
Ce qu'on savait sur le changement climatique dans la seconde moitié du XX^e siècle

Une petite histoire de la recherche sur le climat



| | |
|-----------|------------|
| Version 1 | 17.11.2022 |
| Version 2 | 12.12.2023 |
| | |
| | |
| | |

Imprint :

Proposition de citation

Bardou E. 2024. Ce qu'on savait sur le changement climatique dans la deuxième moitié du XX^e siècle. Une petite histoire de la recherche sur le climat

Rapport N°:

White paper n°2

Auteurs :

Eric Bardou

DSM-consulting

Barma 1

1973 Nax

Tel. +41 79 423 45 42

Email : info@dsm-consulting.ch

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 1 |
| 1.1. Le fonctionnement de la science..... | 2 |
| 1.2. Le malentendu avec les médias..... | 3 |
| 2. Les prémices de la recherche climatique | 4 |
| 2.1. La découverte de l'âge de la terre..... | 4 |
| 2.2. Les défricheurs de la recherche sur le climat | 5 |
| 3. Une période de réels doutes scientifiques | 6 |
| 4. Vers une meilleure capacité de mesure..... | 7 |
| 5. Vers une quantification absolue..... | 9 |
| 6. Information des politiques..... | 10 |
| 7. La science climatique entre dans l'ère digitale | 11 |
| 7.1. Les débuts du calcul numérique..... | 11 |
| 7.2. L'effet controversés des aérosols | 12 |
| 7.3. Les mesures satellitaires..... | 13 |
| 8. Perspectives issues de la recherche..... | 13 |
| 9. Conclusions | 15 |
| 10. Bibliographie | 16 |

1. Introduction

Vous êtes curieux et ne prenez pas les informations données par les politiciens pour argent comptant. Vous appréciez de voir comment science, histoire et société s'interpénètrent et quelles relations la politique et les médias démocratiques ont façonnées. Alors, ce document va vous intéresser. De plus, en remontant aux sources, la plupart des grands noms de la physique du XIX^e au XX^e siècle vont apparaître.

L'histoire du CO₂ a passionné les grands noms de la chimie et de la physique du XIX^e et du XX^e siècle.

Durant l'été 2018 Greta Thurnberg, exaspérée par l'inaction des gens en charge de guider la société, a commencé sa grève du climat. Le monde emporté par l'élan d'une jeune fille se met à bouger. Le 15 mars 2019 à Sion (Figure 1). Grève des jeunes pour le climat à Sion, le 15.03.2019.", page 1), comme dans le reste du monde, les étudiants descendent dans la rue. La société suisse se réveille, le climat est devenu un sujet de société. Pour ceux qui travaillent depuis longtemps sur les effets du bouleversement climatique (Figure 2), pour ceux qui mesurent le retrait des glaciers, ... ils pourraient se dire enfin ! Mais enfin quoi ! Que savait-on sur le réchauffement du climat et depuis quand ? Cet article s'attache à répondre à cette question et regardant le déroulement de l'histoire scientifique.



Figure 1. Grève des jeunes pour le climat à Sion, le 15.03.2019.

L'histoire des sciences montre qu'un décalage chronologique, parfois important, existe entre la découverte d'un phénomène, son établissement robuste dans les théories scientifiques et son application pour la société. Néanmoins, l'actualité récente, avec la pandémie du Covid-19, nous a enseigné que lorsque qu'il y a la probabilité de mourir dans les deux semaines à venir, il est possible d'appliquer le résultat des recherches scientifiques assez rapidement. Entre ces deux extrêmes, la question est de savoir pourquoi les politiciens, les économistes, les financiers, ceux qui dirigent le monde, ne semblent réagir que depuis peu ?

Il y a des voix disant que d'insister sur la catastrophe peut être contre-productif. Ici, toutefois, ce n'est pas un discours alarmiste, mais un coup de gueule, car en étudiant les sources pour écrire cet article, je me suis dit qu'on s'était bien moqué de nous !

Si cela rebute certains de regarder les choses en face, ils peuvent se tourner vers plusieurs initiatives salutaires qui sont en route. Je citerais seulement celles de [Paul Hawken](#), ou celle de [Cyril Dion](#). Dans tous les cas, pour éviter un retour à l'âge des cavernes, il faudra changer. Si on veut le faire de façon fluide et humaine, cela vaut la peine d'étudier les écrits de [Kate Raworth](#). Finalement, j'ai écrit cette histoire en français pour la rendre accessible au gens qui m'entourent et car il existe suffisamment de littérature en anglais sur le sujet.



Figure 2. Là où, adolescent, j'apprenais la marche en crampons et piolet !

Il y a des solutions, mais plus le temps passe plus elle demanderont d'efforts pour être mises en place. Trop d'attente pourrait aussi conduire à des tensions sociales très fortes.

Mais, avant d'entrer dans l'histoire, il faut prendre en compte quelques éléments sur le fonctionnement de la science, du journalisme (qui est une source d'informations bienvenues pour la société) et de leur interrelation.

1.1. Le fonctionnement de la science

Ce qui justifie le "salaire" des chercheurs, ce sont les articles scientifiques qu'ils rédigent. Ceux-ci ne doivent pas être confondus avec des articles de presse. Déontologiquement, on ne peut pas publier un même résultat une seconde fois. Comme cette pratique est vraiment universelle, il se peut que plusieurs groupes de recherche travaillent sur le même sujet et soient donc en concurrence. Ils doivent travailler d'arrache-pied pour pouvoir publier en premier. Si c'était la seule règle, on publierait à tout va, même des faits à moitié prouvés.

Une seconde règle a donc été ajoutée : la relecture par les pairs. Pour qu'un article scientifique soit publié, il doit être accepté, en général par deux relecteurs et l'éditeur du journal considéré. Donc trois personnes (au moins), généralement des scientifiques, travaillant dans le même domaine et ayant le même niveau de connaissances sur le sujet, vont relire le manuscrit et exiger de répondre à des questions assurant la justesse, l'unicité et la reproductibilité des travaux.

Ce fonctionnement est tourné vers l'accroissement des connaissances. La nouveauté d'une affirmation n'a pas besoin d'être une révolution. Ainsi, chaque résultat publié est tenu à disposition de tout un chacun¹ et peut être tenu pour acquis. Un résultat publié pourra alors être cité pour servir de base à une nouvelle argumentation développée à partir de ce point. La négative est aussi vraie, il est possible de critiquer un résultat, pour autant que l'argumentaire tienne la route. La science est incrémentielle !

Notez qu'en histoire, comme dans les autres branches scientifiques, accéder à la référence bibliographique permet de vérifier la véracité et le niveau technique de l'affirmation². C'est une des différences entre un article scientifique et un article médiatique. En pratique, on ne peut pas éviter certains biais inhérents à la nature humaine, quelques coups de pouces de groupes de recherche amis acceptant une rigueur un peu moins stricte ou alors des groupes concurrents qui voient là une bonne manière de retarder leurs challengers. Mais globalement ce système fonctionne relativement bien. A ce jour, on n'en a pas trouvé d'autres (Lane, 2017; Spier, 2002).

Malgré quelques tricheries et tricheurs, il n'en reste pas moins que, pour un article de dix pages (incluant des illustrations), il n'est pas rare d'avoir plus d'une cinquantaine de questions des relecteurs auxquelles une réponse doit être apportée. Sans réponse argumentée, les relecteurs recommanderont à l'éditeur le rejet de l'article. Une partie des questions est souvent liée à la langue, pas suffisamment claire dans le premier jet. Une autre concerne des points scientifiques de méthode ou d'interprétation des résultats. Il faut alors remettre l'ouvrage sur le métier. Apporter les éclaircissements permettant l'acceptation de l'article peut demander plusieurs semaines de travail supplémentaire. La publication d'une idée révolutionnaire peut être assez difficile car les relecteurs n'ont pas fait votre travail et seront d'abord réticents. Ils trouveront beaucoup d'arguments contre et le travail de persuasion scientifique sera ardu et fastidieux. Toutefois, et ce n'est pas qu'une tournure de phrase standard, les relecteurs sont généralement remerciés en fin d'article car, sa qualité se trouve améliorée, grâce à leurs remarques.

- 1 Aujourd'hui il est possible de faire une recherche sur le web (en utilisant par exemple <https://scholar.google.ch/> ou en collant dans un browser le *digital object identifier*, doi: + le numéro indiqué en référence). On peut aussi trouver les articles scientifiques en relation avec les mots-clés entrés. Une fois trouvés, les journaux qui ne sont pas en *open-access* nécessitent l'achat de l'article. Dans ce cas, un petit email directement à l'auteur permet, moyennant en petit délai, d'obtenir l'article gratuitement. Ces journaux sont aussi accessibles gratuitement en format imprimé dans les bibliothèques des universités.
- 2 Ce système peut aussi être utilisé pour vérifier les assertions des personnes donnant leur avis dans les médias. S'ils maîtrisent un sujet, ils auront publié des articles scientifiques à ce propos. Sans mention de ces publications scientifiques, leur avis peut être motivé par d'autres motifs que la recherche de d'un savoir objectif !

Le fonctionnement de la science et de la publication scientifique, justificatif du salaire des chercheurs.

Retenez que, pour publier un article scientifique un travail méticuleux est nécessaire et que l'auteur (et la plupart du temps il y en a plusieurs pour un article), deux relecteurs et un éditeur, soit au moins 4 personnes doivent être d'accord avec les résultats. En faisant une recherche en 2019 sur les articles scientifiques parlant de l'existence prouvée du réchauffement climatique, 488'000 articles ont été trouvés, donc au minimum 1'952'000 personnes qui se sont mises d'accord entre elles. Ce ne sont pas exactement les mêmes proportions que de donner la parole à 2 personnes aux avis divergents, un scientifique et un climato-sceptique par exemple, dans un débat soi-disant équilibré sur un plateau de télévision.

1.2. Le malentendu avec les médias

Ainsi, dans un mode de fonctionnement démocratique, les politiques doivent convaincre l'opinion publique du bien fondé de leurs intentions. Pour que la démocratie fonctionne, et c'est primordial, il faut que les médias, "faiseurs d'opinions", donnent une parole plus ou moins équilibrée à toutes les visions, à tous les partis politiques. Rien à redire à cela.

Le malentendu s'installe lorsque le même traitement est appliqué à la gestion d'une question scientifique. Le journaliste, pensant bien faire son travail, va donner la parole à des avis divergents. Le problème, c'est que l'on va mettre ainsi dans la balance de l'opinion une vision scientifiquement acceptée par plusieurs milliers, voire millions, de personnes avec celle défendue par des critiques ne représentant, dans le meilleur des cas, que leur avis, dans le pire celui de lobbies opposés aux évidences scientifiques pour des raisons souvent purement économiques.

Les défauts de ce mécanisme ont été mis en évidence par Oreskes et Conway (2012). Afin de continuer le *business as usual*, les partisans du *statu quo* vont semer le doute et la controverse afin de contrer le consensus scientifique. Ce mécanisme a été mis en lumière lorsqu'on a rendu évident le lien entre le cancer et la cigarette, les CFC et le trou d'ozone, ainsi que la pollution et les pluies acides. Pour éviter ce malentendu, il suffirait de faire une recherche sur [Google Scholar](#)³ afin d'établir quel crédit scientifique attribuer aux assertions de pseudo-experts climatiques. Quels sont les articles qu'ils ont publiés, dans quels journaux et dans quels domaines ? Ces articles ont-ils engendré des réponses (polémiques), ou sont-ils largement recités par d'autres scientifiques ? Voilà des signes faciles à mettre en évidence pour décider, ou pas, de donner la parole à quelqu'un sur une question scientifique.

Les lobbies ont utilisés les messages précautionneux des scientifiques pour tourner les incertitudes inhérentes à des recherches très complexes en messages réfutant la qualité des études.

3 Google Scholar est un outil de recherche sur internet qui fouille dans les données publiées scientifiquement.

2. Les prémices de la recherche climatique

2.1. La découverte de l'âge de la Terre



Figure 3. Exemple de la première édition de la bible imprimée par Gutenberg (Photo: A. Bardou).

La découverte du temps profond (*deep time* en anglais) permet un renouveau des paradigmes en science naturelle.

Au début du XIX^e siècle, la vision scientifique du monde et de la nature est encore largement celle présentée dans la Bible. Le monde a été créé par Dieu en 7 jours. D'après l'archevêque James Ussher, l'histoire du monde avait commencé le 23 octobre 4004 avant n.è. Ceci ayant été calculé en se basant sur les âges des personnages cités dans la Bible (Figure 3). Au XIX^e siècle l'accumulation d'observations de fossiles d'animaux éteints et d'animaux "tropicaux" dans des zones aujourd'hui froides, a commencé

à ébranler quelques certitudes. En 1859 paraîtra "L'origine des espèces", de Charles Darwin. Celui-ci a pu s'appuyer sur les travaux de ses prédécesseurs qui ont permis la découverte de ce qu'on appelle le temps profond (par ex. Bardou, 2009). Que ce soit pour l'évolution biologique, ou celle du paysage, cette découverte du temps profond va permettre de comprendre la variabilité intense du climat.

Les glaciers, au premier rang des objets menacés par le climat, vont aussi être étudiés. Le lien avec le climat est relativement simple. Il fait froid, les glaciers avancent (au XIX^e siècle le Petit Age Glaciaire se termine); il fait chaud, ils disparaissent. Plusieurs auteurs notent ces changements, comme Placidus a Spescha (Scapozza, 2019). C'est aussi le cas de Ignaz Venetz et Jean de Charpentier, qui à la faveur des travaux visant à minimiser la débâcle de Gietro en 1818, vont rencontrer Jean-Pierre Perraudin (Reynard, 2019). Perraudin, montagnard et bon observateur naturaliste, a l'intuition que les glaciers du Val de Bagnes étaient plus étendus par le passé. Il a en effet reconnu les marques d'érosion laissées sur les roches sur des rochers plus bas dans la vallée. "Peut-être même qu'ils ont été jusqu'à Martigny", pense-t-il. En voulant lui prouver qu'il avait tort, les scientifiques vont mettre en avant les éléments qui finissent par prouver qu'il avait raison. Il vont ainsi donner naissance à la "Théorie glaciaire" et par là même à la reconnaissance de la variabilité climatique.

En 1909, deux scientifiques bavarois, Penck et Brückner publient "*Die Alpen im Eiszeitalter*", sur la base des moraines observées au sud de Munich (Figure 4). Les glaciers ont atteint les rivières de la banlieue munichoise (donnant au passage le nom de certaines glaciations dans les Alpes, comme le *Würm*). Au début du XX^e siècle il était donc évident que le climat avait dû fortement se réchauffer pour mettre en évidence le recul des glaciers de Munich à la haute partie des Alpes !

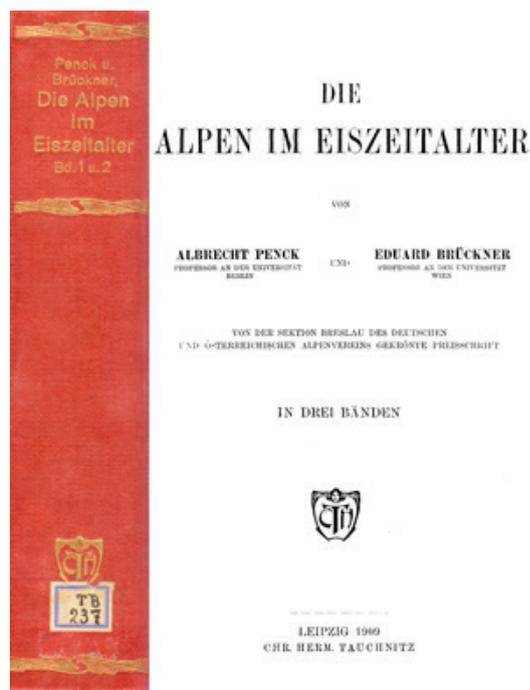


Figure 4. Couverture de l'édition "*Die Alpen im Eiszeitalter*" de 1909 disponible à la Médiathèque de Sion.

2.2. Les défricheurs de la recherche sur le climat

Qu'est-ce qui donne sa température à la Terre, permettant l'avance ou le retrait des glaciers (entre autres) ? Le Soleil évidemment. Ceux qui avaient connu une éclipse de Soleil avaient senti la baisse quasi instantanée de la température lorsque sa lumière directe était masquée. Cet astre était donc l'objet de recherche des astronomes. En 1801 Wilhelm Herschel, sur la base de taches observables à la surface du Soleil émet l'hypothèse qu'il a des cycles d'activité.

Dans un premier temps, les savants ont lié la température de la Terre avec l'énergie reçue du Soleil.

Avant lui, Horace-Bénédict de Saussure, celui qui incitera à la première ascension du Mont-Blanc, montrera que le rayonnement solaire est différent en altitude par rapport à la plaine, donc que la couche d'atmosphère l'influence. En 1824, en se basant sur les mesures de de Saussure, Jean Baptiste Joseph Fourier, le grand mathématicien français ajoutera des calculs thermodynamiques montrant que la Terre serait bien plus froide si elle n'avait pas d'atmosphère. Il décrit pour la première fois l'effet de serre.

De Saussure montre que l'atmosphère "filtre" le rayonnement solaire.

En 1856, Eunice Newton Foote, une Américaine remarque dans des manipulations au laboratoire que le CO₂ a un effet multiplicateur sur l'échauffement de l'air contenu dans des bouteilles. Elle fait la supposition que s'il y avait plus de CO₂ dans l'atmosphère il pourrait faire plus chaud. Le britannique John Tyndall⁴ décrit à nouveau l'effet de serre naturel en 1862, en identifiant les gaz qui en sont responsables, ainsi que leur contribution proportionnelle avec par ordre d'impact décroissant la vapeur d'eau, le CO₂ et l'ozone (O₃).

E.N. Foote observe l'effet amplificateur du CO₂ en 1856 déjà !.

Deux ans plus tard, l'écossais James Croll se base sur les observations des astronomes (comme Jens Esmark et Urbain Le Verrier) et des calculs de mathématiciens (entre autres Joseph-Alphonse Adhémar) et publie un article sur l'effet des cycles orbitaux de la Terre. Mais son apport principal est de mettre en avant la rétroaction de l'albedo de la glace sur la température globale. A partir des années 1870, les effets orbitaux sur le climat seront discutés dans la communauté scientifique. Dès les années 1920, Vladimir Köppen et Milutin Milanković confirmeront, avec des calculs plus précis, les hypothèses de Croll.

Les variations orbitales de la terre influencent l'apport énergétique du Soleil.

D'un point de vue physique, dès 1895, l'école allemande (Gustav Robert Kirchhoff, Wilhelm Wien, Josef Stefan et Ludwig Boltzmann) va travailler sur le rayonnement selon diverses longueurs d'ondes (entre autres, visible et infra-rouge). Tout ce corpus, permet de calculer le bilan radiatif de la Terre, donc sa température de surface. Ces travaux seront harmonisés en 1900 dans la loi de Planck (élaborée par le physicien allemand précurseur de la physique quantique Max Planck, prix Nobel 1918). C'est encore aujourd'hui la base physique de certains modèles climatiques.

Max Planck, par ses travaux, permettra le calcul du bilan radiatif de la Terre. .

En 1896, Svante Arrhenius, un chimiste suédois, calcule en tenant compte de l'effet de rétroaction de l'albedo de la glace, mis en avant par Croll et les travaux de Tyndall, qu'une division par deux de la teneur en CO₂ serait suffisante pour induire une période glaciaire. Ces travaux sont appuyés par d'autres scientifiques. Toutefois en 1899, Cyrus F. Tolman, un géologue états-unien estime que la plupart du CO₂ est stocké sous forme d'acide carbonique dans les océans. Ce pourrait être un formidable tampon (mais qui pourrait aussi accélérer le système). L'estimation de ce réservoir tampon restera longtemps incertaine avant de pouvoir être réellement mesuré (et s'avérer moins "protecteur" que prévu, nous le verrons plus tard). En revenant à Arrhenius, en 1908, ce dernier publie des résultats détaillés sur l'augmentation anthropique du CO₂ et l'effet que cela pourrait avoir sur l'augmentation des températures.

Au tournant du XIX^e et du XX^e siècle, Svante Arrhenius montre que la concentration de CO₂ module le climat. Il calcule que l'augmentation anthropique en CO₂ pourrait augmenter les températures.

4 Qui fut aussi membre de la première cordée à gravir le Weisshorn en Valais.

Dès le début du XX^e siècle, la plupart des bases physiques, chimiques, astronomiques et géologiques permettant de prévoir un réchauffement de la Terre à la suite de l'utilisation des combustibles fossiles sont disponibles. Notons aussi qu'il s'agit déjà d'une "recherche" internationale. Même sans internet les savants s'échangeaient volontiers leur données, leurs idées circulaient étonnamment vite et les publications étaient disponibles dans les bibliothèques (même celles de villes sans université).

Ils ignoraient cependant les développements socio-économiques futurs. Tout comme le GIEC qui définit aujourd'hui différents scénarii pour faire ses modélisations pour le climat futur, mais qui sont d'ailleurs sources de grandes incertitudes (malheureusement aucunes de ces incertitudes n'induit de refroidissement, leurs effets sont tous vers l'accroissement des températures).

Si le rôle du CO₂ était déjà compris au début du XX^e siècle, il manquait encore des éléments pour modéliser le climat.

Le XX^e siècle allait se dérouler, 1914 approchait et la folie qui mit à bas presque tous les Etats d'Europe, allait donner un grand élan à la science (pour de mauvaises raisons, mais nous verrons que les scientifiques ne sont pas tous inhumains). Malgré tout, certaines prises de conscience allaient être fortement retardées. Mais ne commettons pas d'anachronismes, certains éléments manquent encore au puzzle.

3. Une période de réels doutes scientifiques

Au début du XX^e siècle, une révolution scientifique est en cours. C'est l'apparition de la science quantique, dont les applications sur le rayonnement des ondes, comme la lumière solaire, est immense. Les avancées de la physique quantique se faisaient avant tout en théorie, et sur des expériences minutieuses en laboratoire. Chaque pays avait ses vedettes. Les capacités de mesure dans l'environnement, hors du laboratoire, étaient moyennes et ceux qui s'y frottaient étaient des passionnés, mais justement, pas forcément des vedettes de la science.

L'effet du CO₂ est souligné une nouvelle fois en 1931..

Notons seulement deux noms avant la fin de la 2^{ème} guerre mondiale : Edward O. Hulburt et Guy S. Callendar. En 1931, l'états-unien Hulburt s'attacha à mesurer plus exactement les coefficients d'absorption des gaz (plutôt que d'essayer de comprendre la structure complexe des bandes d'absorptions utile pour expliquer les sauts d'énergie quantique). Ses calculs remirent en avant ceux d'Arrhenius, la multiplication ou la division par 2 de la concentration de CO₂ pourraient faire changer de 4°C, en plus ou en moins, la température de la Terre (Hulburt, 1931).

En 1938, Callendar, un anglais spécialiste de la vapeur, mais passionné de climatologie, fait le lien entre le réchauffement enregistré depuis le début des mesures, avec une estimation de 0.15°C d'augmentation en 50 ans⁵, et le rejet par l'homme de millions de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère (Callendar, 1938). A cette époque l'effet de serre fut appelé l'effet Callendar. Notez qu'il savait de quoi il parlait et que sa connaissance n'était pas que théorique. Il mit en pratique l'effet de serre afin de faire disparaître le brouillard de certains aérodromes anglais durant la guerre en réchauffant localement l'atmosphère ... en brûlant 450 m³/h d'essence (appelé système [FIDO](#), Figure 5).



Figure 5. Bombardier atterrissant sur un aérodrome équipé du système [FIDO](#) (source Imperial war Museum).

⁵ Une réanalyse actuelle de 200 stations montre que le réchauffement sur cette période a été de 0.25°C.



Figure 6. *L'atmosphère est le siège de bien des processus, chimiques, physiques, aussi bien qu'esthétiques.*

Rappelons qu'à cette période les calculs se faisaient à la main. L'analyse de grandes quantités de données se faisaient sans tableur informatique. Cela limitait la prise en compte de relations complexes comme certaines, extrêmement non-linéaires, qui régissent la physique de l'atmosphère. La capacité des océans à dissoudre de grande quantité de CO_2 laissait penser que sa concentration planétaire pouvait être auto-régulée. Tout cela, la guerre, l'intérêt pour d'autres problématiques plus urgentes et un certain cloisonnement des spécialistes induisit qu'il n'y avait, à la fin des années 1930, pas de consensus sur l'avenir du climat.

L'effet de l'océan sur la dissolution du CO_2 restait encore à quantifier et à la fin des années 1930 les préoccupations étaient ailleurs !.

4. Vers une meilleure capacité de mesure

Les avancées scientifiques sur le climat faites entre 1945 et 1965 environ ont été établies dans des projets ne visant pas à étudier la dynamique du climat. Cela donne aussi une valeur à ce tournant. Les professionnels, payés pour d'autres tâches, ont vu de plus en plus d'évidences qui remettaient en avant certaines idées oubliées. Dans le contexte de la guerre froide, il fallait de solides raisons et quelque courage pour se concentrer sur des tâches qui n'étaient pas les leurs !

Après la guerre, le réchauffement du climat dû à l'augmentation du CO_2 n'était pas dans les priorités scientifiques. Le fait que le CO_2 devait se dissoudre dans la masse liquide de l'océan rassurait tout le monde. Toutefois, si depuis les années 1930 on comprenait les réactions chimiques qui se produisaient dans l'eau de mer, notamment en lien avec l'acidité, certaines subtilités ainsi que le mélange global des eaux restaient inconnues et toutes les tentatives de calcul du temps de résidence du CO_2 dans l'air restaient approximatives. Bref, dans une pensée plutôt linéaire, par nécessité, les quelques molécules (une centaines de ppm⁶) contenues dans l'air n'intéressaient pas grand monde au regard de la masse des eaux océaniques.

En 1950 on est en pleine guerre froide. Les USA (en tous cas eux et probablement en premier !) voulurent être capable de mieux mesurer le taux de radioactivité dans l'air. Non pas pour protéger l'environnement, mais pour détecter les explosions nucléaires des autres. C'était l'ère des essais dans l'atmosphère⁷. Des laboratoires de recherches militaires furent mis à contribution, ainsi que les scientifiques. Ce travail concernait, entre autres, la chimie isotopique et entre autres celle du carbone. A Chicago, le groupe de Willard F. Libby avait commencé à utiliser le C_{14} pour dater les matériaux archéologiques. La technique était balbutiante, mais les besoins de l'U.S. Air Force pour une mesure de très faibles quantités arriva à point nommé afin d'accélérer la science. Libby lui-même le reconnut : *"L'Air Force n'avait qu'un intérêt négligeable pour la datation des momies égyptiennes, mais elle se préoccupait beaucoup des mesures difficiles [de très faible niveau] de radioactivité"* (interview de Libby cité par Weart, 2019).

Les mesures des éléments de l'air devient primordiale durant la guerre froide et va accélérer l'analyse du carbone, entre autres du C_{14} .

Un des membres du groupe de Chicago, Hans Suess, découvrit comment les vieux arbres pouvaient être contaminés par l'isotope stable du carbone C_{13} . On allait pouvoir appliquer le même raisonnement pour comprendre la dissolution du CO_2 dans l'océan et par là même mieux comprendre la circulation océanique. Libby et Suess étaient chimistes et intéressés par l'archéologie.

6 Partie par million, unité de mesure de concentration d'une molécule, surtout utilisée pour définir une fraction massique soit 1mg/kg.

7 Dès que les satellites furent disponibles, ils furent utilisés pour détecter entre autre, le "double-flash" typique des explosions nucléaires. C'est ainsi que le 22 septembre 1979, à 00:53 UTC on détecta un de ces flashes fut détecté dans l'Atlantique Sud, appelé incident *Vela* (du nom du satellite). On ne sait toujours pas aujourd'hui qui a fait exploser cette bombe !

La dispersion des éléments chimiques dans l'océan peut s'étendre sur des km², mais ne se mélanger que sur une très faible épaisseur !

On commence à comprendre que le CO₂ pourrait s'accumuler dans l'air et être dommageable. Cette idée a déjà, à ce moment, été diffusée à un large public.

Par le jeu du fonctionnement de la science, de la publication d'articles et de la revue des projets de financement scientifique, intervient alors un troisième personnage : Roger R. D. Revelle. Revelle est océanographe et dirige l'institut d'océanographie Scripps en Californie. Sorti de la guerre avec le grade de commandant (avec des activités scientifiques), Revelle avait des liens étroits avec l'Office de la Recherche Navale de l'U.S. Navy (ONR). Lors des essais nucléaires dans le Pacifique, Revelle a pu compter sur une équipe de 80 personnes pour s'intéresser à la chimie de la zone d'océan impactée par les retombées radioactives. A l'époque, on était aussi intéressé à mettre les déchets radioactifs au fond de l'océan. En 1955 la Navy fit exploser une bombe sous la surface. L'année précédente, l'équipage d'un bateau japonais avait été sévèrement irradié. Les Etats Unis marchaient sur des œufs. En 1955 donc, l'équipe de Revelle reprit ces mesures lors de l'essai sous-marin. La radioactivité s'était répandue sur des centaines de kilomètres carrés ... mais sur une épaisseur de seulement 1 mètre d'eau. Revelle en conclut que "[les éléments chimiques] radioactifs allaient rester là pour plusieurs années, mais dilués seulement dans un volume d'eau de seulement 1/50 à 1/100 du volume de l'océan" (cité par Weart, 2019).

Revelle avait entendu parler, entre autres, des recherches de Callendar. Il comprit assez rapidement que, puisque le mélange océanique était très faible et que seule la couche supérieure était concernée par les échanges avec l'atmosphère, l'accumulation de CO₂ atmosphérique allait augmenter et "qu'il était possible qu'il puisse y avoir des effets importants et peut-être dommageables dès la fin du XX^e siècle" (cité par Weart, 2019). Cet avis sortit du cercle purement scientifique et fut **publié dans le Washington Post en mars 1956**.



Figure 7. Vagues, interface entre l'atmosphère et l'océan.

Toutes les données sur la dynamique des réactions chimiques eau-carbonates étaient connues, une à une, depuis les années 1930. Toutefois, leur combinaison en cascade dans l'océan n'avait pas été étudiée. La dynamique chimique de l'eau de mer change lorsque qu'on ajoute des molécules de CO₂. Effectivement, le CO₂ de l'atmosphère est rapidement absorbé par l'océan, mais la chimie de l'eau de mer fait qu'il va rapidement aussi être retourné à l'atmosphère. Il y avait encore des incertitudes dans les calculs liés à la capture par la biomasse, mais l'image globale était là : 80% du CO₂ restait dans l'atmosphère, à l'image de la petite augmentation observée par Callendar. A ce rythme-là, Revelle et Suess conclurent que dans les décennies (suivant 1957) "une augmentation de 20 à 40% du CO₂ atmosphérique pouvait être anticipée" (Revelle and Suess, 1957)⁸.

Point important : les prévisions de Revelle et Suess se basaient sur une augmentation linéaire de la population qui rejetait le CO₂ dans l'atmosphère. En fait, comme l'avait déjà émis, en 1954, le géochimiste et activiste Harrison Brown, la croissance démographique était exponentielle. Notons que ces estimations étaient en dessous de ce qui s'est réellement passé (Brown, 1954). Aujourd'hui, les choix et l'évolution de la société (démographie mais aussi choix stratégiques, industriels, économiques, etc.) restent une grande incertitude pour les prévisions⁹.

8 En 1959, deux suédois, Bert Bolin et Erik Eriksson ont clairement expliqué le principe de tampon de l'eau de mer et ses implications sur le climat (Bolin and Eriksson, 1959). De façon étrange le fichier pdf de leur article référencé a disparu de la National Science Digital Library, institution étatique américaine. On peut toujours le télécharger en mars 2019 ici https://geosci.uchicago.edu/~archer/warming_papers/bolin.1958.carbon_uptake.pdf.

9 Pour en tenir compte, le GIEC propose plusieurs scénarii, comme prendre des mesures pour limiter le taux de CO₂ ou continuer comme maintenant à ne rien faire. Le National Centre for Climate Services, l'instance Suisse sur les changements climatiques offre de nombreuses ressources, entre autres une grille de lecture pour comprendre comment l'affirmation d'un seul chiffre sur le climat futur ne veut rien dire et pourrait permettre à certains de biaiser le discours. Un résumé de cet "outil" se trouve ici : [comment interpréter un prévision climatique](#).

5. Vers une quantification absolue

Revenons à la science, 1957-1958 s'annonçait l'année géophysique internationale (AGI). Revelle s'était rendu compte que "[l'humanité] mène actuellement une expérience géophysique à grande échelle d'un genre qui n'aurait pas pu se produire dans le passé ni être reproduit à l'avenir" (Revelle and Suess, 1957). Il voulait obtenir une référence de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère qui puisse être comparée 10 ans plus tard. Il engagea le géochimiste Charles David Keeling pour faire ces mesures.

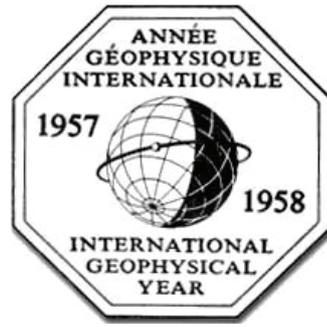


Figure 8. Ecusson de l'Année Géophysique Internationale.

Keeling installa ces capteurs au Mauna Loa, un volcan des îles Hawaii. Ce site, entouré de milliers de kilomètres d'océan était représentatif d'une atmosphère peu influencée par l'homme. Les mesures commencèrent en mars 1958. Elles continuent encore aujourd'hui sous le nom de la courbe de Keeling. En utilisant les travaux de la plupart des scientifiques engagés dans la recherche climatique (au premier rang desquels ceux qui analysent les bulles d'atmosphère emprisonnées dans les glaces) l'institut Scripps a pu reconstituer la teneur en CO₂ depuis 800'000 ans (cf. Figure 9). Cette concentration n'avait jamais dépassé 300 ppm. Aujourd'hui, en décembre 2023, elle vaut 421.10 ppm¹⁰.

La mesure directe du CO₂ atmosphérique commence. Lorsqu'on regarde cette courbe depuis le début de l'ère industrielle, soit depuis 1700, on appelle aussi la courbe en cane de hockey du fait de l'accroissement exponentiel qui se produit vers la fin du XX^e siècle.

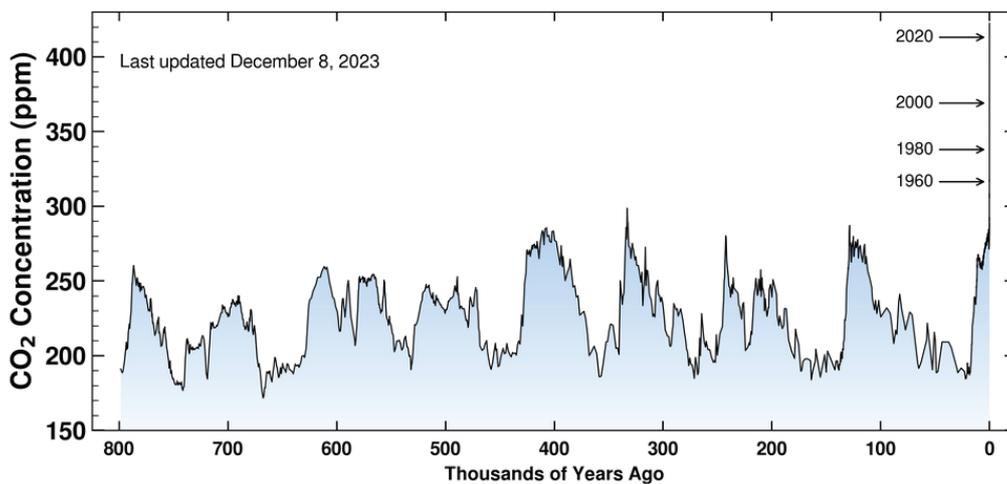


Figure 9. Courbe de Keeling et reconstitution de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère sur les derniers 800'000 ans, ici telle que téléchargée en décembre 2023 (<https://keelingcurve.ucsd.edu/>).

Cela, Keeling ne le savait pas encore et quand il a commencé ses mesures, la barre des 310 ppm était déjà dépassée et la concentration était en hausse. Mais en juillet 1958, une baisse était enregistrée. Puis, après quelques problèmes d'appareillage, en novembre, on enregistrait une concentration en augmentation. En 1959, lorsqu'un peu plus d'une année de mesures fut disponible, la fluctuation de la concentration de CO₂ montrant un maximum en mai et un minimum en novembre a pu être expliquée. Elle reflétait le cycle de la végétation¹¹.

¹⁰ Cette courbe et les reconstitutions de températures qui en découlent est aussi la pierre d'achoppement d'une mécompréhension de la part des médias. Ils présentent souvent l'argument de climatosceptique annonçant que pendant l'optimum climatique du Moyen-Âge la Suisse était plus chaude que maintenant avec des glaciers moins étendus. Premièrement, depuis les années 1990, l'argument tombe vu que la teneur en CO₂ et les reconstitutions de températures montrent qu'on est passé en dessus des valeurs observées durant l'optimum climatique. Deuxièmement, si effectivement les glaciers étaient moins étendus, notez que les chaudes températures de l'optimum ont duré durant 3 siècle, alors qu'actuellement le climat se réchauffe depuis son point le plus bas (depuis la dernière grande glaciation) atteint en 1850 (fin du Petit Age Glaciaire). L'inertie de l'environnement fait que l'adaptation au nouveau climat n'est pas encore complète.

¹¹ Notez qu'à fin 1959, l'argent de l'AGI pour les mesures de CO₂ était épuisé. Les résultats paraissaient toutefois si intéressants que H. Suess demanda à Revelle de transférer son budget dédié à ses propres recherches sur la mesure de Keeling.

En continuant les mesures, Keeling mit en évidence que, malgré les fluctuations annuelles la concentration augmentait. Les estimations précédentes allaient pouvoir être contrôlées, dont le temps de résidence du CO₂ dans l'atmosphère. L'équipe de l'institut Scripps montra ainsi, en 1973, qu'environ la moitié du CO₂ issu de la combustion des énergies fossiles s'accumulait dans l'atmosphère. Mais ne brûlons pas les étapes.

Rapidement, dès 1963, l'évidence de la hausse continue de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, ainsi que les travaux des décennies précédentes alarma les scientifiques. En 1965 un rapport de synthèse mettant en évidence le problème et, déjà, son urgence est délivré au président Lyndon B. Johnson¹².

6. Information des politiciens

En 1963, soit 5 ans seulement après le début des mesures, la tendance est suffisamment claire pour que les scientifiques communiquent les résultats aux autorités. Ce qui, pour des mesures environnementales, est très court et nécessite donc une grande certitude.

L'augmentation des concentrations de CO₂ était si évidente, et en phase finalement avec ce que la science avait avancé depuis S. Arrhenius 65 ans plus tôt, que les scientifiques eurent suffisamment d'arguments pour avertir l'administration américaine. Ainsi Revelle, membre de l'Association Américaine pour l'Avancement des Sciences (AAAS), une association qui promeut l'utilisation responsable de la science dans les politiques publiques et agit comme organe de conseil pour le président des Etats-Unis, peut mettre en garde, sans équivoque, les politiciens en 1965 déjà.

C'était il y a 58 ans. Sur les mesures du Mauna Loa, *"les données montrent clairement et de façon concluante que, de 1958 à 1963, la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère a augmenté de 1.36 %. L'augmentation d'une année à l'autre a été assez régulière, proche de la valeur annuelle moyenne de 0.23 %"* ([President Science Advisory Committee, 1965](#)). Dans le rapport on peut lire aussi que :

- ▶ "L'homme a commencé à brûler les combustibles fossiles qui étaient enfermés dans les roches sédimentaires pendant plus de 500 millions d'années, et cette combustion augmente de façon mesurable le dioxyde de carbone atmosphérique".
- ▶ "Le taux actuel de production de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles est environ cent fois plus élevé que le taux moyen de libération de calcium et de magnésium provenant de l'altération des roches siliceuses. Tant que ce rapport se maintient, la précipitation des carbonates métalliques ne pourra pas maintenir une teneur constante en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. En l'espace de quelques siècles, nous remettons dans l'air une part importante du carbone".

La combustion des énergie fossiles augmente de façon mesurable le CO₂.

En l'espace de quelques siècles, nous remettons dans l'air une part importante du carbone qui était séquestré dans le sol.

RESTORING THE QUALITY OF OUR ENVIRONMENT



*Report of The
Environmental Pollution Panel
President's Science Advisory Committee*

THE WHITE HOUSE
NOVEMBER 1965

Figure 10. Rapport présenté au président des Etats-Unis en 1965.

¹² Le rapport est une synthèse des résultats scientifiques disponible à l'époque. Il est coédité par 30 personnes. Il est clair qu'à ce niveau de responsabilité chacun des 30 auteurs, représentant les directeurs de différentes institutions, dont Revelle, se sont fait appuyer par quelques collaborateurs. A la sortie de ce rapport pas loin d'une centaine de personnes devait donc approuver de porter ce rapport à la connaissance du président des Etats-Unis.

- ▶ "La partie qui reste dans l'atmosphère peut avoir un effet significatif sur le climat : le dioxyde de carbone est presque transparent à la lumière visible, mais il est un absorbeur puissant et un réflecteur du rayonnement infrarouge [...], par conséquent, une augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique pourrait agir comme le verre dans un grenier, pour augmenter la température de l'air inférieur".
L'augmentation du CO₂ atmosphérique pourrait agir comme une serre et augmenter la température de l'air.
- ▶ "Nous pouvons conclure avec une claire assurance qu'à l'heure actuelle, les combustibles fossiles sont la seule source de CO₂ qui soit ajoutée au système biosphère océan-atmosphère. Si cela est vrai pour les cent dernières années, la quantité de CO₂ dans l'air au début de la présente décennie serait d'environ 7 % plus élevée qu'au milieu du siècle dernier."
Les combustibles fossiles sont la seule source de CO₂ qui soit ajoutée au système biosphère océan-atmosphère
- ▶ "En se basant sur les besoins énergétiques mondiaux prévus, le Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies (1956) a estimé qu'en l'an 2000, la combustion de combustibles fossiles, avec nos prévisions, entraînerait une augmentation d'environ 25 % du CO₂ atmosphérique par rapport à la quantité présente au XIX^e siècle".
On peut estimer qu'en l'an 2000, la combustion de combustibles fossiles entraînerait une augmentation d'environ 25 % du CO₂ atmosphérique.
- ▶ "On peut calculer à partir de ces données qu'avec une augmentation de 25% du CO₂ atmosphérique, la température moyenne à la surface de la terre pourrait augmenter de 0.6°C à 4°C (1,1°F à 7°F), selon le comportement de la vapeur d'eau atmosphérique".
Avec une augmentation de 25% du CO₂, la température moyenne à la surface de la terre pourrait augmenter de 0.6°C à 4°C.
- ▶ Suivent dans le rapport les effets possibles de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, comme la fonte de la calotte glaciaire de l'Arctique, la montée du niveau des mers, l'augmentation de l'acidité des eaux douces et l'accroissement de la photosynthèse.
Cela aurait un impact négatif sur la fonte de la calotte glaciaire de l'Arctique, la montée du niveau des mers, l'augmentation de l'acidité des eaux douces.

Il y a 58 ans les principaux éléments étaient donc disponibles. Dans n'importe quelle institution, n'importe quelle entreprise recevant une telle information, on peut imaginer un effet de latence de 1-2 ans pour se tourner vers la recherche de solutions. C'est d'ailleurs ce qui va se produire ... mais pas pour trouver les bonnes solutions, les lobbies pétroliers ayant été attentifs à ce rapport.

7. La science climatique entre dans l'ère digitale

7.1. Les débuts du calcul numérique

Dès 1956, Gilbert Plass a calculé le réchauffement en incluant pour la première fois précisément le spectre d'absorption de CO₂ grâce à l'aide d'un ordinateur. Avant les calculs se faisaient à la main et seule l'armée ou la NASA pouvaient s'offrir des mathématiciens qui travaillaient en parallèle. Ce premier modèle digital a permis de prouver que les bandes d'absorption de la vapeur d'eau et du CO₂ ne se chevauchaient pas, et donc s'additionnaient dans l'effet de serre global. Reprenant les calculs de S. Arrhenius, G. Plass a estimé que le réchauffement planétaire serait de 3,6°C en cas de doublement de la concentration atmosphérique CO₂. Il ajouta que : "Le CO₂ supplémentaire, libéré dans l'atmosphère par des procédés industriels et d'autres activités humaines peuvent avoir causé l'élévation de la température de l'air au cours du siècle actuel. Contrairement à d'autres théories du climat, la théorie du CO₂ prévoit que cette tendance au réchauffement se poursuivra, au moins pendant plusieurs siècles" (Plass, 1956).

La disponibilité des premiers ordinateurs avait conduit à la première prévision météorologique digitale dans les années 1950.



Figure 11. Cumulonimbus, en formation.

Les ordinateurs allaient pouvoir aussi être utilisés pour calculer les phénomènes liés au climat. Initialement ces calculs ont plus conduit à la confusion qu'à une clarification des problèmes. Cela a soulevé des doutes quant à la théorie du réchauffement planétaire. Ainsi Fritz Möller, reprenant les données de Gilbert Plass, a calculé un modèle climatique unidimensionnel dans lequel il a inclus, non seulement l'augmentation de vapeur d'eau libérée par le réchauffement des océans, appelées

boucle de rétroaction positive de la vapeur d'eau, mais aussi les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Ce premier modèle a abouti à un réchauffement massif et, avec certaines conditions initiales, à un réchauffement sans fin, qui s'intensifiait jusqu'à ce que tous les océans s'évaporent. En 1963, Möller écrit que : "l'effet d'une augmentation du CO_2 de 300 à 330 ppm peut être entièrement compensé par une modification de la teneur en vapeur d'eau de 3% ou par une modification de la couche nuageuse de 1% de sa valeur sans que des changements de température se produisent. Ainsi, la théorie selon laquelle les variations climatiques sont influencées par les variations de la teneur en CO_2 devient très discutable"(Möller, 1963). La description correcte de l'influence des nuages sur le climat mondial allait être un problème majeur dans les décennies suivantes.

La cause de l'important réchauffement dans le modèle de Möller a rapidement été trouvée. Son modèle, de façon erronée, prenait en compte seulement le transport de chaleur entre le sol et l'air, mais pas le transport de chaleur par convection. Dans le milieu des années 1960, Manabe et Wetherald (1967) l'on intégré correctement. Ce modèle, le "Manabe-Wetherald one-dimensional radiative-convective model", est considéré comme le premier modèle atmosphérique raisonnablement réaliste tenant compte à la fois du bilan radiatif de la Terre et des transports de chaleur par convection. C'était toutefois un modèle unidimensionnel, il faisait l'estimation pour un point donné. Ce modèle prévoyait un réchauffement de $2,3^\circ\text{C}$ en cas de doublement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

Malgré quelques inconnues, la majorité de la communauté scientifique avait des raisons objectives de penser que le climat allait plutôt se réchauffer mais que des efforts de modélisation devaient encore être fait.

7.2. L'effet controversés des aérosols

Toutefois, depuis les années 1940 et jusqu'au milieu des années 1970, les températures moyennes ont diminué partout dans le monde. Certains glaciers ont à nouveau avancé. Toujours en pleine guerre froide avec des prévisions d'hiver planétaire en cas de guerre nucléaire, on parlait alors de refroidissement global par aérosols. Mais d'autres chercheurs attribuaient avec raison ce refroidissement à l'augmentation de la pollution atmosphérique. Il y avait toutefois controverse et George Kukla (un astronome d'origine tchèque, pionnier du forçage radiatif astronomique) et Reid Bryson (géologue et météorologue intéressé aux aérosols), entre autres, ont mis en garde le président états-unien contre une ère glaciaire causée avant tout par l'émission d'aérosols. A ce moment, on ne connaissait pas l'amplitude possible de chacun des forçages radiatifs sur le climat, cycles de Milanković, aérosols, concentration de CO_2 .

Le premier modèle produit par un ordinateur représentant plausiblement le climat est mis en route en 1967. En cas de doublement de la concentration de CO_2 la terre pourrait se réchauffer de $2,3^\circ\text{C}$.

En 1975, Wallace Broecker note cependant que *"si la poussière produite par l'homme n'est pas une cause majeure du changement climatique, alors il y a de bonnes raisons de penser que la tendance actuelle au refroidissement donnera lieu, d'ici une dizaine d'années, à un réchauffement prononcé induit par le dioxyde de carbone. Par analogie avec des événements similaires dans le passé, le refroidissement climatique naturel qui, depuis 1940, a plus que compensé l'effet du dioxyde de carbone, va bientôt disparaître. Une fois que cela se produira, l'augmentation exponentielle de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère aura tendance à devenir un facteur important et d'ici le début du siècle prochain, la température moyenne de la planète aura dépassé les limites vécues au cours des 1000 dernières années"*(Broecker, 1975).

Le forçage astronomique va vers le froid et il va être supplanté par le forçage radiatif dû à l'augmentation du CO₂. Il pourrait bien s'emballer !

Cette pollution atmosphérique attaque directement la santé des habitants (maladies respiratoires et cardiovasculaires). Une étude récente montre qu'en Europe, chaque année, près de 800'000 personnes meurent prématurément en raison de la pollution atmosphérique (Lelieveld et al. 2019). Cette pollution, qu'on connaît aussi sous le nom de smog était si grave, que des mesures ont été prises, comme la restriction de circulation automobile. L'importance du problème de santé publique a amené les nations à signer le Protocole d'Helsinki. Conclu le 8 juillet 1985 et entré en vigueur en 1987 (il y a 36 ans), il propose de réduire la pollution dans le monde entier. Cette réduction de la pollution bienvenue, va aussi inverser la tendance au refroidissement observée depuis les années 1940.

7.3. Les mesures satellitaires

Dès les années 1960, les satellites ont permis une observation quantifiée de la Terre avec les satellites TIROS (pour Satellites d'observation par télévision infrarouge) de la NASA. Ces premiers capteurs prenaient des images de la Terre couverte de nuages. A partir de 1966, la seconde génération de satellites (ESSA-TIROS) embarquèrent des radiomètres et des spectromètres. Ils permettaient de mesurer le bilan thermique de la Terre, sa couverture de glace ou le spectre et l'intensité du rayonnement solaire depuis l'espace, même à travers les nuages.

En 1966 les premiers satellites emportant des radiomètres (pouvant "voir" au travers des nuages) sont mis en fonction.

En parallèle, les mesures spatiales du soleil permirent pour la première fois des mesures totalement exemptes de l'influences atmosphériques. Cela a permis une définition exacte de la constante solaire qui, auparavant, n'était connue qu'approximativement.

En 1969, Syukuro Manabe a pu vérifier son modèle climatique avec des données mesurées depuis l'espace grâce au satellite NIMBUS III dont les mesures étaient en accord avec le modèle (Wark and Hilleary, 1969). Depuis lors le nombre de satellites a augmenté et la qualité des capteurs a augmenté. Ces mesures, globales par essence, apportent, même si elles sont moins précises qu'une mesure au sol, une homogénéité de la donnée sur une grande surface. Notez, malheureusement pour les détracteurs de la science, que ces mesures sont bien plus pessimistes que les modèles et que si elles ne donnent pas la cause du changement, elles ne permettent pas de le remettre en cause.

8. Perspectives issues de la recherche

Deux exemples peuvent être tirés "The Copenhagen Diagnosis: Climate Science Report". Ce document avait pour but de fournir les éléments scientifiques les plus récents pour la Conférence sur le climat de Copenhague, la COP 15. Le dernier document de synthèse datait de 2007 et de grands progrès avaient été faits depuis. Cela valait la peine de faire une mise à jour et de la rendre accessible à tous. Deux graphiques sont à retenir.

Le premier concerne la surface minimale occupée par la banquise dans l'Arctique (par des capteurs passifs mesurant l'énergie des micro-ondes émises par la Terre). Plus cette

Les mesures de l'extension de la banquise montrent qu'elle disparaît plus vite que ne le prévoyaient les modèles.

surface est faible plus la banquise aura donc fondu. Les scientifiques ne pouvaient pas proposer de mesurer cette surface avant d'avoir les satellites capables de prendre instantanément (ou tout du moins en quelques heures seulement) une image de l'entier de l'Arctique. Ils ont alors fait un modèle. C'est la bande bleue sur le graphique en Figure 12, la ligne noire étant la valeur moyenne que l'on peut supposer la plus probable. Lors des premières estimations faites avec les satellites, on se trouvait proche de la moyenne donnée par les modèles (courbe rouge ci-dessous). Mais dès les années 1990, et avec une tendance continue les mesures montrent qu'à la fin de l'été la surface de la banquise est plus faible que l'estimation inférieure donnée les modèles.

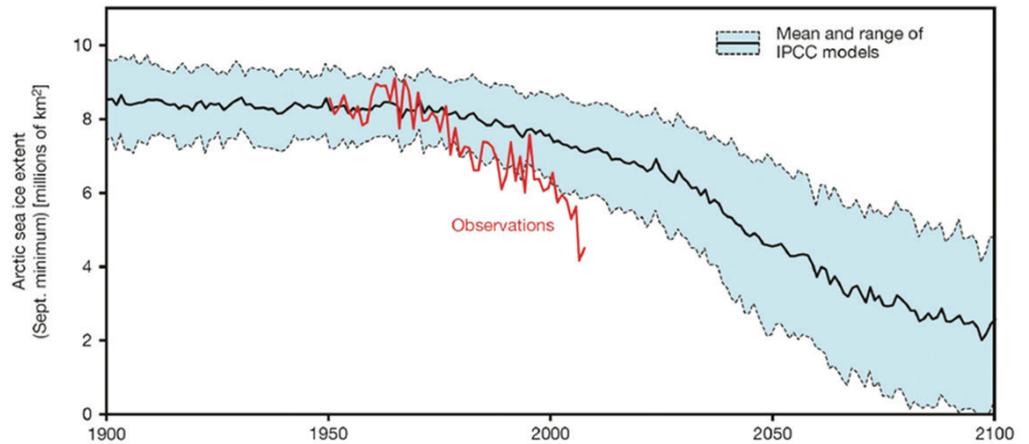


Figure 12. La diminution de l'extension de la banquise arctique (source: fig. 13 dans *The Copenhagen Diagnosis: Climate Science Report*).

Un phénomène similaire se produit entre les mesures et le modèle d'augmentation du niveau des mers. Les mesures ne suivent pas la moyenne des résultats du modèle mais la borne défavorable de l'incertitude !.

Le second est la mesure du niveau des mers (par capteurs actifs envoyant des pulses de micro-ondes) qui se fait avec des satellites différents des précédents. En utilisant là les mesures effectuées par les marégraphes dans les ports, les scientifiques ont utilisé des modèles dès les années 1990. Sur le graphique en Figure 13, la bande grise montre l'incertitude due au modèle (précision du modèle et incertitude sur le comportement socio-économique global). Comme pour la surface de la banquise, les mesures satellites (en bleu) se trouvent sur la marge de la partie supérieure du modèle.

L'augmentation du niveau de la mer est donc proche des valeurs les plus défavorables, une élévation plus forte que les valeurs moyennes prévues. Mauvaise nouvelle, plus pour les Kiribati que pour la Suisse !

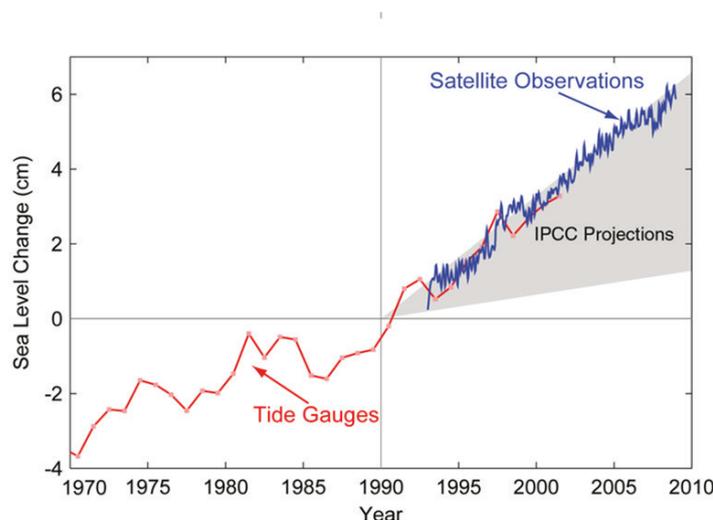


Figure 13. L'élévation du niveau de la mer modélisé et mesuré (source: fig. 16 dans *The Copenhagen Diagnosis: Climate Science Report*).

9. Conclusions

Ce petit retour dans le passé nous apprend que dès 1965 et le rapport au président L. Johnson, les politiques d'outre-Atlantique étaient au courant. Il est vrai qu'une partie des recherches décrites dans ces pages se sont passées aux Etats-Unis. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il aurait fallu attendre la popularisation de ces recherches pour que la Suisse ait accès aux bases scientifiques qui auraient pu permettre des décisions politiques nécessaires.

En effet, plusieurs scientifiques suisses ont été très impliqués, dès les années 1910, et même avant, dans la recherche climatique. On peut citer Alfred de Quervain, météorologue, le premier à avoir traversé le Groenland d'est en ouest en 1912. Il y a surtout Hans Oeschger qui a travaillé sur la détection des éléments faiblement radioactifs comme le C_{14} , en même temps que Willard F. Libby. Oeschger, en 1967, a été l'un des pionniers de l'analyse des bulles d'air contenues dans les carottes de glace (base de la reconstruction de la variabilité du climat). Il édite, avec Bruno Messerli (un autre Suisse), *Das Klima. Analysen und Modelle, Geschichte und Zukunft*. (Oeschger, H., Messerli, B. et Svilar, M, 1980). Oeschger a aussi été co-auteur du premier rapport du GIEC en 1992.

Donc, en Suisse, où était née la théorie des glaciers, les processus menant au réchauffement du climat du fait de l'augmentation du CO_2 étaient connus quasiment au même moment qu'ailleurs. Les scientifiques suisses actifs dans les géosciences étaient aux premières loges pour mesurer la dégradation de la cryosphère, effet facilement observable du réchauffement dans les Alpes. Parce que le réchauffement planétaire est préoccupant, une première conférence mondiale sur le climat est convoquée à Genève en 1979. On a vu (§ 7.2), que le protocole d'Helsinki est signé en 1985 et la première Conférence sur le climat (COP) a lieu à Kyoto en 1997.

Si l'histoire, dans cet article s'arrête dans les années 1970, c'est que j'ai décidé de m'arrêter au tournant où les aspects scientifiques étaient devenu suffisamment robustes pour permettre de prendre des décisions. Il ne parle pas des progrès faits depuis (résolution des modèles, mesures environnementales toujours plus complexes, etc.). Il ne couvre pas non plus les actions principalement menées par certains depuis le rapport de 1965 pour cacher les résultats scientifiques à la population. Finalement, parce que c'est encore trop tôt pour traiter cette histoire, cet article ne répond pas à la question de savoir pourquoi rien n'a été entrepris¹³ plus rapidement à l'échelle étatique.

¹³ En 1979, l'administration Carter a fait installer 32 panneaux solaires thermiques sur le toit de la Maison Blanche. En 1986 l'administration [Reagan s'empresse de démonter](#) cette installation et de les stocker dans un entrepôt. Un administrateur du Unity College dans l'état du Maine les récupère en 1991 pour [chauffer l'eau de leur cafétéria](#). Depuis les panneaux se sont retrouvés aux quatre coins du monde ... jusqu'en [Chine où en 2010](#) un des 32 panneaux à été acheté par le Solar Science and Technology Museum de Dezhou. Un film ["The road not taken"](#) raconte cette histoire.

10. Bibliographie

- Bardou, E., 2009. Darwin, une révolution dans l'histoire des sciences? Bull. Murithienne 127, 101–105.
- Broecker, W.S., 1975. Climatic Change : Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming ? Science (80-). 189, 460–463.
- Brown, H., 1954. Challenge of Man's Future. The Viking Press.
- Callendar, G.S., 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. Q. J. R. Meteorol. Soc. 64, 223–240. doi:10.1002/qj.49706427503
- Hawken, P. 2020. Drawdown. <https://www.drawdown.org/>. Dernier accès le 11.12.2023.
- Hulburt, E.O., 1931. The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth. Phys. Rev. JOURNALS Arch. 38. doi:https://doi.org/10.1103/PhysRev.38.1876
- Lane, S.N., 2017. Editorial 2017: respond, don't rebut. Earth Surf. Process. Landforms 42, 3–4. doi:10.1002/esp.4087
- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., Münzel, T., 2019. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. Eur. Heart J. 1–7. doi:10.1093/eurheartj/ehz135
- Manabe, S., Wetherald, R.T., 1967. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. J. Atmos. Sci. 24, 241–259.
- Möller, F., 1963. On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance of the Earth's surface and on the climate. J. Geophys. Res. 68, 3877–3886. doi:10.1029/JZ068i013p03877
- Oreskes, N., Conway, E.M., 2012. Les Marchands de doute. Le Pommier, Paris.
- Oeschger, H., Messerli, B. und Svilar, M. (Ed.), 1980, Das Klima. Analysen und Modelle, Geschichte und Zukunft. Springer Verlag, 296 p.
- President Science Advisory Committee, 1965. <http://www.climatefiles.com/climate-change-evidence/presidents-report-atmospher-carbon-dioxide/> Dernier accès le 11.12.2023.
- Plass, G., 1956. The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. Tellus 8, 140–154.
- Revelle, R., Suess, H.E., 1957. Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ during the Past Decades. Tellus 9, 18–27. doi:10.1111/j.2153-3490.1957.tb01849.x
- Reynard, E., 2019. Développement de la glaciologie. Le rôle du Giétro et du Val de Bagnes, in: Papilloud, J.-H., Cantinotti, S. (Eds.), Gietro 1818 Sous La Loupe Des Sciences. Annales Valaisannes2019. Martigny.
- Scapozza, C., 2019. Pater Placidus a Spescha (1752-1833), in: Papilloud, J.-H., Cantinotti, S. (Eds.), Gietro 1818 Sous La Loupe Des Sciences. Annales Valaisannes2019. Martigny.
- Spier, R., 2002. The history of the peer-review process. Trends Biotechnol. 20, 357–358. doi:10.1016/s0167-7799(02)01985-6

The Copenhagen Diagnosis: Climate Science Report. 2009. 2009: Updating the World on the Latest Climate Science. I. Allison, N.L. Bindoff, R.A. Bindshadler, P.M. Cox, N. de Noblet, M.H. England, J.E. Francis, N. Gruber, A.M. Haywood, D.J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T.M. Lenton, M.E. Mann, B.I. McNeil, A.J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H.J. Schellnhuber, S.H. Schneider, S.C. Sherwood, R.C.J. Somerville, K. Steffen, E.J. Steig, M. Visbeck, A.J. Weaver. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, ISBN: [978-0-9807316-1-3]. http://www.ccrc.unsw.edu.au/sites/default/files/Copenhagen_Diagnosis_HIGH.pdf Dernier accès le 11.12.2023.

Wark, D.Q., Hilleary, D.T., 1969. Atmospheric Temperature: Successful Test of Remote Probing. *Science* (80). 165, 1256–1258. doi:10.1126/science.165.3899.1256

Weart, S. 2019. The discovery of Global Warming. <https://history.aip.org/climate/index.htm#contents> Dernier accès le 11.12.2023.