5,8 \cdot 10^{20}$ J et $2,6 \cdot 10^{19}$ J. Dans le même rapport, plus loin, un tableau donne la génération d'électricité dans le monde, soit 26 614,8 TWh, dont 2701,4 TWh d'électricité nucléaire. En unités physiques, cela donne respectivement $9,6 \cdot 10^{19}$ J et $9,7 \cdot 10^{18}$ J. Le rapport entre l'énergie primaire nucléaire consommée dans le monde et l'électricité nucléaire produite est de 2,63, ce qui ferait un rendement de 38 %, alors que le rendement d'une centrale nucléaire est plutôt de 33 %. La différence de $1,12 \cdot 10^{18}$ J proviendrait-elle de la différence entre l'électricité *générée* et l'énergie *produite*? Donc des pertes (4,3 %)? Le diable se cache dans les détails et dans la définition exacte de ce que l'on considère comme quantité!

20. Voir par exemple le podcast *Sismique #103 : Minerais et métaux, un enjeu stratégique* avec Emmanuel Hache, décembre 2022, <https://www.sismique.fr/post/103-extraire-a-tout-prix-emmanuel-hache>.

21. Voir par exemple la mine de charbon à ciel ouvert de Garzweiler en Allemagne (https://fr.wikipedia.org/wiki/Mine_de_Garzweiler) qui racle le sol sur près de 200 m de profondeur et sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés (<https://www.arte.tv/fr/videos/100748-005-A/toxic-tour-5-6/>).

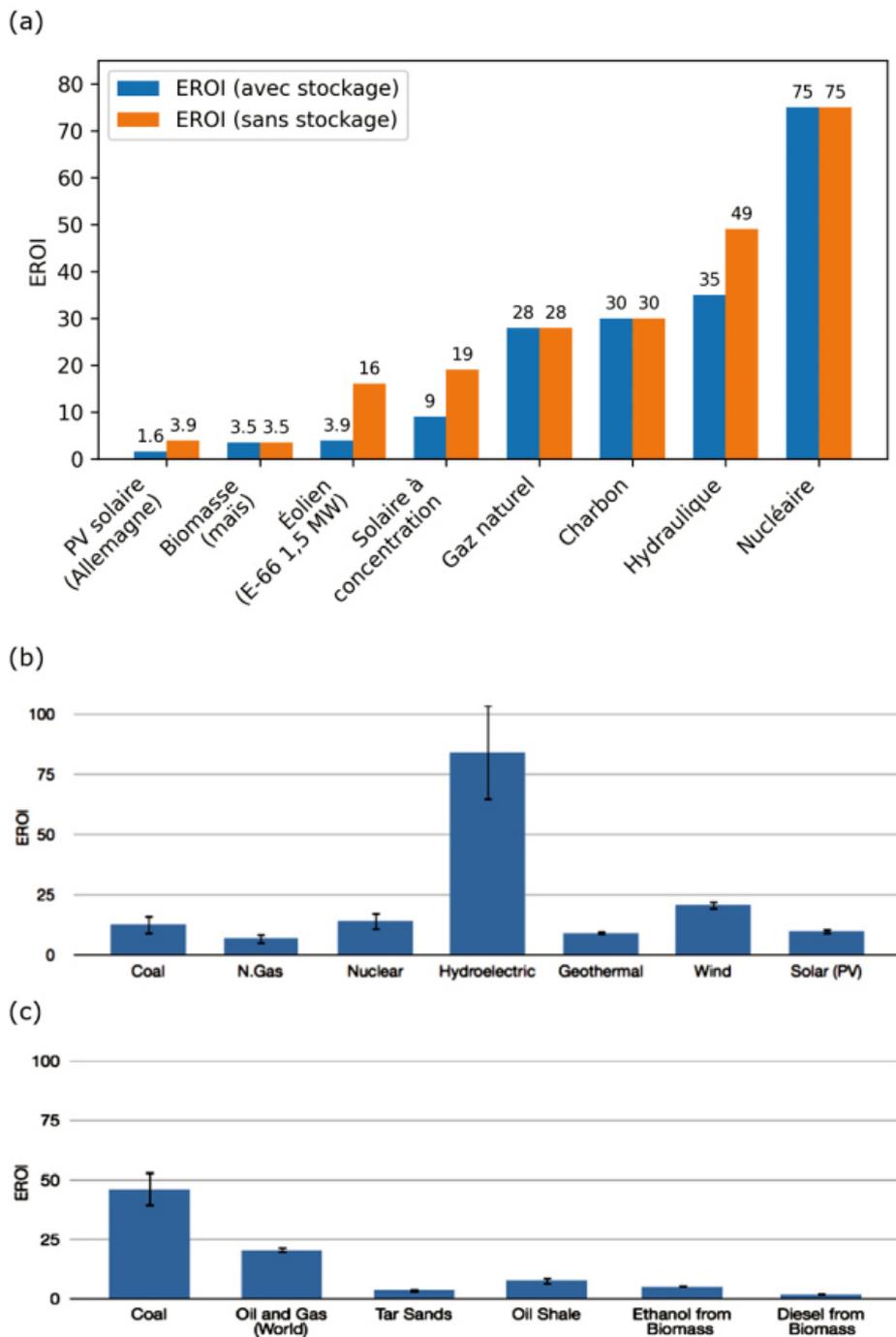


FIGURE 4.9 – Différentes estimations de l'EROI pour différentes énergies. (a) EROI de toutes les techniques énergétiques, en tenant compte de l'intermittence nécessitant soit un stockage ou pas. La biomasse considérée est le maïs (55 t/ha par an récolté (humide)); le vent est celui du nord de l'Allemagne (2000 heures à pleine charge); pour le charbon, le transport n'est pas compris; pour le nucléaire, l'enrichissement est compté comme 83 % par centrifugeuse et 17 % par diffusion; pour le solaire photovoltaïque (PV), il s'agit d'installations sur le toit; pour le solaire thermique dans le désert (CSP), la connexion au réseau électrique européen n'est pas comprise. (b) Valeurs moyennes de l'EROI (avec les incertitudes) pour la génération d'électricité; elles sont basées sur différentes valeurs publiées. (c) Valeurs moyennes de l'EROI (avec les incertitudes) pour les combustibles thermiques; elles sont basées sur différentes des valeurs publiées. (b), (c) Figures tirées de Hall *et al.* (2014) et issues d'une méta-analyse par Dale (2010). CC BY-NC-ND.

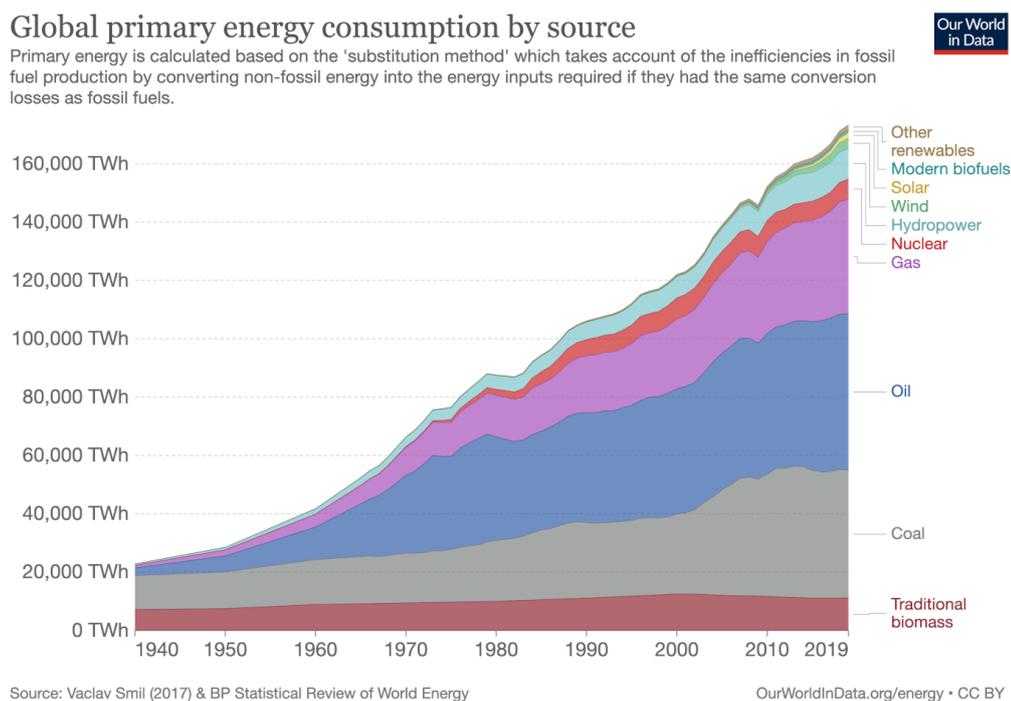


FIGURE 4.10 – Évolution de la consommation d'énergie primaire dans le monde entre 1940 et 2019. Source : <https://ourworldindata.org/energy>.

Autre exemple, le Data Portal²² du Shift Project donne une consommation totale d'énergie primaire dans le monde en 2016 de $6,08 \cdot 10^{20}$ J et une production de $5,96 \cdot 10^{20}$ J, donc *moindre* que la consommation. Néanmoins, il faut noter que cette base de données a le mérite de rassembler beaucoup d'informations et de permettre de choisir les unités (dont le joule !).

L'énergie dans le monde

La consommation totale d'énergie primaire dans le monde était de 13,5 Gtep en 2017 (BP 2018) et de 13,9 Gtep ($5,8 \cdot 10^{20}$ J = 580EJ ou encore une puissance de 18,4 TW) en 2018 (BP 2019), elle augmente à un rythme d'environ 2,2 % par an (figure 4.10), elle est de 595,15 EJ en 2021²³. La population mondiale étant de 7,63 milliards de personnes en 2018, cela représente donc une consommation énergétique moyenne de 1,8 tep/habitant/an ou encore 76 GJ/habitant/an. Les ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) contribuent à 78,1 % de la consommation totale, le nucléaire à 4,1 %, les renouvelables (essentiellement l'hydroélectricité et la biomasse – le bois) à 17,8 % (voir figure 4.11c). La figure 4.10 montre que depuis 1940 (mais c'est le cas également avant), il n'y a jamais eu de *transition* énergétique, c'est-à-dire de substitution d'une source d'énergie par une autre : le panorama actuel est le reflet d'accumulations successives. La figure 4.11a montre la part relative de chaque source d'énergie primaire dans le monde, avec la part grandissante du charbon dès le milieu du XIX^e siècle, celle du pétrole au début du XX^e siècle, puis le gaz naturel dès le milieu du XX^e siècle avec l'hydroélectricité ; le nucléaire est arrivé à la fin du XX^e siècle. La part des renouvelables croît depuis les années 2010. Elles viennent s'additionner au reste sans s'y substituer.

22. <https://theshiftdataportal.org/>

23. Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/bp-statistical-review-world-energy-2022-les-chiffres-de-lenergie-dans-le-monde-220629>.

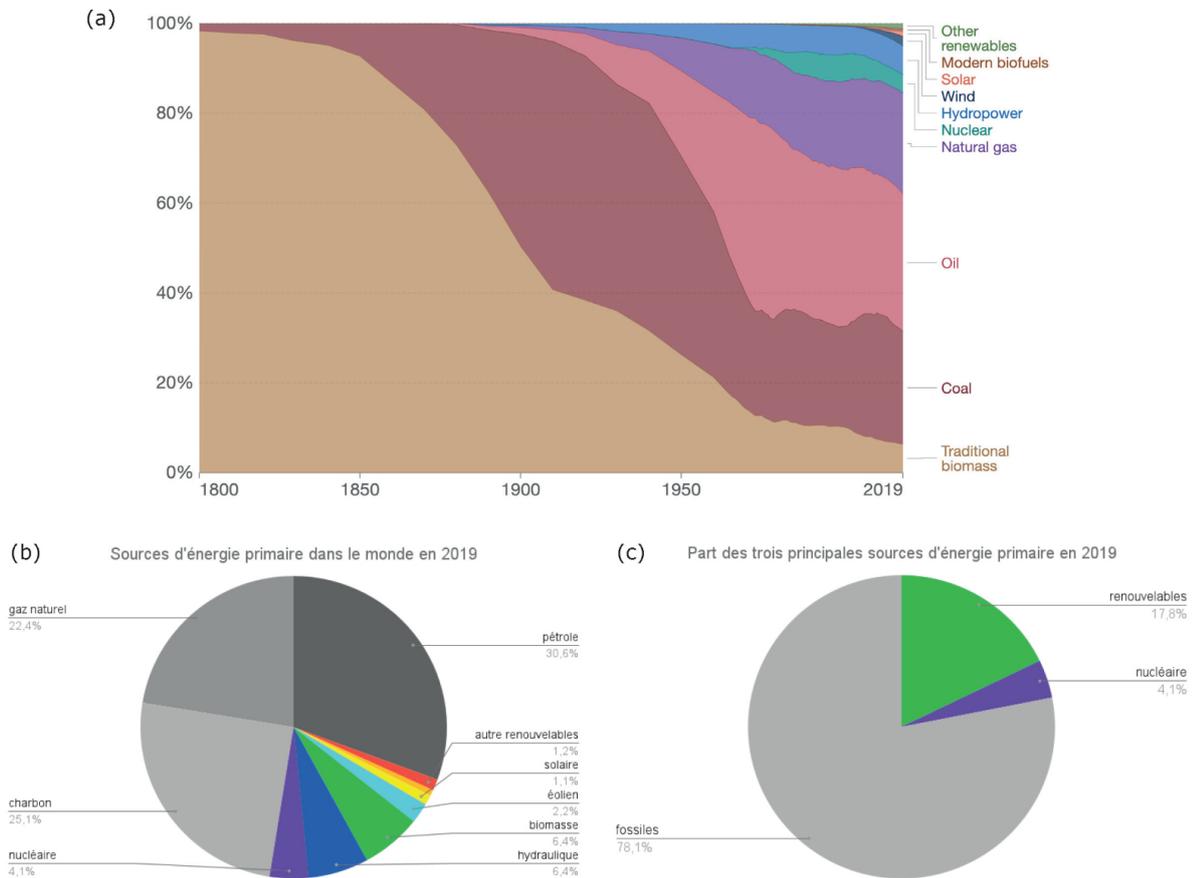


FIGURE 4.11 – Part relative des différentes sources d'énergie primaire dans le monde. (a) Évolution de la ces parts relatives entre 1800 et 2019. Source : Our World in Data (<https://ourworldindata.org/global-energy-200-years>). (b) Pourcentage de ces parts relatives en 2019. (c) Parts relatives des trois principales sources d'énergie primaire.

4.3 Les différents types d'énergie

4.3.1 Les énergies de stock

Les énergies de stock sont des énergies épuisables (en quantité par définition limitée), mais dont il est possible de piloter le flux avec une certaine latitude (Treiner 2018).

4.3.2 Les énergies fossiles

Les combustibles fossiles sont riches en carbone et sont issus de la dégradation de matières organiques (méthanisation) enfouies dans le sol depuis des centaines de millions d'années. Il s'agit du pétrole, du charbon, de la tourbe et du gaz naturel. Ces sources ne sont pas renouvelables (à l'échelle de l'humanité), car elles demandent des millions d'années pour se constituer, et sont utilisées bien plus rapidement.

Quand un être vivant meurt, il va se décomposer. Le carbone qui le compose est transformé en dioxyde de carbone dans un milieu riche en oxygène (aérobie). Dans un milieu pauvre en oxygène (anaérobie), comme sur un fond marin, c'est l'activité bactérienne qui va décomposer la matière, formant un composé solide, le kérogène, sorte d'état intermédiaire entre la matière organique et les combustibles fossiles, composé surtout de carbone et d'oxygène. La tectonique des plaques va soumettre le kérogène à des pressions et à des températures élevées (50 °C à 120 °C). Il s'ensuit alors une décomposition chimique (pyrolyse) qui conduit à la formation

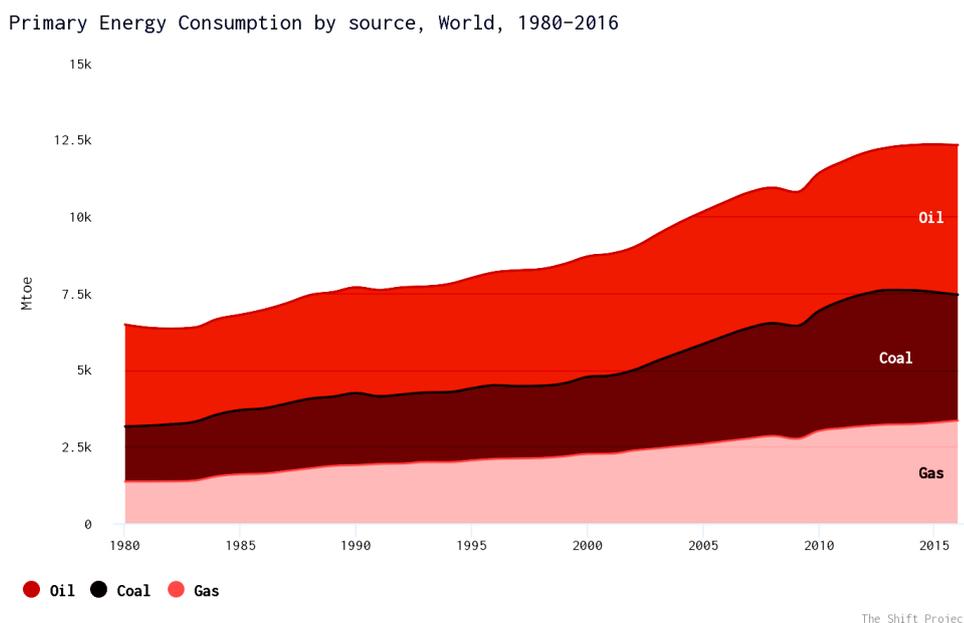


FIGURE 4.12 – Évolution de la consommation des énergies fossiles entre 1980 et 2016. Source : U.S. Energy Information Administration, <https://www.theshiftdataportal.org/>. CC BY-SA.

de pétrole et de gaz naturel. Le charbon est formé à partir de végétaux plus élaborés (arbres, plantes...), dont la pyrolyse du kérogène fournit, plus la pression et la température (donc la profondeur) augmentent, de la tourbe, de la lignite, de la houille et enfin de l'anhracite. La fraction de carbone passe de moins de 55 % pour la tourbe à plus de 90 % pour l'anhracite.

Constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène (le méthane a le rapport H/C le plus élevé, l'anhracite et certaines houilles sont composés de carbone presque pur), les combustibles fossiles sont des hydrocarbures. Emprisonnés dans les sous-sols de la Terre, ils sont extraits de différentes manières :

- par puisage, en ce qui concerne le pétrole et le gaz naturel ;
- par extraction directe à la surface des sols, pour la tourbe ;
- par extraction dans des mines, comme pour le charbon ;
- par extraction dans des mines à ciel ouvert, en particulier pour le lignite.

Le charbon a été le moteur de la révolution industrielle. Dès la fin du XVII^e siècle, on se rend compte que sa combustion permet de dégager suffisamment d'énergie thermique pour faire fonctionner les machines à vapeur. Son utilisation permet également de limiter l'utilisation du bois et donc limiter la déforestation. Le pétrole devient l'objet d'une exploitation industrielle au milieu du XIX^e siècle. Le gaz naturel fut d'abord utilisé pour l'éclairage (éclairage public au gaz dans les années 1820 aux États-Unis), avant d'être utilisé comme combustible pour propulser des machines et pour le chauffage. Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale qu'il va susciter un intérêt en ce sens.

La combustion des hydrocarbures en présence d'oxygène conduit à la formation de dioxyde de carbone et d'eau, et dégage de l'énergie. Par exemple, la combustion du méthane :



La combustion du méthane dégage 56 MJ/kg (pouvoir calorifique supérieur – PCS – voir note 48 page 172). Celle du butane (C₄H₁₀) dégage 50 MJ/kg (PCS), et celle de l'octane (essence ; C₈H₁₈), 48 MJ/kg (PCS).

La consommation des énergies fossiles dans le monde (figure 4.12) a quasiment doublé entre 1980 (6,48 Gtep = 2,7 · 10²⁰ J) et 2016 (12,33 Gtep = 5,2 · 10²⁰ J).

Modèle de Hubbert

On peut évaluer de manière simple l'évolution d'un stock de matériau en quantité finie, comme les ressources fossiles ou encore l'uranium. En 1956, lors d'un colloque de l'*American Petroleum Institute*, le géologue américain Marion King Hubbert prédit que la production globale de pétrole aux États-Unis atteindrait un maximum autour de 1970. On s'aperçut en 1970 qu'il avait vu juste.

Le modèle qu'il avait alors développé est assez simple.

Considérons la production annuelle $P(t)$ à l'instant t , et Q la production totale cumulée jusqu'à l'instant t . On a ainsi :

$$P(t) = \frac{dQ}{dt}$$

On peut faire l'hypothèse que la production annuelle $P(t)$ est proportionnelle à la quantité $Q(t)$ déjà extraite, en supposant que l'exploitation d'une ressource (quelle qu'elle soit) augmente au fur et à mesure des connaissances acquises sur cette ressource et de l'amélioration des technologies permettant de l'extraire (voir Treiner 2018). Soit :

$$P(t) = \alpha \times Q(t) \quad \text{soit} \quad \frac{dQ}{dt} = \alpha \times Q(t)$$

Mais cela génère une croissance exponentielle, ce qui n'est pas réaliste. En fait le coefficient α n'est pas constant mais décroît quand la quantité totale extraite augmente :

$$\alpha(t) = \alpha_0 \times \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_{\max}}\right)$$

où α_0 est une constante et Q_{\max} est la quantité totale de ressource exploitable, constante. On peut poser une décroissance linéaire de α avec $Q(t)$:

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha_0 \times Q(t) \times \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_{\max}}\right), \quad (4.7)$$

ce qui donne une équation différentielle du premier ordre non-linéaire (terme en Q^2 dans le second membre). Pour résoudre cette équation, il suffit de faire le changement de variable suivant :

$$Z(t) = \frac{1}{Q(t)} \quad \text{soit} : \quad \frac{dZ}{dt} = -\frac{1}{Z^2} \frac{dZ}{dt}$$

pour $Q(t) > 0$, ce qui est toujours le cas. En reportant dans l'équation (4.7), cela donne :

$$\frac{dZ}{dt} = -\alpha_0 \times Z(t) + \frac{\alpha_0}{Q_{\max}}$$

On obtient ainsi une équation différentielle du premier ordre, linéaire, à coefficients constants, assez simple à résoudre, par exemple en séparant les variables :

$$\frac{dZ}{-\alpha_0 \times Z(t) + \frac{\alpha_0}{Q_{\max}}} = dt$$

En intégrant :

$$\ln \left| -\alpha_0 \times Z(t) + \frac{\alpha_0}{Q_{\max}} \right| = -\alpha_0 t + k$$

où k est une constante d'intégration. Soit :

$$Z(t) = \frac{1}{Q_{\max}} - \frac{K}{\alpha_0} e^{-\alpha_0 t} \quad \text{avec} : \quad K = \pm e^k$$

On détermine K à l'aide d'une condition à la limite : $Q(0) = Q_0 = \frac{1}{Z(0)}$. Soit :

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_{\max}} - \frac{K}{\alpha_0}$$

soit :

$$K = \frac{\alpha_0}{Q_0} \left(\frac{Q_0}{Q_{\max}} - 1 \right)$$

Comme $Q_{\max} > Q_0$, $K < 0$.

Cela donne :

$$Q(t) = \frac{1}{Z(t)} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{\max}} - \frac{K}{\alpha_0} e^{-\alpha_0 t}}$$

ou encore :

$$Q(t) = \frac{Q_{\max}}{1 + \left(\frac{Q_{\max}}{Q_0} - 1 \right) e^{-\alpha_0 t}} \quad (4.8)$$

Cette fonction est appelée fonction *logistique* ou fonction de Verhulst²⁴. Cette fonction est représentée pour le pétrole sur les figures 4.13b et 4.13d ; il s'agit d'une sigmoïde. La production annuelle $P(t)$ est la dérivée de la production cumulée $Q(t)$:

$$P(t) = \frac{dQ}{dt} = \alpha_0 \times Q(t) \times \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_{\max}} \right)$$

soit :

$$P(t) = \alpha_0 Q_{\max} \frac{\left(\frac{Q_{\max}}{Q_0} - 1 \right) e^{-\alpha_0 t}}{\left[1 + \left(\frac{Q_{\max}}{Q_0} - 1 \right) e^{-\alpha_0 t} \right]^2} \quad (4.9)$$

Cette fonction est ajustée sur les données²⁵ du pétrole aux États-Unis (figure 4.13a) et dans le monde (figure 4.13c).

Pour les États-Unis, le « pic » des réserves de pétrole (dites conventionnelles) intervient au milieu des années 1980²⁶. À partir de la fin des années 2000, la production connaît une hausse spectaculaire à cause du pétrole de schiste. Le modèle de Hubbert utilisé ici est très sommaire, il ne permet pas de faire des prédictions précises : il faillit même à modéliser le stock mondial (figure 4.13). Néanmoins, on peut l'utiliser pour bien d'autres matériaux que le pétrole, comme les métaux, l'uranium, etc. (voir par exemple Halloy 2018).

24. La fonction logistique fut ainsi nommée par Verhulst en 1845 alors qu'il étudiait des modèles d'évolution de la population. Ce type de modèle simple peut s'appliquer à de nombreux phénomènes, et illustre le fait qu'une croissance exponentielle est essentiellement transitoire, elle ne peut durer indéfiniment : la propagation d'une épidémie, d'un feu de forêt, ou l'exploitation d'une ressource en quantité finie... Voir : <http://www.energieclimat.net/article-1-apres-croissance-l-equation-logistique-81590596.html>

25. La quantité de pétrole est exprimée en millions de tonnes équivalent pétrole (tep). Elle est souvent exprimée dans une unité plus ésotérique, mais néanmoins très usitée, le *baril* (symbole bl ou bbl), une unité de volume qui équivaut à 42 gallons américains ou 158,99 litres. 1 tep = 7,14 bep (barils équivalent pétrole).

26. Hubbert avait utilisé les données disponibles jusqu'en 1956 pour prédire un pic au début des années 1970. Un « pic » a eu lieu en 1970 (figure 4.13c) ce qui sembla donner raison à ses prédictions, mais la suite montra que le problème était plus complexe !

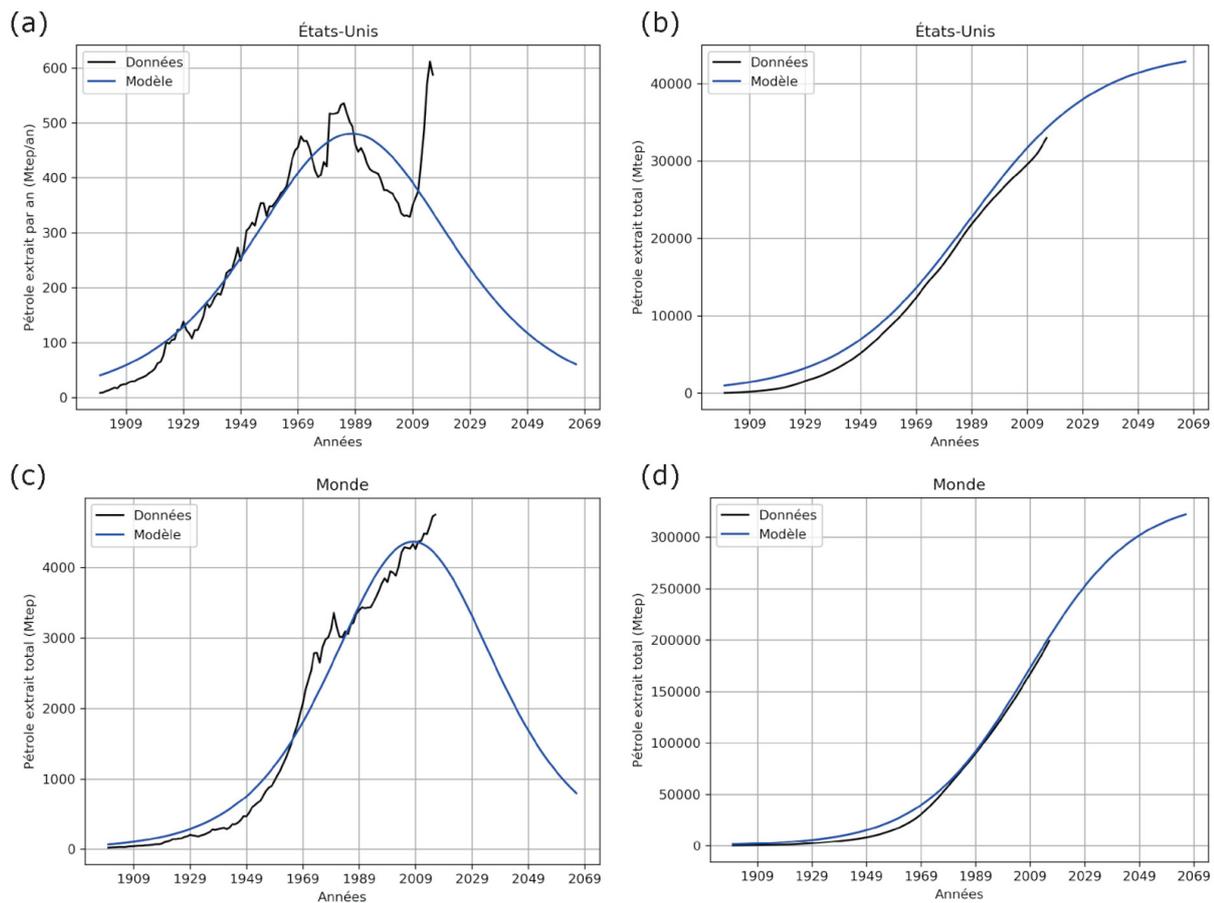


FIGURE 4.13 – Évolution du pétrole extrait aux États-Unis et dans le monde. Les courbes en noir sont les données (en millions de tonnes équivalent pétrole – Mtep), les courbes en bleu sont issues du modèle de Hubbert ajusté aux données. Les données sont tirées de la base de données de l’U.S. Energy Information Administration, <https://theshiftdataportal.org/>. (a) Pétrole extrait annuellement aux États-Unis. Les paramètres du modèle ajusté obtenus sont : $\alpha_0 = 4,3 \cdot 10^{-2} \text{ an}^{-1}$, $Q_{\max} = 4,4 \cdot 10^4 \text{ Mtep}$ et $Q_0 = 1,4 \cdot 10^4 \text{ Mtep}$. (b) Pétrole total extrait aux États-Unis. (c) Pétrole extrait annuellement dans le monde. Les paramètres du modèle ajusté obtenus sont : $\alpha_0 = 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ an}^{-1}$, $Q_{\max} = 3,4 \cdot 10^5 \text{ Mtep}$ et $Q_0 = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Mtep}$. (d) Pétrole total extrait dans le monde.

Les pics de production des ressources fossiles

Le pic mondial de production du pétrole conventionnel se situe vers 2008²⁷, celui du pétrole non conventionnel²⁸ (dit de schiste²⁹, pétrole extralourd³⁰...) devrait arriver vers 2025 (Auzanneau 2019). Pour le gaz, le pic arriverait vers 2030. Pour le charbon, l’incertitude est plus grande, mais il pourrait arriver vers 2030-2035 (Durand 2018).

En 2018, les réserves mondiales prouvées (c’est-à-dire techniquement et économiquement accessibles) de pétrole (pétrole conventionnel et pétrole non conventionnel : pétrole de schiste, sables bitumineux, etc.) sont estimées à 1730 milliards de barils (soit 244 Gt) (BP 2019). Le rapport réserves sur production annuelle est d’environ 50 ans (la production annuelle de pétrole

27. Avec une production de 69 millions de barils par jour ; elle était en 2018 de 66,5 millions de barils par jour (IEA 2018).

28. Le pétrole non conventionnel est celui qui est extrait avec des techniques différentes du puits de pétrole traditionnel, qui sont généralement plus onéreuses.

29. Il s’agit de roches sédimentaires (et des schistes) qui contiennent des kérogènes, substances à mi-chemin dans le processus de transformation, entre la matière organique et le pétrole ou le gaz.

30. Il s’agit de pétrole obtenu à partir de bitume ou de sable bitumineux ; le bitume est un mélange d’hydrocarbures à poids moléculaire élevé.

était de 4,5 Gt en 2018, ou 95 millions de barils par jour en moyenne). La consommation annuelle de pétrole est de 4,7 Gt en 2018, ce chiffre incluant les bio-carburants.

Les réserves prouvées de charbon (anthracite, lignite, bitumineux) dans le monde sont de 1055 Gt en 2018 (BP 2019). Le rapport réserves sur production annuelle est de quasiment 200 ans. En effet, la production annuelle (2018) de charbon est de 3,9 Gtep, soit 5,6 Gt (1 tonne équivalent pétrole = 1,43 tonne équivalent charbon). La consommation annuelle est de 3,8 Gtep.

Les réserves prouvées de gaz naturel sont évaluées à $197 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ en 2018³¹ (BP 2019). Le rapport réserves sur production annuelle est d'environ 50 ans. En effet, la production annuelle de gaz naturel est de $3,9 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ (la consommation annuelle est de $3,8 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$) en 2018.

4.3.3 Le nucléaire

L'énergie nucléaire (électricité) est une énergie de stock, actuellement basée sur l'uranium qui est un minerai présent dans la croûte terrestre, donc en quantité limitée.

La consommation d'électricité nucléaire dans le monde est de 611 Mtep ($2,6 \cdot 10^{19} \text{ J}$) en 2018 (BP 2019), soit 4,4 % de l'énergie primaire consommée ($13\,865 \text{ Mtep} = 5,8 \cdot 10^{20} \text{ J}$). Toujours en 2018, 26 615 TWh ($9,6 \cdot 10^{19} \text{ J}$) d'électricité ont été générés dans le monde, dont 2701 TWh ($9,7 \cdot 10^{18} \text{ J}$) par le nucléaire (BP 2019), soit 10 %.

En France, la production d'électricité nucléaire (RTE 2019) a été de 380 TWh en 2019 (70,9 % de la production totale d'électricité), soit 43 GW en moyenne sur l'année, pour une capacité de production de 63,1 GW (soit 47 % de la capacité de production totale française qui est de 135 GW), d'où un facteur de charge de 68 %.

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire est abordé dans le chapitre 2, §2.4.

Réserves d'uranium

Les réacteurs nucléaires actuels utilisent comme combustible l'uranium 235 qui est présent à 0,7 % dans l'uranium naturel. Pour produire 1 GW d'électricité pendant un an (8772 heures), il faut produire environ 3 GW de chaleur, car les réacteurs nucléaires ont un rendement thermodynamique d'environ 33 %. Ce qui fait $9,5 \cdot 10^{16} \text{ J}$. Comme chaque noyau fissionné libère environ 200 MeV d'énergie thermique, soit $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$, il faut casser $3 \cdot 10^{27}$ noyaux. Avec une masse molaire de $235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, cela fait 1175 kg d'uranium 235.

En réalité, tout l'uranium 235 n'est pas intégralement fissionné, seulement 80 à 90 % (Grenèche *et al.* 2012). Il faut donc 1380 kg d'uranium 235 au départ pour produire 1 GW d'électricité.

En 2017, les ressources estimées d'uranium naturel pouvant être extraites à un coût raisonnable (moins de 130 \$/kg) sont estimées à 6,1 millions de tonnes³², environ 42 700 tonnes d'uranium 235.

En 2019, on comptait 450 réacteurs en service dans le monde³³. Fin 2018, la puissance électrique nette des tranches nucléaires en service dans le monde s'élevait à quelque 397 GW³⁴. Il faut donc 548 tonnes d'uranium 235 chaque année pour parvenir à couvrir ces besoins. À ce rythme les réserves actuellement connues seront épuisées en 78 ans...

Une solution pour augmenter le stock disponible serait d'utiliser la surgénération, c'est-à-dire la capacité d'un réacteur à produire plus d'isotopes fissiles qu'il n'en consomme en

31. L'unité que l'on trouve dans le rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie, entre autres, est le bcm ou tcm : *billion cubic meter* et *trillion cubic meter* respectivement, soit 1000 milliards de mètres cubes ou 1 milliard de mètres cubes.

32. Source : <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>

33. Source : <https://www.nuklearforum.ch/fr/faits-et-chiffres/nuclearplanet/les-centrales-nucleaires-dans-le-monde>

34. En supposant que l'ensemble de ces réacteurs fonctionnent en permanence, avec donc un facteur de charge de 1. Ce qui n'est évidemment pas le cas.

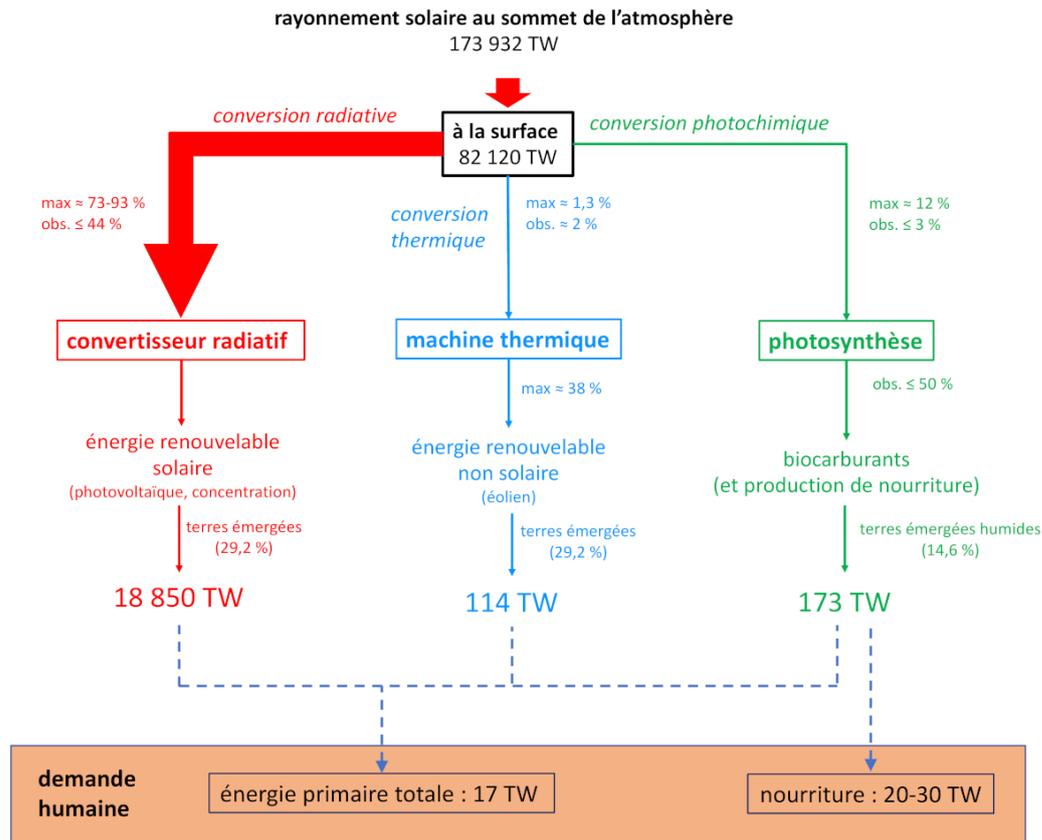


FIGURE 4.14 – Schéma des différents flux d'énergie d'origine solaire : énergie radiative (photovoltaïque, etc.), énergie thermique (gradients de température à l'origine des vents, chaleur latente à l'origine du cycle de l'eau, etc.) et énergie chimique (photosynthèse et biomasse). Les différentes formes d'énergies renouvelables issues de l'énergie solaire sont comparées avec la consommation humaine en termes d'énergie primaire (17 TW, plutôt 18,4 TW en 2018) et de nourriture (Kleidon *et al.* 2015).

transmutant des isotopes fertiles en isotopes fissiles. Cette capacité pourrait être utilisée dans les réacteurs de 4^e génération (réacteurs à neutrons rapides). Dans ce cadre, théoriquement, tout l'uranium 238 est utilisable ce qui permet un gain en énergie de $1/0,007 = 140$ par rapport à l'utilisation actuelle de l'uranium 235 seul. En pratique, le gain réel est estimé à un facteur 50 à 100 (Grenèche *et al.* 2012), ce qui multiplie d'autant l'horizon des réserves.

4.3.4 Les énergies de flux

Les énergies de flux sont : l'énergie solaire (figure 4.14), l'énergie éolienne, l'énergie marine, l'énergie hydraulique, l'énergie issue de la biomasse, l'énergie géothermique. Ce sont des énergies inépuisables (à l'échelle humaine), que l'on appelle donc « renouvelables » (à l'échelle humaine). Néanmoins leur flux est généralement variable, spatialement et/ou temporellement. Pour utiliser ces énergies, il faut connaître ces flux, leur régularité ou périodicité, leur intensité, et les possibilités de les récupérer ou de les transformer en énergie utilisable.

À part la géothermie, issue de la désintégration radioactive des roches dans les profondeurs de la Terre, et l'énergie issue des marées (issue de l'énergie gravitationnelle du Soleil et de la Lune) les autres énergies sont toutes directement ou indirectement issues de l'énergie radiative solaire. Cette énergie est à l'origine de la circulation atmosphérique, et donc des vents dont l'énergie mécanique prélevée est l'énergie éolienne ou l'énergie de la houle marine ; du cycle de l'eau (évaporation et précipitations), donc de l'énergie hydraulique ; des plantes qui croissent par la photosynthèse et forment la biomasse.

La surface terrestre (sous l'atmosphère), reçoit en moyenne sur toute sa surface et sur une rotation (24 h), environ $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (voir la figure 3.13, page 100). La surface de la Terre étant de $4\pi R^2 = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$, elle reçoit (en moyenne) chaque seconde $8,7 \cdot 10^{16} \text{ J}$ de la part du Soleil.

L'humanité consomme environ 14 Gtep/an, soit $5,9 \cdot 10^{20} \text{ J} \cdot \text{an}^{-1}$ ce qui représente une puissance moyenne de $1,9 \cdot 10^{13} \text{ W} = 19 \text{ TW}$. Ainsi, l'énergie consommée en une année parvient à la surface de la Terre en environ 2 h de la part du Soleil (en moyenne), bien que de manière diffuse et difficilement « récupérable » en l'état.

Environ 1 à 2 % de l'énergie solaire parvenant à la surface terrestre est transformée en vent, soit une puissance d'environ 900 TW (Miller *et al.* 2011).

Sur $8,7 \cdot 10^4 \text{ TW}$ d'énergie solaire parvenant à la surface de la Terre, environ 180 TW est convertie en biomasse³⁵ soit 0,2 %.

4.3.5 L'énergie solaire photovoltaïque

Il s'agit de l'énergie électrique récupérée grâce à des cellules photovoltaïques. L'effet photoélectrique³⁶ à l'origine de ces cellules est un effet physique qui désigne l'émission d'électrons par un matériau soumis à un flux de photons. Cette propriété de certains matériaux (métaux, semi-conducteurs...) a été découverte en 1839 par Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond (père de Henri Becquerel, découvreur de la radioactivité naturelle). Elle a été théoriquement comprise par Albert Einstein en 1905 à l'aide du concept de photon, particule de lumière, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1921. L'effet photovoltaïque est un effet photoélectrique apparaissant sous l'incidence de photons sur un semi-conducteur, provoquant l'apparition d'un courant électrique. Il est utilisé dans les panneaux photovoltaïques permettant de produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire, dont la première application date de 1956 pour l'alimentation des satellites à l'aide de cellules au silicium. Les centrales photovoltaïques pour la production d'électricité sur les réseaux électriques apparaissent à partir des années quatre-vingt. Elles utilisent des onduleurs³⁷ pour convertir le courant continu issu des panneaux en courant alternatif.

Actuellement la puissance installée (on parle de *puissance crête*) des installations (figure 4.15) peut aller jusqu'à plusieurs centaines de mégawatts.

Le rendement (à savoir le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue – équation 4.1) d'un panneau solaire photovoltaïque varie entre 6 et 8 % pour les panneaux en silicium amorphe, et atteint 46 % pour les plus performants en laboratoire. En moyenne, les rendements sont autour de 15 %.

Le facteur de charge (équation 4.2) moyen des installations photovoltaïques varie de 10 % à 24 % selon la localisation, les valeurs les plus élevées étant atteintes dans des régions très ensoleillées autour des basses latitudes.

En 2017, la production mondiale d'électricité solaire photovoltaïque s'élevait à 443,6 TWh, en augmentation de 35 % par rapport à 2016; elle représentait 1,7 % de la production mondiale d'électricité³⁸. En 2021, la capacité de production installée a atteint 942 GW. La production s'est élevée à 1000 TWh la même année. La production d'électricité photovoltaïque dans le monde a cru de 322 % entre 2015 et 2021.

35. La Terre reçoit environ $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, sur une surface de $5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$. Le rendement de la photosynthèse est d'environ 0,1 % sur les océans (70 % de la surface) et d'environ 0,7 % pour la végétation sur les terres couvrant environ 20 % de la surface (voir §4.3.8). Ce qui permet d'obtenir cet ordre de grandeur.

36. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photoélectrique

37. Un onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir un courant continu en courant alternatif; il est constitué de thyristors, des transistors de puissance, disposés de telle manière que le signal d'entrée est modulé pour obtenir en sortie un signal alternatif de fréquence désirée.

38. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_solaire_photovoltaïque



FIGURE 4.15 – Parking de supermarché couvert équipé de panneaux solaires photovoltaïques à Gap (Hautes-Alpes). Crédit photo : Guillaume Blanc.

En France, en 2019 (RTE 2019), la production d'électricité d'origine solaire est de 11,6 TWh (hausse de 7,8 % par rapport à l'année précédente). Le facteur de charge annuel³⁹ est de 14 % (contre 15 % en 2018). La capacité installée est de 9,4 GW. En 2021, la capacité installée en France passe à 14,3 GW, la production est de 15,1 TWh.

Quelle surface de panneaux photovoltaïques ?

La densité surfacique de puissance solaire moyenne annuelle reçue en France est d'environ $145 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Avec un rendement de 15 %, un panneau solaire photovoltaïque délivre donc, en moyenne, une puissance électrique d'environ $22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, soit une quantité annuelle d'énergie de $193 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$.

Prenons l'exemple extrême des besoins annuels d'électricité en France (478 TWh consommés en 2018). Pour y subvenir uniquement avec des panneaux solaires photovoltaïques, il faudrait couvrir une surface de $2,5 \cdot 10^9 \text{ m}^2 = 2500 \text{ km}^2$, soit l'équivalent de la surface de l'île de la Réunion.

Pour subvenir aux besoins mondiaux d'électricité (environ 23 000 TWh/an), il faudrait une surface 48 fois plus importante, soit la surface des régions Auvergne-Rhône-Alpes et Bourgogne-France-Comté réunies.

4.3.6 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique peut être utilisée directement pour chauffer de l'eau, cuire des aliments, etc. Ou bien indirectement, en concentrant le rayonnement solaire à l'aide de miroirs afin de produire de l'électricité de manière classique (chauffage d'un fluide caloporteur – EDF 2012), auquel cas on parle de solaire thermodynamique. Les technologies utilisées dans les deux cas sont très différentes. Dans le premier, les températures sont dites basses ($\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$), dans le second elles sont hautes (typiquement $> 300 \text{ }^\circ\text{C}$). Dans le premier cas, l'échelle est généralement individuelle (chauffe-eau solaire, par exemple), dans le second elle est industrielle.

39.

$$f = \frac{11,6 \cdot 10^{12} \times 24 \times 365,25}{9,4 \cdot 10^9} = 0,14$$

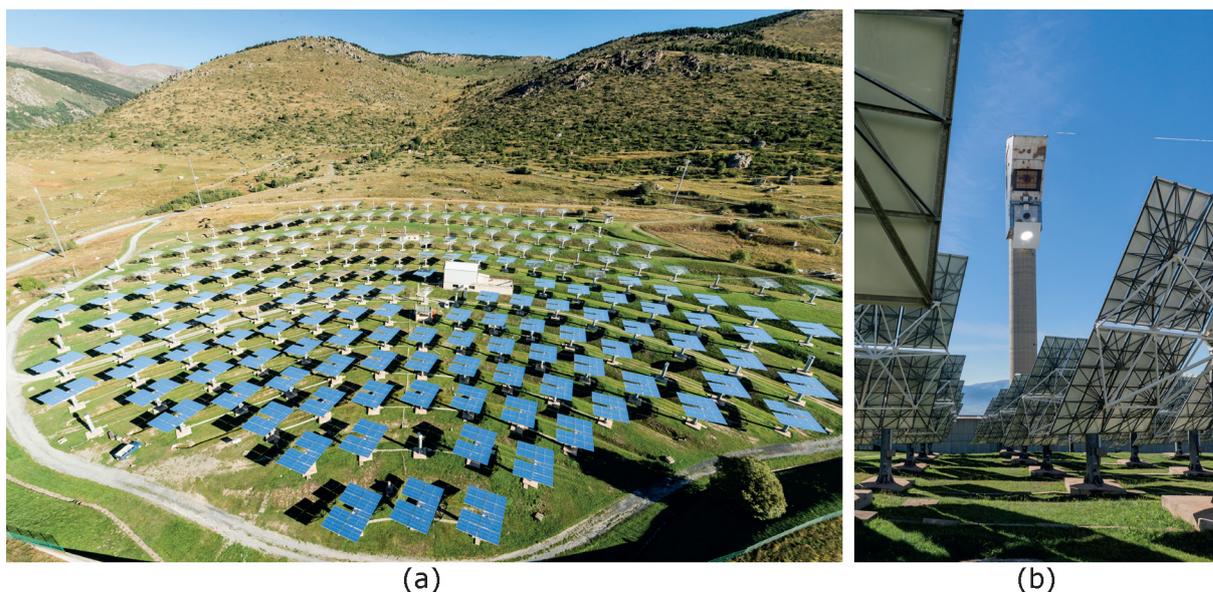


FIGURE 4.16 – (a) Héliostats de la centrale solaire THEMIS à Targassonne, dans les Pyrénées-Orientales. (b) Tour de la centrale solaire THEMIS qui reçoit la lumière réfléchiée par les héliostats. (a), (b) Crédit photos : Cyril FRESILLON / PROMES / CNRS Photothèque. © CNRS.

Par exemple, la centrale solaire Thémis dans les Pyrénées est un centre de recherche sur les centrales thermodynamiques⁴⁰ (figure 4.16).

La production⁴¹ des centrales solaires thermodynamiques atteignait 11 TWh en 2017, soit 0,04 % de la production mondiale d'électricité; en comparaison, la production du solaire photovoltaïque s'élevait à 444 TWh (1,7 %), soit 41 fois plus. Les principaux pays producteurs sont l'Espagne : 5,8 TWh (54 %) et les États-Unis : 3,6 TWh (33 %). La puissance installée de leurs centrales atteignait 4845 MW fin 2017 (soit un facteur de charge global d'environ 26 %).

4.3.7 L'énergie éolienne

La puissance cinétique de déplacement des masses d'air sur la planète représente environ 900 TW (Miller *et al.* 2011) (soit environ 1 % de la puissance solaire incidente au niveau du sol). L'air est mis en mouvement par une différence de température induisant une différence de pression, et donc un mouvement d'air pour rétablir l'équilibre. À l'échelle de la planète, l'énergie de rayonnement du Soleil n'est pas répartie de manière identique sur toute la surface de la Terre, la région des Tropiques en reçoit beaucoup plus que celle des pôles. Il y a donc une circulation générale de l'air pour répartir l'énergie solaire entre l'équateur et les pôles⁴².

Mais la totalité des 900 TW (ce qui représente quand même 50 fois les besoins de l'humanité), ne peut être « extraite ». On montre que seulement 18 à 68 TW pourraient théoriquement être récupérés (Miller *et al.* 2011). Comme le système Terre est à l'équilibre et que la vitesse des vents n'augmente pas avec le temps, l'énergie cinétique des masses d'air est dissipée. La moitié est dissipée par des frottements au sein de l'atmosphère elle-même, l'autre moitié par des frottements avec la surface des continents et des océans. L'idée est donc de récupérer une partie de l'énergie cinétique *avant* qu'elle ne se dissipe en énergie thermique en la transférant aux pales d'éoliennes. Elle devient de l'énergie mécanique de rotation, qui est à son tour transformée en électricité par l'intermédiaire d'un alternateur. Électricité qui peut ensuite être injectée sur le réseau.

40. Voir : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Thémis_\(centrale_solaire\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thémis_(centrale_solaire)).

41. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_thermodynamique.

42. Voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Circulation_atmosphérique.

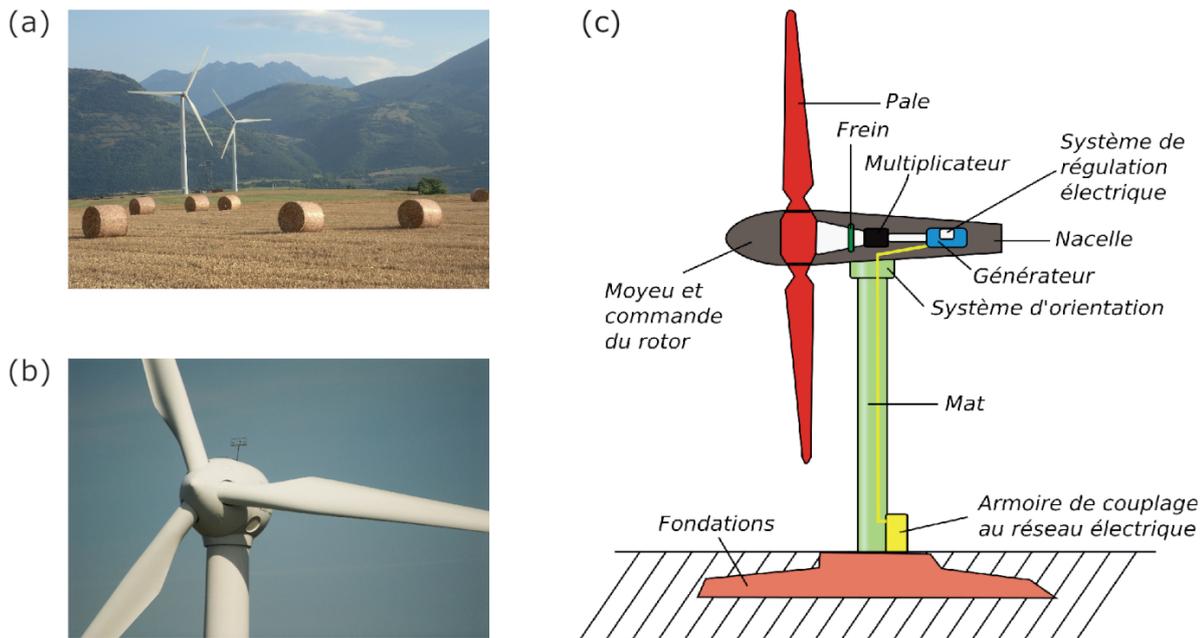


FIGURE 4.17 – (a) Deux éoliennes dans le Trièves, au pied de l’Obiou. Crédit photo : Guillaume Blanc. (b) Éolienne en bordure de l’A1. Crédit photo : Guillaume Blanc. (c) Schéma d’une éolienne. Source : Wikipédia/Mathieu Clabaut. CC BY-SA.

La part de l’électricité éolienne dans la production mondiale atteignait 4,4 % en 2017 et était estimée à 6 % en 2020. Les principaux pays producteurs sont la Chine (29 % du total mondial en 2020), les États-Unis (21 %) et l’Allemagne (8 %). La puissance installée dans le monde s’élevait à 831 GW en 2021, en croissance de 172 % par rapport à 2015. La production d’électricité éolienne mondiale s’élevait à 1862 TWh en 2021. En France, la production d’électricité éolienne s’élevait à 40 TWh en 2020, en progression de 185 % par rapport à 2015. La puissance installée en 2021 est de 19 GW.

Fonctionnement d’une éolienne

Il existe de nombreux types d’éoliennes pour produire de l’électricité ou encore pour effectuer un travail mécanique (pompage). La plupart des éoliennes⁴³ sont constituées d’un rotor, horizontal (voir la figure 4.17), composé de 3 pales.

La puissance d’une éolienne se situe entre 1 et 5 MW. L’éolienne est à sa puissance nominale pour des vitesses de vent entre 15 m/s et 25 m/s (voir l’annexe C). Sous 15 m/s, l’éolienne produit moins d’énergie, au-dessus de 25 m/s, elle est mise à l’arrêt. Le rotor tourne entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation du rotor est généralement contrôlée par l’angle de calage des pales (angle entre le plan de la pale et le plan perpendiculaire à la direction du vent).

Le couplage au réseau électrique peut se faire de différentes manières, soit par couplage direct du rotor à un alternateur synchrone, la fréquence électrique du réseau étant obtenue par un convertisseur de fréquence. Il peut également se faire par couplage à un alternateur asynchrone (où le rotor et le stator sont découplés) par l’intermédiaire d’un multiplicateur de vitesse (boîte d’engrenages), car l’alternateur doit fournir du courant électrique à la fréquence de 50 Hz pour être couplé au réseau.

43. Voir : Nifenecker (2014) et <https://eolienne.f4jr.org/aerogenerateur>.

Combien d'éoliennes ?

En 2019, la France a produit 537,7 TWh d'énergie électrique (pour une consommation de 473 TWh : la France a exporté 84 TWh, importé 28,3 TWh, soit un solde de 55,7 TWh vers ses voisins ; la différence de 9 TWh représente les pertes par effet Joule lors du transport sur le réseau ainsi que l'énergie « grise » prélevée pour le fonctionnement des installations). Cette production se répartit en 70,6 % (379,5 TWh) pour le nucléaire, 11,2 % (60 TWh) pour l'hydraulique, 7,9 % (42,6 TWh) pour le thermique fossile, 6,3 % (34,1 TWh) pour l'éolien, 2,2 % (11,6 TWh) pour le solaire, 1,8 % (9,9 TWh) pour les bioénergies.

Fin 2019, la capacité de production éolienne installée est de 16,5 GW. La puissance installée moyenne d'une éolienne est de 2 MW, ce qui représente donc environ 8250 éoliennes. Une éolienne a un rotor dont le diamètre est de 80 à 110 m, perché sur un mât de 80 à 100 m, pour une hauteur totale de 120 à 155 m. Dans un parc éolien, les éoliennes doivent être à 400 m les unes des autres (ADEME 2011), chaque éolienne « occupe » donc environ 16 ha de terrain, mais leur emprise au sol représente seulement 300 m² – 2 % – (la fondation typique d'une éolienne fait 10 m de rayon), le reste est utilisable pour des terrains agricoles, par exemple.

Comme le parc éolien a fourni 34,1 TWh en moyenne sur l'année, on en déduit que la puissance moyenne est de 3,9 GW, et donc le facteur de charge de : $3,9 / 16,5 = 23,6\%$. Une éolienne produit donc, en moyenne, une puissance de 0,47 MW.

Le parc électronucléaire quant à lui, a une capacité de production de 63,1 GW. Le parc de 58 réacteurs (en 2019) est réparti sur 19 sites, un site ayant typiquement une superficie de 150 ha. Cela représente en moyenne 1088 MW par réacteur. La puissance moyenne totale était de 43,3 GW en 2019, soit un facteur de charge de 68,7 %.

Les centrales nucléaires occupent donc environ 2850 ha, pour une puissance moyenne de 43,3 GW, soit 15 MW/ha. Le parc éolien représente environ 132 000 ha, une surface 500 fois plus élevée, pour une puissance moyenne de 3,9 GW, soit 0,03 MW/ha.

Si on veut (en admettant que ce soit physiquement possible) remplacer les centrales nucléaires par des éoliennes, pour fournir la puissance moyenne produite par le nucléaire en 2019, il faudrait rajouter environ $43\,300 / 0,47 \approx 92\,000$ éoliennes, soit une surface d'environ 1 472 000 ha, ou 14 720 km². Ce qui représente, en gros, l'équivalent de deux départements français. La surface inutilisable (bétonnée) représente environ 295 km² (trois fois la surface de la ville de Paris). Contre 28,5 km² (un facteur 10 fois moindre) pour les centrales nucléaires.

On peut également comparer les volumes de béton et d'acier nécessaires : les centrales nucléaires consomment 760 t/MWh de béton et 160 t/MWh d'acier, tandis que les éoliennes consomment 8000 t/MWh de béton et 1800 t/MWh d'acier (DoE 2015, p. 390), soit un facteur 10 plus élevé.

4.3.8 La biomasse

D'après l'article 19 de la loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement⁴⁴, *La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.*

L'ensemble de la biomasse sur Terre (figure 4.18) est estimé à environ 550 Gt de carbone (Bar-On *et al.* 2018). Les plantes en composent la grande majorité (450 Gt de carbone, soit 82 %), les bactéries viennent juste après avec 70 Gt de carbone (13 %).

44. Voir : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do?idArticle=JORFARTI000020949597&cidTexte=JORFTEXT000020949548&categorieLien=id>.

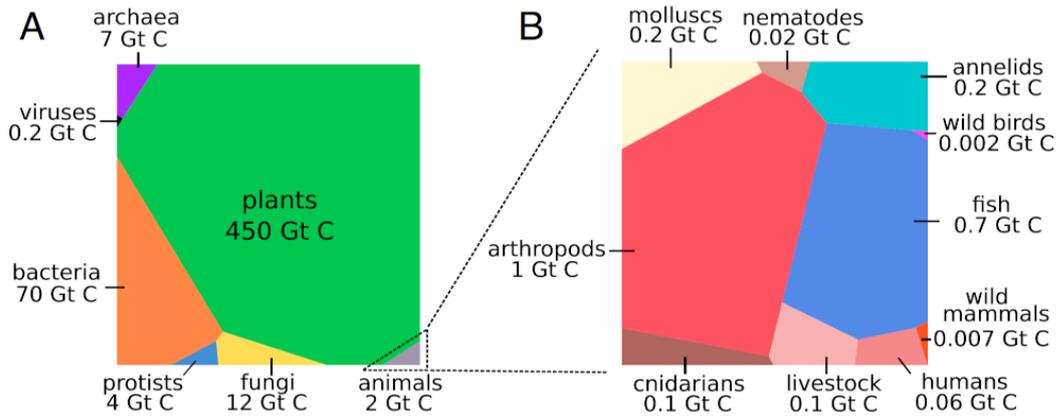
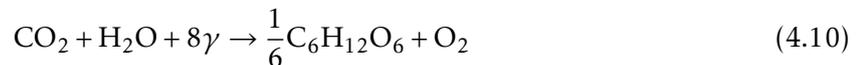


FIGURE 4.18 – Représentation graphique de la distribution globale de la biomasse sur Terre, par groupes taxonomiques d'êtres vivants. L'aire de chaque polygone est proportionnelle à la masse correspondante du groupe. Le « livestock » représente les animaux d'élevage. Source : Bar-On *et al.* (2018). CC BY-NC-ND.

Dans les organismes photosynthétiques, la chlorophylle⁴⁵ permet d'utiliser l'énergie radiative solaire pour fabriquer des molécules organiques permettant la croissance de la plante. C'est une molécule organique complexe qui permet de récupérer les photons de longueur d'onde adéquate dans le rayonnement pour ensuite, à l'aide d'eau et de dioxyde de carbone, synthétiser les molécules organiques (glucides, comme le glucose) nécessaires à la plante. La chlorophylle absorbe la lumière visible dans toutes les longueurs d'onde entre 400 et 740 nm. Néanmoins la végétation n'absorbe pas parfaitement toutes ces longueurs d'onde, elle reflète environ 10 % de la lumière incidente. Cette lumière a une longueur d'onde essentiellement dans la bande verte (autour de 530 nm), c'est pourquoi la végétation apparaît verte.

La réaction photosynthétique est typiquement⁴⁶ (Bolton & Hall 1991) :



où γ représente un photon. Il en faut au minimum 8 pour convertir une mole de CO₂ en glucide (on considère dans ce cas la synthèse du glucose : C₆H₁₂O₆) (Zhu *et al.* 2008).

Le glucose contient 2862 kJ · mol⁻¹, donc 1/6 de mole contient 477 kJ (Zhu *et al.* 2008).

L'énergie radiative E nécessaire pour une mole de CO₂ est celle de 8 moles de photons, soit :

$$E = 8 \times \mathcal{N} \times \frac{hc}{\lambda}$$

où : $\mathcal{N} = 6,02 \cdot 10^{23}$ est le nombre d'Avogadro ; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J · s est la constante de Planck ; $c = 3 \cdot 10^8$ m · s⁻¹ est la vitesse de la lumière ; λ est la longueur d'onde des photons, que l'on prend à 690 nm (la photosynthèse opère entre 400 nm et 740 nm, avec un maximum autour de 690 nm - Bolton & Hall 1991). Alors :

$$E = 8 \times 6,02 \cdot 10^{23} \times \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{690 \cdot 10^{-9}} = 1386 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Le rendement énergétique de la réaction chimique de photosynthèse est donc environ : $\eta = 477/1386 = 0,34$.

45. Voir : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlorophylle>.

46. Cela correspond au mécanisme (simplifié) concernant 95 % des plantes vertes, notamment aux latitudes moyennes (photosynthèse en C3). Sous les latitudes tropicales, d'autres mécanismes ont lieu compte tenu des conditions climatiques plus chaudes (photosynthèse en C4).

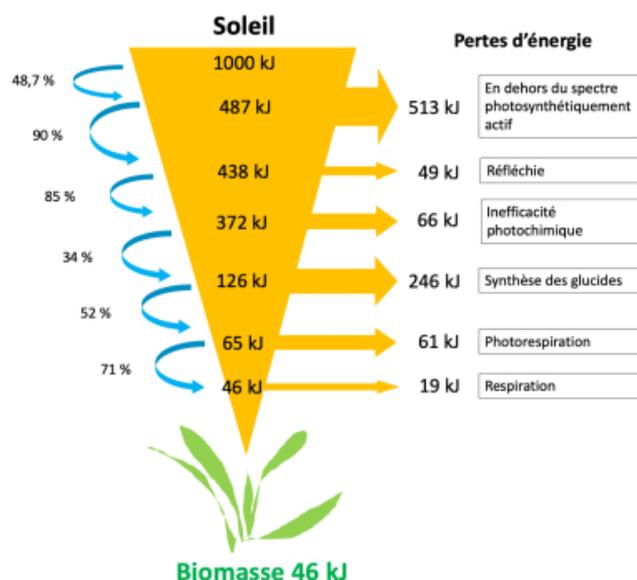


FIGURE 4.19 – Illustration du rendement de la production de biomasse par la photosynthèse. Les pertes d'énergie minimales pour 1000 kJ d'énergie radiative solaire incidente à chaque étape du processus de la photosynthèse, jusqu'à la formation d'énergie chimique stockée dans la plante sont données. Seul le principal type de photosynthèse (C3) est considéré. Les calculs menant à ces valeurs considèrent une température de la feuille de 30 °C et une concentration de CO₂ atmosphérique de 380 ppm. Le rendement maximal théorique de conversion d'énergie est donc de 4,6 %.

L'énergie radiative solaire est ainsi convertie en énergie chimique au sein des plantes, ce qui leur permet d'assurer les fonctions vitales comme la nutrition et la respiration (voir par exemple Sourisse 2018). La respiration se fait généralement la nuit, les plantes consomment alors de l'oxygène et rejettent du dioxyde de carbone. Mais une partie du carbone est stockée par les plantes lors de leur croissance. Il faut ainsi environ 2 kg de dioxyde de carbone pour produire 1 kg de biomasse sèche (soit environ 2200 cm³ de bois ou 200 à 500 mL d'huile).

L'efficacité énergétique de la production de biomasse par photosynthèse est illustrée à la figure 4.19. Ainsi, 51,3 % de l'énergie radiative solaire incidente se trouve en dehors de la fenêtre photosynthétique du spectre; environ 10 % de l'énergie radiative restante est réfléchie; 15 % de ce qui reste est ensuite perdu sous forme d'énergie thermique parce que la réaction de photosynthèse est peu efficace aux plus courtes longueurs d'ondes; 66 % est perdu pour synthétiser le glucose (réaction 4.10); puis 48 % d'énergie est perdue par les réactions de photorespiration et enfin, la respiration expulse 29 % de ce qu'il reste (Zhu *et al.* 2008). Ce qui donne, finalement, 4,6 % :

$$0,487 \times 0,9 \times 0,85 \times 0,34 \times 0,52 \times 0,71 = 0,046$$

Des estimations sur le terrain montrent qu'en réalité, cette efficacité de production de biomasse est bien inférieure⁴⁷, car d'autres facteurs sont limitants (la disponibilité de l'eau ou des nutriments, par exemple). Elle serait plutôt de l'ordre de 0,1 % dans les océans et 0,7 % sur les terres (Kleidon *et al.* 2015).

La surface des continents correspond à 29 % de la surface terrestre, et la végétation s'étend sur environ 66 % de leur surface, soit environ 20 % de la surface totale.

47. D'après Monteith (1972), cette estimation avait déjà été faite en 1852 par William Thomson, futur Lord Kelvin : *l'auteur estime la valeur mécanique de la chaleur solaire laquelle, quand elle n'est pas absorbée par l'atmosphère, devrait tomber chaque année sur chaque pied carré de terre, à 530 000 000 pied-livres (unité d'énergie!); et déduit que probablement beaucoup plus, 1/1000 de la chaleur solaire, qui tombe en fait sur les plantes en croissance, est converti en effet mécanique.*

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- de la chaleur ;
- de l'électricité ;
- une force motrice de déplacement.

On distingue trois procédés d'utilisation de la biomasse : la voie thermochimique (combustion, gazéification, pyrolyse), la méthanisation et la production de biocarburants. La méthanisation permet de produire du gaz via la dégradation de la matière organique par des micro-organismes. La pyrolyse est typiquement la fabrication de charbon de bois. La gazéification est la réaction entre le carbone de la biomasse et des gaz réactants pour produire un gaz combustible.

La combustion de la biomasse produit de l'énergie thermique que l'on quantifie à l'aide du pouvoir calorifique inférieur⁴⁸ (PCI) d'un matériau.

Ainsi la paille⁴⁹ a un PCI de 14,3 MJ·kg⁻¹, le bois de 10,8 MJ·kg⁻¹, les déchets urbains de 7,8 MJ·kg⁻¹. Pour le bois, le PCI dépend directement de son taux d'humidité : des granulés de bois dont le taux d'humidité est très faible (5 à 10 %) ont un PCI de 18 MJ·kg⁻¹. Par comparaison, le PCI du fioul domestique est de 42 MJ·kg⁻¹, celui de la houille de 26 MJ·kg⁻¹.

En moyenne, la biomasse fournit donc 17 MJ par kilogramme de matière sèche. Comme le flux d'énergie radiative solaire est de 171 W·m⁻², cela est équivalent à la production de : 10⁻⁵ kg·s⁻¹·m⁻². Soit, dans des unités plus « agricoles », 3150 t·an⁻¹·ha⁻¹. En comparant à la production effective annuelle de maïs, par exemple, qui varie entre 30 et 60 t·an⁻¹·ha⁻¹ (Monteith 1972), on obtient un rendement énergétique d'environ 1 à 2 %, ce qui corrobore l'ordre de grandeur obtenu théoriquement précédemment.

En 2017 la biomasse fournissait 1329 Mtep (5,56 · 10¹⁹ J) d'énergie, soit 9,5 % environ de l'énergie primaire consommée dans le monde, dont 481,5 TWh (1,73 · 10¹⁸ J) d'électricité, soit 1,9 % de la production mondiale d'électricité.

48. Le pouvoir calorifique (Sawerysyn 1993) est l'énergie dégagée sous forme thermique par la réaction de combustion par le dioxygène. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) comprend à la fois la quantité de chaleur dégagée et la chaleur latente de vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) exclut la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Ainsi, on a toujours PCI < PCS.

En thermochimie, on utilise généralement l'enthalpie standard de réaction, $\Delta_r H^\circ$, qui est la quantité de chaleur reçue par le système chimique (le pouvoir calorifique est reçu par l'utilisateur) à pression constante, dans les conditions standard de température (298 K) et de pression (1013 hPa). L'enthalpie de réaction standard peut ainsi tenir compte ou non de la chaleur latente de vaporisation des produits de la réaction, selon leur état physique à l'issue de la réaction.

Dans le cas d'une réaction de combustion, les produits de réaction contiennent généralement de l'eau qui est à l'état de vapeur à l'issue de la réaction. L'enthalpie de réaction standard tient donc compte de la chaleur latente de vaporisation ainsi que du refroidissement de l'eau jusqu'à 298 K. Ainsi, on a :

$$\text{PCS} = -\Delta_r H^\circ$$

et

$$\text{PCI} = \text{PCS} - nL_{\text{vap}}^{\text{eau}} - nc_p^{\text{eau}}\Delta T$$

où n est le nombre de moles d'eau produite pour une mole de réactif, $L_{\text{vap}}^{\text{eau}} = 40,66 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ est la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau à 1013 hPa, $c_p^{\text{eau}} = 75,5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ est la capacité calorifique molaire de l'eau liquide et ΔT est la différence de température entre l'ébullition de l'eau (373 K) et la température standard (298 K), soit 75 K. Donc :

$$\text{PCI} = \text{PCS} - n \times 46,3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (4.25)$$

49. Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>.

4.3.9 L'énergie marine

Les mers et océans représentent 71 % de la surface de la planète. Ils reçoivent $1,95 \cdot 10^{24} \text{ J} \cdot \text{an}^{-1} = 5,4 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$ de rayonnement solaire sur leur surface. Ils véhiculent donc une grande quantité d'énergie restituée sous forme mécanique (vents, houles, courants), thermique (gradients de température), chimique (gradients de salinité).

La puissance d'origine gravitationnelle provoquant les marées est estimée à 3 TW sur l'ensemble des océans (Eckley Selin 1998), mais seulement 4 à 13 % est potentiellement disponible pour générer de l'électricité à partir de barrages. Il est possible de récupérer l'énergie de la marée en installant des centrales (turbines) dans des zones côtières de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre une marée haute et une marée basse successives).

Par exemple, l'usine marémotrice de la Rance⁵⁰ est installée en France dans l'estuaire de la Rance à côté de Saint-Malo. Mise en service en 1967, elle présente une puissance installée de 240 MW. Son facteur de charge est de 25 %, physiquement lié à la périodicité et à l'amplitude des marées.

La puissance estimée des vagues est de 2 TW (Gunn & Stock-Williams 2012), dont environ 5 % peut être théoriquement extraite. Différentes techniques sont à l'étude pour récupérer cette énergie.

L'exploitation de l'énergie des courants marins peut se faire à l'aide d'hydroliennes. Le potentiel mondial est estimé entre 75 et 100 GW.

Grâce au rayonnement solaire, la surface des océans est chaude, en particulier dans la zone intertropicale où la température en surface peut dépasser les 25 °C. En revanche, en profondeur, la température est de l'ordre de 2 à 4 °C. La couche superficielle de l'océan (zone épipélagique, 200 m) est mélangée par les vagues et le vent ce qui répartit l'énergie reçue. Une zone de transition s'étend ensuite entre 200 m de profondeur (eaux chaudes) et environ 1000 m (eaux froides), la thermocline. Il est donc possible d'utiliser la différence de température entre les zones profondes et les zones superficielles (typiquement 20 °C en zone intertropicale) comme sources froide et chaude d'une machine thermique, pour produire de l'électricité. Le rendement maximal théorique d'une telle installation est donné par le rendement de Carnot :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

où T_f est la température de la source froide, T_c la température de la source chaude. Avec $T_f = 278 \text{ K}$ et $T_c = 298 \text{ K}$, on obtient $\eta_C = 0,07$. Ce qui est assez faible par rapport à d'autres machines thermiques. Des projets sont à l'étude pour tenter de récupérer cette énergie.

L'exploitation des gradients de salinité se fait par le principe de l'osmose. L'osmose est le phénomène de diffusion de molécule de solvant d'une solution vers une autre à travers une membrane dite semi-perméable (ne laissant passer que le solvant, pas le soluté) séparant les deux solutions aux concentrations en soluté différentes (donc hors équilibre). L'évolution vers l'équilibre engendre donc un transfert de solvant du milieu le moins concentré (hypotonique) vers le milieu le plus concentré (hypertonique). La pression osmotique est la pression qu'il faut exercer sur le solvant de la solution la moins concentrée pour l'empêcher de traverser la membrane vers la solution la plus concentrée; elle est proportionnelle à la concentration. On peut utiliser ce principe en mettant des turbines au niveau de la membrane entre deux milieux, de l'eau douce de faible salinité, et de l'eau de mer, de forte salinité. L'eau, passant de l'eau douce (faible pression osmotique) à l'eau de mer (forte pression osmotique) va pouvoir actionner ces turbines. Quelques usines exploitant ce principe existent.

50. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Usine_marémotrice_de_la_Rance.

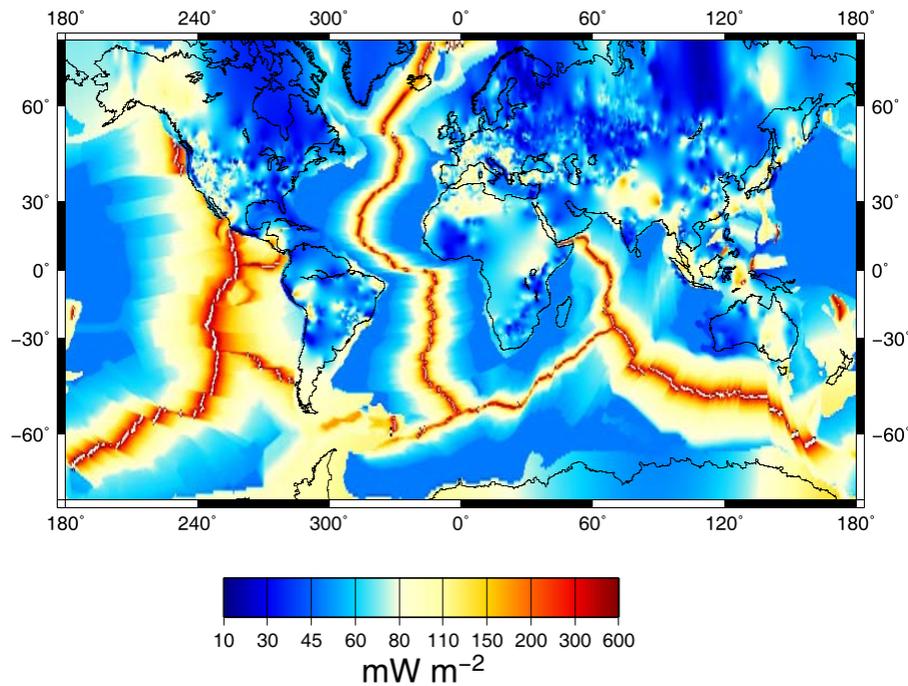


FIGURE 4.20 – Carte du flux géothermique dans le monde. Crédit : Claude Jaupart.

La géothermie

La surface de la Terre reçoit non seulement un flux d'énergie radiative venant du Soleil (environ $171 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), mais également un flux d'énergie thermique provenant du sous-sol⁵¹. Ce flux est beaucoup plus faible, environ $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Davies & Davies 2010), provenant pour moitié de la désintégration radioactive (voir l'annexe D) de quatre isotopes à vie longue présents dans la croûte terrestre et le manteau supérieur depuis la formation de la Terre (thorium 232, uranium 238 et 235, potassium 40), et pour moitié de l'énergie de refroidissement de la Terre, issue de sa formation. Une petite partie provient de la cristallisation de la graine (Thomas 2014).

Cette puissance géothermique représente un total de 46 TW sur l'ensemble de la surface de la Terre, dont un tiers par les continents et deux tiers par les océans (Davies & Davies 2010).

La figure 4.20 montre que ce flux n'est pas uniforme sur la surface de la planète, il est maximal au niveau des dorsales océaniques. Il n'est pas non plus uniforme à l'intérieur de la Terre (sinon, avec un gradient constant de $0,03 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, on aurait une température de $190\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ au centre du noyau⁵²!). La figure 4.21b montre l'évolution de la température selon la structure interne de la Terre.

Il est possible d'exploiter ce flux d'énergie thermique, en creusant plus ou moins profondément. Il est utilisé pour le chauffage ou la production d'électricité. L'énergie thermique est généralement récupérée à l'aide d'un échangeur thermique, qui permet de transférer cette énergie d'un fluide vers un autre sans les mélanger, via une surface d'échange.

51. On constate expérimentalement qu'en moyenne la température s'élève d'environ $3 \text{ }^\circ\text{C}$ tous les 100 m de profondeur. D'après la loi de conduction de la chaleur de Fourier :

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

où φ est le flux d'énergie thermique (puissance surfacique), λ est la conductivité thermique. Pour les roches dans la croûte terrestre, la conductivité thermique vaut environ $2,5$ à $3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Thomas 2014). Ce qui donne un flux : $\varphi \simeq 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

52. Si une telle température est impensable, en réalité, il n'est pas aisé de mesurer la température dans le noyau solide. Ce serait au moins $5300 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bailly 2013).

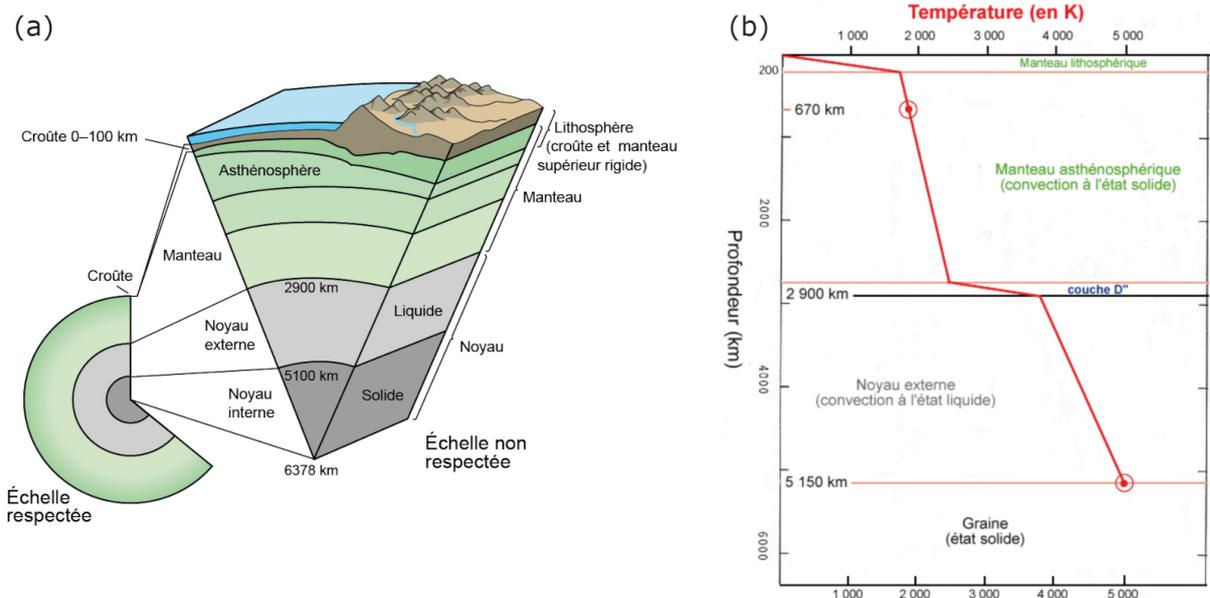


FIGURE 4.21 – Structure interne de la Terre et profil de température en fonction de la profondeur. (a) Schéma de la structure interne de la Terre. CC0. (b) Profil de température à l'intérieur de la Terre. Source : Moyen (2001). © Planet Terre.

On distingue (Le Nir 2008 ; Thomas 2014) :

- La géothermie très basse température (ou très basse énergie, moins de 500 kW) pour des sources à moins de 30 °C se situant à faible profondeur (moins de 200 m). En général, la technologie d'exploitation ne peut être un simple échangeur de chaleur et nécessite une pompe à chaleur.

Une pompe à chaleur est une machine thermodynamique qui permet de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude. Ce transfert se fait à l'aide d'un fluide caloporteur en circuit fermé, il ne peut se faire qu'avec un apport d'énergie extérieur permettant d'actionner un compresseur. Dans le fonctionnement classique en « chauffage », le bâtiment à chauffer constitue la source chaude, tandis que le milieu extérieur constitue la source froide. Une pompe à chaleur peut également permettre de climatiser : le bâtiment devient la source froide auquel de la chaleur est prélevée et injectée à l'extérieur, la source chaude.

Ce type de « géothermie » correspond à l'exploitation du proche sous-sol, dont la température est relativement constante, entre 12 °C et 15 °C en France métropolitaine (la température de nos caves). L'appellation de géothermie est alors abusive, car la température du sous-sol superficiel (10 à 20 m), à peu près constante sur une année, dépend seulement du rayonnement solaire, et donc de la latitude et de l'altitude. En France, L'exploitation de cette source de chaleur n'est donc qu'une façon détournée d'utiliser l'énergie radiative solaire, en lissant l'alternance jour-nuit grâce à l'inertie thermique du proche sous-sol.

- La géothermie à basse température ou basse énergie correspond à des ressources de température entre 30 °C et 90 °C, à des profondeurs entre 1500 et 2500 m. Elle est essentiellement utilisée pour le chauffage urbain par l'intermédiaire des réseaux de chaleur. On la trouve surtout localisée dans les bassins sédimentaires (comme le bassin parisien).
- La géothermie à moyenne et haute température (ou énergie) pour des températures entre 90 °C et 150 °C (moyenne température) ou supérieure à 150 °C (haute température), à des profondeurs typiquement de plus de 1500 m. Elle est utilisée pour la production d'électricité (ou de chaleur) à proximité des zones volcaniques ou à fort gradient thermique.

Par exemple, le campus de l'université Paris-Saclay, sur le plateau de Saclay dans l'Essonne utilise un réseau de chaleur pour le chauffage et la climatisation alimenté par deux puits de géothermie de 700 m de profondeur puisant dans une nappe aquifère (de l'Albien) une eau à environ 30 °C.

De nombreux endroits dans le monde exploitent la géothermie. La plus grosse centrale de production d'électricité géothermique est située en Californie, au nord de San Francisco. La puissance installée est de 1517 MW, avec une production moyenne de 955 MW⁵³. En Islande, grâce à une géologie privilégiée, les deux-tiers de l'énergie primaire consommée sont d'origine géothermique (61,8 % en 2018). La majeure partie sert au chauffage et 30,3 % (en 2018) de son électricité est produite par des centrales géothermiques, le reste (69,7 %) l'est par des centrales hydroélectriques.

4.3.10 L'électricité hydraulique

Nous avons déjà évoqué l'utilisation de l'énergie cinétique des vagues, des courants marins et des marées pour produire de l'électricité. Cette section traite succinctement de la production d'électricité par récupération de l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau.

Une différence de niveau dans un cours d'eau, naturelle ou bien provoquée (par une retenue, par exemple) permet de transformer l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique. L'eau peut ainsi actionner une turbine, son énergie cinétique est alors transformée en énergie cinétique de rotation, qui va elle-même actionner un alternateur synchrone, transformant l'énergie mécanique en énergie électrique (Lavy 2004).

L'hydroélectricité tire bénéfice du cycle de l'eau (figure 4.22), elle est donc, indirectement, une énergie solaire.

La puissance mécanique d'une centrale hydroélectrique gravitaire est donnée par :

$$P_m = \rho ghQ$$

où $\rho = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ est la masse volumique de l'eau ; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur, h est la hauteur de chute et Q est le débit.

Pour avoir la puissance électrique délivrée, il suffit de multiplier cette relation par le rendement η de l'installation, qui vaut généralement entre 0,6 et 0,9 :

$$P_e = \eta \times P_m = \eta \rho ghQ$$

La France possède un potentiel hydroélectrique important grâce à la présence de massifs montagneux sur son territoire (voir par exemple le barrage de Serre-Ponçon, figure 4.23), et d'un réseau électrique performant pour transporter l'électricité depuis le lieu de production jusqu'aux consommateurs, distants. Le potentiel hydroélectrique est déjà exploité en très grande partie.

La puissance actuellement (2019) installée est de 25,5 GW (soit environ dix fois moins que la Chine). La production en 2018 (RTE 2018b) est de 63,1 TWh = 5,4 Mtep (le barrage des Trois Gorges⁵⁴ en Chine produit 85 TWh par an), ce qui représente 14 % de la consommation finale d'électricité (tableau B.1) pour cette année-là⁵⁵.

Les principaux types de centrales sont les centrales au fil de l'eau, sans réservoir, et les centrales réservoirs qui sont dotées d'un réservoir.

Les centrales au fil de l'eau la turbinent au fur et à mesure sans la retenir, assurant une production continue d'électricité. La puissance installée est d'environ 7,6 GW (soit 30 % du parc), répartie sur plus de 2000 installations, la production représente 54 % de la production hydroélectrique française.

53. Source : https://en.wikipedia.org/wiki/The_Geysers

54. https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_des_Trois-Gorges

55. La production d'électricité hydraulique est en partie dépendante de la pluviométrie. Ainsi, l'année 2017 plus sèche en moyenne, avait vu la production chuter de 30 % (RTE 2018b).

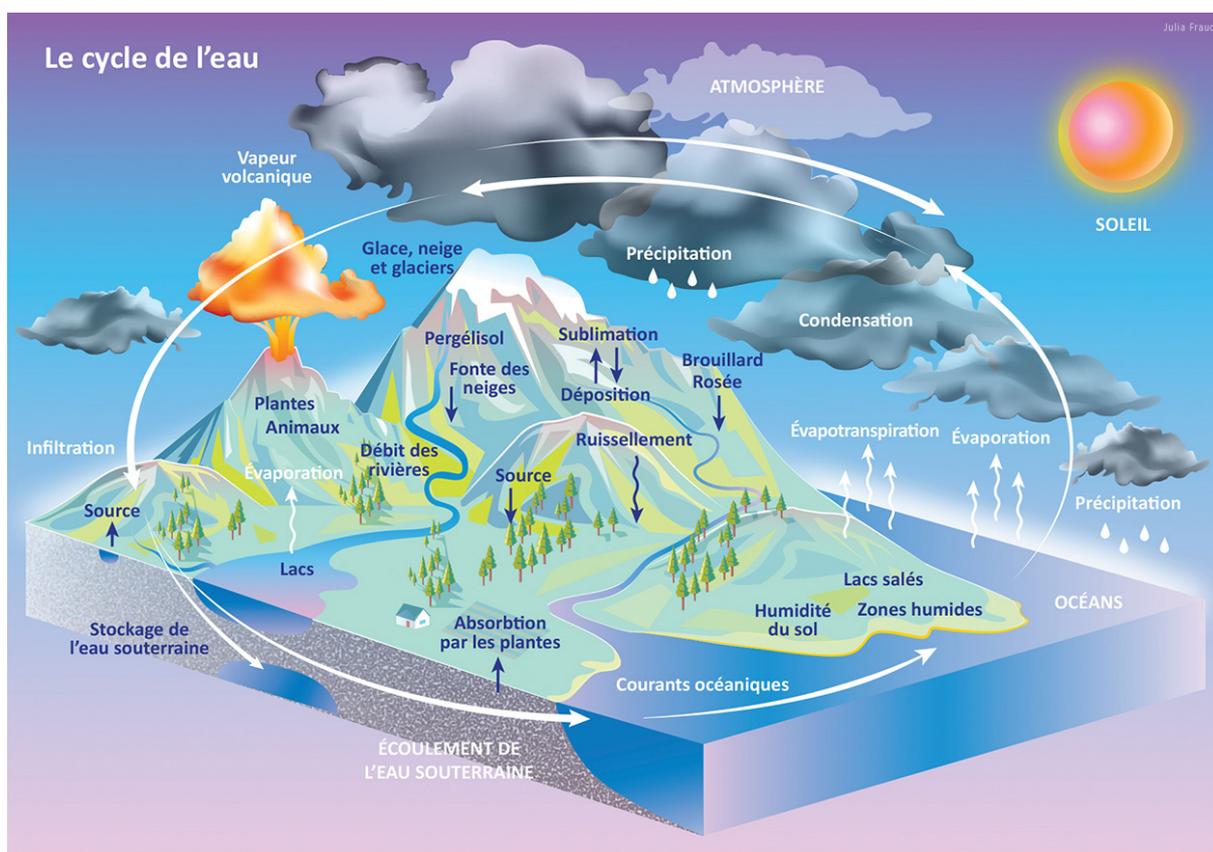


FIGURE 4.22 – Illustration du cycle naturel de l'eau. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Les centrales réservoirs disposent d'une retenue permettant de stocker l'eau pour la turbiner en fonction de la demande. On distingue les centrales de lac et les centrales d'éclusee selon la taille de réservoir. La puissance installée est de 13 GW, répartie dans une centaine de centrales de lac et 140 centrales d'éclusee. La production annuelle représente 46 % de la production hydroélectrique française. Ce type de centrale est crucial pour assurer la stabilité du réseau électrique. Il permet en effet l'ajustement de la production aux pics de consommation ou bien en cas d'incident sur le réseau. Cette puissance est mobilisable en quelques minutes⁵⁶, ce qui explique qu'une centrale comme celle de Serre-Ponçon n'a un facteur de charge que de 21 % : elle ne fonctionne pas en permanence.

Le reste de la puissance installée (4,9 GW) est constitué de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP – section 4.4.3).

La puissance installée en 2019 est de 25,6 GW (RTE 2019) ce qui représente 19 % de l'ensemble des centrales électriques de France. La production hydroélectrique a totalisé 60 TWh soit 11,2 % de la production électrique totale. Le potentiel accessible est déjà bien exploité : en France, et même en Europe, le développement de l'énergie hydroélectrique est donc limité.

En 2018, la puissance installée des centrales hydroélectriques atteint 1292 GW dans le monde, produisant environ 4 200 TWh par an, soit 70 % de la production mondiale d'énergie renouvelable et 15,8 % de la production mondiale d'électricité.

56. Une centrale thermique à gaz nécessite 7 à 11 h pour passer de l'arrêt à la pleine puissance, mais en fonctionnement elle est capable de moduler sa production pour suivre les variations de l'éolien, par exemple. De même il faut environ 40 h à une centrale nucléaire pour passer de l'arrêt à la pleine puissance (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Suivi_de_charge), mais lorsqu'elle est en fonctionnement on peut moduler jusqu'à 80 % de sa puissance en moins de 30 min. Les arrêts de centrales nucléaires n'ont lieu qu'environ une fois par an.

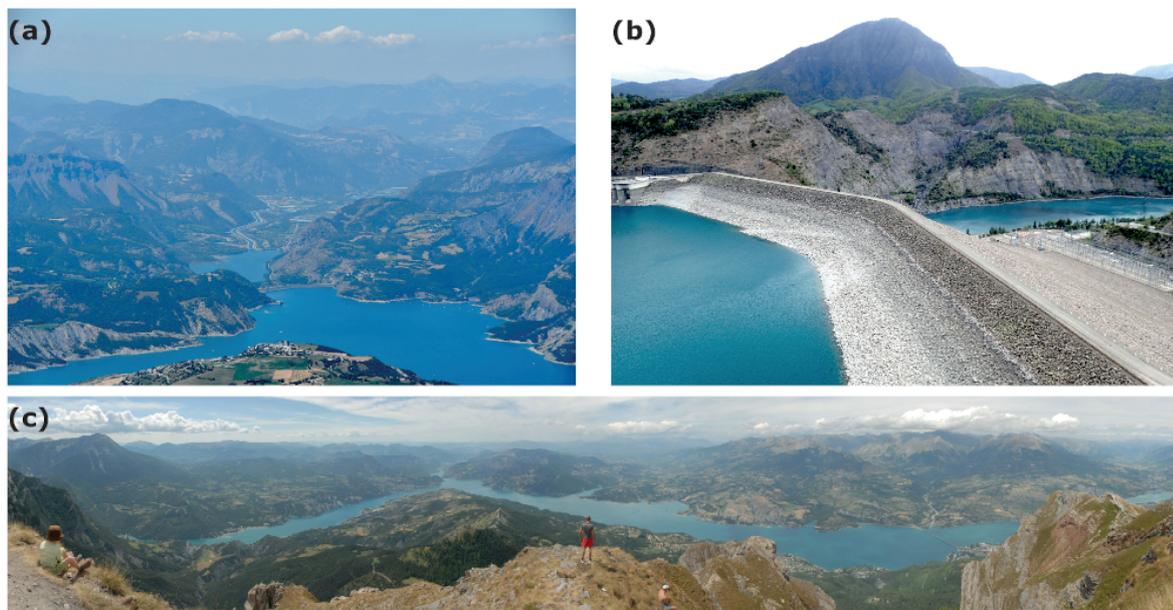


FIGURE 4.23 – Lac et barrage de Serre-Ponçon, sur la Durance. Construit entre 1957 et 1959, année de sa mise en eau, le barrage de Serre-Ponçon est un ouvrage en terre haut de 123 m. Le volume d'eau dans la retenue est de 1,272 km³, dont un tiers est mobilisable pour l'exploitation (production d'électricité ou irrigation) entre les cotes 780 m d'altitude et 722 m. Le lac de Serre-Ponçon a une superficie de 28,2 km², et une profondeur maximale de 90 m. La puissance installée de l'usine hydroélectrique est de 380 MW, le facteur de charge de 21 %. Le débit équipé de l'usine est de 300 m³ · s⁻¹, quand le débit moyen d'alimentation de la retenue est d'environ 100 m³ · s⁻¹. Voir aussi : https://fr.wikipedia.org/wiki/Lac_de_Serre-Ponçon. (a) Vue sur le barrage et le lac depuis le sommet du Morgon. (b) Le côté amont du barrage. (c) Panorama sur le lac de Serre-Ponçon (19 km de long) depuis le sommet du Morgon. (a)-(c) Crédit photos : Guillaume Blanc.

4.4 L'électricité

L'électricité n'est pas une énergie primaire, c'est un vecteur ; elle est néanmoins comptabilisée dans l'énergie finale. Un vecteur fort utile, puisqu'on peut le produire à partir de différentes sources, y compris des sources renouvelables ou peu polluantes. Il présente néanmoins un inconvénient majeur, à savoir la difficulté que l'on a à le stocker pour différer son utilisation.

En 2018, la France a consommé 437 TWh d'électricité (soit 37,5 Mtep ou $1,6 \cdot 10^{18}$ J) – voir le tableau B.1 – ce qui représente une puissance moyenne sur l'année de de 35 GW. Soit 27,4 % de la consommation d'énergie finale. La puissance installée est de 133 GW (RTE 2018a).

La même année, dans le monde, 9,9 Gtep d'énergie finale ont été consommés⁵⁷, dont 1,9 Gtep d'électricité soit 19 % (figure 4.24).

4.4.1 Réseau électrique

La distribution d'électricité se fait sous la forme d'un réseau câblé (au sein duquel le signal électrique se déplace à la vitesse de l'onde électromagnétique dans le conducteur, soit environ 200 000 km/s dans le cuivre), depuis les sites de production jusqu'aux consommateurs (figure 4.25).

⁵⁷. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCbySource>

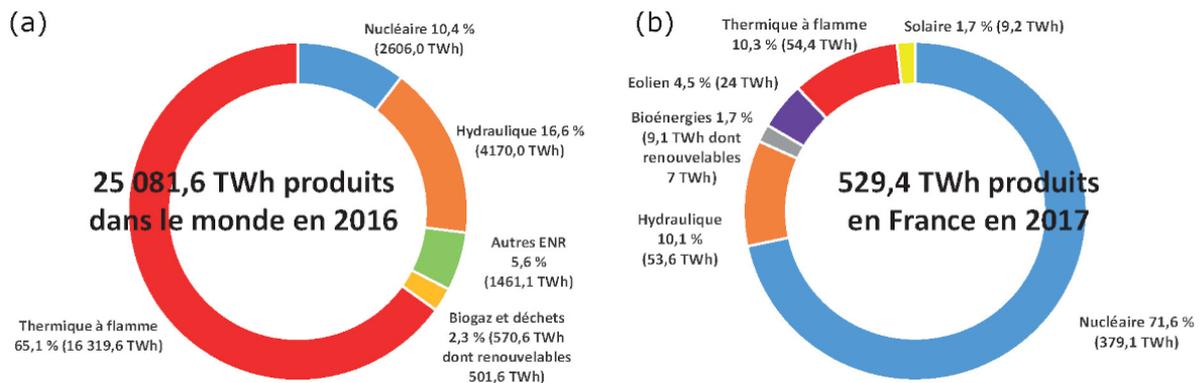


FIGURE 4.24 – Production d'énergie électrique dans le monde en 2016, en France en 2017, par secteurs énergétiques. (a) La production mondiale d'électricité en 2016. Données : RTE (2016). (b) La production française d'électricité en 2017. Données : RTE (2017).

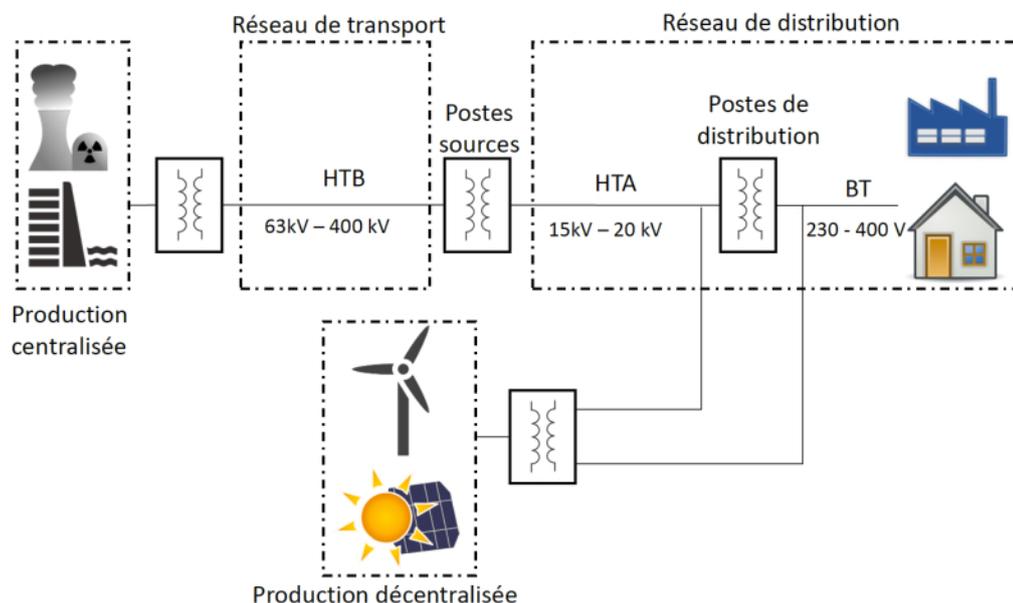


FIGURE 4.25 – Schéma de l'organisation du système électrique français. Tiré de Ghanty (2018).

Un courant alternatif

Le réseau est constitué de lignes électriques fonctionnant à différents niveaux de tension, connectées entre elles par l'intermédiaire de postes électriques qui permettent de répartir l'électricité et de passer d'une tension à une autre grâce à des transformateurs.

Pour une puissance électrique transportée P_{elec} donnée :

$$P_{\text{elec}} \propto U \times I$$

où U est la tension, I est l'intensité ; en augmentant la tension, l'intensité diminue. Or les pertes par effet Joule (puissance dissipée P_{Joule}) sont proportionnelles au carré de l'intensité :

$$P_{\text{Joule}} = R \times I^2 \propto R \times \left(\frac{P_{\text{elec}}}{U} \right)^2$$

où R est la résistance de la ligne. Ces relations dépendent de coefficients dont l'ordre de grandeur est l'unité pour le courant alternatif (déphasage entre tension et courant) et du nombre de phases (une ou trois), qui ne changent rien au raisonnement.

On constate que la puissance (thermique) dissipée par effet Joule diminue comme le carré de la tension. On a donc intérêt à augmenter la tension et à diminuer l'intensité pour transporter une même puissance électrique. Ces transformations se font à l'aide de transformateurs qui ne fonctionnent qu'en courant alternatif, puisque c'est par l'effet d'induction entre deux bobines de tailles différentes que l'on peut modifier l'amplitude de la tension. L'induction électromagnétique est un phénomène lié à la variation temporelle du flux magnétique (donc du courant) dans une bobine. C'est pour cela que l'électricité est transportée sous forme alternative (voir aussi Krakowski 2016).

Les pertes par effet Joule ne sont pas négligeables, puisqu'en 2019, sur 537,7 TWh d'énergie électrique produite par la France, 11 TWh ont ainsi été perdus⁵⁸, soit 2,2 % (RTE 2019). C'est pourquoi, sur de longues distances, il est préférable de transporter l'électricité en haute tension. Le réseau de transport français rassemble les lignes à haute tension (63 000 et 90 000 volts) et à très haute tension (225 000 volts et 400 000 volts). L'électricité est majoritairement produite à des tensions de 10 kV à quelques kilovolts. Elle est ensuite réhaussée jusqu'à plusieurs centaines de kilovolts pour être transportée. Elle est finalement abaissée, à plusieurs reprises, avant d'être amenée jusqu'aux consommateurs par le réseau basse tension.

Le courant dans un tel réseau est donc alternatif et sinusoïdal. En effet, la manière la plus simple de produire de l'électricité est de faire tourner un alternateur, qui, par induction, transforme une énergie mécanique de rotation en énergie électrique. L'alternateur peut être entraîné par une turbine (barrage hydroélectrique, centrale thermique), par une éolienne, etc. De cette façon, comme il s'agit d'un mécanisme en rotation uniforme autour d'un axe, le courant produit sera naturellement sinusoïdal.

La fréquence du courant transporté est une donnée fondamentale, il faut la choisir soigneusement, car une fois que le réseau a atteint une certaine taille il est impossible d'en changer. Le choix de la fréquence de 50 Hz en France est historique, il a été fixé par le distributeur d'électricité allemand AEG en 1899. Peu avant, les États-Unis fixaient la fréquence de leur courant à 60 Hz. Il y a différentes raisons à ces valeurs⁵⁹, qui sont un compromis entre les fonctionnements optimum des différents appareils électriques, ampoules à incandescence, transformateurs, et surtout moteurs asynchrones fonctionnant par induction.

Cette fréquence est assurée par la rotation des alternateurs qui tournent tous à la même fréquence instantanée, proportionnelle à leur vitesse de rotation, c'est la fréquence *synchrone* (Sapy 2019).

La mise en réseau de l'acheminement de l'électricité permet également de profiter du caractère aléatoire de la demande de chaque consommateur, en la lissant sur l'ensemble de l'interconnexion, tout comme les pannes : la probabilité que tout le monde fasse fonctionner ses appareils électriques en même temps ou que des pannes surgissent simultanément est ainsi nulle en pratique (Krakowski 2016).

Les réseaux français et européens

Le réseau électrique français est constitué de trois parties.

- Le réseau de *transport* (figure 4.26) situé entre les zones de production et les réseaux de distribution, est constitué de deux sous-ensembles :
 - ▶ Le réseau de grand transport et d'interconnexion qui constitue le squelette du réseau, entre les centres de production et les pays frontaliers. Il permet de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances. Il est alimenté avec une tension de 400 000 V.
 - ▶ Les réseaux de *répartition* régionaux ou locaux, vers les agglomérations et les grandes entreprises consommatrices. Le transport est assuré en très haute tension (THT), 225 000 V, et haute tension, 90 000 et 63 000 V.

58. Ce qui représente une puissance moyenne sur l'année de 1,2 GW : soit un réacteur nucléaire.

59. Voir par exemple la page Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fréquences_des_courants_industriels.

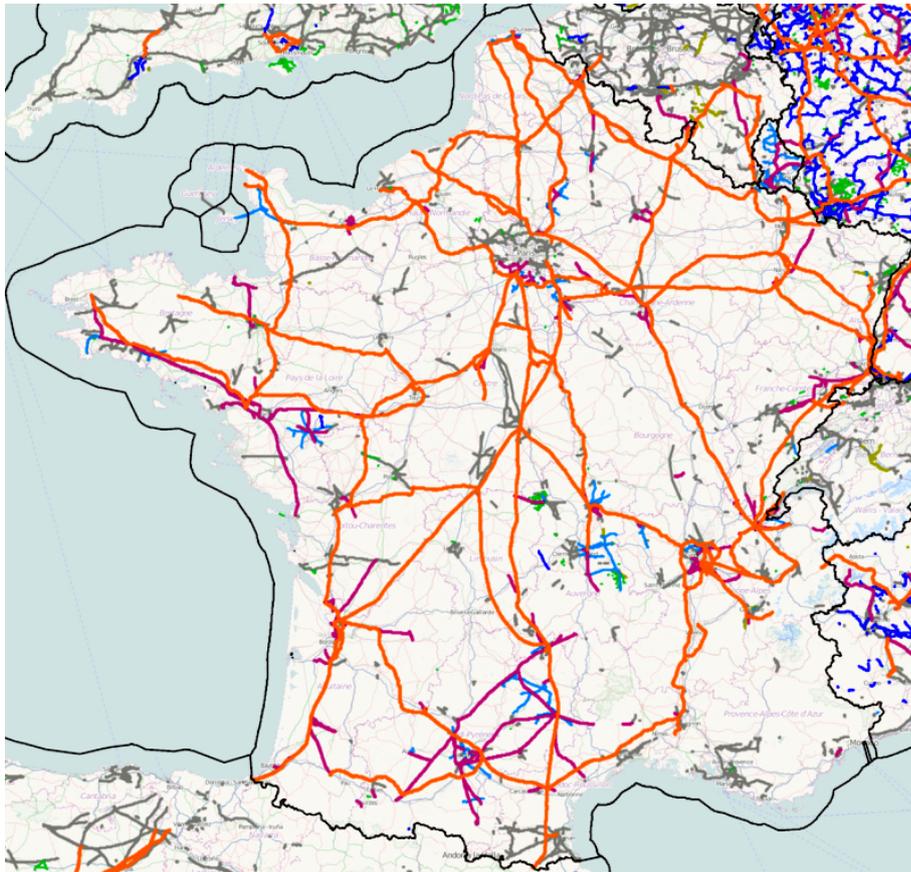


FIGURE 4.26 – Carte du réseau de transport de l'électricité en France. Source : https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Power_networks/France. CC BY-SA.

- Les réseaux de distribution pour acheminer l'électricité localement vers les consommateurs, au nombre de 38 millions. Ceux-ci sont ainsi alimentés essentiellement en basse tension (BT – 230 et 400 V). Certains – 5 millions (petites et moyennes entreprises, hôpitaux, etc.) – sont alimentés en moyenne tension (MT), 20 000 V.

En 2019, la longueur totale des lignes électriques de transport (THT et HT) en exploitation est de 106 000 km dont 6400 km de lignes souterraines⁶⁰. Le réseau de distribution, est constitué, quant à lui, de 622 000 km en moyenne tension, et 702 000 km en basse tension⁶¹.

En Europe, les réseaux électriques (figure 4.27) de 42 gestionnaires à travers 35 pays sont interconnectés, et gérés par le *Réseau européen des gestionnaires de réseau(x) de transport d'électricité*⁶² (ENTSO-E).

Puissance et fréquence

On peut réduire la complexité d'un réseau de transport de l'électricité aux lignes électriques et aux machines tournantes qui le constituent.

60. Source : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/le-reseau-de-transport>.

61. Source : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/le-reseau-de-distribution>.

62. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_européen_des_gestionnaires_de_réseau_de_transport_d'électricité](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_europ%C3%A9en_des_gestionnaires_de_r%C3%A9seau_de_transport_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9).



FIGURE 4.27 – Carte du réseau de transport de l'électricité en Europe tracé par l'éclairage nocturne (pollution lumineuse) en 2012. Source : Google Maps / Night-lights imagery by Earth Observation Group, Colorado School of Mines – <https://blue-marble.de/nightlights/2012>.

Comme les différents alternateurs du réseau fonctionnent de façon synchrone, le théorème du moment cinétique appliqué à l'ensemble d'entre eux donne :

$$\frac{dJ}{dt} = \mathcal{M}$$

où $J = I \times \omega$ est le moment cinétique des alternateurs, avec I leur moment d'inertie et ω leur vitesse angulaire; $\mathcal{M} = \mathcal{M}_m - \mathcal{M}_e$ est le moment des forces s'appliquant sur les alternateurs, avec \mathcal{M}_m le moment (moteur) des forces mécaniques et \mathcal{M}_e le moment (résistant) des forces magnétiques entre le stator et le rotor, soit :

$$\frac{dJ}{dt} = I \times \frac{d\omega}{dt} = \mathcal{M}_m - \mathcal{M}_e$$

soit :

$$I \times \omega \times \frac{d\omega}{dt} = \omega \times \mathcal{M}_m - \omega \times \mathcal{M}_e$$

d'où :

$$\frac{1}{2} I \times \frac{d\omega^2}{dt} = P_m - P_e = \Delta P \quad (4.11)$$

où $P_m = \mathcal{M} \times \omega$ est la puissance mécanique de rotation des alternateurs (apportée par les turbines) et $P_e = u(t) \times i(t)$ est la puissance électrique (générée par l'induction dans la bobine du stator) sur le réseau.

On introduit ω_0 la vitesse angulaire synchrone des machines et P_0 la puissance nominale du réseau (on a $P_m^0 = P_e^0 = P_0$ où P_m^0 est la puissance mécanique nominale et P_e^0 est la puissance électrique nominale). Avec :

$$\omega = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$p_m = \frac{P_m}{P_0}$$

$$p_e = \frac{P_e}{P_0}$$

(4.11) donne :

$$\frac{1}{2}I \times \frac{d\omega^2}{dt} = \frac{P_0}{\omega_0} (p_m - p_e) = \frac{P_0}{\omega_0} \times \Delta P$$

ou encore :

$$H \times \frac{d\omega^2}{dt} = \Delta p \quad (4.12)$$

où H est la constante d'inertie du réseau (Ghanty 2018) :

$$H = \frac{I \times \omega_0}{2 \times P_0}$$

On a, par ailleurs : $\omega = \nu$, où ν est la fréquence du réseau divisée par la fréquence nominale $\nu_0 = \omega_0/(2\pi)$. Si on suppose que la fréquence varie peu autour de la fréquence nominale, on a :

$$\nu = 1 + 2\delta\nu$$

Ainsi, (4.12) devient :

$$2H \times \frac{d\delta\nu}{dt} = \Delta p \quad (4.13)$$

L'équation (4.13) explique le lien entre la variation $\delta\nu$ de la fréquence du réseau et l'équilibre des puissances Δp . Ainsi, si la puissance mécanique fournie à l'alternateur est supérieure à la puissance électrique du réseau, $\Delta p > 0$, donc $\frac{d\delta\nu}{dt} > 0$, et la fréquence augmente. Et inversement. Plus la constante d'inertie H est grande, plus l'écart de fréquence est petit, et donc moins les alternateurs sont sensibles aux déséquilibres de puissance.

Pour le réseau européen (interconnecté), la fréquence nominale est $\nu_0 = 50$ Hz, la constante d'inertie vaut typiquement $H = 5$ s (Ghanty 2018). La puissance moyenne annuelle de production d'électricité en Europe en 2018 est de 380 GW.

Un écart de 0,5 Hz de la fréquence, correspond à 1 % de la fréquence nominale. Ainsi $\Delta p = 2 \times 5 \times 0,01 = 0,1$, soit 10 % de la puissance nominale, ou 38 GW, ce qui représente environ 30 % de la puissance installée française, soit plusieurs dizaines de réacteurs nucléaires, par exemple. Inversement, une chute de puissance de 1 GW sur le réseau européen (par exemple la « perte » d'un réacteur nucléaire), correspond à un écart de puissance de 2,6 ‰. Et donc à une baisse de fréquence de $2,6 \cdot 10^{-4}$, soit 49,99974 Hz.

Notons que l'on peut suivre en direct la fréquence du réseau européen sur le site : <https://www.mainsfrequency.com/index.htm>.

Triphasé

Le transport de l'électricité se fait généralement en *triphase*, c'est-à-dire à l'aide de trois courants sinusoïdaux (dans trois fils différents), de mêmes fréquence et amplitude, et déphasés de $2\pi/3$ radians.

En régime sinusoïdal, l'intensité du courant s'écrit :

$$i(t) = I \sin(\omega t) \quad (4.14)$$

où I est l'amplitude du courant, ω est la pulsation du signal. La tension s'écrit :

$$u(t) = U \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.15)$$

où U est l'amplitude de la tension, φ est le déphasage entre le courant et la tension.

La puissance instantanée en monophasé s'écrit :

$$p(t) = u(t) \times i(t) = UI \sin(\omega t) \times \sin(\omega t + \varphi) = \frac{UI}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \quad (4.16)$$

avec :

$$\sin a \times \sin b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) - \cos(a + b)] \quad (4.17)$$

Le premier terme, constant, est la puissance active ou puissance réelle. Le second terme est la puissance fluctuante, une puissance sinusoïdale de fréquence 100 Hz (si la fréquence $\nu = \omega/2\pi = 50$ Hz).

Si, par exemple, le courant $i(t)$ et la tension $u(t)$ sont délivrés par un alternateur monophasé de fréquence 50 Hz, cela signifie que la turbine connectée mécaniquement à l'alternateur ainsi que le rotor tournent à cette fréquence. La puissance électrique fluctuante induit des variations de la puissance mécanique, qui compte tenu de l'inertie mécanique du rotor induisent des oscillations de couple, lesquelles doivent être absorbées par l'élasticité de l'arbre de transmission et donc peuvent finir par l'abîmer.

Dans un réseau électrique en triphasé, ce problème n'existe pas. En effet, considérons le système de courants et tensions en triphasé équilibré (c'est-à-dire d'égales amplitudes entre les phases) :

$$\begin{cases} i_1(t) = I \sin(\omega t) \\ i_2(t) = I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3(t) = I \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} u_1(t) = U \sin(\omega t + \varphi) \\ u_2(t) = U \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_3(t) = U \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Alors la puissance instantanée $p(t)$ totale transportée s'écrit :

$$\begin{aligned} p(t) &= \sum_{k=1}^3 u_k(t) i_k(t) \\ &= UI \left[\sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \end{aligned}$$

Ce qui donne avec (4.17) :

$$p(t) = \frac{1}{2} UI \left[3 \cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi) - \cos\left(2\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) - \cos\left(2\omega t + \varphi - \frac{8\pi}{3}\right) \right]$$

or :

$$\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$$

avec :

$$\cos \frac{4\pi}{3} = \cos \frac{8\pi}{3} = -\frac{1}{2}, \quad \sin \frac{4\pi}{3} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{et} \quad \sin \frac{8\pi}{3} = +\frac{\sqrt{3}}{2}$$

on a :

$$\begin{aligned} \cos\left(2\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) &= -\frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(2\omega t + \varphi) \\ \cos\left(2\omega t + \varphi - \frac{8\pi}{3}\right) &= -\frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(2\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

d'où :

$$p(t) = \frac{1}{2} UI \left\{ 3 \cos \varphi - \underbrace{\left[\cos(2\omega t + \varphi) \left(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) - \sin(2\omega t + \varphi) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right]}_{=0} \right\}$$

soit, finalement :

$$p(t) = \frac{3}{2} UI \cos \varphi \quad (4.18)$$

La composante fluctuante a ainsi disparu. D'autres arguments⁶³ en faveur d'un réseau de distribution électrique en triphasé ont permis d'opter pour ce système à la fin du XIX^e siècle.

63. Voir par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_triphasé

Courant continu haute tension

À partir de (4.14) et (4.15), on détermine la puissance moyenne (sur une période) :

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt = \frac{UI}{2} \cos \varphi = U_{\text{eff}}I_{\text{eff}} \cos \varphi$$

où $U_{\text{eff}} = \frac{U}{\sqrt{2}}$ est la valeur efficace⁶⁴ de la tension et $I_{\text{eff}} = \frac{I}{\sqrt{2}}$ est la valeur efficace du courant.

Cette puissance moyenne, réelle, est la *puissance active* et correspond à la puissance moyenne fournie (ou reçue) au cours d'une période donnée. Elle est exprimée en watts (W). Le $\cos \varphi$ est appelé le facteur de puissance.

La *puissance apparente* est le produit de la tension efficace par l'intensité efficace :

$$P_{\text{app}} = U_{\text{eff}}I_{\text{eff}}$$

Elle s'exprime en voltampère (VA), pour la différentiel de la puissance active.

On peut ainsi exprimer la puissance apparente en notation complexe :

$$\underline{P}_{\text{app}} = P_{\text{app}} \times e^{j\varphi} = U_{\text{eff}}I_{\text{eff}} [\cos \varphi + j \sin \varphi] = P + jQ$$

où P est la puissance active, et Q est la *puissance réactive*, partie complexe de la puissance apparente complexe. Elle s'exprime en voltampères réactifs (var).

La puissance active correspond à un travail mécanique (moteur) ou à de la chaleur (effet Joule). La puissance réactive est générée par les dipôles capacitifs (puissance produite) ou inductifs (puissance consommée). Dans le cas où elle est consommée, elle correspond à l'établissement d'un champ magnétique dans les machines électriques.

Une ligne de transport de l'électricité présente non seulement une résistance, mais également une inductance. Cette dernière est généralement plus importante, ainsi la baisse de tension au bout d'une certaine distance dépend essentiellement de l'inductance⁶⁵. Par ailleurs, sur une ligne de transport en triphasé, il y a des effets capacitifs entre les phases et entre les phases et la terre. Ces effets capacitifs sont plus importants pour une ligne souterraine que pour une ligne aérienne. L'ensemble de ces effets est modélisé par un schéma électrique équivalent dit en « Pi » (figure 4.28).

Une ligne électrique cherche à transporter la puissance active P . Comme on a : $P = \sqrt{P_{\text{app}}^2 - Q^2}$, il faut donc limiter la puissance réactive Q , à savoir les pertes inductives et capacitatives. Sur les distances importantes, il faut compenser ingénieusement les pertes de puissance réactive⁶⁶.

Une façon de limiter ces pertes est de transporter le courant haute tension sous forme continue (ligne dites « HVDC » pour *High Voltage Direct Current*). Dans ce cas, il n'y a plus de puissance réactive, et la résistance est moins importante en courant continu qu'en courant alternatif (à cause de l'effet de peau, qui fait qu'à fréquence élevée, le courant circule en surface des conducteurs). La difficulté réside dans la connexion d'une liaison à courant continu au réseau alternatif. Pour cela, diverses solutions existent, il s'agit de convertisseurs en électronique de puissance composés de diodes. La conversion alternatif-continu et inversement ne se fait

64. La valeur efficace d'un signal périodique est définie comme :

$$S_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t)dt}$$

65. Pour une ligne de 220 kV à 50 Hz avec des conducteurs en aluminium de section 240 mm² et d'acier de section 40 mm², la résistance est de 0,06 Ω · km⁻¹ tandis que l'inductance $L\omega$ vaut 0,3 Ω · km⁻¹. Tiré de : https://fr.wikipedia.org/wiki/Modélisation_en_Pi_des_lignes_électriques

66. https://fr.wikipedia.org/wiki/Compensation_de_puissance_réactive

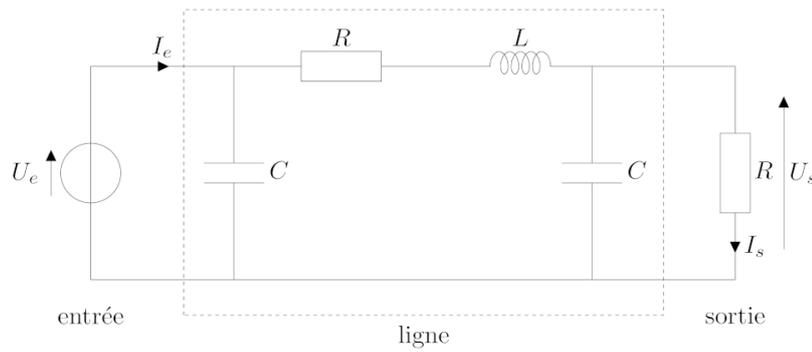


FIGURE 4.28 – Modélisation électrique équivalente d'une ligne de transport en « Pi ». Ce schéma permet de modéliser les lignes allant de 80 à 240 km. En deçà les effets capacitifs peuvent être négligés sur une ligne aérienne, au-delà les effets de propagation doivent être pris en compte en ajoutant en série des schémas de ce type.

pas sans pertes, c'est pourquoi les lignes à courant continu deviennent rentables au-delà de 500 km.

Pour des liaisons souterraines ou sous-marines longue distance, afin de limiter les pertes dues aux effets capacitifs importants (puissance réactive), et donc les stations de compensation, il est souvent préférable de transporter l'électricité en courant continu.

Par exemple, une liaison HVDC France-Espagne⁶⁷ – ligne de 320 kV et de 65 km de long transportant au total 2 GW – a été inaugurée en 2015.

4.4.2 Stabilité du réseau

L'électricité est un vecteur énergétique qui ne peut pas facilement se stocker massivement, en tout cas sous une forme immédiatement disponible et à un coût satisfaisant. Il faut donc qu'en permanence la production (nette, c'est-à-dire la production totale à laquelle on retranche les exportations et le stockage, on ajoute les importations et le déstockage), soit égale à la consommation (nette, c'est-à-dire la consommation effective à laquelle on retranche les pertes diverses), et ce en tout point x du réseau et à chaque instant t , d'où la loi des réseaux électriques :

$$\text{Production}(x, t) = \text{Consommation}(x, t) \quad (4.19)$$

Cette condition est nécessaire au bon fonctionnement du système électrique. En revanche le maillage du réseau permet de faire face à différents aléas localisés (ouvrages hors-service, incidents, pic ou creux subit de consommation locale, etc.). Néanmoins le réseau n'est pas à l'abri d'un effondrement si les aléas locaux se répercutent sur l'ensemble.

L'égalité dans l'équation (4.19) est satisfaite par la physique de la répartition des tensions et courants au sein des réseaux, formalisée par les lois de Kirchhoff (loi des nœuds, loi des mailles) en régime sinusoïdal. À chaque nœud du réseau où convergent N branches, on a :

$$\sum_{k=0}^N \underline{I}^k = 0 \quad (4.20)$$

où \underline{I}_k est l'intensité du courant en notation complexe dans la branche k .

67. https://fr.wikipedia.org/wiki/Interconnexion_électrique_France-Espagne

De plus, dans chaque maille du réseau constituée de N branches, on a :

$$\sum_{k=0}^N \underline{V}^k = 0 \quad (4.21)$$

où \underline{V}^k est la tension en notation complexe le long de la branche k .

Le pilotage du réseau revient donc essentiellement à maintenir la fréquence dans une plage de valeurs étroites autour de la valeur nominale, qui sont des conditions contractuelles. Les variations de la fréquence synchrone se propagent à l'ensemble du réseau en quelques millisecondes : du fait des interconnexions internationales, une perturbation importante en Europe du Nord peut être ressentie quelques secondes plus tard en Europe du Sud (Sapy 2019 ; Bornard *et al.* 2005).

Le maintien d'une fréquence proche de sa valeur nominale est donc nécessaire au bon fonctionnement des matériels électriques optimisés pour cette valeur ; la fréquence doit rester comprise dans la plage $50 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$. De trop grandes excursions de fréquence sont en outre inadmissibles pour certains matériels, dont les groupes de production, qui se retirent du réseau pour des écarts de fréquence de 2 à 4 Hz. Les petits écarts de la fréquence autour de sa valeur de référence, représentatifs du fonctionnement normal d'un système, sont compensés par l'inertie des masses tournantes des machines couplées au réseau.

En cas de déséquilibre, des protocoles de régulation sont prévus (OIE 2017). Ainsi le réseau européen dispose d'une réserve de puissance de 3 GW (équivalent à la perte des deux plus gros réacteurs nucléaires français, par exemple) activable⁶⁸ en moins de 30 secondes (réserve primaire). Cette réserve permet de rétablir la stabilité de la fréquence du réseau, mais ne permet généralement pas d'atteindre la fréquence cible de 50 Hz. Pour cela, une réserve secondaire, nationale, est de 500 MW à 800 MW, avec un délai de réponse de moins de 15 minutes. Pour plus de détails à propos des mécanismes d'ajustement en fréquence on pourra consulter Benabderrazik (2018).

Un incident de grande ampleur sur le réseau électrique (« black-out »), concernant un grand nombre de clients, est généralement le résultat de l'un des phénomènes électromécaniques suivants (RTE 2004) :

- la cascade de surcharges de lignes de transport et leur déclenchement ;
- l'écroulement de fréquence ;
- l'écroulement de tension ;
- la rupture de synchronisme entre les groupes de production.

La baisse de puissance sur le réseau entraîne une baisse de fréquence (équation 4.13), baisse de fréquence qui diminue la vitesse des alternateurs, et ainsi de suite. Si la baisse de fréquence est trop élevée, les mécanismes de récupération prévus seront inefficaces, ce qui peut entraîner la perte d'une grande partie du réseau.

Par exemple, les tempêtes (cyclones extratropicaux) Lothar et Martin de fin décembre 1999 ont mis hors service 540 lignes THT et HT, plus d'un milliers de pylônes électriques, en France, soit 8 % du réseau électrique⁶⁹. Les coupures d'électricité ont touché 3,6 millions de foyers. Le 8 janvier 2021, suite à une chute brutale de tension survenue en Roumanie, le blackout n'a été évité qu'en isolant cette partie du réseau et en déconnectant certains gros consommateurs⁷⁰.

68. La production d'électricité en France en 2018 a été de 549 TWh, soit une puissance de production moyenne de 63 GW. Cette réserve « primaire » de puissance constitue donc un peu moins de 5 % de la capacité moyenne française.

69. Voir par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tempêtes_de_fin_décembre_1999_en_Europe

70. Voir : <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2021/01/12/electricite-et-co2-le-constat-europeen-de-2020/>

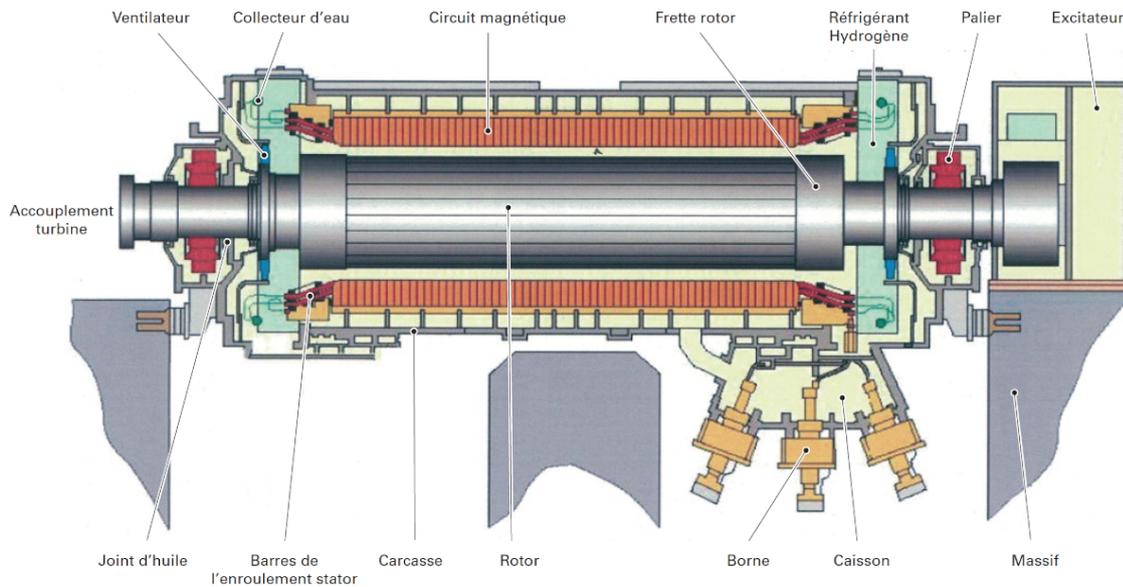


FIGURE 4.29 – Schéma d'un turbo-alternateur typique. Extrait de Verrier *et al.* (2009), <https://doi.org/10.51257/a-v2-d3530>. © Techniques de l'Ingénieur.

Exemple d'un alternateur de centrale nucléaire

Un alternateur est une machine tournante qui permet de convertir une énergie mécanique de rotation en énergie électrique par l'intermédiaire d'aimants et d'électroaimants. Un arbre est mis en rotation par des turbines, le rotor. Sur cet arbre se trouvent des aimants qui produisent un champ magnétique. Cet arbre tourne au sein d'une coquille cylindrique, le stator, constitué d'un bobinage de fil conducteur. La rotation du champ magnétique du rotor devant le bobinage du stator y induit un courant électrique qui est ensuite injecté dans le réseau.

Un alternateur est une machine synchrone : la fréquence f_e du courant produit est déterminée par la fréquence de rotation f_r du rotor et par le nombre de pôle magnétiques sur le rotor :

$$f_e = p \times f_r \quad (4.22)$$

où p est le nombre de paires de pôles sur le rotor.

La figure 4.29 montre le schéma d'un turbo-alternateur typique (voir par exemple Verrier *et al.* 2009). Dans une centrale nucléaire, la turbine mise en rotation par la vapeur du circuit secondaire tourne à 1500 tours par minute. Elle entraîne le rotor de l'alternateur. Les dispositifs présentés en figure 4.30 illustrent ce phénomène. Une fréquence de rotation de 1500 tours/minute (25 Hz) correspond à une fréquence électrique générée de 50 Hz car le rotor est constitué de deux paires d'aimants⁷¹, ce qui donne $p = 2$ dans l'équation (4.22), chaque tour générant deux extrema, donc une fréquence deux fois plus importante. Le stator est lui constitué de 6 bobines (figure 4.31), trois fois plus que le rotor, afin de générer un courant triphasé.

Pour synchroniser l'électricité produite par l'alternateur au réseau, il faut une concordance précise à la fois de la fréquence, de la tension de toutes les phases ainsi que des phases elles-mêmes.

⁷¹. Dans l'alternateur d'une centrale nucléaire, ces aimants sont des électro-aimants. En revanche, les générateurs des éoliennes sont des dynamos à aimant permanent (en néodyme en particulier), qui donc génèrent du courant continu, lequel doit être transformé en alternatif.

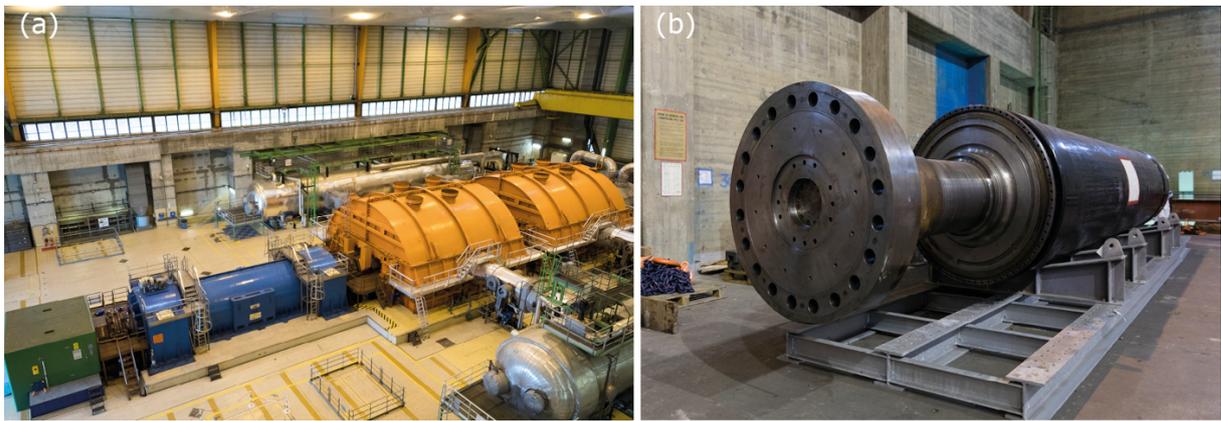


FIGURE 4.30 – (a) Centrale nucléaire de production d'électricité de Saint-Laurent-des-Eaux : la salle des machines abrite l'alternateur (en bleu sur l'image) accolé à l'excitatrice (en vert) qui va produire une impulsion électrique. La vapeur passe par les deux groupes « sécheur surchauffeur » disposés de chaque côté de la turbine (corps basse pression) de couleur orange avant de rejoindre le condenseur. Crédit : Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN. (b) Ancienne centrale nucléaire du Garigliano en Italie, en cours de démantèlement : le rotor, pièce mobile de l'alternateur, dans lequel des bobinages en cuivre permettent de faire circuler un courant continu. Mise en service en 1964 puis arrêtée en 1978, la centrale du Garigliano est une des plus vieilles au monde en phase de démantèlement. Crédit : Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN. (a), (b) © IRSN.

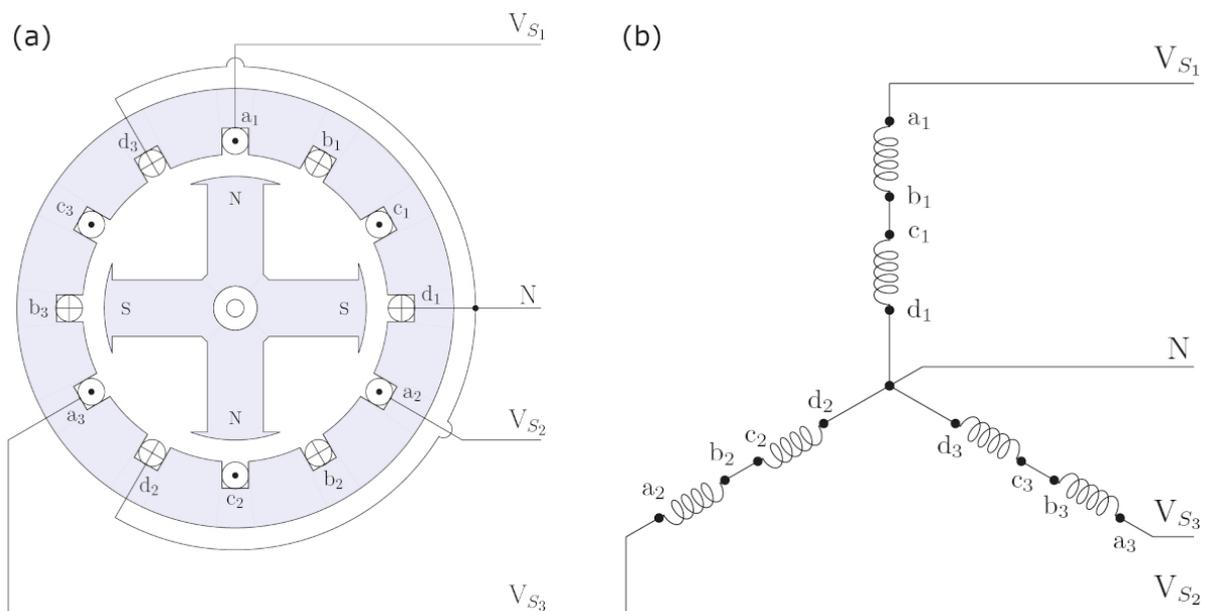


FIGURE 4.31 – La figure de gauche (a) montre une vue en coupe de l'alternateur : le rotor est constitué de deux paires de pôles d'aimants ; le stator est constitué de six bobines longitudinales. La figure de droite (b) montre le schéma électrique équivalent et la manière dont les bobines sont couplées pour obtenir un courant triphasé.

Le diamètre typique d'un rotor d'alternateur de centrale nucléaire est de 1,7 à 2 m, sa longueur est de 17 m, sa masse de 240 tonnes. Quand il tourne à 25 tours par seconde, son inertie mécanique est importante. La stabilité du réseau électrique doit ainsi beaucoup à l'inertie mécanique des centrales de production, qui « lissent » les petites fluctuations inévitables entre production et demande.

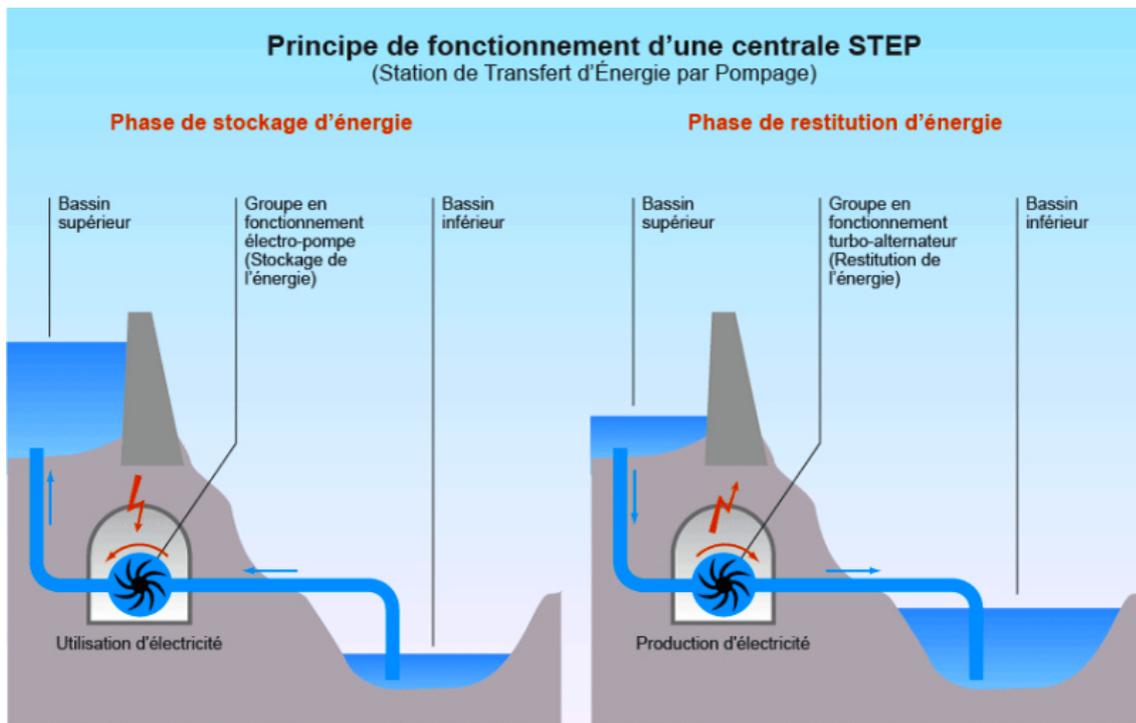


FIGURE 4.32 – Principe de fonctionnement d'une centrale de pompage-turbinage (STEP). Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite>. © Connaissance des Énergies.

4.4.3 Le stockage

Les énergies de flux intermittentes, comme le solaire photovoltaïque et l'éolien, ne sont pas accessibles à la demande. Il faut donc pouvoir les stocker afin de différer leur consommation. Les périodes de production électrique optimales (éolien, solaire, etc.) ne sont généralement pas corrélées aux périodes d'utilisation de l'énergie.

Dans un mix énergétique sans moyens de production d'électricité pilotables et accessibles rapidement pour accéder aux fluctuations de la demande, le stockage est l'unique solution pour satisfaire l'équation d'équilibre des réseaux électriques (4.19).

Tout une série de technologies sont étudiées, qu'elles soient déjà existantes sur le plan industriel, ou à l'état de recherche dans les laboratoires. Le stockage de l'électricité est effectivement compliqué. Pour stocker 1 kWh, il faut 70 g d'essence, 30 kg de batterie au plomb, 5 à 8 kg de batterie Li-ion, ou 3600 kg d'eau à une hauteur de 100 m (Ngô 2016).

La solution de stockage la plus efficace actuellement est celle du pompage hydraulique entre deux réservoirs situés à des altitudes différentes. Ce sont les *Stations de Transfert d'Énergie par Pompage* (STEP) ou centrales de pompage-turbinage. La technique consiste à remonter (par pompage) de l'eau d'un bassin ou d'un cours d'eau, pour la stocker dans un réservoir à plus haute altitude. L'eau est alors disponible pour être turbinée et produire de l'électricité en fonction de la demande (figure 4.32). Lorsque la demande en électricité est faible, ou bien lorsque la production des sources renouvelables est élevée, elle est utilisée pour pomper l'eau vers le bassin supérieur. Le rendement d'une telle installation est assez élevé, entre 70 et 85 %.

Les autres technologies de stockages disponibles sont :

- le stockage d'énergie thermique au sein de divers matériaux (eau, sable, roches, sels fondus⁷²), chauffés ou refroidis, pour bénéficier ensuite de gradients thermiques.

72. Les sels fondus (un mélange de nitrate de potassium et de nitrate de sodium) sont utilisés notamment pour stocker l'énergie thermique générée par les centrales solaires à concentration. Les sels sont portés à plus de 500 °C. Ensuite, ils peuvent produire de la vapeur par l'intermédiaire d'un échangeur thermique, qui pourra alimenter un turbo-alternateur. Ils peuvent être stockés, chauds, en vue d'une production différée.

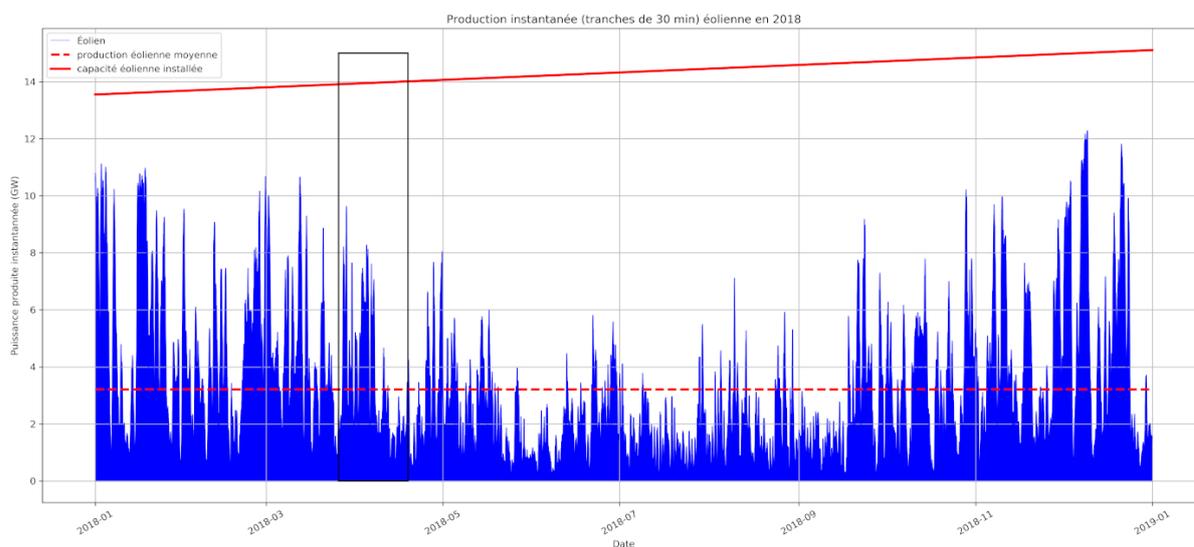


FIGURE 4.33 – Vue générale de la production instantanée (par pas de 30 min) éolienne sur l'année 2018. La capacité installée varie de 13,55 GW début 2018 à 15,11 GW fin 2018 (RTE 2017 ; RTE 2018a). La production moyenne est de 3,21 GW. La production minimale est de 83 MW (soit 0,6 % de la capacité moyenne installée), la production maximale de 12,3 GW (soit 86 % de la capacité moyenne installée). Le rectangle noir représente la partie zoomée sur la figure 4.35. Les données sont issues du site : <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere>

- ➔ Le stockage électrochimique dans des batteries.
- ➔ Le stockage sous forme d'énergie mécanique (gaz comprimé, roue à inertie, etc.).

Début 2020, la capacité mondiale de stockage est de 174 GW (DOE 2020). Dont 168 GW en STEP (97 %) ; 2,4 GW (1,4 %) en stockage thermique ; 2,0 GW en stockage électro-chimique (batteries), soit 1,1 %, avec 1,6 GW sous forme de batteries Li-ion⁷³.

La capacité de stockage représente ainsi environ 6,7 % de la consommation mondiale d'électricité.

En France, il y a 7 STEP (dont le barrage de Grand'Maison⁷⁴ en Isère, d'une puissance de 1,8 GW) pour une puissance totale de 4,9 GW (soit 20 % de la puissance hydroélectrique installée – 25 GW en 2018), mobilisables en quelques minutes.

4.4.4 Les énergies intermittentes

L'énergie éolienne dépend de la présence de vent. La figure 4.33 montre le caractère intermittent de cette production sur une année, avec des variations importantes, de moins de 1 % de la capacité installée à moins de 90 % au maximum. Ces variations dépendent des vents, donc de la météorologie, mais elles sont généralement complètement décorréées de la demande en électricité. La figure 4.35 montre le caractère stochastique de la production d'énergie éolienne. L'énergie solaire obéit à l'alternance jour-nuit (figures 4.34 et 4.35), mais le maximum de production en journée reste relativement aléatoire.

Dans les deux cas, les progrès des prévisions météorologiques sur une période de quelques jours pour un lieu donné peuvent permettre une prédiction de la production pour ces énergies avec certaines incertitudes.

73. Ces chiffres ont été obtenus avec la base de données de projets de stockage à la date du 18 février 2020 (fichier disponible à l'adresse : <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/projects.html/>). Seuls les moyens opérationnels ont été comptabilisés.

74. https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Grand'Maison.

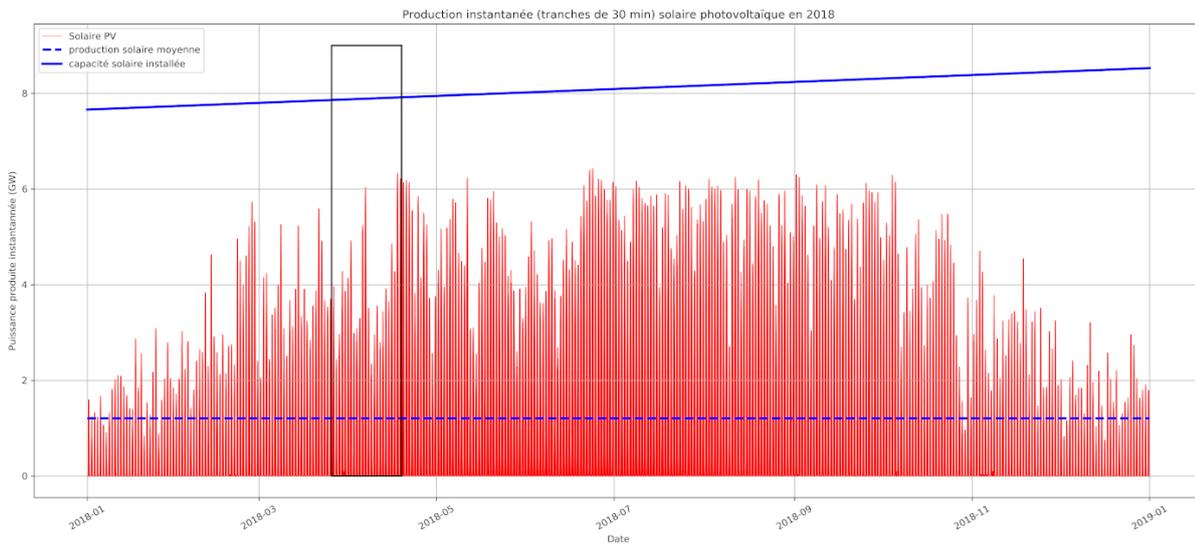


FIGURE 4.34 – Vue générale de la production solaire photovoltaïque sur l’année 2018. La capacité installée varie de 7,66 GW début 2018 à 8,53 GW fin 2018 (RTE 2017 ; RTE 2018a). La production moyenne est de 1,21 GW. La production maximale est de 6,4 GW (soit 79 % de la capacité moyenne installée). Le rectangle noir représente la partie zoomée sur la figure 4.35. Les données sont issues du site : <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere>.

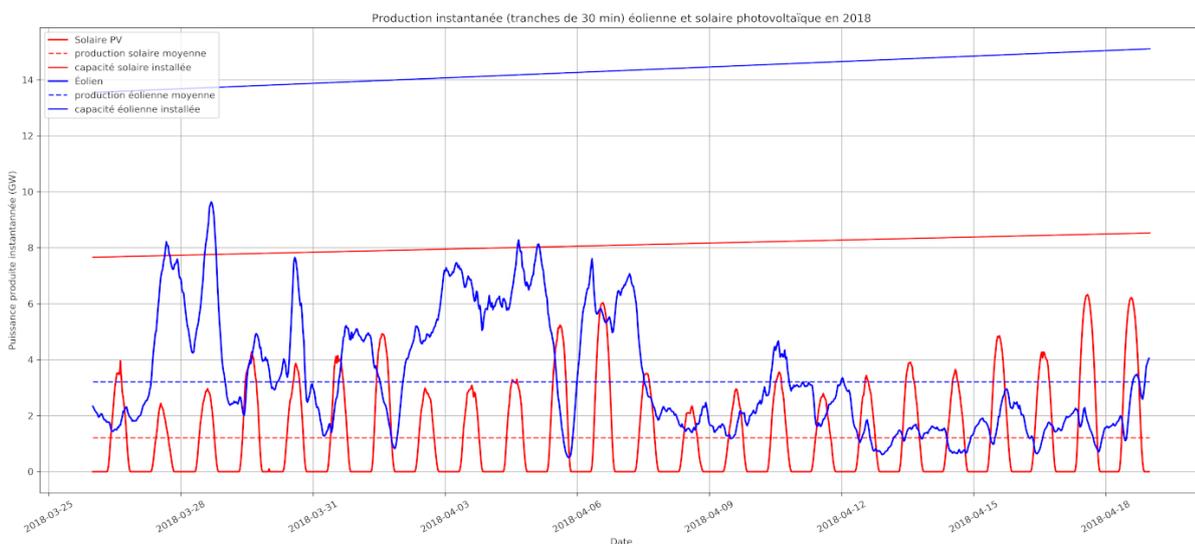


FIGURE 4.35 – Zoom sur la période printanière de la production instantanée éolienne et photovoltaïque allant du 26 mars 2018 au 19 avril 2018. Les données sont issues du site : <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere>.

On pourrait imaginer à l’échelle d’un grand pays ou d’un ensemble de pays comme l’Europe qu’un réseau électrique uniforme puisse permettre de répartir la production et la demande : statistiquement, n’y a-t-il pas toujours du vent quelque part quand une région demande un surplus d’énergie électrique ? Cette idée du « foisonnement » des vents à grande échelle est battue en brèche par des études statistiques (voir par exemple Flocard *et al.* 2014). La figure 4.36 montre une corrélation nette entre la production éolienne de l’ensemble de 7 pays de l’Europe de l’ouest ainsi que de la France, même si une atténuation des extrêmes sur l’Europe montre

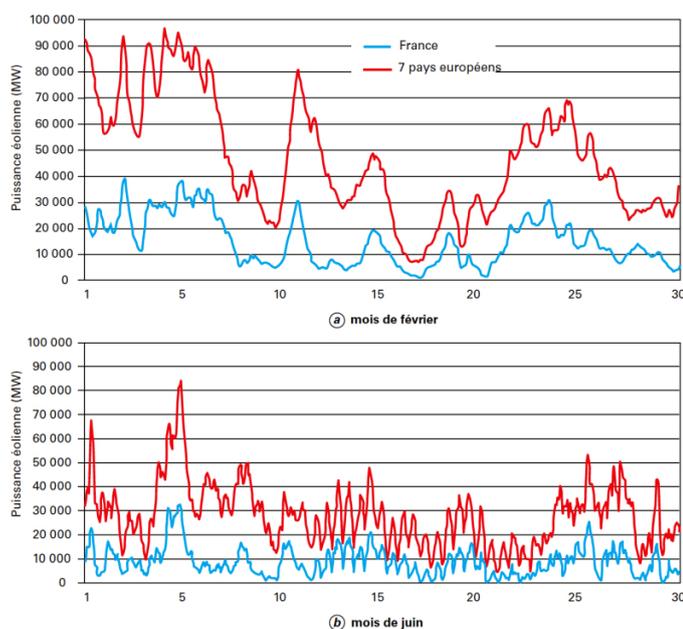


FIGURE 4.36 – Comparaison des puissances éoliennes 2025-2030 extrapolées à partir des données horaires réelles 2013 de la France et de l'ensemble de 7 pays de l'Europe de l'ouest et du nord (Belgique, Allemagne, Danemark, Irlande, Royaume-Uni, Espagne, France) heure par heure pour un mois de février et un mois de juin. Extrait de Flocard *et al.* (2014), <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8586>. © Techniques de l'Ingénieur.

qu'un foisonnement existe. Celui-ci n'est cependant pas suffisant pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables au niveau européen. La simulation d'une flotte de 280 GW d'énergie éolienne installée en Europe et géographiquement bien distribuée montre qu'en hiver la puissance journalière générée à partir du vent varie entre 40 et 170 GW selon les conditions de vent (Burtin & Silva 2015)!

4.4.5 Intermittence et stabilité

La question de l'intermittence des sources prend tout son sens au regard de la nécessaire stabilité du réseau (Treiner 2018). Les fluctuations journalières de la demande sont de l'ordre de 15 à 20 % en France.

Mix électrique en temps réel

Il est possible de regarder en temps réel la consommation et la production d'électricité en France sur le site : <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere>. Par exemple, la figure 4.37 montre la production journalière d'électricité, pour chaque filière, par pas temporels de 15 minutes, pour la journée du jeudi 25 avril 2019. Le maximum de production est à 11 h 00 (66 GW), tandis que le minimum est à 4 h (55 GW). La consommation (ou puissance appelée) est au-dessus de la ligne horizontale, le surplus produit (sous la ligne horizontale) est exporté ou utilisé pour du stockage par pompage.

L'écart de consommation entre le minimum et le maximum, par rapport à une valeur moyenne journalière est d'environ $\pm 10\%$. Dans ce cas précis ce sont les centrales nucléaires et hydrauliques qui sont mises à contribution. Sur une autre journée, hivernale, celle du jeudi 24 janvier 2019 (figure 4.38), le maximum de la consommation est atteint vers 19 h, avec une mise à contribution de l'électricité hydraulique (facteur 3,3 en plus par rapport au minimum), à laquelle s'ajoutent des importations.

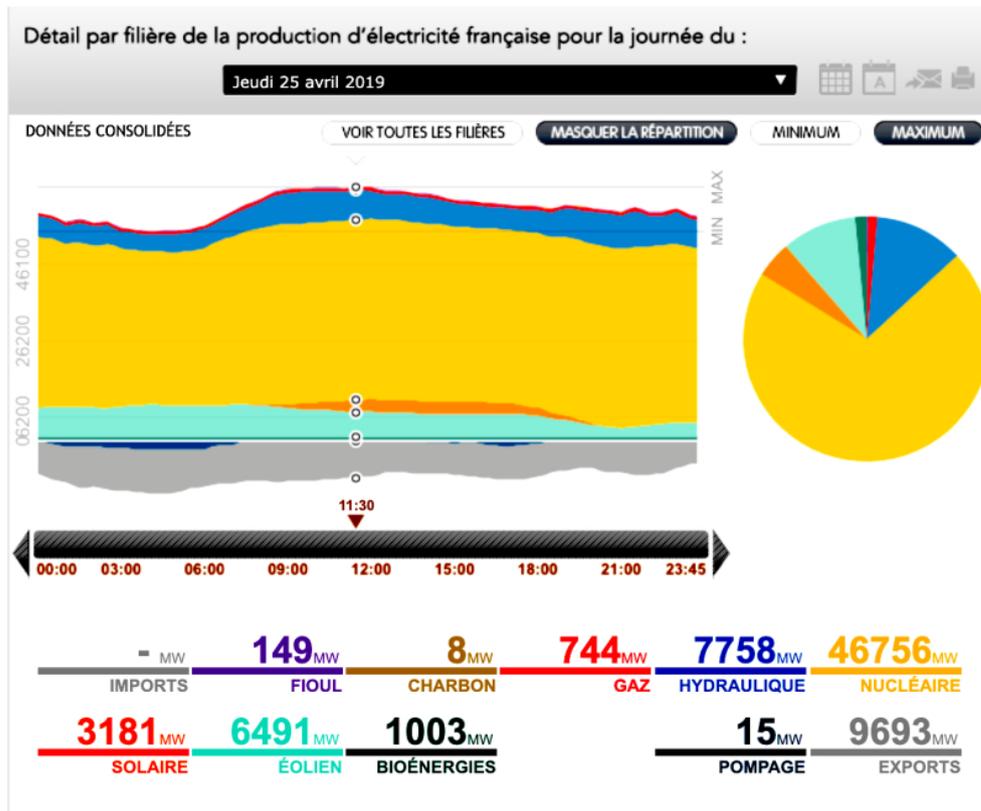


FIGURE 4.37 – Détail par filière de la production d'électricité en France le jeudi 25 avril 2019. Le curseur est sur le maximum de production instantané à 11 h 30. Le minimum est à 4 h 00. Source : <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>. © RTE.

Intermittence et stockage

En développant les sources d'énergie intermittentes, ce sont les fluctuations de la production qui deviendraient prépondérantes et ainsi plus importantes que les fluctuations de la demande. Pour gérer cela, compte tenu de l'équation d'équilibre du réseau, il faut prévoir un stockage capable de lisser les fluctuations de la production aussi importantes soient-elles. Il faut donc que le stockage ajouté à la production produise une puissance proche de la puissance moyenne.

En suivant le raisonnement de Treiner (2018), supposons que l'on remplace la puissance nucléaire moyenne annuelle française, soit environ $P_N = 43$ GW, par un mix d'éolien et de photovoltaïque.

Pour le solaire photovoltaïque, si l'on souhaite récupérer d'une façon ou d'une autre toute l'énergie produite, la puissance de stockage nécessaire est donnée par la différence entre la puissance moyenne (avec un facteur de charge d'environ 15 % cela fait 15 % de la puissance installée – ou puissance-crête) et la puissance maximale instantanée, soit environ 80 % de la puissance installée (puissance-crête) (figure 4.34). La puissance de stockage nécessaire est donc de 65 % de la puissance-crête.

Pour l'éolien, la puissance de stockage nécessaire est également la différence entre la puissance moyenne (avec un facteur de charge d'environ 23 %, cela fait 23 % de la puissance installée) et la puissance maximale instantanée (environ 86 % de la puissance installée, voir la figure 4.33), soit 43 % de la puissance installée.

Considérons un « mix » composé d'une fraction m_e de la puissance installée totale P_i^{tot} (éolien + photovoltaïque) pour la puissance installée éolienne P_i^e , et d'une fraction $(1 - m_e)$ de

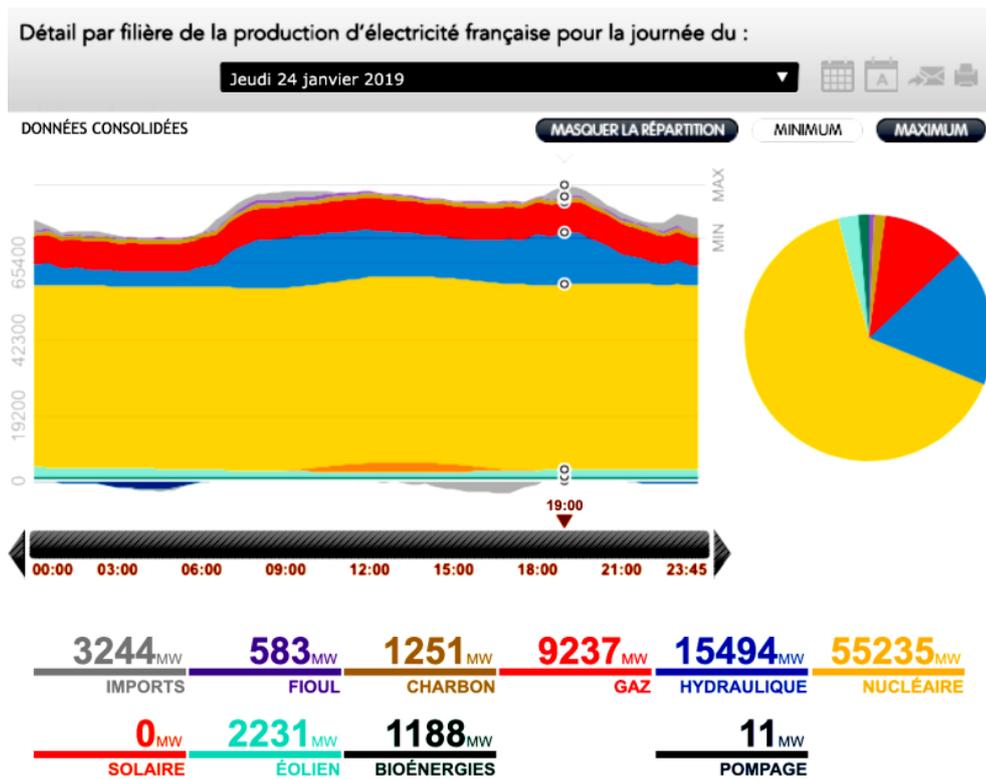


FIGURE 4.38 – Détail par filière de la production d'électricité en France le jeudi 24 janvier 2019. Le curseur est sur le maximum de production instantané à 19 h. Le minimum est à 5 h 00. Source : <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere>. © RTE.

la puissance installée totale pour la puissance installée solaire photovoltaïque P_i^{PV} . On a donc :

$$\begin{aligned} P_i^e &= m_e \times P_i^{\text{tot}} \\ P_i^{PV} &= (1 - m_e) \times P_i^{\text{tot}} \end{aligned}$$

Et, bien sûr :

$$P_i^{\text{tot}} = P_i^e + P_i^{PV}$$

Et puis, par hypothèse :

$$f_c^e \times P_i^e + f_c^{PV} \times P_i^{PV} = P_N$$

où f_c^e est le facteur de charge de l'éolien, f_c^{PV} est le facteur de charge du photovoltaïque et P_N est la puissance moyenne du nucléaire que l'on souhaite atteindre. Soit :

$$P_i^{\text{tot}} = \frac{P_N}{f_c^e \times m_e + f_c^{PV} \times (1 - m_e)}$$

On peut ainsi déterminer la puissance P_{stock} nécessaire au stockage compte tenu des hypothèses précédentes :

$$P_{\text{stock}} = (f_m^e - f_c^e) \times P_i^e + (f_m^{PV} - f_c^{PV}) \times P_i^{PV}$$

où f_m^e est la fraction de la puissance éolienne installée donnant la puissance instantanée maximale ; et f_m^{PV} est la fraction de la puissance solaire installée donnant la puissance instantanée maximale.

La figure 4.39 représente les puissances installées P_i^{tot} , P_i^e et P_i^{PV} , ainsi que la puissance consommée moyenne visée (P_N), et la puissance de stockage en fonction du « mix », à savoir la fraction m_e d'éolien. En termes de puissance totale installée, l'optimal intervient quand on a

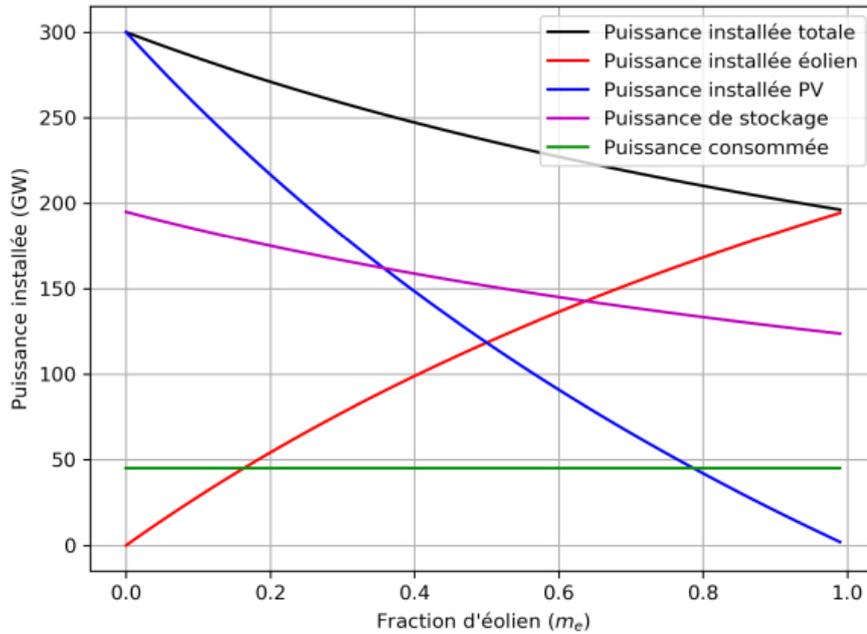


FIGURE 4.39 – Puissances totale, de stockage, éolienne et solaire (PV) installées en fonction de la fraction de puissance éolienne installée m_e , pour une puissance consommée donnée.

uniquement de l'éolien ($m_e = 1$), car son facteur de charge est plus élevé. Il faut quand même une puissance installée minimale égale à $P_N/f_c^e = 196$ GW (dans ce cas uniquement éolienne), pour accéder à une puissance moyenne de 45 GW, avec une puissance de stockage de 124 GW. Si on augmente la fraction de solaire photovoltaïque, ces quantités augmentent.

Sachant que la capacité actuelle de stockage de la France sous forme de STEP est de 7 GW, auxquels s'ajoutent environ 18 GW d'hydroélectricité pilotable, cela ne représente que 20 % du minimum qu'il faudrait pour remplacer l'électricité nucléaire par du renouvelable.

La figure 4.40 montre la variation du niveau de stock nécessaire pour fournir l'appoint d'un mix 100 % intermittent (Grand *et al.* 2015). Un tel stockage idéal absorberait la production excédentaire et la restituerait en cas de déficit par rapport à la charge (demande). La puissance d'appoint est définie comme la différence entre la puissance demandée (charge) et la puissance de production. Elle est ainsi positive s'il faut fournir une puissance supplémentaire pour subvenir à la demande, et négative dans le cas contraire. Quand elle est positive, il y a production à partir du stock; quand elle est négative, il y a stockage. L'énergie potentielle du stockage (STEP) $E_S(t)$ est reliée à la puissance d'appoint $P_A(t)$ par :

$$\frac{dE_S}{dt} = -P_A(t)$$

La courbe bleue de la figure 4.40 représente l'énergie potentielle de stockage, $E_S(t)$, sur une année, tandis que la courbe rose représente la puissance d'appoint, $P_A(t)$. Le niveau d'énergie est arbitrairement fixé à 0 en début d'année. Le bilan annuel étant nul, il doit revenir à 0 en fin d'année.

Dans ce cas de figure la capacité de stockage doit être de 14 TWh pour subvenir aux variations extrémales. On note que la puissance entrant ou sortant du stockage varie entre -45 GW et $+25$ GW. En France, la plus grande centrale de pompage-turbinage, celle de Grand'Maison, a une capacité de stockage de 35 GWh, soit 400 fois moins que les 14 TWh du cas d'école précédent.

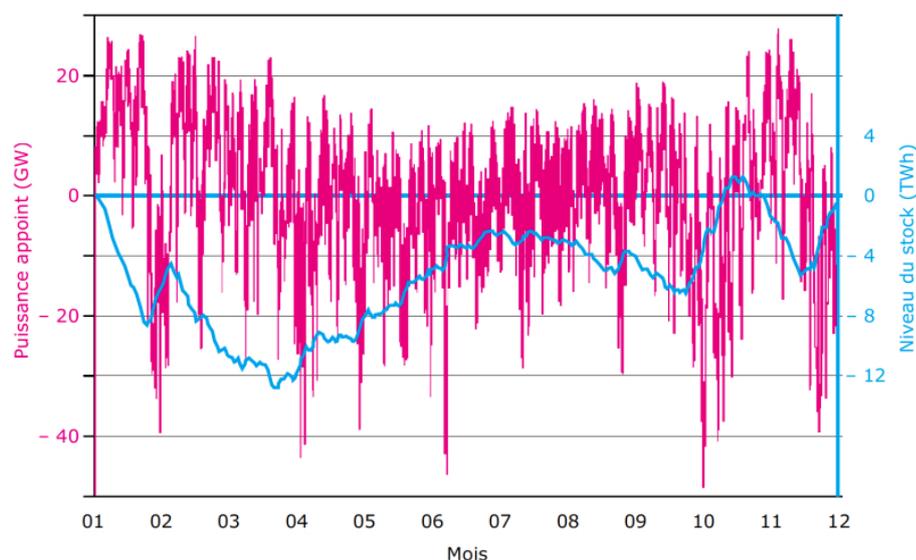


FIGURE 4.40 – Évolution annuelle de l'énergie potentielle d'un stockage parfait fournissant la puissance d'appoint dans le cas d'un mix 100 % intermittent. Extrait de Grand *et al.* (2015), <https://doi.org/10.51257/a-v1-in301>. © Techniques de l'Ingénieur.

Gestion de l'intermittence

Outre la capacité de stockage, il y a, pour gérer l'intermittence de la production d'électricité, trois autres possibilités :

- utiliser des moyens de production classique pilotables ;
- importer ou exporter de l'électricité grâce aux interconnexions avec les pays voisins ;
- supprimer ou réduire certaines consommations non prioritaires.

L'insertion dans le réseau de sources intermittentes, outre l'augmentation des fluctuations de la production, diminue également l'inertie globale (Sapy 2019). Les énergies intermittentes sont généralement connectées au réseau par des onduleurs qui n'ont pas d'inertie propre, ce qui limite la stabilité instantanée du réseau (figure 4.41).

Néanmoins la nécessaire décarbonation de l'électricité, et des ressources nucléaires épuisables (uranium pour la génération III), font que les énergies renouvelables comme le solaire photovoltaïque et l'éolien réalisent une inévitable percée dans le mix énergétique de la France, mais pas seulement. Outre leur problématique intermittence, l'absence d'inertie de ces moyens de production d'électricité pose la question de la stabilité du réseau électrique.

Cette stabilité pourrait être assurée par des compensateurs synchrones qui sont des moteurs synchrones tournant à vide. Ils fournissent ainsi de l'inertie au réseau sans lui injecter de puissance électrique. Cette solution a déjà été éprouvée à une échelle régionale, son efficacité à grande échelle restant à démontrer (IEA & RTE 2021). D'autres solutions sont étudiées, comme l'utilisation de convertisseurs spécifiques qui permettent un ajustement rapide de la production renouvelable à un écart de fréquence. Ou encore la mise en réseau des convertisseurs pour constituer non pas une grille formée de machines synchrones et donc asservie à la fréquence du réseau (*grid-following*), mais une grille *générant* sa propre consigne en fréquence ou « onde de tension » (Arghir *et al.* 2018). Ces technologies doivent encore faire leurs preuves en dehors des laboratoires et sur un réseau à grande échelle.

Pour garantir l'alimentation malgré la variabilité de l'éolien et du solaire photovoltaïque, divers scénarios sont envisageables (IEA & RTE 2021). Le développement de nouvelles centrales pilotables ayant recours à de nouveaux combustibles pour le biogaz ou l'hydrogène ; des installations de stockage à grande échelle : batteries, STEP, hydrogène ; un accroissement de

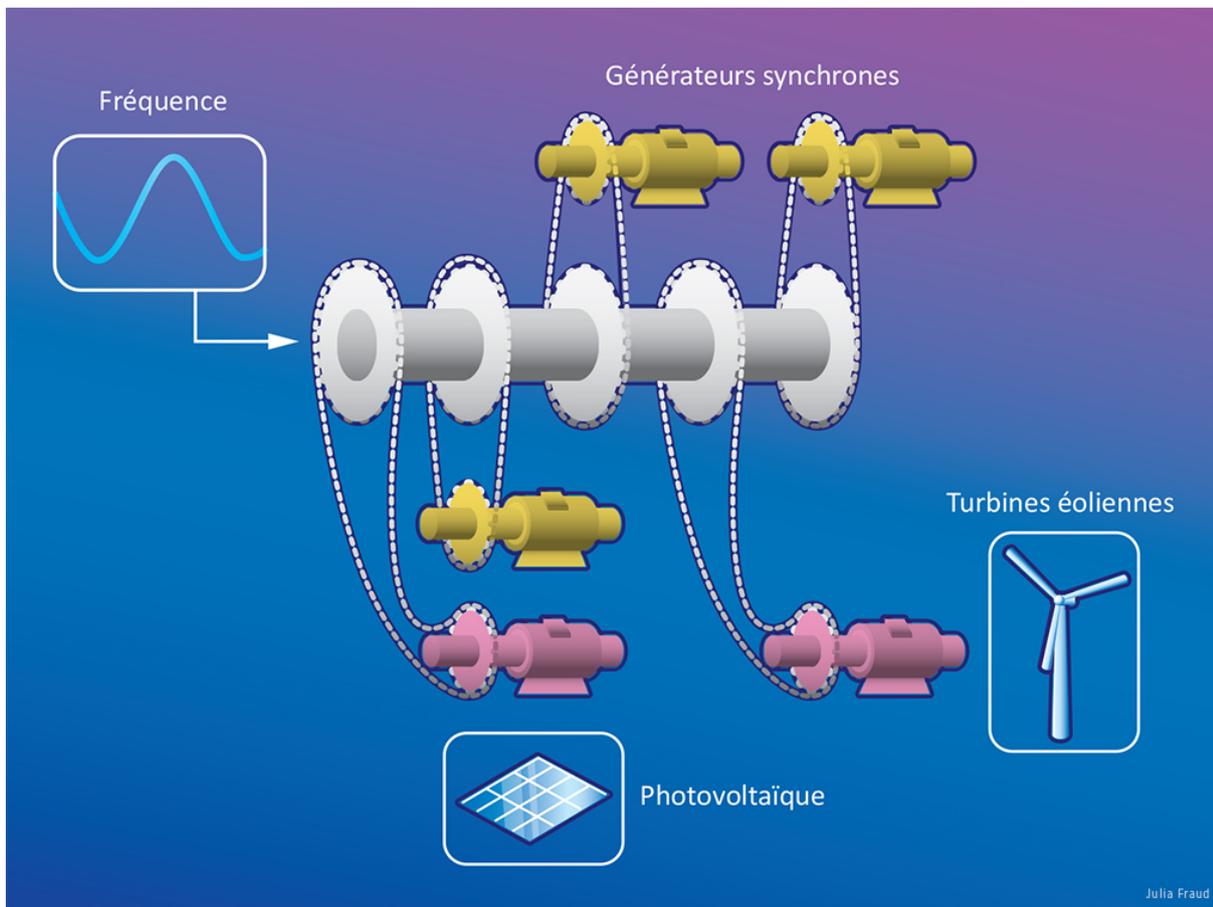


FIGURE 4.41 – Illustration de l’inertie du réseau électrique et de ses constituants qui permettent de garantir la stabilité de la fréquence, comme les générateurs synchrones (alternateurs). Adapté de Burtin & Silva (2015). Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

la flexibilité de la demande dans les installations industrielles; des réseaux électriques plus développés et interconnectés à grande échelle afin d’atténuer les conséquences des variations locales.

4.5 Le CO₂

Nous avons vu que toutes les activités humaines requièrent de l’énergie qu’elles transforment d’un état à un autre. La quasi-totalité (78 %) de l’énergie ainsi consommée (transformée) est issue de ressources fossiles dont la transformation nécessite une combustion produisant du dioxyde de carbone qui s’accumule dans l’atmosphère (voir par exemple la réaction chimique (4.6), p. 159), perturbant ainsi le cycle naturel du carbone.

4.5.1 Unités

Les quantités de dioxyde de carbone ou de carbone stockées et échangées sont généralement exprimées dans diverses unités. La plupart se ramènent à des masses de carbone (C) ou de dioxyde de carbone (CO₂) par unité de temps (souvent l’année). On parle alors d’équivalent CO₂ pour les gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone : il s’agit alors de la masse de dioxyde de carbone qui provoque le même forçage radiatif que la masse de gaz en question. Les masses de ces autres gaz sont converties en masse de CO₂ par l’intermédiaire du pouvoir de réchauffement global (PRG) (voir §3.2.9, p. 106); elles dépendent donc de la définition du PRG choisie, et en particulier de l’horizon temporel (qui est fixé à 100 ans par convention).

Voici quelques-unes de ces unités :

- 1 tC (tonne de carbone); pour les flux à l'échelle de la planète, on utilise souvent la GtC (giga-tonne de carbone);
- 1 tCO₂ (tonne de CO₂ ou plus souvent tonne *équivalent*-CO₂ pour les cocktails de gaz à effet de serre – ainsi, par exemple, comme le pouvoir de réchauffement global du méthane est de 25, 1 kg de méthane = 25 kgCO₂éq);
- 1 GtCO₂ = 0,273 GtC et 1 GtC = 3,664 GtCO₂ (voir § 3.3.3, p. 115)⁷⁵;
- 1 PgC (péta-gramme de carbone) = 10¹⁵ g de C = 1 GtC;
- 1 ppm (partie par million, en nombre) dans l'atmosphère correspond à 2,13 GtC (voir § 3.3.3);
- 1 ppb = 10⁻³ ppm (partie par milliard).

4.5.2 Le cycle du carbone

Le cycle naturel (ou pré-industriel) du carbone sur Terre est complexe. Il fait intervenir différents réservoirs de tailles différentes :

- l'atmosphère (CO₂ et CH₄ essentiellement, diffus) d'une taille d'environ 600 GtC;
- l'hydrosphère (les océans essentiellement où se trouve du CO₂ dissous de manière diffuse) d'une taille de 38 000 GtC;
- la biosphère (carbone organique dans la biomasse constitué de la végétation et des sols) d'une taille d'environ 2000 GtC;
- la lithosphère (croûte terrestre et une partie du manteau qui forment une enveloppe rigide à la surface de la Terre où le carbone est fixé sous forme de fossiles : pétrole, gaz, charbon, et sous forme de calcaires);
- le manteau terrestre (CO₂ dissous et diffus).

Le cycle du carbone est estimé en évaluant la taille de ces réservoirs et le temps de résidence du carbone ainsi que les flux d'échanges entre eux. L'essentiel du flux se fait entre l'atmosphère, les couches superficielles du sol et les océans, le tout incluant la biosphère. Le flux le plus important est celui entre l'atmosphère et la biosphère (équilibre entre photosynthèse et respiration) de l'ordre de 108 GtC/an (figure 4.42). Un flux d'environ 60 GtC/an entre l'atmosphère et les océans concerne l'équilibre de dissolution du dioxyde de carbone.

75. Le calcul rapide du rapport des masses molaires (voir note 1, page 46) $M(\text{CO}_2)/M(\text{C})$ donne $44/12 = 3,667$. En réalité, il faut tenir compte des abondances isotopiques du carbone et de l'oxygène ainsi que des masses molaires qui ne sont pas exactement égales au nombre de masse. Le tableau suivant donne les valeurs des différents isotopes stables de ces deux éléments :

Isotope	Abondance	Masse molaire (g/mol)
¹² ₆ C	0,98930	12,00000
¹³ ₆ C	0,01070	13,00335
¹⁶ ₈ O	0,99762	15,99490
¹⁷ ₈ O	0,00037	16,99913
¹⁸ ₈ O	0,00205	17,99916

Ainsi :

$$M(\text{C}) = 0,98930 \times 12,00000 + 0,01070 \times 13,00335 = 12,01074 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$M(\text{O}) = 0,99762 \times 15,99490 + 0,00037 \times 16,99913 + 0,00205 \times 17,99916 = 16,00002 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$M(\text{CO}_2) = 12,01074 + 2 \times 16,00002 = 44,01078 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

D'où :

$$\frac{M(\text{CO}_2)}{M(\text{C})} = \frac{44,01078}{12,01074} = 3,6643$$

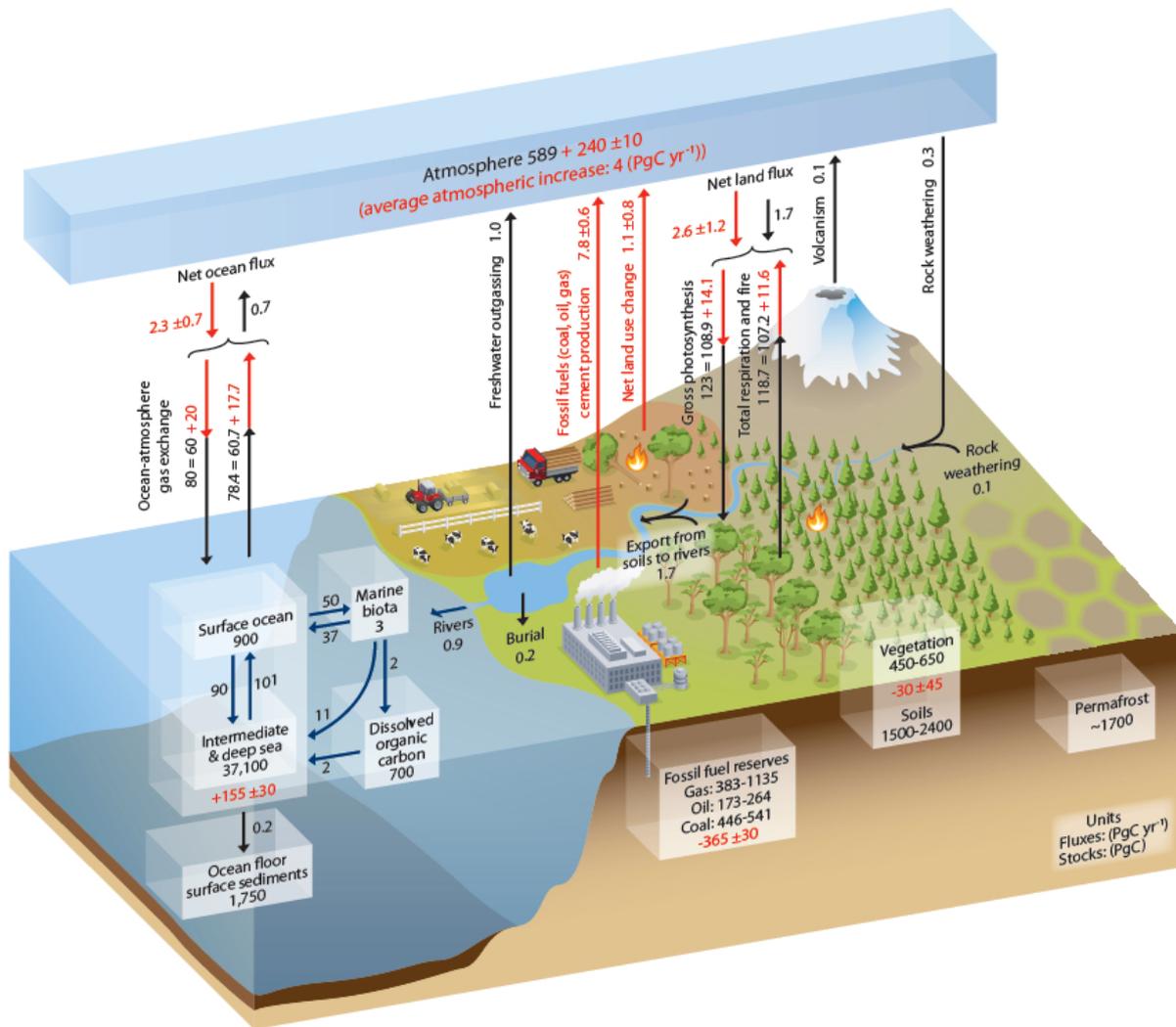


FIGURE 4.42 – Réservoirs (en Pg soit 10^{15} g ou 1 Gt) et flux de carbone (en Pg/an). En noir les estimations pré-industrielles (1750). Les flèches rouges indiquent les flux annuels anthropiques moyennés sur 2000–2009. Les nombres rouges indiquent les changements cumulés de carbone anthropique sur la période 1750–2011. Source : GIEC (2013). © Intergovernmental Panel on Climate Change.

La réserve la plus importante, non mentionnée à la figure 4.42, est celle de carbone sous forme de carbonates dans les roches sédimentaires de la lithosphère et du manteau terrestres (estimée à plus de 50 millions de GtC). Les eaux océaniques constituent un important réservoir de l'ordre de 38 000 GtC. Le réservoir des énergies fossiles (accessibles) est d'environ 4000 GtC.

Les autres réservoirs et flux sont indiqués à la figure 4.42. Cette figure indique en outre, en rouge, les flux de carbone et les variations des stocks dus aux activités humaines. De manière générale celles-ci perturbent l'ensemble des flux en lien avec l'atmosphère et génèrent un flux unilatéral vers l'atmosphère dû à la combustion des ressources fossiles d'une part (7,8 GtC/an) et à la déforestation d'autre part (1,1 GtC/an).

L'échelle de temps d'échange sur un cycle du carbone entre l'atmosphère et la biosphère est de 1 à 100 ans. Celle de l'échange entre l'atmosphère et l'océan est de 10 à 1000 ans. Celle de l'échange entre l'atmosphère et la lithosphère est de 1000 à 10 000 ans. Le cycle d'altération des roches calcaires a une période de 10^4 à 10^5 années.

4.5.3 Les émissions de GES

Qu'est-ce ?

Il faut distinguer les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la quantité de gaz à effet de serre observée dans l'atmosphère (section 3.3.3, p. 115). Les émissions de GES par les activités humaines sont des estimations (et non des mesures directes) qui dépendent des connaissances scientifiques et des données disponibles.

Le GIEC (TFI pour *Task Force on national greenhouse gas Inventories*) fournit une base méthodologique pour réaliser les inventaires nationaux d'émission⁷⁶. Les gaz à effet de serre retenus pour ces bilans sont ceux pris en compte par le protocole de Kyoto⁷⁷ :

- le dioxyde de carbone (CO₂);
- le méthane (CH₄);
- le protoxyde d'azote (encore appelé oxyde nitreux ou gaz hilarant) (N₂O);
- l'hexafluorure de soufre (SF₆);
- les hydrofluorocarbures (HFC);
- les perfluorocarbures (PFC) ou hydrocarbures perfluorés.

Les émissions sont données en tCO₂ (ou en tC), à savoir la quantité de CO₂ qu'il faudrait émettre pour avoir le même effet de serre (voir §3.2.9). On ne compte que les émissions anthropiques.

En France, l'inventaire annuel est réalisé par le *Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique* (CITEPA); le dernier rapport date de 2019 (CITEPA 2019).

Les émissions liées à la fabrication des biens importés ne sont pas prises en compte dans le bilan national (territorial) : seules les émissions liées aux activités à l'intérieur des frontières le sont.

Comment les calculer ?

L'émission $E_{a,t}$ d'une activité a pendant un intervalle de temps t est exprimée schématiquement par (GIEC 2006 ; CITEPA 2019) :

$$E_{a,t} = A_{a,t} \times F_a \quad (4.23)$$

où $A_{a,t}$ est la quantité d'activité relative à l'activité a pendant l'intervalle de temps t , et F_a est le facteur d'émission relatif à l'activité a .

Par exemple, dans le cas de la combustion de ressources fossiles, le facteur d'émission est la masse de GES produite par unité de masse ou de volume de combustible.

On distingue généralement trois niveaux d'émissions (ADEME 2014) :

- Scope 1 : les émissions physiquement et directement produites par une activité;
- Scope 2 : les émissions d'une énergie consommée qui ne sont pas émises sur le lieu de consommation, mais sur le lieu de production (électricité et réseaux de chaleur);
- Scope 3 : les émissions indirectes (comme le transport de marchandises).

Empreinte carbone

L'empreinte carbone est un indicateur qui tient compte de l'ensemble des émissions liées à la demande intérieure du pays : émissions directes de GES des ménages (logement et transport), émissions issues de la production intérieure (hors exportation), émissions liées à l'importation de biens et services pour les entreprises ou les ménages (les importations ré-exportées ne sont

76. <https://www.ipcc.ch/working-group/tfi/>

77. Le Protocole de Kyoto est un accord international visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, qui a été signé en 1997 lors de la 3^e COP à Kyoto au Japon; il est entré en vigueur en 2005.

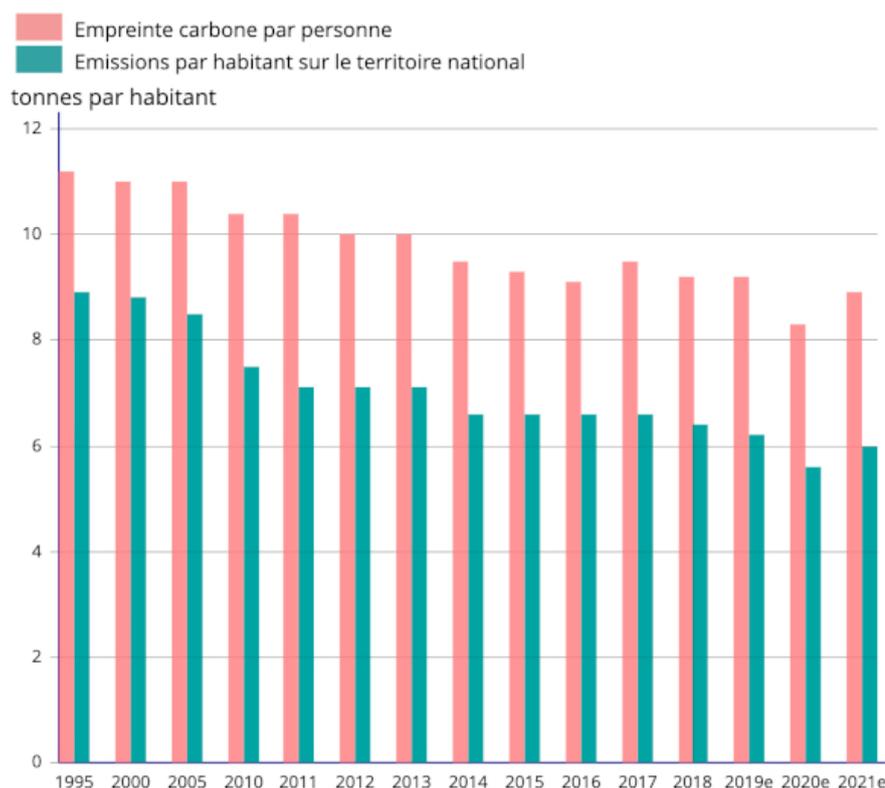


FIGURE 4.43 – Évolution des émissions de GES par personne en France (métropole et Outre-mer) pour les deux périmètres, celui de l’empreinte carbone et celui de l’inventaire national, en tCO₂/habitant. Les trois principaux GES : CO₂, CH₄ et N₂O sont pris en compte. Pour les années 2019, 2020, 2021, il s’agit d’une estimation. Tiré de : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3281683?sommaire=3281778>.

pas prises en compte)⁷⁸, contrairement à l’inventaire national qui ne tient pas compte des importations. La figure 4.43 montre la différence entre les émissions de GES par personne (bilan national) et l’empreinte carbone par personne pour la France. On constate une différence significative liée aux importations : en 2016, par exemple, les émissions affectées aux importations représentent 51 % de l’empreinte carbone. Celles associées aux exportations représentent 28 % de l’inventaire. La figure 4.44 montre, pour différents pays ou groupes de pays, l’évolution des deux approches, empreinte et inventaire, montrant ainsi que la diminution apparente des émissions de CO₂ (uniquement) des pays occidentaux est largement compensée par l’augmentation de celles de la Chine qui exporte massivement vers ces mêmes pays occidentaux.

Facteurs d’émission des énergies courantes

Le facteur d’émission intervenant dans l’équation (4.23) est une donnée tabulée. On peut trouver les facteurs d’émission de nombreuses substances et processus dans la *Base Carbone* de l’ADEME⁷⁹. Nous en donnons quelques-uns ici. Ainsi le tableau 4.3 donne les facteurs d’émission de quelques combustibles courants, à savoir la quantité de CO₂ émise en grammes de CO₂ par unité d’énergie produite (énergie thermique émise par la combustion), en kWh. Il donne les émissions *directes* (1^{re} colonne) lors de la combustion, hors chaleur latente de vaporisation de l’eau (pouvoir calorifique inférieur – PCI). La 2^e colonne donne les émissions après analyse du cycle de vie (ACV). Ce type d’analyse recense et quantifie, tout au long de la vie d’un produit, les flux physiques de matière et d’énergie associés aux activités humaines (ADEME 2018).

78. Tiré de : https://fr.wikipedia.org/wiki/émissions_de_gaz_à_effet_de_serre_en_France#Méthodologie.

79. <https://www.bilans-ges.ademe.fr/>

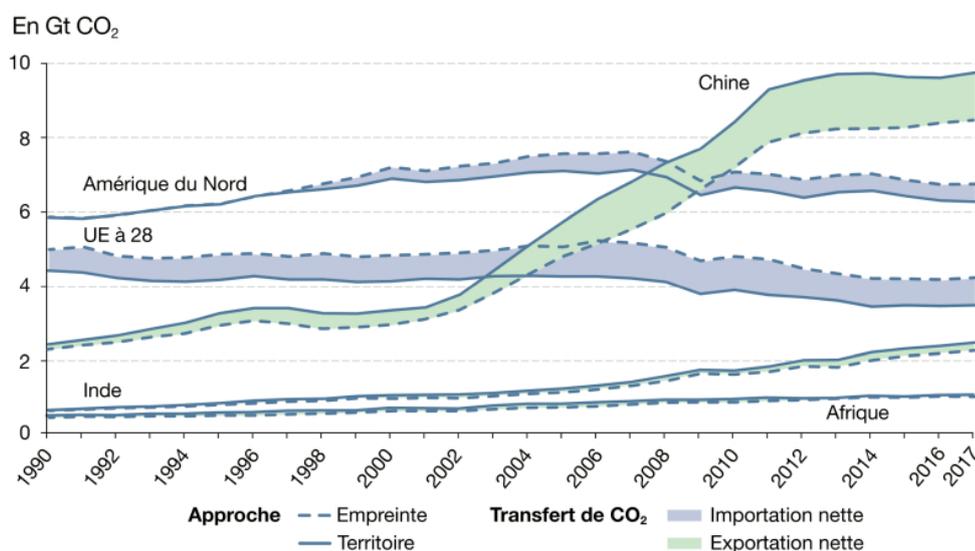


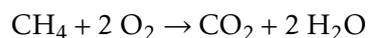
FIGURE 4.44 – Comparaison internationale des émissions de CO₂ (uniquement) dues à la combustion d'énergie selon les approches : inventaire national et empreinte selon le jeu des exportations et importations entre pays. Source : Service des données et études statistiques (SDES 2021). Licence Ouverte.

Combustibles	Émissions directes (gCO ₂ /kWh)	Émissions ACV (gCO ₂ /kWh)
Charbon	345	377
Fioul lourd	283	324
Fioul domestique	272	324
Gazole	256	323
Essence (SP95, SP98)	253	314
GPL	233	260
Gaz naturel	204	243
Bois énergie	18,8	29,5

TABLE 4.3 – Facteurs d'émission CO₂ des combustibles courants (pouvoir calorifique inférieur, c'est-à-dire sans tenir compte de la chaleur latente de l'eau produite par la combustion), d'après la *Base Carbone* de l'ADEME. La première colonne concerne les émissions directes lors de la combustion. La deuxième colonne donne la valeur après analyse du cycle de vie (ACV).

Les facteurs d'émissions peuvent varier en fonction de la composition des combustibles et des méthodes employées. L'ADEME, dans la *Base Carbone*, estime l'incertitude à $\pm 5\%$ pour les produits pétroliers et à $\pm 20\%$ pour le charbon et ses dérivés.

Prenons l'exemple du gaz naturel. Cette appellation concerne différents « gaz » qui contiennent majoritairement du méthane, mais également d'autres gaz (alcane, azote, etc.). Le « gaz naturel de réseau » contient typiquement 90 % en masse de méthane (plus 5 % d'éthane, 1 % de propane, 0,2 % de butane, 2,2 % d'azote, 1,4 % de dioxyde de carbone). La combustion du méthane est donnée par :



Ainsi une mole de méthane donne une mole de dioxyde de carbone. Pour déterminer le facteur d'émission, il faut la quantité d'énergie produite par cette réaction. Pour cela, on utilise le pouvoir calorifique (voir note 48, p. 172). En général, on utilise le PCI, car la chaleur latente de l'eau est perdue, sauf dans certains dispositifs, comme les chaudières à condensation⁸⁰. Le PCI

80. https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudière_à_condensation

	CO _{2f}	CH _{4f}	CH _{4b}	N ₂ O	Autre gaz	TOTAL	CO _{2b}
Combustion	0	0	0,0188	0	0	0,0188	0,38
Amont	8,22 · 10 ⁻³	2,46 · 10 ⁻³	0	0	0	0,0107	-0,38
TOTAL	8,22 · 10⁻³	2,46 · 10⁻³	0,0188	0	0	0,0295	0

TABLE 4.4 – Les données d'émission des gaz à effet de serre pour la combustion du « bois énergie » ou bois en bûche à 20 % d'humidité (*Base Carbone* de l'ADEME). L'indice « f » correspond à « fossile », l'indice « b » à biogénique. Les données sont en kgCO₂. Source ADEME (www.ademe.fr).

Filières	D'après la <i>Base Carbone</i> ADEME (janvier 2015)	Médiane d'émissions issue du rapport du GIEC (2014)	Rapport de l'université de Singapour (2008)	Rapport de l'université de Stanford (2009)
Nucléaire	6	12	66	9 à 70
Charbon	1038	820	960 à 1050	
Gaz	406	490	443 à 611	
Fioul	704		778	
Hydraulique retenue	4	24	10	17 à 22
Photovoltaïque	55	41 à 48	32	19 à 59
Éolienne	7,3	11 à 12	9	2,8 à 7,4
Géothermie	45	38	38	15,1 à 55
Biomasse		230	14 à 31	
Solaire thermique		27	13	
Biogaz			11	

TABLE 4.5 – Émissions directes (CO₂ + ACV) par kWh de diverses filières de production d'électricité, en gCO₂/kWh, selon diverses estimations. Tableau issu de : https://fr.wikipedia.org/wiki/Empreinte_carbone_de_l'électricité

du méthane est de 803,3 kJ·mol⁻¹, tandis que le PCS vaut 890,8 kJ·mol⁻¹. La différence entre les deux correspond à la liquéfaction puis au refroidissement de 2 moles d'eau (équation 4.25, p. 172).

Comme la masse molaire du méthane est de 16 g·mol⁻¹, le PCI vaut 803,3 / 16 = 50,2 kJ·g⁻¹ = 50,2 MJ·kg⁻¹ pour 1 kg de méthane. Or 1 kg de méthane génère 44/16 = 2,75 kg de dioxyde de carbone. Le PCI est donc de 50,2/2,75 = 18,25 MJ·kg⁻¹ de CO₂ produites. Or 1 kWh = 3,6 MJ, cela fait donc : 5,1 kWh·kg⁻¹, soit 1/5,1 = 0,197 kg·kWh⁻¹ de CO₂ produit, soit 197 gCO₂·kWh⁻¹. Le tableau 4.3 donne 204 gCO₂·kWh⁻¹ qui tiennent compte des 6,2 % d'autres alcanes contenus dans le gaz naturel.

Les émissions en ACV de la 2^e colonne (+ 39 gCO₂·kWh⁻¹) correspondent à l'exploration et la production (15,3 gCO₂·kWh⁻¹), la transmission jusqu'aux frontières françaises (20,6 gCO₂·kWh⁻¹), le transport (gazoduc ou méthanier – 2,8 gCO₂·kWh⁻¹), la distribution (1,5 gCO₂·kWh⁻¹).

Le tableau 4.4 montre la répartition des émissions du bois, à titre d'exemple, pour les différents gaz à effet de serre dans le facteur d'émission (dernière ligne du tableau 4.3). La combustion du bois génère 18,8 g (équivalent CO₂ – on passe d'une quantité de CH₄ à une quantité de CO₂ par l'intermédiaire du pouvoir de réchauffement global ou PRG) de méthane « biogénique » (c'est-à-dire produit par des organismes vivants), et 380 g de dioxyde de carbone biogénique. Le bilan sur le dioxyde de carbone est considéré comme nul, par hypothèse, puisque la combustion du bois ne fait que relâcher celui qui a été capté par la croissance de l'arbre. Donc, la combustion du bois rejette 18,8 gCO₂. Mais son exploitation (coupe, transport, etc.) rejette 0,822 gCO₂ de dioxyde de carbone et 0,246 gCO₂ de méthane (tous deux issus de combustibles fossiles). L'ajout des deux quantités constitue l'émission en cycle de vie du bois.

	CO _{2f}	CH _{4f}	CH _{4b}	N ₂ O	Autre gaz	TOTAL	CO _{2b}
Combustion	2,48	9,33 · 10 ⁻⁴	0	0,224	0	2,51	0,156
Amont	0,581	0,0421	0	0,0347	0	0,657	-0,156
TOTAL	3,06	0,043	0	0,0571	0	3,16	0

TABLE 4.6 – Les données d'émission des gaz à effet de serre pour la combustion du gazole routier (France continentale) selon la *Base Carbone* de l'ADEME. L'indice « f » correspond à fossile, l'indice « b » à biogénique. Source ADEME (www.ademe.fr).

Le tableau 4.5 donne les facteurs d'émission pour différentes filières de production d'électricité, selon différentes sources. On constate de grandes différences selon les sources en particulier pour le nucléaire et l'hydraulique. Cela vient du fait que pour certaines estimations un peu anciennes, les normes de l'analyse en cycle de vie (ACV) ne sont pas les mêmes que pour les analyses plus récentes. De plus, l'estimation donnée par l'ADEME se base sur le contexte français, où l'électricité est largement décarbonée, donc la construction d'une centrale nucléaire rejette moins de CO₂ que dans les pays où l'électricité est produite surtout à partir de charbon (comme les États-Unis auxquels se réfèrent les deux études de Singapour et Stanford).

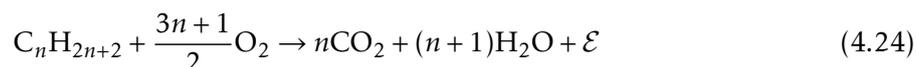
Faire un bilan d'émissions de CO₂

À titre d'exemple nous allons estimer les émissions de dioxyde de carbone pour un trajet en voiture.

Ma voiture est une Peugeot 308 SW break datant de 2010. Elle consomme en moyenne 5,3 litres de gasoil sur 100 km. Cette moyenne est une mesure faite sur des dizaines de milliers de kilomètres de trajets, principalement sur autoroutes.

Le gazole⁸¹ ou gasoil est un dérivé pétrolier qui contient principalement des alcanes (75 %) et des hydrocarbures aromatiques (25 %). Sa formule chimique moyenne est C₁₆H₃₄ (cétane) (voir Chevron 2007), qui est un alcane (de formule chimique générale C_nH_{2n+2}).

La formule chimique de combustion des alcanes est :



où \mathcal{E} est l'énergie thermique libérée par la réaction.

Dans le cas où $n = 16$ (cétane), la combustion d'une mole de cétane produit 16 moles de dioxyde de carbone. Donc la combustion de 226 g de cétane ($M_{\text{C}_{16}\text{H}_{34}} = 226 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) produit 704 g de CO₂ (car $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$). Ainsi 1 kg de cétane donne 3,12 kg de CO₂.

La masse volumique de la cétane est $\rho_{\text{C}_{16}\text{H}_{34}} = 770 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à 18 °C. Donc la combustion de 1 L de cétane produit 2,4 kg de CO₂.

La Base Carbone de l'ADEME donne un facteur d'émission pour le gazole routier (France continentale) de 3,16 kgCO₂/L (tableau 4.6). Il s'agit d'une empreinte carbone (avec ACV, donc) et non de l'unique émission de combustion. La combustion d'un litre de gazole génère 2,48 kgCO₂, 9,33 · 10⁻⁴ kgCO₂ de CH₄ et 2,24 · 10⁻² kgCO₂ de N₂O soit 2,51 kgCO₂ au total (tableau 4.6).

Avec ma voiture, j'émet donc $5,3 \times 2,51 = 13,3 \text{ kgCO}_2$ pour 100 km, soit 133 gCO₂/km. Cela sans tenir compte de la construction, de l'entretien et de la destruction de la voiture elle-même (cycle de vie)⁸².

81. Voir : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gazole>.

82. La *Base Carbone* de l'ADEME donne 190 gCO₂/km (en tout) pour une voiture motorisation gazole de 2018.

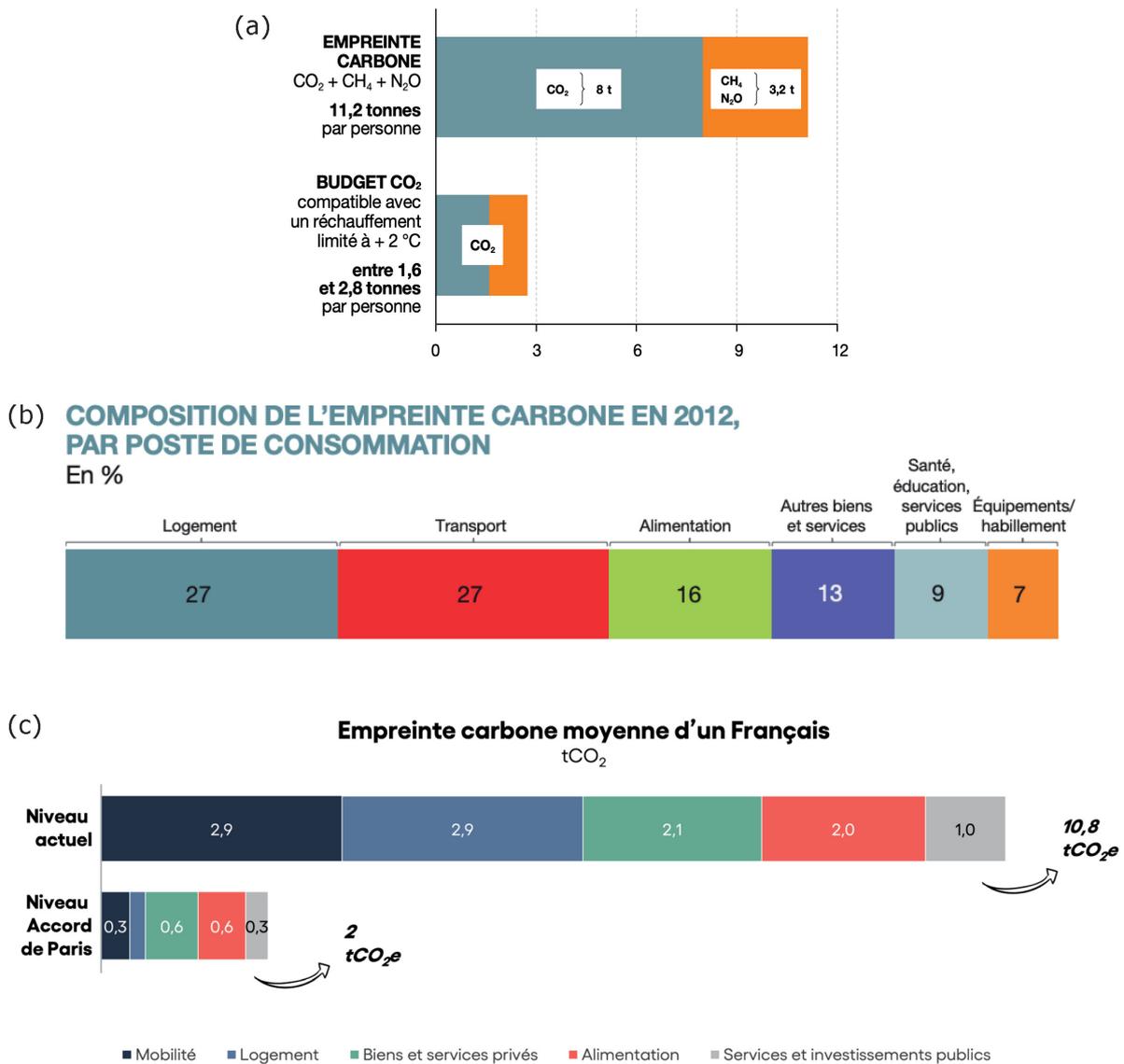


FIGURE 4.45 – L’empreinte carbone moyenne des Français-e-s. (a) Empreinte carbone des Français-e-s (métropole et départements et régions d’outre-mer) en 2018 en tCO₂ par an et par personne. Source : Service des données et études statistiques CGDD (2020b). Licence Ouverte. (b) Composition de l’empreinte carbone des Français-e-s en 2012 par poste de consommation, en relatif. Source : Service des données et études statistiques CGDD (2017). Licence Ouverte. (c) Composition de l’empreinte carbone moyenne d’un-e Français-e en tCO₂. Source : <https://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part>, voir aussi Dugast & Soyeux (2019). © Carbone 4.

Empreinte carbone des Français-e-s

L’empreinte carbone moyenne d’un-e Français-e est d’environ 11 tCO₂/an (figure 4.45 ; voir aussi Ravijen 2018). Les importations en constituent environ la moitié.

D’après le Commissariat général au développement durable (CGDD 2020b) :

L’empreinte carbone est composée des émissions directes des ménages (16 %) et des GES résultant de la fabrication des biens et services qu’ils consomment (84 %). Les émissions directes des ménages correspondent aux GES provenant de la consommation de carburant de leurs véhicules et des combustibles (gaz et fioul) brûlés dans les chaudières des logements.

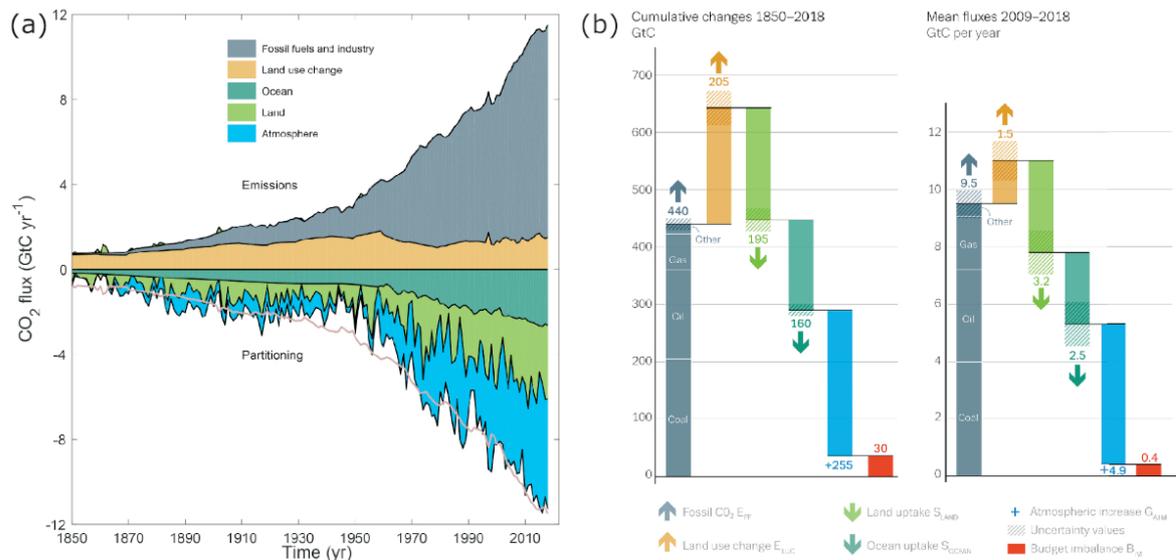


FIGURE 4.46 – Représentation des flux anthropiques de carbone. (a) Les émissions anthropiques annuelles de CO₂ par la combustion des ressources fossiles (gris), ainsi que par le changement d'utilisation des terres, essentiellement la déforestation (brun), partitionnée entre l'atmosphère (bleu), la terre (vert) et l'océan (turquoise). La courbe rose est le reflet des émissions totales : il y a des incertitudes sur l'équilibre budgétaire. (b) Flux de carbone anthropique. À gauche, les flux cumulés sur la période 1850-2018 ; à droite les flux moyens annuels entre 2009 et 2018. D'après Friedlingstein *et al.* (2019).

Les émissions associées à la fabrication des biens et services consommés se produisent dans les usines, bureaux, commerces, établissements publics ou exploitations agricoles, localisés en France ou à l'étranger. À un produit sont associées les émissions relevant directement de la branche d'activité concernée mais également les GES résultant de la production des biens ou services intermédiaires nécessaires à la fabrication de ce produit. L'empreinte d'un produit alimentaire est ainsi constituée d'émissions directes, issues des usines agroalimentaires, et d'émissions indirectes provenant de l'agriculture, des transports, du commerce, etc. Des activités ordinaires de nos modes de vie (se déplacer, se loger, se nourrir) induisent ainsi, en amont, des émissions de GES « invisibles » pour le consommateur.

Le rapport Dugast & Soyeux (2019), du cabinet Carbone 4, montre qu'une partie (environ 20 %) des leviers sont actionnables au niveau individuel (nourriture, mobilité notamment) pour réduire notre empreinte dans l'objectif d'atteindre les 2 tCO₂ stipulées par l'Accord de Paris⁸³ pour une trajectoire à 2 °C de réchauffement.

Le flux de carbone anthropique

Entre 1750 et 2011, la combustion des carburants fossiles (charbon, gaz, pétrole) et la production de ciment ont relâché dans l'atmosphère environ 375 GtC (1375 GtCO₂). La déforestation a ajouté 180 GtC (660 GtCO₂) de plus. Sur ces 555 GtC (2035 GtCO₂), moins de la moitié (240 GtC ou 880 GtCO₂) se sont accumulés dans l'atmosphère, le reste ayant été absorbé par

83. L'Accord de Paris fait suite aux négociations tenues lors de la Conférence de Paris de 2015 (COP21). Il prévoit de contenir le réchauffement climatique *nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux pré-industriels et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C* (article 2). L'Accord de Paris exige que les « parties » fassent tous les efforts possibles par l'intermédiaire des Contributions Déterminées au Niveau national (en anglais NDC) et qu'elles augmentent ces efforts à long terme de façon constante. Ainsi, cet Accord exige notamment des pays qu'ils soumettent ces plans climat actualisés, afin de rendre compte de leurs émissions et des efforts entrepris (<https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-paris-agreement/l-accord-de-paris>). Pour l'Union européenne (et donc la France), les NDC sont d'au moins 40 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau national à l'horizon 2030 par rapport à 1990 (source : https://unfccc.int/sites/default/files/resource/151119_SNBC_publiee%20Avec%20resume.pdf).

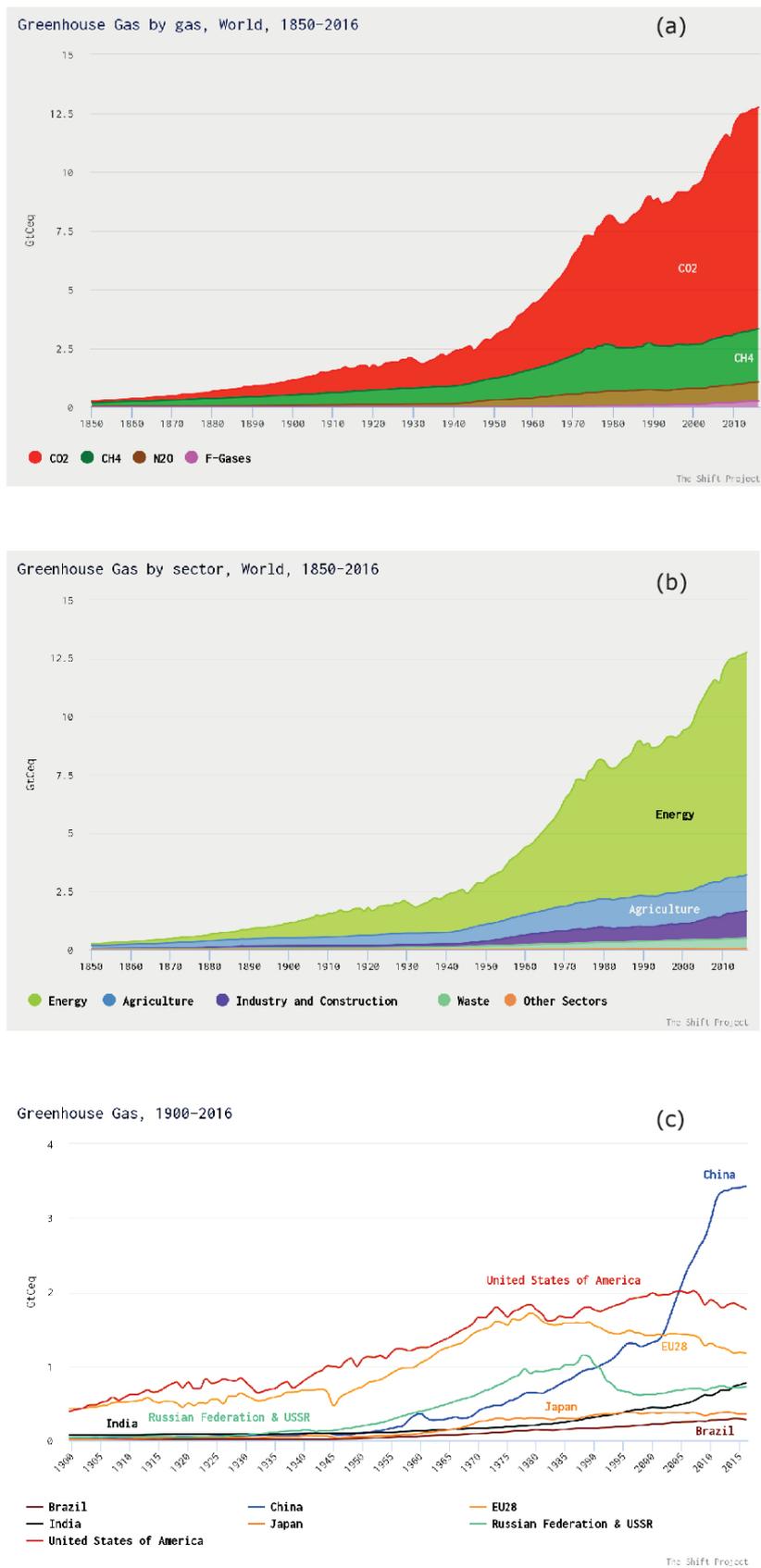


FIGURE 4.47 – Évolution des émissions annuelles de gaz à effet de serre en GtC/an. (a) Évolution des émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre par type de gaz. (b) Évolution des émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre par secteur d'émission. (c) Évolution des émissions annuelles de gaz à effet de serre pour les principales régions émettrices. Source : U.S. Energy Information Administration, <https://www.theshiftdataportal.org/>. CC BY-SA.

Région	Nombre d'habitants (millions)	BP (2019)		IEA (2019)		Rang par hab. (IEA)	Écart du total
		Total (MtCO ₂)	Par habitant (MtCO ₂ /hab.)	Total (MtCO ₂)	Par habitant (MtCO ₂ /hab.)		IEA – BP IEA
		Monde	7500	33 242,5	4,43		32 840
Chine (RP)	1386	9229,8	6,66	9257,9	6,68	35 ^e	+0,3 %
États-Unis	325,1	5014,4	15,42	4761,3	14,65	11 ^e	–5 %
Allemagne	82,5	762,6	9,24	718,8	8,71	24 ^e	–6 %
Canada	36,5	549,5	15,05	547,8	15,01	10 ^e	–0,3 %
Australie	24,6	412,3	16,76	384,6	15,63	9 ^e	–7 %
France	66,8	321,4	4,81	306,1	4,58	58 ^e	–5 %
Qatar	2,725	102,4	37,58	80,1	29,39	1 ^{er}	–28 %

TABLE 4.7 – Émissions totales et par personne de CO₂ émis par la combustion d'énergies fossiles pour l'année 2017, pour quelques pays selon deux sources, BP (BP 2019) et l'IEA (IEA 2019). Le rang des émissions par personne est tiré de https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_émissions_de_dioxyde_de_carbone_par_habitant. La dernière colonne montre l'écart relatif entre les deux références, BP et IEA.

les océans et les écosystèmes terrestres. La figure 4.46a montre les émissions annuelles de dioxyde de carbone à partir des combustibles fossiles et de la fabrication du ciment (qui nécessite une utilisation de combustibles fossiles pour chauffer le mélange de calcaire – ce qui rejette du CO₂ initialement piégé dans les carbonates – et d'argile) et de l'utilisation des terres (essentiellement la déforestation). Différents puits naturels permettent d'absorber environ la moitié de ces émissions (océans et sols). La figure 4.46b montre les flux de carbone anthropiques cumulés depuis l'ère industrielle et annuels en moyenne sur la dernière décennie : chaque année 11 GtC (40 GtCO₂) sont relâchées dans l'atmosphère, dont la moitié est absorbée par les puits de carbone que sont les océans et les sols (végétation, etc.).

L'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère en 2019 a été de $5,2 \pm 0,9$ GtC (soit une augmentation de la concentration de $2,5 \pm 0,4$ ppm), ce qui amène la concentration atmosphérique de CO₂ à un niveau de 410 ppm (Friedlingstein *et al.* 2019).

La figure 4.47 montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre depuis le milieu du XIX^e siècle. La figure 4.47a différencie l'évolution des principaux gaz, dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote. La figure 4.47b montre cette même évolution selon les secteurs d'émission, l'énergie, l'agriculture, l'industrie et la construction et les déchets. Enfin, la figure 4.47c montre l'évolution des émissions pour les sept principales régions émettrices : les pays émergents (Chine, Inde, etc.) voient leurs émissions croître fortement depuis le début des années 2000, en particulier la Chine (dont une bonne partie pour nos importations!).

En 2017, la Chine était le premier pays émetteur de CO₂ avec 28,2 % des émissions, les États-Unis sont en deuxième place avec 14,5 %. La France arrive en vingtième position avec 0,9 % des émissions⁸⁴.

Le tableau 4.7 montre les différences qui peuvent exister entre deux sources de données. Ici pour les émissions totales de CO₂ *a priori* selon le même périmètre (CO₂ uniquement émis par la combustion des énergies fossiles) pour différents pays, pour l'année 2017. On donne également l'écart relatif entre les deux références, qui peut aller jusqu'à près de 30 %!

84. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_%C3%A9missions_de_dioxyde_de_carbone.

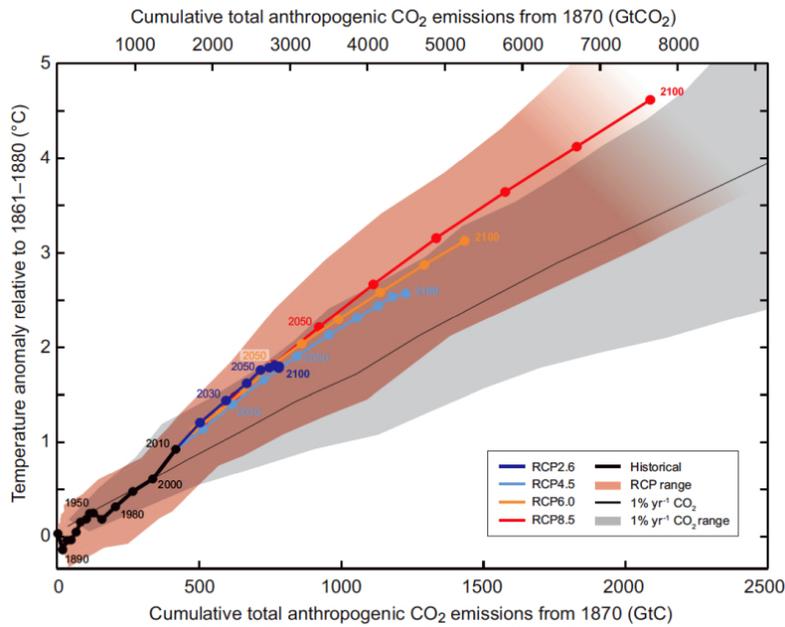


FIGURE 4.48 – Augmentation de la température moyenne à la surface du globe en fonction des émissions totales cumulées de CO₂ à l'échelle mondiale, selon diverses sources de données. Les résultats d'une série de modèles de cycle climat-carbone pour chaque RCP (correspondant à divers forçages radiatifs) jusqu'en 2100 sont présentés avec des lignes colorées et des moyennes décennales (points). Les résultats du modèle sur la période historique (1860 à 2010) sont indiqués en noir. Le panache coloré illustre l'étalement des modèles sur les quatre scénarios RCP. Source : GIEC (2013), p. 28. © Intergovernmental Panel on Climate Change.

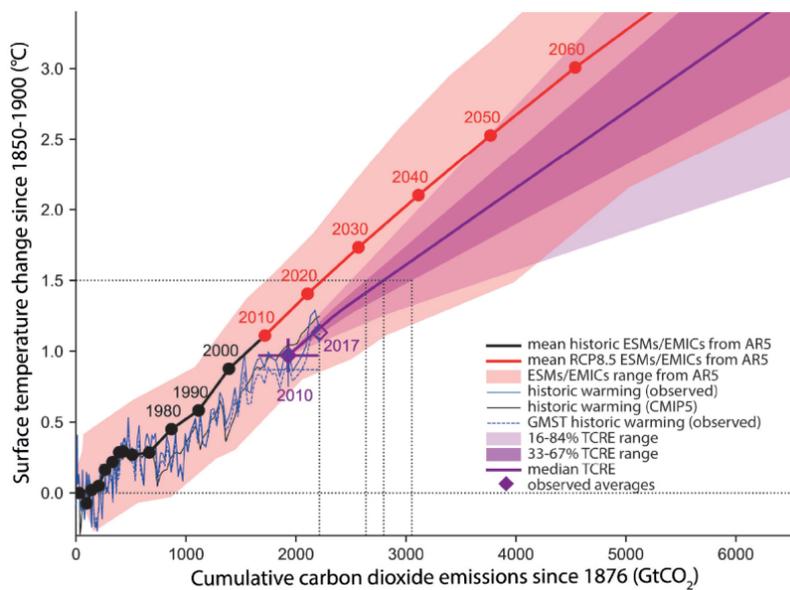


FIGURE 4.49 – Évolution des températures par rapport à la période 1850-1900 en fonction des émissions cumulées de CO₂ depuis le 1^{er} janvier 1876. La ligne avec les points montre la température moyenne de l'air proche de la surface en réponse aux émissions cumulées de CO₂ et autres forçages. La courbe noire correspond aux observations historiques tandis que la courbe rouge correspond au scénario RCP8.5 du rapport AR5 (GIEC 2013). La courbe violette correspond à la réponse en température par rapport au CO₂ accumulé du rapport SR15 (GIEC 2018). Source : GIEC (2018), p. 105. © Intergovernmental Panel on Climate Change.

4.5.4 Ce qu'il reste à émettre

Cette section est basée sur Treiner (2015). La figure 4.48 montre l'anomalie de température en fonction de la quantité totale de dioxyde de carbone émise pour les différents scénarios (voir §3.5, p. 134) du 5^e rapport du GIEC (GIEC 2013). La courbe en violet (RCP2.6), correspondant à la trajectoire la plus optimiste, se termine en 2100 avec une pente nulle, indiquant une stabilisation de l'anomalie de température un peu en-dessous de 2 °C. Les autres courbes, pour les autres scénarios, se terminent avec des pentes positives en 2100, la température continue d'augmenter...

Le scénario RCP2.6 correspond ainsi à une émission totale d'environ 800 GtC (soit environ 3000 GtCO₂). Fin 2018, nous en étions à environ 625 GtC (2300 GtCO₂), et environ 635 GtC (2330 GtCO₂) fin 2019 (voir §3.3.3). Il reste donc environ 165 GtC (605 GtCO₂) à émettre. Au rythme actuel de 11 GtC/an, cela représente 15 ans.

Le scénario « optimiste » n'est, de fait, plus d'actualité. Le rapport « 1,5 °C » du GIEC de 2018 (GIEC 2018) évoque le scénario RCP8.5, la trajectoire suivie y étant parallèle sur une figure donnant l'anomalie de température en fonction de la quantité de CO₂ émise (figure 4.49). La quantité de 800 GtC ou 2930 GtCO₂ évoquée correspond à 1,5 °C de réchauffement (courbe violette).

La figure 4.50c montre la corrélation entre l'anomalie de température et la concentration en CO₂ dans l'atmosphère entre 1976 et 2019 pour trois jeux de données de température. La moyenne des pentes des ajustements linéaires, pondérée par le coefficient de corrélation est de 0,013 °C/ppm. Comme la concentration en CO₂ augmente de 2 ppm/an, cela fait 0,026 °C/an, soit 0,24 °C par décennie. Soit à peu près les valeurs du GIEC (voir §3.3.8).

En recalibrant l'ordonnée à l'origine pour que l'anomalie de température ΔT soit actuellement de 1,1 °C pour une concentration $C_{\text{CO}_2} = 410$ ppm, on obtient :

$$\Delta T = 0,013 \times C_{\text{CO}_2} - 4,23$$

Cette relation ne fonctionne pas pour le début du XX^e siècle, la valeur de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère avant l'ère industrielle, 280 ppm, ne donne pas $\Delta T = 0$ °C. L'augmentation de la concentration en CO₂ ne se fait pas de façon linéaire depuis le début. Elle augmente régulièrement (figure 4.51).

Au rythme actuel, nous serons à +1,5 °C pour 441 ppm, soit dans 15 ans. Et à + 5 °C pour 710 ppm, donc dans 150 ans.

Pour mémoire, un écart de 5 °C (en moins), c'est ce qui nous sépare de la dernière glaciation⁸⁵ (dite de « Würm ») il y a 20 000 ans. Une calotte polaire descendait alors jusqu'au milieu de l'Angleterre, et l'ensemble des Alpes gisait sous une gangue de glace (figure 4.52). Le niveau des mers était 120 m plus bas qu'actuellement, l'Angleterre n'était pas une île. On peut ainsi imaginer ce que pourrait être l'inverse (+ 5 °C), à la différence près que le réchauffement d'environ 5 °C entre la dernière glaciation et la période tempérée actuelle s'est produit sur une échelle de temps de l'ordre de 10 000 ans ; actuellement, c'est de l'ordre de 200 à 300 ans, soit 30 fois plus rapidement.

85. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Dernière_période_glaciaire.

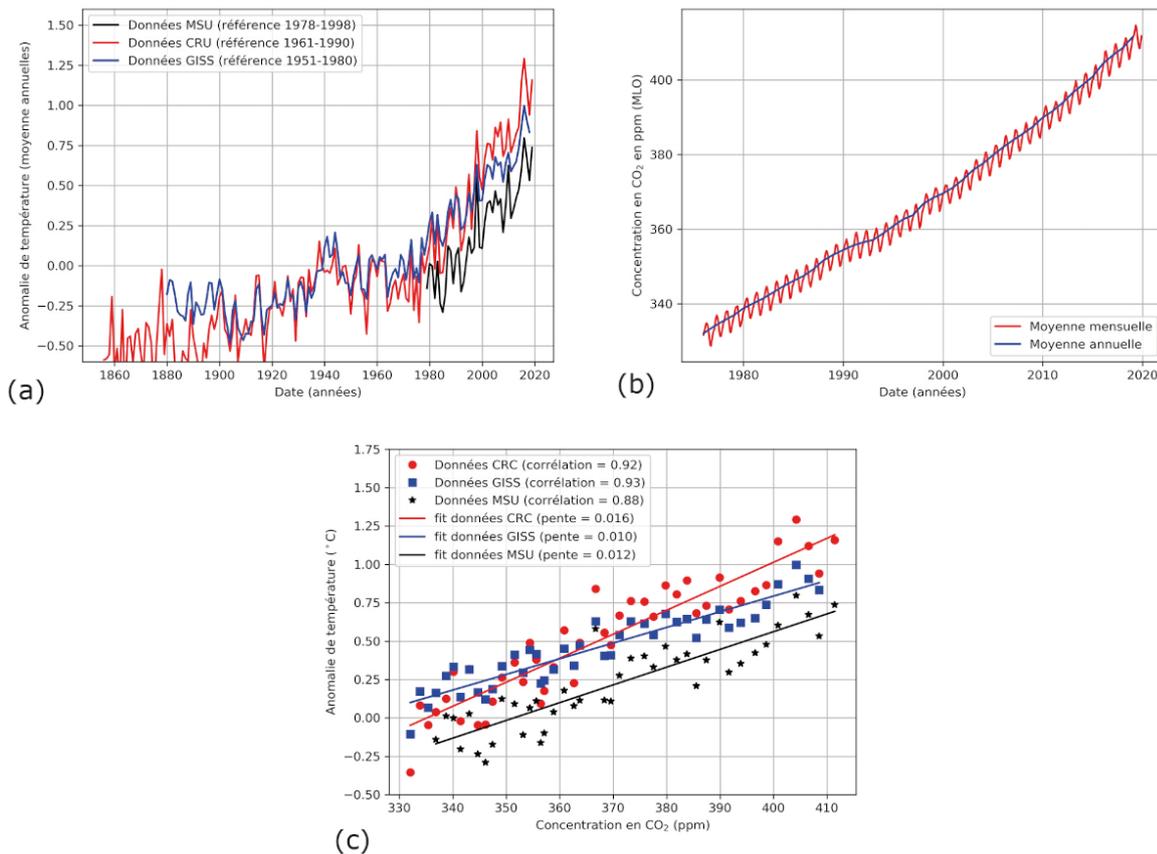


FIGURE 4.50 – Corrélation entre l’anomalie de température et la proportion de CO₂ dans l’atmosphère. (a) Anomalie de température de la basse atmosphère entre 1860 et 2019 pour trois jeux de données : CRC (*Climate Research Unit*) de l’université d’East Anglia (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/crutem4/data/diagnostics/global/nh+sh/index.html>), MSU (Satellite micro-onde – *Microwave Sounding Unit* – http://data.remss.com/msu/monthly_time_series/) et GISS (NASA Goddard Institute for Space Studies : https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/). Le décalage vertical est dû aux différentes périodes de référence. (b) Concentration en CO₂ dans l’atmosphère mesurée à l’observatoire du Mauna Loa (MLO, Hawaï). Les oscillations observées sont des cycles saisonniers été-hiver reliés à la photosynthèse et à la respiration de la végétation. La photosynthèse est particulièrement active durant l’été (consommant le CO₂), la respiration plus importante durant l’hiver (rejetant du CO₂). Données issues de : https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/index.php?category=Greenhouse%2BGases¶meter_name=Carbon%2BDioxide&site=MLO (c) Corrélation et ajustement linéaire entre l’anomalie de température et la concentration en CO₂ pour les trois jeux de données pour la période 1976-2019.

4.6 La transition énergétique

La transition énergétique est une modification structurelle profonde de la société, visant à changer les modes de consommation de l’énergie afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il existe différents scénarios plus ou moins réalistes d’un point de vue physique. Au vu de ce qui précède, réduire drastiquement la part des énergies carbonées doit constituer un objectif majeur pour les sociétés dès à présent. Plusieurs trajectoires sont envisageables pour y parvenir. Elles sont éminemment politiques (selon l’objectif de société souhaité), la science peut seulement évaluer leur faisabilité compte tenu des flux physiques. Les quelques notions abordées jusqu’ici devraient fournir les outils pour s’en faire une idée objective.

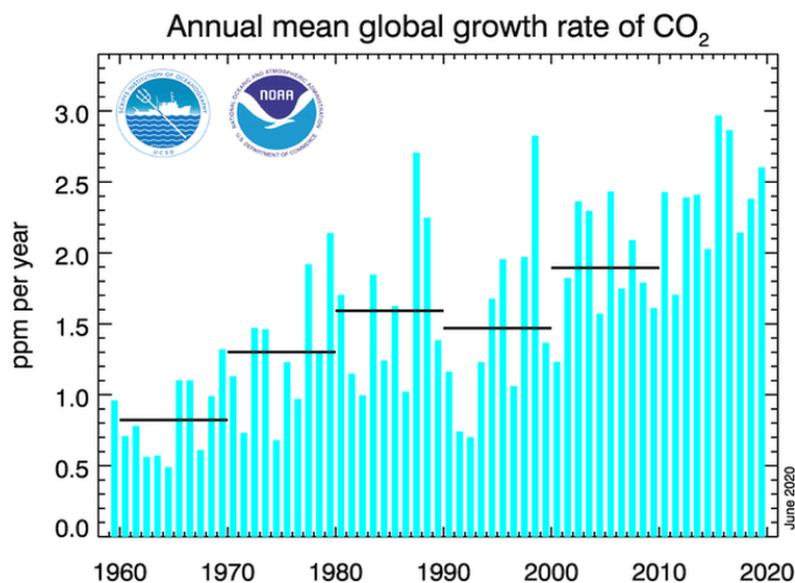


FIGURE 4.51 – Évolution du taux de croissance annuel de la concentration en CO₂. Source : National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratories / Global Monitoring Laboratory, https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_gr.html.

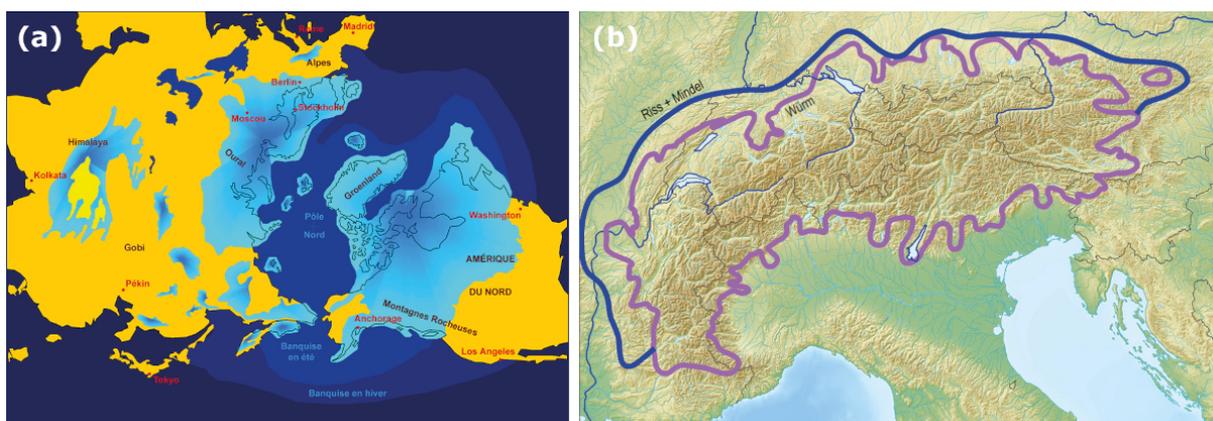


FIGURE 4.52 – Extension des glaciers lors de la dernière glaciation. (a) Extension des inland-sis dans l'hémisphère nord lors de la dernière glaciation. Source : Wikipedia/Hannes Grobe, https://fr.wikipedia.org/wiki/Dernière_période_glaciaire. CC BY-SA. (b) Les Alpes Nord-occidentales au dernier maximum glaciaire (Würm). Source : Wikipédia/Jo Weber, https://fr.wikipedia.org/wiki/Glaciation_de_Riss. CC BY-SA.

Compte tenu de l'état de la planète (outre la crise climatique, l'humanité doit faire face à un effondrement de la biodiversité, à de multiples pollutions, etc.), la transition énergétique n'est qu'un aspect des diverses modifications qui attendent nos sociétés, de gré (en anticipant du mieux possible les changements pour nous y préparer) ou de force (en nous adaptant en temps réel quand les crises seront ancrées dans nos quotidiens), dans les décennies à venir.

Chapitre 5

Ondes électromagnétiques et santé

BLANC Guillaume & Noûs Camille, Ondes électromagnétiques et santé, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.d2f159>



L'objectif de ce chapitre est de comprendre comment les ondes électromagnétiques non ionisantes interagissent avec la matière et avec le corps humain, pour faire le point sur les risques pour la santé.

5.1 Rappels de physique des ondes électromagnétiques

5.1.1 Équations de Maxwell dans le vide en régime variable

Les équations de Maxwell (élaborées entre 1865 et 1884) synthétisent les découvertes expérimentales en électricité et magnétisme depuis le début du XIX^e siècle. Elle font également le lien entre les sources du champ électromagnétique (distributions de charges et de courants) et le champ lui-même qui est une combinaison des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} .

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (5.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (5.4)$$

où :

\vec{E} est le champ électrique ;

\vec{B} est le champ magnétique ;

ρ est la densité volumique de charge ;

ε_0 est la permittivité diélectrique du vide ;

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ;

\vec{j} est la densité de courant électrique.

Les deux premières équations traduisent les propriétés intrinsèques du champ électromagnétique. Les deux suivantes expriment le lien entre les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} et leurs sources respectives, les charges électriques ρ et le courant électrique \vec{j} .

5.1.2 Équation de propagation d'une onde

L'équation de propagation des ondes ou équation de d'Alembert (à une dimension), pour une grandeur scalaire $s(x, t)$, s'écrit :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0 \quad (5.5)$$

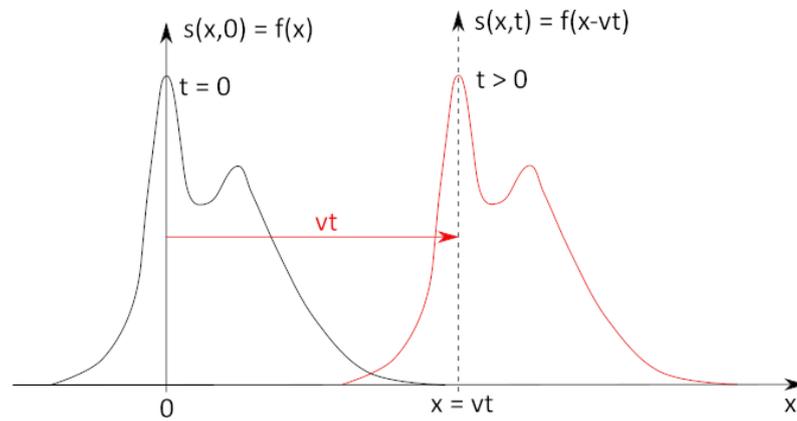


FIGURE 5.1 – Illustration de la propagation d’une onde progressive. Le profil à $t = 0$ est dessiné en noir. Au bout d’une durée t , le profil (en rouge) s’est traduit dans la direction des x croissants d’une distance vt .

Une solution générale de cette équation peut s’écrire :

$$s(x, t) = f\left(t - \frac{x}{v}\right) + g\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (5.6)$$

$f\left(t - \frac{x}{v}\right)$ représente une onde progressive, c’est-à-dire qui se déplace vers les x croissants. En effet, pour une valeur $t - \frac{x}{v}$ constante, lorsque t augmente, il faut que x augmente également (figure 5.1). Inversement, $g\left(t + \frac{x}{v}\right)$ représente une onde régressive, se propageant vers les x décroissants.

Une perturbation (dans le temps) – c’est-à-dire une petite variation – du champ électrique \vec{E} engendre une perturbation du champ magnétique \vec{B} , qui engendre à son tour une perturbation du champ \vec{E} : une perturbation du champ électromagnétique (\vec{E} , \vec{B}) se propage ainsi de proche en proche.

De fait, le champ électrique et le champ magnétique vérifient l’équation de propagation des ondes :

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{et} \quad \nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (5.7)$$

où c est la vitesse de propagation de l’onde :

$$c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2} \quad (5.8)$$

qui n’est autre que la vitesse de la lumière dans le vide : $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette relation traduit le lien entre électricité, magnétisme et vitesse de la lumière.

Les équations de Maxwell permettent de montrer que l’on a un couplage entre les deux champs, électrique et magnétique :

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{u} \wedge \vec{E} \quad (5.9)$$

et :

$$\vec{E} = -c \vec{u} \wedge \vec{B} \quad (5.10)$$

où \vec{u} est le vecteur unitaire de la direction de propagation de l’onde électromagnétique.

5.1.3 Énergie d’une onde électromagnétique

La puissance rayonnée par un champ électromagnétique à travers une surface fermée S est donnée par :

$$\mathcal{P}_{\text{rayonnée}} = \oiint_S \vec{\Pi} \cdot d\vec{S} \quad (5.11)$$

où $\vec{\Pi}$ est le vecteur de Poynting dont l'expression est :

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (5.12)$$

Par ailleurs, la densité volumique d'énergie électromagnétique est donnée par :

$$w = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (5.13)$$

5.1.4 Spectre électromagnétique

Le tableau 5.1 montre les différents domaines du spectre électromagnétique avec les domaines de fréquences, de longueurs d'onde et d'énergie des photons correspondants.

Voici quelques fréquences pour divers appareils et technologies d'utilisation courante :

- Lignes très haute tension : 50 Hz
- Appareils électroménagers : 50 Hz
- Wifi : 2,4 GHz et 5 GHz
- Téléphonie mobile (téléphone et antennes relais) : 2G = 900 MHz et 1800 MHz, 3G = 2100 MHz et 900 MHz, 4G = 2600 MHz et 800 MHz, 5G = 3,5 GHz et 26 GHz en plus des fréquences de la 2G, de la 3G et de la 4G
- Radio FM : 100 MHz
- Four à micro-ondes : 2,4 GHz

5.2 Antennes : l'émission des ondes électromagnétiques

5.2.1 Dipôle oscillant

Considérons une charge électrique ponctuelle $-q$ fixe à l'origine O des coordonnées, et une charge $+q$ qui se déplace sur l'axe Oz avec un mouvement rectiligne sinusoïdal de pulsation ω : $z(t) = z_0 \cos(\omega t)$. On a ainsi un dipôle électrique oscillant de moment dipolaire $\vec{p} = q z(t) \vec{e}_z$.

Dans la région de l'espace où $r \gg \lambda = 2\pi c/\omega$, on montre que les champs \vec{E} et \vec{B} s'écrivent :

$$\vec{E}(r) = -\frac{\omega^2 \mu_0 q z_0 \sin \theta}{4\pi r} \cos\left[\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right] \vec{e}_\theta \quad (5.14)$$

$$\vec{B}(r) = \vec{e}_r \wedge \frac{\vec{E}(r)}{c} \propto \vec{e}_\varphi \quad (5.15)$$

où (r, θ, φ) sont les coordonnées sphériques et $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ est le trièdre de vecteurs unitaires des coordonnées sphériques.

On obtient ainsi une onde électromagnétique qui se propage perpendiculairement au plan $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$, donc dans la direction radiale selon \vec{e}_r . L'amplitude des deux champs électrique et magnétique décroît comme $1/r$. Les champs \vec{E} et \vec{B} sont orthogonaux, dans le plan $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$, perpendiculaires à la direction de propagation. Le champ électromagnétique a *localement* une structure d'onde plane progressive. Il rayonne de manière *anisotrope*, avec une forme dans l'espace selon $\sin \theta$, donc avec une amplitude nulle selon l'axe du dipôle et maximale dans la direction perpendiculaire : il s'agit du « lobe de rayonnement ». Ce modèle du dipôle oscillant rayonnant un champ électromagnétique représente le principe de base de l'émission par une antenne.

Désignation	Fréquence	Longueur d'onde	Énergie	Applications
Non ionisant				
Fréquences extrêmement basses (ELF)	0–300 Hz	10^5 – 10^3 km	12,4 feV – 1,24 peV	Réseau électrique 50 Hz, électroménager
Fréquences audio (VF)	0,3–3 kHz	1000–100 km	1,24–12,4 peV	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction
Très basses fréquences (VLF)	3–30 kHz	100–10 km	12,4–124 peV	Radiocommunications
Basses fréquences (LF)	30–300 kHz	10–1 km	0,124–1,24 neV	Radiodiffusion GO, fours à induction, plaques à induction
Fréquences moyennes (MF)	0,3–3 MHz	1 km – 100 m	0,124–12,4 neV	Radiodiffusion MO, PO, diathermie médicale
Hautes fréquences (HF)	3–30 MHz	100–10 m	12,4–124 neV	CB (<i>citizen band</i> - 27 MHz), soudure, collage
Très hautes fréquences (VHF)	30–300 MHz	10–1 m	0,124–1,24 μ eV	Télévision, radio FM
Fréquences ultrahautes (UHF)	0,3–3 GHz	1–0,1 m	1,24–12,4 μ eV	Télévision, radars, téléphonie mobile, fours à micro-ondes (2,4 GHz), hyperthermie médicale
Fréquences superhautes (SHF)	3–30 GHz	100–10 cm	12,4–124 μ eV	Radars, alarmes anti-intrusion
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30–300 GHz	10–1 cm	0,124–1,24 meV	Radars, communications par satellite, scanner corporel
Infrarouge (IR)	0,3–385 THz	1 mm – 780 nm	1,24 meV – 1,6 eV	Spectrométrie IR, chauffage
Visible	385–750 THz	780–400 nm	1,6–3,1 eV	Vision humaine, photosynthèse
Ionisant				
Ultraviolet (UV)	750 THz – 3 PHz	400–100 nm	3,1–12,4 eV	Lampes germicides, solarium
Rayon X	3 PHz – 30 EHz	100 nm – 10 pm	12,4 eV – 124 MeV	Radiographie, cristallographie
Rayon γ	> 30 EHz	< 10 pm	> 124 MeV	Radioactivité, gammagraphie (bâtiment)

TABLE 5.1 – Les différents domaines du spectre électromagnétique.

5.2.2 Puissance rayonnée par un dipôle oscillant

Avec les expressions des deux champs rayonnés (5.15), le vecteur de Poynting (5.12) s'écrit :

$$\vec{\Pi} = \frac{E^2}{\mu_0 c} \vec{e}_r \quad (5.16)$$

La densité surfacique de puissance moyenne rayonnée est donnée par :

$$\frac{dP}{dS} = \left\langle \|\vec{\Pi}\| \right\rangle_t = \frac{(qz_0)^2}{32\pi^2 \varepsilon_0} \frac{\omega^4}{c^3} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \quad (5.17)$$

soit :

$$\frac{dP}{dS} \propto \frac{1}{\lambda^4} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \quad (5.18)$$

Donc :

- la puissance surfacique décroît en $1/r^2$;
- elle varie en ω^4 (*i.e.* en $1/\lambda^4$), ce qui permet d'expliquer le bleu du ciel (sous l'action du champ électrique du rayonnement solaire, les électrons des atomes de l'atmosphère oscillent comme un *dipôle*).

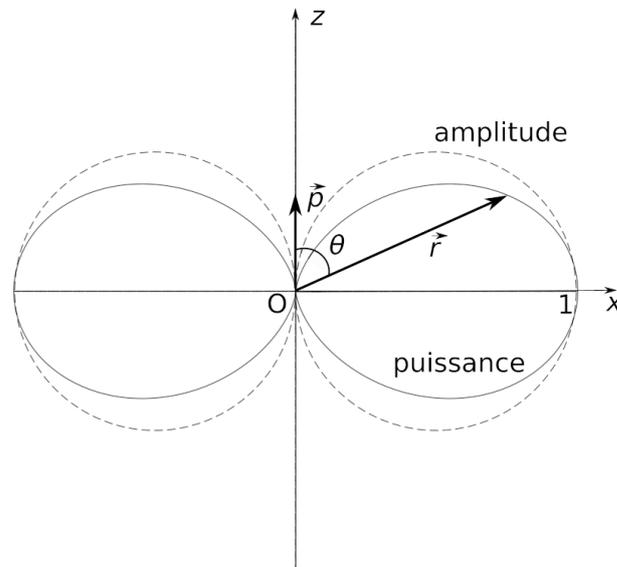


FIGURE 5.2 – Diagramme de rayonnement (distribution angulaire) d'un dipôle situé sur l'axe Oz , de moment dipolaire \vec{p} . L'amplitude est en $\sin \theta$ et représentée en traits tiretés; la puissance est en $\sin^2 \theta$ et représentée en trait plein. Il y a une symétrie de révolution autour de l'axe Oz .

5.2.3 Principe de fonctionnement d'une antenne

Un courant sinusoïdal dans un conducteur engendre un déplacement de charges (les électrons) selon le modèle précédent du dipôle. Un conducteur dans lequel circule un tel courant va donc rayonner un champ électromagnétique. On a ainsi un *émetteur*.

Inversement, un champ électromagnétique qui rencontre un conducteur va induire un déplacement de charges à l'intérieur de celui-ci, et donc un courant. On a donc un *récepteur*.

Il existe une multitude d'antennes en fonction de la fréquence du signal que l'on souhaite émettre, et de la directivité que l'on souhaite : *une antenne isotrope est un objet idéal qui n'existe pas en pratique*.

La figure 5.2 montre la distribution angulaire (diagramme de rayonnement) de l'intensité et de la puissance du rayonnement d'un dipôle.

5.2.4 Exemple de l'antenne relais de la téléphonie mobile

Les antennes relais de la téléphonie mobile quadrillent désormais le territoire¹. Elles ressemblent à celles présentées en figure 5.3.

La figure 5.4 montre le résultat d'une simulation numérique pour la puissance émise et le champ électrique d'une antenne relais de la téléphonie mobile, située sur le toit d'un immeuble. La figure 5.4b montre qu'à l'intérieur des bâtiments la puissance est atténuée d'environ -60 dBm², soit un facteur $\sim 10^6$, obtenu essentiellement par la disposition géométrique³. Au niveau du sol, 13 m sous l'antenne, les réflexions multiples sur les façades font que la

1. La localisation et les caractéristiques techniques de chaque antenne peuvent être consultées sur le site de l'Agence Nationale des Fréquences : <https://www.cartoradio.fr> ou sur <https://www.antennesmobiles.fr/> pour une présentation différente des mêmes données.

2. dBm est le rapport de puissances en décibels mesurées en mW :

$$x \text{ dBm} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$$

Donc 0 dBm correspond à une puissance de 1 mW.

3. La simulation considère des bâtiments aux murs de béton de 75 cm d'épaisseur, présentant une atténuation de 13 dB sous incidence normale à 900 MHz.

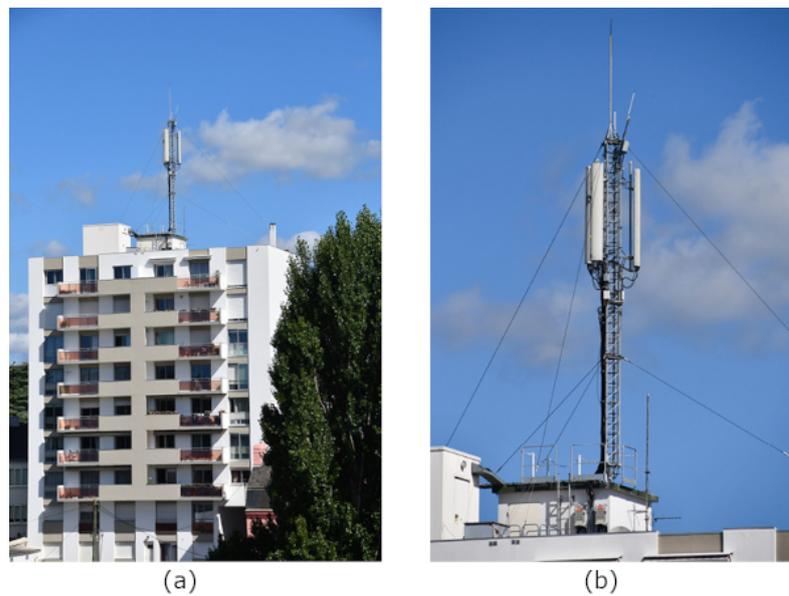


FIGURE 5.3 – Photos d'une antenne relais de téléphonie mobile sur le toit d'un immeuble. Antenne de l'opérateur Orange à Lorient. (a) Antenne relais de téléphonie mobile sur le toit d'un immeuble. (b) Gros plan. Crédit photos : Guillaume Blanc.

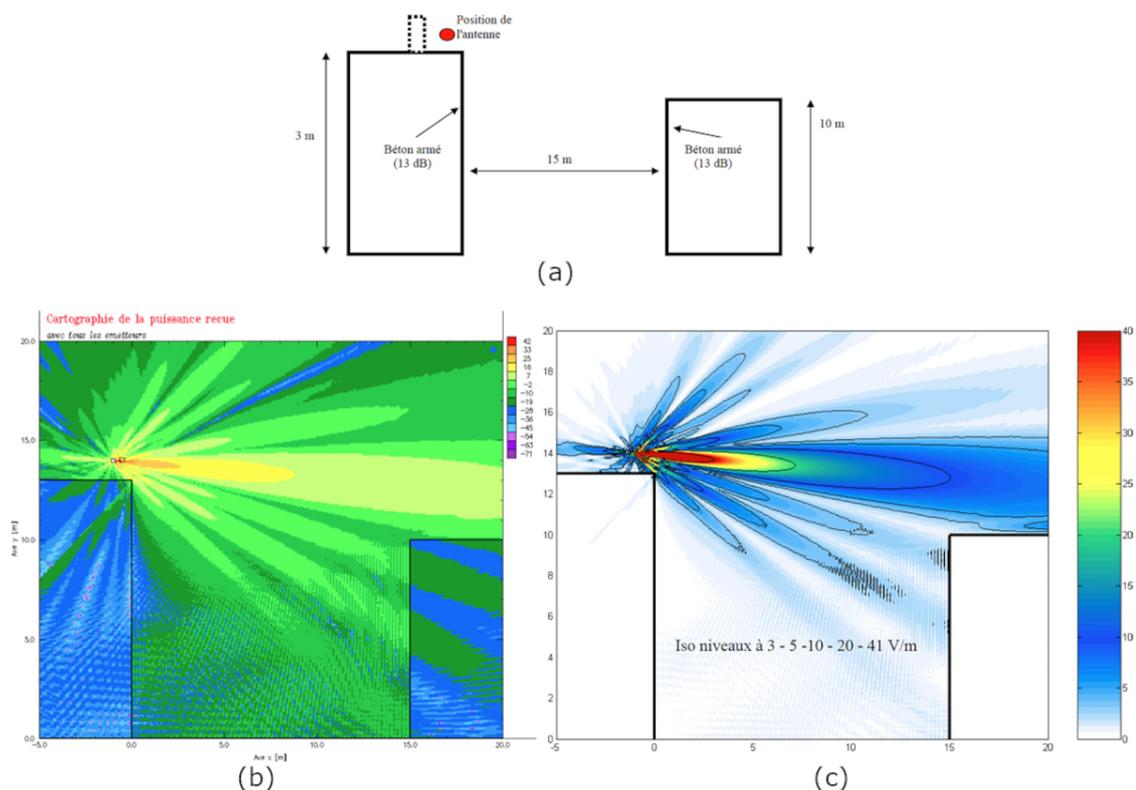


FIGURE 5.4 – Simulation de la carte d'émission d'une antenne relais placée sur le toit d'un immeuble. (a) Configuration géométrique de la simulation. (b) Simulation de la carte de puissance reçue. La puissance est exprimée en décibels (dBm), où $x \text{ dBm} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$. La puissance de l'antenne est de 43 dBm, soit 20 W. On note que 7 dBm = 5 mW. (c) Simulation de la carte du champ électrique. Tiré de Penneç (2001). © ANFR.

puissance est quasiment uniforme de l'ordre de -10 dBm, soit une réduction de -53 dBm par rapport à la source (facteur $\sim 10^5$ soit $0,2$ mW!). Compte tenu du caractère directionnel de l'émission d'une antenne (lobe), le bâtiment situé *sous* l'antenne reçoit un rayonnement négligeable.

Les valeurs limites d'exposition du public dans la réglementation française⁴ sont de :

- 36 V/m à 700 MHz (téléphonie mobile 4G)
- 39 V/m à 800 MHz (téléphonie mobile 4G)
- 41 V/m à 900 MHz (téléphonie mobile 2G et 3G)
- 58 V/m à 1800 MHz (téléphonie mobile 2G et 4G)
- 61 V/m à 2100 MHz (téléphonie mobile 3G)
- 61 V/m à 2600 MHz (téléphonie mobile 4G)
- 28 V/m pour un émetteur de radiodiffusion
- 31 à 41 V/m pour un émetteur de télédiffusion

Le diagramme d'émission de la figure 5.4c montre que, dans ce cas précis, la réglementation est respectée même à proximité immédiate de l'antenne, dans le cas d'une antenne relais.

5.3 Interaction des ondes électromagnétiques avec la matière

5.3.1 Champ proche et champ lointain

À proximité immédiate d'une antenne ou d'une source d'ondes électromagnétiques, la structure du champ est compliquée, c'est pourquoi on se place généralement dans « l'approximation de champ lointain », ce qui permet de faciliter les calculs. C'est-à-dire pour une distance d :

$$d > \frac{\lambda^2}{2A} \quad (5.19)$$

où λ est la longueur d'onde et A est la taille de l'antenne. Dans la plupart des cas, cette approximation est valable; sauf dans le cas des téléphones mobiles quand ils sont proches de l'oreille... La modélisation étant délicate, on effectue alors des mesures.

5.3.2 Interaction avec les matériaux

Dans les matériaux électriquement isolants, la pénétration des ondes électromagnétiques dépend de la nature du matériau et de la longueur d'onde. Leur atténuation, en fonction de l'épaisseur, est donnée par :

$$\text{Atténuation} = \exp\left(-\frac{\pi \times \text{épaisseur} \times f \times \tan(\delta)}{c\sqrt{\epsilon_r}}\right) \quad (5.20)$$

où δ est l'angle de perte, caractéristique diélectrique des matériaux isolants, ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du matériau⁵, c est la vitesse de la lumière et f la fréquence de l'onde incidente. En pratique les ondes électromagnétiques sont très peu absorbées par les matériaux rencontrés dans les bâtiments (pierre, béton...). De plus, une partie de l'onde est réfléchie, et une partie est transmise, avec les coefficients de réflexion R et de transmission T :

$$R = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{et} \quad T = 1 - R \quad (5.21)$$

4. Voir : <http://www.radiofrequences.gouv.fr/fixer-des-limites-d-exposition-a92.html>.

5. La permittivité ϵ d'un matériau quantifie sa réponse à un champ électrique. Elle dépend du matériau et des caractéristiques du champ électrique. Elle est exprimée relativement à la permittivité du vide, ϵ_0 qui est une constante : $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ selon : $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$. ϵ_r est la permittivité relative du matériau, sans unité. Elle vaut 1 pour le vide (par définition), 2,1 pour du téflon, 5 pour du verre et du PVC, 78 pour de l'eau distillée à basses fréquences.

Les matériaux électriquement conducteurs sont imperméables aux ondes électromagnétiques (qui ont une très faible pénétration, l'« épaisseur de peau » δ ; attention c'est un autre « δ » que l'angle de perte des matériaux isolants!); on peut ainsi écranter un champ électromagnétique. Dans ces matériaux, l'atténuation \mathcal{A} des ondes est donnée par :

$$\mathcal{A} = e^{-\frac{d}{\delta}} \quad \text{avec} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} \quad (5.22)$$

où d est la distance à partir de l'interface, δ l'épaisseur de peau, f la fréquence, μ la perméabilité du matériau⁶, σ sa conductivité électrique. Les hautes fréquences pénètrent peu à l'intérieur des conducteurs (pour le cuivre, $\delta = 9,38$ mm à 50 Hz et $\delta = 2,1$ μm à 1 GHz).

Les matériaux étanches aux ondes radio sont ainsi essentiellement les métaux. La cage de Faraday est une enceinte métallique dont les parois atténuent fortement les ondes. Pour les basses fréquences, les parois sont pleines car l'atténuation dépend de l'épaisseur du métal (et de sa conductivité électrique) ainsi que de la fréquence des ondes. Pour les hautes fréquences un grillage suffit, dont la taille de la maille doit être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Par exemple, le four à micro-ondes est entouré d'une cage métallique, qui est grillagée sur la porte, afin de pouvoir « voir » à l'intérieur ($\lambda = 12$ cm, grille avec une maille de 1 mm).

5.3.3 Interaction avec la matière vivante

Ordres de grandeurs énergétiques

Les transitions énergétiques entre états quantifiés des atomes et molécules suite à l'absorption d'un photon induisent différents effets selon l'énergie du photon E_γ .

L'énergie d'ionisation d'un atome ou d'une molécule neutre est l'énergie qu'il faut lui fournir pour arracher l'électron le moins lié (première ionisation), ce qui forme ainsi un ion positif. L'énergie de première ionisation⁷ la plus élevée est celle de l'hélium, 24,6 eV, la plus basse est celle du césium, 3,9 eV. Celle de l'hydrogène est de 13,6 eV, celle du carbone est de 11,3 eV. L'énergie d'ionisation s'exprime également en joule par mole ($1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} = 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$).

Ces énergies correspondent à des longueurs d'onde lumineuses telles que : $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, où $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck, ν est la fréquence de l'onde lumineuse correspondante et λ sa longueur d'onde, enfin $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide. Donc :

$$\lambda = \frac{hc}{E_\gamma} \quad (5.23)$$

Pour des énergies de l'ordre de 10 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), on obtient :

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 299\,792\,458}{10 \times 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 120 \text{ nm} \quad (5.24)$$

Il s'agit du domaine électromagnétique des ultraviolets.

6. La perméabilité magnétique d'un matériau caractérise sa réponse à un champ magnétique. Elle s'exprime comme le produit d'une perméabilité relative μ_r , sans dimension, dont la valeur dépend du matériau, et de la perméabilité du vide, μ_0 , constante, qui vaut $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

7. Voir la table des énergies d'ionisation : https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_d'ionisation#Valeurs_numériques_des_énergies_d'ionisation

L'énergie de la liaison covalente est l'énergie qu'il faut fournir pour briser une liaison chimique entre deux atomes. Une liaison covalente est une liaison chimique dans laquelle deux atomes se partagent une à trois paires d'électrons. La matière vivante est essentiellement formée de carbone (et d'hydrogène), avec des liaisons covalentes simples de type C – C ou C – H. L'énergie de liaison est généralement donnée sous la forme d'enthalpie de liaison, à savoir l'énergie requise pour briser (ou former) la liaison à pression extérieure constante. La liaison C – H nécessite ainsi $413 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (soit 4,3 eV) pour être détruite⁸ tandis que la liaison C – C a besoin de $348 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (soit 3,6 eV); une triple liaison C \equiv C nécessite $839 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ pour être détruite.

Ces énergies correspondent à des longueurs d'onde de 280 à 330 nm, donc au domaine des ultraviolets.

Les liaisons de type hydrogène impliquant des atomes d'hydrogène et des atomes tels que l'oxygène, l'azote ou le fluor sont des liaisons intermoléculaires (comme par exemple dans l'eau) plus fragiles que les liaisons covalentes avec des énergies de liaison entre 0,04 eV et 1,7 eV. Cela correspond à respectivement $30 \mu\text{m}$ (infrarouge) à 690 nm (visible).

Les liaisons de type Van der Waals sont des interactions électrostatiques entre atomes ou molécules dont l'énergie de liaison est typiquement entre 4 (300 μm) et 40 meV (30 μm), donc dans l'infrarouge lointain et le submillimétrique.

Les énergies plus basses de 1 à 10 meV correspondent au domaine électromagnétique du millimétrique. Elles mettent en jeu les excitations des niveaux quantiques vibrationnels et rotationnels des molécules.

Pour les photons d'énergie plus faible (mais de haute fréquence $> 10 \text{ MHz}$ – radiofréquences), on constate un effet Joule (effet thermique) dû à l'agitation des charges et des dipôles au passage de l'onde.

Pour les basses fréquences ($< 100 \text{ kHz}$), le champ électrique est très fortement atténué en pénétrant dans le corps humain qui fait cage de Faraday (facteur d'atténuation de $\sim 25\,000\,000$); le champ magnétique associé génère des courants induits (densité de courant qui s'exprime en $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$).

Pour les fréquences intermédiaires [100 kHz, 10 MHz], il y a coexistence des deux effets.

Le débit d'absorption spécifique (DAS)

Pour les ondes de fréquence supérieure à 100 kHz, typiquement, la puissance absorbée par unité de masse du matériau considéré est définie par le DAS :

$$\text{Débit d'absorption spécifique (DAS)} = \frac{dE_{\gamma}}{dm \times dt} \quad (5.25)$$

ou SAR en anglais, qui s'exprime en $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Le DAS peut être calculé numériquement à partir de simulations de propagation des ondes et de modèles numériques de corps humains⁹. Il peut être également mesuré, à l'aide d'un protocole très strict et normalisé (Hamada *et al.* 2009), ce que fait par exemple l'Agence Nationale des Fréquences¹⁰ sur les téléphones vendus en France¹¹.

8. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_chimique

9. Voir par exemple : https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2021/05/S3c-Joe_WIART.pdf.

10. ANFR – <https://www.anfr.fr/>

11. Leur base de données de mesures est en ligne ici : <https://data.anfr.fr>.

Densité de courant induit dans le corps humain en mA/m ²	Valeurs des champs magnétiques externes induisant un courant dans le corps humain à 50 Hz en μT	Effets
En dessous de 10	Supérieurs à 500 et jusqu'à 5 000	Effets biologiques mineurs
De 10 à 100	Supérieurs à 5 000 et jusqu'à 50 000	Effets sur le système nerveux et la vision (magnéto phosphènes)
De 100 à 1000	Supérieurs à 50 000 et jusqu'à 500 000	Stimulation des tissus excitables
Au-dessus de 1 000	Supérieurs à 500 000	Fibrillation ventriculaire

FIGURE 5.5 – Effets des courants induits dans le corps humain, pour une fréquence de 50 Hz et différentes intensités du champ magnétique. Tiré de http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Champs_electromagnetiques_extremement_basse_frequence_DGS_2014.pdf (INRS 2001).

Le DAS peut être exprimé en fonction de l'amplitude du champ électrique E et en fonction de l'élévation de température T par rapport au temps t selon :

$$DAS = \sigma \frac{E^2}{\rho} = c_p \frac{dT}{dt} \quad (5.26)$$

où σ est la conductivité électrique du matériau (corps humain), ρ est sa densité, c_p est sa capacité thermique massique.

Pour mesurer le DAS (Hamada & Watanabe 2016), on utilise un modèle physique du corps humain (que l'on appelle un « fantôme ») ayant les mêmes propriétés de conductivité électrique, densité, capacité thermique (en première approximation de l'eau, le corps humain étant majoritairement composé d'eau). Et on mesure l'élévation de température avec des sondes de températures à réponse rapide, en évitant de perturber le champ électromagnétique.

5.3.4 Selon les domaines de fréquences

Fréquences extrêmement basses (< 300 Hz)

Il s'agit typiquement des ondes électromagnétiques générées par le courant alternatif de 50 Hz (lignes hautes tensions, appareils électroménagers...).

On ne constate aucune réaction biologique manifeste pour des champs électriques jusqu'à ~ 10 kV/m. Et aucune réaction biologique pour des champs magnétiques à 50/60 Hz jusqu'à ~ 1 mT (voir figure 5.5).

5.3.5 Fréquences intermédiaires [100 kHz, 10 MHz]

Par exemple :

- la cuisson par induction (20-50 kHz);
- la radiodiffusion (ondes longues – GO – et ondes moyennes – OM);
- les ampoules fluocompactes basse consommation.

Les technologies employées respectent les normes de limites d'exposition. On constate une absence d'effet aigu sur la santé (avec un recul de plusieurs décennies pour la radio!).

5.3.6 Radiofréquences [10 MHz, 300 GHz]

Par exemple :

- la radiodiffusion FM/TV (TNT);
- les communications sans fil (téléphonie mobile, wifi, etc.).

À ces fréquences, les ondes électromagnétiques interagissent avec l'eau des tissus biologiques. La polarisation des molécules d'eau fait qu'elles vont « suivre » l'orientation du champ électrique oscillant, les frottements intermoléculaires vont générer une élévation de température. C'est le principe de chauffage du four à micro-ondes (voir section 5.5).

Les modélisations théoriques couplées aux recherches expérimentales sur diverses espèces (autres que l'humain), montrent qu'avec des expositions résultant d'un DAS moyen pour l'ensemble du corps d'environ $6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 6 GHz, pendant au moins une heure dans des conditions thermiquement neutres (28 °C, nu, au repos), sont nécessaires pour induire une augmentation de 1 °C de la température du corps chez les adultes humains. Un DAS plus élevé est nécessaire pour atteindre cette élévation de température chez les enfants en raison de leur dissipation thermique plus efficace. Cependant, étant donné le peu de données de mesure disponibles, la Commission internationale sur la protection des rayonnements non-ionisants (ICNIRP¹²) a adopté une position conservatrice et utilise $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en moyenne sur 30 minutes comme niveau d'exposition à ces ondes électromagnétiques correspondant à une élévation de la température du corps de 1°C (ICNIRP 2020).

Notons que la thermorégulation du corps humain est très efficace. À titre de comparaison, un adulte humain génère une puissance d'environ $1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ au repos, près de $2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en position debout et environ 10 à $12 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en courant (ICNIRP 2020).

À mesure que la fréquence des ondes augmente, l'exposition du corps et l'échauffement qui en résulte deviennent plus superficiels et, au-dessus d'environ 6 GHz, cet échauffement se produit principalement dans la peau.

La limite légale (voir le tableau 5.2) du DAS est donc : $\text{DAS} < 2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pour la tête et le tronc). Actuellement, la majorité des smartphones ont un $\text{DAS} < 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Les normes actuelles ne prennent en compte que les effets thermiques, comme nous venons de le voir. Les effets cancérigènes à long terme en sont exclus. Pour le moment aucune étude épidémiologique sérieuse (voir section 5.6) ne permet d'établir un risque significatif avéré pour la santé humaine dans des conditions normales d'utilisation. Néanmoins, quelques études ayant observé un éventuel excès de risque suite à de fortes et longues expositions, le CIRC¹³

12. L'ICNIRP a pour objectif de protéger les personnes et l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements non ionisants. À cette fin, l'ICNIRP élabore et diffuse des conseils fondés sur des données scientifiques pour limiter l'exposition aux rayonnements non ionisants (<https://www.icnirp.org/>).

13. Le CIRC est le Centre International de Recherche sur le Cancer. C'est une agence de recherche sur le cancer de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), basée à Lyon. Ses missions sont de coordonner et de mener des recherches sur les causes du cancer chez l'être humain, sur les mécanismes de la cancérogenèse et d'élaborer des stratégies scientifiques de lutte contre le cancer. Dans ce cadre, il identifie les facteurs environnementaux et professionnels susceptibles d'accroître le risque de cancer chez l'homme en les classifiant. Des groupes de travail interdisciplinaires composés d'experts scientifiques internationaux examinent les études publiées sur un agent et évaluent le degré d'indication de cancérogénicité qu'il présente. Pour cela, ils s'appuient sur un ensemble de principes, de procédures et de critères scientifiques décrits dans les monographies du CIRC. Le CIRC examine la cancérogénicité éventuelle de produits chimiques, de mélanges complexes de substances, d'expositions professionnelles, d'agents physiques et biologiques et de facteurs comportementaux. On utilise le terme d'agent pour désigner l'ensemble. Le CIRC définit 3 groupes (de 1 à 3) correspondant à des degrés d'indication de cancérogénicité pour l'être humain. Le deuxième est subdivisé en groupe 2A et 2B. Ces groupes sont les suivants :

- Groupe 1 : agent cancérogène (parfois appelé cancérogène avéré ou cancérogène certain) pour l'homme;
- Groupe 2A : agent probablement cancérogène pour l'homme;
- Groupe 2B : agent peut-être cancérogène (parfois appelé cancérogène possible) pour l'homme;
- Groupe 3 : agent inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme.

Source : <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/publications-du-circ/classification-des-substances-cancerogenes/>

	DAS moyen dans le corps	DAS tête et tronc	Texte législatif
Effet établi	$4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$20 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	
Limite pour les travailleurs	$0,4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$10 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	Directive 2004/40/CE
Limite pour le public	$0,08 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	RE 1999/519/CE

TABLE 5.2 – Valeurs des limites fondamentales du DAS fixées par l’ICNIRP : valeurs moyennes à respecter sur une durée de 6 min sur une région très localisée de masse 10 g (ICNIRP 2020). Le facteur de protection pour tenir compte des incertitudes scientifiques et des différences physiologiques en termes de thermorégulation est de 10 pour les travailleurs et 50 pour le public (corps entier), moins au fait des expositions et des mesures d’atténuation. Il est respectivement de 2 et 10 pour les régions localisées.

a décidé de classer les champs électromagnétiques de radiofréquence comme « peut-être cancérogènes pour l’homme » (groupe 2B) (Baan *et al.* 2011). L’effet cancérogène des champs électromagnétiques émis par les technologies de communications sans fil reste controversé.

Il n’y a pas de problème sanitaire pour les sources en champ lointain (antennes relais, wifi...) car le niveau d’exposition est très bas (décroissance de l’énergie avec le carré de la distance). Cependant, le nombre d’utilisateurs de téléphones portables (champ proche) étant important, une augmentation minime du risque pourrait se traduire par un problème de santé publique, donc l’activité de recherche se poursuit, d’autant que le recul dans le temps est faible. Néanmoins aucun mécanisme connu ne vient étayer un possible effet nocif sur la santé, car les intensités et puissances sont trop faibles pour générer un transfert thermique suffisant ¹⁴.

5.4 Électrosensibilité

L’électrosensibilité est un syndrome défini par l’individu lui-même et non par la le médecin. Les personnes en souffrant présentent des symptômes réels que l’on retrouve dans la population générale (maux de tête, troubles du sommeil...) mais plus fréquents et pouvant devenir invalidants. Des essais cliniques réalisés en double aveugle, où les patient.e-s sont exposé.e-s à des champs tantôt réels, tantôt factices, ont démontré que les personnes se jugeant hypersensibles étaient incapables de distinguer une exposition aux champs électromagnétiques réels d’une exposition simulée ¹⁵ (Rubin *et al.* 2005). On parle alors d’« effet nocebo » qui est un effet psychologique de personnes ressentant des effets secondaires indésirables en consommant ou en étant exposés à des produits inertes ¹⁶.

Cette « peur des ondes » a été relayée par la presse à l’occasion d’une affaire survenue en 2009 ¹⁷ : certain.e-s habitant.e-s d’un quartier de Saint-Cloud se seraient mis à avoir des troubles divers et variés après qu’un opérateur de téléphonie a installé des antennes relais dans leur résidence. Il s’est avéré par la suite, que les antennes n’étaient pas encore alimentées...

Il se trouve que les médias pourraient avoir une certaine responsabilité dans l’épidémie : une étude (Witthöft & Rubin 2013) intitulée « Les avertissements des médias concernant les effets néfastes sur la santé de la vie moderne s’auto-réalisent-ils ? Une étude expérimentale sur

14. Notons toutefois que des recherches récentes semblent montrer que les ondes électromagnétiques pourraient avoir un effet physiologique sur certaines cellules du corps humain, par l’intermédiaire d’une protéine sensible au champ magnétique, le cryptochrome. Voir par exemple : *Des chercheurs montrent que les champs magnétiques agissent sur les cellules* par David Larousserie, Le Monde, 16 octobre 2018, https://www.lemonde.fr/sciences/article/2018/10/16/des-chercheurs-montrent-que-les-champs-magnetiques-ont-des-effets-sur-les-humains_5370290_1650684.html.

15. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Sensibilit _electromagn tique

16. M me si cet effet dans le cadre de l’explication de l’electrosensibilit  est questionn  (Dieudonn  2016).

17. Voir <http://rue89.nouvelobs.com/2013/06/09/mobiles-wifi-antennes-les-ondes-mont-tuer-243087>.

l'intolérance environnementale idiopathique (*i.e.* symptômes que l'on éprouve pour soi-même) attribuée aux champs électromagnétiques » conclut que :

Les reportages des médias sur les effets néfastes de substances supposées dangereuses peuvent augmenter la probabilité d'éprouver des symptômes à la suite d'une exposition fictive et de développer une sensibilité apparente. Un plus grand engagement entre les journalistes et les scientifiques est nécessaire pour contrer ces effets négatifs.

5.5 Et le four à micro-ondes alors ?

Le four à micro-ondes génère et utilise des ondes de même fréquence que celles des téléphones portables. Or le four à micro-onde sert à cuire des aliments. Donc les téléphones portables pourraient très bien faire cuire notre cerveau ? Pour répondre à cette question voyons d'abord comment fonctionne un four à micro-ondes.

5.5.1 Fonctionnement

Le four à micro-ondes a été inventé de manière inopinée à la sortie de la seconde guerre mondiale quand un ingénieur américain travaillant sur les radars se serait aperçu que les ondes électromagnétiques qu'il manipulait pouvaient chauffer.

À partir de la tension alternative du réseau électrique ménager (220 V, 50 Hz) on obtient une haute tension continue avec d'une part un transformateur pour élever la tension, et d'autre part un circuit redresseur généralement constitué de diodes pour convertir cette tension en courant continu. Celui-ci alimente un magnétron qui va générer des ondes électromagnétiques.

Un magnétron¹⁸ à cavité se compose d'une cathode cylindrique portée à un potentiel négatif élevé créé par la haute tension précédemment générée. La cathode est placée au centre d'une chambre métallique circulaire, lobée et sous vide. Les parois de la chambre constituent l'anode du tube. Un champ magnétique parallèle à l'axe de la cavité est généré par un aimant permanent. Les électrons se déplacent initialement radialement vers l'extérieur de la cathode, attirés par le champ électrique des parois de l'anode. Le champ magnétique courbe la trajectoire des électrons qui spiralent vers l'extérieur, conséquence de la force de Lorentz. Des cavités cylindriques sont réparties sur le pourtour de la chambre. Des fentes sont découpées sur la longueur des cavités et s'ouvrent sur l'espace central commun. Lorsque les électrons passent devant ces fentes, ils induisent un champ électromagnétique à haute fréquence dans chaque cavité résonnante selon le principe de l'antenne. Le champ est alors conduit dans un guide d'ondes (un tube métallique) qui dirige l'énergie électromagnétique ainsi extraite vers la chambre de cuisson.

La taille des cavités détermine la fréquence de résonance, et donc la fréquence des micro-ondes émises.

La figure 5.6 montre schématiquement comment fonctionne le four à micro-ondes. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Fréquence des ondes : 2,45 GHz
- Longueur d'onde : 12,2 cm
- Puissance : 500–2000 W (à comparer avec la puissance d'un smartphone : ~ 1 W et celle d'une borne wifi : ~ 30 mW)

Comment sont chauffés les aliments ?

La molécule d'eau est polarisée (figure 5.7a), ce qui lui permet de s'orienter selon un champ électrique auquel elle est soumise (figure 5.7b, c). Une onde électromagnétique étant (entre autres) composée d'un tel champ, oscillant, l'eau va ainsi pouvoir osciller, changer de direction

18. Sur le fonctionnement détaillé du magnétron, voir Rohit Choudhury, *Magnétron*, 2015, diapositives. <https://www.slideshare.net/RohitChoudhury1/magnetron-55879835/8>.

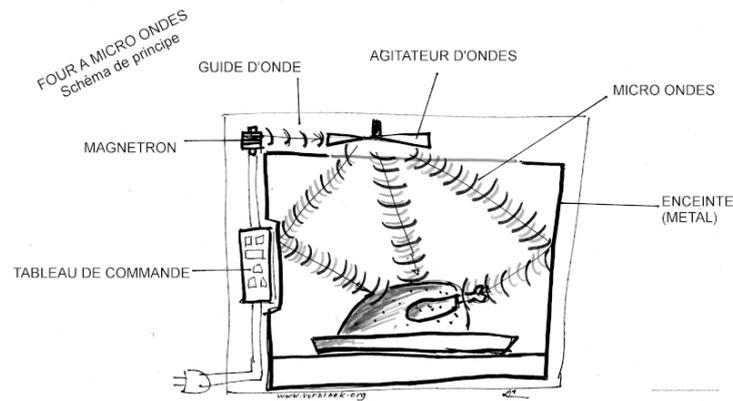


FIGURE 5.6 – Illustration du fonctionnement du four à micro-ondes. Source : Wikipédia/Vorzinek. CC BY-SA.

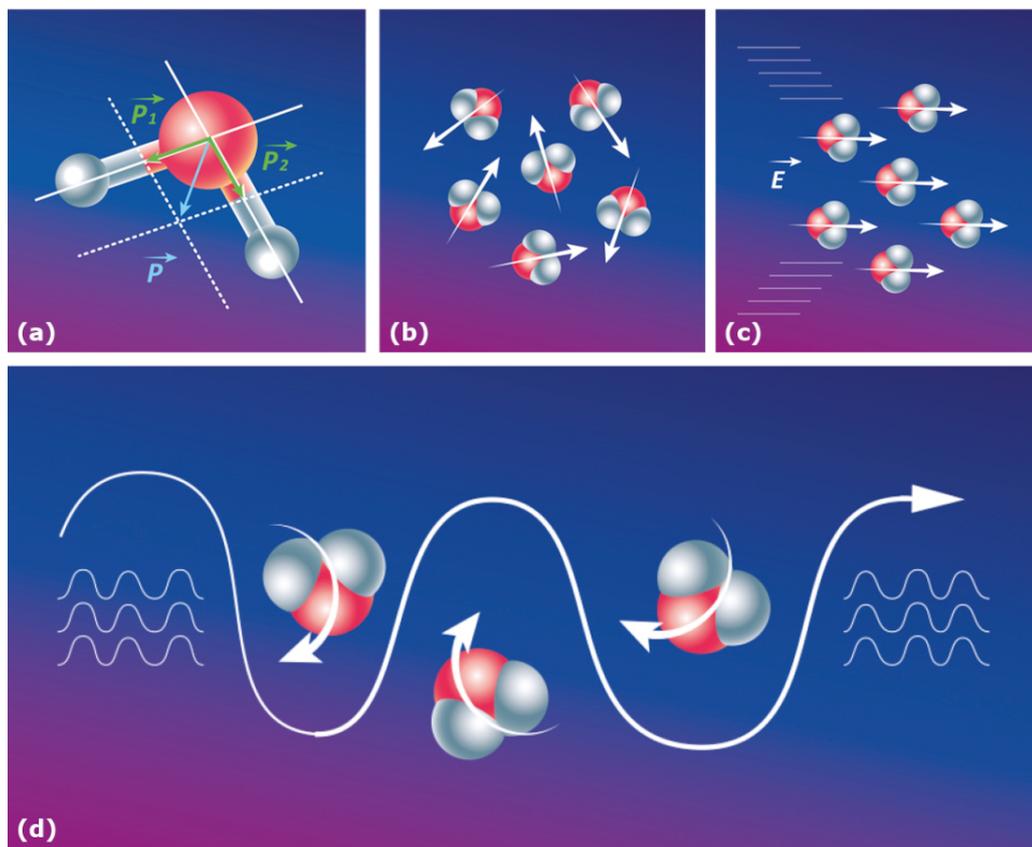


FIGURE 5.7 – Principe du chauffage par des ondes électromagnétiques micro-ondes. (a) Schéma de la molécule de d'eau avec son moment dipolaire \vec{p} . (b) En l'absence de champ électrique \vec{E} extérieur, les moments dipolaires des molécules d'eau sont orientés de manière désordonnée. (c) En présence d'un champ électrique \vec{E} extérieur, les moments dipolaires s'alignent. (d) Si le champ \vec{E} extérieur oscille, les moments dipolaires de l'eau oscillent de concert. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

au gré de l'onde (figure 5.7d). Le chauffage a lieu grâce aux « frottements » moléculaires et à la diffusion thermique¹⁹.

19. Pour en savoir plus, voir par exemple Wikipédia : Four à micro-ondes (https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_à_micro-ondes#Action_des_micro-ondes_sur_la_molécule_d'eau)

Étude	Rayonnement de fuite moyen (mW/cm ²)	Nombre d'appareils testés	Âge des appareils testés (années)
Alhekail 2001 (appareils usagés)	0,41	106	0,1–14
Thansandote 2000 (appareils neufs)	0,08	60	0
Thansandote 2000 (appareils usagés)	0,17	103	1–23
Matthes 1992 (appareils usagés)	< 0,062 pour 50 % des appareils ; max = 0,086	130	0,5–18

TABLE 5.3 – Mesure du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes selon trois études. Source : OFSP (2016).

Distance (cm)	DAS mesuré (W/kg)	Limite recommandée	
		DAS (W/kg)	Partie du corps exposée
< 0,1	7,95	4	membres
5	0,256	2	tête, tronc
30	0,0056	0,08	corps entier

TABLE 5.4 – Débit d'absorption spécifique (DAS) du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes selon l'étude de Bangay et al. (2003) en fonction de la distance. Tiré de OFSP (2016).

Dangereux, le four à micro-ondes ?

L'enceinte du four est métallique, la porte elle-même est dotée d'une grille métallique, qui permet de voir à l'intérieur, mais empêche les ondes de sortir (cage de Faraday).

Selon les normes en vigueur, les fuites de rayonnement ne doivent pas excéder 5 mW/cm² à une distance de 5 cm. Le tableau 5.3 donne des mesures du rayonnement de fuite pour un certain nombre de fours d'âges divers. Les trois études présentant ces mesures arrivent à la conclusion que le rayonnement de fuite est le plus important lorsque les joints d'étanchéité de la porte sont usés ou encrassés, ou lorsque la porte ou le système de fermeture sont usés. Le rayonnement de fuite maximal admissible n'a été dépassé que dans un seul cas.

Le tableau 5.4 donne des mesures du DAS du rayonnement de fuite de fours à micro-ondes à différentes distances. À une distance de 30 cm (ce qui correspond à une exposition de tout le corps) comme à une distance de 5 cm (ce qui correspond par exemple à l'exposition de la tête lorsqu'on regarde les aliments dans le four), les valeurs DAS sont nettement inférieures aux valeurs limites recommandées. Ce n'est qu'au contact direct avec le four que les valeurs limites recommandées sont dépassées.

5.5.2 Conclusion : le téléphone portable est-il un four à micro-ondes ?

D'une part, on constate que les fours à micro-ondes sont inoffensifs tant qu'ils sont en bon état. D'autre part, la fréquence de la téléphonie mobile est dans la même gamme que celle des fours à micro-ondes. Mais la différence principale est que la puissance émise n'est pas du tout la même : elle est supérieure à 500 W pour la cuisson des aliments, contre ~ 1 W pour un téléphone portable. C'est cette grande différence de puissance, et en particulier la faible puissance des téléphones portables (qui tend de surcroît à diminuer plus la technologie

progresse), qui explique que l'on ne peut pas se cuire le cerveau en téléphonant. Néanmoins l'utilisation des téléphones portables étant récente, des études sur d'éventuels effets à long terme sont en cours (étude COSMOS, par exemple).

5.6 Quelques « études » sur l'effet des ondes sur la santé

- *Étude Interphone*²⁰ : vaste étude sur l'impact des téléphones portables sur la santé humaine dans les règles de la méthode scientifique. Conclusion : rien de significatif, si ce n'est qu'il faut poursuivre les études... (voir Communiqué de l'OMS, 2010²¹).
- *Étude COSMOS*²² : débutée en 2010, dans le but de suivre 250 000 adultes utilisateurs de téléphones portables dans 5 pays jusqu'en 2040...
- *L'étude « Draper »* (Draper *et al.* 2005), qui concluait que les enfants avaient un risque accru de leucémie en vivant à proximité d'une ligne THT. Mais là encore des problèmes méthodologiques sont à déplorer (voir : *Lignes électriques à haute tension et cancer chez l'enfant : ce que certains... oublient*²³, mais aussi Bunch *et al.* 2014).

20. <http://interphone.iarc.fr/>

21. OMS, Publication de l'étude Interphone sur l'utilisation des téléphones portables et le risque de cancer du cerveau, communiqué de presse. https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr200_F.pdf

22. <http://www.ukcosmos.org/>

23. http://www.unice.fr/zetetique/articles/HBJBDBDC_Draper.html

Annexe A

Quelques organismes internationaux pour le climat

BLANC Guillaume & Noûs Camille, Quelques organismes internationaux pour le climat, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.b236d0>



A.1 Le GIEC

Cette partie est basée sur Jouzel & Debroise (2014).

La communauté scientifique s'organise : en 1979, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) crée le Programme de Recherche Mondial sur le Climat (PRMC); en 1986, le Programme International Géosphère-Biosphère est lancé par le Conseil International pour la Science.

Les gouvernements lancent le GIEC en 1986. L'OMM et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement lancent le **Groupe Intergouvernemental d'Experts du Climat** (GIEC ou IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change – en anglais)¹ dont l'objectif est de : *faire le point, synthétiser et résumer les connaissances, pour fournir une base d'information et de réflexion aux décideurs politiques.*

Des milliers de scientifiques de disciplines très diverses font le point des connaissances sur le réchauffement climatique à intervalle régulier dans des rapports exhaustifs (*assessment reports*). Rapports qui sont résumés en quelques pages destinées aux responsables politiques, que les délégués (de 170 états) devront adopter mot à mot à l'unanimité. Et ça fonctionne!!

En 1988 a lieu la première réunion du GIEC à Genève. En 1989, à l'occasion d'une résolution des Nations Unies, les états membres *s'engagent à commencer des négociations devant conduire à une convention sur l'effet de serre.*

Le GIEC a produit une série de six rapports, en 1990, 1995, 2001, 2007, 2013 et le dernier en 2021. Chaque rapport est divisé en trois parties, qui restituent les synthèses des trois groupes de travail :

- Groupe 1 – « éléments scientifiques »
- Groupe 2 – « impacts, adaptations et vulnérabilité »
- Groupe 3 – « mesures d'atténuation »

En 2007, le GIEC reçoit le **Prix Nobel de la Paix** avec Al Gore pour « l'éveil des consciences sur les risques du changement climatique ». En 2009, c'est le *climategate*, crise de confiance qui suit la publication d'une série de mails piratés échangés par des chercheurs britanniques. Une interprétation hors contexte pouvait suggérer que des données avaient été falsifiées. En fait, il n'en était rien, comme le montrèrent différentes enquêtes, dont les résultats n'ont pas eu le même écho médiatique que le vol de courriels... Le GIEC a subi beaucoup d'attaques de climatosceptiques qui guettent la moindre faille dans ses rapports, ce que l'on peut voir comme une force pour l'organisme qui peut ainsi se targuer de publier des rapports supportant la critique minutieuse!

En 2010 a lieu un audit externe sur le fonctionnement du GIEC par le Conseil Inter-Académique : les processus d'évaluation du GIEC sont validés.

1. <http://www.ipcc.ch>

A.2 Les Conférences des Parties (COP)

En 1992, au **Sommet de la Terre** à Rio de Janeiro, les responsables politiques s'engagent et signent la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) (en 2015, la CCNUCC est ratifiée par 196 « parties prenantes », à savoir 195 états plus l'Union européenne). En 1995, c'est la première réunion de ces « parties » à Berlin. Ces réunions (*Conference Of the Parties* – COP) se déroulent chaque année² (sauf en 2020 à cause de la crise du covid).

1997 : COP3 à Kyoto – **Protocole de Kyoto** = objectif chiffré de réduction des émissions de GES, avec des engagements différents selon les pays. Non ratifié par les États-Unis.

2002 : COP8 à New Dehli = programme de sensibilisation du public.

2003 : COP9 à Milan = fonds spécial changement climatique (financement de technologies pour s'adapter).

2007 : COP13 à Bali = « **Objectif 2 °C** » = seuil d'adaption, au-delà duquel tout deviendrait plus compliqué! Nécessite de diviser par deux les émissions d'ici 2050...

2009 : COP15 à Copenhague = l'espoir de faire le point sur le protocole de Kyoto avant de mettre sur les rails une deuxième phase est déçu. Un accord final non contraignant sur la réduction des GES...

2015 : COP21 à Paris = Accords de Paris ; l'objectif est de contenir le réchauffement sous les 2 °C. Chaque pays donne sa feuille de route, mais elle n'est pas contraignante!

2021 : COP26 à Glasgow = débouche sur le « Pacte de Glasgow pour le climat » dans lequel plus de pays s'engagent à la neutralité carbone. Les pays riches *promettent* d'augmenter le financement de l'adaptation pour aider les pays les plus pauvres.

On peut légitimement se questionner sur l'efficacité de ces conférences, trop souvent phagocytées par les lobbys des énergies fossiles³.

2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Conférences_des_Nations_unies_sur_les_changements_climatiques

3. Voir par exemple le billet de blog : <https://bonpote.com/organisation-minable-et-festival-de-greenwashing-a-la-cop26/>.

Annexe B

Bilan énergétique de la France

BLANC Guillaume & NOÛS Camille, Bilan énergétique de la France, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.ee1cb3>



B.1 Diagramme de Sankey des flux énergétiques de la France

Un diagramme de Sankey¹ montre des flux avec des flèches dont la taille est proportionnelle au flux ainsi représenté. Il est particulièrement utilisé pour représenter des flux d'énergie notamment pour les bilans annuels énergétiques des pays.

Le site <https://www.iea.org/sankey/> de l'Agence Internationale de l'Énergie répertorie les bilans énergétiques des pays pour différentes années sous forme de diagrammes de Sankey. Il est possible de moduler les paramètres.

B.2 Bilan énergétique de la France

Nous décryptons ici le schéma 4.3 page 146, issu de CGDD (2019b) reproduit ci-dessous (figure B.1). Les énergies sont en Mtep, avec $1 \text{ Mtep} = 10^6 \text{ tep}$ et $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ}$. Le tableau B.1 donne les énergies primaires et les énergies finales.

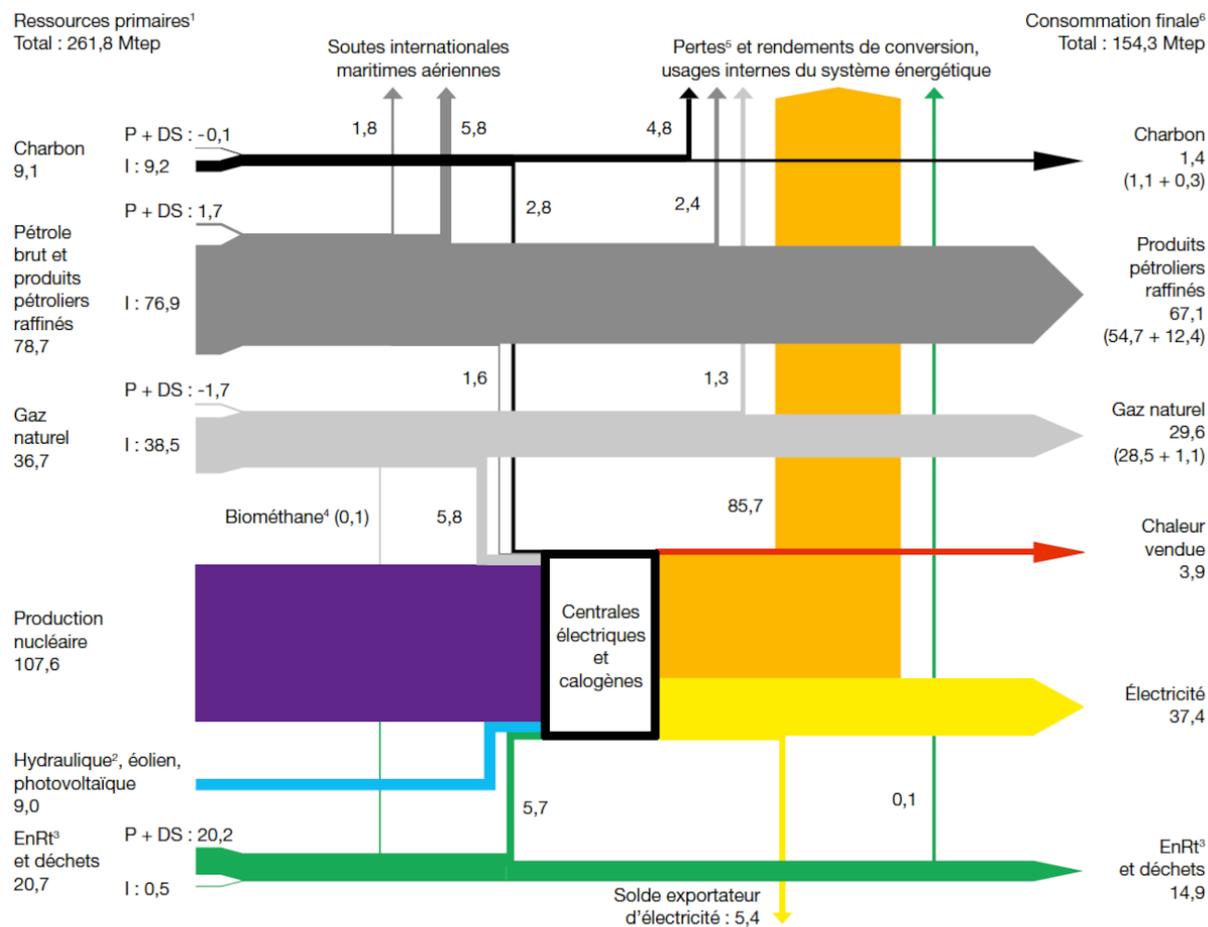
Les énergies primaires sont obtenues en enlevant les produits autres que l'énergie issus des ressources fossiles, en enlevant les carburants des transports maritimes et aériens internationaux, ainsi que les exportations d'électricité. Ces dernières sont réparties au sein des différentes sources primaires au prorata de leur répartition dans le mix primaire à l'origine de l'électricité.

L'énergie primaire est l'énergie servant à produire l'énergie finale, telle qu'elle est « achetée » par les consommateurs, par exemple l'essence issue du raffinage du pétrole, ou l'électricité issue de différentes sources. L'essence (énergie finale) n'est pas une énergie utile, elle doit être brûlée dans un moteur pour cela (auquel cas l'énergie utile peut être l'énergie mécanique des roues, ou l'énergie thermique selon les usages). En revanche l'électricité (énergie finale) est aussi une énergie utile.

Les pertes sont liées au transport, au raffinage pour les ressources fossiles, et au rendement des centrales thermiques pour la production d'électricité. Elles sont calculées au prorata du mix primaire à l'origine de l'électricité.

Une petite partie de l'énergie thermique dégagée par la production d'électricité (3,9 Mtep) est vendue en tant que telle, et incluse dans les pertes dans le tableau B.1.

1. D'après le nom de l'ingénieur irlandais Matthew Henry Phineas Riall Sankey (1853-1926) qui a utilisé en 1898 cette représentation à propos de l'efficacité énergétique de la machine à vapeur.



P : production nationale d'énergie primaire. *DS* : déstockage. *I* : solde importateur.

¹ Pour obtenir la consommation primaire, il faut déduire des ressources primaires le solde exportateur d'électricité ainsi que les soutes maritimes et aériennes internationales.

² Y compris énergies marines, hors accumulation par pompage.

³ Énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique, biocarburants, pompes à chaleur, etc.).

⁴ Injections de biométhane (compté comme énergie renouvelable dans les ressources primaires) dans les réseaux de gaz naturel.

⁵ L'importance des pertes dans le domaine de l'électricité tient au fait que la production nucléaire est comptabilisée pour la chaleur produite par la réaction, chaleur dont les deux tiers sont perdus lors de la conversion en énergie électrique.

⁶ Usages non énergétiques inclus. Pour le charbon, les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel, la décomposition de la consommation finale en usages énergétiques et non énergétiques est indiquée entre parenthèses.

Source : calculs SDES, d'après les sources par énergie

FIGURE B.1 – Bilan énergétique de la France en 2018 (en Mtep), sous la forme d'un diagramme de Sankey (diagramme de flux où la largeur des flèches est proportionnelle au flux). Tiré de CGDD (2019b). Licence Ouverte.

(1) Ressource primaire	(2) Vecteur (utile)	(3) D'après le dia- gramme (Mtep)	(4) Non- énergie (Mtep)	(5) Soutes (Mtep)	(6) Soustrac- tions faites (Mtep)	(7) Soustrac- tions faites (%)	(8) Exportations électricité (Mtep - prorata)	(9) Énergie pri- maire (Mtep)	(10) Énergie pri- maire (%)	(11) Pertes (Mtep)	(12) Pertes (% de EP)	(13) Énergie finale (Mtep)	(14) Énergie finale (%)
Charbon	Électricité	2,8			2,8	2,1	-0,1	2,7	2,1	-1,9	70,4	0,8	2,1
	Chaleur	6,3	-0,3		6			6	5,6	-4,8	80	1,1	1,1
	Total	9,1	-0,3		8,8		-0,1	8,7	3,7	-6,7	77	1,9	1,4
Pétrole	Électricité	1,6			1,6	1,2	-0,1	1,5	1,2	-1,1	73,3	0,4	1,1
	Chaleur	77	-12,4	-7,6	54			57	52,9	-2,4	4,2	54,7	55,2
	Total	78,6	-12,4	-7,6	58,6		-0,1	58,5	24,9	-3,5	6	55,1	40,3
Gaz naturel	Électricité	5,8			5,8	4,4	-0,2	5,6	4,4	-3,9	69,6	1,7	4,5
	Chaleur	30,9	-1,1		29,8			29,8	27,6	-1,3	4,4	28,5	28,7
	Total	36,7	-1,1		35,6		-0,2	35,4	15,1	-5,2	14,7	30,1	22
Nucléaire	Électricité	107,6			107,6	81,2	-4,4	103,2	81,2	-72,8	70,5	30,4	81,1
	Chaleur												
	Total	107,6			107,6		-4,4	103,2	43,9	-72,8	70,5	30,4	22,3
Photovoltaïque éolien hydraulique	Électricité	9			9	6,8	-0,4	8,6	6,8	-6,1	70,9	2,5	6,7
	Chaleur												
	Total	9			9		-0,4	8,6	3,7	-6,1	70,9	2,6	1,9
EnRt	Électricité	5,7			5,7	4,3	-0,2	5,5	4,3	-3,8	69,1	1,7	4,5
	Chaleur	15			15			15	13,9	-0,1	1	14,9	15
	Total	20,7			20,7		-0,2	20,5	8,7	-3,9	19	16,5	12,1
Total	Électricité	132,5			132,5	100	-5,4	127,1	100	-89,6	70,5	37,5	100
	Chaleur	129,2	-13,8	-7,6	107,8			107,8	100	-8,6	8	99,2	100
	Total	261,7	-13,8	-7,6	240,3		-5,4	234,9	100	-98,2	41,8	136,7	100

TABLE B.1 – Décryptage du bilan énergétique de la France en 2018, d'après la figure B.1. La colonne (1) liste les différentes ressources primaires : « pétrole » signifie pétrole brut et produits raffinés, « nucléaire » signifie production nucléaire, « hydraulique » inclut les énergies marines mais pas le pompage, « EnRt » signifie énergies renouvelables thermiques, ce qui inclut le bois et ses déchets, le solaire thermique, les biocarburants, les pompes à chaleur, etc. La colonne (2) distingue les vecteurs d'énergie, l'électricité d'une part, et, de façon un peu brute la chaleur, sachant que dans la plupart des cas (combustibles fossiles), l'énergie finale n'est pas de la chaleur mais du carburant (essence. . .). L'énergie utile, thermique dans ce cas, n'est pas donnée, elle est sujette à de nouveaux rendements et pertes selon l'usage qui en est fait (moteurs. . .). La colonne (3) retranscrit les données du diagramme. La colonne (4) identifie les produits finaux non énergétiques comptabilisés dans le diagramme pour les retrancher (colonne (6)). La colonne (5) quantifie le carburant des transports internationaux (« soutes ») à retrancher également. La colonne (6) donne le résultat des soustractions. La colonne (7) donne la fraction correspondante de l'électricité « primaire » pour chaque source, ce qui permet de ventiler sur les différentes sources les exportations d'électricité (colonne (8)), au prorata de l'électricité primaire. La colonne (9) donne ainsi les valeurs effectives des énergies primaires en fonction des sources. La colonne (10) donne la fraction d'énergie primaire de chaque source par rapport aux vecteurs « électricité » et « chaleur » et par rapport au total. La colonne (11) identifie les pertes généralement thermiques au cours de différents processus, transport ou production (rendement des machines thermiques, des raffineries, etc.). La colonne (12) donne la fraction des pertes par rapport à l'énergie primaire (colonne (9)) correspondante. La colonne (13) soustrait les pertes (11) à l'énergie primaire (9) pour donner l'énergie finale. La colonne (14) donne la fraction d'énergie finale de chaque source par rapport aux vecteurs « électricité » et « chaleur » et par rapport au total.

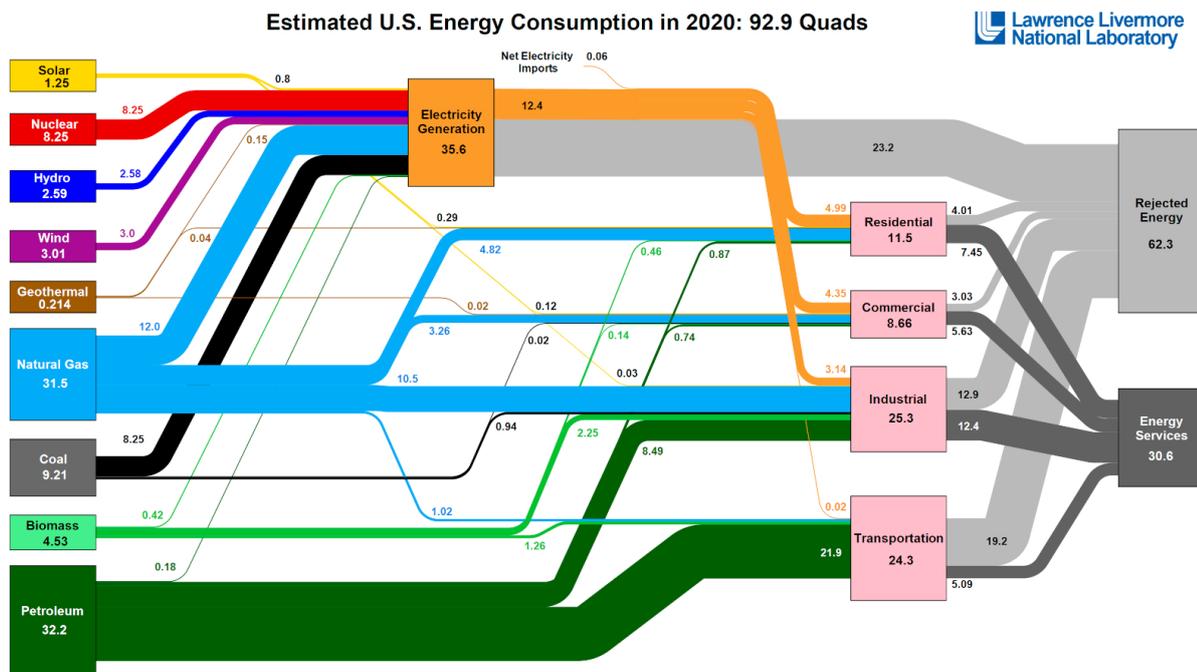


FIGURE B.2 – Bilan énergétique des États-Unis en 2020 sous la forme d'un diagramme de Sankey. L'énergie y est exprimée en « quads », une unité anglosaxonne à la définition quelque peu rocambolesque : un « quad » est un quadrillion de BTU, où quadrillion est exprimé dans l'« échelle courte » soit 10^{15} ; un « BTU » (*British Thermal Unit*) est une unité d'énergie thermique définie comme étant l'énergie nécessaire pour élever la température d'une livre anglaise (« *pound* » – 453,59237 g) d'eau de 1°F (soit $9/5$ de degrés Celsius) à la pression d'une atmosphère. Ainsi, $1 \text{ quad} = 1,055 \cdot 10^{18} \text{ J} = 1,055 \text{ EJ}$. Tiré de <https://flowcharts.llnl.gov/>. CC BY-NC-SA.

B.3 Bilan énergétique des États-Unis

Notons que le laboratoire Lawrence Livermore aux États-Unis fait le travail de séparation entre l'énergie grise et l'énergie utile, comme sur le diagramme de la figure B.2.

Annexe C

Rendement théorique d'une éolienne

BLANC Guillaume & NOÛS Camille, Rendement théorique d'une éolienne, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.7715e2>



L'énergie cinétique du vent est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho \times V \times v^2$$

où m est la masse d'air et v sa vitesse; $\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ est la masse volumique de l'air et V le volume correspondant à la masse m .

Cela suppose néanmoins que toute l'énergie de la masse d'air est prélevée par l'éolienne, et donc que la vitesse du vent est nulle derrière le rotor. Ce qui n'est pas possible pour la continuité de l'écoulement (conservation du flux de masse). Donc si la vitesse du vent est v_1 en amont du rotor et v_2 en aval, l'énergie cinétique prélevée vaut :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}\rho \times V \times (v_2^2 - v_1^2)$$

La variation de puissance (cinétique) correspondante est :

$$\Delta P_c = \frac{1}{2}\rho \times S \times \frac{L}{\Delta t} \times (v_2^2 - v_1^2)$$

où S est la surface balayée par les pales de l'éolienne et L est la longueur du cylindre d'air qui passe par le rotor pendant Δt . Ce qui donne :

$$\Delta P_c = \frac{1}{2}\rho \times S \times v_{\text{moy}} \times (v_2^2 - v_1^2)$$

où $v_{\text{moy}} = L/\Delta t$ est la vitesse moyenne du vent au niveau du rotor.

Déterminons la puissance absorbée par le rotor. La variation $\Delta \vec{p}$ de la quantité de mouvement de l'air avant et après le rotor est :

$$\Delta \vec{p} = m \times (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)$$

Soit, d'après le principe fondamental de la dynamique, la force \vec{F} s'exerçant sur les pales du rotor, avec $dm/dt = \rho \times S \times dL/dt = \rho \times S \times v_{\text{moy}}$:

$$\frac{d\Delta \vec{p}}{dt} = \vec{F} = \rho \times S \times v_{\text{moy}} \times (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)$$

Donc la puissance mécanique perdue par le vent est :

$$P_{\text{perdue}} = \vec{F} \cdot \vec{v}_{\text{moy}} = \rho \times S \times v_{\text{moy}}^2 \times (v_1 - v_2)$$

en supposant que toutes les vitesses sont colinéaires. Cette puissance est égale à la différence de puissance cinétique du vent avant et après le rotor :

$$P_{\text{perdue}} = P_c^{\text{avant}} - P_c^{\text{après}} = -\Delta P_c$$

soit :

$$\rho \times S \times v_{\text{moy}}^2 \times (v_1 - v_2) = -\frac{1}{2} \rho \times S \times v_{\text{moy}} \times (v_2^2 - v_1^2)$$

On en déduit l'expression de v_{moy} :

$$v_{\text{moy}} = \frac{v_2 + v_1}{2}$$

La puissance absorbée par le rotor est égale à la puissance perdue par le vent :

$$P_{\text{rotor}} = P_{\text{perdue}} = \rho \times S \times v_{\text{moy}}^2 \times (v_1 - v_2) = \rho \times S \times \frac{(v_1 + v_2)^2}{4} \times (v_1 - v_2)$$

Cette puissance est maximale quand sa dérivée par rapport à la vitesse du vent en aval (v_2) – qui est la variable ajustable, la vitesse incidente (v_1) étant imposée – s'annule, soit :

$$2(v_1 + v_2)(v_1 - v_2) - (v_1 + v_2)^2 = 0$$

soit :

$$2(v_1 - v_2) - (v_1 + v_2) = 0$$

soit :

$$v_1 - 3v_2 = 0$$

soit encore :

$$v_2 = \frac{v_1}{3}$$

La puissance maximale récupérable par le rotor est donc :

$$P_{\text{rotor}}^{\text{max}} = \rho \times S \times \frac{1}{4} \left(\frac{4}{3} v_1 \right)^2 \times \frac{2}{3} v_1 = \frac{8}{27} \rho \times S \times v_1^3$$

La puissance cinétique incidente du vent est :

$$P_c^{\text{incidente}} = \frac{1}{2} \rho \times S \times v_1^3$$

donc :

$$P_{\text{rotor}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_c^{\text{incidente}}$$

Il s'agit de la limite de Betz : il n'est pas possible de récupérer plus de $16/27 \approx 0,6$ de la puissance cinétique incidente. Le rendement d'une éolienne ne peut donc théoriquement dépasser 60 %.

Pour plus de détails sur la physique des éoliennes, on pourra consulter Nifenecker (2014).

Annexe D

Puissance géothermique

BLANC Guillaume & Noûs Camille, Quelques organismes internationaux pour le climat, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.077f16>



Dans cette annexe, nous estimons le flux d'énergie thermique provenant de la désintégration radioactive de radioisotopes présents naturellement dans la croûte et le manteau terrestre.

D.1 Décroissance radioactive

On peut estimer la puissance de l'énergie géothermique issue de la croûte terrestre et du manteau supérieur. Cette énergie, thermique, provient de la décroissance radioactive de quatre éléments présents dans la croûte terrestre depuis la formation de la Terre, il y a 4,543 milliards d'années : le thorium 232, l'uranium 238, l'uranium 235 et le potassium 40. La figure D.1 montre les filiations radioactives de ces noyaux. Comme c'est l'énergie totale de désintégration qui nous intéresse ici, on peut faire l'hypothèse que chacun de ces isotopes se désintègre directement vers l'isotope stable en bout de chaîne, car les périodes radioactives des noyaux fils sont très petites devant celles des noyaux pères. En revanche, il faut considérer la somme des énergies de désintégration de l'ensemble des noyaux de la chaîne. Pour chacun d'eux, la table des isotopes¹ fournit toutes les données, dont le « Q » de la réaction de décroissance, à savoir l'énergie de désintégration. En sommant toutes les énergies de décroissance de la chaîne, on obtient l'énergie de décroissance totale qui figure dans le tableau D.1, en plus d'autres caractéristiques.

Élément	Concentration croûte terrestre (kg/kg)	Concentration manteau supérieur (kg/kg)	Isotope	Abondance isotopique	Période radioactive (Ga)	Énergie de désintégration (Mev)
K	$2,09 \cdot 10^{-6}$	$3,10 \cdot 10^{-4}$	$^{40}_{19}\text{K}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	1,25	1,33
Th	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$^{232}_{90}\text{Th}$	0,9998	14	47,76
U	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,10 \cdot 10^{-8}$	$^{238}_{92}\text{U}$	0,9927	4,47	53,89
			$^{235}_{92}\text{U}$	0,0072	0,703	46,40

TABLE D.1 – Caractéristiques des isotopes radioactifs naturellement présents dans la croûte terrestre. Les concentrations massiques dans la croûte terrestre (continentale) sont tirées du site : https://fr.wikipedia.org/wiki/Abondance_des_éléments_dans_la_croûte_terrestre et issues de Haynes (2017) (p. 2402). Les concentrations dans le manteau supérieur proviennent de Turcotte & Schubert (2002) (p. 246).

1. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.

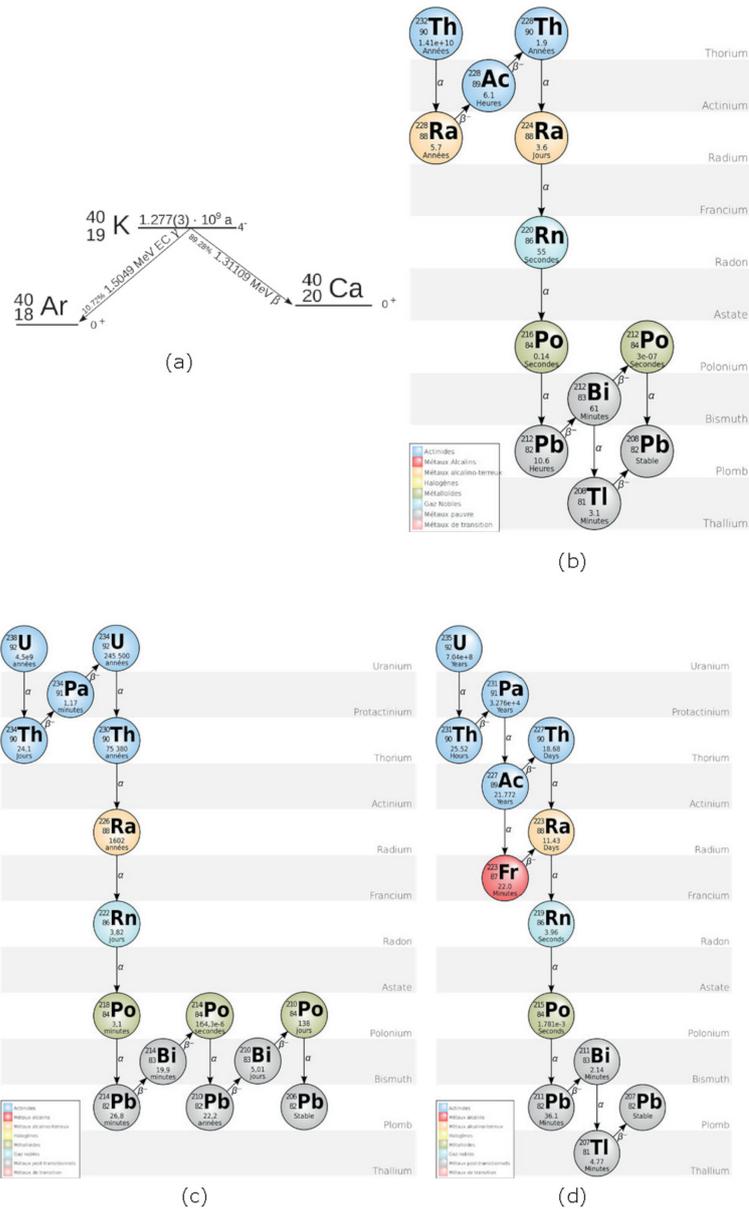


FIGURE D.1 – Schémas des filiations de décroissance radioactive des isotopes présents naturellement dans la croûte et le manteau terrestres. (a) Schéma de la filiation radioactive du potassium 40. Source : Wikipédia/Tubas-en, https://fr.wikibooks.org/wiki/Le_noyau_atomique/La_loi_de_désintégration_radioactive. CC BY-SA. (b) Schéma de la filiation radioactive du thorium 232. Source : Wikipédia/BatesIsBack, https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_de_désintégration. CC BY-SA. (c) Schéma de la filiation radioactive de l’uranium 238. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_de_désintégration. CC0. (d) Schéma de la filiation radioactive de l’uranium 235. Source : Wikipédia/Edgar.bonnet, https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_de_désintégration. CC BY-SA.

D’après la loi de décroissance radioactive (équation 2.1, p. 51), le nombre de noyaux dN se désintégrant pendant un intervalle de temps dt est donné par :

$$dN = -\frac{\ln 2}{T} N dt \tag{D.1}$$

où T est la période radioactive et N est le nombre de noyaux à l’instant t .

Isotope	$P^{1 \text{ kg}}$ (W · kg ⁻¹)	$P_{\text{Turcotte}}^{1 \text{ kg}}$ (W · kg ⁻¹)	$P_{\text{Turcotte}}^{1 \text{ kg}}/P^{1 \text{ kg}}$
⁴⁰ ₁₉ K	5,61 · 10 ⁻⁵	2,92 · 10 ⁻⁵	0,52
²³² ₉₀ Th	3,10 · 10 ⁻⁵	2,64 · 10 ⁻⁵	0,85
²³⁸ ₉₂ U	1,07 · 10 ⁻⁴	9,46 · 10 ⁻⁵	0,89
²³⁵ ₉₂ U	5,92 · 10 ⁻⁴	5,69 · 10 ⁻⁴	0,96

TABLE D.2 – Puissances massiques émises par les isotopes radioactifs ($P^{1 \text{ kg}}$). Les valeurs de Turcotte & Schubert (2002) sont également données ($P_{\text{Turcotte}}^{1 \text{ kg}}$), ainsi que le rapport entre les valeurs de l'ouvrage et celles obtenues ici.

Pour connaître la puissance thermique issue de la décroissance radioactive, connaissant l'énergie relâchée sous forme thermique par une désintégration (tableau D.1), il suffit de connaître le nombre de désintégrations par seconde pour chaque isotope.

Ainsi la puissance thermique dégagée par un isotope est :

$$P = -E \frac{\Delta N}{\Delta t} = E \frac{\ln 2}{T} N_0$$

où E est l'énergie dégagée par une réaction de désintégration, et N_0 est le nombre de noyaux aujourd'hui. Il reste à estimer N_0 .

D.2 Puissance radioactive massique

On peut déjà calculer la puissance thermique pour chaque isotope par unité de masse (1 kg). Dans ce cas, on a :

$$N_0^{1 \text{ kg}} = \frac{1}{m_i}$$

où $m_i = M_i/\mathcal{N}$ est la masse de l'isotope considéré, M_i est sa masse molaire (en kg), et \mathcal{N} est le nombre d'Avogadro. La puissance $P_i^{1 \text{ kg}}$ pour l'isotope i est calculée dans le tableau D.2 :

$$P_i^{1 \text{ kg}} = \frac{E_i \times \ln 2 \times \mathcal{N}}{T_i \times M_i} = 2,11 \cdot 10^{-3} \times \frac{E_i(\text{MeV})}{T_i(\text{Ga}) \times M_i(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})} \quad (\text{D.2})$$

La tableau D.2 présente les valeurs obtenues à l'aide de l'équation (D.2) avec celles données dans l'ouvrage de Turcotte & Schubert (2002) (p. 246), qui sont également celles de la page Wikipédia « Earth's internal heat budget »².

D.3 Puissance surfacique de la croûte continentale

Pour déterminer le nombre de noyaux radioactifs (N_0) présent dans la croûte, il faut déterminer sa masse, en supposant que l'essentiel de la radioactivité en provient. Pour cela, il faut distinguer la croûte continentale et la croûte océanique, qui ont des caractéristiques différentes³ (voir le tableau D.3).

Considérons seulement la croûte continentale dans un premier temps.

2. https://en.wikipedia.org/wiki/Earth's_internal_heat_budget

3. La surface de la croûte continentale ne correspond pas à la surface des terres émergées (29 % de la surface terrestre), mais correspond à la définition géologique, qui inclut les plateaux continentaux et les fonds marins peu profonds. Sa surface est donc supérieure aux 29 % des terres émergées, elle est d'environ 41 % (Davies & Davies 2010).

	Fraction de la surface terrestre	Épaisseur moyenne	Masse volumique moyenne
Croûte continentale	$f_c = 0,41$	$h_c = 35 \text{ km}$	$\rho_c = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Croûte océanique	$f_o = 0,59$	$h_o = 6 \text{ km}$	$\rho_o = 2,9 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Manteau supérieur	$f_m = 1,00$	$h_m = 400 \text{ km}$	$\rho_m = 3,3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

TABLE D.3 – Caractéristiques de la partie supérieure de l'enveloppe terrestre.

Dans ce cas, le nombre de noyaux de l'isotope i , par unité de surface terrestre, est donné par :

$$\frac{N_i}{S^c} = \frac{A_i \times m^c}{m_i}$$

où S^c est la surface de croûte continentale, A_i est l'abondance isotopique massique, m^c est la masse continentale de l'unité de surface et m_i est la masse d'un isotope. On a :

$$m^c = \rho^c \times h^c$$

où ρ^c est la masse volumique de la croûte continentale, et h^c est son épaisseur. Et :

$$m_i = \frac{M_i}{\mathcal{N}}$$

Ce qui donne :

$$\frac{N_i}{S^c} = A_i \times \frac{\mathcal{N}}{M_i} \times \rho^c \times h^c$$

D'où la puissance surfacique produite par l'isotope i :

$$\frac{P_i}{S^c} = E_i \frac{\ln 2}{T_i} \times A_i \frac{\mathcal{N}}{M_i} \times \rho^c \times h^c$$

Et celle, P^c , pour l'ensemble des quatre isotopes considérés sur la surface continentale S^c :

$$\frac{P^c}{S^c} = \left(\sum_{i=1}^4 \frac{E_i \times A_i}{T_i \times M_i} \right) \mathcal{N} \times \ln 2 \times \rho^c \times h^c$$

Numériquement, cela donne :

$$\begin{aligned} \frac{P^c}{S^c} = & \left(\underbrace{\frac{1,33 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 20900 \cdot 10^{-6} \times 117 \cdot 10^{-6}}{1,25 \cdot 10^9 \times 365,25 \times 24 \times 3600 \times 40 \cdot 10^{-3}}}_{^{40}\text{K}} + \underbrace{\frac{47,76 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 9,6 \cdot 10^{-6}}{14 \cdot 10^9 \times 365,25 \times 24 \times 3600 \times 232 \cdot 10^{-3}}}_{^{232}\text{Th}} \right. \\ & \left. + \underbrace{\frac{53,89 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 2,7 \cdot 10^{-6} \times 0,9927}{4,47 \cdot 10^9 \times 365,25 \times 24 \times 3600 \times 238 \cdot 10^{-3}}}_{^{238}\text{U}} + \underbrace{\frac{46,40 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 2,7 \cdot 10^{-6} \times 0,0072}{0,703 \cdot 10^9 \times 365,25 \times 24 \times 3600 \times 235 \cdot 10^{-3}}}_{^{235}\text{U}} \right) \\ & \times 6 \cdot 10^{23} \times \ln 2 \times 2,7 \cdot 10^3 \times 35 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

	Surface (m ²)	Puissance totale (ce calcul) (TW)	Puissance surfacique moyenne (mW·m ⁻²)	
			(Davies 2010)	Ce calcul
Continent	2,073 · 10 ¹⁴	14,4	70,9	69,4
Océan	3,028 · 10 ¹⁴	3,8	105,4	12,7
Total	5,101 · 10 ¹⁴	18,2	91,6	29,1

TABLE D.4 – Estimation des puissances thermiques continentale et océanique par Davies & Davies (2010) et ce calcul.

Ou encore :

$$\frac{P^c}{S^c} = \left(\underbrace{\frac{1,33 \times 20900 \times 117 \cdot 10^{-6}}{1,25 \times 40}}_{\text{}^{40}_{19}\text{K}} + \underbrace{\frac{47,76 \times 9,6}{14 \times 232}}_{\text{}^{232}_{90}\text{Th}} + \underbrace{\frac{53,89 \times 2,7 \times 0,9927}{4,47 \times 238}}_{\text{}^{238}_{92}\text{U}} + \underbrace{\frac{46,40 \times 2,7 \times 0,0072}{0,703 \times 235}}_{\text{}^{235}_{92}\text{U}} \right) \times \frac{10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 10^{-6}}{10^9 \times 365,25 \times 24 \times 3600 \cdot 10^{-3}} \times 6 \cdot 10^{23} \times \ln 2 \times 2,7 \cdot 10^3 \times 35 \cdot 10^3$$

Soit :

$$\frac{P^c}{S^c} = \left(\underbrace{0,065}_{\text{}^{40}_{19}\text{K}} + \underbrace{0,141}_{\text{}^{232}_{90}\text{Th}} + \underbrace{0,136}_{\text{}^{238}_{92}\text{U}} + \underbrace{5,46 \cdot 10^{-3}}_{\text{}^{235}_{92}\text{U}} \right) \times 0,2$$

Ce qui donne finalement :

$$\frac{P^c}{S^c} = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 69 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$$

À comparer avec un flux sur la croûte continentale mesuré de 71 mW·m⁻² (Davies & Davies 2010) (voir le tableau D.4). La différence obtenue avec Davies & Davies (2010), en particulier sur la croûte océanique provient des dorsales océaniques qui sont des lieux de diffusion efficaces de l'énergie thermique issue du manteau, autre que par la radioactivité. L'énergie thermique totale en surface issue des profondeurs terrestres est donc environ pour moitié due à la radioactivité et pour moitié due aux remontées de magma au niveau des dorsales.

On obtient ici une contribution relative des puissances surfaciques : 19 % pour le ⁴⁰₁₉K, 41 % pour le ²³²₉₀Th, 39 % pour le ²³⁸₉₂U et 2 % pour le ²³⁵₉₂U. Que l'on peut comparer aux valeurs plutôt admises⁴ qui sont respectivement : 15 %, 44 %, 39 % et 2 %.

D.4 Évolution temporelle

En résolvant l'équation différentielle (D.1), et en faisant la même hypothèse (raisonnable) d'isotopes se désintégrant en une seule fois, on obtient une décroissance exponentielle du nombre de noyaux radioactifs avec le temps :

$$N_i(t) = N_i^0 \exp\left(-\frac{\ln 2 \times t}{T_i}\right)$$

4. Voir par exemple : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chaleur-Terre-geothermie.xml>, https://en.wikipedia.org/wiki/Earth's_internal_heat_budget ou Turcotte & Schubert (2002), Arevalo *et al.* (2009).

Si on suppose que N_i^0 est le nombre de noyaux à l'époque actuelle, et que l'on souhaite donc remonter dans le temps, alors cette équation s'écrit :

$$N_i(t) = N_i^0 \exp\left(\frac{\ln 2 \times t}{T_i}\right)$$

où t varie de 4,543 Ga (l'âge de la Terre) à 0.

Compte tenu de l'équation (D.2), on en déduit l'évolution temporelle de la puissance masique dans 1 kg de matériau (croûte ou manteau – c, o, m), c, o, m :

$$P_i^{1 \text{ kg}}(t) = \frac{E_i \times \ln 2 \times \mathcal{N} \times A_i^{c,o,m}}{T_i \times M_i} \times \exp\left(\frac{\ln 2 \times t}{T_i}\right)$$

Pour obtenir la puissance surfacique à travers l'une ou l'autre des couches considérées, il suffit de multiplier l'expression précédente par $\rho^{c,o,m} \times h^{c,o,m}$:

$$P_i^{1 \text{ m}^2}(t) = P_i^{1 \text{ kg}}(t) \times \rho^{c,o,m} \times h^{c,o,m}$$

Et pour obtenir la puissance totale due à l'isotope i :

$$P_i^{c,o,m}(t) = P_i^{1 \text{ kg}}(t) \times \rho^{c,o,m} \times h^{c,o,m} \times f^{c,o,m} \times 4\pi R^2$$

où $R = 6371$ km est le rayon de la Terre, et f est la fraction de surface terrestre considérée.

La figure D.2 montre la somme de ces fonctions pour les trois composantes : croûte continentale, croûte océanique et manteau supérieur.

Les puissances thermiques totales actuelles sont de : 4,8 TW pour le potassium 40; 10 TW pour le thorium 232; 9,4 TW pour l'uranium 238 et 0,4 TW pour l'uranium 235 (Arevalo *et al.* 2009).

D'après Preuss (2011), les puissances thermiques totales provenant de la radioactivité dans la croûte et le manteau seraient de 8 TW pour l'uranium 238, 8 TW pour le thorium 232 et 4 TW pour le potassium 40, ce qui est similaire à ce que l'on obtient.

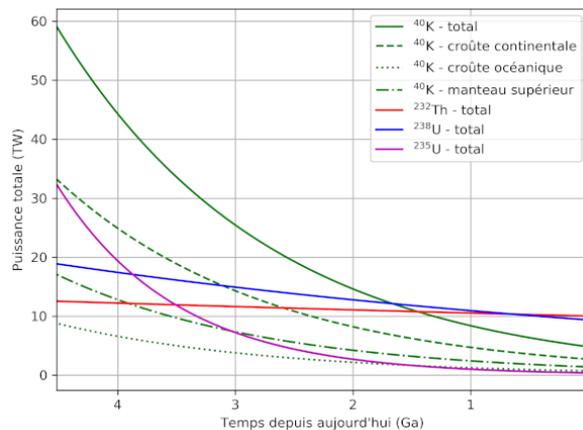


FIGURE D.2 – Puissance émise par la surface de la Terre due à la radioactivité des quatre principaux isotopes en fonction du temps. Pour chacun des isotopes, les contributions des croûtes continentales et océaniques et du manteau supérieur sont sommées. Leurs contributions pour le potassium 40 est ajoutée. Les valeurs nominales sont celles des paramètres décrits dans le texte.

Références

- ADEME (2011), *Dans l'air du temps, l'énergie éolienne*. https://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne.pdf.
- ADEME (2014), *Base carbone - documentation des facteurs d'émission de la base carbone*, <https://base-empreinte.ademe.fr/>.
- ADEME (2018), *Qu'est-ce que l'ACV?* <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.
- Albarède F. & Thomas P. (2000), *Lien entre le $\delta_{18}\text{O}$ des glaces et la température atmosphérique — Planet-Terre*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/temperature-des-glaces.xml>.
- Althaus V. (2019), *Le capitalisme à l'assaut des sciences humaines et sociales : l'exemple des revues payantes en psychologie*, *Zilsel*, **6**(2), pp. 9–24. <https://doi.org/10.3917/zil.006.0009>.
- Andreotti B. & Noûs C. (2020), *Contre l'imposture et le pseudo-rationalisme*, *Zilsel*, **7**(2), pp. 15–53. <https://doi.org/10.3917/zil.007.0015>.
- Arevalo R., McDonough W.F. & Luong M. (2009), *The K/U Ratio of the Silicate Earth : Insights into Mantle Composition, Structure and Thermal Evolution*, *Earth and Planetary Science Letters*, **278**(3-4), pp. 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.023>.
- Arghir C., Jouini T. & Dörfler F. (2018), *Grid-Forming Control for Power Converters Based on Matching of Synchronous Machines*, *Automatica*, **95**, pp. 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.05.037>.
- Arliss J.M., Kaplan E.N. & Galvin S.L. (2005), *The effect of the lunar cycle on frequency of births and birth complications*, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, **192**(5), pp. 1462–1464. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2004.12.034>.
- Arnold E.J. (2014), *Fraude et mauvaises pratiques dans les publications scientifiques*, *Hermès, La Revue*, **70**(3), pp. 197–204. <https://doi.org/10.3917/herm.070.0197>.
- Attali G., Bidar A., Caroti D. & Coutouly R., *Esprit critique, outils et méthodes pour le second degré*, Agir (Canopé 2019). <https://www.reseau-canope.fr/notice/esprit-critique.html>.
- Attard J. (2020), *À propos du critère de réfutabilité et des hypothèses ad hoc*. <https://cortecs.org/superieur/a-propos-du-critere-de-refutabilite-et-des-hypotheses-ad-hoc/>.
- Attard J. (2021), *Internet et désinformation : une fake news? – Le Cortecs*. <https://cortecs.org/informations-medias/internet-et-desinformation-une-fake-news/>.
- Auzanneau M. (2019), *Pic pétrolier probable d'ici 2025, selon l'Agence internationale de l'énergie*. <https://www.lemonde.fr/blog/petrole/2019/02/04/pic-petrolier-probable-dici-a-2025-selon-lagence-internationale-de-lenergie/>.
- Baan R., Grosse Y., Lauby-Secretan B., Ghissassi F.E., Bouvard V., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Islami F., Galichet L. & Straif K. (2011), *Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields*, *The Lancet Oncology*, **12**(7), pp. 624–626. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70147-4).
- Bailly S. (2013), *Quelle est la température du centre de la Terre?* <https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/quelle-est-la-temperature-du-centre-de-la-terrenbsp-11620.php>.

- Balian R. (2009), *Comparaisons des différentes formes d'énergie*. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Comparaison-differentes-formes-energies-Balian.xml>.
- Bar-On Y.M., Phillips R. & Milo R. (2018), *The biomass distribution on Earth*, Proceedings of the National Academy of Sciences, **115**(25), pp. 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
- Basdevant J.L., Rich J. & Spiro M., *Énergie Nucléaire* (Les Éditions de l'École polytechnique 2002).
- Benabderrazik M. (2018), *Les solutions de stockage dans la régulation du réseau électrique (1/2)*. <https://www.energystream-wavestone.com/2018/05/les-solutions-de-stockage-dans-la-regulation-du-reseau-electrique-12/>.
- Bender F.A.M., Rodhe H., Charlson R.J., Ekman A.M.L. & Loeb N. (2006), *22 Views of the Global Albedo—Comparison between 20 GCMs and Two Satellites*, Tellus, **58**, pp. 320–330. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00181.x>.
- Benelmir R., Lallemand A. & Feidt M. (2002), *Analyse exergétique - Définitions*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8015>.
- Bernard C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (Flammarion 2013).
- Berruyer (2011), *Climat : les cycles de Milankovitch*. <https://www.les-crisis.fr/climat-14-milankovitch/>.
- Berthet V., *L'erreur est humaine - Aux frontières de la rationalité* (CNRS Éditions 2018).
- Biraud F. & Zarka P. (1998), *Sur l'astrologie ; réflexions de deux astronomes*. <https://lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/GlobsPZpro/reflexions.html>.
- Blanc G. (2006), *Coup de Lune ?* <http://gblanc.fr/spip.php?article14>.
- Blondel S. (2003), *Généralisation de l'espérance d'utilité : le cas des jeux de loterie en France*, Économie et Prévision, **159**(3), pp. 105–112. <https://doi.org/10.3917/ecop.159.0105>.
- Bolton J.R. & Hall D.O. (1991), *The maximum efficiency of photosynthesis*, Photochemistry and Photobiology, **53**(4), pp. 545–548. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1991.tb03668.x>.
- Bonneuil C., Choquet P.L. & Franta B. (2021), *Early warnings and emerging accountability : Total's responses to global warming, 1971–2021*, Global Environmental Change, **71**, p. 10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102386>.
- Bornard P., Pavard M. & Testud G. (2005), *Réseaux d'interconnexion et de transport : fonctionnement*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d4091>.
- Bouchet-Petersen J. (2019), *Dans la lutte climatique, les Français poussent à des contraintes*, Libération.fr. https://www.liberation.fr/france/2019/09/20/dans-la-lutte-climatique-les-francais-poussent-a-des-contraintes_1752640.
- Bouneau S. (2018a), *Comment comprendre la transition énergétique ?* in *Conférence au LPS, Orsay* (2018a).
- Bouneau S. (2018b), *Quelles sources d'énergie pour répondre aux besoins futurs ?* in *EcoClim 2018* (2018b). https://pperso.ijclab.in2p3.fr/page_perso/Appert/ECOCLIM2018/.
- Boy D. (2002), *Les Français et les para-sciences : vingt ans de mesures*, Revue Française de Sociologie, **43**(1), pp. 35–45. http://www.persee.fr/doc/rfsoc_0035-2969_2002_num_43_1_5472.
- Boy D. & Michelat G. (1986), *Croyances aux parasciences : dimensions sociales et culturelles*, Revue Française de Sociologie, **27**(2), pp. 175–204. https://www.persee.fr/doc/rfsoc_0035-2969_1986_num_27_2_2302.
- BP (2018), *BP Statistical Review of World Energy*, Technical report, BP. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.

- BP (2019), *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- Broch H., *Comment déjouer les pièges de l'information ou les règles d'or de la zététique* (book-e-book 2008a). <https://www.book-e-book.com/livres/11-comment-dejouer-les-pieges-de-linformation-ou-les-regles-dor-de-la-zetetique-2915312126.html>.
- Broch H., *L'art du doute* (book-e-book 2008b), book-e-book edition. <https://www.book-e-book.com/livres/8-l-art-du-doute-9782915312119.html>.
- Bronner G. (2011), *Ce qu'Internet fait à la diffusion des croyances*, *Revue Européenne des Sciences Sociales*, **49**(1), pp. 35–60. <https://doi.org/10.4000/ress.805>.
- Bronner G., *La démocratie des crédules* (PUF 2013). https://www.puf.com/content/La_démocratie_des_crédules.
- Bronner G. & Géhin É., *L'inquiétant principe de précaution* (PUF 2008). <https://doi.org/10.3917/puf.bronn.2010.01>.
- Bunch K.J., Keegan T.J., Swanson J., Vincent T.J. & Murphy M.F.G. (2014), *Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines : childhood cancer risk in Britain 1962–2008*, *British Journal of Cancer*, **110**(5), pp. 1402–1408. <https://doi.org/10.1038/bjc.2014.15>.
- Burde G.I. (2004), *Lecture Notes on Physics of the Environment*. <http://www.bgu.ac.il/~georg/envphys.pdf>.
- Burtin A. & Silva V. (2015), *Technical and Economic Analysis of the European Electricity System with 60% RES*, Technical report, EDF R&D. https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-07/full_cost_workshop_7_technical_and_economic_analysis_of_the_european_electricity_system_with_60_res.pdf.
- Callen H.B., *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (Wiley 2005).
- Carlson S. (1985), *A double-blind test of astrology*, *Nature*, **318**(6045), pp. 419–425. <https://doi.org/10.1038/318419a0>.
- Caroti D. (2020), *Pourquoi enseigner l'esprit critique?* *Science et Pseudo-Sciences*, **333**. <https://www.afis.org/Pourquoi-enseigner-l-esprit-critique/>.
- Casacuberta N., Christl M., Vockenhuber C., Wefing A.M., Wacker L., Masqué P., Synal H.A. & Rutgers van der Loeff M. (2018), *Tracing the three atlantic branches entering the Arctic ocean with 129I and 236U*, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, **123**(9), pp. 6909–6921. <https://doi.org/10.1029/2018JC014168>.
- Castelle M. (2016), *Les techniques de fabrication de la grande statuaire en bronze 1540-1660 en France*, Ph.D. thesis. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01385286/document>.
- Caton D.B. & Wheatley P.A. (1998), *Nativity and the Moon : Do Birthrates Depend on the Phase of the Moon?* *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communications*, **74**, p. 50.
- CGDD (2017), *Ménages & Environnement – Les chiffres clés – Édition 2017*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/Datalab-25-menages-environnement-cc-ed-2017-oct2017-b.pdf>.
- CGDD (2019a), *Bilan énergétique de la France En 2018 – Données définitives*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-12/datalab-essentiel-195-bilan-energetique-france-2018-decembre2019.pdf>.
- CGDD (2019b), *Bilan énergétique de la France en 2018 – Données provisoires*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-04/datalab-essentiel-173-bilan-energetique-provisoire-2018-avril2019.pdf>.

- CGDD (2020a), *Bilan énergétique de la France pour 2018*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-64-bilan-energetique-france-2018-janvier2020.pdf>.
- CGDD (2020b), *L'empreinte carbone des Français reste stable*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-essentiel-204-l-empreinte-carbone-des-francais-reste-stable-janvier2020.pdf>.
- Chalmers A.F., *Qu'est-ce que la science?* (Le Livre de Poche 1990).
- Chanel O., Chichilnisky G. & Basiuk A. (2020), *Décisions en situation d'incertitude, peur et catastrophes*. <https://lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/dialogues-economiques/decisions-en-situation-dincertitude-peur-et-catastrophes>.
- Chaquin P. (2020), *Cours d'atomistique, liaison chimique et spectroscopie*. <https://www.lct.jussieu.fr/pagesperso/chaquin/>.
- Charpak G. & Broch H., *Devenez sorciers, devenez savants* (Odile Jacob 2002).
- Chevron (2007), *Diesel fuels technical review*, Technical report. <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>.
- CITEPA (2019), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques - bilan des émissions en France de 1990 à 2017*, Technical report, <https://www.citepa.org/fr/secten/>.
- Cook J., Oreskes N., Doran P.T., Anderegg W.R.L., Verheggen B., Maibach E.W., Carlton J.S., Lewandowsky S., Skuce A.G., Green S.A., Nuccitelli D., Jacobs P., Richardson M., Winkler B., Painting R. *et al.* (2016), *Consensus on consensus : a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming*, *Environmental Research Letters*, **11**(4), p. 048002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.
- Courtier P., *Équilibre radiatif de la planète terre, premiers éléments sur l'effet de serre* (École des Ponts - ParisTech 2010).
- Cummings R.E. (2020), *Writing knowledge : Wikipedia, public review, and peer review*, *Studies in Higher Education*, **45**(5), pp. 950–962. <https://doi.org/10.1080/03075079.2020.1749791>.
- Dale M.A.J. (2010), *Global energy modelling : a biophysical approach (gemba)*, Ph.D. thesis, University of Canterbury. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/5156>.
- David E., Wolfson M. & Fraifeld V.E. (2021), *Background Radiation Impacts Human Longevity and Cancer Mortality : Reconsidering the Linear No-Threshold Paradigm*, *Biogerontology*, **22**(2), pp. 189–195. <https://doi.org/10.1007/s10522-020-09909-4>.
- Davies J. & Davies D. (2010), *Earth's surface heat flux*, *Solid Earth*, **1**, pp. 5–24. <https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010>.
- Delaygue G. (2002), *Quelques chiffres sur les gaz à effet de serre*. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/data-g-e-s.xml>.
- Delmas R., Chauzy S., Verstraete J.M. & Ferré H., *Atmosphère, océan et climat* (Belin - Pour la Science 2007).
- Diallo M., Legras B., Ray E., Engel A. & Añel J.A. (2017), *Global distribution of CO₂ in the upper troposphere and stratosphere*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**(6), pp. 3861–3878. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3861-2017>.
- Dieudonné M. (2016), *Does electromagnetic hypersensitivity originate from nocebo responses? Indications from a qualitative study*, *Bioelectromagnetics*, **37**(1), pp. 14–24. <https://doi.org/10.1002/bem.21937>.
- DoE (2015), *An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities - Chapter 10 : Concepts in Integrated Analysis*, Technical report, Department of Energy. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter10.pdf>.
- DOE (2020), *Global Energy Storage Database – Energy Storage Systems*. <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>.

- Dorion N. & Mouchotte J. (2012), *Jardiner avec la Lune : mythe ou réalité*, Technical report, Société Nationale d'Horticulture de France. <https://www.snhf.org/wp-content/uploads/2016/10/jardiner-avec-la-lune.pdf>.
- Draper G., Vincent T., Kroll M.E. & Swanson J. (2005), *Childhood Cancer in Relation to Distance from High Voltage Power Lines in England and Wales : A Case-Control Study*, *BMJ*, **330**(7503), p. 1290. <https://doi.org/10.1136/bmj.330.7503.1290>.
- Drummond C. & Fischhoff B. (2017), *Individuals with greater science literacy and education have more polarized beliefs on controversial science topics*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**(36), pp. 9587–9592. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704882114>.
- Dufresne J.L. & Treiner J. (2011), *L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit !* *La Météorologie*, **72**, pp. 31–41. <https://doi.org/10.4267/2042/39839>.
- Dugast C. & Soyeux A. (2019), *Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'état face à l'urgence climatique*, Technical report, Carbone 4. <https://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part>.
- Durand B. (2018), *La raréfaction prochaine des combustibles fossiles va contraindre de hâter la transition énergétique*. <https://www.europeanscientist.com/fr/opinion/rarefaction-prochaine-combustibles-fossiles/>.
- Eckerman K., Harrison J., Menzel H.G. & Clement C. (2012), *Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60*, *Annals of the ICRP*, **119**. [https://www.icrp.org/docs/P_119_JAICRP_41\(s\)_Compendium_of_Dose_Coefficients_based_on_ICRP_Publication_60.pdf](https://www.icrp.org/docs/P_119_JAICRP_41(s)_Compendium_of_Dose_Coefficients_based_on_ICRP_Publication_60.pdf).
- Eckley Selin N. (1998), *Tidal Power – Types & Facts*. <https://www.britannica.com/science/tidal-power>.
- EDF (2012), *Le solaire thermodynamique à concentration*. https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/thermique/enjeux/modernisation-du-parc/le_solaire_thermodynamique_a_concentration.pdf.
- Evans S. (2021), *Analysis : Which countries are historically responsible for climate change?* <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>.
- Factsory (2019), *Les agences réglementaires ne reflètent pas la science*. <http://factsory.org/2019/les-agences-reglementaires-ne-refletent-pas-la-science/>.
- Factsory (2021), *Bronner et sa méthodologie crédule*. <https://factsory.org/2021/bronner-et-sa-methodologie-credule/>.
- Fagherazzi G., Vilier A., Saes Sortorelli D., Lajous M., Balkau B. & Clavel-Chapelon F. (2013), *Consumption of artificially and sugar-sweetened beverages and incident type 2 diabetes in the Etude Epidémiologique auprès des femmes de la Mutuelle Générale de l'Education Nationale–European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition cohort*, *The American Journal of Clinical Nutrition*, (97), pp. 517–523. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.050997>.
- Farina M., Pasquinelli E. & Zimmerman G., *Esprit Critique, Esprit Scientifique*, 1 (Le Pommier 2017).
- Farina M., Pasquinelli E. & Zimmerman G., *Esprit Critique, Esprit Scientifique*, 2 (Le Pommier 2018).
- Ferroir T. (2012), *Ce qu'il faut comprendre et retenir du $\delta_{18}O$ en tant qu'indicateur paléoclimatique*. <http://tristan.ferroir.fr/index.php/2012/01/18/ce-qu'il-faut-comprendre-et-retenir-du-delta-18-o-en-tant-quindicateur-paleoclimatique/>.
- Feynman R., *Feynman Lectures on Physics*, volume 1 (1963). https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_toc.html.
- Fiolet T. (2019), *Perception des risques liés à la santé et le traitement de l'information scientifique dans les médias : les résultats de l'enquête*. <https://quoidansmonassiette.fr/>

- perception-des-risques-lies-sante-le-traitement-de-linformation-scientifique-dans-medias-resultats-enquete/.
- Flocard H., Pervès J.P. & Hulot J.P. (2014), *Électricité : intermittence et foisonnement des énergies renouvelables*, Techniques de l'Ingénieur, <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8586>.
- Foos J., *Manuel de radioactivité* (Hermann 2009).
- Foucart S., Horel S. & Laurens S., *Les gardiens de la raison* (La Découverte 2020).
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P. *et al.* (2019), *Global Carbon Budget 2019*, Earth System Science Data, **11**(4), pp. 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Fröhlich C. (2006), *Solar Irradiance Variability since 1978, Revision of the PMOD Composite during Solar Cycle 21*, Space Science Reviews, **125**, pp. 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9046-5>.
- Gans J. & Leigh A. (2015), *Does the Lunar Cycle Affect Birth and Deaths?* Journal of Articles in Support of the Null Hypothesis, **11**(2), pp. 31–36. <https://www.jasnh.com/pdf/Vol11-No2-article3.pdf>.
- Ghanty Y. (2018), *Étude du lien entre la fréquence et les puissances actives pour le dimensionnement d'un microréseau alternatif îloté avec sources d'énergie renouvelables*, Ph.D. thesis, Toulouse. <https://oatao.univ-toulouse.fr/24284/>.
- GIEC (2006), *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 1 - General guidance and reporting*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf.
- GIEC (2007), *Fourth Assessment Report : Climate change 2007 : The AR4 synthesis report*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>.
- GIEC (2013), *Climate change 2013 : The Physical Science Basis*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- GIEC (2018), *Global warming of 1.5 °C*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- GIEC (2021), *Climate change 2021 : The physical science basis*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Goode P.R., Pallé E., Shoumko A., Shoumko S., Montañes-Rodriguez P. & Koonin S.E. (2021), *Earth's Albedo 1998–2017 as Measured From Earthshine*, Geophysical Research Letters, **48**(17), p. e2021GL094888. <https://doi.org/10.1029/2021GL094888>.
- Gouhier C., Le Ruz P. & Herriau J.C. (2008), *Enquête citoyenne « Vivre avec une ligne THT? »*. https://www.criirem.org/wp-content/uploads/2015/11/090123_synthese_enquete_tht-2.pdf.
- Grand D., Brun C.L. & Vidil R. (2015), *Intermittence des énergies renouvelables et mix électrique*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-in301>.
- Grenèche D., Chauvin A. & Laugier F. (2012), *Uranium : ressources, consommation et évolutions du marché*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bn3571>.
- Guaric A. (2020), *Climat : les chercheurs « s'attendent à des ouragans plus puissants et des pluies plus intenses »*, Le Monde.fr. https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/08/27/climat-le-nhc-s-attend-a-des-ouragans-plus-puissants-associes-a-des-pluies-plus-intenses_6050127_3244.html.
- Guilford M.C., Hall C.A., O'Connor P. & Cleveland C.J. (2011), *A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production*, Sustainability, **3**(10), pp. 1866–1887. <https://doi.org/10.3390/su3101866>.

- Gunn K. & Stock-Williams C. (2012), *Quantifying the global wave power resource*, *Renewable Energy*, **44**, pp. 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>.
- Hall C.A., Lambert J.G. & Balogh S.B. (2014), *EROI of Different Fuels and the Implications for Society*, *Energy Policy*, **64**, pp. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
- Halley J. (2018), *L'épuisement des ressources minérales et la notion de matériaux critiques*, *La Revue Nouvelle*, **4**, pp. 34–40. <https://doi.org/10.3917/rn.184.0034>.
- Hamada L., Iyama T., Onishi T. & Watanabe S. (2009), *The Specific Absorption Rate of Mobile Phones Measured in a Flat Phantom and in the Standardized Human Head Phantom*, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (2009). https://www.ieice.org/publications/proceedings/bin/pdf_link.php?fname=21S4-1.pdf&iconf=EMC&year=2009&vol=14&number=21S4-1&lang=E.
- Hamada L. & Watanabe S. (2016), *Calibration of SAR Probe*, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, **63**(1), pp. 135–150. <https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol63no1/journal-vol63no1-02-07.pdf>.
- Haynes W.M., *CRC Handbook of Chemistry and Physics : A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data* (CRC Press 2017).
- Hilbert M. & López P. (2011), *The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*, *Science*, **332**, pp. 60–65. <https://doi.org/10.1126/science.1200970>.
- Hocquet A. (2020), *Reproduire un résultat scientifique : plus facile à dire qu'à faire*, *The Conversation*. <http://theconversation.com/reproduire-un-resultat-scientifique-plus-facile-a-dire-qua-faire-129848>.
- Hróbjartsson A. & Gøtzsche P.C. (2010), *Placebo interventions for all clinical conditions*, *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, **1**, p. CD003974. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd003974.pub3>.
- Huet S. (2018), *OGM-poisons? La vraie fin de l'affaire Séralini*. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2018/12/11/ogm-poisons-la-vraie-fin-de-laffaire-seralini/>.
- Huet S. (2020), *Ce que révèle le canular « Hydroxychloroquine »*. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2020/08/17/que-revele-le-canular-hydroxychloroquine/>.
- Hugo V., *L'art et la science* (Actes Sud 1993).
- ICNIRP (2020), *Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*, *Health Physics*, **118**(5), pp. 483–524. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>.
- ICRP (2017), *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Technical report, ICRP. [https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP Publication 103](https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103).
- IEA (2018), *World Energy Outlook 2018*, Technical report, International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
- IEA (2019), *Key World Energy Statistics 2019*, Technical report. <https://www.iea.org/events/key-world-energy-statistics-2019>.
- IEA & RTE (2021), *Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050*, Technical report. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese ENR horizon 2050_FR.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese_ENR_horizon_2050_FR.pdf).
- INRS (2001), *Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques : champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz)*, *Hygiène et sécurité du travail*. [https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND 2143](https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202143).

- IUPAC (2016), *IUPAC Announces the Names of the Elements 113, 115, 117, and 118*. <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>.
- Jackson J.D., *Électrodynamique classique* (Dunod 2021).
- Johnsen S., Dansgaard W. & Clausen H. (1972), *Oxygen Isotope Profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets*, *Nature*, **235**, pp. 429–434. <https://doi.org/10.1038/235429a0>.
- Jouzel J. (2022), *Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du développement durable dans l'enseignement supérieur*, Technical report. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/former-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique-dans-le-superieur-83888>.
- Jouzel J. & Debroise A., *Le défi climatique, objectif +2 °C* (Dunod 2014).
- Jouzel J., Lorius C., J. Johnsen S. & Grootes P. (1994), *Climate Instabilities : Greenland and Antarctic Records*, *Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II : Sciences de la Terre et des Planetes*, **319**. <https://hal.science/hal-03343799>.
- Juignet P. (2015), *Karl Popper et les critères de la scientificité*, *Philosophie, Science et Société*.
- Kahneman D., *Système 1 / Système 2 : les deux vitesses de la pensée* (Flammarion 2012).
- Keeling R.F., Manning A.C., McEvoy E.M. & Shertz S.R. (1998), *Methods for Measuring Changes in Atmospheric O₂ Concentration and Their Application in Southern Hemisphere Air*, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **103**(D3), pp. 3381–3397. <https://doi.org/10.1029/97JD02537>.
- Kleidon A., Miller L. & Gans F., *Physical Limits of Solar Energy Conversion in the Earth System*, in H. Tüysüz & C.K. Chan, eds., *Solar Energy for Fuels*, volume 371 (Springer International Publishing 2015), pp. 1–22. https://doi.org/10.1007/128_2015_637.
- Kopp G. & Lean J.L. (2011), *A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance*, *Geophysical Research Letters*, **38**, p. L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>.
- Krakowski V. (2016), *Intégration du renouvelable et stratégie de déploiement du réseau électrique : réconciliation d'échelles spatio-temporelles dans des exercices prospectifs de long terme*, Ph.D. thesis, Université de recherche Paris Sciences et Lettres. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01557528v2>.
- Krewski D., Turner M.C., Lemyre L. & Lee J.E. (2012), *Expert vs. public perception of population health risks in Canada*, *Journal of Risk Research*, **15**(6), pp. 601–625. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.649297>.
- Lambert J.G., Hall C.A., Balogh S., Gupta A. & Arnold M. (2014), *Energy, EROI and quality of life*, *Energy Policy*, **64**, pp. 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>.
- Larrère C. & Larrère R. (2001), *Les OGM entre hostilité et principe de précaution*, *Courrier de l'environnement de l'INRA*, **43**. <https://hal.inrae.fr/hal-02674663>.
- Laurens S., *Militer Pour La Science*, En Temps et Lieux (Éditions EHESS 2019).
- Lavy P. (2004), *Production d'électricité par aménagements hydrauliques*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d4008>.
- Le Nir M. (2008), *Ressources géothermiques du département de l'Essonne*, Technical Report BRGM/RP-56966-FR, Bureau de Recherche Géologique et Minière. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56966-FR.pdf>.
- Legras B., Dufresne J.L. & Megie G. (2000), *Quelles sont les propriétés communes des gaz à effet de serre?* <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/gaz-effet-serre.xml>.
- Levrard B. (2005), *Cycles de Milankovitch et variations climatiques : dernières nouvelles*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/milankovitch-2005.xml>.

- Lions J.L., Manley O.P., Temam R. & Wang S. (1997), *Physical Interpretation of the Attractor Dimension for the Primitive Equations of Atmospheric Circulation*, Journal of the Atmospheric Sciences, **54**(9), pp. 1137–1143. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054%3C1137:PIOTAD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054%3C1137:PIOTAD%3E2.0.CO;2).
- Lorenz E.N. (1963), *Deterministic Nonperiodic Flow*, Journal of the Atmospheric Sciences, **20**(2), pp. 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2).
- Lorius C. & Merlivat L. (1975), *Distribution of Mean Surface Stable Isotopes Values in East Antarctica : Observed Changes with Depth in Coasted Area*, General assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics; Grenoble, France; 25 Aug 1975. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/07/242/7242101.pdf?r=1.
- Machon D., *Les bavures scientifiques, quand les scientifiques se prennent les pieds dans la démarche*, volume 36 (book-e-book 2015). <https://www.book-e-book.com/livres/133-les-bavures-scientifiques-9782372460095.html>.
- Messerli F.H. (2012), *Chocolate Consumption, Cognitive Function, and Nobel Laureates*, New England Journal of Medicine, **367**(16), pp. 1562–1564. <https://doi.org/10.1056/NEJMon1211064>.
- Miller L.M., Gans F. & Kleidon A. (2011), *Estimating Maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences*, Earth System Dynamics, pp. 1–12. <https://doi.org/10.5194/esd-2-1-2011>.
- Monteith J.L. (1972), *Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems*, The Journal of Applied Ecology, **9**(3), p. 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>.
- Morton-Pradhan S., Bay R.C. & Coonrod D.V. (2005), *Birth rate and its correlation with the lunar cycle and specific atmospheric conditions*, American Journal of Obstetrics and Gynecology, **192**(6), pp. 1970–1973. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2005.02.066>.
- Moyen J.F. (2001), *Connaître le géotherme en profondeur*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/geotherme-profond.xml>.
- Nénot J.C. (2009), *Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique*, Technical report, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (France). http://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf.
- Ngô C. (2016), *Stockage de l'énergie*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8090>.
- Nifenecker H. (2014), *Physique des éoliennes*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8584>.
- OFSP (2016), *Four à micro-ondes*, Technical report, Office fédéral de la santé publique (Suisse). <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-mikrowellenofen.pdf.download.pdf/faktenblatt%20mikrowellenofen%20f.pdf>.
- OIE (2017), *Gestion de l'équilibre du système électrique*, Observatoire de l'Industrie Électrique. https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/oi_-_fiche_pedago_flexi_avril_2017.pdf.
- OIE (2020), *Primaire ou finale : comment comptabiliser l'énergie?* Observatoire de l'Industrie Électrique. https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/fiche_pedago_primaire_ou_finale_-_coment_comptabiliser_l_energie_-_mars_2020.pdf.
- Oreskes N. & Conway E.M., *Marchands de Doute* (Le Pommier 2012).
- Osmundsen M., Bor A., Vahlstrup P.B., Bechmann A. & Petersen M.B. (2021), *Partisan Polarization Is the Primary Psychological Motivation behind Political Fake News Sharing on Twitter*, American Political Science Review, **115**(3), pp. 999–1015. <https://doi.org/10.1017/S0003055421000290>.

- Parrenin F. (2013), *Quels sont les liens entre CO₂ et température?* <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/liens-entre-co2-temperature-par-frederic-parrenin>.
- Parrenin F., Masson-Delmotte V., Köhler P., Raynaud D., Paillard D., Schwander J., Barbante C., Landais A., Wegner A. & Jouzel J. (2013), *Synchronous Change of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature During the Last Deglacial Warming*, *Science*, **339**(6123), pp. 1060–1063. <https://doi.org/10.1126/science.1226368>.
- Pegion K. (2020), *Des prévisions météorologiques à 28 jours*, *Pour la Science*, **515**. <https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/des-previsions-meteorologiques-a-28-jours-19923.php>.
- Pennec F.L. (2001), *Analyse de champ proche et de couverture radioélectrique*, Technical report, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne. [https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/Analyse de champ proche et de couverture radioelectrique.pdf](https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/Analyse_de_champ_proche_et_de_couverture_radioelectrique.pdf).
- Perdijon J., *La formation des idées en physique, du phénomène à la théorie* (Dunod 2007).
- Philip S.Y., Kew S.F., van Oldenborgh G.J., Anslow F.S., Seneviratne S.I., Vautard R., Coumou D., Ebi K.L., Arrighi J., Singh R., van Aalst M., Pereira Marghidan C., Wehner M., Yang W., Li S. *et al.* (2021), *Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021*, *Earth System Dynamics*. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.
- Planton S. (2020), *La température moyenne de la Terre*, Encyclopédie de l'environnement. <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/temperature-moyenne-terre-rechauffement-climatique/>.
- Poincaré H., *La science et l'hypothèse* (Ernest Flammarion 1917).
- Pontcerq, *De la faiblesse de l'esprit critique envisagé comme compétence* (2022). [http://www.pontcerq.fr/wp-content/uploads/2022/09/De-la-faiblesse-de-lesprit-critique-envisagé-etc..pdf](http://www.pontcerq.fr/wp-content/uploads/2022/09/De-la-faiblesse-de-lesprit-critique-envisage-etc..pdf).
- Preuss P. (2011), *What Keeps the Earth Cooking?* <https://newscenter.lbl.gov/2011/07/17/kamland-geoneutrinos/>.
- Rakotoarison S. (2014), *Karl Popper (1902-1994) : la réfutabilité, critère de la scientificité*. <http://www.agoravox.fr/culture-loisirs/culture/article/karl-popper-1902-1994-la-156881>.
- Ramunni G., *Les lieux des erreurs scientifiques* (Le Cavalier Bleu 2012).
- Ramus F. (2014), *Comprendre le système de publication scientifique*, *Science et Pseudo-Sciences*, **308**. <https://www.afis.org/Comprendre-le-systeme-de-publication-scientifique>.
- Rasplus V., *Ce que la science veut dire, ce que la pseudo-science veut faire*, in *Sciences et Pseudo-Sciences, Regards Des Sciences Humaines*, Sciences et Philosophie (Éditions Matériologiques, « Sciences & philosophie » 2014).
- Ravijen (2018), *L'empreinte carbone des français, un sujet tabou?* <http://ravijen.fr/?p=440>.
- Reinsel D., Gantz J. & Rydning J. (2018), *The Digitization of the World from Edge to Core*. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
- Rochoy M. (2020), *Le meilleur article de tous les temps*. <http://www.mimiryudo.com/blog/2020/08/le-meilleur-article-de-tous-les-temps/>.
- Roques A., *Processionary Moths and Climate Change : An Update* (Springer Dordrecht 2017). <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7>.
- Rowe D. (2018), *Emmy Noether : le centenaire d'un théorème*, *Pour la Science*, **490**. <https://www.pourlascience.fr/sd/mathematiques/emmy-noether-le-centenaire-d-un-theoreme-14564.php>.

- Royer J.F. & Nicolis C. (1994), *Chaos et Météorologie*, La Météorologie, **8**(5), pp. 38–53. <https://doi.org/10.4267/2042/53401>.
- RTE (2004), *Mémento de la sûreté du système électrique*. <https://docplayer.fr/1151047-Memento-de-la-surete-du-systeme-electrique.html>.
- RTE (2016), *Bilan électrique 2016*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité.
- RTE (2017), *Bilan électrique 2017*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan_electrique_2017.pdf.
- RTE (2018a), *Bilan Électrique 2018*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan_electrique_2018.pdf.
- RTE (2018b), *Panorama de l'électricité renouvelable au 31 decembre 2018*, Technical report. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama de l'électricité renouvelable au 31 decembre 2018_compressed.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama_de_l_electricite_renouvelable_au_31_decembre_2018_compressed.pdf).
- RTE (2019), *Bilan électrique 2019*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan-electrique-2019_1_0.pdf.
- Rubin G.J., Das Munshi J. & Wessely S. (2005), *Electromagnetic Hypersensitivity : A Systematic Review of Provocation Studies*, Psychosomatic Medicine, **67**(2), pp. 224–232. <https://doi.org/10.1097/01.psy.0000155664.13300.64>.
- Russell B., *Is There a God?* in J.G. Slater & P. Köllner, eds., *The Collected Papers of Bertrand Russell, Volume 11 : Last Philosophical Testament, 1943-68* (Routledge, London 1997), pp. 543–548. https://cortecs.org/wp-content/uploads/2014/12/Is-there-a-God_Russell_1952.pdf.
- Sapy G. (2019), *Les énergies renouvelables intermittentes mettent-elles en cause la stabilité des réseaux?* Science et Pseudo-sciences, **329**. <https://www.afis.org/Les-energies-renouvelables-intermittentes-mettent-elles-en-cause-la-stabilite>.
- Sawerysyn J.P. (1993), *Les pouvoirs calorifiques*, Bulletin de l'Union des Physiciens, **87**, p. 11. <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD N° 3 BUP DOC V 4.0/Disk 1/TEXTES/1993/07520401.PDF>.
- SDES (2021), *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2021*, Technical report. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab_81_chiffres_cles_du_climat_edition_2021.pdf.
- Siméon G. (2012), *Données le vertige*. https://www.liberation.fr/futurs/2012/12/03/donnees-le-vertige_864585/.
- Sourisse (2018), *Biomasse et énergie : des ressources primaires aux produits énergétiques finaux*. <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>.
- Speich S., Reverdin G., Mercier H. & Jeandel C. (2015), *L'océan, réservoir de chaleur*, Plateforme Océan & Climat. http://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2015/03/FichesScientifiques-ocean-reservoir-chaleur_BD.pdf.
- Staboulidou I., Soergel P., Vaske B. & Hillemanns P. (2008), *The Influence of Lunar Cycle on Frequency of Birth, Birth Complications, Neonatal Outcome and the Gender : A Retrospective Analysis*, Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica, **87**(8), pp. 875–879. <https://doi.org/10.1080/00016340802233090>.
- Strugarek A., Beaudoin P., Charbonneau P., Brun A.S. & do Nascimento J.D. (2017), *Reconciling Solar and Stellar Magnetic Cycles with Nonlinear Dynamo Simulations*, Science, **357**(6347), pp. 185–187. <https://doi.org/10.1126/science.aal3999>.
- Thomas P. (2014), *La chaleur de la Terre et la géothermie*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chaleur-Terre-geothermie.xml>.
- Thompson P.D. (1957), *Uncertainty of Initial State as a Factor in the Predictability of Large Scale Atmospheric Flow Patterns*, Tellus, **9**(3), pp. 275–295. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v9i3.9111>.

- Treiner J. (2015), *Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone*, Reflets de la Physique, **43**. <https://doi.org/10.1051/refdp/201543046>.
- Treiner J. (2016), *Le taux de retour énergétique, une mesure de l'efficacité sociétale des sources d'énergie*, Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/chronique-retour-energetique-39038/>.
- Treiner J. (2018), *Énergies de stock, énergies de flux*, Le Bup, **112**. https://enseignement-scientifique.discip.ac-caen.fr/IMG/pdf/energies_de_stock_energies_de_flux.pdf.
- Trenberth K.E., Fasullo J.T. & Kiehl J. (2009), *Earth's Global Energy Budget*, Bulletin of the American Meteorological Society, **90**(3), pp. 311–324. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>.
- Turcotte D.L. & Schubert G., *Geodynamics* (Cambridge University Press 2002).
- UNESCO (2005), *Vers les sociétés du savoir*, Technical report, UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000141907>.
- Valentin L., *Le Monde Subatomique* (Hermann 1986).
- Valentin L., *L'univers mécanique, introduction à la physique et à ses méthodes* (Hermann 1995).
- Verrier M., Chay P. & Gabion M. (2009), *Turboalternateurs*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v2-d3530>.
- Von Neumann J. & Morgenstern O., *Theory of games and economic behavior* (Princeton University Press 1944).
- Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., Czerski K., Gottlieb S. & Hussein A. (2013), *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*, Energy, **52**, pp. 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>.
- Witthöft M. & Rubin G.J. (2013), *Are Media Warnings about the Adverse Health Effects of Modern Life Self-Fulfilling? An Experimental Study on Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to Electromagnetic Fields (IEI-EMF)*, Journal of Psychosomatic Research, **74**(3), pp. 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2012.12.002>.
- Yeganefar M. (2013), *À propos de la science et de la méthode scientifique*. <https://blogs.univ-poitiers.fr/n-yeganefar/2013/09/07/a-propos-de-la-science-et-de-la-methode-scientifique/>.
- Yiou P., *Le temps s'est-il détraqué? Comprendre les catastrophes climatiques* (Buchet-Chastel 2015).
- Zhu X.G., Long S.P. & Ort D.R. (2008), *What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?* Current Opinion in Biotechnology, pp. 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>.

Index

- activité, 51, 52, 64, 65, 69, 70
- albédo, 89, 90, 95, 96, 98, 101
- alpha (radioactivité), 51–53, 55, 58, 59, 61, 64, 67, 70
- analyse en cycle de vie (ACV), 151, 202, 204, 205
- anomalie de température, 104, 113, 119, 120, 123
- argument d'autorité, 24
- aspartame, 39
- astrologie, 4–6, 24, 25, 33, 35, 36
- azote, 86, 106, 109, 115, 118
- aérosols, 101, 115
- becquerel, 52, 64
- beta (radioactivité), 49, 51–53, 55, 59, 61, 64, 70, 74
- biais cognitif, 3, 22, 34, 40, 41
- biomasse, 142, 143, 147, 149, 150, 157, 164, 165, 169, 199
- Brandolini, loi de, 22
- cage de Faraday, 223, 224
- calorie, 141
- calotte polaire, 121, 132
- cancer, 62, 64, 65, 69
- cancérogène, 226, 227
- chaos (système chaotique), 82
- charge de la preuve, 22
- chargé-e de recherche, 15
- chimie, 11, 12
- CIRC, 226
- consensus, 17, 18
- constante radioactive, 51, 53
- constante solaire, 89, 91, 95, 100, 119
- contamination, 61
- controverse, 3, 4, 17, 18, 29, 38, 40
- corps noir, 90, 92–94, 98
- corrélation-causalité, 13, 25
- croyance, 2–6, 21, 24, 25, 28, 31–34
- créationnisme, 25
- DAS (Débit d'Absorption Spécifique), 224–226, 230
- directeur-riche de recherche, 15
- dogmatisme, 3, 20, 23
- dose absorbée, 62, 63
- dose efficace, 62, 64
- dose équivalente, 62–66
- double aveugle, 36
- Draper (étude), 231
- débit de dose, 62
- effet Barnum, 25
- effet nocebo, 227
- effet Pangloss, 25
- empirisme, 13, 38
- enseignant-e-chercheur-euse, 15, 16
- entropie, 140
- EPIC, 15
- EPST, 15
- esprit critique, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 20, 21, 34
- excentricité, 126
- exergie, 140
- expérimentation, 11–15, 18, 20, 36, 39
- facteur d'émission, 201, 202, 204, 205
- facteur de charge, 148, 163, 165–167, 169, 173, 177, 194–196
- facteur de dose, 64
- fake news, 33
- falsifiabilité, 15
- fission nucléaire, 46, 48, 51, 53, 55, 58, 60, 67, 73–79, 144, 147, 150
- forçage radiatif, 101–104, 108, 113, 120, 134, 135
- fossile (énergie), 142, 143, 145–147, 149, 150, 157, 158, 169, 198–201, 204, 207, 209
- fraude, 19
- fusion froide, 18
- gamma (radioactivité), 53, 55, 56, 58, 60–62, 67, 68, 70, 71, 74, 75
- GIEC, 5, 17
- glaciation, 83, 113, 126
- glaciers, 121, 125
- gray, 62, 64
- géothermique (énergie), 143, 147, 149, 150, 164, 174
- hydraulique (énergie), 142, 143, 147–150, 164, 169, 176, 190, 193, 205
- hypothèse, 12–14, 16, 18, 21, 31

- ICNIRP, 226
 inertie thermique, 88, 121
 interdisciplinarité, 11
 internet, 12
 Interphone (étude), 231
 irradiation, 61, 62, 64, 65, 67, 69
 kilowatt-heure, 141
 Kirchhoff (loi du rayonnement de), 94, 105, 106
 lobe de rayonnement, 218, 220
 magnétron, 228
 marchand de doute, 4, 29, 44
 marchand de peur, 25, 44
 maître-sse de conférences, 15
 mille-feuille argumentatif, 22
 modérateur (de neutrons), 75–78
 moment dipolaire, 109, 110, 117
 moteur surnuméraire, 5, 6, 34, 35
 médias, 2, 3, 5–7, 21, 24, 26, 28, 33, 43
 mémoire de l'eau, 18
 méta-analyse, 17
 métabolisme, 142
 nombre de masse, 46, 47
 nuages, 82, 87, 89, 97, 99, 102, 104, 106, 131
 nucléaire (centrale), 142, 144, 148, 150, 163, 169, 188, 189, 193, 205
 nucléaire (énergie), 139, 142, 143, 145, 147, 150, 155, 157, 163, 169, 194–196, 205
 numéro atomique, 46
 obliquité, 127
 oxygène, 86, 106, 109, 115, 117, 118, 128, 129, 131
 ozone (couche d'), 44, 85, 101, 105
 partie par million (ppm), 115
 paréidolie, 40
 pesticide, 4, 6, 44
 photosynthèse, 118
 photovoltaïque, 143, 147–149, 165–167, 190, 194–197
 physique, 12
 placebo (effet), 29
 Planck (loi de), 93
 pluridisciplinarité, 11
 polarisation (molécule d'eau), 226, 228
 politique, 20, 34, 38, 41, 44
 Popper (Karl), 15
 pouvoir calorifique, 141, 159, 172, 202, 203
 Pouvoir de Réchauffement Global (PRG), 107, 108, 198, 204
 principe de parcimonie, 24
 probabilité, 22, 37–39, 41
 professeur·e des universités, 15
 prudence, 38
 précaution, 38
 précession, 127
 prévention, 38
 pseudo-science, 20, 21
 rationalisme, 13, 14
 referee, 16
 relativisme, 2, 29
 Representative Concentration Pathway (RCP), 134
 revue par les pairs, 4, 14, 16, 20, 43
 revue prédatrice, 16
 revue à comité de lecture, 16
 risque zéro, 39, 41
 réfutabilité, 15, 17, 18, 21, 24
 rétroaction, 102
 scepticisme, 3, 5
 scintigraphie, 69
 section efficace, 74, 75
 Shared Socio-economic Pathway (SSP), 135
 sievert, 62, 64
 sophisme, 22
 sourcellerie, 5, 6, 36
 Stefan-Boltzmann (loi de), 92–94, 99, 104
 stratosphère, 85, 105, 106, 113, 120
 sérendipité, 18
 thermorégulation, 226
 tonne-équivalent-pétrole (tep), 141
 transdisciplinarité, 11
 tropopause, 85, 104
 troposphère, 85, 104–106, 113, 115
 uranium, 142–145, 147, 148, 150, 160, 161, 163, 174, 197
 vapeur d'eau, 87, 88, 97, 104, 106, 112, 131
 vecteur de Poynting, 218, 219
 Wien (loi de), 93, 106
 zététique, 6, 10, 19, 20, 22
 électron-volt, 141
 émissivité, 94–96, 105
 énergie de liaison, 46–48, 52, 73, 74
 éolienne, 148, 150, 167–169, 180, 188
 éolienne (énergie), 142, 143, 147–150, 164, 167, 169, 177, 190–192, 194, 195, 197
 épaisseur de peau, 223

Table des matières

Pourquoi Camille Noûs?	VII
Remerciements	IX
Introduction	1
1 La méthode scientifique	9
1.1 Comment se fait la science?	10
1.1.1 Science et technologie	10
1.1.2 Les domaines scientifiques	10
1.1.3 Qu'est-ce que la physique?	11
1.1.4 La méthode scientifique	12
1.1.5 Qui sont les scientifiques?	15
1.1.6 Le processus de publication d'un résultat scientifique	16
1.1.7 Consensus et controverses	17
1.1.8 L'erreur fait partie de la méthode	18
1.1.9 La capitalisation de la science	19
1.2 Quelques méthodes autour de l'esprit critique	19
1.2.1 La zététique	19
1.2.2 Comprendre le monde qui nous entoure	20
1.2.3 Sciences et pseudo-sciences	20
1.2.4 Croyances	21
1.2.5 Règles d'or de la zététique	22
1.3 Internet	26
1.3.1 Qu'est-ce qu'internet?	26
1.3.2 Diffusion du savoir	27
1.3.3 Internet comme support du savoir	28
1.3.4 Le biais de confirmation	31
1.3.5 Le marché de l'information	31
1.3.6 Recherche d'information sur internet	32
1.3.7 Motivation des croyants	32
1.3.8 La propagation des croyances	33
1.4 Quelques croyances tenaces	34
1.4.1 Les effets allégués à la Lune	34
1.4.2 Les machines « surnuméraires »	34
1.4.3 L'astrologie	35
1.4.4 La sourcellerie	36
1.4.5 Expérimenter la validité d'une pseudo-science/croyance	36
1.5 Le principe de précaution	37
1.5.1 Danger et risque	37
1.5.2 Le principe de précaution	37
1.5.3 Mathématisation du principe de précaution	39

1.5.4	Biais cognitifs liés à l'estimation des risques	40
1.5.5	La responsabilité des médias professionnels	43
1.5.6	Instiller le doute	44
2	Nucléaire et radioactivité	45
2.1	Éléments de physique nucléaire	46
2.1.1	Introduction	46
2.1.2	Un peu de physique nucléaire	46
2.1.3	Les différentes radioactivités	52
2.2	Interaction des rayonnements ionisants avec la matière	55
2.2.1	Introduction	55
2.2.2	Effet des rayonnements ionisants sur la matière	61
2.2.3	Effet des rayonnements ionisants sur la matière vivante et radioprotection	61
2.2.4	Effet de la dose reçue	65
2.3	Application des rayonnements	67
2.4	Production d'énergie nucléaire	73
2.4.1	Énergie chimique et énergie nucléaire	73
2.4.2	Réaction de fission	73
2.4.3	Fissile ou fertile?	74
2.4.4	Réaction en chaîne	74
2.4.5	Les principaux types de réacteurs	76
2.4.6	Les réacteurs à eau pressurisée	77
2.4.7	Masse critique	79
3	Le réchauffement climatique	81
3.1	Comprendre le climat terrestre	82
3.1.1	Météo ou climat ?	82
3.1.2	La modélisation numérique du climat	83
3.1.3	La machine climatique	84
3.1.4	L'atmosphère terrestre	85
3.1.5	Les océans	88
3.1.6	La source d'énergie : le Soleil	89
3.1.7	Les lois du rayonnement	91
3.2	L'effet de serre	94
3.2.1	Un modèle radiatif sans atmosphère	94
3.2.2	Un modèle avec une couche d'atmosphère	95
3.2.3	Échanges radiatifs réels	99
3.2.4	Stabilité de l'équilibre	99
3.2.5	Réchauffement climatique	101
3.2.6	Forçages radiatifs	101
3.2.7	Rétroactions	102
3.2.8	Effet de serre et stratosphère	104
3.2.9	Les gaz à effet de serre	106
3.2.10	Absorption du rayonnement par les molécules	109
3.2.11	Exemple de la molécule de CO ₂	110
3.3	Observations du réchauffement climatique	113
3.3.1	Notion de température moyenne	113
3.3.2	Augmentation de la température moyenne	113
3.3.3	Évolution de la proportion de gaz à effet de serre	115
3.3.4	Réchauffement et irradiance solaire	119
3.3.5	Origine anthropique	120
3.3.6	Le niveau des océans	120

3.3.7	Les événements extrêmes	121
3.3.8	En résumé...	123
3.3.9	Et chez nous en France ?	125
3.4	Paléoclimatologie	125
3.4.1	Cycles de Milankovitch	126
3.4.2	Le rapport isotopique, un indicateur du climat	128
3.4.3	Qui pilote qui : la température ou le CO ₂ ?	132
3.5	Scénarios pour le futur	134
4	L'énergie et le CO₂	137
4.1	Qu'est-ce que l'énergie?	138
4.1.1	Définition physique	138
4.1.2	L'énergie dans la société	142
4.1.3	Exemple de la France	145
4.2	Différentes classifications	147
4.2.1	Sources et vecteurs	147
4.2.2	Puissances, facteurs de charge	148
4.2.3	Quelques ordres de grandeur	149
4.2.4	Pilotable ou non pilotable	149
4.2.5	Concentrée ou diluée	150
4.2.6	L'énergie grise et le taux de retour énergétique	151
4.2.7	Le paysage énergétique mondial	155
4.3	Les différents types d'énergie	158
4.3.1	Les énergies de stock	158
4.3.2	Les énergies fossiles	158
4.3.3	Le nucléaire	163
4.3.4	Les énergies de flux	164
4.3.5	L'énergie solaire photovoltaïque	165
4.3.6	L'énergie solaire thermique	166
4.3.7	L'énergie éolienne	167
4.3.8	La biomasse	169
4.3.9	L'énergie marine	173
4.3.10	L'électricité hydraulique	176
4.4	L'électricité	178
4.4.1	Réseau électrique	178
4.4.2	Stabilité du réseau	186
4.4.3	Le stockage	190
4.4.4	Les énergies intermittentes	191
4.4.5	Intermittence et stabilité	193
4.5	Le CO ₂	198
4.5.1	Unités	198
4.5.2	Le cycle du carbone	199
4.5.3	Les émissions de GES	201
4.5.4	Ce qu'il reste à émettre	211
4.6	La transition énergétique	212
5	Ondes électromagnétiques et santé	215
5.1	Rappels de physique des ondes électromagnétiques	216
5.1.1	Équations de Maxwell dans le vide en régime variable	216
5.1.2	Équation de propagation d'une onde	216
5.1.3	Énergie d'une onde électromagnétique	217
5.1.4	Spectre électromagnétique	218
5.2	Antennes : l'émission des ondes électromagnétiques	218

5.2.1	Dipôle oscillant	218
5.2.2	Puissance rayonnée par un dipôle oscillant	219
5.2.3	Principe de fonctionnement d'une antenne	220
5.2.4	Exemple de l'antenne relais de la téléphonie mobile	220
5.3	Interaction des ondes électromagnétiques avec la matière	222
5.3.1	Champ proche et champ lointain	222
5.3.2	Interaction avec les matériaux	222
5.3.3	Interaction avec la matière vivante	223
5.3.4	Selon les domaines de fréquences	225
5.3.5	Fréquences intermédiaires [100 kHz, 10 MHz]	225
5.3.6	Radiofréquences [10 MHz, 300 GHz]	226
5.4	Électrosensibilité	227
5.5	Et le four à micro-ondes alors?	228
5.5.1	Fonctionnement	228
5.5.2	Conclusion : le téléphone portable est-il un four à micro-ondes?	230
5.6	Quelques « études » sur l'effet des ondes sur la santé	231
Annexe A : Quelques organismes internationaux pour le climat		233
A.1	Le GIEC	234
A.2	Les Conférences des Parties (COP)	235
Annexe B : Bilan énergétique de la France		237
B.1	Diagramme de Sankey des flux énergétiques de la France	238
B.2	Bilan énergétique de la France	238
B.3	Bilan énergétique des États-Unis	242
Annexe C : Rendement théorique d'une éolienne		243
Annexe D : Puissance géothermique		247
D.1	Décroissance radioactive	248
D.2	Puissance radioactive massique	250
D.3	Puissance surfacique de la croûte continentale	250
D.4	Évolution temporelle	252

Liste des figures

1.1	Illustrations de la démarche scientifique.	13
1.2	Illustration des différents niveaux de preuves scientifiques.	17
1.3	Comment se construit la science.	19
1.4	Méthode scientifique et méthode créationniste.	21
1.5	La thèse de Russell.	23
1.6	Illustration de la différence entre précision et exactitude.	23
1.7	Corrélation entre le taux de CO ₂ dans l'atmosphère et l'espérance de vie.	26
1.8	Évolution du nombre d'internautes dans le monde.	28
1.9	Évolution de la quantité d'information disponible dans le monde.	30
1.10	Taille de la sphère des données.	31
1.11	Illustration du <i>PageRank</i>	32
1.12	Croyances et sexe, âge, profession, niveau d'études.	33
1.13	Illusion de mouvement perpétuel.	35
1.14	Un sourcier du XVIII ^e siècle dans un livre français sur les superstitions.	36
1.15	Illustration de la différence entre danger et risque.	38
1.16	Le « visage de Mars » au cours du temps!	40
1.17	Illustration du biais de confirmation : influence de la pleine Lune sur le sommeil.	41
1.18	Courbe des probabilités perçues selon deux modèles.	42
1.19	La perception de quelques risques et leur réalité.	43
2.1	Énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de nucléons.	48
2.2	La vallée de stabilité des noyaux atomiques.	50
2.3	Les différentes radioactivités.	54
2.4	Exemple de la filiation du plomb 212.	54
2.5	Résumé schématique des différents rayonnements.	56
2.6	Les différents domaines du spectre électromagnétique.	57
2.7	Différentes façons d'absorber différents rayonnements.	60
2.8	Illustration des différentes notions de dose radioactives.	62
2.9	Facteur de pondération pour un rayonnement de neutrons.	63
2.10	Dose équivalente annuelle moyenne en France.	67
2.11	Chaîne de réactions pour l'analyse par activation neutronique.	68
2.12	Spectre γ d'analyse par activation.	68
2.13	Scintigraphie.	70
2.14	Traceurs radioactifs en sciences de l'environnement.	71
2.15	Gammagraphie.	72
2.16	Gammagraphie d'une statue.	73
2.17	Schéma d'une centrale à eau pressurisée.	77
2.18	Les tours aéroréfrigérantes de la centrale nucléaire de Dampierre.	78
3.1	Maillage à trois dimensions de l'atmosphère terrestre.	84
3.2	les différents acteurs du climat.	85
3.3	L'atmosphère terrestre depuis l'espace.	86
3.4	Les différentes couches de l'atmosphère.	87

3.5	Les flux énergétiques entre le Soleil et la Terre.	90
3.6	L'albédo de la Terre.	91
3.7	Différence de rayonnement solaire incident.	92
3.8	Spectres de corps noirs.	93
3.9	Modèle sans atmosphère.	95
3.10	Modèle à une couche d'atmosphère.	96
3.11	Évolution de la température d'équilibre à la surface.	98
3.12	Schéma des différents flux radiatifs du modèle à une couche.	99
3.13	Schéma des différents flux radiatifs à l'origine de l'effet de serre.	100
3.14	Schéma des différents flux radiatifs à l'origine de l'effet de serre avec le réchauffement.	101
3.15	Forçages radiatifs.	102
3.16	Boucle de rétroaction générale.	103
3.17	La rétroaction climatique.	104
3.18	Bilan énergétique sur la stratosphère.	106
3.19	Spectres de rayonnement du Soleil et de la Terre.	107
3.20	Illustration des différentes contributions à l'effet de serre.	108
3.21	Moment dipolaire et molécules H ₂ O et CO ₂	110
3.22	Modes de vibration du CO ₂	111
3.23	Spectres d'émission en vibration du CO ₂	111
3.24	Absorptivité des principaux gaz à effet de serre.	112
3.25	Anomalies moyennes observées de la température de surface de la Terre entre 1850 et 2012.	114
3.26	Anomalies moyennes observées de la température de surface de la Terre entre 1880 et 2018.	114
3.27	Température mesurée dans la stratosphère.	115
3.29	Évolution de la proportion de gaz à effet de serre.	116
3.30	Évolution des concentrations de dioxygène et de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.	118
3.31	Anomalie de température et irradiance solaire.	119
3.32	Modèles avec et sans le forçage anthropique.	120
3.33	Évolution du niveau moyen des mers sur différentes périodes.	121
3.34	Accumulation de l'énergie.	122
3.35	Schéma illustrant l'augmentation des événements extrêmes dans un climat en moyenne plus chaud.	123
3.36	Vague de chaleur à Lytton, Canada, en 2021.	123
3.37	Quelques mesures de températures moyennes en France.	124
3.38	Moyenne annuelle du niveau de la mer à Brest.	124
3.39	Durée d'enneigement au Col de Porte.	126
3.40	Évolution visuelle et quantitative du glacier Blanc.	127
3.41	Évolution de la température moyenne à la surface de la Terre sur les 500 derniers millions d'années.	128
3.42	Principaux paramètres orbitaux de Milankovitch.	128
3.43	Schéma illustrant la précession climatique.	129
3.44	Variations des paramètres orbitaux.	130
3.45	Valeurs de l'indicateur $\delta^{18}\text{O}$ dans les océans et dans les précipitations.	130
3.46	Relation entre les teneurs isotopiques moyennes et la température moyenne.	131
3.47	Le cycle annuel de δD dans la neige et les glaces du Groenland.	132
3.48	Évolution de la température moyenne, des concentrations en gaz à effet de serre et de l'insolation.	133
3.49	Évolution de la température annuelle en Antarctique et de la concentration en CO ₂	133

3.50	Évolution de la température annuelle en Antarctique et de la concentration en CO ₂ lors de la dernière glaciation.	134
3.51	Forçages radiatifs et températures pour les quatre scénarios RCP.	134
3.52	Projection des scénarios RCP pour quelques observables.	135
4.1	Définition de l'énergie primaire en fonction de la source.	143
4.2	Énergie finale.	145
4.3	Bilan énergétique de la France en 2018.	146
4.4	Les différentes formes d'énergies.	151
4.5	Schéma illustrant l'énergie grise d'une voiture.	152
4.6	Fraction d'énergie utilisable par rapport à l'énergie totale produite en fonction de l'EROI.	153
4.7	Évolution de l'EROI pour la production de pétrole et de gaz aux États-Unis de 1920 à 2010.	154
4.8	Illustration de différents périmètres de calcul de l'EROI.	154
4.9	Différentes estimations de l'EROI pour différentes énergies.	156
4.10	Évolution de la consommation d'énergie primaire dans le monde entre 1965 et 2017.	157
4.11	Évolution de la consommation d'énergie dans le monde	158
4.12	Évolution de la consommation des énergies fossiles entre 1980 et 2016.	159
4.13	Évolution du pétrole extrait aux États-Unis et dans le monde.	162
4.14	Schéma des différents flux d'énergie d'origine solaire.	164
4.15	Parking couvert équipé de panneaux solaires photovoltaïques.	166
4.16	Centrale solaire Thémis dans les Pyrénées.	167
4.17	Éoliennes.	168
4.18	Estimation de la biomasse sur Terre.	170
4.19	Illustration du rendement de la production de biomasse par la photosynthèse.	171
4.20	Carte du flux géothermique dans le monde.	174
4.21	Structure interne de la Terre et profil de température en fonction de la profondeur.	175
4.22	Illustration du cycle naturel de l'eau.	177
4.23	Lac et barrage de Serre-Ponçon, sur la Durance.	178
4.24	Production d'énergie électrique.	179
4.25	Schéma de l'organisation du système électrique français.	179
4.26	Carte du réseau de transport de l'électricité en France.	181
4.27	Carte du réseau de transport de l'électricité en Europe tracé par l'éclairage nocturne.	182
4.28	Modélisation électrique équivalente d'une ligne de transport.	186
4.29	Schéma d'un turbo-alternateur.	188
4.30	Illustrations montrant le groupe turbo-alternateurs sur deux centrales nucléaires.	189
4.31	Machine synchrone à deux paires de pôles.	189
4.32	Principe de fonctionnement d'une centrale de pompage-turbinage (STEP).	190
4.33	Vue générale de la production éolienne instantanée en 2018.	191
4.34	Vue générale de la production instantanée solaire photovoltaïque en 2018 (par pas de 30 min).	192
4.35	Zoom sur une partie de la production éolienne et photovoltaïque en 2018.	192
4.36	Comparaison des puissances éoliennes de la France et de l'ensemble de 7 pays européens pour un mois de février et un mois de juin.	193
4.37	Détail par filière de la production d'électricité en France le jeudi 25 avril 2019.	194
4.38	Détail par filière de la production d'électricité en France le jeudi 24 janvier 2019.	195
4.39	Puissances totale, de stockage, éolienne et solaire installées en fonction de la fraction d'éolien.	196

4.40	Évolution annuelle de l'énergie potentielle d'un stockage parfait fournissant la puissance d'appoint.	197
4.41	Illustration de l'inertie du réseau électrique et de ses constituants.	198
4.42	Réservoirs et flux de carbone.	200
4.43	Différence entre les périmètres de l'empreinte carbone et l'inventaire national en France.	202
4.44	Comparaison internationale des émissions de CO ₂ dues à la combustion d'énergie selon les approches.	203
4.45	L'empreinte carbone moyenne des français.	206
4.46	Représentations des flux anthropiques de carbone.	207
4.47	Évolution des émissions de gaz à effet de serre.	208
4.48	Variation de température en surface de la Terre en fonction de la quantité totale de CO ₂ émise.	210
4.49	Variation de température en surface de la Terre en fonction de la quantité totale de CO ₂ émise.	210
4.50	Corrélation entre l'anomalie de température et la proportion de CO ₂ dans l'atmosphère.	212
4.51	Taux de croissance annuel de la concentration en CO ₂	213
4.52	Extension des glaciers lors de la dernière glaciation.	213
5.1	Illustration de la propagation d'une onde progressive.	217
5.2	Diagramme de rayonnement d'un dipôle.	220
5.3	Antenne relais de téléphonie mobile sur le toit d'un immeuble.	221
5.4	Carte d'émission d'une antenne relais.	221
5.5	Effets des courants induits dans le corps humain.	225
5.6	Illustration du fonctionnement du four à micro-ondes.	229
5.7	Principe du chauffage par des ondes électromagnétiques micro-ondes.	229
B.1	Bilan énergétique de la France en 2018.	239
B.2	Bilan énergétique des États-Unis en 2020.	242
D.1	Schémas des décroissances radioactives des isotopes présents naturellement dans la croûte terrestre.	249
D.2	Puissance émise par la surface de la Terre due à la radioactivité en fonction du temps.	253

Liste des tableaux

2.1	Masse et taille des constituants atomiques.	48
2.2	Comparaison entre l'énergie de liaison des électrons dans l'atome et l'énergie de liaison nucléaire.	49
2.3	Coefficient d'atténuation linéique pour des photons.	58
2.4	Les différentes façons d'absorber des particules.	60
2.5	Facteur de pondération lié à la nature et à l'énergie du rayonnement.	63
2.6	Facteur de pondération lié à la nature du tissu touché.	63
2.7	Facteurs de doses.	64
2.8	Valeurs de l'activité pour quelques substances.	66
2.9	Quelques exemples de doses équivalentes.	66
2.10	Doses ponctuelles reçues lors de certains examens médicaux.	66
2.11	Sections efficaces de fission.	75
2.12	Probabilité d'absorption des neutrons de différents modérateurs.	75
3.1	Composition de l'atmosphère.	86
3.2	Les différentes contributions à l'effet de serre.	108
3.3	Pouvoir de réchauffement global de quelques gaz.	108
4.1	Part de l'électricité nucléaire en France en 2018.	147
4.2	Rendement de quelques installations de transformation de l'énergie.	148
4.3	Facteurs d'émission CO ₂ des combustibles courants.	203
4.4	Données d'émissions GES pour le bois énergie.	204
4.5	Émissions directes de diverses sources de production d'électricité.	204
4.6	Empreinte carbone du gazole routier.	205
4.7	Comparaison des émissions de CO ₂ de quelques pays entre deux sources.	209
5.1	Les différents domaines du spectre électromagnétique.	219
5.2	Limites fondamentales du DAS.	227
5.3	Mesure du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes.	230
5.4	DAS du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes.	230
B.1	Décryptage du bilan énergétique de la France en 2018.	241
D.1	Caractéristiques des isotopes radioactifs de la croûte terrestre.	248
D.2	Puissances massiques émises par les isotopes radioactifs.	250
D.3	Caractéristiques de la partie supérieure de l'enveloppe terrestre.	251
D.4	Résumé des puissances thermiques continentale et océanique.	252

Publié par Université Paris Cité, 85 Boulevard Saint-Germain 75006 Paris
Chef de projet : Maxence Larrieu
Assistant d'édition : Vincent Colpin
Impression : ateliers d'Université Paris Cité, 75006 Paris
Dépôt légal : mai 2023

Physique et enjeux de société

Radioactivité, réchauffement climatique, énergie, ondes électromagnétiques et santé

La science est au cœur de multiples enjeux de société, au rang desquels les nombreux défis engendrés par les crises écologiques. Ces enjeux impliquent des mécanismes que la physique peut permettre d'expliquer. Une formation universitaire de physique fournit un bagage standard pour critiquer des résultats liés à la discipline : ordres de grandeur, adéquation entre les modèles et les expériences, ou encore incertitudes expérimentales. Cet outillage est nécessaire à tout scientifique. Mais un citoyen doit aussi être capable d'interagir avec ses semblables de manière rationnelle, c'est-à-dire comprendre les débats de société et y participer en connaissance de cause.

C'est dans cette optique que s'inscrit cet ouvrage, issu d'un cours à destination des étudiants en troisième année de Licence de physique à Université Paris Cité. Son objectif est double : transmettre un ensemble de connaissances minimales dans quelques domaines physiques sur des thématiques que l'on rencontre fréquemment dans les médias, afin d'en saisir les enjeux, et d'autre part donner des clés permettant de se construire une opinion éclairée.

Après avoir expliqué comment le savoir scientifique s'élabore, le manuel apporte des éléments de compréhension sur la radioactivité, le réchauffement climatique, l'énergie dans la société et les émissions de gaz à effet de serre, sans oublier les ondes électromagnétiques et la santé.