



Glaciations et effet de serre :

deux quêtes scientifiques étroitement imbriquées

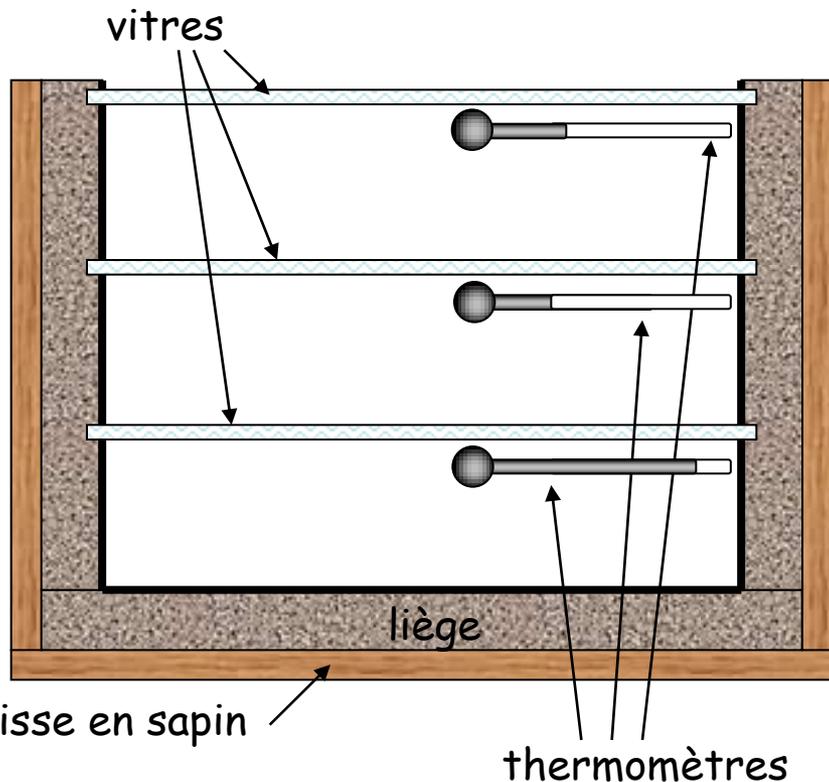
Jean Poitou

Horace Benedict de Saussure



Montée de M. de Saussure à la cime du Mont-Blanc,
gravure aquarellée de Chrétien de Mechel (1737- 1817)

Héliothermomètre (1760-67-74-80 ...)



• Pour que le Soleil frappât toujours perpendiculairement ces glaces [...] j'avois soin dans mes expériences de faire suivre à ma caisse le mouvement du Soleil, en la retournant régulièrement toutes les 20 minutes, en sorte que le Soleil éclairât exactement la totalité du fond de la caisse. La plus grande chaleur que j'aie obtenu par ce moyen a été de 87,7, c'est-à-dire de près de 8 degrés au-dessus de la chaleur de l'eau bouillante [...]

(Il s'agit évidemment de degrés Réaumur).

[...] j'ai essayé d'employer des calottes de verres hémisphériques qui s'emboîtent les unes dans les autres [...] le thermomètre n'est monté là qu'à 70 degrés [...] ce qui me fait voir qu'on ne pourroit pas même se flatter de faire cuire sa soupe dans cet appareil.

Effet de l'altitude

- L'héliothermomètre donne des résultats presque indépendants de l'altitude contrairement à la température extérieure
- C'est donc que l'atmosphère agit comme la vitre de l'héliothermomètre en retenant la chaleur

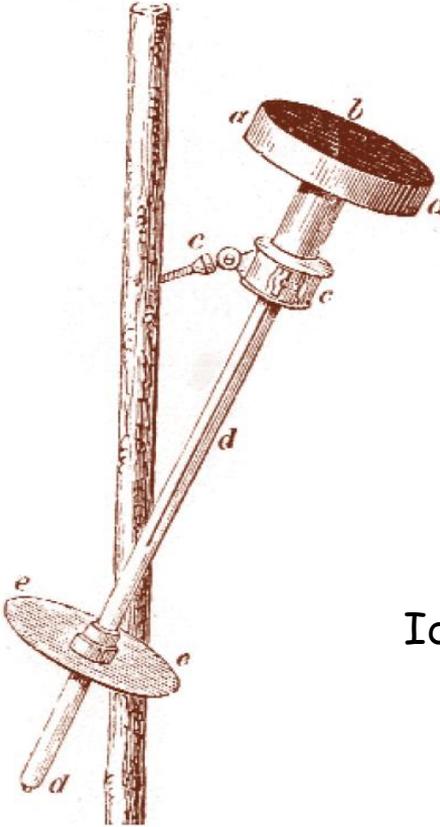
Jean-Baptiste Joseph Fourier



« La Terre est ainsi plongée dans la température du ciel planétaire mais elle est échauffée par les rayons solaires dont l'inégale distribution produit la diversité des climats. Tous les effets terrestres de la chaleur du Soleil sont modifiés par l'interposition de l'atmosphère et la présence de l'océan. Les grands mouvements de ces fluides rendent la distribution des températures plus uniforme. »

« La température de la surface terrestre est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacles pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air, lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure. (1824) »

Claude Pouillet



1838 Mesure la constante solaire avec son, pyrhéliomètre :
changement de température d'un réservoir d'eau orienté perpendiculairement aux rayons solaires.



Identifie CO_2 et H_2O comme responsables de l'effet de serre.

Un autre phénomène, intrigant

Blocs erratiques

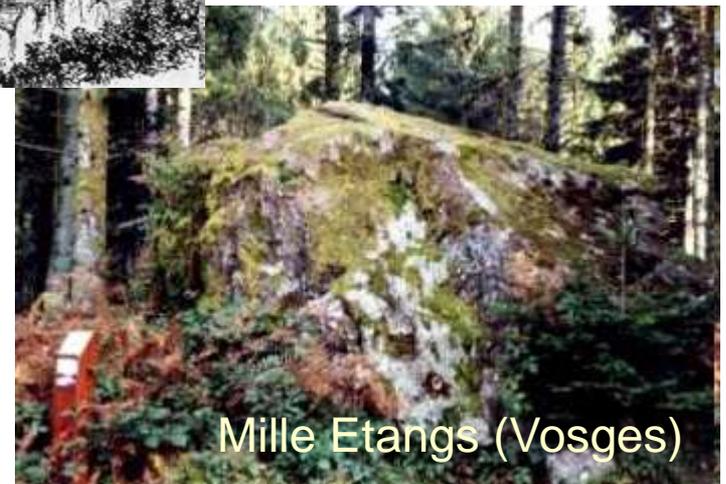
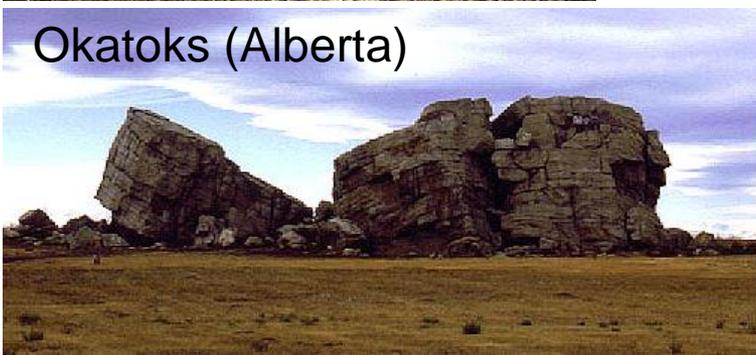
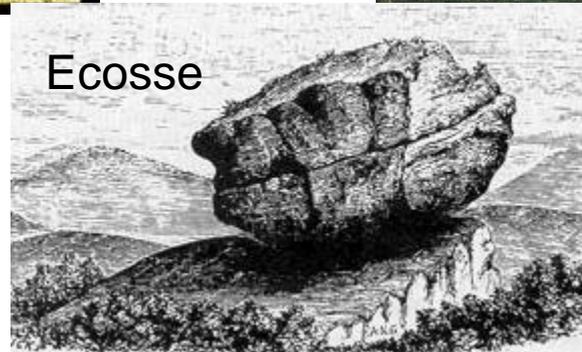
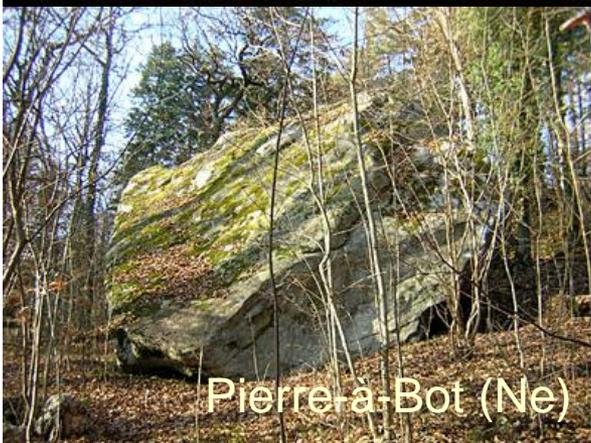
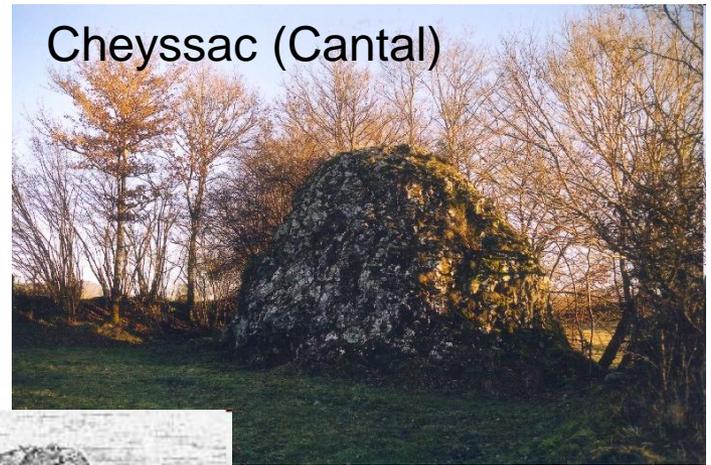
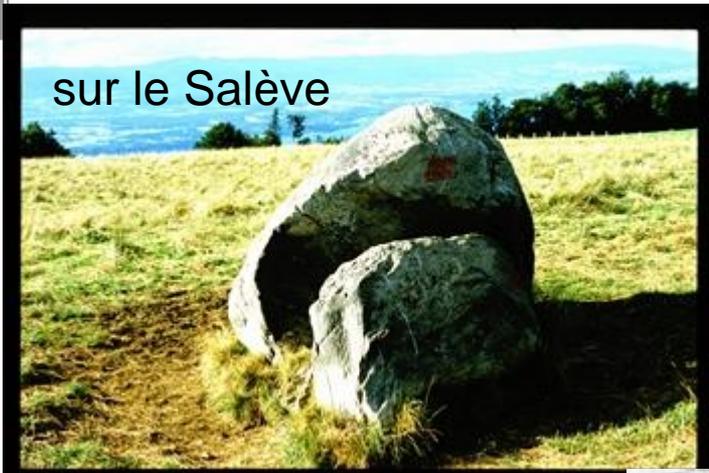


Charpentier 1841

"Les granites ne se forment pas dans la terre comme des truffes,
et ne croissent pas comme des sapins sur les roches calcaires" !
(Saussure. *Voyages dans les Alpes*. 1779)

Saussure remarque que les blocs erratiques sont tous situés dans l'axe
des vallées alpines

blocs erratiques



Les premières hypothèses de transport glaciaire

1787

Bernhard-Friedrich Kuhn (de Berne) : étude traitant du transport des blocs de rochers par les glaciers

1795

James Hutton (géologue écossais) évoque succinctement l'hypothèse glaciaire

1802

John Playfair (écossais) décrit le pouvoir de transport des glaciers

1815

Jean-Pierre Perraudin (paysan du Valais) : « Les glaciers de nos montagnes ont eu jadis une bien plus grande extension qu'aujourd'hui. Toute notre vallée, jusqu'à une grande hauteur au-dessus de la Drance (torrent de la vallée), a été occupée par un vaste glacier, qui se prolongeait jusques à Martigny, comme le prouvent les blocs de roches qu'on trouve dans les environs de cette ville et qui sont trop gros pour que l'eau ait pu les y amener. »

1824

Jens Esmark : la majeure partie de la Norvège a été couverte d'une épaisse couche de glace ; les blocs erratiques et moraines résultent du transport des roches par les glaciers ; les fjords ont été creusés par les glaciers

1829

Goethe évoque l'hypothèse du transport glaciaire des blocs erratiques

1832

Reinhard Bernhardt étudie les moraines et blocs erratiques du nord de l'Allemagne. Il en déduit qu'une calotte de glace a recouvert le nord de l'Europe, descendant jusqu'en Allemagne centrale.

1833

Charles Lyell appuie l'idée que les énormes blocs erratiques ont été transportés par des icebergs ou des plaques de glace par le Déluge.

Ignace Venetz



ingénieur hydrologue
& glaciologue

Fin 18ème début 19ème siècle, forte progression des glaciers suisses

En 1821, Venetz étudie les glaciers :

- fonctionnement
- indices de leurs anciennes positions.

Les glaciers poussent devant eux des débris, blocs et sable confondus, en vrac : les moraines.

On trouve d'anciennes moraines à quelques km en aval des glaciers

De plus, on trouve des stries sur des rocs vifs, orientées dans la direction des vallons, semblables à celles que découvrent les glaciers actuels

→ les glaciers ont été autrefois plus étendus et ils ont reculé !

A travers tout le plateau suisse jusqu'au Jura, on trouve

- des traces d'anciennes moraines
- des blocs de granite qui proviennent du massif du Mont-Blanc.

→ tous ces blocs ont été transportés par un glacier qui occupait jadis toute la vallée du Rhône !



Roches polies et striées par un ancien glacier représentées par L. Agassiz en 1840

Comment est-ce possible avec une Terre,
initialement en fusion,
qui s'est progressivement refroidie
au cours des temps géologiques ?

Jean de Charpentier



Scientifique réputé,
directeur des mines de
sel à Bex

Jean de Charpentier ne croit pas aux idées de Venetz.

Mais, sur le terrain, il se convainc de la justesse du raisonnement car les glaciers expliquent :

- le transport des blocs erratiques qui gardent leurs arêtes vives
difficilement explicable dans le cas d'un transport par les eaux
- la distribution des blocs erratiques :
dans certaines vallées, blocs de nature différente (granite, calcaire) sur les deux rives
possible si 2 glaciers issus de vallées différentes se rejoignent dans une même vallée
- des dépôts de matériaux rocheux sans stratification ni triage
le glacier charrie et dépose les pierres en les entassant sans ordre
- de petits amas de matériaux stratifiés dans des lacs formés par le barrage des moraines
- la formation des roches lisses, appelées roches moutonnées, dans les vallées alpines
roches usées et polies par le frottement du glacier.
- la formation des stries à la surface des rochers
façonnées par le raclement des cailloux transportés par la glace

Charpentier expose ses conclusions à Lucerne en 1834.

Grenoble – 12 février 2011

Louis Agassiz



Naturaliste. Paléontologue
et zoologue.

Intrigué mais non convaincu par Charpentier, va sur le terrain pour examiner les prétendues preuves.

Convaincu à son tour, il comprend l'ampleur géographique du phénomène dont il se fait le chantre.

En 1837, *Discours d'ouverture sur l'ancienne extension des glaciers*, devant la Société Helvétique des Sciences Naturelles à Neufchâtel. Il expose avec fougue ses nouvelles idées sur l'extension des glaces : une grande partie de l'Europe, le Nord de l'Asie et de larges parties de l'Amérique du Nord.

→ tollé général.

Il emploie l'expression "âge glaciaire" proposée quelque temps auparavant par le géologue allemand Karl Schimper dans son « Eiszeitode ».

1840

William Buckland converti aux idées d'Agassiz suite à des observations dans les alpes suisses et en écosse

→ glaciers à l'origine la nombreux dépôts de surface en Grande Bertagne

théories refusées par le monde scientifique britannique et germanique

1852

découverte de la calotte de glace du Groenland

1862

rupture de barrage dans les hihghlands avec vidange de nombreux réservoirs → aucune roche marquée comme dans les sites supposés glaciaires

Une origine astronomique pour les glaciations ?

1842

origine astronomique des glaciations :

précession des équinoxes (variation de la direction du ciel pointée
par les pôles)

→ glaciations catastrophiques alternées Nord Sud tous les 20 000 ans

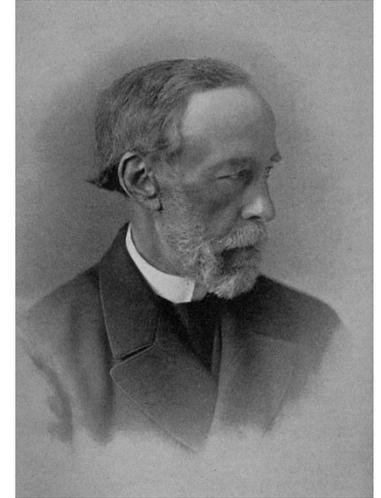
James Croll

1864 - Calcul des variations de l'excentricité de la terre

→ module les effets de la précession des équinoxes

1875 *Climate and Time*

préconise d'inclure les effets de la variation de l'obliquité



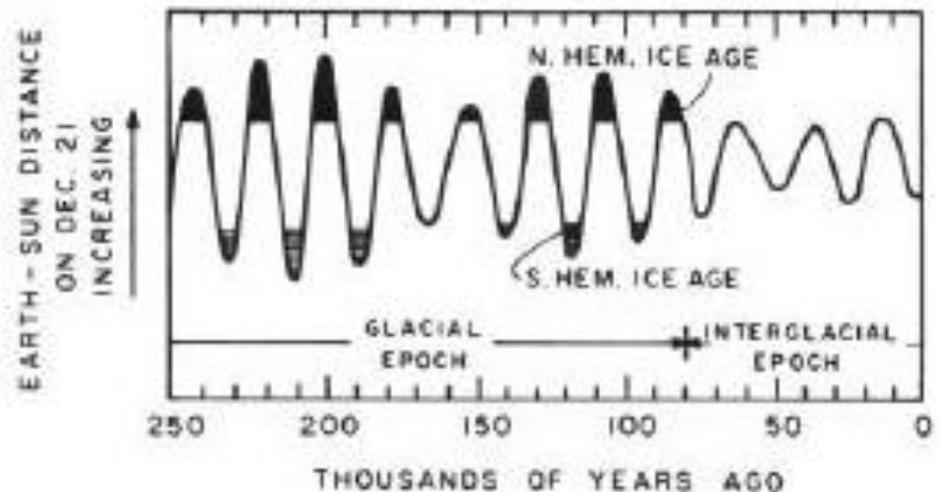
Autodidacte écossais

Importance des rétroactions

- hiver froid propice à l'accumulation de la neige
- la neige accumulée se transforme peu-à-peu en glace
- l'albédo est renforcé entraînant une chute des températures

→ glaciations alternées entre les deux hémisphères

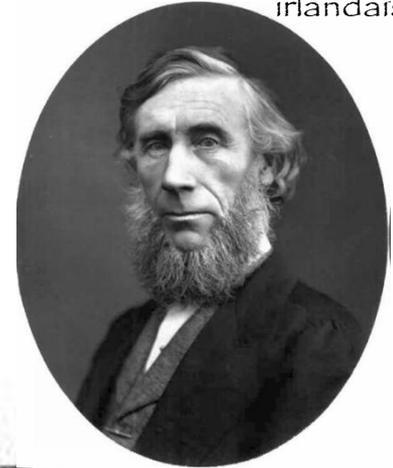
dernière déglaciation il y a 80 000 ans.



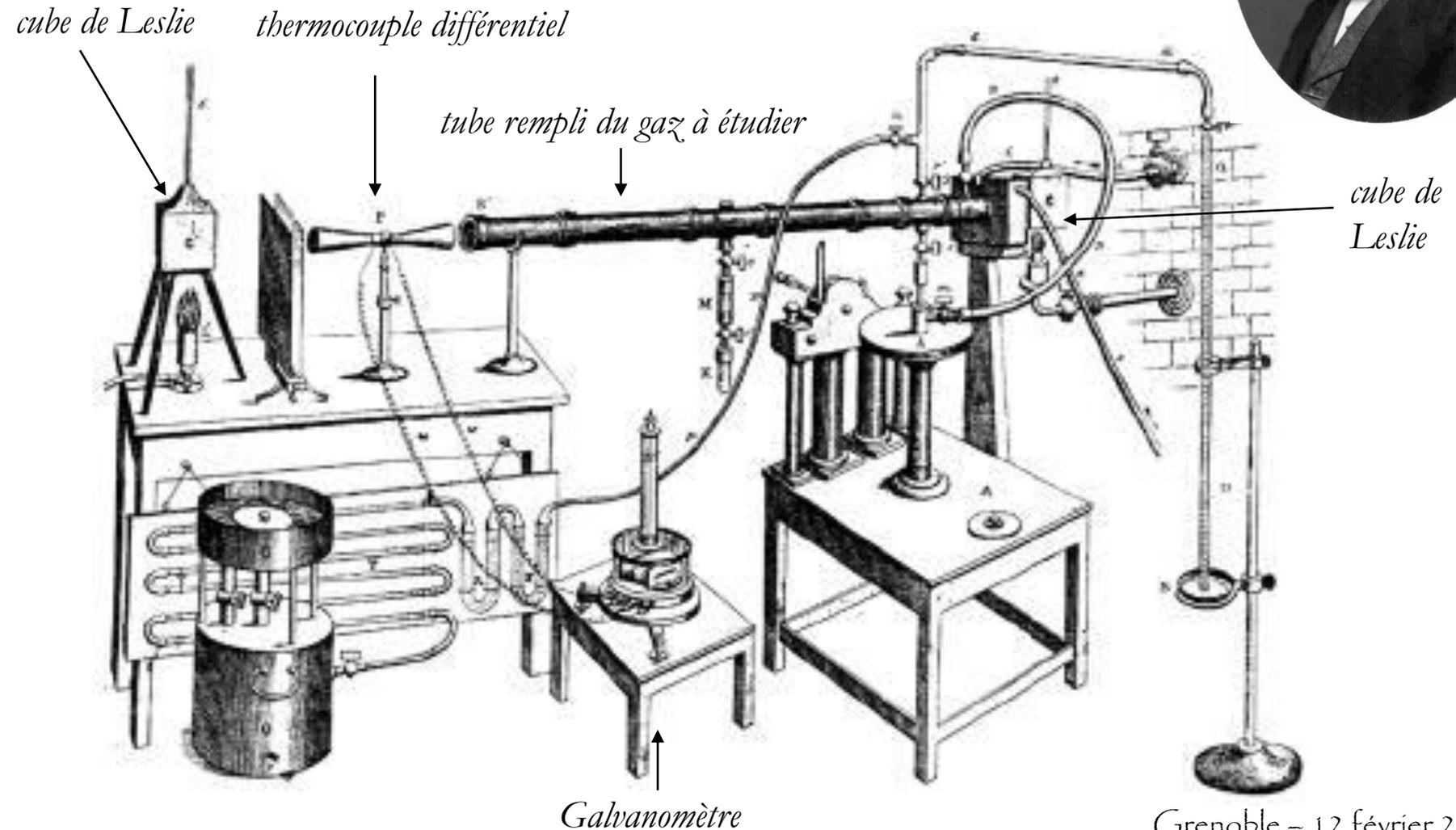
Une origine atmosphérique pour les glaciations ?

John Tyndall

physicien
irlandais



- Etude du mouvement des glaciers.
- 1859 ... Mesure l'absorption des IR par le CO_2 , la *vapeur d'eau*, les hydrocarbures à l'aide d'un spectrophotomètre différentiel.



Importance de la vapeur d'eau

- Rôle climatique des gaz à effet de serre.
- - Perte radiative de chaleur nocturne responsable de la formation de la rosée et de la gelée blanche.
- - Importance de la vapeur d'eau

"...this aqueous vapour is a blanket more necessary to the vegetable life of England than clothing is to man. Remove for a single summer night the aqueous vapour from the air that overspreads this country, and you would assuredly destroy every plant capable of being destroyed by a freezing temperature. The warmth of our fields and gardens would pour itself unrequited into space, and the sun would rise upon an island held fast in the iron grip of frost ... its presence would check the earth's loss; its absence without sensibly altering the transparency of the air, would open wide a door for the escape of the earth's heat into infinitude."

L'effet de serre pourrait-il être la cause des déglaciations ?





directeur de la bibliothèque
à l'Université de Pavie,
puis professeur de géographie
physique à l'université de
Padoue

« L. De Marchi ... examined in detail the different theories hitherto proposed, astronomical, physical, or geographical... These theories assert that the occurrence of genial or glacial epochs should depend on one or other change in the following circumstances :

- (1) The temperature of the earth 's place in space.
- (2) The sun's radiation to the earth (solar constant),
- (3) The obliquity of the earth 's axis to the ecliptic.
- (4) The position of the poles on the earth's surface.
- (5) The form of the earth's orbit, especially its eccentricity (Croll) .
- (6) The shape and extension of continents and oceans.
- (7) The covering of the earth 's surface (vegetation) .
- (8) The direction of the oceanic and aerial currents.
- (9) The position of the equinoxes.

De Marchi arrives at the conclusion that all these hypotheses must be rejected. On the other hand, he is of the opinion that a change in the transparency of the atmosphere would possibly give the desired effect. »

(Arrhenius , 1896)

Svante Arrhenius



XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS *.

Phil. Mag. S. 5. Vol. 41. No. 251. April 1896.

TABLE VII.—*Variation of Temperature caused by a given Variation of Carbonic Acid.*

Latitude.	Carbonic Acid=0.67.					Carbonic Acid=1.5.					Carbonic Acid=2.0.					Carbonic Acid=2.5.					Carbonic Acid=3.0.				
	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.0	6.1	6.05	7.9	8.0	7.9	8.0	7.95	9.1	9.3	9.4	9.4	9.3
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	5.8	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	7.87	9.3	9.5	8.9	9.5	9.3
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	7.0	7.9	7.7	9.5	9.4	8.6	9.2	9.17
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.6	6.9	7.3	7.42	9.3	9.0	8.2	8.8	8.82
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	6.6	6.7	6.87	8.7	8.3	7.5	7.9	8.1
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	6.3	6.6	6.52	7.9	7.5	7.2	7.5	7.52
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.02	3.2	3.2	3.1	3.1	3.15	5.0	5.0	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.3	6.4	6.42	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.6	6.6	6.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.35
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	6.7	6.65	7.4	7.5	8.0	7.6	7.62
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.35	6.7	6.8	7.0	7.0	6.87	7.9	8.1	8.6	8.3	8.22
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	7.4	7.32	8.6	8.7	9.1	8.8	8.8
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.95	7.7	7.9	7.9	7.9	7.8	9.1	9.2	9.4	9.3	9.25
-50	-3.2	-3.3	—	—	—	3.8	3.7	—	—	—	6.0	6.1	—	—	—	7.9	8.0	—	—	—	9.4	9.5	—	—	—
-60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

prix Nobel de Chimie en 1903 pour ses travaux sur les électrolytes

- I should certainly not have undertaken these tedious calculations if an extraordinary interest had not been connected with them [...]: the probable causes of the Ice Age. [...] A variation of the atmospheric carbonic acid [might explain] temperature variations of 5° – 10° C.

Thomas C. Chamberlin

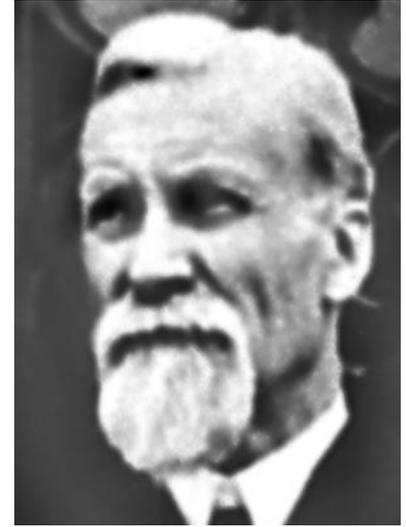
Glaciations = phénomène cyclique

1897

Les processus géologique sont susceptibles de générer des variations notables de la concentration atmosphérique du CO_2

La compréhension du climat nécessite de prendre en compte tout ce qui se passe sur notre planète et pas seulement l'atmosphère et l'océan

les cycles glaciaires peuvent être des cycles naturels amplifiés par les rétroactions du CO_2



géologue américain

Le réchauffement global dû à l'action de l'homme

Arrhénius dans « Världarnas utveckling » (l'évolution des mondes) en 1906

« Par suite de l'augmentation de l'acide carbonique dans l'air, il nous est permis d'espérer des périodes qui offriront au genre humain des températures plus égales et des conditions climatiques plus douces. Cela se réalisera sans doute dans les régions les plus froides de notre Terre. Ces périodes permettront au sol de produire des récoltes considérablement plus fortes qu'aujourd'hui, pour le bien d'une population qui semble en voie d'accroissement plus rapide que jamais. »

[Edition en français : L'évolution des mondes, Béranger (1910)].

C'est Arrhenius qui baptise cet effet « effet de serre » par référence à Saussure

Nernst suggère de brûler le charbon en excès pour augmenter l'effet de serre et fertiliser les cultures

Knut Ångström



physicien
spectroscopiste
suédois

1902

Mesure de l'absorption des IR à travers un tube rempli de CO_2

- même quantité que dans la colonne atmosphérique
- quantité moitié
- quantité double

→ variation minime

→ que valent les calculs d'Arrhénius ?

La vapeur d'eau ne masque-t-elle pas les raies d'absorption du CO_2 ?

Edward O. Hulburt

1931

Hulburt refait les calculs d'absorption atmosphérique et confirme les résultats d'Arrhénius

Hulburt, E.O. (1931). "The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth."
Physical Review 38: 1876-90



Directeur du Center
for Space Research,
Naval Research Laboratory,
Washington

Pour les météorologistes, l'idée qu'ajouter du CO_2 dans l'atmosphère pourrait changer le climat

"was never widely accepted and was abandoned when it was found that all the long-wave radiation [that would be] absorbed by CO_2 is [already] absorbed by water vapor"

Brooks, C.E.P. (1951). "Geological and Historical Aspects of Climatic Change." In *Compendium of Meteorology*, edited by Thomas F. Malone, pp. 1004-18. Boston: American Meteorological Association.

l'opinion générale était que la concentration atmosphérique des gaz, solubles, était automatiquement régulée par les océans, ou par l'activité biologique, selon le principe de Le Chatelier (1888) : pour un système à l'équilibre, si on l'écarte de cet état d'équilibre, il tend à y revenir spontanément.

"The self-regulating mechanisms of the carbon cycle can cope with the present influx of carbon of fossil origin." *Hutchinson, G.E. (1948). "Circular Causal Systems in Ecology." Annals of the New York Academy of Sciences 50: 221-46*

Guy Stewart Callendar



1938

- mise en évidence de l'augmentation de température depuis le 19ème siècle

- évaluation des concentrations atmosphériques en CO_2 correspondantes

calcul de la variation de l'altitude de l'absorption des IR, qui explique l'augmentation de température observée

Ingénieur en machines à vapeur
passionné de météo

→ possibilité de changement climatique dû à l'activité industrielle (accumulation de CO_2) = phénomène bénéfique

Et les théories astronomiques ?

Milutin Milankovitch

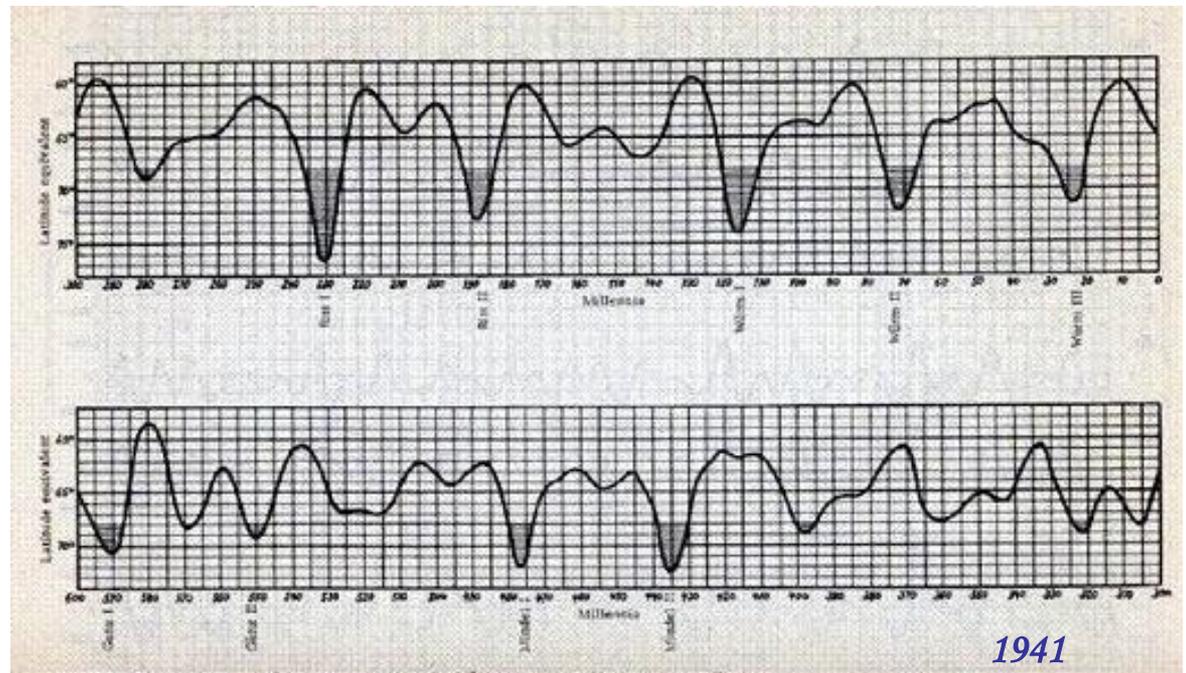


ingénieur en génie civil,
mathématicien

- 1920 *Théorie Mathématique Des Phénomènes Thermiques Produits Par La Radiation Solaire. Paris: Gauthier-Villars.*
- 1930 "Mathematische Klimalehre Und Astronomische Theorie Der Kilimaschwankungen." *In Handbuch Der Klimatologie, edited by W. Köppen and R. Geiger, Vol. 1, Pt. A, pp. 1-176. Berlin: Borntraeger.*
- 1941 *Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Belgrade: Koniglich Serbische Akademie.*

- importance de l'insolation d'été
- calcul de l'altitude de la neige « éternelle »

30 années de labeur
pour établir la
distribution spatiale et
temporelle de
l'énergie solaire reçue
par la terre



KÖNIGLICH SERBISCHE AKADEMIE

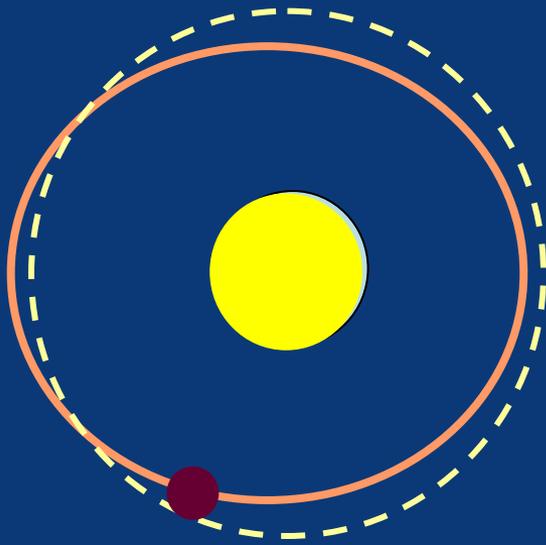
KANON DER ERDBESTRAHLUNG
UND
SEINE ANWENDUNG
AUF
DAS EISZEITENPROBLEM

VON
M. MILANKOVITCH

ordentlichem Professor an der Universität in Belgrad, wirklichem Mitgliede
der königlich serbischen Akademie

BELGRAD 1941

Théorie astronomique des glaciations



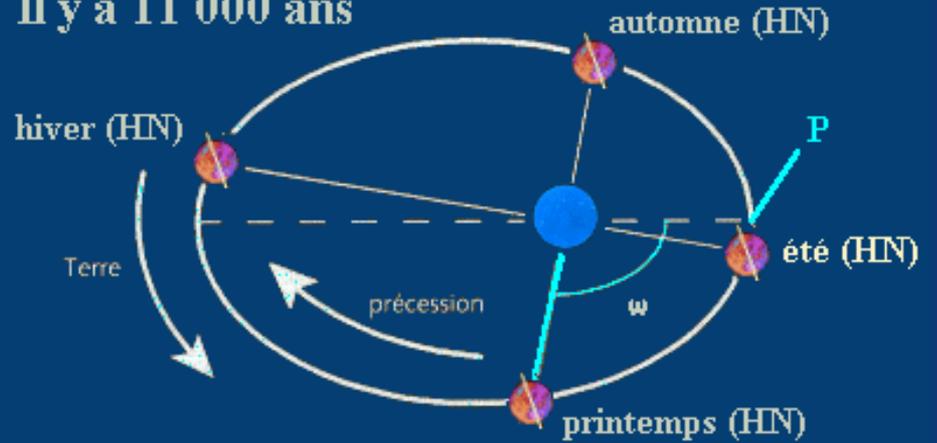
Excentricité
100 000
et
413 000 ans



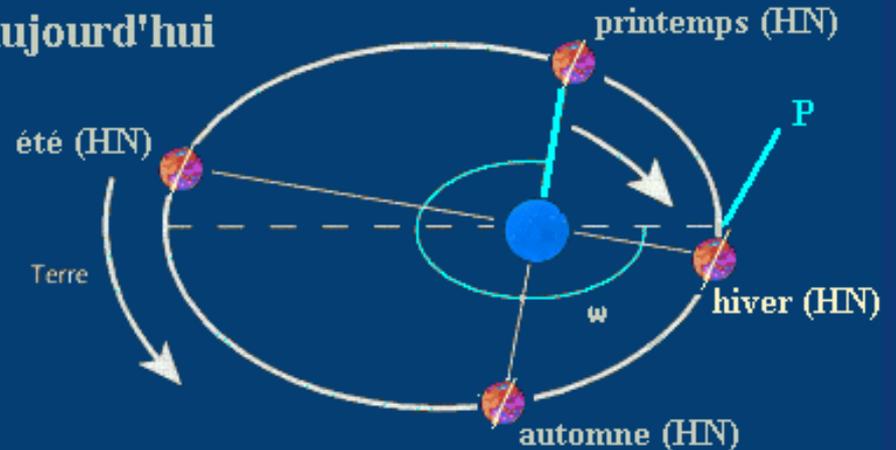
Obliquité
41 000 ans

Précession des équinoxes
19 000 et 23 000 ans

Il y a 11 000 ans



Aujourd'hui



des avancées décisives pour les paléoclimats

datations

- 1949 Carbone 14 (*Willard F. Libby*)
- isotopes de l'uranium (^{234}U - ^{230}Th)



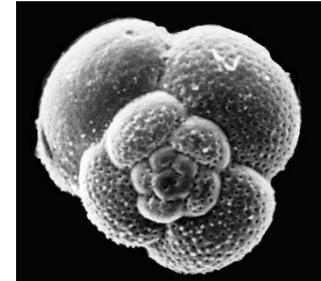
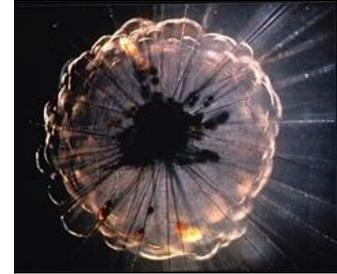
Prix Nobel de chimie
en 1960

paléothermomètres



le père de la
paléo-océnographie

1950 - ... ^{18}O / ^{16}O des tests de foraminifères
dans les sédiments marins (*Cesare Emiliani*)

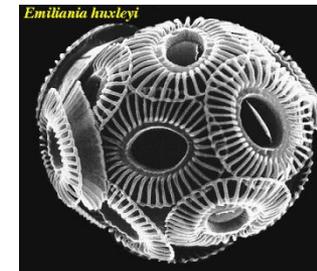


glaciologue
danois

1954 ^{18}O / ^{16}O dans les glaces polaires (*Dansgaard*)

→ carottes

- sédiments marins
- calottes polaires



Emiliana huxleyi

Années 1950 ...

1955 Hans Suess



diminution relative du Carbone 14 dans l'atmosphère, preuve d'une accumulation de carbone fossile

1956 Gilbert Plass



calcul de l'absorption par le CO_2 sur toute la colonne atmosphérique, en considérant chacune des raies d'absorption

→ rôle climatique du CO_2

- explication possible les cycles glaciaires - interglaciaires
- prévoit une augmentation de la température globale de $1,1^\circ C$ par siècle (avec les émissions de CO_2 de l'époque)

1957 Roger Revelle



les propriétés chimiques de l'océan lui interdisent d'être l'absorbeur illimité du CO_2 atmosphérique en excès

« Human beings are now carrying out a large scale experiment of a kind that could not have happened in the past nor be reproduced in the future »

fin des années 1950,

premiers signaux d'alarme sur l'effet de serre vers le grand public

fin des années 50 : Plass aux USA

début des années 60 : Mikhail Budyko (URSS)

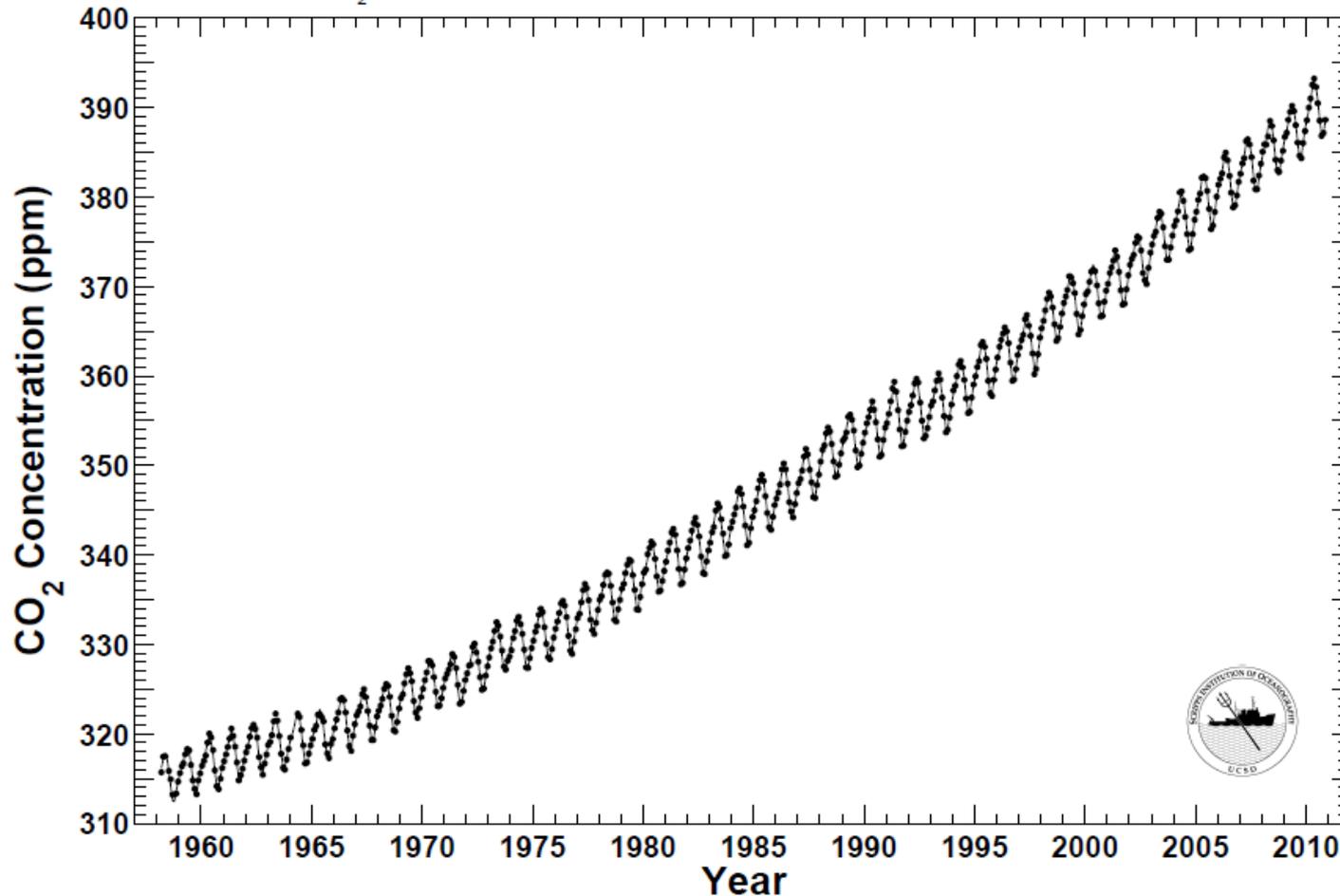
prédiction d'augmentation exponentielle de la concentration en CO_2

mais les mesures donnaient des concentrations très fluctuantes

1958 début des mesures de CO₂ dans l'Antarctique et à Mauna Loa

Mauna Loa Observatory, Hawaii Monthly Average Carbon Dioxide Concentration

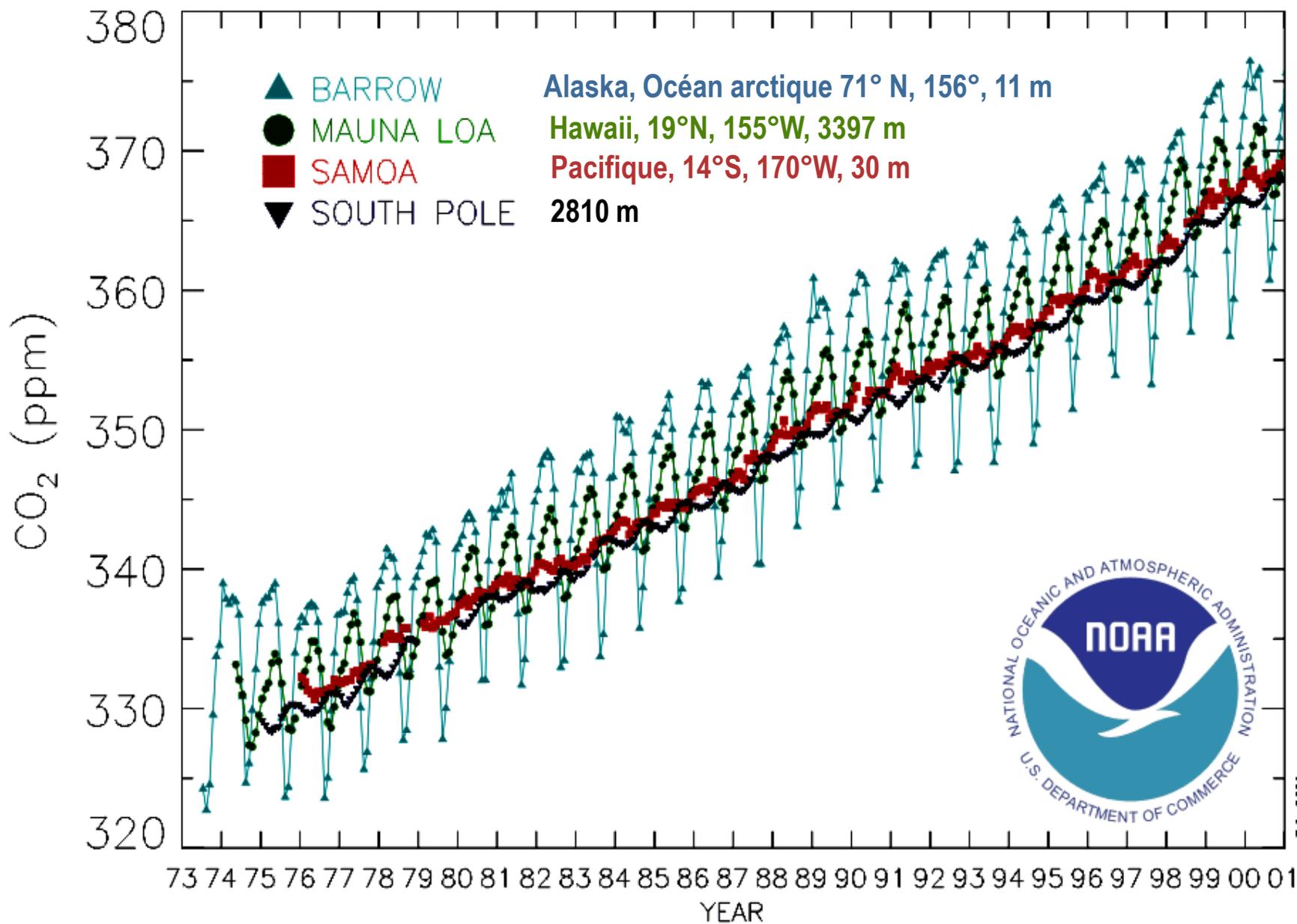
Data from Scripps CO₂ Program Last updated December 2010



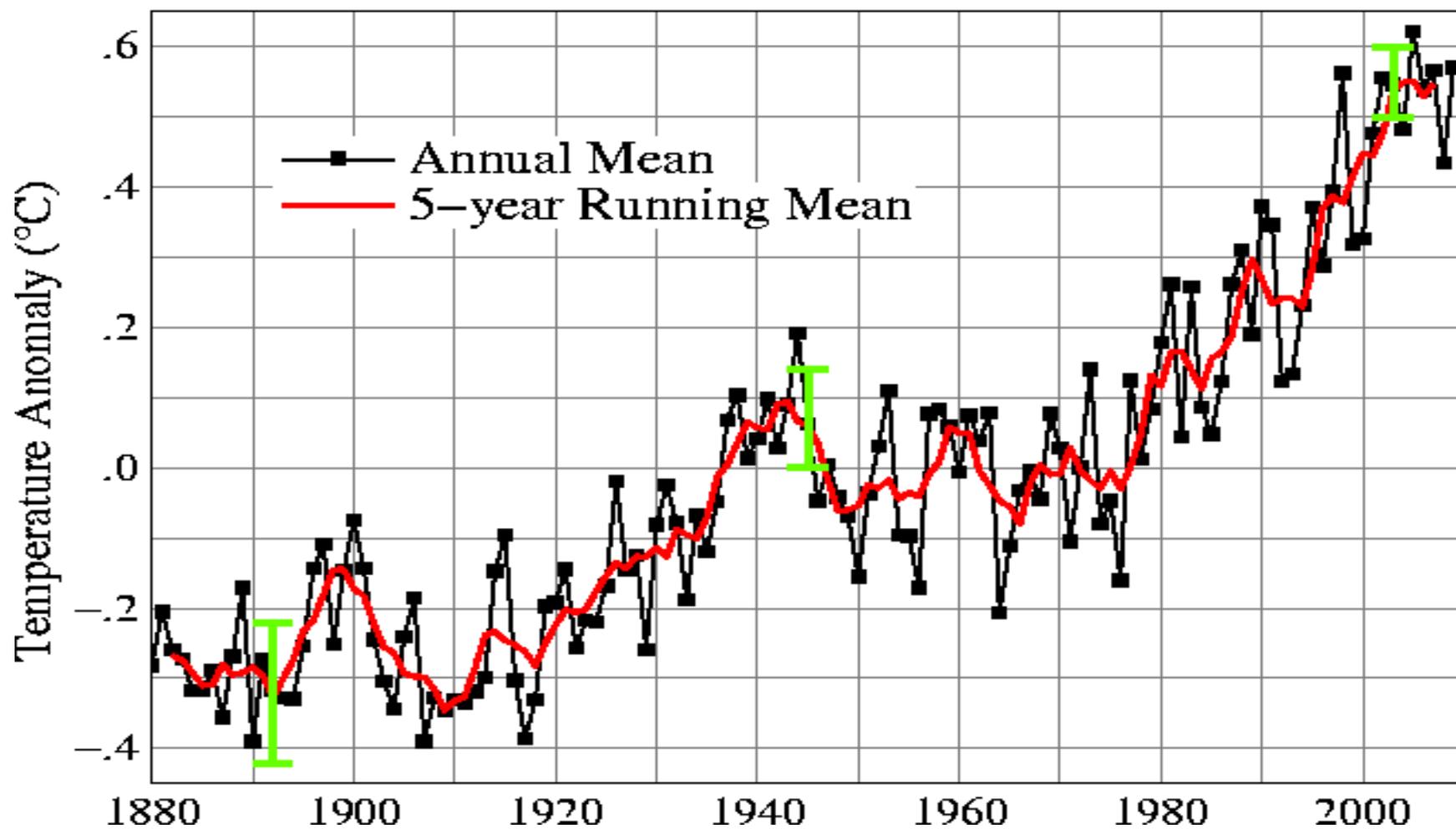
Charles David
Keeling

Monthly Mean Carbon Dioxide

NOAA CMDL Carbon Cycle Greenhouse Gases



Difficile de convaincre la communauté scientifique d'un réchauffement imminent avec les températures des années 50.



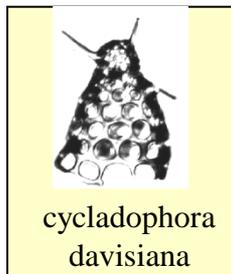
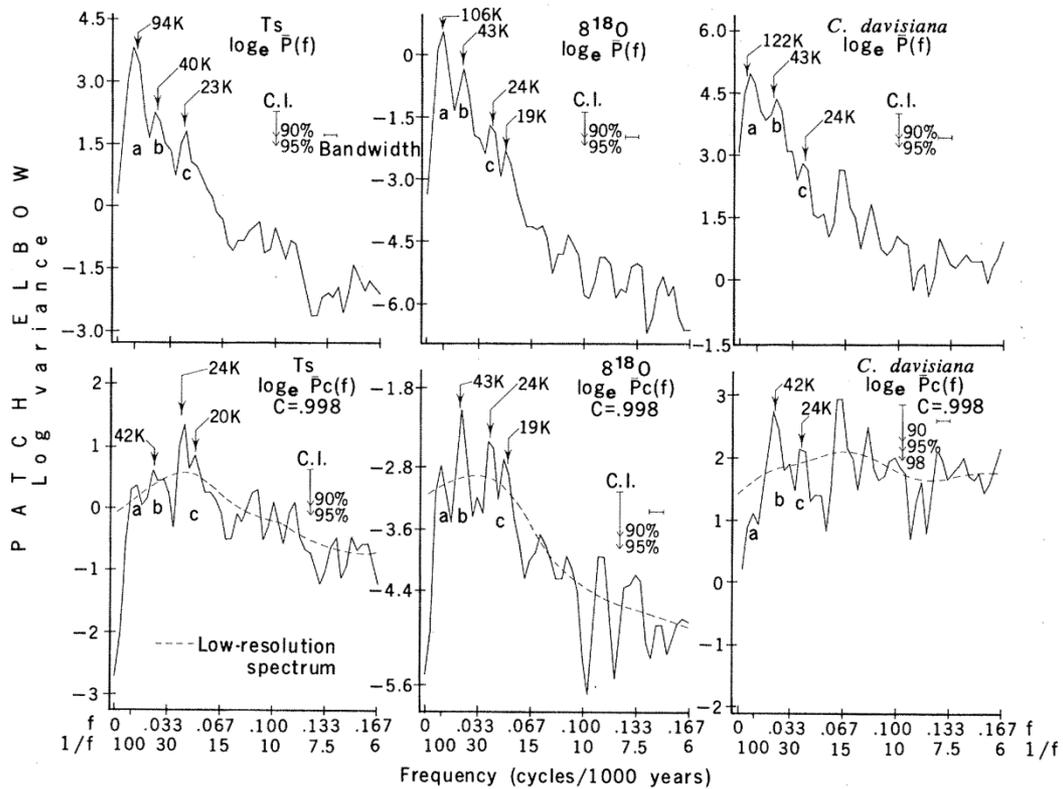
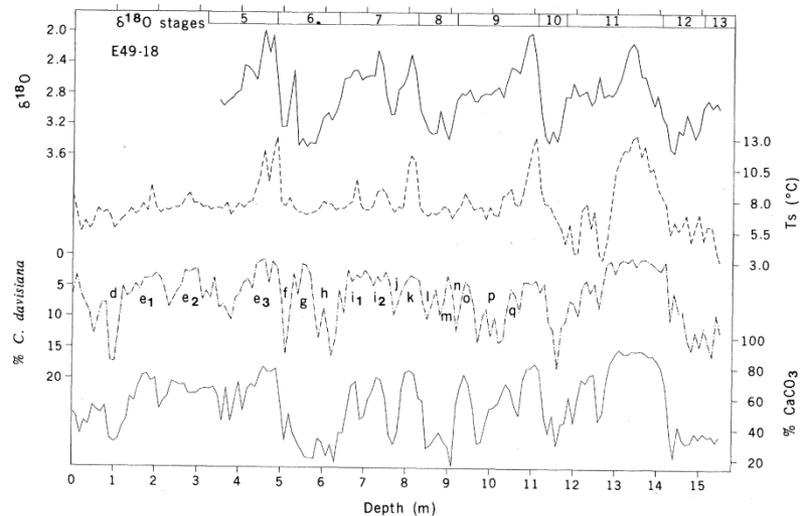
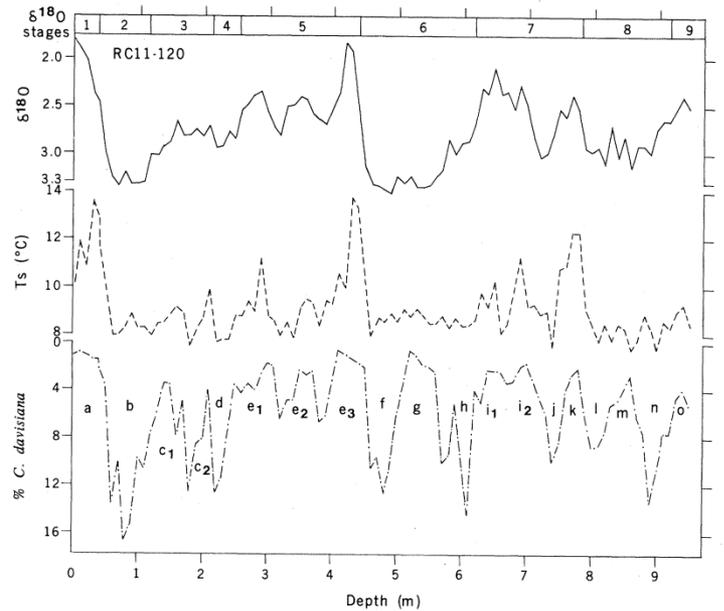
Années 1960

Les diverses communautés scientifiques impliquées dans le climat commencent à se parler.

1967 premier calcul complet de l'effet du doublement du CO₂

Manabe, S., and R. T. Wetherald, 1967: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24 (3), 241-259

Hays, Imbrie, Shackleton (1976)

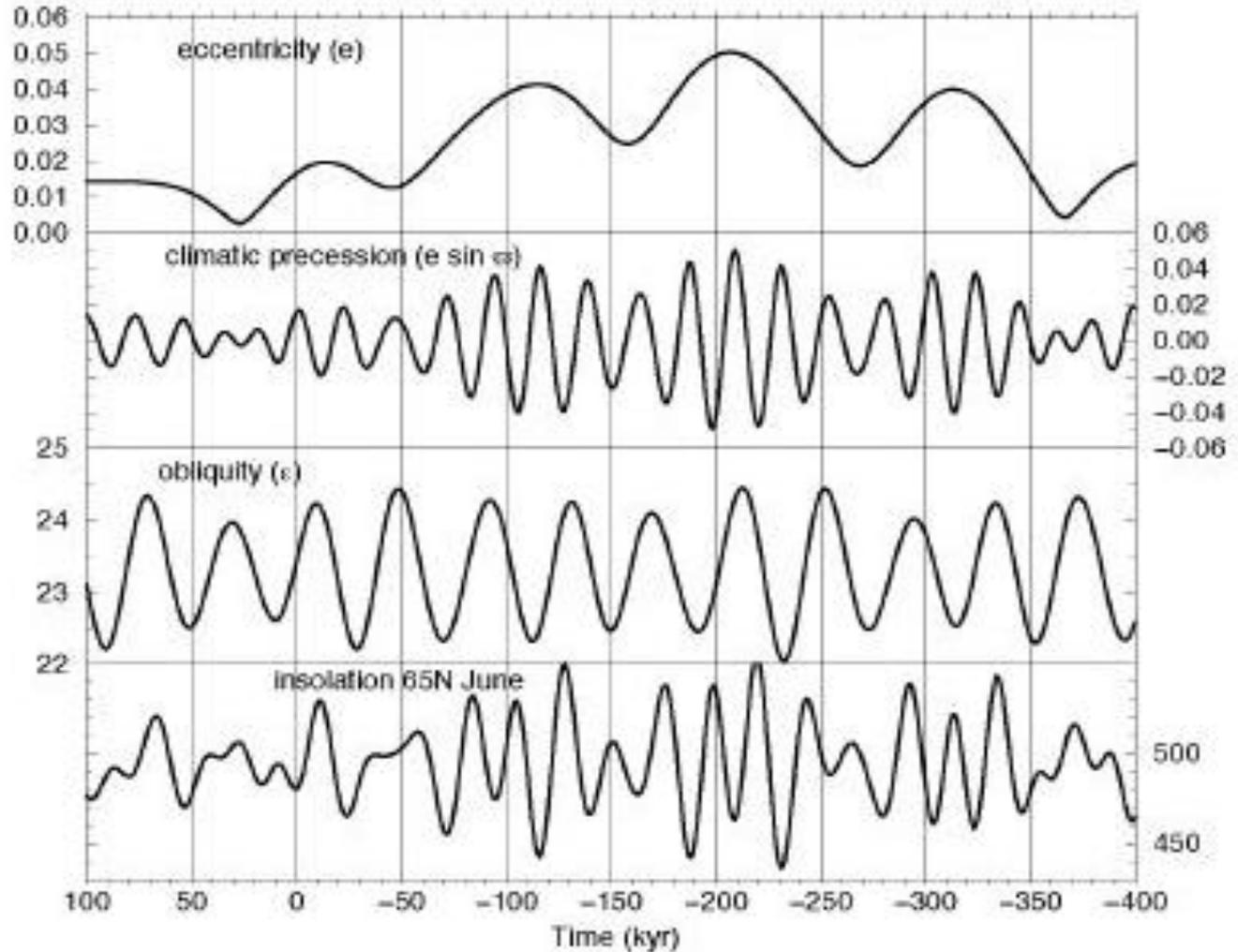
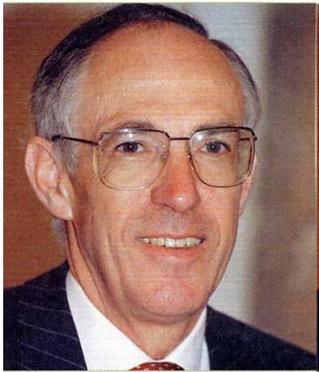


TS = Température de surface de la mer en été, déduite des populations de foraminifères

André Berger

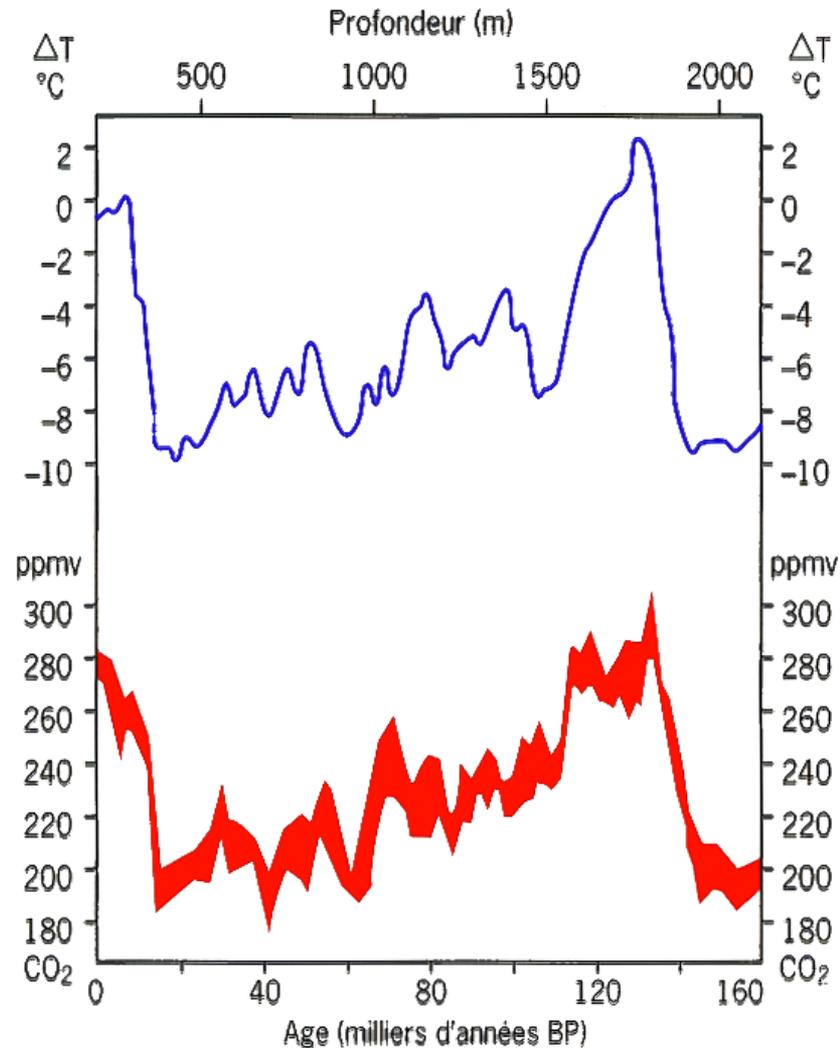
1978.

Long Term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climatic Changes.
Journal of the Atmospheric Sciences, volume 35(12), 2362-2367.



1987 Résultats de Vostok

Courbes de la température et de la concentration en CO_2 en fonction de l'âge de la glace



1979 : La National Academy of Sciences (NAS) publie un rapport sur l'évolution du climat :

A wait-and-see policy may mean waiting until it is too late to avoid significant climate changes.

1983 : La NAS confirme qu'un doublement du CO_2 conduira à un réchauffement de la terre de 1,7 à 4,5 °C.

1988 : l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change , GIEC en français), composé de climatologues en pointe sur l'ensemble du globe est créé par l'UNEP (United Nations Environment Program) et la WMO (World Meteorological Organization)

1995 : 2ème rapport de l'IPCC

the balance of evidence suggests that there is a discernible human influence on global climate.

1997 : Protocole de Kyoto

2001 : 3ème rapport de l'IPCC :

There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities.

2005 : entrée en vigueur du protocole de Kyoto

2007 : 4ème rapport de l'IPCC :

Most of the observed increase in globally averaged temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations.

- Les cycles glaciaires-interglaciaires sont pilotés par la variation de l'insolation conformément à la théorie de Milankovitch
- Cet effet déclenchant est considérablement renforcé par les rétroactions
 - pouvoir réfléchissant de la surface du globe aux hautes latitudes
 - effet de serre.

un site internet de référence :

<http://www.aip.org/history/climate/index.htm>

tout l'historique de la découverte du réchauffement global.

le site est en anglais (aip = American Institute of Physics)