

Leon Freris
David Infield

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

2^e ÉDITION

Traduit de l'anglais par Michel Pinard

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel
Conception graphique de la couverture : Elizabeth Riba
Illustration de couverture : artjazz/shutterstock.com

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Dunod Editeur and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2009, 2013, 2021

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082454-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE DE LA SECONDE ÉDITION

Depuis que la première édition de cet ouvrage a été publiée en 2008, la technologie des renouvelables et son déploiement ont progressé spectaculairement. Ce développement est en grande partie dû aux politiques nationales et internationales. Ainsi, le cadre fourni par l'Union européenne en 2007 a eu pour objectif d'installer 20 % de renouvelables en 2020 dans les États membres. En 2008, les sources à plus grande croissance sont les éoliennes. Mais aujourd'hui, on constate également une croissance comparable du photovoltaïque. Même au Royaume-Uni, qui dispose pourtant de ressources limitées en solaire, ces deux technologies vont, ensemble, pousser le charbon à l'extinction.

Cependant, l'utilisation croissante des renouvelables impacte l'exploitation des réseaux. En ce sens, cet ouvrage a une importance accrue et nous espérons qu'il sera utile aux étudiants et aux chercheurs en les aidant à comprendre les problèmes clés que l'industrie de la puissance aura à résoudre dans les prochaines années.

Ainsi, comme dans la première édition, les caractéristiques des sources des énergies renouvelables sont décrites en tenant compte de l'importance des facteurs qui impactent leur intégration dans les réseaux. On a de plus introduit une nouvelle matière, qui explore la capacité de la source d'énergie renouvelable à contribuer à la régulation dynamique du système, grâce à l'utilisation de sa réponse en fréquence. Une telle capacité est commercialement disponible et exploitée ; elle permet la critique de la stabilité du système à mesure que l'introduction des renouvelables augmente sur le réseau.

Le contenu de cet ouvrage est largement basé sur le module de cours de Master enseigné au Centre for Renewable Energy Systems Technology (CREST) de Loughborough University, où les deux auteurs ont travaillé. Le cours, dans son ensemble, a été prévu pour fournir une introduction à l'intégration technique des sources de renouvelables dans les réseaux. Les étudiants de Loughborough en Master ont généralement validé leurs partiels sur des sujets techniques, mais pas nécessairement sur l'ingénierie de l'électricité. De même, cet ouvrage admet une non-connaissance approfondie du sujet, et une annexe disponible en ligne sur le site *dunod.com* explique aux lecteurs les bases de l'électricité relative à la puissance. On a augmenté des exemples de travail pour aider les lecteurs à tester leurs capacités.

Au dernier chapitre, on a cherché à expliquer les futurs développements et à présenter les avancées technologiques de la dernière décennie. Cela revient à tracer

les pistes de la recherche dans le monde entier pour observer la direction prise par les différentes avancées sur les renouvelables, qui feront que les réseaux électriques de demain seront sans doute sans CO₂.

Mars 2019

David Infield et Leon Freris

TABLE DES MATIÈRES

Préface de la première édition	V
Préface de la seconde édition	VII
Avant-propos	XIII
Remerciements	XVII
1 • Énergie et électricité	1
1.1 L'énergie au niveau mondial	1
1.2 L'impact sur l'environnement	4
1.3 La production de l'électricité	19
1.4 Le système électrique de puissance	24
2 • Sources conventionnelles et sources renouvelables de l'électricité	31
2.1 Introduction	31
2.2 Les sources conventionnelles d'énergie : charbon, gaz et nucléaire	32
2.3 L'énergie hydroélectrique	34
2.4 L'énergie éolienne	39
2.5 L'énergie solaire par effet photovoltaïque ou thermique	55
2.6 L'énergie des marées	63
2.7 L'énergie des vagues	69
2.8 La biomasse	72
2.9 Résumé des caractéristiques des différentes sources d'énergie	74
2.10 Combinaison entre différentes sources	76
3 • Contrôle de l'équilibrage de la fréquence du réseau	77
3.1 Introduction	77
3.2 La demande de consommation électrique	78
3.3 Commande de la puissance	81
3.4 Contrôle dynamique en fréquence des systèmes de forte puissance	87

3.5	Impact des énergies renouvelables sur le contrôle de la fréquence et sur sa fiabilité	97
3.6	Réponse en fréquence des générateurs fonctionnant à partir des énergies renouvelables	111
3.7	Modélisation du contrôle en fréquence	118
3.8	Le stockage de l'énergie	122
4	• La production de l'électricité	131
4.1	La conversion d'une énergie renouvelable en énergie électrique	131
4.2	Le générateur synchrone (alternateur)	132
4.3	Le transformateur	144
4.4	La génératrice asynchrone	147
4.5	Électronique de puissance	158
4.6	L'électronique de puissance associée aux générateurs intermittents utilisant une énergie renouvelable	174
4.7	Applications aux microcentrales hydroélectriques	190
4.8	Applications aux turbines utilisées dans les courants marins	192
5	• Analyse des systèmes de puissance	193
5.1	Introduction	193
5.2	Le système de transmission	194
5.3	Contrôle de la tension du réseau	199
5.4	Transfert de puissance dans une ligne unique	200
5.5	Gestion de la puissance réactive	204
5.6	Simulation des flux des puissances sur le réseau	207
5.7	Défauts et protection	214
5.8	Variation en fonction du temps et simulation en régime dynamique	218
5.9	Stabilité du réseau	218
5.10	Évaluation dynamique d'une ligne	221
5.11	Analyse de la fiabilité	222
6	• Les énergies renouvelables dans les réseaux	223
6.1	La distribution de l'énergie	223
6.2	Effets sur la tension	226
6.3	Les limites thermiques	233
6.4	Autres effets des générateurs intermittents	235
6.5	Îlotage	239
6.6	Transmission d'un défaut	241
6.7	Caractéristiques de générateurs et de convertisseurs	243

7 • L'économie appliquée aux systèmes de puissance et le marché de l'électricité	245
7.1 Introduction	245
7.2 Le coût de la production de l'électricité	246
7.3 L'optimisation économique dans les systèmes de puissance	250
7.4 Coûts externes	258
7.5 Effets de l'intermittence des générateurs ER	264
7.6 Les mécanismes d'aide pour l'énergie renouvelable	271
7.7 Le commerce de l'électricité	275
8 • L'Avenir. Vers un meilleur usage de l'énergie électrique	281
8.1 Introduction	281
8.2 L'avenir de l'énergie éolienne	283
8.3 L'avenir de l'énergie solaire	297
8.4 L'avenir de la bioénergie	303
8.5 L'avenir de l'énergie géothermique	305
8.6 L'avenir de l'énergie électrique hydraulique et maritime	305
8.7 La forme du futur réseau	307
8.8 Conclusion	320
Bibliographie	323
Index	329



L'annexe *Concepts de base sur l'énergie électrique* est téléchargeable en ligne sur le site dunod.com depuis la page de l'ouvrage.

Annexe • Concepts de base sur l'énergie électrique

- A.1 Introduction
- A.2 Générateurs et consommateurs d'énergie
- A.3 Pourquoi utilise-t-on le courant alternatif (AC) ?
- A.4 Les formes d'onde en courant alternatif
- A.5 Réponse des composants des circuits en courant alternatif
- A.6 Les vecteurs de Fresnel (Phasors)
- A.7 Somme vectorielle (Phasor addition)
- A.8 Coordonnées cartésiennes (Rectangular notation)

- A.9 Réactance et impédance
- A.10 Puissance active dans les circuits alternatifs
- A.11 Puissance réactive dans les circuits alternatifs
- A.12 Puissance complexe
- A.13 Conservation des puissances active et réactive
- A.14 Conséquences des flux de puissance réactive.
Correction du facteur de puissance
- A.15 Le triphasé
- A.17 Le circuit de Thévenin équivalent

AVANT-PROPOS

Toutes nos félicitations ! En ayant cet ouvrage entre vos mains (ou son équivalent numérique), vous montrez probablement un intérêt pour les concepts utilisés par les ingénieurs travaillant sur les énergies renouvelables (et, vous prenez le temps de lire un avant-propos que la plupart des gens, moi y compris, sautent pour accéder directement aux chapitres techniques, mais ceci est une autre histoire...).

Je souhaite que vous vous intéressiez durablement aux énergies renouvelables. Quand j'étudiais les techniques de l'ingénieur électrique dans les années 1980, les renouvelables (l'éolien, le solaire et, dans une certaine mesure, l'hydroélectrique) étaient considérés par les universitaires, les industriels et les organismes spécialisés comme d'autres énergies possibles, mais seulement alternatives... « Alternatives » ! Au lieu de s'intéresser au réseau de transport haute et basse tension qui délivre l'électricité pour les foyers et pour les usines, à partir des sources de forte puissance, telles que celles des centrales au charbon, au mazout, au gaz, ou nucléaire ! Nous disposions de quelques études sur l'hydroélectricité, mais elles expliquaient que cette dernière servirait exclusivement pour les pics de consommation et pour le contrôle de la fréquence, et que, virtuellement, il n'existait aucune autre énergie renouvelable à la même échelle de puissance.

Le badge « alternatif » était pour celui qui essayait d'explorer les possibilités offertes par des énergies venant des renouvelables, et il était catalogué comme « non-conformiste », « écolo rêveur », voire « tout simplement fou ». Il était difficile d'être différent et de proposer autre chose que les moyens de produire et de fournir de l'électricité établis pendant les décennies précédentes. Il est vrai que cela n'était pas sans raison – le paiement de la facture d'énergie formait une part significative du budget pour à peu près tout le monde, et c'était souvent le moyen le moins cher pour produire de l'électricité et la fournir de manière fiable aux « consommateurs ». Un changement significatif eut été jugé difficile et coûteux. Il était plus facile de continuer comme avant.

Nous vivons désormais dans une époque très différente. Il me convient que le terme « consommateur » ait été remplacé par le mot « client ». La production et la vente de l'électricité sont aujourd'hui beaucoup plus compétitives et le rôle du client remplace le « Monopoly » de la production et du service. Il est regrettable que des millions de personnes dans le monde rencontrent des difficultés à payer leur énergie, aussi les changements que nous voulons pour améliorer notre environnement doivent prendre en compte le fait qu'elle leur devienne abordable. Souvent, ceci demande de nombreuses initiatives, en cherchant de nouvelles

solutions pour utiliser l'infrastructure existante, et en mettant au défi les vieilles normes d'ingénierie et de régulation qui dominent encore les réseaux électriques dans le monde.

De plus, ceux qui se sont inquiétés des effets néfastes des gaz qui créent les pluies acides, et donc de la contribution du CO₂ au changement climatique, se sont en fait opposés à la « folie », et ont introduit une législation globale pour lutter contre cet état de fait. On a fait de grands pas au sujet des renouvelables, particulièrement pour l'éolien et le solaire. Le monde de l'énergie « alternative » est devenu beaucoup plus grand public. Bien sûr, certains nieront toujours l'existence du changement climatique. Néanmoins ce qui est indiscutable, c'est que les combustibles fossiles sont en bout de parcours et qu'il vaut mieux, selon moi, produire de l'énergie en utilisant des ressources durables que laisser nos combustibles fossiles seuls en exploitation, à moins que l'on leur trouve un usage plus performant et non polluant.

Durant le premier cycle de mes études, nos cours nous préparaient uniquement à être ingénieur. Nous sommes entrés dans le monde du travail avec des mathématiques et de la physique plein la tête – seulement pour nous apercevoir que la plupart des emplois demandent, en plus de nos talents d'ingénieur, une tête d'économiste, un esprit soucieux de l'environnement et une bonne formation dans le management. Selon moi, ce sont des qualités que tous les ingénieurs devraient s'attacher à développer s'ils veulent voir leur travail faire les plus grands progrès.

Le développement rapide des sources d'énergie renouvelables qui sont, par nature, éparpillées, donne un avantage aux ressources locales plutôt qu'aux centralisées, pour certaines raisons économiques ; tout ceci fait que la production et la distribution de l'électricité (et d'autres produits énergétiques) sont loin des défis du plan de prévision, mais le rendent aussi beaucoup plus intéressant et passionnant pour les ingénieurs de demain. Désormais, nous n'avancions plus en ligne droite, selon le précepte « plus c'est grand, mieux c'est ». Nous devons penser tangentiellement, innover et, par une association heureuse, nous focaliser sur certains détails (là où c'est payant), sans perdre de vue l'existence d'un système plus grand et d'impératifs réglementaires. L'ancienne époque du « voici comment c'est fait » ne doit plus nécessairement s'appliquer.

Je suis très intéressé par l'augmentation de l'éolien, en particulier en mer ; il s'est installé rapidement ces dernières années, et les prévisions de croissance sont énormes pour les deux prochaines décennies. Les « fermes éoliennes, parcs éoliens ou centrales éoliennes » sont désormais à une telle échelle de puissance que l'on peut les considérer à l'égal des centrales électriques classiques, avec des prix de revient compétitifs qui continuent à baisser et une fiabilité qui s'améliore. Plus encore, d'autres améliorations vont apparaître : l'utilisation de nouveaux matériaux, pour une meilleure fiabilité ; des formes d'hélices les rendant plus légères et plus aérodynamiques ; des fondations à la fois plus légères et plus robustes ; et, enfin, une plus grande dépendance du rivage grâce aux câbles. Les solutions rentables d'installation en mer profonde, comme les éoliennes flottantes, sont à l'ordre du jour. L'utilisation du numérique ouvre plus de perspectives, pour diverses opérations de contrôle et de maintenance à distance, sans intervention humaine.

Le peu de personnes travaillant *in situ* permet une industrie plus sûre, et l'homme ne sera là que pour plus de contrôle, plus d'innovation et plus d'invention. Les marées, les vagues et les cerfs-volants restent potentiellement des sources du futur, aux côtés de nombreux concepts dans de prochaines étapes de développement, tels que l'extraction du CO₂ de l'air.

Nous devons également penser à la manière dont nos réseaux électriques et leurs régulations, conçus il y a des dizaines d'années pour des usages très différents, évolueront. Il y aura probablement plus d'intelligence, une plus grande interconnectivité entre les centrales éoliennes sur terre et en mer, mais aussi avec celles d'autres pays, tout en étant associée à du stockage, non d'un seul type, mais varié (batteries, stockage par pompage, mécanique, et peut-être air comprimé, par exemple). L'éolien et d'autres formes de renouvelables, candidats évidents pour fournir de l'énergie pour le chauffage et le transport, offrent une opportunité de première classe pour décarboner ces deux secteurs. De fait, ils sont de bien plus grands utilisateurs d'énergie que ceux de l'électricité domestique.

On espère utiliser les renouvelables pour obtenir, à partir de l'eau de mer, de l'hydrogène ou de l'ammoniac, créant ainsi un carburant fiable, transportable et stockable. Ces produits pourraient être des solutions intéressantes pour continuer à utiliser notre électricité en réseau et le gaz en canalisation¹, mais aussi un moyen simple d'apporter de l'énergie à un véhicule. Dans le futur, quand nous créerons une nouvelle source d'énergie, nous devons avoir à l'esprit le chauffage et le transport, et tous ces systèmes demanderont des innovations majeures pour décarboner. Enfin, un autre grand changement se produit clairement dans notre monde des renouvelables – le pouvoir des populations. La voix des clients, en particulier à travers les médias, est désormais un outil très puissant pour promouvoir de nouveaux succès technologiques (les derniers véhicules électriques par exemple) – mais aussi bien en réputation qu'en négatif, quand les choses s'avèrent fausses. Nous devons apporter des changements dans les moyens de créer et d'utiliser des sources d'énergie, tout en gardant constamment les clients en tête. Ce sont les fils conducteurs qui permettront d'arriver à des réductions importantes de coût, à un usage performant de l'énergie et à une bonne fiabilité.

Que déduire de tout ce qui précède ? Cela soulève l'importance des défis de l'ingénieur, mais aussi de nombreuses opportunités dans l'innovation ; une grande chose pour les nouveaux ingénieurs ! Cet ouvrage, écrit par deux des professeurs les plus compétents dans le domaine et comptant parmi les plus passionnés par les renouvelables que j'ai eu le plaisir de rencontrer, vous fournira une base solide pour vous lancer sur le sujet. C'est à vous de décider si vous irez plus loin dans des parcours classiques d'ingénierie ou sur des chemins plus innovants encore !

Andrew Jamieson

1. Notons que l'ammoniac est alors généralement utilisé à l'état liquide.

REMERCIEMENTS

Cette seconde édition inclut plus de contenus que la première, grâce au travail d'anciens collègues des auteurs lorsque ces derniers travaillaient au CREST de Loughborough University. Ainsi, le Dr Murray Thomson a beaucoup apporté sur l'électronique de puissance (chapitre 4) et sur la plupart des contenus des chapitres 5 et 6. Ses commentaires et ses critiques dans les premiers temps de la création de l'ouvrage ont été inestimables et ont fortement impacté la structure de la première édition, laquelle a été finalement retenue. Le professeur Simon Watson du CREST, et aujourd'hui de la Delft University of Technology, a beaucoup contribué à la rédaction du chapitre 7. De plus, l'exemple sur le contrôle dynamique de la demande du chapitre 3 provient des travaux de Mastère du CREST de J. A. Short. L'illustration de la contribution de la réponse fréquentielle provient du travail de Lei Wu, alors à l'University of Strathclyde et désormais *lecturer* au Nanjing Institute of Technology. De nombreux autres chercheurs et organisations ayant autorisé la reproduction de documents sont mentionnés dans l'ouvrage.

Nous sommes également reconnaissants à l'équipe Wiley à Chichester, qui nous a aidés dans la production du manuscrit.

Dernier point, et non des moindres, nous souhaitons dédicacer cette édition, comme nous l'avions fait pour la première, à nos épouses respectives Marion Peach et Delphine Freris qui ont accepté que nous ayons souvent soustrait du temps de la vie familiale pour les besoins de la rédaction.

Leon Freris et David Infield

1 • ÉNERGIE ET ÉLECTRICITÉ

1.1 L'énergie au niveau mondial

1.1.1 Histoire de l'énergie

L'énergie a joué un rôle clé dans le développement de la société. Dans le monde préindustriel, cette énergie était principalement fournie par l'homme et par la combustion du bois, pour le chauffage, la cuisine ou la fonte des métaux. Le charbon, grâce à la nouvelle technologie des machines à vapeur, a mécanisé la production, amélioré les transports et favorisé fortement la révolution industrielle. Les années entre les deux guerres mondiales ont vu la montée de l'exploration et de l'exploitation du pétrole. L'accès à ce type de carburant devint la clé de l'issue de la Seconde Guerre mondiale. La prospérité et l'expansion postindustrielle de l'après-guerre sont indéniablement liées à l'usage du pétrole, ainsi qu'au développement de l'industrie automobile. Plus récemment, on a pu constater une nouvelle phase de la croissance économique grâce à l'usage de plus en plus grand du gaz naturel.

L'électricité est la forme « première » de l'énergie, grâce à la facilité de son usage et de sa distribution. La demande d'électricité dans le monde est en croissance permanente, de par l'augmentation de l'activité industrielle et des consommateurs (qui y ont de plus facilement accès à mesure que leurs pays se développent économiquement).

1.1.2 La consommation énergétique mondiale

Actuellement, la consommation annuelle d'**énergie primaire**¹ est d'environ 500 EJ. Ceci est équivalent à environ $1,5 \times 10^{17}$ Wh ou 150 000 TWh. En divisant ce nombre par celui d'heures dans l'année, on obtient environ 17 TW ou 17 000 GW comme puissance moyenne nécessaire aux consommateurs de la planète (figure 1.1). Le diagramme circulaire de la figure 1.1 montre l'importance relative des diverses sources d'énergie primaire au niveau mondial, selon les données de l'Agence internationale de l'énergie (International Energy Agency [IAE], *Key World Energy Statistics*, 2016).

1. L'énergie primaire est l'énergie originelle avant sa transformation en une énergie plus pratique comme l'électricité.

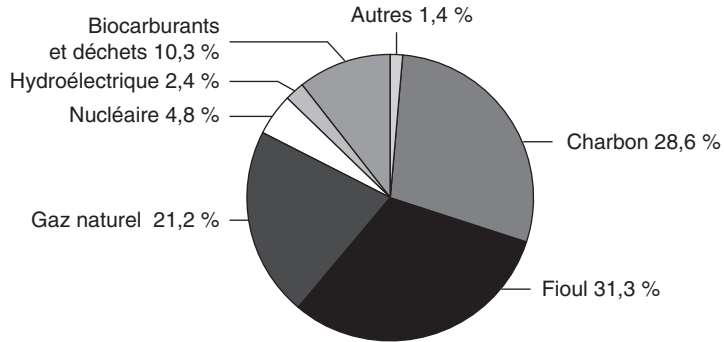


Figure 1.1 – Importance relative en pourcentage des énergies primaires dans le monde. Notons que la tourbe et le schiste bitumeux sont inclus avec le charbon et que l'on a regroupé les énergies renouvelables : éolien, solaire, géothermie et marées.

Les besoins en énergie au niveau mondial continuent de progresser régulièrement, comme le montre la figure 1.2 (également basée sur les statistiques IEA 2016) dans laquelle la majorité de cette croissance est due à l'augmentation de la consommation des combustibles fossiles (en particulier le charbon et le gaz). Le développement rapide des économies indiennes et chinoises contribue significativement à cette croissance, bien que la consommation par habitant reste faible dans ces pays par rapport à celles de l'Europe ou de l'Amérique du Nord.

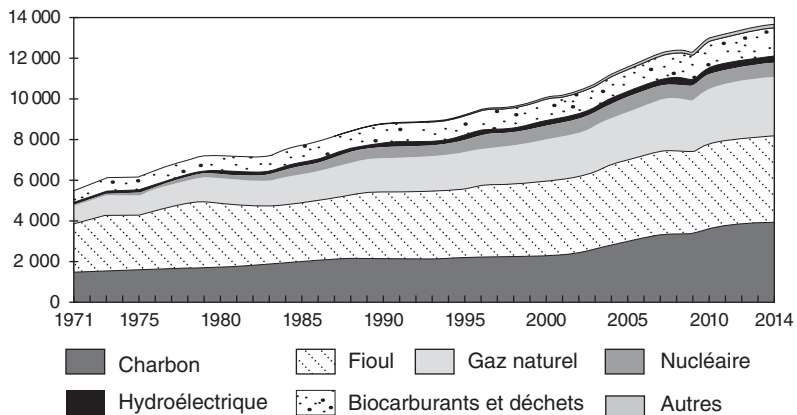


Figure 1.2 – Croissance récente dans le monde des énergies primaires fournissant des combustibles en mégatonnes équivalent pétrole (1 Mtoe = 1 TWh). Notons que la tourbe et le schiste bitumeux sont inclus avec le charbon et que l'on a regroupé les énergies renouvelables : éolien, solaire, géothermie et marées.

1.1.3 La limite des ressources disponibles

Il est extrêmement difficile de déterminer précisément pendant combien de temps encore on pourra exploiter les combustibles fossiles. Selon la plupart des compagnies pétrolières et de gaz, de nouvelles ressources importantes de pétrole pourront

être exploitées, ou restent à découvrir. On admet généralement que les réserves de pétrole en exploitation permettent de satisfaire la demande actuelle pour encore 30 ans. Pour le gaz, les dernières estimations indiquent des réserves plus grandes : 50 % de plus que pour le pétrole, soit 60 % de la demande courante. De plus, la recherche de nouveaux gisements de gaz a été moins poussée que pour le pétrole, et il est probable que de nouvelles réserves de gaz seront découvertes. Cependant, il y a par ailleurs d'autres ressources à base de corps hydrogène-carbonés, comme les schistes bitumeux, des huiles lourdes, du méthane provenant du charbon (grisou) dont le total en équivalent énergétique peut être estimé à trois fois les ressources en pétrole et en gaz. Elles sont plus coûteuses à extraire mais deviendraient exploitables si le prix des énergies fossiles traditionnelles continue à croître, en particulier parce que les accès aux sources d'approvisionnement les plus faciles risquent de diminuer. Fait notable, plus récemment, les USA ont développé l'extraction du gaz de schiste par un procédé appelé fracturation.

Heureusement, pour les économies dépendantes des énergies d'origine fossile, on considère que les réserves en charbon sont plusieurs fois plus grandes que celles du pétrole ou du gaz, et pourraient servir durant plusieurs centaines d'années. Il s'agit bien entendu du charbon de haute teneur en carbone, ce que l'on verra par la suite.

Souvent un débat crucial s'introduit lorsqu'on constate un pic de demande de pétrole ou de gaz. C'est le cas lorsque l'extraction de ces produits commence à baisser et ceci bien avant la fin des ressources. C'est important, car cela signifie que les besoins énergétiques ne sont pas complètement satisfaits ; les prix augmentent alors en conséquence, considérablement. D'une manière certaine, les réserves de pétrole et de gaz britanniques en mer du Nord déclinent rapidement depuis le pic d'extraction obtenu en 2003. Vu l'énorme investissement dans les infrastructures, et l'importance de l'exploitation et des profits attendus, il serait surprenant que ceux qui y ont participé ne fassent pas confiance dans l'avenir de ces ressources.

Les réserves pour le carburant nucléaire de fission ne sont pas non plus illimitées ; il y a quelques décennies, on s'est surtout intéressé à un cycle du réacteur qui prolonge la durée du carburant. Cependant, le danger politique de ce type de cycle est la production possible d'armes nucléaires au plutonium ; il a été réduit car on a limité le nombre de réacteurs ainsi conçus à quelques prototypes (qui ont eu beaucoup de problèmes !) et qui sont maintenant hors service.

On estime la durée des réserves d'uranium à 50 ans pour les centrales nucléaires classiques, mais de tels calculs dépendent des hypothèses très diverses. Si un prix extrême du minerai d'uranium est acceptable, alors certaines quantités de ce minerai peuvent être considérées comme des réserves possibles. Le DTI cite les figures OECD/NEA « Red Book » pour affirmer que, en 2004, les réserves connues d'uranium (à 130 \$ le kg) dureraient encore 85 ans (voir les références [2, 3]).

1.1.4 Problèmes de sécurité d'approvisionnement et de disparité de consommation

La sécurité des approvisionnements énergétiques est une exigence mondiale. Une grande part du pétrole provient du Moyen Orient et d'autres pays politiquement

instables. Le conflit entre culture « occidentale » et « islamique » ajoute à l'anxiété sur les approvisionnements énergétiques.

La Russie est le producteur principal de gaz, mais les événements récents en Ukraine ont fait que les pays européens ont pris conscience de leur dépendance vis-à-vis de cette seule source d'approvisionnement. Jusqu'en 2010, Les États-Unis sont le plus grand consommateur d'énergie du monde (dépassés depuis par la Chine à cause de la fantastique croissance économique de ce pays). Cependant, ce pays reste largement importateur de pétrole et de gaz, mais moins que dans le passé, à cause de la production nouvelle de gaz par fracturation. Avec la croissance économique, liée à un carburant bon marché, il est difficile d'imaginer de la part des États-Unis ou d'un autre pays, une politique qui demande aux citoyens de réduire de manière drastique leur consommation et donc leur style de vie.

Un autre aspect gênant est la disparité entre la consommation des pays riches et celle des pays pauvres. Le milliard de personnes les plus riches de la planète consomme plus de 50 % de l'ensemble de l'énergie, tandis que le milliard le plus pauvre n'en consomme que 4 %. Ceci est une source de tensions et d'accusations selon laquelle les pays développés gaspillent l'énergie. Excuser cette grande consommation sous le prétexte d'une forte activité industrielle est tout simplement faux. Le Japon, par exemple, a une économie très développée, la deuxième du monde, mais la consommation par habitant est la moitié de celle des États-Unis. La tarification joue un rôle très important ; ce n'est pas surprenant puisque les États-Unis pratiquent les plus bas prix, et de loin, pour le diesel et l'essence (données de IEA KeyWorld Energy Statistics, 2016).

1.2 L'impact sur l'environnement

1.2.1 Le problème

Les carburants carbonés d'origine fossile ont tous une chose en commun : ils créent tous du dioxyde de carbone (CO_2) lors de leur combustion. Ils ont une part importante du long cycle terrestre de carbone, qui a été fixé durablement durant les périodes géologiques, quand le climat était tropical sur la majorité de la planète, et le taux de CO_2 très important. Cette fixation du carbone par la croissance des plantes, et leur conversion en charbon, pétrole, tourbe et gaz a permis la réduction de manière très significative du taux de CO_2 , et joué un grand rôle dans le refroidissement de la planète ; ce qui a permis l'apparition de formes de vie plus développées. Le débat est que ce carbone non fixé peut entraîner le changement du climat dans une autre direction, avec un réchauffement global pour toute la planète à cause d'un effet de serre excessif.

L'analyse des échantillons sur des calottes glaciaires indique que le niveau du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est plus ou moins stable, un taux de 260 parts par million (ppm), si l'on considère les derniers millénaires jusqu'à l'arrivée de la révolution industrielle au début du XIX^e siècle. Ensuite, le taux de CO_2 a commencé par augmenter lentement, jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, puis rapidement, indiquant par là même l'exploitation à grande échelle des carburants

carbonés d'origine fossile. Aujourd'hui, le taux est de l'ordre 400 ppm et croît très vite, comme l'indique la figure 1.3, obtenue selon des données de la NASA et d'autres sources.

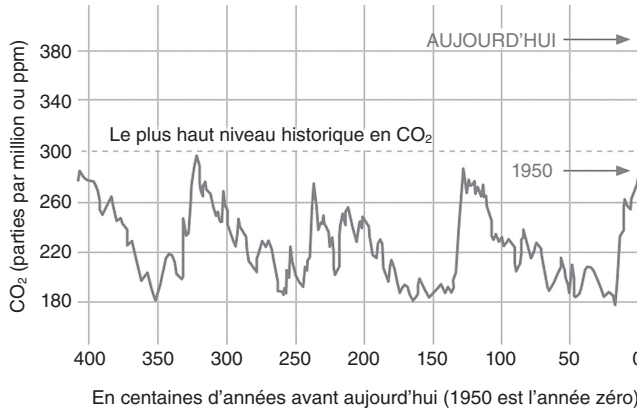


Figure 1.3 – Historique de la concentration atmosphérique en CO₂, en parties par million (*1 ppm = 1 molécule de CO₂ pour 1 million de molécules équivalentes d'air). Reproduit avec l'aimable autorisation de la NASA.

Le CO₂ n'est pas le seul gaz polluant issu de la combustion des carburants carbonés d'origine fossile ; la combustion dans l'air qui contient 78 % d'azote produit inévitablement des oxydes d'azote, NO, NO₂ et N₂O, globalement notés NO_x ; et les sulfures contenus dans le combustible vont donner des émissions de SO₂, ou d'autres oxydes, globalement notés SO_x. Ces gaz NO_x et SO_x sont à l'origine des pluies acides. C'est pour cette raison que l'on a installé des systèmes de désulfuration dans les centrales utilisant des carburants carbonés d'origine fossile. Avec, en contrepartie, une réduction du rendement thermodynamique de ces installations, et une plus grande émission de CO₂.

Les réserves de charbon sont énormes, mais ce combustible est moins intéressant que le pétrole, du point de vue « émission de CO₂ » et aussi beaucoup plus difficile à extraire. Le charbon le moins cher provient des mines à ciel ouvert, mais ce mode d'extraction crée d'énormes dommages pour l'environnement. Toutes les formes d'extraction ont un certain impact sur l'environnement, mais ceci n'apparaît pas dans le coût de l'électricité. Et c'est la raison pour laquelle les coûts environnementaux additionnels sont désignés comme **coûts externes supplémentaires**.

Ces coûts externes sont les conséquences d'une activité qui normalement ne font pas partie de l'analyse économique. Par exemple le coût social des maladies ou des dommages à l'environnement provenant de la pollution causée par une centrale électrique donnée n'est pas à la charge du responsable économique de cette installation, ce qui revient à dire qu'il est extérieur à la microéconomie liée à la centrale. Un certain nombre de pays européens tiennent compte aujourd'hui des coûts externes provenant de la production de l'électricité, par une sorte d'impôt ou de

taxe sur le carbone. Le marché du carbone, exposé en détail au chapitre 7, est un autre moyen d'atteindre cet objectif.

Des arguments économiques plaident en faveur de l'énergie nucléaire. Bien entendu, elle n'est pas sans coûts externes, bien que l'impact au niveau environnemental soit l'objet de beaucoup de controverses. Les déchets radioactifs, les émissions de rayons ionisants et la décontamination finale des réacteurs radioactifs sont rarement pris en compte, et doivent entrer dans la catégorie des coûts externes supplémentaires. Il y a aussi des études concernant les dommages environnementaux causés par les mines d'uranium, mais elles montrent qu'ils sont similaires à ceux des mines de charbon. Si le nucléaire réduit les émissions de CO₂, il est important de savoir exactement de combien est cette réduction. C'est un sujet très controversé. Le taux bien connu d'émission de 386 g de CO₂/kWh introduit par les centrales au gaz peut servir de base de discussion. Dans le cas du nucléaire, les estimations vont de 11-22 g de CO₂/kWh pour l'OCDE, à 10-130 g de CO₂/kWh pour l'ISA de l'université de Sydney. Une récente revue de l'InterGovernmental Panel on Climate Change (IPCC) a identifié certaines publications et est allée jusqu'à 50, à 16 g/kWh pour une centrale nucléaire. Elle a pris pour référence 469 g/kWh pour une centrale au gaz. Si la publication la plus favorable concernant le choix du nucléaire s'avère valable, une réduction du CO₂ en utilisant l'énergie nucléaire resterait néanmoins contestable.

1.2.2 L'analyse scientifique

La science du changement climatique est aujourd'hui bien établie et son but premier est d'établir le lien entre les concentrations de CO₂ et d'autres gaz d'une part, et la croissance de la température d'autre part. Son développement a été l'objet de la commission IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) qui a été créée en 1988 par le programme environnemental de l'organisation météorologique mondiale et des Nations Unies. Il concerne maintenant les savants de 193 pays.

La figure 1.4 fournie par la NASA après mises à jour indiquées à la référence [6] montre le changement en moyenne de 1880 à 2015. La courbe noire de tendance est lissée, tandis que les *moyennes* annuelles sont indiquées par des points. La température est en moyenne restée stable entre 1940 et 1970. La Terre s'est réchauffée de 0,9 °C depuis cette période, portant la température globale au plus haut depuis 12 000 ans.

Les dix années les plus chaudes sont intervenues depuis 1990, ce qui montre de manière évidente, de manière physique et biologique, le changement climatique. La plupart des modèles de climat montrent que le doublement de la concentration des gaz à effet de serre depuis la période préindustrielle provoque très probablement une croissance entre 2 et 5 °C de la température moyenne mondiale. Ce niveau risque d'être atteint entre les années 2030 et 2060. Si rien n'est entrepris, on atteindrait plus que le triplement de la concentration des gaz à effet de serre depuis la période préindustrielle vers 2100, la température moyenne mondiale aurait alors augmenté alors entre 3 et 10 °C selon les dernières projections sur le climat.

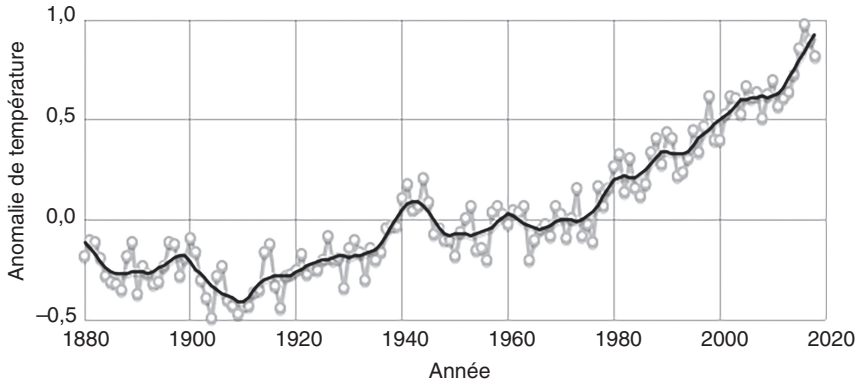


Figure 1.4 – Variation moyenne de la température globale terre-océan de 1880 à 2015 (données en °C). Source : données gracieusement fournies par le NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS) © NASA/GISS.

Bien que la relation entre la concentration en CO_2 , le changement de la température et les variations indésirables du climat soit très complexe, et dès lors très difficile à prévoir avec précision, il est largement admis que cette concentration doit être stabilisée si on veut que les dommages dus au réchauffement de la planète soient évités.

Le IPCC conclut en 2001 qu'il y a une forte présomption que la plus grande partie du réchauffement observé ces 50 dernières années soit liée aux activités humaines. Ceci est confirmé par le *Joint Statement of Science Academies* (2005) et le rapport du programme de *l'US Climate Change Science* (2006). Un autre rapport de l'IPCC, le cinquième (AR5), confirme plus encore cette conclusion et affirme que les dommages globaux dus au réchauffement sont désormais inévitables.

La preuve la plus claire de l'échauffement causé par l'activité humaine est fournie par une modélisation climatique développée par le *Halley Centre for Climate Prediction and Research* au Royaume-Uni. À la figure 1.5, la température moyenne

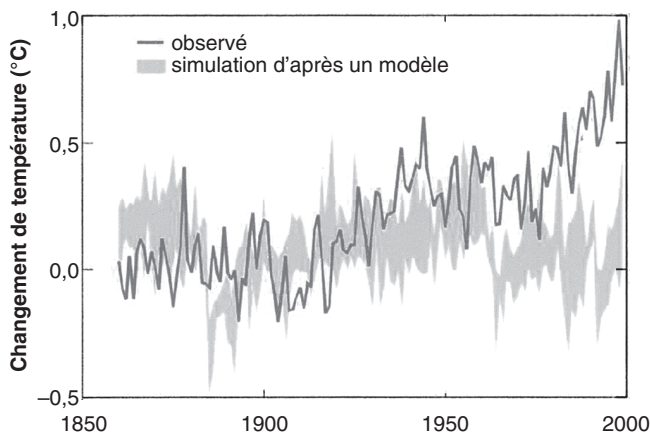


Figure 1.5 – Les facteurs naturels ne peuvent expliquer le réchauffement de la planète. Source des données : Crown Copyright 2007, the Met Office.

de la planète observée depuis les années 1900 (et même avant) est indiquée par la ligne noire. Le modèle climatique est développé ici selon des facteurs naturels, tels que le soleil, le changement dans l'atmosphère dû aux émissions volcaniques, les interactions entre l'atmosphère et les océans sont dans la bande grisée. La figure 1.5 montre un net désaccord entre les deux courbes à partir des années 1970, où l'écart de température dépasse $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, et cet écart ne cesse de croître, alors que les facteurs naturels n'ont pas changé de cette manière.

Si maintenant, au modèle précédent, on ajoute les facteurs humains, tels que le changement dû aux gaz à effet de serre ou à la concentration de particules de sulfate, le modèle présenté en figure 1.6 est beaucoup plus en accord avec la courbe de la température (qui est la même pour les figures 1.5 et 1.6). Par ailleurs, les modélisations du climat par d'autres centres de recherche arrivent aux mêmes conclusions.

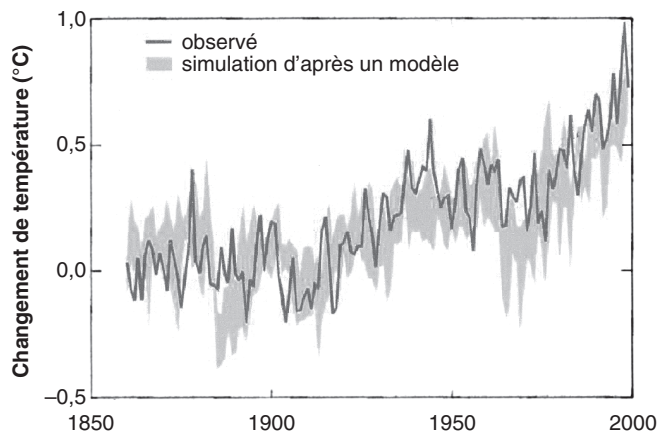


Figure 1.6 – Le réchauffement de la planète peut être correctement simulé lorsque l'activité humaine est prise en compte. Source des données : Crown Copyright 2007, the Met Office.

1.2.3 Le protocole de Kyoto

Les effets du changement climatique sont globaux et leur diminution ne peut être obtenue qu'à la suite d'un effort international et coordonné. Signé en 1997, le protocole de Kyoto a pour but la réduction des émissions de gaz à effet de serre, dans la période 2008 à 2012, à $5,2\%$ en dessous de ceux de 1990. Le protocole de Kyoto fait partie du cadre de la Convention pour le Changement Climatique des Nations Unies en 1994 (UNFCCC). Les États-Unis l'ont signé, mais ne l'ont pas ratifié et le Canada l'a quitté en 2011. Les émissions des gaz à effet de serre provenant des USA sont actuellement 20% plus grandes qu'en 1990 tandis que le but recherché par le protocole est une réduction de 7% .

Les accords de Paris, qui devaient venir en force courant 2016, sont le développement le plus récent de l'UNFCCC. Pour la première fois, ils demandent aux pays participants de travailler ensemble pour limiter la croissance de la température durant ce siècle en dessous de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, au-dessus des niveaux à l'époque préindustrielle,

et de poursuivre les effets pour limiter la croissance à 1,5 °C. Un soutien financier devrait être donné aux pays en développement pour leur permettre de contribuer à ce but global. Bien que les aspirations de ces accords soient louables, leurs faiblesses résident dans le manque de cibles nationales précises, et dans l'absence de sanctions pouvant être appliquées pour s'assurer du progrès réalisé.

Selon le rapport de l'IPCC (InterGovernmental Panel on Climate Change), la limitation à 2 °C pour la croissance de la température équivaldrait à une limitation en CO₂ à 450 parts par million (ppm) à l'an 2100. Ceci signifie que les émissions doivent être entre 40 et 70 % en dessous des niveaux de 2010 en 2050. Le rapport de l'IPCC pour obtenir la réduction de CO₂ indique la chose suivante :

« Un nombre limité d'études seulement ont exploré les scénarios qui sont les *plus probables ou les plus improbables* pour apporter en 2100 un changement de température en dessous de 1,5 °C relativement à l'époque préindustrielle. Ces scénarios indiquent une concentration atmosphérique en dessous de 430 ppm de CO₂ en 2100. »

Étant donné le niveau actuel du « CO₂ équivalent », ceci semble plutôt impossible. Il est clair, cependant, qu'il serait prudent pour les pays industrialisés de réduire leur émission par au moins 60 % en 2050, pour que les pires effets du changement climatique puissent être atténués en toute certitude, et mieux encore si la limite à 1,5 °C recherchée est obtenue. C'est un défi énorme pour les individus, les gouvernements et les organismes supranationaux.

Une grande responsabilité revient aux nations produisant les plus grandes émissions de CO₂ par habitant ainsi qu'à celles qui montent rapidement dans le tableau qui suit. Le tableau 1.1 indique les variations selon les pays et les groupes énergétiques (*i.e.* les émissions associées aux changements sur les terres et les forêts), les émissions par tête et les méthodes d'évaluation de l'émission par tête. Le total des émissions de la Chine dépasse celui des USA, bien qu'il soit plus faible par habitant. La figure 1.7, obtenue à partir du récent rapport IPCC (AR5), montre clairement que pendant que les émissions des pays de l'OCDE étaient relativement stables entre 1970 et 2010, l'Asie a subi une rapide expansion des émissions durant la même période, et que les données les plus récentes confirment cette tendance.

Le développement rapporté par l'IPCC dans l'AR5 n'est pas encourageant. En dépit de l'ensemble des politiques pour la réduction du changement climatique adoptées dans le monde, les émissions de gaz créées par l'homme continuent à progresser, et même s'accroissent. Au cours des années 2000-2010, les émissions mondiales ont augmenté de 2,2 % alors que le taux de croissance prévu était seulement de 1,3 % sur 30 ans. La figure 1.8 montre les tendances des émissions des gaz issues de l'activité humaine ; la crise de 2008 n'a causé qu'une brève réduction. AR5 examine également la concentration à venir des gaz en 2100, avec la probabilité associée de contrainte de croissance globale de température de 2° relativement à l'époque préindustrielle.

D'autre part, il est improbable que les scénarios qui prévoient une concentration de 650 ppm ou plus permettent une limitation de la température globale comme préalablement exigé.

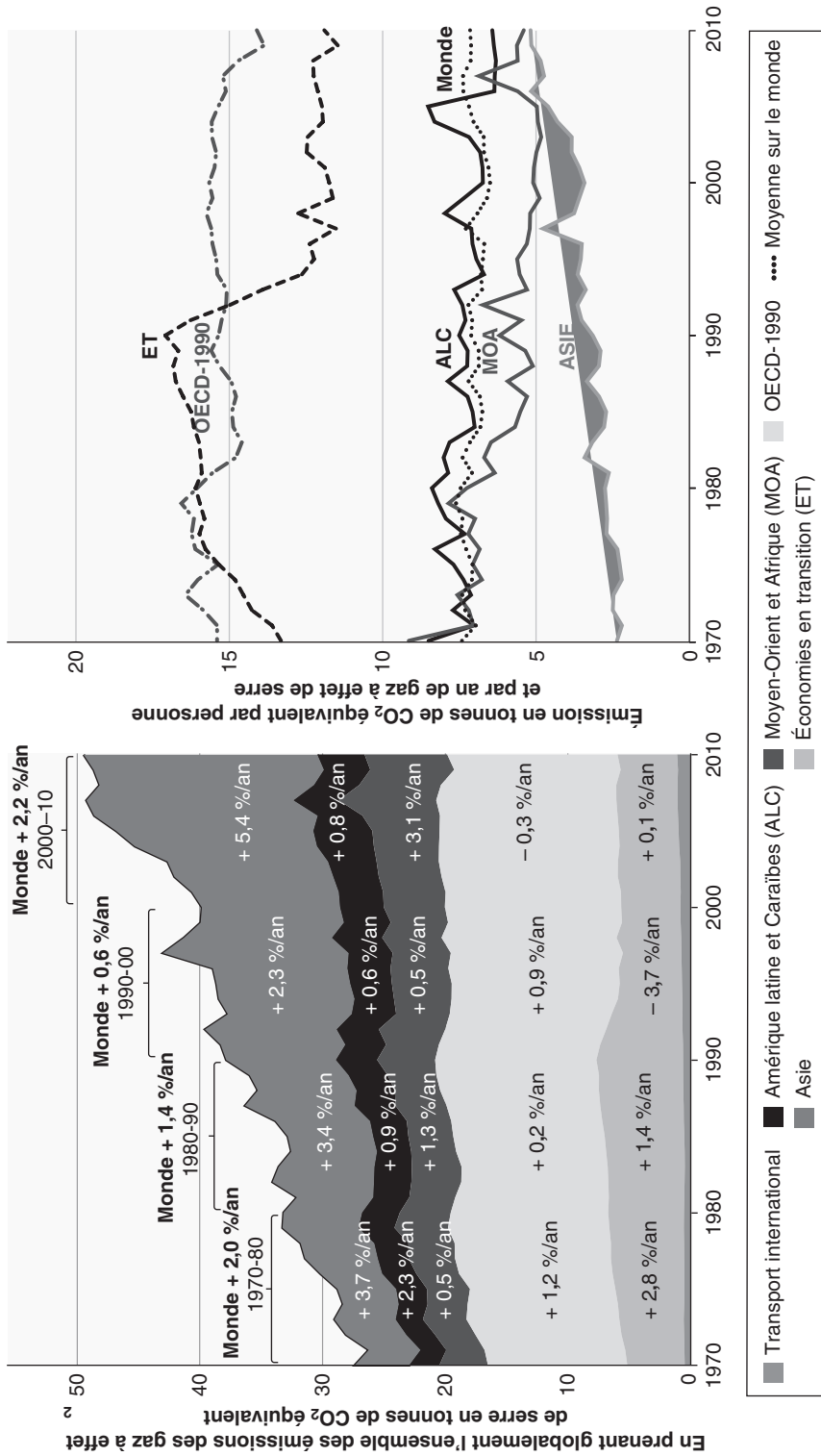


Figure 1.7 – Différences de croissance des gaz à effet de serre selon les régions du monde entre 1970 et 2010. Données fournies gracieusement par IPCC. L'axe vertical a cumulé les quantités émises et on indique en pourcentage par an selon la région les taux de croissance.

N.B. : courbes (à droite) en tonnes de CO₂ équivalent par personne et par an.

Tableau 1.1 – Données du CAIT (Climate Data Explorer 2017, Washington DC).

Pays ou groupements de pays	Émissions de gaz à effet de serre en mégatonnes équivalent CO ₂	CO ₂ par habitant en tonnes par an	Revenu annuel par habitant (en \$)
USA	6 280	19,9	56 115
Europe	4 224	8,3	32 005
Royaume Uni	456	7,1	43 876
Japon	1 353	10,7	34 524
Chine	11 735	8,6	8 028
Inde	2 909	2,3	1 598
Monde	45 261	6,4	10 057

Il conclut que les scénarios qui atteignent 450 ppm CO₂ en 2100 sont plus probables qu'improbables pour limiter l'accroissement de température à moins de 2 °C.

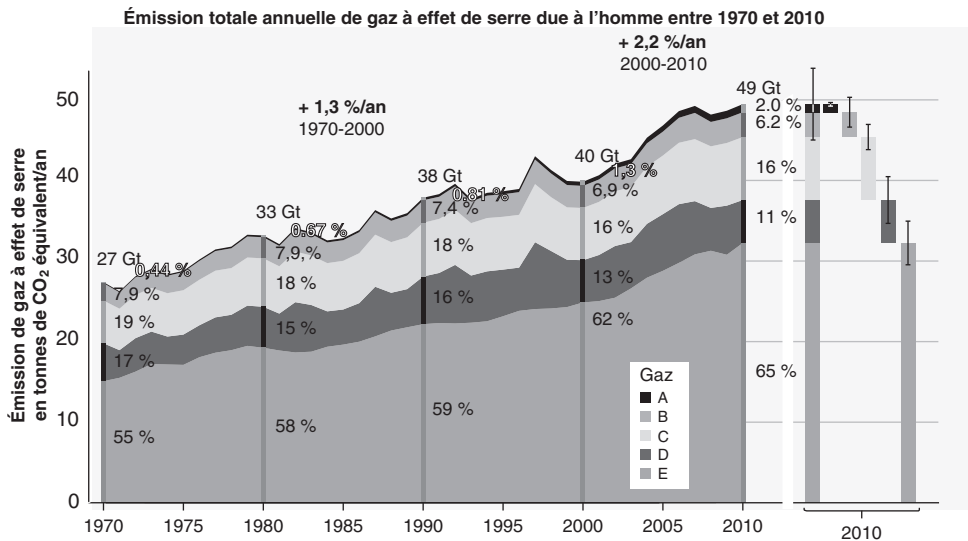


Figure 1.8 – Effet anthropique (dû à l'homme) sur le climat mondial des gaz à effet de serre et différences de leur croissance selon la date. L'axe vertical a cumulé les quantités émises de CO₂ équivalent indiquées en pourcentage par an.

Données reproduites avec l'aimable autorisation de l'IPCC. A, gaz à effet de serre fluorés (HFCs, PFCs, SF₆...); B, N₂O; C, CH₄; D, CO₂ naturel y compris des forêts et des campagnes; E, CO₂ provenant des combustions et de l'industrie.

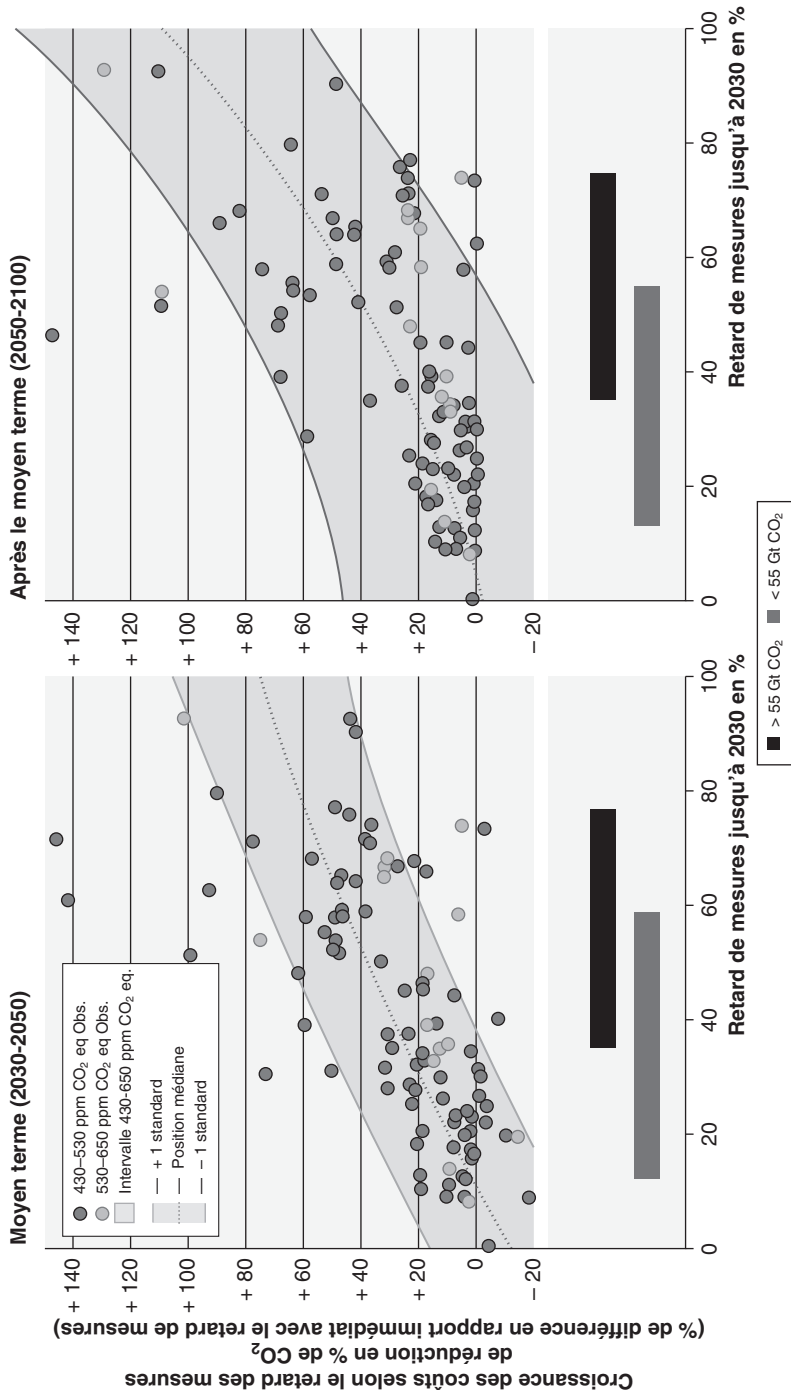


Figure 1.9 – Impacts financiers à moyen terme (2030-2050) et à long terme (2030-2100) selon les retards sur les mesures de réduction en % de CO₂ jusqu'à 2030. L'axe vertical a indiqué la croissance des coûts en %, ppm CO₂ eq. obs., parties par million CO₂ équivalent observé ; - 1 Standard, écart en moins par rapport au standard ; + 1 Standard, écart en plus par rapport au standard ; > 55 Gt CO₂ supérieur à 55 gigatonnes de CO₂ (mondial) en 2030 ; < 55 Gt CO₂, inférieur à 55 gigatonnes de CO₂ (mondial) en 2030.

Données reproduites avec l'aimable autorisation d'IPCC.