

SCIENCE, CLIMAT & SOCIÉTÉ

INTRODUCTION

Rappel	échelle de temps d'étude	quoi ?
climatologie	30 ans minimum	étude du climat
météorologie	quelques jours	étude des phénomènes atmosphériques (nuages, précipitations, vents...) pour comprendre comment leur formation et évolution en fonction de paramètres comme la température, pression atmosphérique, humidité sur quelques jours tout au plus)

Objectifs du thème : comprendre la nature du savoir, ses méthodes d'élaboration et identifier et comprendre les effets de la science sur la société et l'environnement, les impacts bénéfiques et délétères des activités humaines (+/-)

Science depuis les Lumières = entreprise collective fondée sur rigueur, faits et preuves adossés à des lois, énoncés, hypothèses, modèles dans des édifices explicatifs appelés théories de construction du savoir (connaissances) pour décrire, comprendre et prévoir le réel par la matière, la reproductibilité des expériences, l'évaluation des publications par les pairs avec rationalité, rigueur et principe de parcimonie, indépendance des forces mercantiles, politiques et religieuses, doute raisonnable, matérialisme de méthode.

Le climat peut être vu comme un état métastable de l'hydrosphère et l'atmosphère sur au moins 30 ans localement ou à l'échelle globale et répondant aux perturbations de son équilibre radiatif de base sous l'influence des facteurs naturels ou anthropiques : il inclut l'étude des interactions entre biosphère, hydrosphère, atmosphère, lithosphère et cryosphère.

La société est l'humanité, la collectivité humaine des pays et du monde, ayant ses lois, systèmes d'exercice du pouvoir avec ou sans religion d'Etat.

Sur quelles données se base t-on ? Comment l'humain peut-il en comprenant le système climatique passé et l'histoire de son atmosphère depuis 4,56 Ga (voir enseignement de spécialité en particulier) et les changements actuels, complexes, envisager des actions régulatrices d'atténuation des changements climatiques dont il est majoritairement responsable depuis la révolution industrielle ?

I / HISTOIRE DE L'ATMOSPHERE & APPARITION DE LA BIOSPHERE

Comment a évolué la composition initiale atmosphérique terrestre depuis 4,56 Ga et comment cela a t-il favorisé les conditions présidant à l'apparition de la vie il y a au moins -3,5 Ga sous forme de Cyanobactéries photosynthétiques ?

gaz	atmosphère initiale	Explication de l'atmosphère initiale	atmosphère actuelle	explication de l'évolution de la composition initiale primordiale à l'actuelle de 2024	Indices du taux
N2	5 %		78 %	<p>pp (N2) proche de la valeur actuelle (0.8 bar) dès -4.3 Ga, après son dégazage par le manteau. Hypothèse actuelle : origine astéroïde / comète</p> <p>La diminution de la concentration atmosphérique en CO2 et la condensation de l'eau dans l'océan primitif (qui a peut être existé avant l'Archéen) « profite » au N2 qui devient progressivement le composant dominant de l'atmosphère. La pression atmosphérique totale aurait été de 1 bar à l'Archéen, soit une pression similaire à la pression atmosphérique actuelle. L'atmosphère contient dès lors près de 80% de N2. La richesse en N2 est, dès l'Archéen, une caractéristique fixe de l'atmosphère terrestre.</p>	
O2	0 %	<p>apparition de la photosynthèse L'enrichissement en carbone 12 de sédiments de -3.8 Ga (Isua, Groenland) pourrait montrer que, dès le début de l'Archéen voire avant, il y avait une activité photosynthétique, donc une libération d'O2 possible : le 12C plus réactif que le 13C est préférentiellement incorporé dans la matière vivante au rapport 13C/12C plus faible que prévu ailleurs où il est constant sur Terre.</p> <p>constat : La plus ancienne formation sédimentaire interprétée comme issue d'une activité biologique = formation australienne de Pilbara, datée de -3.5 Ga à stromatolithes, formations sédimentaires carbonatées (plus rarement siliceuses) à dépôts laminaires de carbonates CaCO3 clairs, alternés avec des laminations sombres riches en matière organique.</p> <p>interprétation : actuellement, ce type de formation se met en place grâce à l'activité photosynthétique des Cyanobactéries actuelles, bactéries à thylakoïdes libres dans leur cytoplasme à photosystèmes leur permettant de réaliser la photosynthèse (voir chapitre 2), se développant en une colonie en tapis sur un support humide. Dans le cas des stromatolithes, leur consommation de CO2 favorise la précipitation de carbonates CaCO3(s). Le tapis bactérien est alors recouvert par un dépôt de calcaire clair, les bactéries recouvertes sont « étouffées » et meurent, ce qui forme le dépôt sombre. Les Cyanobactéries recolonisent alors le substrat calcaire. La construction en couches alternées du stromatolithe se déroule ainsi cycliquement. La présence de stromatolithes archéens montre l'existence de Cyanobactéries photosynthétiques à cette époque. Elles se sont aussi fossilisées dans des fers rubanés (voir juste après). On pense qu'elles se sont développées dans l'océan archéen. De l'O2 est donc libéré... mais cela n'entraînera pas immédiatement l'oxygénation de l'atmosphère.</p> <p>les inclusions minérales des chondrites carbonées piégées au sein de chondrites à enstatite permettent d'imaginer une contribution partagée des 2 types de météorites pour expliquer la composition du manteau</p>	20,9 %	<p>- production de O2 = photosynthèse des Végétaux chlorophylliens et Bactéries notamment les Cyanobactéries, les autres sources sont négligeables (photolyse de l'eau dans la haute atmosphère : H2O => 1/2 O2 + 2H+ + 2 e-), qui utilisent l'énergie lumineuse pour produire des matières organiques à partir de CO2 et d'eau, ce qui libère donc du O2</p> <p>a/ les couches rouges</p> <p>les couches rouges sont des formations détritiques continentales, fluviales ou deltaïques (sables +/- grossiers) colorées en rouge par des oxydes ferriques : hématite Fe2O3 et magnétite Fe3O4. issus de l'oxydation du Fer libérée par l'altération minéralogique des micas granitiques, des pyroxènes des basaltes ... au contact du O2 : ces couches rouges révèlent la présence de O2 dans l'atmosphère. constat : < - 2 Ga : donc interprétation : il y avait alors atmosphère très faiblement oxygénée, à un taux insuffisant pour que l'oxydation continentale ait lieu.</p> <p>b/ les dépôts d'uraninite UO2</p> <p>fluviales et détritiques, ces dépôts de UO2, minéral d'aluminium avec du O2 s'oxydent et deviennent solubles : leur présence révèle donc une teneur en O2 très faible (> 100 fois moins qu'aujourd'hui) or constat = < - 2,1 Ga donc jusqu'à 2 Ga, la teneur en O2 était très faible dans l'atmosphère : leur dépôt confirme l'interprétation avec les couches rouges.</p> <p>c/ les gisements de fer rubané</p> <p>résultat de la consommation de O2, formations sédimentaires marines, non détritiques, source des plus grands gisements de fer mondiaux, d'oxydes de fer magnétite et hématite issus de l'oxydation des ions ferreux Fe2+, apportés par les eaux fluviales privées de O2 mais qui mises en contact avec des eaux oxygénées marines déclenche la réaction chimique de précipitation de ces oxydes Fe3O4 et Fe2O3, caractéristiques de la période de - 3,8 Ga à - 1,8 Ga, période où la photosynthèse des Cyanobactéries productrices de O2 est active sans apparition de O2 dans l'atmosphère. donc pendant près de 2 Ga le O2 produit dans l'eau est piégé par ces formations de fer rubané.</p> <p>hypothèse explicative : lorsque la production de O2 a dépassé la capacité d'absorption par le fer marin en contexte d'oxygénation par la photosynthèse cyanobactérienne, le O2 a commencé à augmenter en quantité dans l'eau puis a diffusé dans l'air : c'est l'apparition de l'O2 atmosphérique vers - 2,35 / - 2 Ga</p> <p>Les fers rubanés archéens (BIFs)</p> <p>Les gisements de fer rubané (en anglais, Banded Iron Formation -BIFs) sont des minerais très riches en fer formés par l'alternance de lits quartziques et de lits riches en oxydes ferriques (= 90 % du minerai de fer exploité dans le monde). Les différentes couches sont centimétriques. Leur origine est majoritairement archéenne ; on les rencontre sur toute la surface du globe de -4 Ga à -1,8 Ga environ. Bien que la vie soit apparue vraisemblablement avant -3,5 Ga, le relargage d'oxygène libre (O2) n'a initialement eu qu'un impact limité sur l'écologie des océans et de l'atmosphère. L'augmentation de sa concentration dans l'océan, par suite de la photosynthèse cyanobactérienne, en a progressivement fait un milieu oxydant, alors qu'il était initialement réducteur.</p> <p>Le fer ferreux (Fe2+), ainsi que le fer natif éventuellement présent (Fe0) ont dès lors pu être oxydés en fer ferrique (Fe3+) et précipiter sous forme de magnétite Fe3O4 et d'hématite Fe2O3, et ce jusque vers -2,4 Ga environ.</p> <p>Lorsque, au Paléoproterozoïque, la plus grande partie des formes réduites du fer furent oxydées, la sédimentation de gisements de fer rubané s'est raréfiée et la teneur en O2 a alors augmenté dans les océans d'abord, dans l'atmosphère ensuite, pour se révéler hautement toxique pour les organismes anaérobies. C'est ce que l'on appelle la Grande Oxydation ou catastrophe de l'oxygène. Exploités comme minerai de fer, comme c'est le cas en Australie, Afrique du Sud et au Brésil. D'immenses gisements sont au stade exploratoire en Afrique occidentale et centrale</p> <p>Aujourd'hui :</p> <p>- production de O2 = photosynthèse des Végétaux chlorophylliens et Bactéries notamment les Cyanobactéries, les autres sources sont négligeables (photolyse de l'eau dans la haute atmosphère : H2O => 1/2 O2 + 2H+ + 2 e-), qui utilisent l'énergie lumineuse pour produire des matières organiques à partir de CO2 et d'eau, ce qui libère donc du O2</p> <p>- consommation de O2 = phénomènes biologiques (respiration des êtres vivants, O2 = comburant des combustions des substrats métaboliques) et géologiques (altération des roches, formation d'oxydes de Fer par exemple et oxydation de gaz réduits d'origine « émissions volcaniques »)</p> <p>bilan : exigence d'un équilibre consommation / production (voir cycle du C vu en 2nde) : teneur en O2 = Cste = 20,9 %.</p> <p>Des indices pétrographiques (roches) permettent de dater l'apparition du O2 dans les océans puis dans l'atmosphère : l'aspect des gisements de fer rubané (couches alternativement riches et pauvres en Fer) traduit une précipitation périodique qui pourrait résulter de la prolifération saisonnière des Cyanobactéries, Bactéries photosynthétiques</p> <p>taux de O2 : de 1% il y a -2 Ga, passé à 10% - 600 Ma puis à 21% aujourd'hui - 400 Ma : enrichissement progressif</p> <p>accumulation de O2 dans l'atmosphère que si la production par photosynthèse en libère plus que ce que la respiration et les diverses oxydations en consomment : à certaines époques, l'augmentation de la sédimentation organique a été contemporaine d'une augmentation du taux de O2 : ces 2 évolutions sont liées.</p> <p>explication ? : en effet : la matière organique enfouie, fossilisée (transformé lentement en charbon ou pétrole ...) échappe à l'oxydation par respiration : le O2 libéré par la photosynthèse ayant produit cette matière organique contribue donc à l'augmentation du taux de O2 atmosphérique.</p> <p>vers - 500 Ma : le O2 présent se transforme partiellement en ozone O3 selon O2 + 1/2 O2 => O3 en formant une couche dans la haute atmosphère filtrant et absorbant en partie les UV , ce qui permet la vie hors de l'eau, car jusque là, la vie ne devait sa survie qu'à la protection de l'eau filtrant les UV nocifs.</p>	
H2O	83 %		traces	<p>baisse de température pendant les 100 Iers Ma => condensation de la vapeur d'eau => déluge universel => océan liquide</p>	

CO2	12 %	<p>primitif. on a un dégazage mantellique précoce dans l'histoire terrestre avec mise en place de l'atmosphère primitive les 500 1ers Ma, événement candidat le plus important pour former l'atmosphère primitive.</p>	<p>une grande partie du CO2 atmosphérique passe dans les océans et se retrouve dissous dans l'eau : $CO_2 + H_2O \Rightarrow H_2CO_3$, acide faible qui attaque les silicates des roches de la croûte (tronc commun : granitoïdes) La consommation d'une mole de CO2 et la formation d'une mole de CaCO3 (carbonate de calcium) participe donc à la baisse du taux de CO2 atmosphérique, ainsi piégé, séquestré dans les roches calcaires de la lithosphère sous les océans. consommation par photosynthèse des Cynobactéries océaniques</p> <p>taux de CO2 : baisse jusque vers - 500 Ma 2 processus ont fait chuter le taux de CO2 dans l'atmosphère et ont permis la formation des 2 principaux réservoirs de C :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la formation des calcaires par piégeage du CO2 (roches calcaires de la lithosphère : 30×10^6 Gt) - la fossilisation des matières organiques sous forme de C (10×10^6 Gt : charbon, pétrole, schiste bitumeux) <p>= formes de stockage du C présent dans l'atmosphère sous forme de CO2 A l'échelle des temps géologiques, le taux de CO2 atmosphérique dépend aussi en-dehors de ces 2 réservoirs de l'intensité du volcanisme émetteur de CO2.</p> <ul style="list-style-type: none"> \ quantité du CO2 atmosphérique <p>constat : L'analyse de paléosols de l'Archéen tardif (-2.8 Ga) montre l'absence de sidérite (FeCO3 formé à partir de CO2) interprétation : une pression partielle en CO2 seulement jusqu'à 100 fois plus forte que l'actuelle. l'Archéen montre donc une diminution de la pression partielle en CO2 de l'atmosphère primitive. Comment s'est produit une telle diminution du taux de CO2 ?</p> <p>constat : plus anciens sédiments = archéens (-3.88 Ga, Groenland, Isua ?) interprétation : présence d'eau liquide. On conçoit donc l'existence d'un océan archéen un peu avant, mis en place entre -4 et - 3,9 Ga.</p> <p>constats :</p> <ul style="list-style-type: none"> - diminution significative du bombardement terrestre par des corps de grande taille le rend (enfin) durable - la surface de la croûte continentale s'est accrue - L'atmosphère primitive aurait vu sa richesse en CO2 diminuer significativement par formation de carbonates piégeant le CO2, de moins en moins vite recyclés du fait du ralentissement de l'activité interne lié au refroidissement progressif de la Terre. <p>hypothèses explicatives du refroidissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - \ dégazage - \ bombardement => conséquence : \ apport en CO2 - début de consommation significative par les êtres vivants photosynthétiques. <p>Des modèles ont été établis pour chiffrer l'évolution de la pression partielle en CO2. On passe de plusieurs dizaines de bars à - 30 mbar pour les modèles d'atmosphère archéenne relativement pauvre en CO2,- 200 mbar pour les modèles les plus riches en CO2. On reste au dessus des 0.3 mbar actuels dans tous les cas.</p>
CH4			<p>en plus d'un dégazage possible si manteau plus réducteur, la vie aurait pu produire du CH4 avant -3.8 Ga dès -4.2 Ga. par des Procaryotes méthanogènes => effet de serre généré par ce méthane biogénique atmosphérique => favorisation du maintien de l'eau liquide sur Terre malgré une luminosité solaire inférieure à l'actuelle => réchauffement climatique => favorisation de la formation des carbonates => diminution du taux de CO2 atm à l'Archéen. Si la diminution du taux de CO2 est importante, elle a dû être compensée pour maintenir un effet de serre suffisant pour l'existence de l'eau liquide sur Terre. L'atmosphère primitive archéenne enrichie en CH4 d'origine biologique permet un tel effet de serre malgré la décroissance de la quantité de CO2. constat : fin de l'Archéen (-2.7 et -2.5 Ga) : \ / 2 taux de Ni dans les roches sédimentaires comme les fers rubanés. interprétation : refroidissement terrestre => ralentissement de l'activité interne => diminution de l'apport hydrothermal océanique de nickel Ni or, les Procaryotes méthanogènes se nourrissant de Ni => chute de leur importance dans la biosphère. Comme \ production CH4 biogénique => \ taux de CH4 atm archéenne.</p>

les autres gaz traces ne sont pas reportés dans ce tableau : argon (Ar), autres GES (N2O, Nos ... (voir brochure CEA p 15)

chute de près de 80% du taux de vapeur d'eau, de 11,96% du taux de CO2 et la hausse du taux d'O2 de près de 21% et de celle de N2 de 73%

BILAN

Il existe de nombreuses interactions entre enveloppes : géosphère (cryo/litho), biosphère, hydrosphère et atmosphère. Elles concernent des cycles biogéochimiques comme celui de l'eau, du carbone, de l'azote etc ...

1/ débuts de la Terre : accréation : scénario admis et fortes périodes volcaniques intenses

les grains de poussière proches du plan de symétrie de la nébuleuse s'agglomèrent par collisions à basse vitesse et forment progressivement des corps kilométriques à décakilométriques

les corps les plus gros attirent davantage la matière et leur masse s'accroît exponentiellement en absorbant le plus petits : c'est l'emballement gravitationnel qui construit des objets pluridécakilométriques à des planétésimaux plurihectakilométriques

activité volcanique intense => dégazage de la planète => atmosphère initiale

baisse de température pendant les 100 1ers Ma => condensation de la vapeur d'eau => déluge universel => océan liquide aqueux => atmosphère à CO₂ et N₂ => une grande partie du CO₂ atmosphérique passe dans les océans et se retrouve dissous dans l'eau : CO₂ + H₂O => H₂CO₃, acide faible qui attaque les silicates des roches de la croûte (tronc commun : granitoïdes) La consommation d'une mole de CO₂ et la formation d'une mole de CaCO₃ (carbonate de calcium) participe donc à la baisse du taux de CO₂ atmosphérique, ainsi piégé, séquestré dans les roches calcaires de la lithosphère sous les océans.

L'apparition des êtres vivants chlorophylliens va amplifier ce processus : ils déplacent l'équilibre par prélèvement du CO₂ pour la photosynthèse et en augmentant donc la précipitation du CaCO₃. Une partie du CO₂ est donc capté dans les calcaires de la lithosphère océanique.

2/ L'apport des roches sédimentaires (stromatolites), indices d'une vie / atmosphère initiale

Actuellement à 20,9 %, le taux de O₂ était probablement nul dans l'atmosphère primitive initiale.

utilisation :

- d'indicateurs géologiques comme les roches sédimentaires => composition de l'atmosphère primitive. L'atmosphère a pu commencer à se former très tôt au cours de l'ère Hadéenne (période allant de - 4,556 Ga aux 1ères roches continentales recensées (voir chapitre 1 Spécifique) : les gneiss canadiens d'Acasta de -4 Ga
- du fractionnement des isotopes de certains éléments (13C/12C dont les variations sont attribuées à la vie) => hypothèses explicatives de l'environnement primitif de notre planète, et donc la 1ère composition de son atmosphère. En l'absence de roche hadéenne, la chimie vient alors au secours des chercheurs.

Les traces de cette époque sont effacées par le 2^e bombardement massif subi dû à l'influence de Jupiter et Saturne à - 3,8 Ga. Il existe 3 types d'éléments volatils candidats à la composition primordiale de l'atmosphère terrestre

- a/ la matière solaire ou de sa nébuleuse présente à la formation de la Terre
- b/ le manteau lors d'un dégazage
- c/ les chondrites carbonées ayant bombardé la Terre après son accréation (8 groupes de météorites, corps solide naturel d'un système planétaire qui en traversant l'atmosphère d'un autre corps n'a pas perdu toute sa masse, atteint la surface de la Terre ou d'un autre astre sans être complètement volatilisé lors de l'impact avec cette surface, la majorité provient de petits corps célestes du Système solaire, les météoroïdes (99,4 % des météorites analysées proviennent de fragments d'astéroïdes, quelques centaines de spécimens sont lunaires ou martiens)

A/ contribution de la nébuleuse protosolaire, dégazage mantellique et refroidissement global formant la croûte avec double bombardement météoritique

Les études convergent vers le scénario :

1/ formation de la Terre en 50 à 100 Ma avec accréation des chondrites

2/ différenciation en 10 à 60 Ma

Certains des éléments volatils ont pu être capturés par gravité dans l'atmosphère primitive mais c'est limité : la composition de l'atmosphère en nombreux isotopes de gaz rares est trop différente de celle de la matière solaire.

Le dégazage correspond à l'énergie libérée sous forme de chaleur par l'accréation, la différenciation terrestre et les désintégrations radioactives des éléments du noyau et depuis le manteau. Cela suppose une Terre partiellement en fusion. Le volcanisme des débuts entraîne des magmas silicatés légers qui migrent en surface formant un océan magmatique avec un dégazage massif des éléments volatils à l'origine de l'atmosphère primitive (CO₂, CH₄)

Le méthane CH₄ produit par des bactéries méthanogènes aurait été produit en grande quantité, notamment en absence d'O₂, poison pour elles. Ces 2 GES CH₄/CO₂ auraient été le moteur d'une régulation climatique réchauffante avec pourtant un albédo (part réfléchie de la lumière incidente solaire d'une surface) faible, un Soleil de faible brillance (30% moins qu'aujourd'hui !), des aérosols (particules solides) formées en haute atmosphère par volcanisme qui absorbent la lumière solaire reçue et une photolyse du CH₄

Le refroidissement de la Terre a entraîné la formation d'une 1ère croûte basaltique.

Seuls certains modèles la conçoivent dès -4,4 voire -4,5 Ga par fusion de la croûte basaltique subductée, comme à l'Archéen. Une fois formée, on a « dégazage du manteau » mais cette croûte hadéenne peut avoir été partiellement ou totalement entraînée par fusion partielle à cause du 1er bombardement météoritique qui continue. La croûte et le manteau ont donc fourni des éléments volatils à l'atmosphère primitive par dégazage.

Constat : la composition de l'atmosphère actuelle en certains isotopes (rappel : isotope = nucléide d'un atome à N neutrons ; tous les isotopes de cet élément possèdent le même nombre de protons Z, numéro atomique propre à cet élément. Ainsi, le nombre de masse $A = Z + N$ d'un atome étant le nombre de nucléons (protons + neutrons formant le noyau), les isotopes d'un élément ont des nombres de masse différents)

Interprétation : => on a un dégazage mantellique précoce dans l'histoire terrestre avec mise en place de l'atmosphère primitive les 500 1ers Ma, événement candidat le plus important pour former l'atmosphère primitive.

le double bombardement météoritique de la Terre après sa formation

constat : existence de cratères d'impacts lunaires datés de -4.55 Ga à -3,8 Ga par les basaltes prélevés sur la Lune, parfois de taille kilométrique

interprétation : au cours de l'Hadéen (-4.55 Ga à -3,8 Ga) un bombardement de la Terre par des météorites et des comètes a eu lieu en 2 fois et aurait pu influencer la composition de la Terre comme celle de l'atmosphère primitive.

constat : présence d'éléments avec du Fer donc à affinité avec lui dans le manteau, normalement absents après différenciation terrestre

interprétation : cela suggère un ajout tardif par bombardements de chondrites carbonées qui en contiennent

Les études du rapport deutérium/hydrogène D/H de l'eau des océans et du manteau suggèrent aussi une filiation avec des chondrites carbonées issus d'astéroïdes et non de comètes dont les rapports 18O/16O ne sont pas conformes à ceux de l'eau terrestre contrairement aux astéroïdes .

hypothèse explicative dans le scénario de la reconstitution de l'histoire terrestre : ce bombardement de la Terre après sa formation par des chondrites carbonées aurait pu apporter beaucoup d'éléments volatils à la Terre et à l'atmosphère, notamment un stock d'eau.

En plus de la capture initiale de gaz de la nébuleuse protoplanétaire ayant peu contribué à l'élaboration de l'atmosphère, le dégazage est un des mécanismes qui a permis de stabiliser, dès -4.3 Ga, une atmosphère primitive. Le bombardement post-accrétion de notre jeune planète par des chondrites carbonées, à l'origine du stock d'eau, a enrichi l'atmosphère en éléments volatils.

B/ contribution des chondrites parentes et manteau terrestre

Le dégazage du manteau dépend de sa composition chimique, elle-même régie par la composition des corps s'étant accrétés pour former la Terre primitive, à priori des chondrites, météorites indifférenciées, de composition moyenne atomique celle de la Terre (manteau moyen) et du Soleil. Divisées en plusieurs catégories selon leur chimie, 2 types sont candidats pour l'origine de la Terre :

	chondrites à enstatite	chondrites carbonées
arguments	à minéraux mis en place dans des conditions réductrices => seraient à l'origine d'un manteau plus réduit que l'actuel. Les conditions d'oxydation du manteau ont alors forcément évolué. D'après la chimie de laves archéennes (komatiites), depuis -3.8 Ga, le manteau avait le même état d'oxydation qu'actuellement.	outre leur richesse en carbone, ce sont les météorites les plus proches de la matière solaire, plus oxydées que les chondrites à enstatite
contribution à l'explication de l'atmosphère primitive	composition isotopique en O plus proche de celle des roches terrestres. L'oxygène étant l'élément chimique le plus abondant, cela argumente l'idée d'une Terre formée à partir de ces météorites.	la composition en métaux comme Si, Al, Fe, Mg des roches terrestres est-elle plus proche de ces chondrites ?

hypothèse existante : il y a eu des échanges entre régions du système solaire où se forment les 2 types de météorites

arguments / constats d'appui : les inclusions minérales des chondrites carbonées piégées au sein de chondrites à enstatite permettent d'imaginer une contribution partagée des 2 types de météorites pour expliquer la composition du manteau primitif.

hypothèse 1 : manteau réduit issu de chondrites à enstatite => dégazage => atmosphère primitive réductrice à H₂, CH₄, H₂S, NH₃ => = composants d'une atmosphère prébiotique réductrice proche de celle imaginée par Stanley Miller (cf expérience historique) en 1953 qui a simulé un tel milieu. Il a pu mettre en évidence la mise en place de réactions chimiques ayant notamment produit des acides aminés du vivant.

hypothèse 2 : manteau plus oxydé issu de chondrites carbonées => dégazage => atmosphère primitive plus oxydante avec par exemple, N sous forme de N₂ et C de CO₂. Plus oxydante certes, mais dépourvue d'O₂.

constat : l'état d'oxydation du cérium dans les zircons hadéens, donc des magmas à partir desquels ils se sont formés

interprétation : suggère que l'atmosphère prébiotique n'a pas été une atmosphère réductrice riche en CH₄ et NH₃, mais plutôt à CO₂, SO₂, N₂ et H₂O. Dépourvue d'O₂ mais pas réductrice, certains statuent sur une atmosphère neutre, d'autres sur une presque aussi oxydante qu'actuellement.

hypothèse interprétative :

cas hypothèse 1 : une telle composition atmosphérique peut s'expliquer par le dégazage d'un manteau oxydant existant dès la formation de la Terre dans le cas d'une accrétion de chondrites carbonées

cas hypothèse 2 : à partir de chondrites à enstatite, il faut attendre l'oxydation progressive du manteau jusqu'à son niveau actuel il y a -3.8 Ga.

argument supplémentaire : le bombardement post-accrétion par les chondrites carbonées contribue lui aussi à apporter à l'atmosphère les volatils oxydés, N₂, CO₂, CO et H₂O. limite majeure : le problème de l'atmosphère primitive à l'Hadéen (-4,56 à -4 Ga) est la quasi-absence d'archives géologiques permettant de savoir clairement ce qu'elle fut. ⇒ **conséquence** : on utilise un recoupement d'autres informations.

C/ une richesse en CO₂ de l'atmosphère primitive hadéenne & importance de l'océan primitif

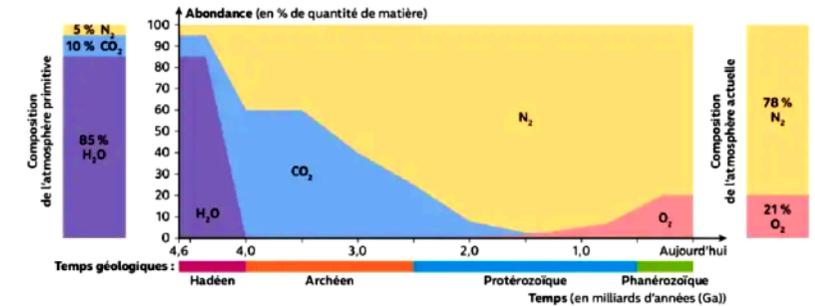
Les zircons (ZrSiO₄) sont des minéraux extrêmement résistants, certains d'Australie sont les plus vieux minéraux datés par radiochronologie : - 4.3 à - 4.4 Ga.

constat : richesse en H₂O => **interprétation** : ils suggèrent, signent, une interaction manteau / eau de mer, donc une eau liquide qui se serait mise en place sur Terre formant un océan primordial dès l'Hadéen... mais peut-être vaporisé plusieurs fois par le bombardement externe encore intense. Cet océan hadéen suppose une température de surface suffisante alors que la luminosité solaire était inférieure à l'actuelle donc un effet de serre naturel atmosphérique suffisant pour permettre son existence.

hypothèse explicative : une atmosphère riche en CO₂ peut exercer un tel effet de serre. Or, la richesse en CO₂ de l'atmosphère primitive dès l'Hadéen est un concept argumenté par le bombardement terrestre par les chondrites carbonées ainsi que par le dégazage intense d'un manteau oxydé ou s'oxydant.

Carbonates et taux de CO₂ atmosphérique : l'existence de l'eau liquide suppose la mise en place d'une sédimentation des carbonates qui ont la vie dure à l'Hadéen. La croûte continentale se forme grâce au magmatisme lié à la subduction de la croûte océanique basaltique. Mais à l'époque, la croûte basaltique subductée était bien plus jeune, elle devait avoir entre 10 à 20 Ma, contre 60 Ma en moyenne actuellement. Les fonds marins ayant une durée de vie courte, les carbonates étaient rapidement subductés, le carbone recyclé dans le manteau et à nouveau dégazé en CO₂. Le contact avec les laves permet aussi une décomposition thermique des carbonates en surface.

Doc.1 Evolution de la composition de l'atmosphère terrestre au cours du temps



Frise présentant l'évolution de la composition de l'atmosphère terrestre depuis ses origines il y a 4,6 milliards d'années (Ga). On trouve également aujourd'hui des traces d'autres gaz (dont H₂O, CO₂, CH₄, N₂O).

Doc.2. L'atmosphère primitive

La Terre s'est formée par accumulation de chondrites (matériaux des astéroïdes). On estime la composition en espèces chimiques de l'atmosphère primitive soit en analysant le dégazage volcanique de la Terre, soit en mesurant les gaz extraits par vaporisation des chondrites en laboratoire.

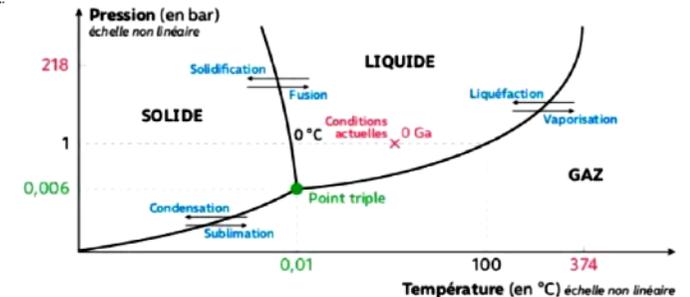
Gaz chondritiques (en %)	
H ₂ O	80 ± 10
CO ₂	20 ± 10
N ₂	1 ± 5
O ₂	0

Gaz volcaniques (en %)	
H ₂ O	83 ± 3
CO ₂	12 ± 4
N ₂	5 ± 3
O ₂	0

D'après Nathan Terminale Enseignement scientifique 2020

Doc.3.a Diagramme d'état de l'eau

Les courbes délimitent trois domaines de pression et de température. Au point triple, les trois états de l'eau coexistent.



Doc.3.b Evolution de la pression et de la température moyenne sur Terre depuis l'Hadéen

Âge terrestre (Ga)	Température de surface (°C)	Pression atmosphérique (bar)	Etat de l'eau
- 4,6	> 1 500	260	Gaz
- 4,4	350	218	
- 4,1	250	< 10	
- 3,3	100	4	
0 (actuel)	15	1	Liquide

hypothèse interprétative : les carbonates qui avaient éventuellement été déposés dans un océan hadéen transitoire auraient pu être décomposés par la température avec la formation d'océans magmatiques locaux lors du bombardement par des météorites de taille kilométrique. Enfin, les carbonates se forment par l'altération et le lessivage de la croûte entraînant dans l'océan des ions Ca^{2+} . La croûte primitive était moins calcique (il existe cependant d'autres carbonates (FeCO_3 , MgCO_3 par exemple), mais surtout, la croûte continentale était encore peu formée, il n'y avait pas grand-chose à altérer et lessiver pour former des carbonates

constat : l'absence d'hydrosphère, donc de formation de carbonates, explique une telle accumulation de CO_2 . Une telle atmosphère aurait pu exister sur la Terre primitive très active, donc dégazant intensément le CO_2 (+ apport externe du bombardement), sans piégeage dans les carbonates.

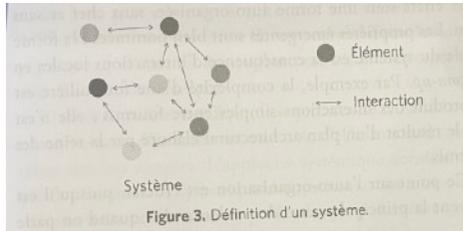
interprétation : l'atmosphère primitive hadéenne aurait pu être dense, avec une pression partielle en CO_2 très élevée (600 bars si tout le carbone des carbonates actuels passait dans l'atmosphère). A l'Hadéen, se met en place une 1ère atmosphère primitive. L'importante activité interne et le bombardement intense génèrent très tôt une atmosphère dense et riche en CO_2 et H_2O . Le refroidissement terrestre conduit à la condensation à l'origine de l'eau liquide (océans primitifs) => \ teneur en vapeur atmosphérique primitive.

L'atmosphère initiale de la Terre était différente de l'atmosphère actuelle. Sa transformation est la conséquence, notamment, du développement de la vie (variation des taux de CO_2 et O_2). L'histoire de cette transformation se trouve inscrite dans les roches, en particulier sédimentaires.

D/ évolution de la composition atmosphérique, apparition de l'hydrosphère et apparition de la vie : relations bactéries initiales, géologie sous-marine et évolution des taux de CO_2 et O_2 atmosphériques

L'atmosphère initiale de la Terre était différente de l'atmosphère actuelle. Sa transformation est la conséquence, notamment, du développement de la vie => transition atmosphère primitive / atmosphère oxydante. Les bulles d'air contenues dans les glaces sont des indices de la composition de l'air passée et de la température des 800 000 dernières années y compris des polluants d'origine humaine. La composition isotopique des glaces et d'autres indices comme la palynologie permettent de retracer les évolutions climatiques de cette période. On ne sait pas exactement dater l'apparition de la vie : les 1ères activités biologiques ont pu apparaître pendant l'Hadéen (avant - 4 Ga) mais le bombardement terrestre encore trop intense ne permet pas de concevoir un océan hadéen stable (contre-argument) et donc de la vie. L'Archéen qui suit (de -4 à -2,5 Ga) est en revanche une période de l'histoire de la planète à marqueurs géologiques bien plus nombreux correspondant à la mise en place d'un océan primitif et d'une activité biologique durable.

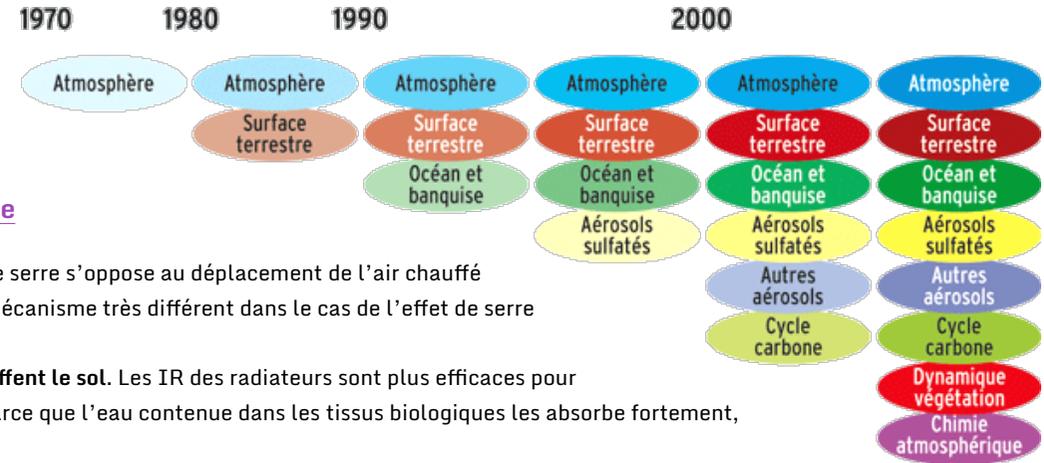
II / LE SYSTEME CLIMATIQUE DU PASSE ET DU PRESENT DEPUIS LA REVOLUTION INDUSTRIELLE : FAITS, INDICES ET PREUVES



A/ Notion de modèle climatique

- **NB** : Limite du modèle dit "de l'effet de serre" : une vraie serre s'oppose au déplacement de l'air chauffé qui, sans la vitre de la serre, s'échapperait vers le haut... mécanisme très différent dans le cas de l'effet de serre atmosphérique.

Toutes les radiations absorbées (UV, visible, IR...) réchauffent le sol. Les IR des radiateurs sont plus efficaces pour réchauffer le corps humain (surtout les peaux blanches) parce que l'eau contenue dans les tissus biologiques les absorbe fortement, alors que les radiations visibles sont moins absorbées



La chaleur d'origine interne n'est pas oubliée dans le bilan radiatif de la Terre mais négligée : 0,06 W.m² en moyenne contre 342 d'origine solaire !

Les températures mesurées sur Terre s'expliquent par :

- l'effet de serre
- l'albédo (% d'une lumière incidente réfléchi par une surface : océan, glace ...)
- les circulations atmosphériques et océaniques
- le cycle de l'eau...
- l'effet des nuages peu aisé à quantifier, puisqu'ils interviennent sur le bilan thermique de la Terre positivement (effet de serre) et négativement (réflexion de radiations solaires incidentes).

Des unités de temps très diverses doivent être prises en compte : l'exemple peut être abordé à travers les effets des éruptions volcaniques. Instantanément, elles exercent un forçage négatif en raison des cendres mais cela dure peu de temps (quelques mois, 2 ans au plus) tandis que le CO₂ qu'elles injectent dans l'atmosphère exerce un forçage positif plus faible mais plus durable (temps de résidence dans l'atmosphère : 15 à 200 ans).

Alertée par la coïncidence de l'augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique depuis 1958 au centre d'enregistrement des données à Mauna Loa; volcan de point chaud éteint (Hawaï) et l'augmentation de la température observée depuis le début du XX^e S, la communauté scientifique a créé en 1988 un groupe de travail, le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat), dont le 1er objectif est d'évaluer le changement climatique : **que deviendra le climat dans les décennies et les siècles à venir, compte tenu de l'évolution démographique et économique susceptible d'entraîner une augmentation accrue des émissions de GES ?**

<https://www.youtube.com/watch?v=3D-RP1EYByE>

Pour y répondre, la **modélisation mathématique** (ou analytique) est indispensable, seul outil capable de considérer les 5 composantes du système climatique et les **mécanismes mis en jeu** dans les variations climatiques

⇒ donc = **programmes informatiques** de reproduction aussi fidèles que possible du climat terrestre actuel, reconstituer celui du passé et prévoir celui du futur : ils sont **reproductifs et prédictifs**.

2015 : environ 20 programmes existent dans le monde. En France, l'un des pôles de modélisation et d'étude du climat est l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace).

Comme tous les modèles, les modèles climatiques sont une **simplification volontaire et reconnue du réel**, ici le système climatique : ils sont **bâti sur des hypothèses concernant l'importance ou non** (au moins momentanée car les modèles évoluent encore) des **causes à impact sur le climat**. 2 modes de raisonnement distincts existent :

l'induction (ou raisonnement inductif)	c'est une opération logique consistant, à partir de faits réels et sensibles, à aboutir à une loi (« Tous les hommes que je connais sont mortels, donc tous les hommes sont mortels ») ; c'est ce type de raisonnement qui permet de construire une théorie climatique (« À chaque fois que la concentration en CO2 atmosphérique augmente, la température augmente, donc l'augmentation de la concentration en CO2 atmosphérique provoque l'augmentation de la température »)
la déduction (ou raisonnement déductif)	c'est une opération logique consistant à appliquer une loi considérée comme exacte à un cas particulier considéré comme entrant dans le cadre de la loi (« Tous les hommes sont mortels ; or Socrate est un homme, donc Socrate est mortel ») ; c'est ce type de raisonnement qui permet, en utilisant la théorie climatique précédemment construite par induction, de reproduire le climat actuel ou les climats passés (« On mesure telle concentration de CO2 atmosphérique, donc la température doit être de tant ») et de prédire

Les théories climatiques étant basées sur un raisonnement inductif, elles ne sont valides que tant que les faits ne les ont pas infirmées. Les prédictions réalisées par les modèles climatiques, qui utilisent ces théories climatiques, ne sont donc valides que tant que ces théories sont valides.

Comment sont construits et validés les modèles climatiques ? Comment fonctionne un modèle numérique du climat ?

Un modèle numérique du climat est un imposant programme informatique qui simule les différentes composantes du système climatique : l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, les glaces (figure 1). On peut citer le modèle de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), qui compte près d'un million de lignes de codes et nécessite le travail d'une centaine de chercheurs et ingénieurs depuis des dizaines d'années. Le programme informatique retranscrit sous forme numérique des milliers d'équations physiques. Par exemple, la composante atmosphérique des modèles de climat résout numériquement les équations de la mécanique des fluides. L'atmosphère terrestre est divisée en des milliers de petits pavés ou « pixels » appelés mailles, d'environ 100 km de côté sur l'horizontale et quelques centaines de mètres sur la verticale. Les processus dont la taille est inférieure à la maille, tels que les nuages, la pluie ou le rayonnement, sont représentés par ce que l'on appelle des paramétrisations physiques. Ces paramétrisations physiques peuvent notamment calculer la proportion de la vapeur d'eau qui se condense pour former des nuages. Dans chacune des millions de mailles de notre atmosphère simulée, on calcule toutes les variables météorologiques, toutes les quelques minutes, comme le font les modèles de prévision météorologique. Mais, tandis que les modèles de prévision météorologique calculent ces variables sur quelques jours à semaines, les modèles de climat les calculent sur des centaines à des milliers d'années ! Par exemple, pour une simulation de 100 ans, avec un pas de temps de 10 minutes, des mailles de 100 km de côté en horizontal et un empilement vertical de 80 mailles, chaque équation est résolue 100 ans x 365 jours/an x 144 pas/jour x 200 mailles en latitude x 400 mailles en longitude x 80 mailles en altitude = 33 000 milliards de fois ! On comprend donc que même si les modèles de climat tournent sur des calculateurs très puissants (figure 2), la puissance de calcul est un facteur limitant. Ainsi, pour simuler 150 ans de climat, le programme tourne en continu sur le supercalculateur pendant plusieurs semaines. La surface, les océans et l'atmosphère terrestres sont découpés en mailles cubiques de quelques centaines de km de côté (de 500 km de côté en 1980 à 100 km de côté en 2007 contre 20 aujourd'hui) formant une grille 3D. Les programmes comportent :

- **des paramètres (ou variables) climatiques concernant chaque maille (ou groupe de mailles), dont on rentre les valeurs actuelles**
- **des équations exprimant les lois régissant le comportement intra-maille**
- **des équations exprimant les lois régissant les relations inter-mailles**

La résolution informatique de l'ensemble des équations permet d'obtenir l'évolution spatiale et temporelle des différents paramètres.

1ers modèles des années 1950 : 1 unique composante, l'atmosphère, avec ses paramètres (composition, température, pression, humidité, précipitations, vent) et ses équations (circulation atmosphérique, pouvoir réchauffant des GES)

depuis : grâce aux satellites et progrès informatiques : de nouvelles composantes ont successivement été introduites.

Aujourd'hui, les programmes considèrent environ 50 paramètres dont 26 depuis l'espace :

- **l'activité solaire et l'activité volcanique**
- **l'atmosphère** (avec en plus, par rapport aux modèles des années 1950, la couverture nuageuse, les aérosols sulfatés et autres aérosols, l'ozone stratosphérique, les réactions chimiques atmosphériques)
- **les océans** (évaporation, circulation océanique horizontale de surface, circulation océanique profonde, niveau des océans par le satellite Jason))
- **les banquises** (formation / fonte des glaces de mer)
- **les sols et la végétation** (évapotranspiration, albédo, dynamique de la végétation)
- **l'hydrologie continentale**
- **le cycle du carbone**, avec biosphère + écosystèmes marins

Comment se valide un modèle ? par une batterie de tests visant à :

- **1/ confronter les résultats du modèle appliqué aux petites échelles temporelles (décennies passées)**, aux observations faites pendant la même période en considérant les sources naturelles et anthropiques de variabilité climatique : on vérifie la reproduction des moyennes des paramètres atmosphériques et océaniques, ainsi que des principales variations connues à différentes échelles temporelles (journalières, saisonnières, interannuelles, épisodes El Nino, moussons), etc
- **2/ confronter les résultats du modèle appliqué à des échelles temporelles plus grandes** comme l'Holocène (6 000 ans) ou le dernier maximum glaciaire (21 000 ans), aux données paléoclimatiques obtenues dans les glaces et les sédiments
- **3/ confronter les résultats des différents programmes entre eux**

Les programmes utilisés par le GIEC étant suffisamment reproductifs donc capables d'être prédictifs, actuellement, un réchauffement assez net de l'HN en été fait plutôt consensus. Depuis la révolution industrielle, les activités anthropiques modifient rapidement et significativement la composition atmosphérique => ceci affecte l'équilibre dynamique des enveloppes fluides de la Terre (atmosphère, hydrosphère). On ne retrouve la tendance actuelle depuis la révolution industrielle qu'en ajoutant le facteur émission de GES augmentée (anthropique)

Les prédictions des modèles climatiques sont-elles fiables ?

Les incertitudes concernant l'ampleur du réchauffement climatique au cours du XXI^e S sont dues :

- **à des différences entre les scénarios d'émission de GES des modèles**
- **aux incertitudes des modèles eux-mêmes**

Celles-ci peuvent être classées en 3 catégories :

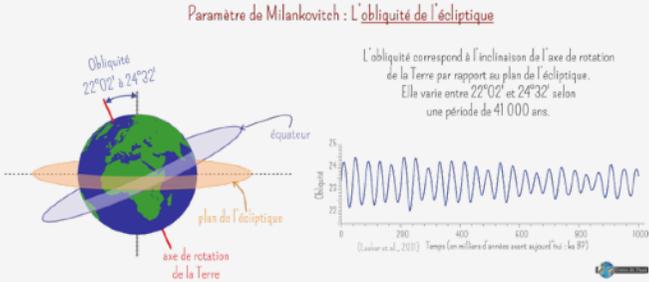
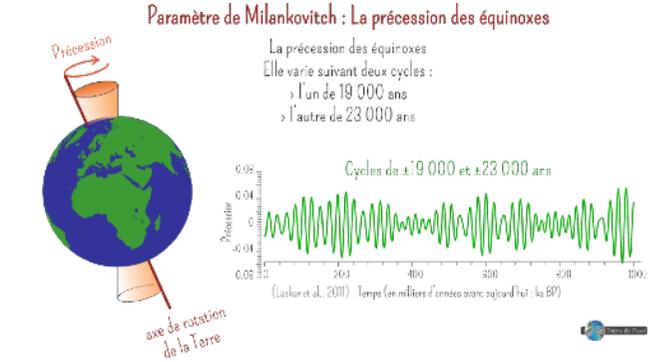
incertitudes sur les paramètres d'entrée des modèles	les sources naturelles de méthane (CH ₄) et de protoxyde d'azote (N ₂ O), GES, ne sont pas quantifiées avec précision mais estimées
	les mesures concernant la circulation océanique profonde sont difficiles
	la différence, due à l'ajout anthropique de gaz à effet de serre, entre l'énergie solaire absorbée par la surface du globe et l'énergie terrestre perdue par rayonnement infrarouges n'est pas mesurée car le système satellital actuel n'est pas encore assez précis, mais seulement estimée (à 1,5 W.m ⁻²)
les incertitudes liées à l'absence ou à la mauvaise représentation de	l'augmentation de l'ozone troposphérique, qui participe à l'effet de serre, n'est pas prise en compte car elle dépend de réactions complexes
	les différents GES ne sont pas toujours pris en compte de manière totalement indépendante (certains modèles font seulement la somme des différents gaz émis, pondérés par leur pouvoir de réchauffement), ce qui empêche de considérer l'effet de la température sur les émissions / éliminations naturelles de chaque gaz, principalement CH ₄

certains phénomènes, négligés ou difficilement modélisables	la modélisation de la couverture nuageuse est imprécise car les nuages sont plus petits que le maillage utilisé par les modèles
	les modifications de la végétation dépendent des conditions locales, qui varient de manière plus incertaine, donc plus difficilement modélisable, que les conditions globales
	l'évaporation continentale fait intervenir des processus de petite échelle qu'il est difficile de modéliser
le caractère partiellement chaotique du climat, qui se traduit par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques proches calcule deux évolutions climatiques notablement différentes	

B/ Cycles de Milankovitch (découverte années 20s) : alternance des périodes glaciaires / interglaciaires

Il énonce 3 paramètres orbitaux ayant une influence sur le climat de la Terre

Paramètre	Périodicité	Explication	Schéma
L'excentricité	100000 et 410000 ans	<p>La Terre fait un tour complet de notre Soleil en un peu plus de 365 jours (365 jours 6 heures et un peu plus de 14 minutes d'après l'Agence spatiale canadienne si vous voulez tout savoir). Si Kepler avait déjà émis l'hypothèse que les planètes orbitaient autour du Soleil suivant une ellipse, Milankovitch, pour sa part, y intègre une nuance : l'excentricité.</p> <p>« L'excentricité mesure le degré d'aplatissement de l'orbite terrestre autour du Soleil. Elle n'est pas stable au cours du temps mais passe d'une valeur nulle (orbite circulaire) à une valeur maximale d'environ 0,07 (ellipse légèrement aplatie) selon deux périodes d'environ 100 000 et 410 000 ans (Brahic et al., 2006). »</p> <p>Lorsque l'ellipse prend la forme d'un cercle parfait, les contrastes saisonniers sont fortement réduits.</p>	<p>Paramètre de Milankovitch : L'excentricité</p> <p>L'excentricité correspond au degré d'aplatissement de l'orbite terrestre autour du Soleil. Elle varie suivant deux cycles : > l'un de 100 000 ans > l'autre de 410 000 ans</p>

Paramètre	Périodicité	Explication	Schéma
L'obliquité de l'écliptique	41000 ans	<p>La Terre tourne sur elle-même en plus de tourner autour du Soleil. Cette rotation sur elle-même s'effectue en un peu plus de 23 heures et 56 minutes, ce qui correspond à la durée d'une journée. Elle a donc un axe de rotation autour duquel elle tourne mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, cet axe n'est pas vertical mais incliné : c'est ce qu'on appelle l'obliquité de l'écliptique.</p> <p>« L'inclinaison de l'axe de rotation par rapport à la normale au plan de l'écliptique, appelée obliquité de l'écliptique, varie entre 22°02' et 24°32' selon une période de 41 000 ans (Brahic et al., 2006). »</p> <p>Actuellement, l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est de 23,45°. Cette inclinaison a des conséquences importantes sur le climat : plus l'inclinaison est forte, plus la quantité d'énergie solaire incidente varie latitudinalement, et donc plus les contrastes sont marqués entre les hautes et les basses latitudes. Ainsi, actuellement, la quantité d'énergie solaire incidente la plus forte arrive au niveau des tropiques.</p>	<p>Paramètre de Milankovitch : L'obliquité de l'écliptique</p>  <p>L'obliquité correspond à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique. Elle varie entre 22°02' et 24°32' selon une période de 41 000 ans.</p>
Précession des équinoxes	19000 et 23000 ans	<p>Ce paramètre joue sur l'intensité du contraste saisonnier : la précession des équinoxes. Si l'on regarde l'axe de rotation de la Terre au cours du temps, il ne reste pas parallèle à lui-même mais tourne sur lui-même dans le sens horaire en formant un cône, un peu comme une toupie lorsqu'elle commence à perdre l'équilibre. Mais bien entendu, le mécanisme en jeu est bien différent. Notre Terre n'est pas sur le point de "perdre l'équilibre" avant d'arrêter de tourner et de choir sur un flanc. En fait, la force responsable de ce mouvement particulier est l'attraction gravitationnelle qu'exercent la Lune et le Soleil sur la Terre... et le fait que notre planète bleue ne soit pas parfaitement ronde mais légèrement ellipsoïde (et même patatoïde si on regarde quelques paramètres supplémentaires) : la force centrifuge induit une accumulation de masse au niveau de l'équateur qui forme donc un léger « bourrelet » à cet endroit. À l'inverse, au niveau des pôles, la Terre est légèrement aplatie. C'est sur ce bourrelet que l'attraction de la Lune et du Soleil jouent. Ce paramètre est en partie une résultante du déplacement de l'axe de rotation de la Terre au cours du temps. En effet, comme l'axe de rotation bouge (on l'a vu avec l'obliquité), la position de la Terre au moment des solstices et des équinoxes change aussi. Cette variation minime à l'échelle humaine induit pourtant un décalage des équinoxes d'environ 26 minutes chaque année : l'équinoxe de l'an prochain se produira environ 26 minutes plus tôt que l'équinoxe de cette année ! Et cette phrase est <u>toujours vraie</u>, que ce soit pour les solstices ou les équinoxes. Enfin, sauf le jour où la galaxie d'Andromède sera suffisamment proche pour provoquer des perturbations majeures, mais a priori, il nous reste près de 4 milliards d'années avant que cela ne se produise. Sachant que la Terre a tout juste un peu plus de 4,56 milliards d'années, on a le temps de voir venir ! L'axe de rotation forme donc un cône suivant «<i>é</i> périodes : l'une de 19 000 ans et l'autre de 23 000 ans, soit une période moyenne de 21 500 ans. Cette variation est d'importance pour expliquer l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires. Enfin, il ne manque d'être intéressant de remarquer que les variations de la précession sont modulées en amplitude par les variations d'excentricité de l'orbite terrestre, comme vous pouvez le constater sur la figure.</p>	<p>Paramètre de Milankovitch : La précession des équinoxes</p>  <p>La précession des équinoxes Elle varie suivant deux cycles : > l'un de 19 000 ans > l'autre de 23 000 ans</p> <p>Cycles de ±19 000 et ±23 000 ans</p> <p>La Terre est légèrement déformée aux pôles et dilatée à l'équateur en raison de la force centrifuge (ellipsoïde)</p>

constat : alternance sur 100 000 ans environ de glaciations / interglaciations depuis 550 Ma

définition : période glaciaire : période où **inlandsis** (= calottes polaires continentales) d'environ 90 000 ans

attention : en période glaciaire, des variations sont possibles définissant des périodes plus froides et d'autres plus chaudes

période interglaciaire : absence d'inlandsis, sur environ 10 000 ans

<https://www.youtube.com/watch?v=MXcY8Cf6hsI>

C/ Facteurs de régulation climatique et indices paléoclimatiques

hypothèse admise de travail : les facteurs de régulation des climats passés sont les mêmes que ceux de l'actuel. La modulation de l'évolution des climats dépend de leur intensité : c'est le principe d'uniformitarisme aussi appelé d'actualisme.

NB : L'adage « le présent est la clé du passé » résume la méthode qui en découle. Ce principe s'oppose au catastrophisme selon lequel les caractéristiques de la surface terrestre sont apparues soudainement dans le passé à partir de processus radicalement différents de ceux existant aujourd'hui. Pendant le XXVIII^e et XIX^e S, une vive controverse existe entre les tenants de ces 2 théories ; en effet, l'uniformitarisme est incompatible avec les événements tels que décrits par la Bible. L'uniformitarisme a évolué depuis sa création. Avant que la tectonique des plaques ne soit acceptée, les géologues pensaient que la surface de la Terre était restée globalement inchangée depuis sa création, son refroidissement depuis un état en fusion ayant provoqué des plissements formant les montagnes.

Dans les dernières décennies du XX^e siècle, l'uniformitarisme a été modifié pour tenir compte de certains événements catastrophiques dans le passé de la terre, tel que l'impact de météorites ou période de volcanisme intense. Il est plutôt énoncé maintenant comme : « les forces géologiques sont la plupart du temps lentes et restent identiques à travers le temps ».

D'abord été formulé par James Hutton, puis répandu par John Playfair et Charles Lyell.

exemples d'application : les coraux ne peuvent pas vivre à plus de -20 à -10 m de profondeur, sans quoi la lumière leur manque : les coraux fossilisés nous permettent donc de reconstituer le niveau de la mer à l'époque (eustatisme).

Ce principe est donc l'**outil conceptuel** qui permet de formuler des hypothèses sur des époques dont nous n'avons que des traces.

1/ variations de l'insolation nette reçue

insolation brute incidente vers la Terre : d'abord filtrées par la couche d'ozone atmosphérique entre autres (UV retenus), les radiations lumineuses sont absorbées, avec perte par convection (mouvement de l'air) et évaporation, rémission d'IR vers le sol avec absorption par les GES après réflexion (vapeur d'eau surtout, CO₂, CH₄ ...), **réflexion de surface (albédo : % de l'énergie reçue au sol réfléchi vers l'espace : élevé au niveau des surfaces neigeuses, faible au niveau des eaux océaniques)**

toute ↗ surface des inlandis ⇒ ↗ énergie réfléchi (albédo) ⇒ ↘ quantité d'énergie solaire absorbée au sol ⇒ accentuation du refroidissement général et inversement

2/ causes des changements climatiques

- Δ énergie solaire reçue et absorbée par le sol liées à l'activité solaire elle-même ou à des changements des paramètres orbitaux (excentricité de l'orbite, inclinaison de l'axe de rotation (obliquité) de la Terre, précession des équinoxes,) ⇒ voir annexe + http://svt.ac-rouen.fr/tice/animations/fusin/parametres_astronomiques_variations_insolation.swf

Ces 3 paramètres astronomiques ne justifient pas seuls les variations climatiques du Quaternaire.

III / LE CLIMAT DU FUTUR

A/ Effet de serre et prédictions d'évolution du climat par les modèles

<http://www.ipsl.fr/fr/Mediatheque/Multimedia/Animation-sur-la-modelisation-climatique>.

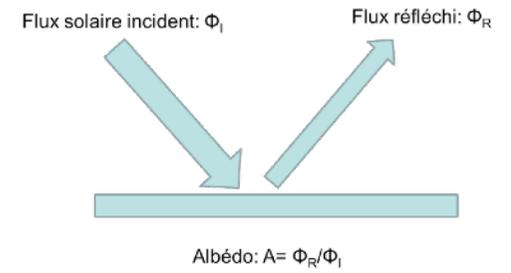
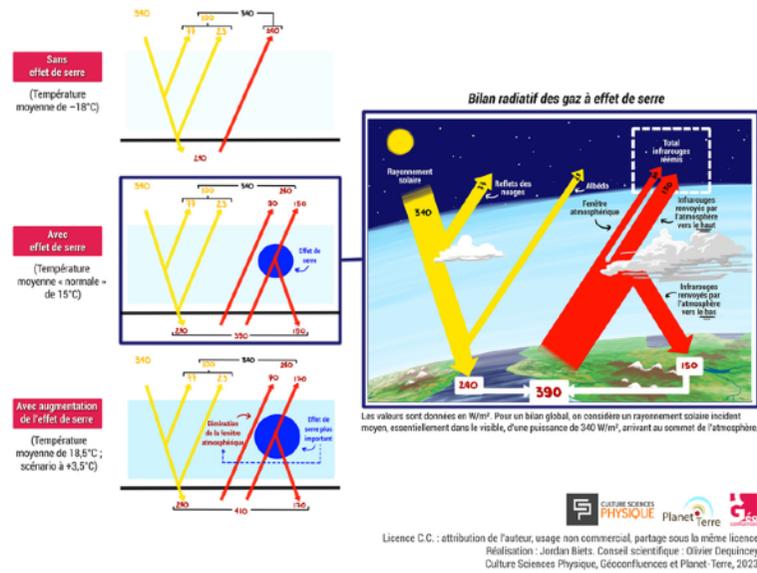
$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échant}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{st}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{st}}} \times 1000$$

Le standard utilisé pour l'étude des carbonates est un rostre de bélemnites de la formation Pee Dee (États-Unis), d'où le terme de PDB signifiant Pee dee belemnite. Pour l'étude des glaces, le standard utilisé est le SMOW (Standard Mean Ocean Water). En paléoclimatologie, l'utilisation du rapport se fonde sur le fait que le test carbonate des organismes vivants de l'océan présente un rapport isotopique différent de l'eau de mer en raison d'un fractionnement biologique qui dépend de la température selon la relation suivante :

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = 16,9 - 4,2 (\delta_c - \delta_w) + 0,13 (\delta_c - \delta_w)^2$$

$\delta_c = \delta^{18}\text{O}$ du CO₂ libéré par réaction du carbonate avec de l'acide orthophosphorique à 25 °C,

$\delta_w = \delta^{18}\text{O}$ du CO₂ en équilibre à 25 °C avec l'eau dans laquelle le carbonate a précipité.



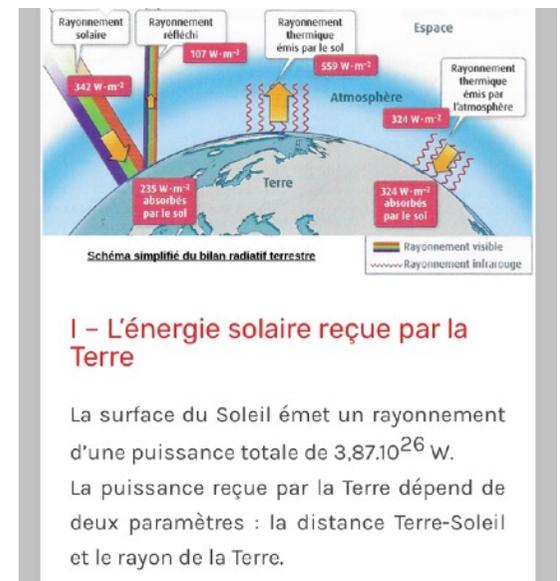
<http://www.cea.fr/content/download/3730/298374/file/atmosphere.swf>

https://www.youtube.com/watch?v=41dI3CmXehQ&list=PL_1WVGjLTYqILN0WKTUyXWkFBYzQkIe&index=5 : évolution contemporaine et prévisions des variations climatiques futures

Histoire des Sciences : 1827 : Fourier suggère l'existence de l'effet de serre

1860 : Tyndall identifie le CO₂ et la vapeur d'H₂O comme GES

1896 : Arrhenius calcule le réchauffement planétaire pour taux de CO₂ atm x 2 : + 5,49°C constat : **Quand on ajoute aux modèles climatiques une équation représentant l'évolution des émissions anthropiques des GES, même s'ils sont construits différemment, même si les valeurs obtenues varient, ils aboutissent tous depuis 1950 au même résultat : un réchauffement global de la planète, d'autant plus important que ces émissions seraient importantes.**



I – L'énergie solaire reçue par la Terre

La surface du Soleil émet un rayonnement d'une puissance totale de $3,87 \cdot 10^{26}$ W.
La puissance reçue par la Terre dépend de deux paramètres : la distance Terre-Soleil et le rayon de la Terre.

Les modèles climatiques actuellement utilisés par le GIEC ont donc certes été validés, mais tous leurs résultats concernant le climat actuel ou les climats passés ne sont pas corrects (le pourcentage de résultats corrects est important mais il n'est pas de 100 %) et surtout le taux de validité d'un modèle sur ses prédictions climatiques n'est pas forcément identique au taux d'exactitude des résultats de ce modèle reproduisant le climat actuel ou des climats passés : par exemple, si un modèle climatique reproduit parfaitement 95 % des données du climat actuel, cela ne veut pas dire que 95 % de ses prédictions sont exactes. **L'effet de serre, déterminé notamment par la composition atmosphérique en GES (2nde : Thème 1), est un facteur influençant le climat parmi d'autres. La modélisation de la relation effet de serre / climat est complexe et permet de proposer des hypothèses d'évolutions possibles du climat de la planète notamment en fonction des émissions de GES anthropiques. L'influence des paramètres astronomiques intervient aussi (non exigible au BAC, voir tableau correspondant)**

B/ Preuves d'un réchauffement climatique

- recul des glaciers de montagnes
- recul de la surface de la banquise (glace de mer) arctique (> 10⁶ km² entre Septembre 2005 et 2007)
- baisse de l'épaisseur de cette même banquise au Pôle Nord de 2,13 m (de 4,88 à 2,75) entre 1980 et 2000 (moins marquée en Antarctique)
- hausse du niveau des mers : +11 cm depuis 1900

C/ Causes d'un réchauffement climatique

1/ accroissement récent du taux de CO₂ atmosphérique

- **2013** : franchissement symbolique des **400 ppm de CO₂ atm (421 ppm en 2024 (+ 51 % depuis 1700))**
- **du début de l'ère industrielle à 2010** : de 280 à 390 ppm (environ + 40% !) avec une augmentation de l'accroissement de ce taux de décennie en décennie : années 70 : + 1,3 ppm.an-1 en moyenne / années 80 : + 1,6 / années 90 : + 1,5 / + 1,9 ppm.an-1 pour les années 2000 / + 2,4 en 2010 ! : ce taux de CO₂ est le plus élevé depuis 700 000 ans et **la rapidité de son accroissement est bien supérieure à celui du passage d'une période glaciaire à interglaciaire**
- **c'est surtout après 1945 que le taux s'accroît vraiment**

2/ des variations d'origine anthropique

2 phénomènes principaux interviennent : combustion des énergies fossiles et déforestation

constat : la quantité de CO₂ rejetée due aux activités humaines est bien supérieure à celle nécessaire pour rendre compte de l'augmentation constatée (**45% seulement dans l'atmosphère**)

interprétation : 55% a été captée car il existe des puits comme les eaux océaniques, la biosphère (sol et végétation) continentale

constat récent : l'efficacité de ces puits diminuerait

3/ une augmentation globale de l'effet de serre

émissions croissantes de CH₄ par exemple

il y a - 700 000 ans, la transition avec une hausse du taux de CO₂ a entraîné un réchauffement climatique donc son évolution récente plus rapide pourrait contribuer plus fortement encore au réchauffement climatique récent

4 / à court et plus long terme

GES ≠ seule cause des Δ climatiques récents : depuis 1000 ans, les données glaciaires indiquent une teneur en CO₂ constante mais d'autres données témoignent de variations climatiques marquées : réchauffement médiéval vers l'an mil, « petit âge glaciaire » entre 1350 et 1850 (voir peintures d'époque)

autres facteurs : variations de l'activité solaire ⇒ voir annexe

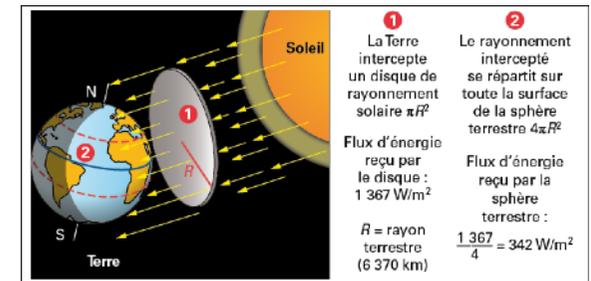
http://svt.ac-rouen.fr/tice/animations/fusin/parametres_astronomiques_variations_insolation.swf (vu dans le II / C/)

La part de chaque facteur est encore discutée mais celle de la teneur en CO2 semble importante : la solubilité du CO2 dans l'eau diminue avec la température croissante donc le réchauffement accentue le réchauffement (boucle de rétroaction positive) : moins de CO2 dans l'eau, c'est plus dans l'air et donc un effet de serre qui s'élève et donc un réchauffement accentué qui entretient un faible volume de glace donc un faible albédo qui entretient un échauffement qui s'accroît

variations du niveau marin depuis 700 000 ans : l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires explique les variations du niveau des mers

- piégeage de l'eau sous forme de glaces ⇒ ↘ niveau marin ⇒ régression marine sur les continents (120 m environ)
- déglaciation liée au réchauffement climatique constaté a des effets inverses : ↗ niveau des mers + transgression marine sur les continents

Une rétroaction est une réponse du système climatique à une perturbation qui lui est appliquée naturellement ou anthropiquement.



phénomène	échelle de temps	effet	part dans le total de l'élévation du niveau marin
dilatation thermique de l'eau du fait d'une température supérieure de 10°C à l'actuel (période interglaciaire)	court terme (quelques milliers d'années)	le volume des eaux augmente avec la température + 10°C => + 10m	insuffisant pour expliquer le + 200-300m constaté par rapport à l'actuel (4%)
fonte des glaces continentales		l'absence de calotte au Crétacé peut laisser à penser que la fonte totale des glaces à cette époque est responsable de l'élévation d'environ + 80 m	insuffisante, même additionnée aux effets de la dilatation thermique (1/3 = 32%)
l'augmentation de l'activité des dorsales	long terme (quelques dizaines de millions d'années)	activité de grande importance sur la morphologie et la profondeur des bassins océaniques : de cette activité dépend le volume occupé par les produits nés de la dorsale : la surface des fonds reste constante par suite de la subduction qui compense l'extension, le volume disponible pour les eaux marines diminue et elles débordent sur les continents (transgression) Les datations de la croûte océanique montrent que le volume né au Crétacé est particulièrement important et témoigne d'une activité intense des dorsales	le reste (64%)

L'humain, en modifiant le climat par ses activités, intervient sur les facteurs liés à l'élévation de la température : dilatation thermique et fonte des glaces => il participe donc à l'élévation du niveau des mers qui est donc facteur anthropique

Le cycle du carbone par ses effets sur la teneur en CO2 atmosphérique conditionne en grande partie le climat terrestre.

- à court terme : sa perturbation anthropique est impliquée dans les changements climatiques (échelle des milliers d'années)
- à long terme : idem (échelle des Ma)

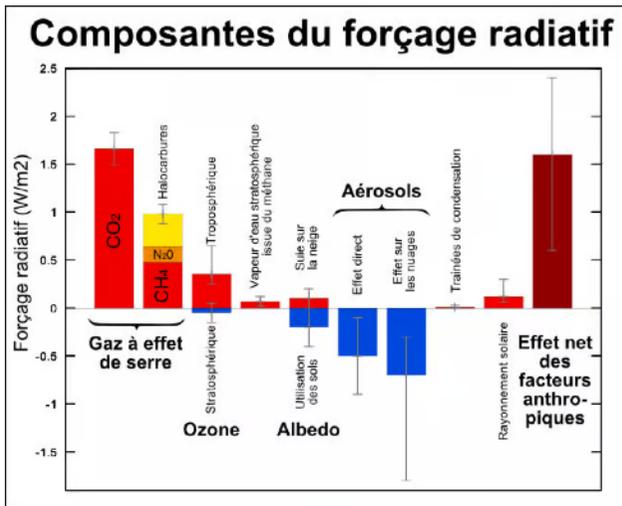
D/ Perspectives futures ? : hypothèses plausibles

échelle de temps	estimation	quoi ?
à court terme	dizaines d'années	elles dépendent en partie dans le futur proche de la maîtrise des rejets de GES Depuis 10 ⁶ ans, la température moyenne à l'année sur Terre oscille entre 10 et 16°C : actuellement entre 14 et 15°C. Si les rejets de CO2 se poursuivent à ce rythme effréné, on pourrait atteindre + 5°C dans 100 ans soit + 20% en moyenne
à moyen terme	centaines d'années (300 ans)	les réserves d'énergies fossiles seront épuisées et l'augmentation de la teneur en CO2 cessera => le taux de CO2 redescendra comme la température.

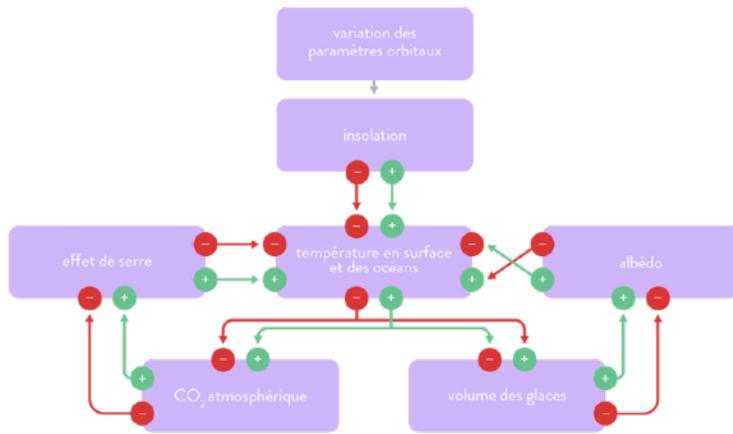
solution envisagée pour limiter le relargage de CO2 dans l'atmosphère : stockage du carbone par carbonatation dans le sous-sol (voir dans les Pyrénées par exemple à Lacq)

Le forçage radiatif d'un facteur climatique X en W.m-2 = ΔP = différence de bilan radiatif = différence de puissance = P émise - P reçue. Ce terme prend une importance capitale dans les questions liées aux changements climatiques, particulièrement à la suite des travaux du GIEC. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer le système (plus d'énergie reçue qu'émise), alors qu'un forçage radiatif négatif va dans le sens d'un refroidissement (plus d'énergie perdue que reçue).

L'océan, tampon thermique puits de carbone a un effet qui diminue car l'océan se réchauffe et donc la solubilité pour le CO2 diminue, il passe donc moins de l'atmosphère à l'hydrosphère. Il rend les variations climatiques irréversibles sur des siècles. En revanche, les végétaux chlorophylliens jouent à court terme une rétroaction négative (notamment les océaniques) : c'est le puits de CO2 stabilisateur temporaire. L'océan absorbe une fraction importante de la puissance radiative solaire liée à un apport supplémentaire d'énergie. Ceci dilate l'eau dont le niveau s'élève (voir plus haut)



Bilan des rétroactions climatiques



© SCHOOLMOUV

BILAN

Le climat est défini par les caractéristiques habituelles de la succession dans le temps des états de l'atmosphère et hydrosphère sur un lieu et plus de 30 ans.

Il faut donc :

- 1/ trouver des archives pour chaque période envisageable
- 2/ puis un modèle qui rende compte de la régularité du climat
- 3/ enfin, faire jouer le modèle pour réaliser des prévisions dans le futur et anticiper des actions correctrices régulatrices des effets anthropiques (atténuation / adaptations)

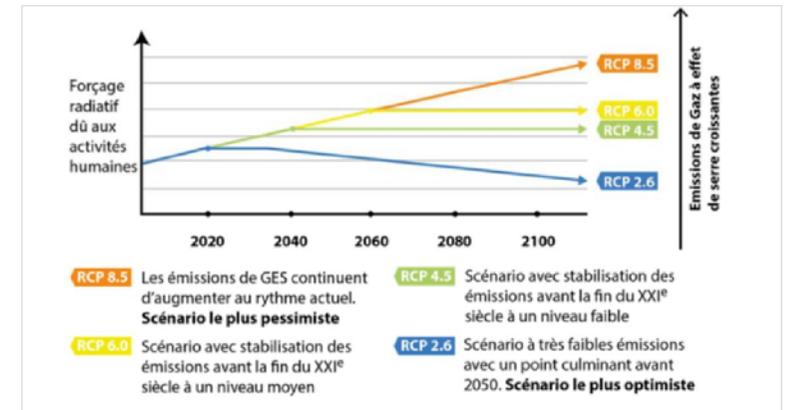
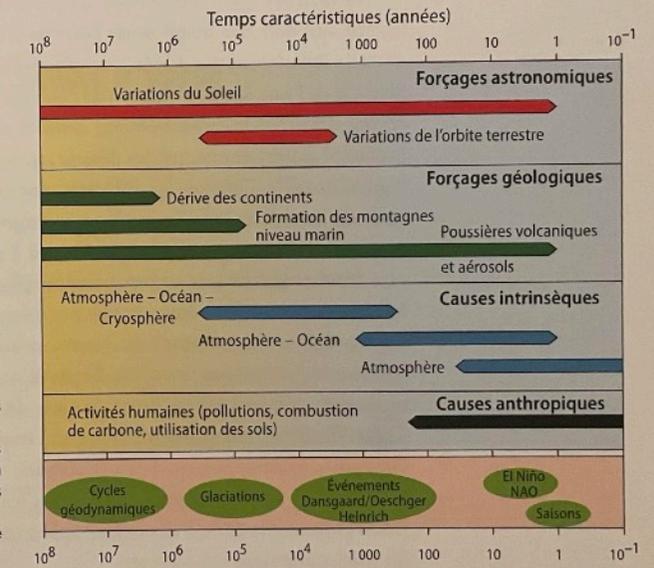
Point GIEC (Groupe d'Experts Inter-Gouvernementaux sur le Climat) : créé en 1988 par 2 institutions des Nations Unies, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Depuis > 30 ans, le GIEC, groupe d'expertise scientifique est conduite par 3 (+ 1 groupe de travail d'équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (GES)).

- le groupe de travail 1 évalue les aspects scientifiques (le système climatique et son évolution)
- le groupe de travail 2 s'occupe des questions concernant la vulnérabilité des systèmes socio-économico-naturels aux changements climatiques, l'évaluation des impacts des changements (conséquences négatives et positives) et les possibilités d'adaptation
- le groupe de travail 3 évalue les solutions d'adaptation envisageables pour limiter les émissions de GES ou atténuer ces changements
- l'équipe spéciale pour les inventaires nationaux de GES développe et améliore un guide méthodologique pour le suivi des émissions de GES. L'usage d'une telle référence commune est essentiel pour les travaux de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

Les modèles climatiques s'appuient sur la mise en équations des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre des méthodes numériques de résolution. Les résultats des modèles sont évalués par comparaison aux observations in situ et spatiales ainsi qu'à la connaissance des paléoclimats. Ces modèles, nombreux et indépendants, réalisent des projections climatiques. Après avoir anticipé les évolutions des dernières décennies, ils estiment les variations climatiques globales et locales à venir sur des décennies ou des siècles. L'analyse scientifique combinant observations, éléments théoriques et modélisations numériques permet aujourd'hui de conclure que l'augmentation de température moyenne depuis le début de l'ère industrielle est liée à l'activité humaine. Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES :

Notre prochain objectif sera de voir le devenir du flux de l'énergie solaire, source principale d'énergie à la surface de la Terre. Nous regarderons comment ce flux peut être modifié depuis sa source jusqu'à son arrivée à la surface de la planète. Puis, nous compléterons cette approche par les mécanismes impliqués dans la répartition de l'énergie à la surface. Les étapes successives sont schématisées Fig. 12.2.

Figure 12.1. Les différentes causes des changements climatiques sont rassemblées ici en quatre classes. Forçages astronomiques et géologiques ainsi que causes anthropiques sont des forçages « externes », parce que, à la différence des causes intrinsèques (forçages internes), ils ne dépendent pas du fonctionnement du climat. (Source: Bard, 2006. Reproduit avec l'autorisation de E. Bard.)



- une augmentation de 1,5 à 5° C de la température moyenne entre 2017 et la fin du XXIe Siècle
- une élévation du niveau moyen des océans entre le début du XXIe siècle et 2100 pouvant atteindre le m
- des modifications des régimes de pluie et des événements climatiques extrêmes.

Le modèle explicatif le plus courant, du au travail de Adhémar (1842) puis Berger (vers 1980) fait reposer les principales variations sur les cycles astronomiques calculés à partir des 3 paramètres classiques (cycles de Milankovitch, années 1920s) :

- 1/ excentricité de l'orbite terrestre mesurant son caractère plus ou moins elliptique
- 2/ obliquité de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'écliptique (ce sont les variations de l'inclinaison)
- 3/ précession, déplacement de la position des équinoxes le long de l'orbite terrestre.

Les modèles mathématiques obtenus rendent très bien compte des variations de l'ensoleillement et donc de la température de l'atmosphère pour ces derniers 700 000 ans. Les variations fines et locales sont ensuite expliquées à partir de **2 paramètres secondaires** :

- 1/ l'**albédo** (rayonnement infrarouge réémis par la terre et exprimé en % du rayonnement solaire incident)
- 2/ la **teneur en CO₂ atmosphérique qui impacte température de l'océan et la solubilité de l'océan au CO₂**: une augmentation de l'albédo est corrélée à augmentation de la surface des inlandsis (glaces et calottes continentales) et à une diminution de la végétation qui favorise une baisse de température. Le CO₂ produit par les organismes continentaux et marins et piégé dans les sédiments est responsable de l'effet de serre. Les variations de ces paramètres continentaux et océaniques amplifient les effets astronomiques mais avec un décalage dans le temps qui est surtout net pour l'albédo au sujet duquel on parle d'hystérésis. Quand le taux de CO₂ atmosphérique augmente, la température moyenne atmosphérique donc océanique aussi, ce qui abaisse la solubilité en CO₂ atmosphérique de ce dernier : l'effet réservoir à C de l'océan diminue depuis 15 ans.

L'atmosphère primitive de la Terre est différente de celle de 2024 : son évolution en 4,56 Ga est fonction de processus biogéologiques : depuis la révolution industrielle, l'activité humaine modifie significativement en sus des variations naturelles et rapidement la composition atmosphérique, notamment en aérosols et GES, ce qui affecte l'équilibre dynamique des enveloppes fluides de la Terre (atmosphère et hydrosphère).

Conséquences : observées déjà et à venir, multiples, importantes pour l'humanité et les écosystèmes => des choix raisonnés des individus et des sociétés s'appuient sur des apports scientifiques et techniques à la compréhension des climats passés, présents pour impacter positivement ceux du futur.