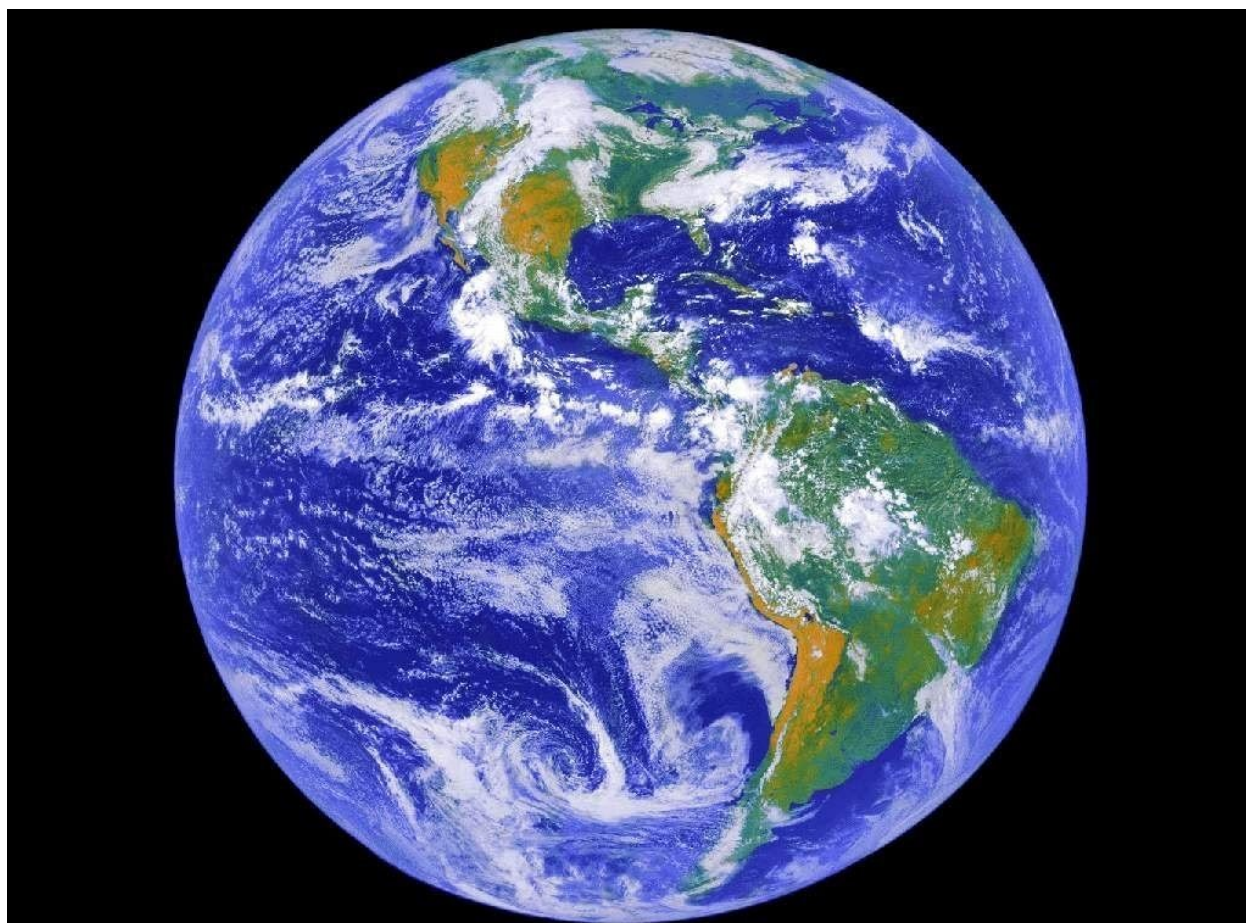


Les modèles de réchauffement climatique



| | |
|--|-----------|
| Introduction | 4 |
| Partie I : les phénomènes physiques dans le climat | 5 |
| A. Les causes de variations climatiques constantes de la terre | 6 |
| a. L'intensité de l'activité solaire | 6 |
| b. Un échange continu de rayons | 7 |
| i. L'effet de serre naturel | 7 |
| ii. L'effet albédo | 8 |
| iii. Le bilan radiatif de la Terre | 9 |
| c. La circulation océanique | 10 |
| i. La circulation rapide | 10 |
| ii. La circulation lente, ou circulation thermohaline | 10 |
| iii. La circulation océanique, un régulateur du climat | 11 |
| d. Circulation de l'air dans l'atmosphère | 11 |
| B. Les causes des variations climatiques ponctuelles de la Terre | 13 |
| a. Cycles et caractéristiques astronomiques de la Terre | 13 |
| i. Caractéristiques astronomiques | 13 |
| ii. Cycles astronomiques | 15 |
| b. Les éruptions volcaniques | 18 |
| c. Les chutes de météorites | 19 |
| Partie II- Les différents modèles de réchauffement climatique | 20 |
| A. Les modèles de réchauffement climatique | 20 |
| a. Les phénomènes physiques dans les modèles climatiques | 20 |
| b. Des modèles à plusieurs échelles | 23 |
| B. Evolution des modèles | 26 |
| C. Les conclusions des modèles | 29 |
| a. Quelles sont les limites des conclusions des modèles? | 29 |
| b. La fiabilité des modèles | 34 |
| Partie III : Nos modèles | 38 |
| A. Modélisation de la variation de la quantité de CO ₂ dans l'air | 38 |
| a. Variation de la population et de la respiration | 40 |
| b. Variation du nombre de véhicules en circulation. | 40 |
| c. Variation de l'industrie et de l'agriculture | 41 |
| d. Variation de la surface des forêts dans le monde | 42 |
| e. Elimination du CO ₂ dans l'atmosphère | 43 |
| f. Condensation de ces valeurs | 43 |
| B. Expression de la température | 46 |
| a. Température du gaz sans influences extérieures | 46 |
| b. Température du gaz due aux rayonnements solaires | 47 |
| Conclusion | 48 |
| Remerciements | 49 |

| | |
|----------------------|-----------|
| Sources | 50 |
| Sources partie I : | 50 |
| Sources partie II : | 50 |
| Sources partie III : | 51 |

Introduction

Actuellement en deuxième année du cycle préparatoire intégré à l'école d'ingénieurs de Polytech Clermont-Ferrand, nous avons décidé de parfaire nos connaissances sur les modèles de réchauffement climatique. En effet, nous entendons de plus en plus parler des problèmes écologiques liés au réchauffement climatique. Ces nombreuses polémiques entraînent la population à prendre différentes positions politiques vis-à-vis de ce changement. Nous avons constaté que certaines personnes ont une tendance à développer une certaine forme de paranoïa tandis que d'autres, au contraire nient l'existence même de ce bouleversement. Ces deux catégories d'individus n'hésitent parfois pas à divulguer de fausses informations sur le sujet dans le but d'appuyer leurs théories. Ainsi, nous avons choisi de nous informer pour nous faire un avis scientifique sur le sujet en démêlant le vrai du faux.

Dans un premier temps, nos recherches se sont portées sur la manière dont la communauté scientifique peut nous donner une idée du climat terrestre à venir. C'est alors que nous avons vu apparaître la notion de modèles climatiques. Nous avons donc décidé d'étudier ces modèles pour en comprendre le fonctionnement et ainsi nous faire une opinion sur la fiabilité de leurs conclusions. Rapidement, nous nous sommes rendu compte de la complexité de ces modèles. En effet, il en existe plusieurs qui ont tous des buts bien précis et qui ne prennent pas en compte les mêmes phénomènes physiques. Il a donc été primordial pour nous de développer nos connaissances sur les différents phénomènes physiques qui régissent les lois du climat pour comprendre les modèles.

Dans un second temps, après avoir compris les différents modèles et leurs conclusions, nous nous sommes fixés l'objectif de créer un modèle à notre portée. Grâce à cela, nous avons pu comprendre les difficultés rencontrées par les scientifiques pour étudier cette variation du climat le plus fidèlement et le plus justement.

Les modèles climatiques peuvent-ils vraiment nous permettre d'évaluer le réchauffement du climat terrestre ?

Pour commencer, nous allons retracer et expliquer l'impact des différents phénomènes physiques qui interviennent dans la variation de notre climat. Puis nous allons définir ce qu'est un modèle climatique et en expliquer le fonctionnement, ainsi que leurs évolutions au cours du temps. Suite à cela, nous allons discuter de leurs conclusions et de leurs fiabilités. Enfin, pour finir, grâce aux explications que l'on aura fourni précédemment, nous pourrons expliquer comment nous avons développé et peaufiné notre propre modèle climatique.

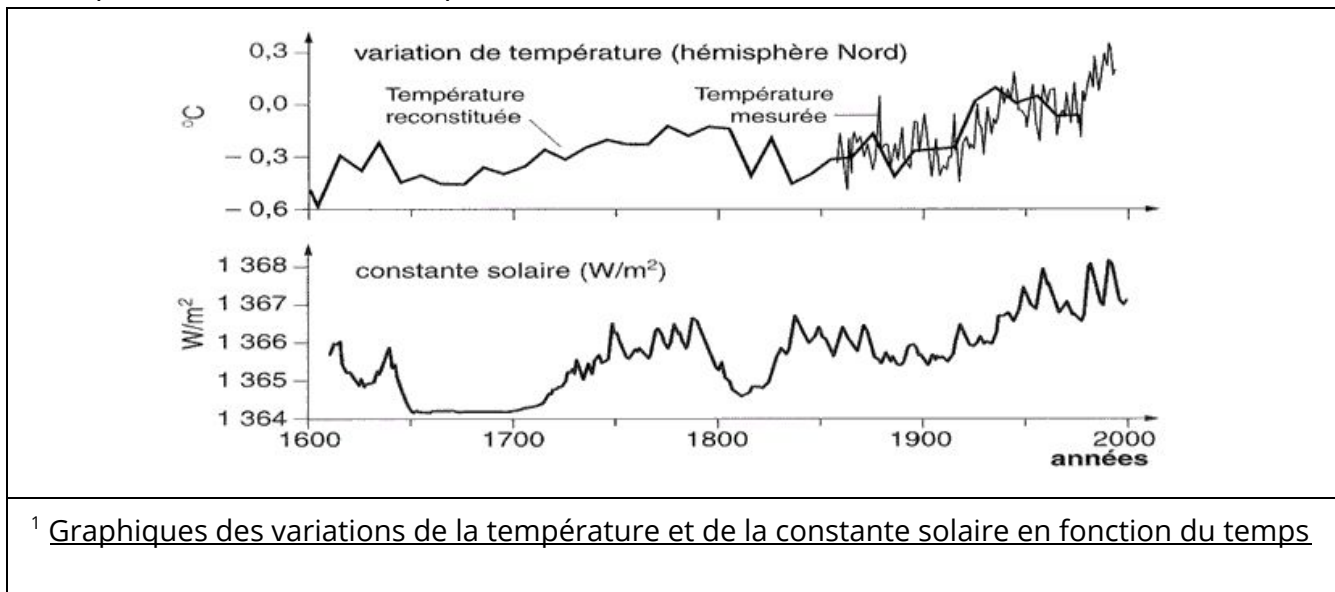
Partie I : les phénomènes physiques dans le climat

Les débats sont nombreux autour des phénomènes physiques qui jouent un rôle dans le changement climatique. Un bon nombre d’entre eux provoquent des variations de notre climat. Parmi ces phénomènes, nous pouvons distinguer ceux qui agissent de manière continue et ceux qui ont un effet ponctuel sur les températures. Le climat évolue sans cesse puisqu’il est le résultat de ces différentes variations en intensité au cours du temps. Depuis les années 1830, nous constatons un réchauffement de la température. De plus, 97% des scientifiques qui travaillent sur le réchauffement de la planète estiment qu’elle se réchauffe à cause de l’activité humaine. Nous allons donc présenter le fonctionnement et les impacts des différents phénomènes, continus et ponctuels, intervenant dans le climat.

A. Les causes de variations climatiques constantes de la terre

a. L'intensité de l'activité solaire

Le climat sur Terre est un système complexe, dont la force motrice est assurée par le rayonnement solaire. La température moyenne de la surface terrestre dépend fortement de la quantité de rayonnement solaire et de la quantité de chaleur retenue par l'atmosphère. L'énergie qui nous vient du Soleil fluctue en fonction du nombre de taches solaires présentes sur le Soleil. Les taches solaires sont les régions les moins chaudes du Soleil (3 927°C au lieu de 5 527°C). Elles sont souvent le lieu d'explosions gigantesques appelées éruptions solaires. L'intensité de l'activité solaire y est donc liée. Les variations du nombre de tâches solaires provoquent des variations de l'intensité du vent solaire, et ainsi du jet de particules chargées en provenance de notre étoile. Lorsque le vent solaire est fort, c'est-à-dire quand les tâches solaires sont très présentes, il est plus difficile pour les particules chargées de pénétrer l'atmosphère terrestre. Au niveau de l'atmosphère, ces particules entrent en collision avec les molécules présentes dans l'air et produisent des ions, ce qui provoque la formation de nuages. Ainsi, dans les périodes de forte activité solaire, le ciel est moins nuageux car le vent solaire diminue la formation d'ions. Ainsi, moins de nuages reflètent les rayons du Soleil ce qui provoque une augmentation de la température à la surface de la planète.



¹ Graphiques des variations de la température et de la constante solaire en fonction du temps

La constante solaire est une moyenne, pour la Terre et sur un an, du flux total d'énergie électromagnétique reçue par le Soleil aux limites de l'atmosphère. Il semble encore difficile d'estimer l'impact de la légère fluctuation de la constante solaire sur les températures mais on peut remarquer sur ces graphiques, une bonne corrélation entre les variations de la température et de la constante solaire.

¹Source <http://autreversion.info/L%27intensit%E9%20de%20l%27activit%E9%20solaire.htm>

b. Un échange continu de rayons

Comme nous l’avons dit, la quantité de rayonnement solaire reçue par la Terre et la quantité de chaleur retenue par son atmosphère définissent majoritairement notre climat.

i. L’effet de serre naturel

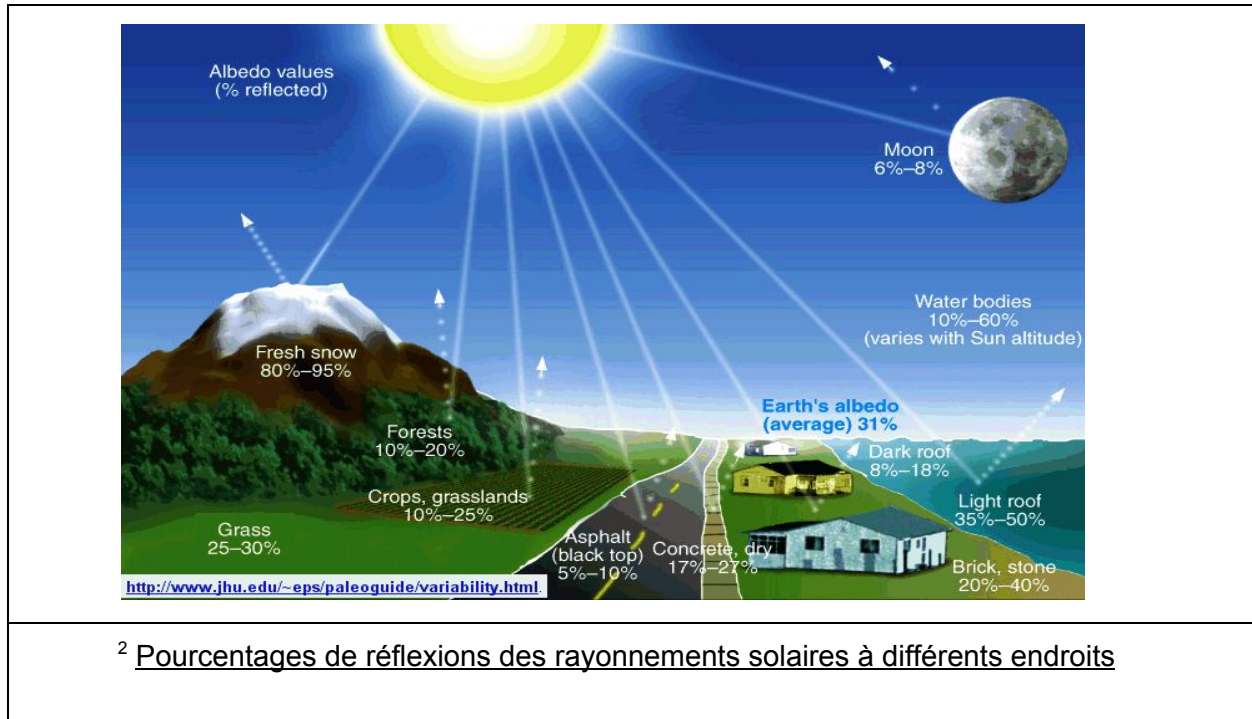
La Terre reçoit l’énergie du soleil sous forme de rayon de lumière et de chaleur. Environ la moitié de ce rayonnement est réfléchi par l’atmosphère et la surface terrestre. L’autre moitié est absorbée par la surface terrestre et réchauffe la Terre. Cette chaleur est ensuite renvoyée sous forme de rayonnement. Une partie de cette chaleur part dans l’espace, mais une autre est absorbée dans l’atmosphère par les gaz à effet de serre et renvoyée vers la Terre. Il se produit ainsi un échange continu de rayons entre la surface du globe et l’atmosphère. Ceci provoque un réchauffement. Autrement dit, l’atmosphère fait office d’isolant thermique : ce phénomène s’appelle l’effet de serre naturel.

Des calculs ont démontré qu’en l’absence d’atmosphère, la température à la surface du globe serait de -18°C . Toute l’eau serait gelée en permanence et les températures seraient trop basses pour la survie des plantes et des animaux. À notre époque, la température moyenne de la Terre est de 15°C . Cela signifie que l’effet de serre assure un réchauffement d’environ 33°C .

Les principaux gaz à effet de serre naturels sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d’azote (N_2O), la vapeur d’eau (H_2O) et l’ozone (O_3). Or la combustion du pétrole et du gaz, l’agriculture intensive, ainsi que d’autres actes émettent de grande quantité de gaz à effet de serre (principalement du dioxyde de carbone et du méthane). De plus, la destruction des “puits de CO_2 ”, comme la déforestation induit sur la quantité de gaz à effet de serre naturellement absorbée par notre environnement. Ces gaz s’accumulent dans l’atmosphère et atteignent désormais des niveaux records. Pour le CO_2 par exemple, sa concentration est passée de 270 parties par million à la fin du 19ème siècle à près de 400 parties par million aujourd’hui, c’est la concentration la plus forte depuis au moins 800 000 ans. En conséquence, l’effet de serre s’intensifie et cette perturbation provoque un changement climatique constant.

ii. L'effet albédo

La quantité de rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre est appelée albédo ou facteur de réflexion, habituellement exprimé en pourcentage. Plus le rayonnement absorbé par la surface est important et moins il est réfléchi, plus la surface chauffe. Les objets noirs, tels que l'asphalte de nos routes ou un T-shirt noir, ont une valeur albédo faible et absorbent donc une grosse partie des rayons du soleil. Ils se réchauffent donc fortement. Les objets blancs ont un albédo élevé et réfléchissent les rayons du soleil beaucoup plus fortement, de sorte qu'ils se réchauffent moins rapidement.



Étant donné que les grandes surfaces du globe réfléchissent la lumière (eau, calottes glaciaires, nuage), la Terre a un albédo relativement important de 30 à 35%. On peut comparer ce nombre à celui de la lune, qui par sa surface de roches volcaniques, a un albédo de 7%. L'intervention de l'Homme (par exemple, la déforestation à grande échelle) modifie l'albédo de la planète. De même, le réchauffement climatique provoque la fonte des glaces. Par sa couleur blanche, la glace possède un albédo plus élevé que l'eau qui est bleue. Ainsi, les rayons du soleil sont plus absorbés et moins réfléchis ce qui provoque un réchauffement.

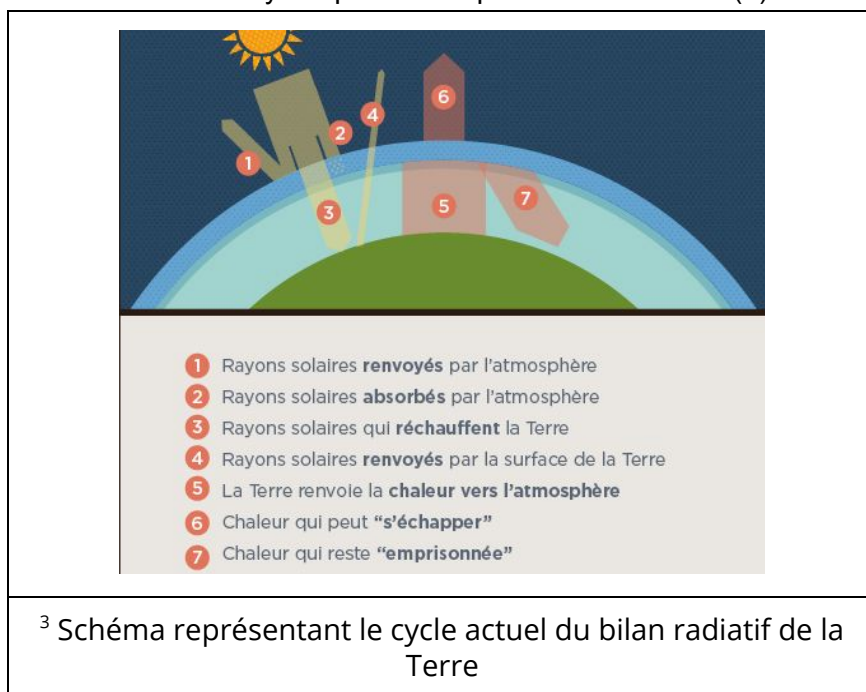
Autre exemple, dans les régions froides où le sol est recouvert de neige, l'effet albédo est fort. Sauf en présence d'une forêt. Dans ce cas, la quantité de rayons du soleil absorbés par les feuilles est beaucoup plus forte qu'en l'absence d'arbre. Ainsi, des chercheurs ont estimé que la présence des arbres qui séquestrent le carbone et participent au refroidissement du climat, était équivalent à leur absence, compensée par un effet albédo plus important. Donc la disparition de forêts dans ces zones n'aurait pas d'impact sur le climat. Ainsi, l'effet albédo peut provoquer des changements climatiques, mais peut aussi jouer le rôle de compensateur thermique lors de certaines catastrophes naturelles à certains endroits précis.

² Source <http://www.jhu.edu/~eps/paleoguide/variability.html>

iii. Le bilan radiatif de la Terre

L'équilibre caractérisé par l'échange entre les rayonnements de courtes longueurs d'onde entrant dans notre atmosphère, et ceux de grandes longueurs d'onde en sortant, s'appelle le bilan radiatif de la Terre. Grâce à cet équilibre, la température moyenne sur Terre est plus ou moins constante dans le temps. Le cycle actuel du bilan radiatif de notre planète se présente comme ceci :

Chaque seconde, la Terre reçoit 100 unités d'énergie du soleil sous forme de lumière et de chaleur. De ces 100 unités, 25 sont réfléchies immédiatement dans l'espace par l'effet albédo de l'atmosphère et 5 par l'effet albédo de la surface du globe (1 et 4). De plus, 25 unités sont absorbées par les gaz à effet de serre dans l'atmosphère et 45 unités par la surface terrestre (2 et 3). Cette énergie réchauffe la Terre et cette chaleur fait en sorte que la Terre émette à son tour de la chaleur. Elle produit alors environ 104 unités d'énergie sous forme de rayonnement (5) complétée par 29 unités dues à l'évaporation de l'eau. Sur ces 133 unités, à peu près 70 unités de cette énergie traversent notre atmosphère pour rejoindre l'espace (6) et les 63 unités restantes sont renvoyées par l'atmosphère vers la Terre (7).



Nous pouvons conclure que le bilan radiatif de la Terre est en équilibre. Il s'établit en effet un équilibre entre l'atmosphère et l'espace : sur environ 100 unités d'énergie reçues par la Terre, celle-ci en renvoie à peu près $25 + 5 + 70 = 95$ unités dans l'espace.

Si un seul des composants du système climatique actuel change, le bilan radiatif sera perturbé. De ce fait, la température moyenne à la surface terrestre changera et après un certain temps, un nouvel équilibre dans le bilan radiatif se mettra en place. La modification de la température provoque un changement de climat sur Terre.

³ Source https://youtu.be/dtAX_gotGIQ

c. La circulation océanique

L'atmosphère et l'océan, qui sont des fluides, interagissent. L'océan joue donc un rôle dans la variation des climats aux différentes zones de notre planète. La circulation océanique peut être divisée en deux : une circulation rapide, poussée par les vents et dominant la couche supérieure de l'océan, une circulation lente et dominant les profondeurs océaniques.

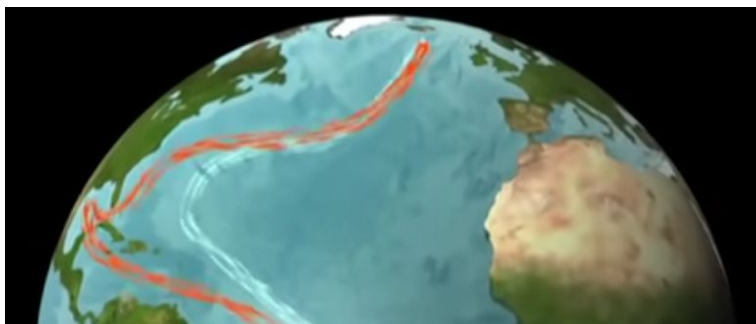
i. La circulation rapide

La circulation rapide est entraînée par les courants de vents, principalement des vents d'Est dans les tropiques et des vents d'Ouest dans les moyennes latitudes. La friction sur l'eau due à la force du vent, couplée à la force de Coriolis (effet de la rotation de la Terre), entraîne un mouvement des couches supérieures de l'océan connu sous le nom de transport d'Ekman. Ce mécanisme engendre un mouvement d'eau perpendiculaire à la direction du vent (vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud). Des zones de divergence et de convergence d'eaux apparaissent alors.

ii. La circulation lente, ou circulation thermohaline

De son côté, la circulation profonde repose sur des constantes de temps plus longues. Cette circulation est parfois appelée « thermohaline », du fait de sa dépendance aux changements de température (« thermo ») et de salinité (« haline ») qui régulent la densité de l'eau de mer. Plus l'eau de mer est froide et salée, plus sa densité s'accroît ; elle s'enfonce alors dans les profondeurs. Cet écoulement a lieu principalement au niveau des hautes latitudes, où la perte de chaleur vers l'atmosphère et la formation de glace changent significativement la température et la salinité de l'eau.

Le segment de circulation thermohaline le plus connu est le Gulf Stream. Il emmène les eaux chaudes salées du golfe du Mexique dans le nord. Les eaux arctiques sont plus denses car elles sont plus froides et plus salées. Les eaux atlantiques sont moins denses car elles sont plus chaudes et moins salées. Ainsi, les eaux chaudes de l'Atlantique se dirigent vers l'Arctique où elles se refroidissent et plongent.



⁴ Un exemple de circulation océanique thermohaline : le Gulf Stream

⁴ Source <https://www.youtube.com/watch?v=g69KxsNxQaQ&t=76s>

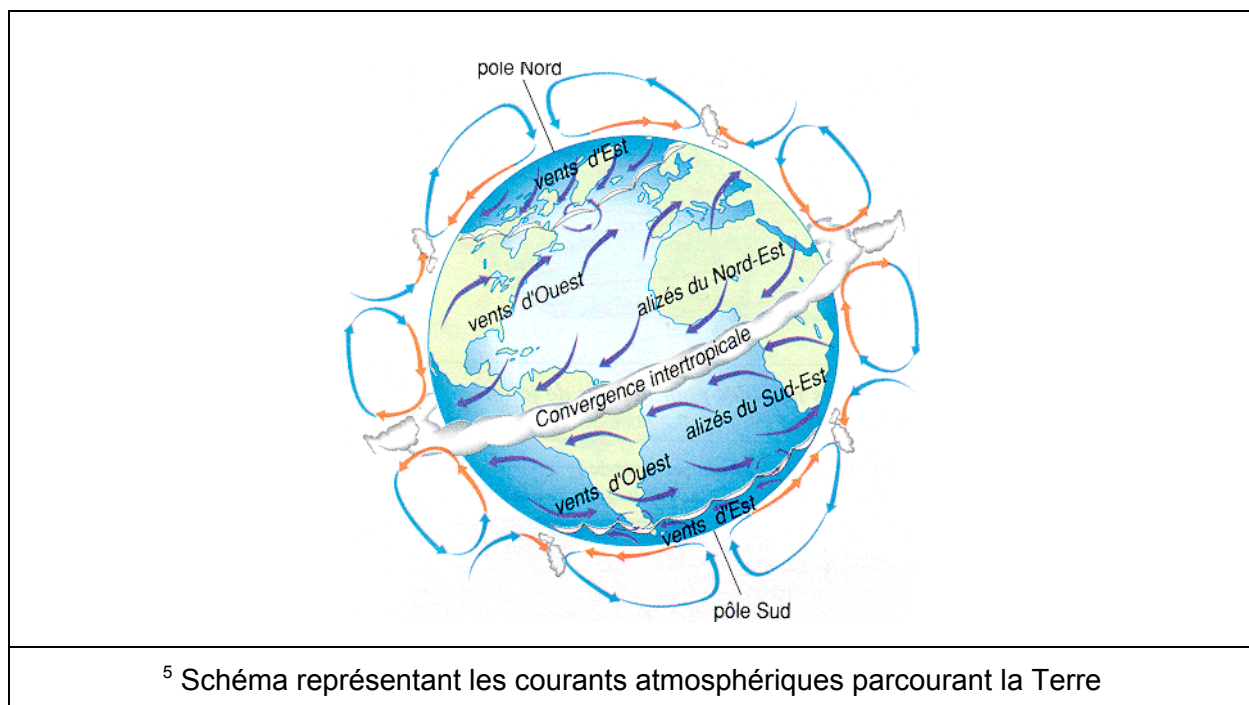
iii. La circulation océanique, un régulateur du climat

La circulation océanique a des conséquences sur l'état moyen et la variabilité du système climatique. Les eaux tropicales chaudes de surface remontent vers le pôle Nord, et cette circulation lente (environ 1 500 ans) atténue les différences de températures entre les latitudes. Ainsi, les phénomènes de remontée d'eau au niveau de l'équateur, et la divergence d'eaux froides en direction des pôles, maintiennent des températures basses le long de l'équateur.

d. Circulation de l'air dans l'atmosphère

La météo, telle que nous la connaissons tous les jours, est régie par différents courants atmosphériques. Toutes les régions du globe sont sous l'influence de courants atmosphériques parcourant la partie basse de l'atmosphère : la troposphère.

Le moteur principal des mouvements atmosphériques est le soleil. Celui-ci réchauffe la surface de la Terre, qui réchauffe à son tour l'air ambiant. Des mouvements ascendants se créent, et en s'élevant l'air se refroidit d'environ 1°C tous les 100m dans la troposphère. Une fois refroidit, l'air redescend vers le sol. Il y a donc des mouvements de convection qui s'établissent dans la troposphère, un peu de partout autour de la Terre. C'est-à-dire que comme pour la circulation océanique thermohaline, l'air chaud remonte et laisse sa place à l'air froid plus dense qui descend.



⁵ Source <http://www.vera-paradise.com/images/masse-d27air-2.jpg>

La circulation de l'air dans l'atmosphère assure 70% à 80% du transfert de l'énergie entre les régions à bilan radiatif positif et celles à bilan radiatif négatif. Par ailleurs, elle joue un rôle important dans le cycle de l'eau, assurant le transport de grandes quantités de vapeur d'eau. Ainsi, le déplacement des masses d'air permet de conditionner le climat des diverses régions de la planète.

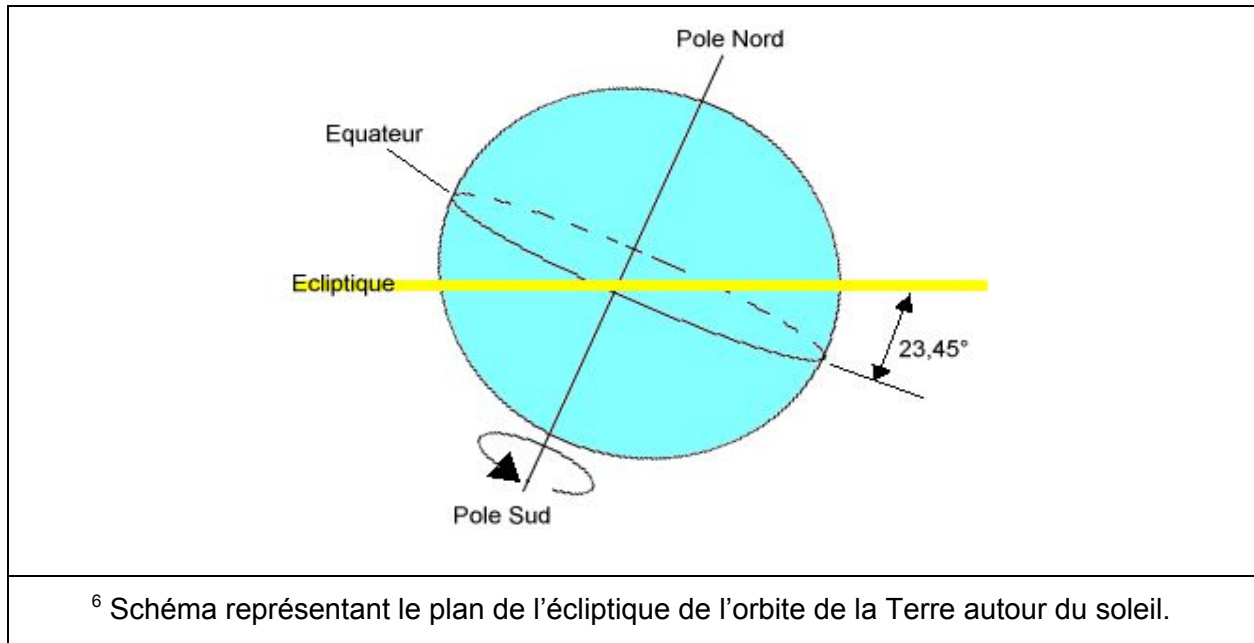
B. Les causes des variations climatiques ponctuelles de la Terre

a. Cycles et caractéristiques astronomiques de la Terre

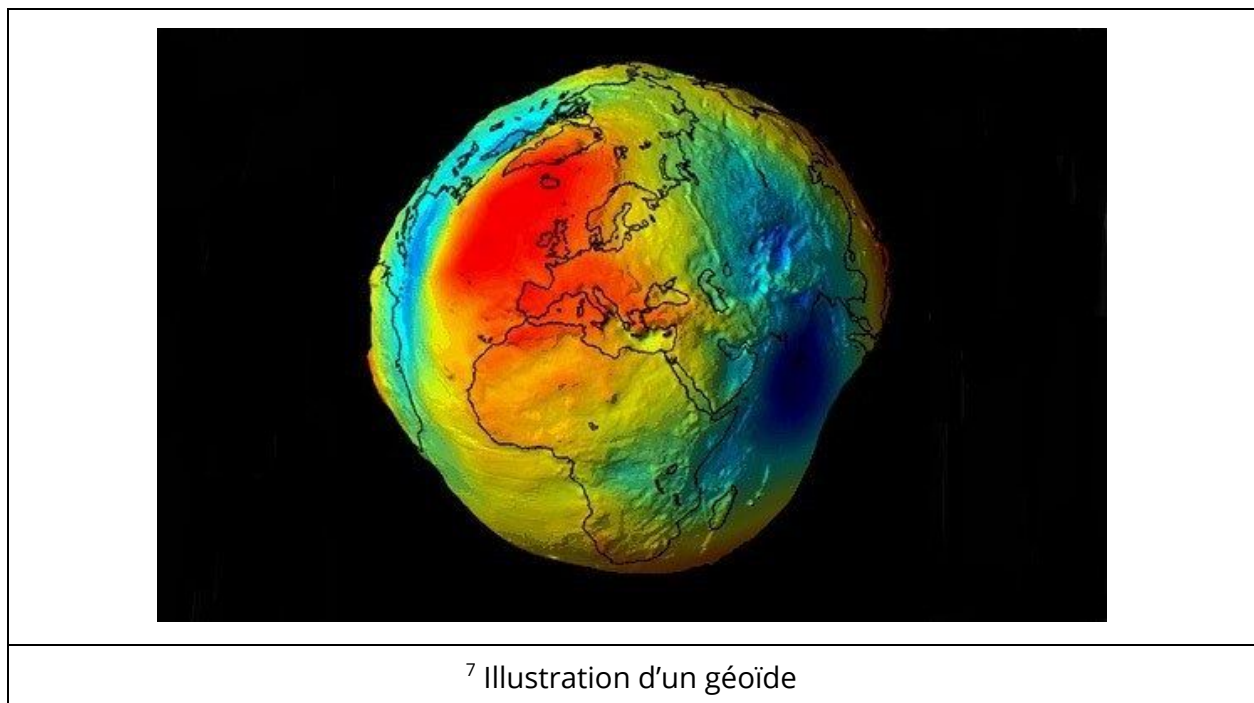
i. Caractéristiques astronomiques

La position astronomique de la Terre joue un rôle important dans son climat. Cette position varie au cours du temps, ce qui fait varier certaines caractéristiques astronomiques de notre planète. Ses caractéristiques sont :

- Sa distance avec le Soleil : la Terre se situe approximativement à 150 millions de kilomètres du Soleil.
- Son orbite : l'orbite de la Terre (parcours qu'elle décrit autour du Soleil) n'est pas ronde mais elliptique, ce qui fait que la Terre est entre 147,17 millions de kilomètres au 2 janvier et 153,18 millions de kilomètres au 2 juillet. Pour l'hémisphère Nord, c'est en hiver que la Terre est la plus proche du Soleil, ce qui signifie que ce n'est pas ce facteur qui détermine les saisons.
- Sa période de révolution autour du Soleil : la Terre tourne autour du Soleil en 365 jours, 06 heures et 09 minutes.
- Sa rotation journalière : dans le même temps, la Terre effectue une rotation sur elle-même en 23 heures 56 minutes 04 secondes. Cette rotation détermine le jour et la nuit.
- La Terre a une orbite située sur un plan dit “plan de l'écliptique”. L'axe des pôles du globe forme actuellement un angle de $23,27^\circ$ avec la perpendiculaire à ce plan. L'inclinaison de l'axe des pôles par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique et la révolution engendre les saisons astronomiques à partir de quatre positions : deux équinoxes (printemps : 21 mars et automne : 23 septembre) et deux solstices (été : 21 juin et hiver : 21 décembre).



De plus, la Terre a une forme de géoïde :



⁶ Source https://home.mis.u-picardie.fr/~choplin/enseignement/dess/sim/t1/td_3d/td_3d_files/i23.gif

⁷ Source

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Switzerland_-_Francais/L_Universite_de_Berne_calculera_l_orbite_du_satellite_GOCE_au_centimetre_pres

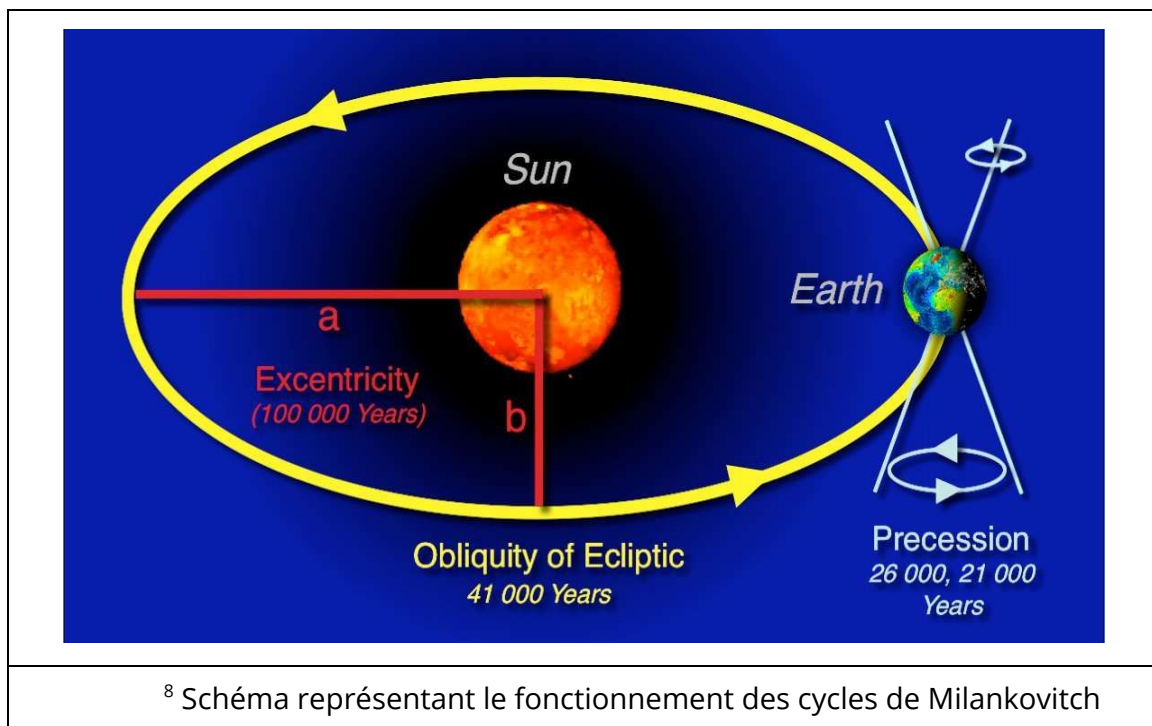
À cause de cette forme, les rayons du soleil doivent traverser à la fois une plus grande distance et surtout une épaisseur plus importante de l'atmosphère en allant vers les pôles. Ainsi, les grandes zones climatiques de notre planète sont constituées de :

- Une zone toujours chaude de part et d'autre de l'équateur jusqu'au-delà des tropiques.
- Deux zones tempérées aux latitudes moyennes (c'est-à-dire à égale distance entre l'équateur et le pôle).
- Deux zones froides entre les cercles polaires et les pôles.

ii. Cycles astronomiques

L'alternance des cycles glaciaires et interglaciaires durant le Quaternaire (ère géologique commençant il y a environ 2,6 Ma, et continuant aujourd'hui) s'explique par les cycles de Milankovitch. Différents paramètres rentrent en compte dans le déroulement de ces cycles :

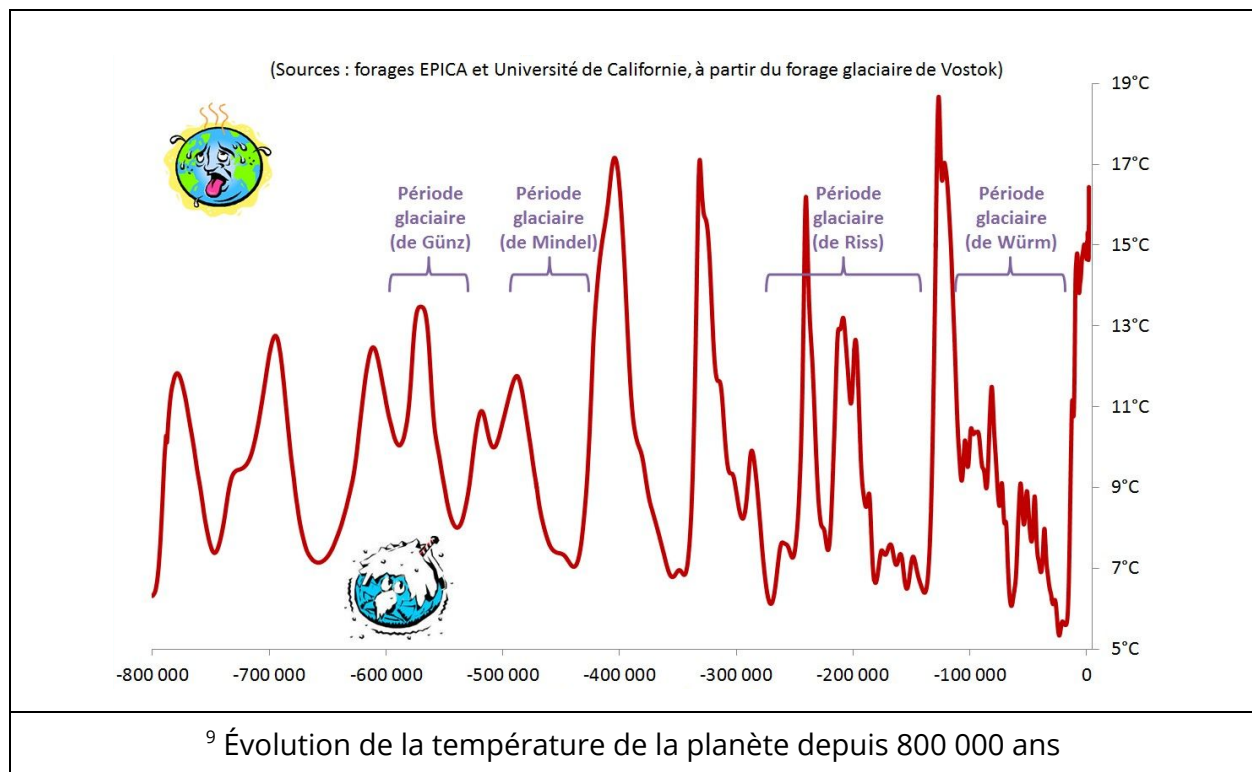
- La variation d'excentricité : à peu près tous les 100 000 ans, l'ellipse formée par l'orbite terrestre s'excentre d'environ 18 millions de km, ce qui modifie la distance de la Terre au Soleil. C'est pourquoi, actuellement, la Terre se trouve plus proche du Soleil en décembre qu'en juillet.
- La variation de l'obliquité de l'axe des pôles : comme nous l'avons précisé précédemment, l'axe des pôles forme de nos jours un angle de $23,27^\circ$ avec la perpendiculaire. Cet angle varie de 22° à 25° tous les 41 000 ans environ. Quand l'inclinaison de l'axe de la Terre est maximale (25°), les rayons du Soleil peinent à atteindre les hautes latitudes en hiver et inversement en été. Ainsi, les étés sont chauds et les hivers rigoureux. Inversement, une diminution de l'inclinaison correspond à des étés moins chauds et à des hivers moins froids.
- La précession des équinoxes : l'axe de rotation de la Terre change de direction l'axe des pôles qui décrit un cône autour de la perpendiculaire au plan de l'écliptique selon un cycle principal de 26 000 ans et un cycle mineur de 21 000 ans. Ainsi, le moment où le pôle Nord pointe vers le Soleil ne correspond pas toujours à la même position de la Terre sur son orbite. Il y a 11 000 ans, la Terre était au plus proche du Soleil au solstice d'été. Ainsi, en hiver on retrouve des glaciations comme la terre se retrouvait au plus loin du Soleil.



Nous savons que depuis 2,6 millions d'années (du début de l'ère géologique du Quaternaire à nos jours), tous les 100 000 ans environ, un nouveau cycle commence. Ce cycle signifie soit le début d'une ère glaciaire, soit le début d'une ère interglaciaire. Durant une ère glaciaire, une partie importante des continents est englacée et génère différents effets sur le fonctionnement de notre planète (baisse du niveau de la mer, modification de la circulation océanique mondiale...). Pendant une période interglaciaire, le climat se réchauffe et entraîne donc de nouveaux phénomènes (fonte de la glace, hausse du niveau de la mer...). L'ère interglaciaire actuelle a débuté il y a 10 000 ans.

⁸ Source

https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/largeoriginal/2/7/b/27b0d567cd_50090380_milankovitch-cycles-hg.jpg



On peut voir, sur ce schéma, que les cycles astronomiques provoquent des variations considérables de notre climat. On constate que les températures durant les périodes glaciaires ont tendance à baisser, alors que durant les périodes interglaciaires elles augmentent significativement.

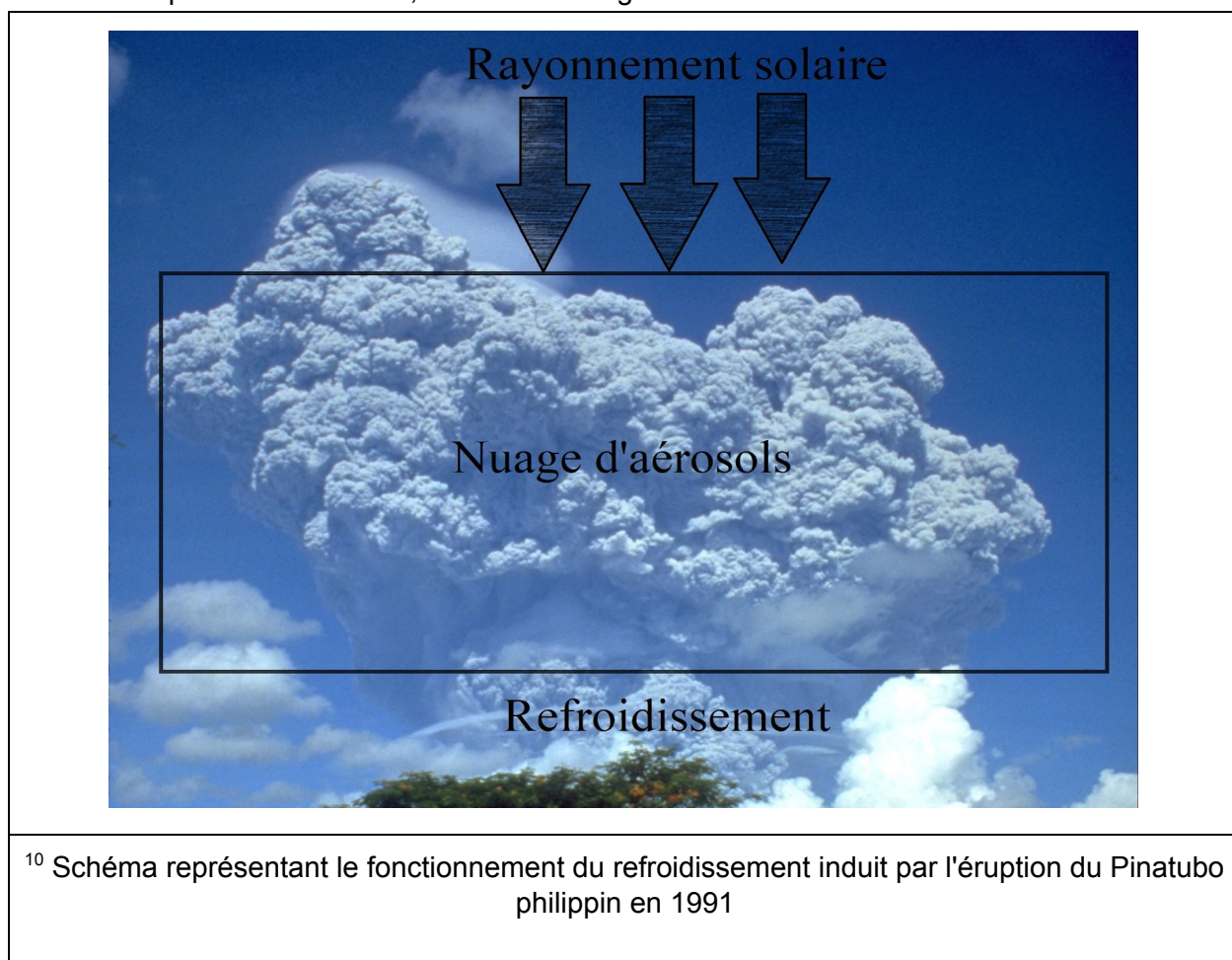
⁹ Source

https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/largeoriginal/2/7/b/27b0d567cd_50090380_milankovitch-cycles-hg.jpg

b. Les éruptions volcaniques

Toutes les éruptions volcaniques ont des effets sur le climat de l'échelle locale à régionale. Certaines d'entre elles, particulièrement importantes, rejettent une importante quantité d'aérosols et de cendres volcaniques dans la stratosphère. Un aérosol est un ensemble de fines particules, solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux. De plus, les volcans produisent et émettent de grandes quantités de dioxyde de soufre lors de leurs éruptions. Celui-ci réagit avec l'eau pour former des aérosols d'acide sulfurique qui se répandent dans toute la stratosphère dans l'année qui suit l'éruption et modifient ainsi le climat planétaire pendant quelques mois. En effet, l'acide sulfurique absorbe et réfléchit le rayonnement solaire, et la couverture atmosphérique, que crée ces aérosols, empêche à une partie de la lumière et de la chaleur venant du Soleil de passer.

Récemment, l'éruption du Pinatubo Philippin en 1991 avait provoqué, les années suivantes, une baisse des températures à l'échelle mondiale. En effet, l'éruption avait entraîné une diminution de la luminosité de l'ordre de 10 % à la surface terrestre. Ainsi, dans les années 1992-1993, on a remarqué une diminution de la température moyenne au sol de 0,5 à 0,6 °C dans l'hémisphère Nord et de 0,4 °C sur tout le globe.



¹⁰ Schéma représentant le fonctionnement du refroidissement induit par l'éruption du Pinatubo philippin en 1991

¹⁰ Source https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinatubo91eruption_clark_air_base.jpg

c. Les chutes de météorites

La chute d'une météorite peut provoquer un épais nuage de poussières, qui empêche les rayons du Soleil d'atteindre la surface du globe. Le refroidissement qu'entraîne ce phénomène à l'échelle mondiale provient donc du même principe que les éruptions volcaniques, mais à plus grande échelle. Ceci provoque un refroidissement du globe durant une dizaine d'années.

Une fois les poussières retombées, l'atmosphère terrestre retrouve une partie de sa transparence. Mais les gaz carboniques, libérés par l'onde thermique qui aurait enflammé les forêts, absorbent par la suite la majeure partie des rayons solaires réfléchis par la Terre. Un effet de serre important a donc lieu durant plusieurs milliers d'années provoquant une augmentation des températures.

Ces différents paramètres influent sur le climat planétaire à des échelles de temps variant de quelques mois à plusieurs millénaires. Ainsi se construit l'histoire du climat de la Terre que les scientifiques tentent de retracer et de prévoir.

Partie II- Les différents modèles de réchauffement climatique

A. Les modèles de réchauffement climatique

Comme il est impossible de se tourner vers le passé récent pour avoir une idée de ce qui peut se passer plus tard, les seuls outils dont la communauté scientifique dispose pour tenter de savoir ce qui peut arriver à l'avenir sont des modèles climatiques. Le but d'un modèle de réchauffement climatique est donc de reproduire aussi fidèlement que possible le comportement du climat terrestre pour nous donner une idée du climat à venir et donc de prévoir d'éventuels bouleversements. Plus concrètement il s'agit d'une représentation numérique de la planète découpé en plusieurs cases appelées mailles, ainsi que des lois et interactions qui y régissent le climat. Dans la suite nous allons essentiellement parler des modèles de réchauffement climatiques globaux qui nous intéressent pour comprendre l'évolution du climat à l'échelle de la planète entière. Nous allons notamment tenter d'en expliquer le fonctionnement et les phénomènes physiques qu'ils prennent en compte.

a. Les phénomènes physiques dans les modèles climatiques

Premièrement il existe plusieurs types de modèles qui sont spécialisés, la plupart du temps, dans quelques phénomènes physiques avec des échelles de mailles bien spécifiques. En effet les modèles les plus simples se concentrent sur un bilan énergétique de la Terre, notamment avec ses échanges avec l'atmosphère, tandis que des modèles bien plus complexes s'appuient également sur les circulations atmosphériques et océaniques ainsi que la biosphère continentales et leurs interactions. Selon la manière dont ils sont construits et ce qu'il prennent en compte, les modèles sont désignés avec des sigles différents. En voici quelques exemples :

- **GCM** signifie « Global Circulation Model », et donc en Français « Modèle de Circulation Globale ». Il s'agit d'un modèle global (GCM pour General Circulation Model), pour donner des tendances de long terme sur de larges zones.
- **AGCM** signifie « Atmospheric Global Circulation Model ». Il s'agit d'une catégorie particulière de GCM, qui ne prennent en compte que l'atmosphère. Cela ne donne des prédictions valables que tant que les autres composantes (sols, océans, glaces) ne bougent pas, et en pratique il s'agit des modèles utilisés pour les prévisions météorologiques.
- **AOGCM** signifie « Atmospheric Oceanic Global Circulation Model ». Il s'agit d'une autre catégorie de GCM, qui prennent en compte l'atmosphère et les océans.

Bien évidemment ce ne sont pas les seuls modèles, il en existe bien d'autres qui codent diverses phénomènes physiques comme la fonte ou la formation des glaces par exemple. Ces modèles sont développés par des équipes de scientifiques pluridisciplinaires dans des laboratoires spécialisés (cela regroupe environ 2 000 scientifiques de professions variées dans le monde). Pour modéliser des phénomènes physiques ces scientifiques s'appuient sur des travaux déjà effectués par des physiciens, chimistes, biologistes, géologues, météorologues, des glaciologues, des énergéticiens, des démographes, et bien d'autres encore. De par les expériences faites et les équations démontrées par ces différents scientifiques, il est possible de modéliser le climat. En France, l'un des pôles de modélisation et d'étude du climat est l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), rassemblant :

- Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS (unité commune à l'Ecole normale, l'Ecole Polytechnique, et l'Université de Paris VI – Jussieu)
- Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (unité mixte CEA – CNRS).
- Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie (unité mixte IRD – CNRS – Jussieu).
- Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (unité mixte CNRS – Jussieu – Université de Versailles-Saint Quentin).
- Laboratoire de Physique et Chimie Marines

Cependant pour obtenir une prévision globale de l'évolution du climat de la Terre ces modèles spécifiques ne suffisent pas car ils ne codent pas assez de phénomènes pour rendre compte de la réalité. C'est pourquoi ils sont bien souvent rassemblés dans le but d'obtenir un rapport assez complet pour nous donner une idée de l'évolution du climat. Ces rapports nous ont notamment été fournis par le GIEC. Le GIEC pour Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (ou IPCC en anglais) est un organisme ouvert à tous les pays membres de l'ONU (soit actuellement 193 états) qui a pour but d'évaluer les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique permettant de mieux comprendre le climat et donc les risques liés au réchauffement climatique, ainsi que de trouver d'éventuelles solutions pour l'atténuer, ou au minimum le limiter. Depuis sa création en 1988 cet organisme a déjà fourni 5 rapports sur l'évolution du climat. Ces rapports s'appuient donc sur le résultat de plusieurs modèles. Le 5eme rapport s'est notamment appuyé sur :

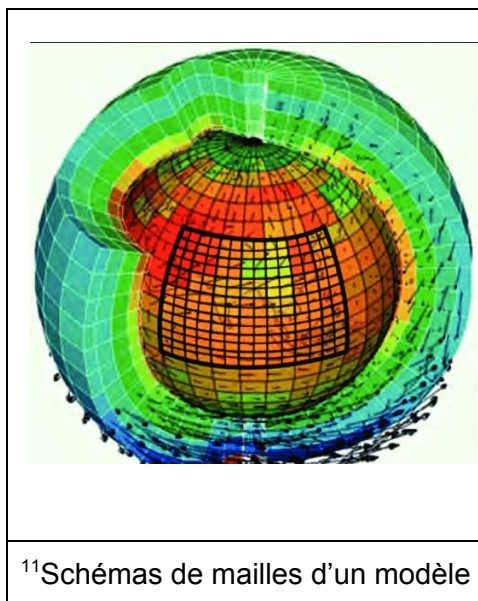
- Les modèles couplés océan-atmosphère. Ils sont constitués de plusieurs modèles (un modèle d'océan, un modèle d'atmosphère, un modèle de glace de mer, un modèle représentant les continents (végétation, ruissellement, etc.)) qui échangent leurs informations par couplage, c'est-à-dire par association. Par exemple, les températures de surfaces atmosphériques, calculées par le modèle d'atmosphère, servent de données d'entrée au modèle d'océan pour le calcul des températures de surfaces océaniques et vice-versa. Ces modèles sont toujours très utilisés aujourd'hui.
- Les modèles du système Terre. Ces modèles sont le développement des modèles couplés océan-atmosphère, auxquels est ajoutée la simulation des cycles biogéochimiques. Ils constituent aujourd'hui les outils les plus complets pour la réalisation des projections climatiques pour lesquelles les rétroactions liées aux cycles biogéochimiques sont importantes.
- Les modèles du système Terre de complexité intermédiaire. Ces modèles incluent les composantes des modèles du système Terre, mais souvent de façon idéalisée, ou à faible résolution, afin d'être moins coûteux en puissance de calcul. Ils permettent l'étude de questions spécifiques, par exemple la compréhension de certains processus de rétroaction.
- Les modèles régionaux. Ils sont similaires aux modèles précédents, mais leur domaine spatial ne couvre qu'une partie du globe terrestre. Leur domaine étant plus petit, il est possible d'avoir une meilleure résolution spatiale (taille de la maille plus petite) et temporelle pour un même coût de calcul par rapport à un modèle global. Les informations aux frontières sont en général fournies par les modèles globaux.

Cette association entre différents modèles est essentielle notamment pour le codage des rétroactions. Les rétroactions traduisent la manière dont un phénomène climatique influe sur un autre. Pour mieux comprendre prenons un exemple. Une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère engendre une augmentation de la température. Cette augmentation de température provoque une fonte des glaces qui a elle même plusieurs effet comme la diminution de l'effet albédo, l'augmentation du niveau des mers, et la libération dans l'atmosphère des nombreux gaz à effet de serre qui étaient emprisonné dans la glace. Et tout cela va également provoquer le réchauffement de la planète.

Comme le démontre ce dernier point, les modèles ne se différencient pas seulement par les phénomènes physiques qu'ils prennent en compte mais aussi par leur taille.

b. Des modèles à plusieurs échelles

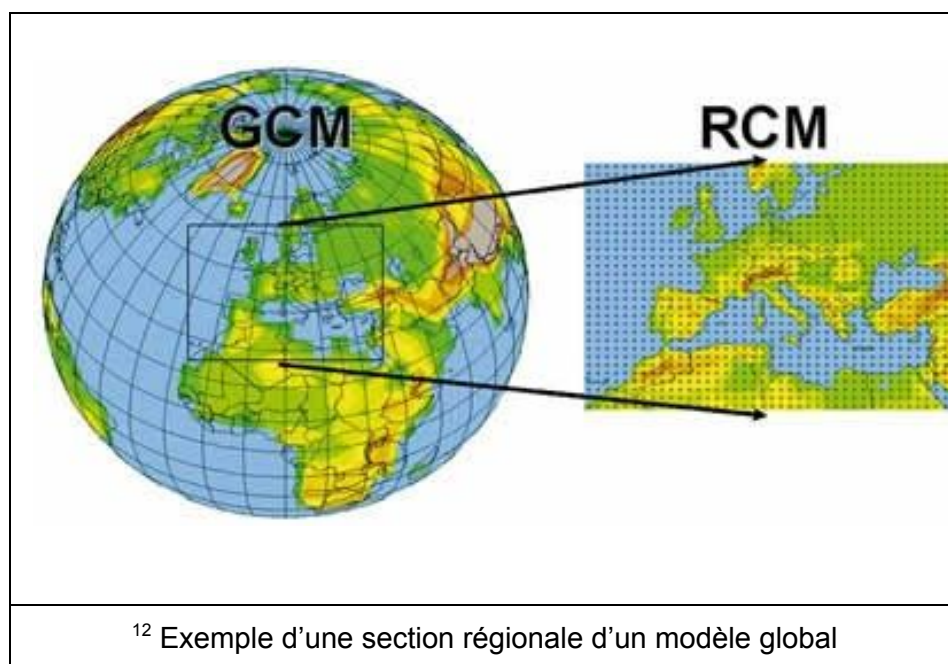
Les modèles sont découpés en plusieurs morceaux que l'on appelle “maille”. Une maille est une représentation 3D d'une partie de la surface terrestre et les interactions entre mailles sont modélisées par un certain nombre d'équations mathématiques qui traduisent la conservation de diverses quantités physiques. Ainsi, il existe plusieurs types de modèles climatiques qui se différencient grâce au nombre de mailles qu'il possèdent. Les modèles régionaux vont modéliser le climat sur une échelle régionale, c'est à dire, sur seulement quelques mailles. Ces modèles opèrent en effet sur un domaine spatial restreint, typiquement à l'échelle d'un continent ou d'un subcontinent, contrairement aux modèles globaux, qui fournissent une information globale à une résolution spatiale grossière. (la zone en noir du schéma représente un modèle régional à l'intérieur d'un modèle global).



Ces modèles dit « globaux » consistent en la représentation numérique de la planète et des interactions entre l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Ces interactions gouvernent l'évolution du climat ceux qui nécessite un très grand nombre de mailles pour modéliser l'entièreté de la planète. Or, plus les mailles des modèles sont importantes et plus ces modèles sont imprécis. Un modèle global utilise bien plus de mailles qu'un modèle régional et ces mailles sont bien plus grandes (supérieures à 100 km contre 10km pour les mailles des modèles régionaux). Il est donc trop imprécis car la résolution (comparable à la taille du pixel pour les images) grossière de ce type de modèle induit une représentation trop grossière du relief, des côtes mais aussi de l'occupation des sols. Ceci limite les études des événements extrêmes, ainsi que les études d'impact et de stratégies d'adaptation associées aux changements climatiques.

¹¹ Source <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2011/TQ2011%20ARTICLE%201.pdf>

En réalité il est impossible de faire un modèle qui réussirait à modéliser toutes les lois physiques du climat et ce tout autour du globe en étant assez précis. C’est pourquoi pour faire un modèle global on associe plusieurs petits modèles entre eux de manière à concerner toute la planète. Lorsqu’un climat régional est utilisé pour raffiner spatialement les simulations issues d’un modèle de climat global, on parle alors de désagrégation dynamique. Ainsi les modèles régionaux désagrègent dynamiquement les données issues de modèles globaux à haute résolution spatiale, via une meilleure prise en compte des états de surface et une physique plus sophistiquée. Concrètement la désagrégation spatiale est comparable à un zoom sur une zone précise. On dit que le modèle climatique global effectue un guidage sur un modèle régional. C’est-à-dire que le modèle climatique global fournit l’évolution de l’état de l’atmosphère à grande échelle (vent, température, pression, humidité), ce qui signifie que les fluctuations de fines échelles (inférieures à 100 km) sont absentes, l’atmosphère est décrite de façon peu détaillée. Le modèle climatique régional utilise cette information pour simuler les phénomènes de petite échelle correspondant à cet état de l’atmosphère, tels que précipitations, les orages, les vents de montagne , ect...



¹² Source <https://www.um.edu.mt/science/geosciences/climate/models>

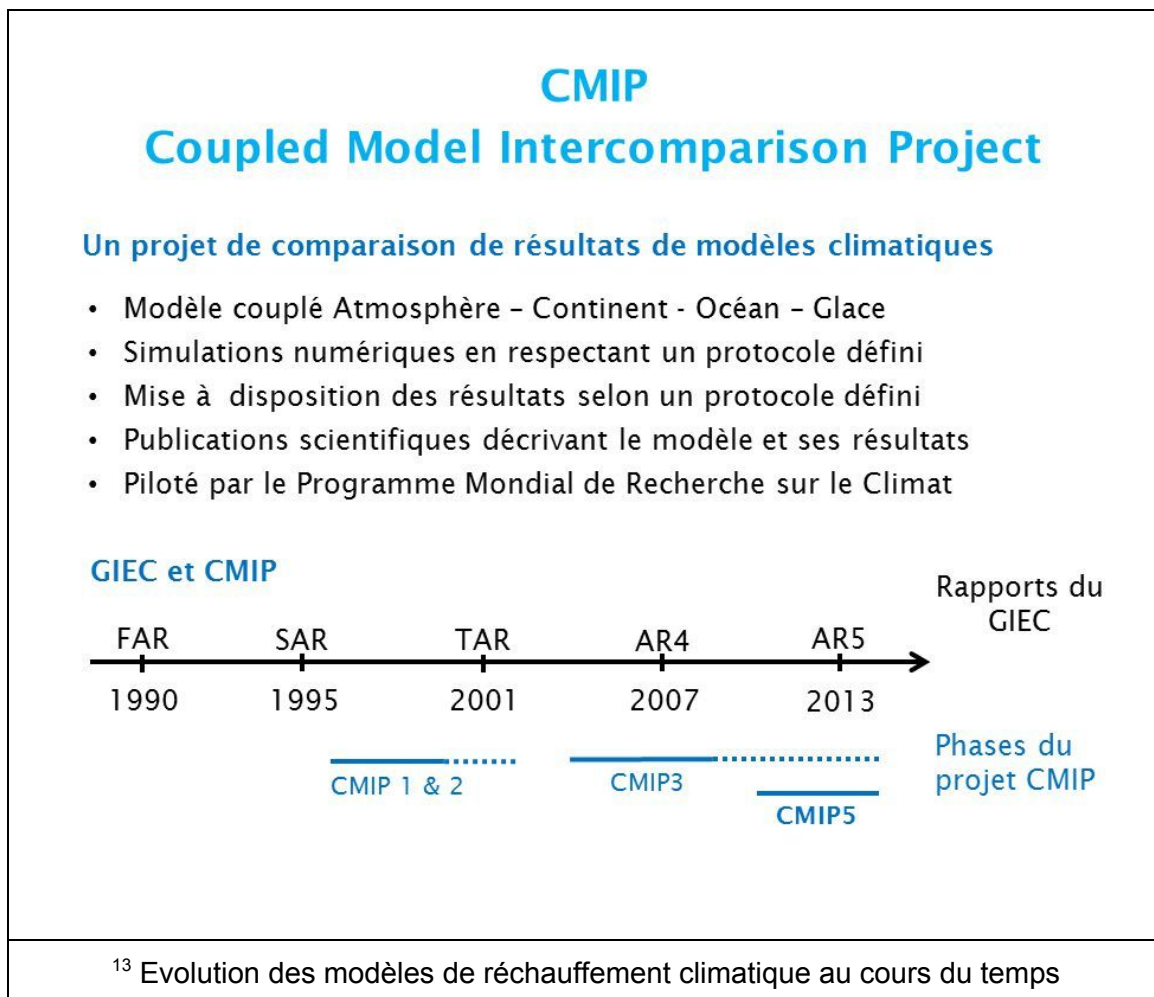
Le guidage est en fait une contrainte du modèle global sur le modèle régional qui a pour but de restreindre ce modèle à une mission particulière. Bien souvent il s'agit de l'évolution atmosphérique à grande échelle. Du point de vue du codage ce guidage se traduit par l'ajout d'un terme dit « de relaxation » dans les différentes équations physiques comprises dans le modèle régional (équations de l'évolution du vent, de la température ou de l'humidité par exemple). Ce terme étant non physique il nécessite l'ajustement d'un coefficient de guidage. Ce coefficient a donc pour but de rendre la simulation la plus précise possible. En effet, un mauvais coefficient de guidage aura pour effet de donner des simulation complètement incorrecte. Si ce coefficient de guidage est trop fort, alors le modèle climatique régional sera trop contraint par le modèle climatique global et il ne pourra alors pas simuler de phénomènes de petite échelle. Si au contraire, le coefficient de guidage est trop faible, alors le modèle climatique régional ne va pas prendre en compte les informations telles que l'état atmosphérique de grande échelle imposé par le modèle global. Le modèle climatique régional va alors produire des phénomènes de petite échelle mais qui n'auront rien à voir avec l'état atmosphérique de grande échelle. Il faut donc réussir à trouver le bon coefficient de guidage pour que le modèle régional obéisse au modèle global tout en simulant les phénomènes de petite taille escompté. Puis pour finir, les résultats des modèles régionaux vont être utilisés dans les modèles globaux qui grâce à cela gagnent en précision.

Pour résumer, les modèles régionaux se servent des informations données par les modèles globaux. Puis les modèles régionaux gagnent en précision en se servant des résultats des modèles régionaux.

B. Evolution des modèles

Historiquement, le premier modèle atmosphérique date de 1950, et a été testé sur le premier ordinateur existant, l'ENIAC. Ce premier modèle ne codait que quelques phénomènes et ses résultats étaient donc trop imprécis pour être utilisés. Cependant en 2007, soit 67 ans plus tard, on estimait qu'il existait 23 modèles indépendants dans le monde. On constate donc une grande évolution du nombre de modèles existant.

Dans cette partie nous allons essayer de montrer l'évolution qu'ont connue les modèles au cours du temps. Pour cela, nous allons nous baser sur les différents modèles dont s'est servi le GIEC pour l'élaboration de ses différents rapports sur le climat.



¹³ Source

https://calcul.math.cnrs.fr/attachments/spip/Documents/Journees/sept2013/MESOCENTRE_MAFUJOL_S20130919.pdf

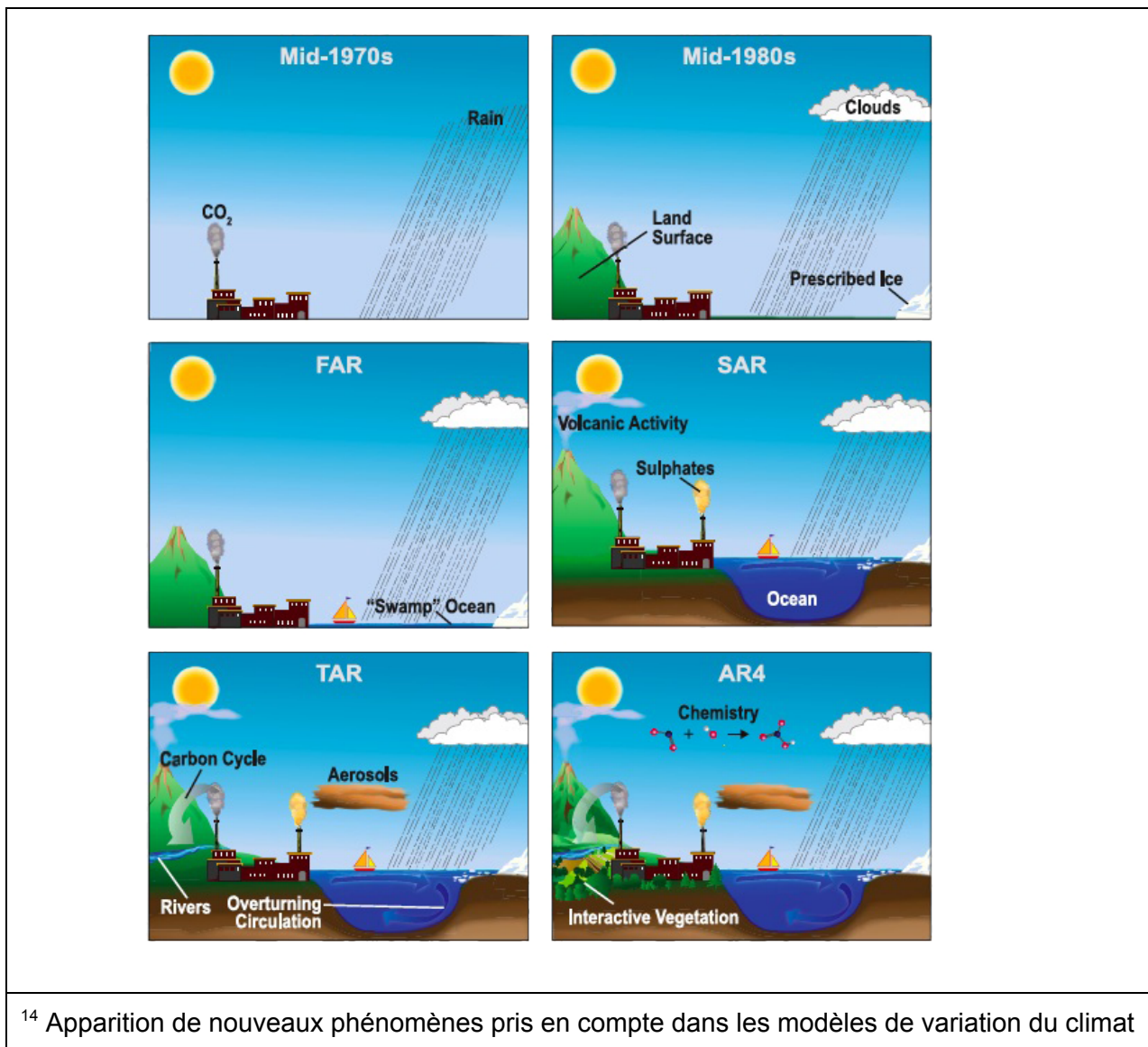
Dans le milieu des années 70 il existait déjà des modèles capables de prendre en compte des phénomènes physiques tels que l'émission de CO₂ par l'industrie ou encore la pluie. Ces mêmes modèles ont évolué au cours des années 80 en codant plus de phénomènes tels que les vents, la quantité de surface continentale ou encore la fonte des glaces comme le montre le schéma ci-dessus. Puis, au fur et à mesure que les années sont passées, de plus en plus de phénomènes physiques ont été codés. Ce progrès de la modélisation a notamment été dopé par l'avènement des satellites artificiels (notamment grâce à leurs données collectées sur l'état de l'atmosphère en temps réel) ainsi que des progrès des stations météorologiques au sol. En 1990 le GIEC utilise les meilleurs modèles qui existent pour établir son premier rapport.

Les différents rapports du GIEC sont désignés sous des acronymes. Le premier rapport fut appelé FAR pour First Assessment Report (Premier rapport d'évaluation en français). Bien que les modèles de l'époque étaient loin d'être aussi performants que maintenant, ce 1^{er} rapport s'était déjà basé sur plusieurs modèles qui prenaient en compte de nombreux phénomènes physiques tels que la circulation atmosphérique, l'influence des mers et océans dans le réchauffement climatique, ainsi que la fonte des glaces et surtout l'activité humaine (en particulier les émissions de CO₂ rejeté par l'industrie dans le monde entier).

En 1995 est publié le second rapport du GIEC appelé « climate change 1995 » (changement climatique 1995) ou SAR. Il a été présenté à l'occasion de la deuxième session de la conférence des parties de la CNUCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) pour débattre sur les impacts de l'Homme dans la variation du climat et trouver des solutions écologiques. Ce second rapport s'appuie sur des modèles un peu plus performants que ceux utilisés pour le rapport précédent mais qui codent à peu près les mêmes phénomènes physiques, bien que quelques nouveaux phénomènes ponctuels ont pu être codés tel que les effets de l'activité volcanique, et que l'on s'intéresse à d'autres émissions de gaz tel que le sulfate. Cependant pour ce nouveau rapport, les modèles atmosphériques et océaniques sont couplés pour un meilleur réalisme des résultats, mais il ne prennent toujours pas en compte les mécanisme de rétroaction dû aux océans, à la glace, ou encore à la végétation. La précision des résultats a notamment énormément évolué à l'échelle régionale grâce au resserrage des maillages des zones étudiées avec une résolution d'à peine 60 km.

En ayant conscience des principaux points à améliorer dans les modèles utilisés le GIEC publie un nouveau rapport 6 ans plus tard, « climate change 2001 » (bilan 2001 des changements climatiques) ou TAR. Pour ce rapport les modèles sont encore améliorés et l'on commence à prendre en compte les phénomènes de rétroaction ce qui a pour effet de rendre les conclusions de ses modèles encore plus précises. On continue de modéliser des phénomènes liés à l'activité humaine, comme l'utilisation des aérosols par exemple ; ainsi que les phénomènes en lien avec le CO₂ qui sont pour les experts les principales causes du réchauffement climatique. On modélise notamment le cycle du carbone. On remarque aussi pour ce 3^{ème} rapport une augmentation considérable du nombre de scénarios utilisés puisque l'on utilise plus d'une quarantaine de scénarios contre seulement 6 pour le rapport précédent.

En 2007 un nouveau rapport est rédigé et nommé AR4, puis en 20013 un autre nommé AR5. Pour ces deux rapports, la précision des modèles est encore améliorée notamment grâce à l’amélioration des technologies utilisées telles que les données satellites ou la puissance des ordinateurs. Quelques nouveaux phénomènes physiques sont également codés mais leurs influences est moindre par rapport à ceux déjà codés. Les principaux phénomènes étudiés restent ceux liés à l’activité humaine notamment les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthanes, hydrocarbure halogéné, ...). Comme on peut le remarquer il y a eu d’importants changements des modèles climatiques au cours des années pour prédire le climat. Il y a surtout eu une grande augmentation des phénomènes physiques codés ainsi que des précisions de ses modèles grâce à l’amélioration des technologies et des techniques de mesure.



¹⁴ Source <https://jancovici.com/changement-climatique/predire-lavenir/quest-ce-quun-modele-climatique-quels-sont-leurs-premieres-conclusions/>

C. Les conclusions des modèles

Maintenant que nous pouvons comprendre les modèles nous allons pouvoir étudier leurs conclusions. Y a-t-il bien d’après les modèles un réchauffement de la planète ? Si oui ce réchauffement est-il naturel ou provoqué par l’homme ? Et pour finir quels en seraient les effets ?

D’abord il faut préciser ce qu’est un scénario. Pour faire simple, on peut considérer le scénario comme l’entrée du programme. Par la suite, nous allons beaucoup parler de scénario de gaz à effet de serre. Ce sont en fait des projections éventuelles de l’évolution des gaz à effet de serre dans les années futures. C’est en fonction de ces scénarios que les modèles peuvent nous donner plusieurs résultats possibles concernant l’évolution du climat.

Après avoir étudié les conclusions des modèles nous chercherons à comprendre si ces modèles sont réellement fiables. Pouvons-nous avoir confiance en leurs conclusions ? Et quelles en sont les limites ?

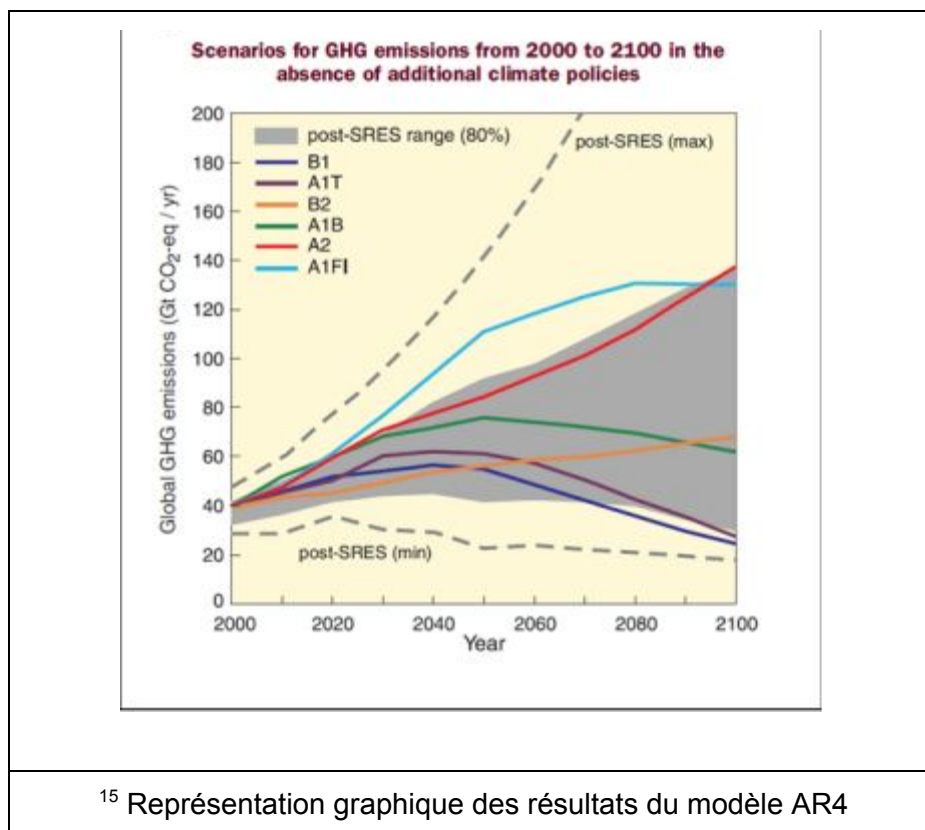
a. Quelles sont les limites des conclusions des modèles?

Les conclusions des modèles ont elles aussi évolué au cours du temps. En effet en même temps que les modèles et les scénarios utilisés se sont améliorés, les conclusions de ces modèles ont changé également.

Pour le premier rapport du GIEC les scientifiques qui se sont intéressés à l’activité humaine on mis au point 4 scénarios différents. Le premier appelé scénario A prévoyait qu’aucune mesure ne serait prise pour limiter la pollution due à l’activité humaine. A l’inverse le scénario D prévoyait que de grandes résolutions seraient prises pour l’avenir et était donc bien plus optimiste que les autres. Ce rapport a amené l’Assemblée générale des Nations Unies à décider d’élaborer une Convention-cadre sur les changements climatiques (CCNUCC) qui a reconnu l’existence du changement climatique d’origine humaine. Il prévoit un doublement des concentrations équivalentes de dioxyde de carbone par rapport aux niveaux préindustriels entre 2025 et 2050 pour les scénarios A à C, et 2100 pour le scénario D. Pour le scénario A les modèles des années 90 prévoient alors une augmentation moyenne de la température sur Terre de 3°C d’ici 2100 ainsi qu’une augmentation de 65 cm du niveau des mers. Pour le scénario D il ne prévoyait qu’une augmentation de 1°C d’ici 2100. Le pire qui puisse arriver d’après ces modèles était donc une augmentation de 3°C. Mais les choses vont bien empirer à partir du troisième rapport d’évaluation. Cette fois les modèles se montrent bien plus alarmants. L’augmentation minimum de la température en un siècle devrait être de 1.4°C, mais surtout dans les pires cas (c’est-à-dire d’après des scénarios ne prévoyant toujours aucune mesure de prise pour limiter l’émission des gaz à effet de serre) l’augmentation serait de 5.8°C. D’après ce rapport il y aurait donc une augmentation du nombre de journées très chaudes et une diminution

du nombre de journées très froides, ainsi qu’une augmentation des catastrophes naturelles telles que des pluies torrentielles, inondations (notamment à cause de la fonte des glaces qui fait monter le niveau des mers) et sécheresses dans la suite du siècle. Ces catastrophes devraient également impacter l’équilibre des espèces voire même entraîner le dépérissement des forêts. Ainsi s’en suivrait une diminution de la quantité de carbone engrangée par les forêts qui entraîne donc nécessairement une augmentation encore plus forte de la température terrestre. De plus à partir de l’année 2001 les modèles concluent à une « très probable » augmentation des précipitations de 0.5 à 1% tous les 10 ans.

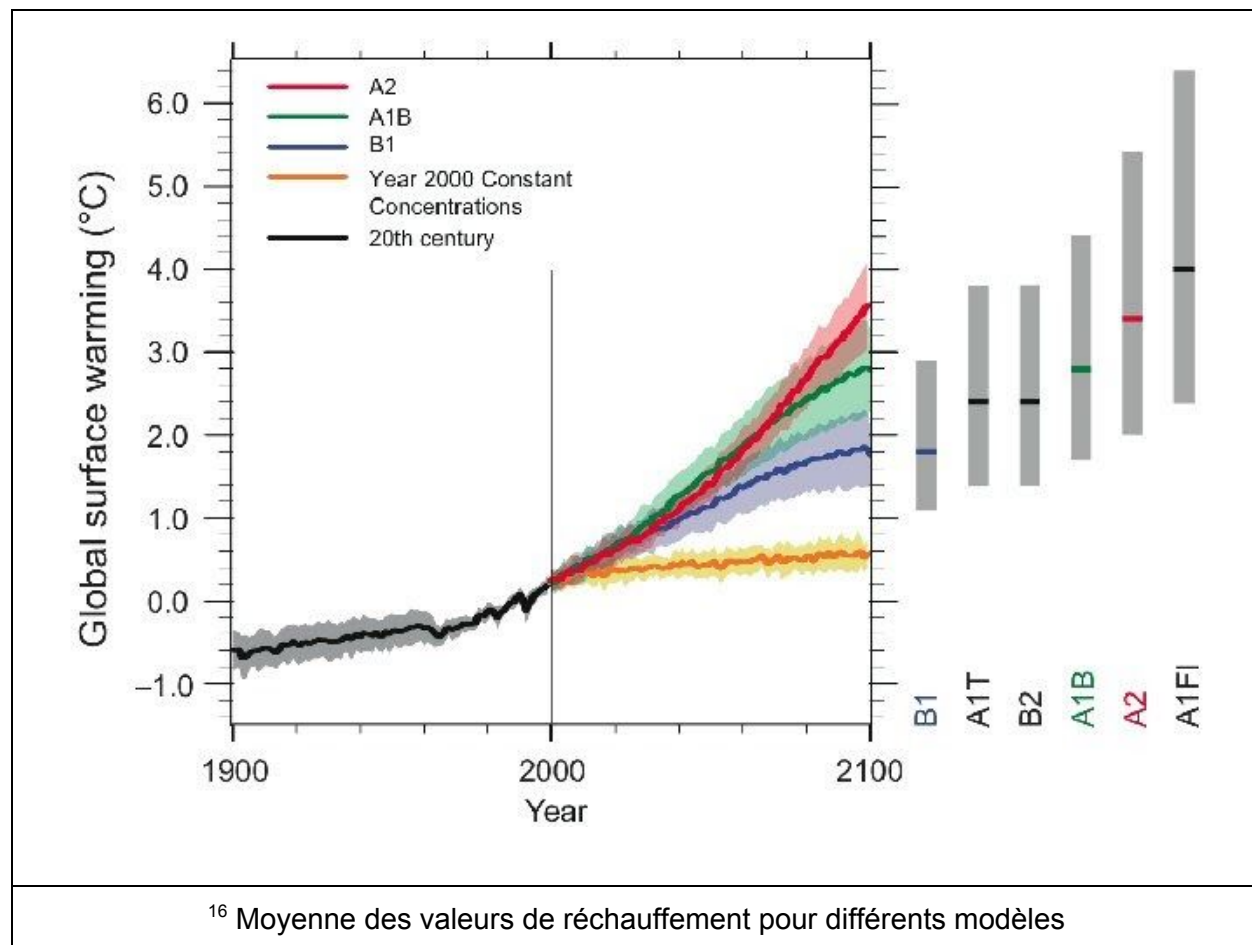
Les conclusions des modèles du rapport AR4 sont en accord avec celles du rapport précédent.



Les scénarios ci-dessus donnent différentes possibilités sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours du 21^{ème} siècle. Ces scénarios appelé SRES ont été utilisés pour l’élaboration du rapport AR4.

¹⁵ Source <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/climat/climats-de-la-terre>

Une fois que ces scénarios sont entrés dans le modèle de réchauffement climatique utilisé par le GIEC on obtient la courbe suivante :



Les résultats obtenus démontrent que même si la concentration en GES n'augmente plus alors il y aura tout de même un léger réchauffement de la surface mondiale mais qu'en fonction de l'évolution de la concentration de ces gaz dans l'atmosphère la température peut fortement monter (avec le scénario A2 jusqu'à 4°C supplémentaire en 100 ans mais d'autres scénarios ont donné des résultats encore plus élevés).

Toutefois, les incertitudes et les fourchettes supérieures de température sont plus grandes. Cela s'explique essentiellement par le fait que, selon l'éventail élargi des modèles maintenant disponibles, les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone seraient plus fortes qu'on ne l'anticipait. Le réchauffement nuit à la fixation du CO₂ atmosphérique dans les terres et les océans, augmentant ainsi la partie des émissions anthropiques qui reste dans l'atmosphère. Dans ce rapport on nous prévient en plus qu'il y aura :

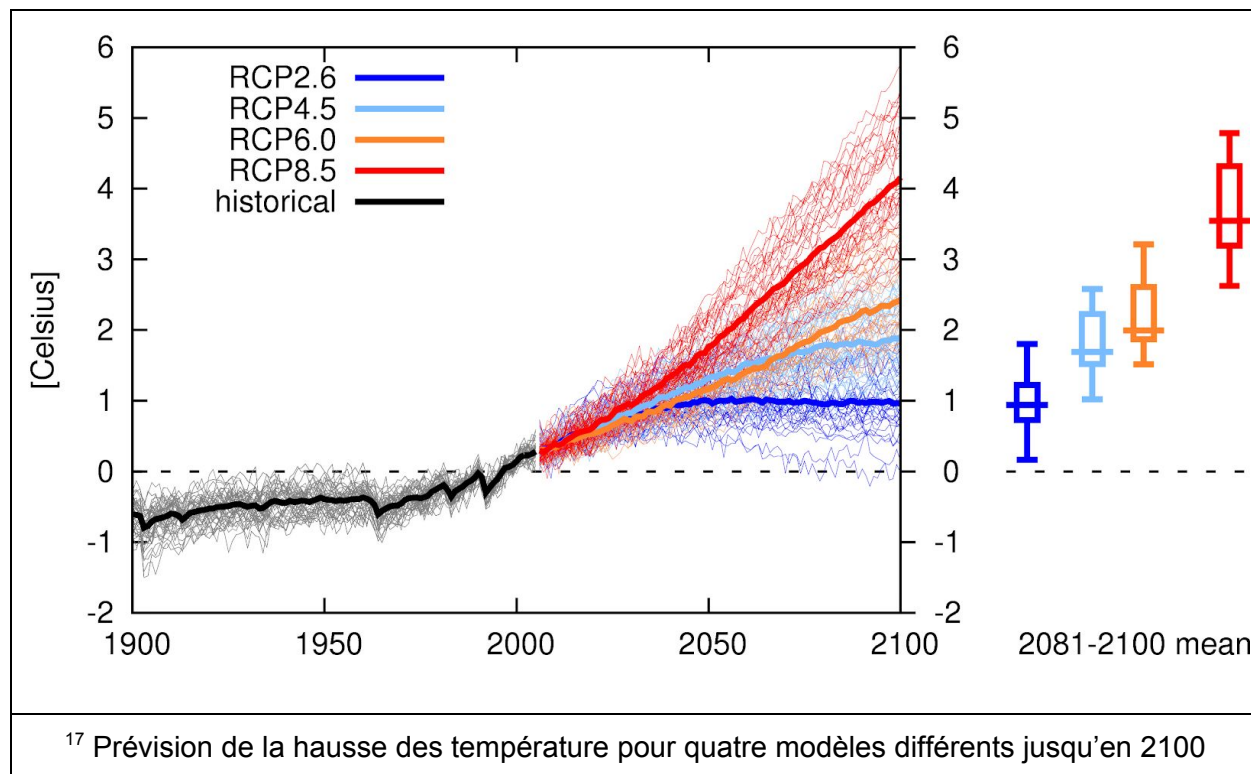
¹⁶ Source <https://www.skepticalscience.com/lessons-from-past-climate-predictions-ipcc-ar4.html>

- un réchauffement maximal sur les terres émergées et dans la plupart des régions des hautes latitudes de l’hémisphère Nord et un réchauffement minimal au-dessus de l’océan Austral et d’une partie de l’Atlantique Nord ;
- une contraction de la couverture neigeuse, une augmentation d’épaisseur de la couche de dégel dans la plupart des régions à pergélisol et une diminution de l’étendue des glaces de mer. Les eaux de l’Arctique seraient pratiquement libres de glace à la fin de l’été d’ici la deuxième moitié du XXI^e siècle (selon certaines projections obtenues avec les scénarios SRES);
- une hausse très probable de la fréquence des températures extrêmement élevées, des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations ;
- une augmentation probable d’intensité des cyclones tropicaux et, avec un degré de confiance moindre, une baisse du nombre de cyclones tropicaux sur l’ensemble de la planète ;
- le déplacement vers les pôles de la trajectoire des tempêtes extratropicales, accompagné de changements dans la configuration des vents, des précipitations et des températures ;
- une augmentation très probable des précipitations aux latitudes élevées et, au contraire, une diminution probable sur la plupart des terres émergées subtropicales.

De plus les modèles utilisés pour ce rapport sont plus précis au niveau régional que les anciens. Grâce à cela on apprend que certains systèmes, secteurs et régions seront plus durement touchés que d’autres par l’évolution du climat. Par exemple certains écosystèmes vont être très impactés comme les régions montagneuses et la toundra en raison d’une forte sensibilité au réchauffement de la planète (fonte des glaces) mais aussi les côtes et petites îles qui vont probablement se faire engloutir à cause de la montée des eaux ou être sévèrement impactées par des inondations fréquentes. Les secteurs de l’agriculture seront particulièrement touchés en raison de nombreuses sécheresses et pluies torrentielles. Les populations disposant d’une faible capacité d’adaptation vont-elles aussi être durement touchées par les conséquences du réchauffement climatique.

Intéressons-nous aux derniers rapports du GIEC datant de 2013. Dans ce rapport, 4 scénarios ont été utilisés : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5. Le scénario RCP 2.6, qui implique de fortes réductions d’émissions de GES par la communauté internationale, est une nouveauté de ce rapport. Le RCP8.5 est le plus pessimiste, mais c’est un scénario probable car il correspond à la prolongation des émissions actuelles. Ces scénarios d’émissions ont été calculés d’une nouvelle manière dans le but de réduire les incertitudes. Au lieu de s’appuyer sur des postulats socio-économiques pour en déduire les différents niveaux d’émission de gaz à effet de serre comme pour les scénarios précédents (SRES par exemple), les nouveaux scénarios sont établis en fixant différents niveaux de déséquilibre énergétique des zones étudiées et en leur attribuant des niveaux de concentration en GES correspondant, puis grâce à cela il est possible de déduire les scénarios d’émissions de GES (puis les scénarios socio-économiques). A nouveau certains résultats des précédents rapports vont être modifiés.

Les scénarios qui prévoient une stagnation des émissions de GES montrent que cela ne suffirait pas à faire stagner le réchauffement de la planète. Seul le scénario le plus optimiste (RCP2.6) donne des résultats inférieurs à 2°C supplémentaires pour 2100 comme en témoigne le graphique ci-dessous.



De plus pour la première fois les résultats obtenus avec les derniers modèles permettent aux scientifiques d'affirmer que le réchauffement climatique actuel est bien d'origine humaine. Le précédent rapport estimait déjà que cette probabilité (à hauteur de 90% de certitudes) et les rapports précédents estimaient qu'il y avait 50 à 60% de chance que ce soit le cas. A partir du 5^{ème} rapport pour les scientifiques il n'y a plus aucun doute.

Donc d'après les derniers rapports du GIEC à moins que nous limitions fortement nos émissions de GES, les températures vont fortement augmenter au cours de ce siècle et même de ceux à venir. Elle devrait augmenter d'environ 0.5 °C entre aujourd'hui et 2035, et de minimum 2°C à environ 5.5°C au supplémentaires maximum d'ici 2100. De plus, les effets refroidissants des aérosols sont revus à la baisse et sont donc très loin de compenser le réchauffement dû à l'industrie. Ce réchauffement d'origine humaine va entraîner une fonte des glaces importante. L'impact de la fonte des glaces du Groenland et de l'Antarctique serait plus important que prévu. En effet, la banquise Arctique pourrait disparaître d'ici 2100 avec une augmentation de température de seulement 2°C. La couverture neigeuse pourrait diminuer à hauteur de 25%, et jusqu'à 85% des glaciers pourraient disparaître.

¹⁷ Source <https://global-climat.com/2015/12/21/la-sensibilite-climatique-reevaluee-par-la-nasa/>

A cause de ses phénomènes les gaz pris au pièges dans la glace (notamment CO₂ et méthanes) vont être libérés dans l’atmosphère et ainsi accentuer le réchauffement de la planète (c’est le principe de la rétroaction). De plus le niveau des mers va augmenter de 17 centimètres dans un scénario optimiste et de 38 centimètres dans le scénario le plus pessimiste entre 2046 et 2065. A la fin du 21^{ème} siècle, la mer pourrait augmenter de 40 centimètres en moyenne dans le plus optimiste des scénarios. Dans le scénario le plus pessimiste, cette hausse pourrait atteindre 82 centimètres au cours de la période 2081-2100 et 98 centimètres en 2100. Si cela s’avère vrai, entre 600 et 700 millions de personnes sont directement menacées par cette montée des eaux. Pour le reste, le dernier rapport est en accord avec le rapport précédent.

b. La fiabilité des modèles

Maintenant que nous connaissons les conclusions apportées par les derniers modèles à la pointe de la technologie il est important de savoir s’ils sont fiables. Bien que la grande majorité des scientifiques qui étudient l’évolution du climat s’accordent à dire que nous pouvons nous y fier, certaines personnes sèment le doute dans l’opinion publique. Certains disent que les modèles sous-estiment le réchauffement de la planète tandis que d’autres affirment que ce réchauffement d’origine humaine n’est que pur spéculation.

Premièrement, il est important de comprendre que les modèles n’ont pas pour but de ne donner des faits climatiques précis sur du court-terme mais plutôt de fournir les tendances les plus probables de l’évolution du climat à une assez grande échelle de temps (échelle minimum d’environ trente ans). C’est pourquoi les scientifiques utilisent les scénarios pour fournir plusieurs possibilités de cette évolution. Mais ces scénarios ne sortent pas de nul part non plus. Comme il a déjà été vu dans la partie précédente, les scénarios sont calculés à partir de faits socio-économiques pour en conclure différents niveaux d’émissions de gaz à effet de serre possibles ou d’une autre manière pour les derniers scénarios RCP (voir partie précédente). En plus de cela, ils sont en accord avec les tendances d’évolution des GES des dernières années. En effet les scientifiques ont montré que la température moyenne a augmenté d’environ 0.6°C au cours du 20^{ème} siècles, le niveau global des mers s’est élevé ainsi que la charge thermique des océans. On constate également une réduction de la couverture neigeuse et de la quantité de glace (que l’on peut notamment constater grâce aux images satellite). La quantité des gaz à effet de serres aurait considérablement augmenté depuis 1750 avec une augmentation de 31% des gaz carbonique et surtout une augmentation de 151% de la quantité de méthane dans l’atmosphère. Toutes ces estimations viennent confirmer que le climat mondial est en train de considérablement se modifier et que l’activité humaine est en majorité responsable de ce dérèglement climatique.

Ensuite il faut savoir que les modèles sont énormément testés et de plusieurs manières. D’abord on teste la fiabilité des modèles à reproduire le climat passé et ce à différentes échelles de temps. Ils sont testés avec les données climatiques que l’on a mesuré au cours du 20^{ème} siècle. Il s’avère que les résultats sont très bon. En effets les modèles parviennent très bien à

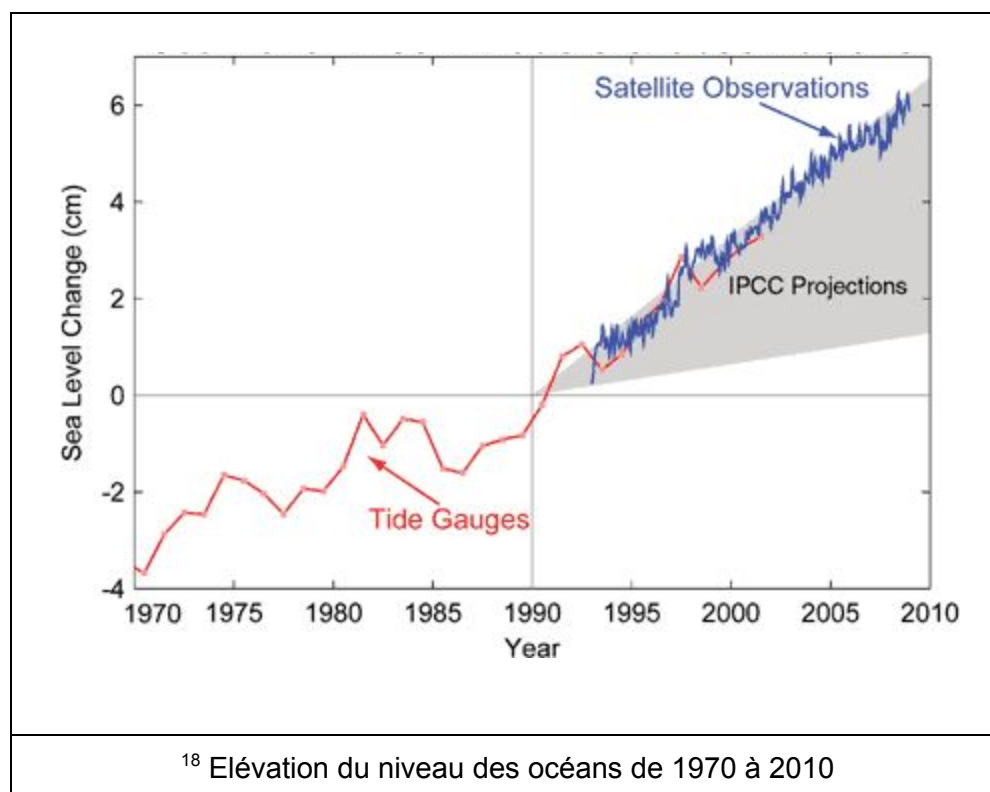
reproduire le climat du 20^{ème} siècle comme le prouve d'ailleurs le schéma (mettre le nom ici) dans la partie précédente où l'on constate que les estimations des modèles sur l'évolution de la température sont complètement en accord avec les données mesurées. Ensuite ils sont également testés sur des climats encore plus vieux comme par exemple les derniers 1000 ans. Les scientifiques utilisent des archives « naturelles » c'est-à-dire des carottages, des sédiments océaniques ou bien des carottages de la glace pour en déduire les climat passés. Il est possible de mesurer par exemple la teneur en CO₂ piégé dans la glace que l'on sait former il y a plusieurs centaines d'années, ou bien d'analyser les sédiments océaniques pour savoirs quelles plantes ou animaux vivaient à une certaines époques et donc en déduire le climat de cette époque. Il est de plus facile de dater les sédiments que l'on analyse grâce à la vitesse d'expansion océanique à peu près constante. En plus de ses archives naturelles il existe aussi quelques archives historiques du climat des derniers mille ans. Grâce à cela il y a peu de doutes sur les conditions climatiques de ces années et encore une fois les modèles parviennent assez bien à reproduire ce climat. Il n'existe aucune incohérence majeure entre les archives et les résultats des modèles. C'est notamment grâce à ces données sur l'époque préindustrielle et grâce à la concordances entre la quantité d'énergies fossiles utilisée et l'augmentation de la concentration en carbone 13 et 14 dans l'atmosphère que les experts s'appuient pour démontrer l'implication de l'Homme dans le réchauffement climatique. Et pour finir, les modèles sont également testés sur des aires climatiques complètement différentes de la nôtre, c'est-à-dire des aires glaciaires où l'eau était rare et que la glace dominait la terre notamment grâce à une faible teneur en CO₂ de l'atmosphère et à une distance entre le soleil et la terre plus importante ; et à l'inverse des périodes bien plus chaudes où la glace était rare et le CO₂ plus présent dans l'atmosphère comme au jurassique par exemple. Et encore une fois aucune incohérence n'est observée.

Puis, les modèles climatiques sont aussi testés en simulant divers phénomènes possibles. Les experts ont, entre autres, simulé un éloignement de la Terre par rapport au soleil pour voir les réactions des modèles. Ils ont fait les mêmes essais pour différents phénomènes, par exemple une modification de l'inclinaison de la Terre par rapport au soleil, mais aussi des phénomènes ponctuels comme une éruption volcanique. L'éruption du mont Pinatubo a permis aux modalisateurs de tester l'exactitude de leurs modèles en ajoutant à ceux-ci les données provenant de l'éruption. Ils ont alors prédit avec exactitude la réponse climatique après l'explosion volcanique. Des modèles ont également prédit correctement les effets d'autres éruptions par la suite. On vérifie aussi que certains effets sont bien modélisés aussi comme la formation des nuages avec la chaleur. A chaque fois, les experts du climat étaient d'accord avec les résultats des modèles à chaque simulation.

En plus de tous ces tests, des physiciens de l'université de Berkeley ont repris et vérifié tous les algorithmes et les données des modèles pour ôter tout doute sur d'éventuelles erreurs dans les modèles ou les données météorologiques utilisées. Par ailleurs ces physiciens ont obtenu exactement les mêmes résultats que les modèles originaux.

Avec toutes ces vérifications, la majorité de la communauté scientifique s'accorde à dire que les modèles climatiques utilisés dans les derniers rapports sont fiables. Cependant certains pensent que les modèles sous-estiment les effets du réchauffement climatique tandis que d'autres pensent toujours que le réchauffement d'origine humaine n'existe pas, on appelle ces derniers les climatosceptiques. Ces personnes qui ne croient pas à l'implication de l'Homme dans les changements climatiques s'appuient sur plusieurs incertitudes pour tenter de décrédibiliser les modèles et les experts du climat, mais ils n'apportent aucune réelle preuve que l'Homme n'est pas impliqué. Ils s'appuient sur plusieurs faits.

Premièrement, le fait qu'il est impossible à l'heure actuelle de fournir une preuve absolument irréfutable de l'importance de l'homme dans le dérèglement climatique. En effet bien que les experts estiment que l'Homme est en grande partie responsable du réchauffement planétaire ils ne peuvent pas l'affirmer à 100%. Les dernières estimations donnent néanmoins des certitudes de cette implication de l'ordre de 90%.



Deuxièmement, ils critiquent les trop fortes incertitudes des conclusions des modèles ainsi que le nombre de scénarios différents utilisés. Ils impliquent que les conclusions dépendent totalement des scénarios utilisés et qu'avec un si grand nombre de scénarios il est possible de « faire dire n'importe quoi aux modèles ». Ils précisent également que les tests effectués grâce aux données du passé sont limités aux données que l'on a de l'époque et ne sont donc pas infaillibles. Il est vrai que les conclusions dépendent des scénarios. C'est pourquoi il est important de préciser que les modèles ne donnent pas un seul avenir possible au

¹⁸ Source <https://skepticalscience.com/translation.php?a=15&l=12>

climat. Ils servent plutôt à montrer ce qui pourrait se produire si un scénario s’avère exact mais il est impossible de prévenir l’avenir et donc dire quel scénario est le plus exact. Cependant, même avec des scénarios optimistes les conclusions tendent toutes à démontrer que la planète se réchauffe, les conclusions convergent. De plus il est quand même possible d’estimer la probabilité qu’un scénario s’avère exacte avec les tendances climatiques et politiques actuelles ainsi que celles du passé.

Troisièmement, tout comme certains scientifiques, ils craignent que les modèles climatiques soient « trop linéaires ». En effet, beaucoup d’aspects de la réponse du climat à une perturbation sont proportionnels à cette perturbation radiative et il est possible que les choses soient en réalité plus complexes. Actuellement les modélisateurs tentent d’améliorer cet aspect de leurs modèles.

D’autres au contraire, pensent les modèles climatiques actuels pourraient sous-estimer les changements climatiques à long-terme. En effet selon une analyse de périodes climatiques passées publiée dans Nature Géoscience par 59 chercheurs de 17 pays la situation climatique serait plus dramatique qu’il n’y paraît. Il en ressort que les calottes polaires vont se réduire significativement pour plusieurs millénaires et que cette fonte des glaces devraient libérer plus de gaz à effet de serre que ce que prédisent les modèles et donc entraîner un réchauffement de la planète encore plus important. Il est vrai qu’il est très difficile de modéliser les phénomènes de rétroaction. Cette étude s’appuie sur des faits passés à des époques chaudes qui ne furent pas causées par une augmentation du CO₂ atmosphérique. Cependant, elle reste intéressante pour comprendre les effets possibles d’une augmentation de la température et on ne peut donc pas affirmer que cette étude est infondée. Elle confirme d’ailleurs beaucoup des conclusions données par les modèles comme la migration des écosystèmes et des zones climatiques vers les pôles. Mais, il semblerait que les effets d’une augmentation de seulement 2°C (comme le prédit le scénario RCP2.6) aura des conséquences bien plus fortes sur la montée des eaux également. En plus de cette études, certaines des mesures récentes viennent confirmer cette hypothèse. Le graphique ci-dessous nous donne l’évolution du niveau de la mer depuis les années 1970.

Comme nous pouvons le remarquer il est exact que les projections du troisième rapport du GIEC (ici en gris) ont légèrement sous-estimé cette augmentation du niveau de la mer (que l’on peut voir grâce au données marégraphiques en rouge et données satellites en bleu).

On peut donc en conclure grâce notamment aux observations passées et aux nombreux tests effectués sur les modèles que ces derniers semblent fiables si l’on comprend qu’il prédisent pas l’avenir mais donnent des possibilité d’évolution du climat. De plus d’après des recherches récentes ils auraient plus tendance à sous-estimer le réchauffement climatique plutôt qu’à le surestimer. Aucune raison concrète en tout cas pour dire que le réchauffement climatique n’est pas en grande partie d’origine humaine.

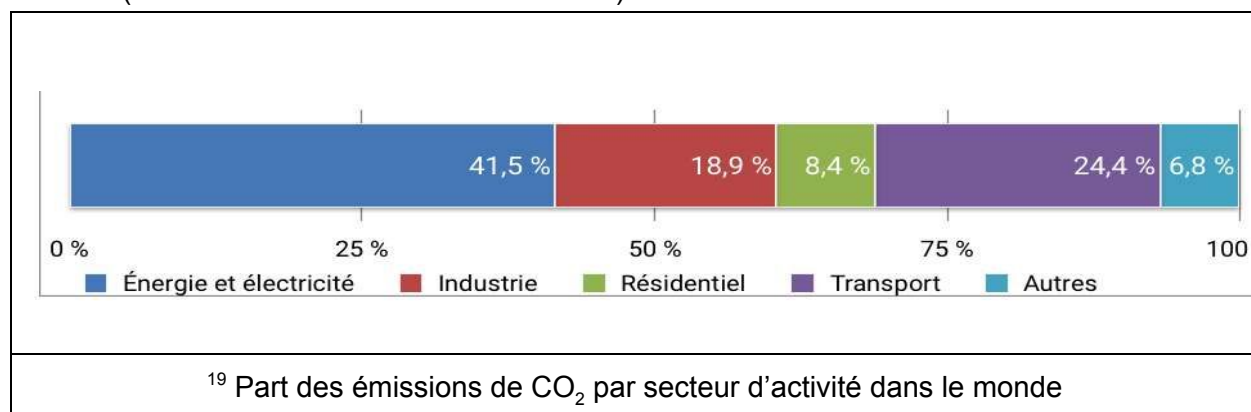
Partie III : Nos modèles

A. Modélisation de la variation de la quantité de CO₂ dans l'air

Pourquoi ne modéliser que les émissions de CO₂? Bien qu'il existe d'autres gaz responsables du réchauffement terrestre, nous avons décidé de modéliser l'effet de serre au moyen de l'effet albédo. Pour ce faire nous devons étudier les variations de ces quantités de gaz à effet de serre (GES). Comme le CO₂ représente presque 70% des GES produits par l'Homme il nous est apparu alors intéressant de nous concentrer sur sa variation. De plus, beaucoup d'études ont montré la corrélation entre la variation de CO₂ et la variation de la température. Nous avons donc étudié de manière générale les secteurs où la production de CO₂ est la plus importante à fin de nous rapprocher de la véritable quantité de CO₂ libérée dans l'air chaque année.

Nous savons aussi que ne considérer que le CO₂ induirait obligatoirement d'importantes erreurs de calcul. Aussi nous avons décidé de faire l'étude de la variation de la température à la surface de la Terre sur une épaisseur de 12 km pour ne conserver que certains gaz : le CO₂ (densité importante, plus lourd que l'air), le O₂ et le N₂ qui occupent tous deux une proportion conséquente de la composition de l'air avec 21% de O₂ et 78% de N₂. Ainsi, nous obtenons des degrés de liberté et de présence du CO₂ dans l'air beaucoup plus précis.

Dans l'objectif de créer un programme totalement autonome, nous avons décidé de modéliser nous-même la variation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Pour cela, nous avons étudié les principaux secteurs polluants. Nous avons regroupé les émissions du milieu de l'industrie qui représentent 18,9% des émissions de CO₂, les transports par véhicule terrestre (14% des émissions) et la variation de la respiration en fonction de l'évolution de la population mondiale (6% des émissions de CO₂ en France).

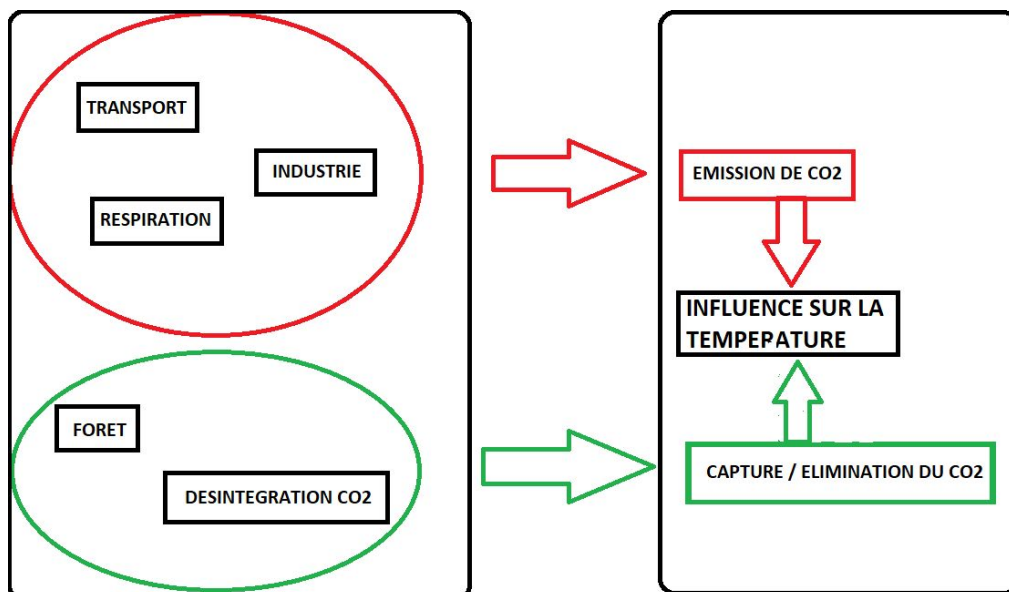


¹⁹ Source

<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/pollution-transport-co2-part-emissions-1017/>

Néanmoins, la variation de la quantité de CO₂ ne vas pas qu’à la hausse; en effet certains organismes et procédés naturels permettent d’éliminer le CO₂ comme par exemple la capture du CO₂ par les végétaux.

La première étape de la conception de notre algorithme a été de planifier notre travail:



Dans le bloc de gauche, nous avons deux catégories : les polluants en rouge et les désintégrateurs en vert. Ces deux catégories font varier la concentration en CO₂ dans notre atmosphère. Ce bloc sera décrit dans la partie “ Modélisation de la variation de la quantité de CO₂ dans l’air ”.

Dans le bloc de droite, nous avons la condensation des valeurs obtenues dans le bloc gauche, et leur impact sur la température. Ce bloc sera décrit en fin de partie “ Modélisation de la variation de la quantité de CO₂ dans l’air ” et dans la partie “ Expression de la température ”.

1) Variation de la population et de la respiration

Pour commencer nous avons décidé de coder la variation de dioxyde de carbone par rapport à un facteur simple et fiable : la respiration humaine. Certes, cette variation semble très faible mais il est intéressant de la coder pour enrichir notre programme et le structurer.

Nous avons commencé par coder la variation de la population mondiale dans les 80 prochaines années. D'après nos recherches, la population mondiale devrait croître de manière logarithmique pour atteindre environ 11 milliards d'habitants en 2100. Nous avons décidé de conserver cette prévision car elle a été publiée en 2015 et prévoyait 7.9 milliards d'habitants pour 2020, chiffre qui est en parfait accord avec les recensements mondiaux de cette année. Cette fonction nous renvoie donc un tableau de 80 éléments (2020 à 2100) où chaque case contient l'effectif mondial obtenu à l'année correspondante. Par exemple, la case 9 correspond à l'année 2029 et nous donne la valeur de 9 396 607 306 humains.

```

75 #Variation de la population mondiale
76 x = np.linspace(np.e**(10), np.e**(55/4), 80)
77 y = 8000000000*np.log(x)
78 for i in np.arange(np.e**(10), np.e**(55/4), 11432.03366):
79     pop = 8000000000*np.log(x)
80

```

La respiration d'un humain émet environ 300 kilos de dioxyde de carbone par an. À titre indicatif, la quantité de CO₂ émise par la respiration des Français représente environ 6% des émissions anthropiques de CO₂. On multiplie donc toutes les cases du tableau précédent par 300*10³ pour obtenir un tableau avec les émissions de CO₂ en gramme par an.

```

em_co2 = []
for i in range(0, len(pop)):
    em_co2.append((pop[i]*300*10**3))

```

2) Variation du nombre de véhicules en circulation.

Après avoir codé la variation de la population, nous avons décidé d'imaginer un scénario pour la variation du nombre de véhicules terrestres (voiture, camion...) en circulation. Il nous a paru important de créer un tel scénario puisque le transport représente environ 25% des émissions de CO₂ mondial total.

Nous avons remarqué que la production automobile suivait une courbe d'aspect linéaire depuis 20 ans. Nos recherches ont démontré que la variation du nombre de véhicules produits s'inscrivait parfaitement dans notre estimation et cela pour deux raisons : premièrement, la population mondiale est en pleine croissance depuis les cinquantes dernières années et les pays en voie de développement se voient passer à la troisième phase de la croissance démographique, ce qui s'assimile à une population nombreuse, stable et économiquement florissante. C'est pourquoi le nombre de véhicules produits augmente sans cesse.

Deuxièmement, les normes anti-pollutions incitent les usagers de la route à se convertir aux voitures électriques, ou du moins, plus propres. Cela pose donc le problème du changement de véhicule et donc d'une production supplémentaire. C'est pourquoi, pour les cents prochaines années à venir, nous pouvons approximer la variation du nombre de véhicules en production par une droite affine d'ordonnée à l'origine la production réalisée en 2020 qui est notre donnée de référence.

```
#nombre de véhicules en circulation
voiture = []
for i in range(0,80):
    voiture.append(((37.07*i+1200)*10**6))
```

Une fois qu'on a la variation du nombre de véhicules mondial en circulation il faut comme précédemment en déduire les émissions de CO₂ de ces véhicules. On sait qu'on a une moyenne d'émission de CO₂ de 120 g/km et on supposera celle-ci constante. Ensuite le nombre de kilomètres moyen parcouru par un véhicule est de 20 000 kilomètres par an. On supposera ce nombre comme étant aussi une constante. A partir de tous ces paramètres on peut calculer les émissions de dioxyde de carbone émises par an.

3) Variation de l'industrie et de l'agriculture

En effectuant nos recherches, nous avons trouvé un relevé des différentes valeurs de variation de la quantité de CO₂ en million de tonnes durant les cinq dernières années. De ces observations, nous avons pu déduire une courbe approximative des variations de la quantité de CO₂ et, en mettant en corrélation avec ces prévisions une hypothèse de développement de l'industrie et des terrains agricoles, nous avons conservé notre formule hypothétique de développement à savoir : $\sqrt[3]{\frac{1}{x}} + 170$

En effet, nous avons constaté que les émissions tendent vers 170 millions de tonnes de CO₂. Même si les terrains agricoles cessent leur expansion, et que leur exploitation devient biologique, les besoins en énergie ainsi que le coût de l'industrie restent trop important pour que leurs émanations deviennent moindres.

```
em3_co2_ppmv = [(317*10**12)/1870/(5.108654936769006e+18)]
em3_co2 = [(317*10**12)/44.0095]
for i in range(1,80):
    em3_co2.append((((1/i)**(1/3)+170)*10**12)/44.0095)
moles
em3_co2_ppmv.append((((1/i)**(1/3)+170)*10**12)/1870*10**6/(5.108654936769006e+18))
```

#liste en
#liste en ppmv

4) Variation de la surface des forêts dans le monde

Les chercheurs ont calculé la quantité de CO₂ capturée par les forêts boréales, tempérées et tropicales pour conclure que :

- Entre 1990 et 2007, la photosynthèse a permis de stocker 2,4 milliards de tonnes de carbone dans la biomasse et dans les sols des forêts par an ,
- 1,2 milliards de tonnes de CO₂ sont capturées par la couverture forestière primaire d'Amazonie, d'Indonésie et d'Afrique centrale chaque année.
- Les zones tropicales représentent la moitié du puits tropical mondial des forêts adultes.

Nous avons supposé que tout type de forêt absorbait la même quantité de dioxyde de carbone, que ce soit la forêt tropicale, tempérée ou boréale. Pour écrire le scénario de l'évolution future de la surface mondiale des forêts, nous avons d'abord regardé l'évolution de la surface des forêts mondiales entre 2010 et 2019. Nous en avons conclu que cette évolution décrit environ une fonction affine, décroissante. C'est pourquoi nous avons décidé de supposer que cette évolution allait continuer ainsi.

```
#arbre
surface = []
for i in range(10,90):
    x = -1733.333 * i + 3.841*10**6
    surface.append(x)
```

A partir de cette fonction nous avons pu en conclure l'évolution de la quantité de CO₂ capturée par les forêts dans le monde.

```
ca_co2 = []
for i in range(0,80):
    x = ((2.4*10**9 * surface[i])/3841000)
    ca_co2.append(x)
```

5) Elimination du CO₂ dans l’atmosphère

D’après nos recherches, le CO₂ se désintègre en 100 ans grâce aux radiations solaires. La plupart de cette quantité est dissoute dans les océans, alors qu’une autre partie est absorbée par les muqueuses des êtres vivants et une autre, comme nous l’avons vu, par les arbres. Enfin les photons d’énergie solaire peuvent aussi désintégrer les molécules de CO₂ en les excitant avec une trop forte charge. Nous avons décidé d’assimiler tous ces phénomènes d’élimination du CO₂ à une élimination globale et naturelle. Au lieu de générer plusieurs codes qui auraient eu pour but de désintégrer le CO₂ au bout de 100 ans, nous avons décidé d’éliminer la production de CO₂ d’une année à l’autre mais après une durée de 100 ans. Ainsi la production entre 1920 et 1921 sera totalement dissoute en 2021 et on retire cette production à la variation de CO₂ de 2021.

```
##### Elimination du CO2 déjà présent dans l'atmosphère
#concentration en CO2 de 1920 à 2000 en ppmv:
co_co2_1920_2000_ppmv = [305,305,305,308,307,307,307,308,310,309,309,309,310,311,312,
                        311,310,312,313,314, 312,314,313,314,314,313,315,313,314,314,314,
                        315,315,315,314,314,315,316,317,318,317]
for i in range(0,40):
    x = 1.575 * i + 317
    co_co2_1920_2000_ppmv.append(x)

co_co2_1920_2000 = []
for i in range(0,len(co_co2_1920_2000_ppmv)):
    co_co2_1920_2000.append(co_co2_1920_2000_ppmv[i]*5.108654936769006e+18*10**3*1870/10**9/44.0095)

elimination_ppmv = [0]
for i in range(1,80):
    elimination_ppmv.append(co_co2_1920_2000_ppmv[i] - co_co2_1920_2000_ppmv[i-1])

elimination_mole = [54287585389.41642]
for i in range(1,80):
    elimination_mole.append(elimination_ppmv[i]*5.108654936769006e+18*10**3*1870/10**9/44.0095)
```

6) Condensation de ces valeurs

A partir des codes précédents nous obtenons plusieurs tableaux de 80 sections correspondant aux années entre 2020 et 2100 des différents facteurs :

- (i) Emission de CO₂ en fonction de la variation de la population et donc de la respiration
- (ii) Emission de CO₂ en fonction des transports routiers et leur évolution
- (iii) Emission de CO₂ en fonction l'industrie, l'agricole, la production d'énergie et le traitement des déchets
- (iv) Capture de CO₂ en fonction de la surface des forêts mondiales
- (v) Elimination du CO₂ dans l'atmosphère par an

A partir de ces tableaux nous devons obtenir deux tableaux par catégorie (respiration, transport,..) l'un ayant pour unité la mole et l'autre ayant pour unité le ppmv. Nous utilisons donc deux fonctions pour obtenir ces listes :

```
def GrammeAMole(tab_kilo):
    tab_mole = []
    for i in range(0,80):
        tab_mole.append((tab_kilo[i]*10**3)/44.0095)
    return tab_mole

def GrammeAppmv(tab_kilo):
    tab_ppmv = []
    for i in range(0,80):
        tab_ppmv.append(((tab_kilo[i]*10**3)/1870)*10**9/(5.108654936769006e+18*10**3))
    return tab_ppmv
```

Nous avons maintenant 2 tableaux pour (i), (ii), (iii), (iv), (v). On fait ensuite deux opérations dans une boucle pour les émissions de CO₂ ((i), (ii), (iii)):
On ajoute tous les tableaux en moles entre eux et à l'année i on ajoute le nombre de mole de l'année i-1, avec pour valeur en mole de l'année 2020 : 1.211492002209386e+20. On suppose ici que le CO₂ ne se désintègre pas.

```
# Variations positives de CO2 dans l'air
variation_positive_CO2_ppmv = [410]
variation_positive_CO2 = [1.211492002209386e+20]
for i in range(1,80):
    variation_positive_CO2.append(em_co2[i]+em2_co2[i]+em3_co2[i]+variation_positive_CO2[i-1])
    variation_positive_CO2_ppmv.append(em_co2_ppmv[i]+em2_co2_ppmv[i]+em3_co2_ppmv[i]
+variation_positive_CO2_ppmv[i-1]+410)
```

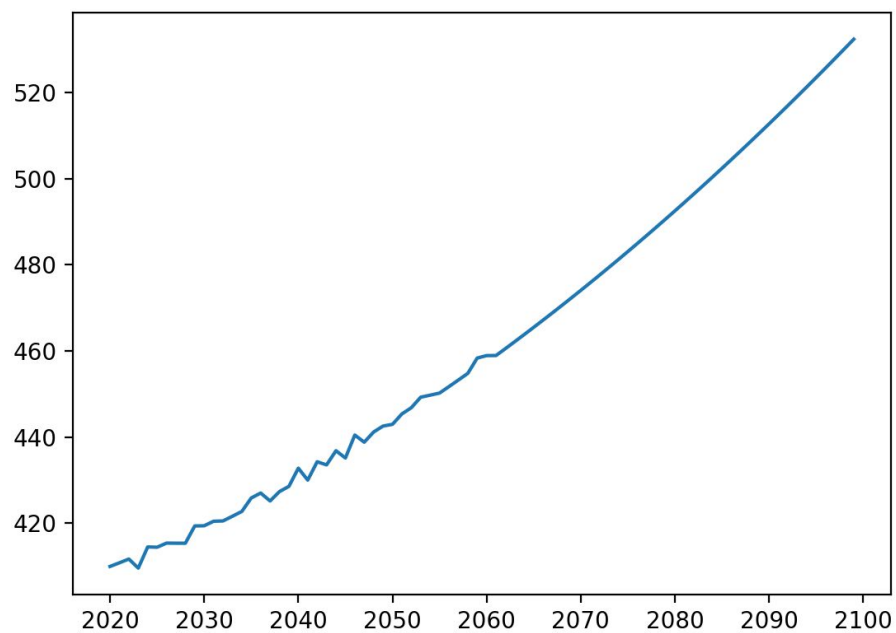
On fait maintenant de même avec l'élimination du CO₂ pour les fonctions (iv) et (v).

```
# Quantité totale de CO2 éliminée chaque année dans l'atmosphère
variation_negative_CO2_ppmv = [0.0002500914151961396]
variation_negative_CO2 =[54287585389.41642]
for i in range(1,80):
    variation_negative_CO2.append(elimination_mole[i]+cap2_CO2[i])
    variation_negative_CO2_ppmv.append(elimination_ppmv[i]+cap2_CO2_ppmv[i])
```

Enfin pour avoir la variation total des émissions de CO₂ en mole on soustrait chaque case des tableaux variation_positive_co2 par variation_negative_co2. Cela nous donne la quantité finale de variation de CO₂ d'une année à l'autre : variation_CO2.

```
# Variation totale
variation_CO2_ppmv = [410]
variation_CO2 = [1.211492002209386e+20]
for i in range(1,80):
    variation_CO2.append(variation_positive_CO2[i]-variation_negative_CO2[i])
    variation_CO2_ppmv.append(variation_positive_CO2_ppmv[i]-variation_negative_CO2_ppmv[i])
```

Au final on obtient cette évolution de concentration en CO₂ en mole :



B. Expression de la température

Après avoir obtenu ces variations de concentration de CO₂ nous pouvons en déduire une variation de température à partir de deux formules.

1) Température du gaz sans influences extérieures

Suite à nos cours de thermochimie du second semestre nous avons remarqué le même lien entre les GES et la température, que les gaz parfait. Dans nos cours de thermochimie, nous supposons que les gaz étaient parfaits. Ici, nous pensons qu'il fallait considérer le CO₂ comme un gaz réel et utiliser les loi des gaz de Van der Waals. Néanmoins, comme une incertitude quant à la définition de ce gaz persistait, nous avons décidé de demander à Monsieur Wolfram Wobrock, doctorant du laboratoire de météorologie physique, s'il fallait utiliser la loi des gaz parfaits ou l'équation d'état de Van der Waals. Après consultation, il nous a conseillé d'utiliser la loi des gaz parfait pour la raison suivante : le volume de la stratosphère est trop grand pour qu'il y ait autant d'interaction entre les molécules que dans l'équation d'état de Van Der Waals.

$$PV = nRT \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en Pa} \\ V \text{ en m}^3 \\ n \text{ en mol} \\ T \text{ en K} \\ R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \end{array} \right.$$

On crée donc un tableau qui va prendre des valeur de température en Kelvin grâce à la loi des gaz parfaits.

```
# Variation de la température en fonction de la pression et du volume occupé par le co2 dans l'air
# Variation_CO2 devra être en % et non en ppm, on aura donc un facteur 10^(-3)
liste_temperature=[]
for i in range(0,len(variation_CO2)):
    n=(quantite_N2+quantite_O2)*(5108654788*10**3/0.022414)+variation_CO2[i]
    liste_temperature.append((10**5*5108654788*10**3)/(n*8.31446261815324))
```

2) Température du gaz due aux rayonnements solaires

Enfin, nous terminerons notre programme par une fonction qui calcul l'élévation de la température en fonction de l'effet de serre par la variation du taux de CO₂ avec deux formules :

- Loi de Stefan : $E = \sigma T^4$
 - σ est la constante de Stéfan-Boltzmann valant $5,674 \cdot 10^{-8}$
 - T est la température absolue en K
 - E l'énergie en W/m²
- $E = \alpha \ln(C/C_0)$
 - $\alpha = 5,35$
 - ln est le logarithme népérien
 - C est la concentration en CO₂ prévue
 - C₀ = 280 ppmv (concentration du CO₂ avant l'ère industrielle)

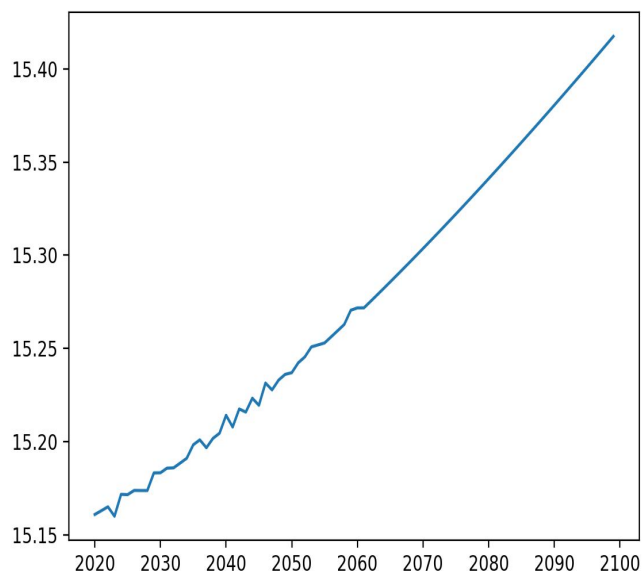
```
#Variation de la température par rapport à la concentration en CO2 dans l'atmosphère.
def variation_temperature():
    # Variation de la température induite par l'effet de serre
    a = 5.35
    o = 5.674*10**-8
    T = []
    for i in range(0,80):
        E = a*np.log(variation_CO2_ppmv[i]/280)
        T.append(((E+390)/o)**0.25)
```

Finalement, on somme nos deux fonctions de température et on convertit les Kelvin en degré Celsius :

```
Temp = []
for i in range(0,len(T)):
    Temp.append([T[i]+liste_temperature[i]-273.15])
```

Voici la courbe d'évolution de la température au cours du temps:

Notre modèle simple nous indique une augmentation d'environ 0.25 degrés Celsius en 80 ans. Cette augmentation, bien que faible par rapport aux modèles du GIEC, s'explique assez aisément. Notre algorithme ne prend en compte que le réchauffement terrestre par effet de serre dû à l'albédo moyen de la Terre. Ainsi, nous avons une première marge d'incertitude due à cette approximation de l'albédo terrestre. Ensuite, bien que le CO_2 représente une part conséquente de la production de GES par l'Homme, c'est l' H_2O qui est responsable à 70% de l'effet de serre. Enfin, il reste encore de nombreux phénomènes non codés qui impactent le climat et qui ont été détaillés en première partie.



Conclusion

Nous avons décidé d'aborder notre problématique “Les modèles climatiques peuvent-ils vraiment nous permettre d'évaluer le climat terrestre” sous trois axes. Pour cela, nous avons décidé de comprendre le fonctionnement réel du climat terrestre. Nous nous sommes ensuite intéressés aux différents types de modèles ainsi que leurs fonctionnements, pour ensuite étudier leurs conclusions et pouvoir débattre sur leur fiabilité et leurs faiblesses. Nous avons finalement décidé de créer par nous-même un modèle simple regroupant les données que nous avons assimilées au cours de ce projet.

Apprendre à connaître les mécanismes des différents phénomènes qui régissent les variations de notre climat nous a permis de comprendre une partie des scénarios que les modèles climatiques prennent en compte pour nous prédire les changements de températures.

Pour connaître le fonctionnement des modèles il a fallu que nous nous intéressions aux différents types de modèles qui existent. D'une part, nous avons étudié la manière dont les scientifiques modélisent la Terre et le climat. D'autre part, nous avons découvert que les modèles se servent les uns des autres. Grâce à cela, nous avons pu comprendre les conclusions données par les modèles et ainsi prendre conscience de la gravité climatique de

notre époque. Mais aussi assimiler les différents points de vue sur l'urgence climatique en étudiant les faiblesses et les atouts de ces modèles de réchauffement climatiques.

Exploiter les données récoltées au cours de ce projet nous a permis d'enrichir nos connaissances sur un sujet d'actualité. Nous avons de même progressé dans la gestion de données, la répartition du travail en équipes, et la mise en pratique de recherches dans un projet concret : le développement de notre programme. Ce programme nous a donné une réponse claire : le climat devrait se réchauffer dans les années à venir. Néanmoins, nous devons d'avoir un regard critique sur nos travaux, car même si nos recherches ont été approfondies afin d'être les plus proches possible de la réalité, elles ne le sont pas rigoureusement. Ceci n'est qu'une preuve parmi d'autres que notre programme n'est pas complet, mais cela prouve aussi que le climat n'est pas quelque chose de simple à manipuler et à estimer.

Finalement, même si de plus en plus de spécialistes se penchent sur la question du réchauffement climatique et sa modélisation en apprivoisant les différentes causes de sa variation, il existe tout de même un risque non nul qu'une variation totalement imprévisible vienne perturber les prévisions. Par exemple, il est difficile de prévoir l'évolution de l'activité humaine pendant des pandémies imprévues comme celle de l'épidémie du Covid-19 qui a considérablement réduit les émissions de CO₂ mais ceci était imprévisible pour les scientifiques ayant conçu les modèles.

Remerciements

Pour terminer ce rapport nous souhaitons adresser un remerciement particulier pour notre tuteur de projet, Monsieur Lengagne, qui nous a assisté et conseillé pendant l'année et demi où nous avons travaillé sur ce projet.

Merci aussi à Monsieur Wobrock pour l'aide qu'il nous a apporté dans le domaine chimique afin de réaliser notre modèle.

Sources partie I :

- ❑ <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-rechauffement-climatique-albedo-compense-deforestation-34176/>
- ❑ <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/effet-de-serre/effet-de-serre-naturel/le-bilan-radiatif-de-la-terre.aspx>
- ❑ https://www.google.com/amp/s/amp.lefigaro.fr/vox/monde/2017/12/28/31002-20171228ARTFIG00147-rechauffement-climatique-quels-enjeux-geopolitiques.php*
- ❑ <https://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/FIsun.html>
- ❑ <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/milankovitch.xml>
- ❑ https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/climat-variations.php#interne
- ❑ <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/volcanologie-volcan-refroidi-terre-8258/>

Sources partie II :

- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Modèle_climatique
- ❑ <https://jancovici.com/changement-climatique/predire-lavenir/quest-ce-quun-modele-climatique-quels-sont-leurs-premieres-conclusions/>
- ❑ <https://www.notre-planete.info/actualites/1180-modeles-climatiques-realite-changement-climatique>
- ❑ <https://interstices.info/modeles-globaux-ou-regionaux-comment-zoomer-le-climat/>
- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_d%27experts_intergouvernemental_sur_l%27évolution_du_climat
- ❑ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/travaux-du-giec>
- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Rapport_spécial_du_GIEC_sur_les_conséquences_d%27un_réchauffement_planétaire_de_1.5_°C
- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Premier_rapport_d%27évaluation_du_GIEC
- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Deuxième_rapport_d%27évaluation_du_GIEC

- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Troisième_rapport_d%27évaluation_du_GIEC
- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Quatrième_rapport_d%27évaluation_du_GIEC
- ❑ <http://www.clubdesargonautes.org/climat/cc/chap13bis.php>
- ❑ https://www.actu-environnement.com/ae/news/4e_rapport_GIEC_climat_3912.php4
- ❑ https://fr.wikipedia.org/wiki/Cinquième_rapport_d%27évaluation_du_GIEC
- ❑ <https://leclimatchange.fr/>
- ❑ <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-giec-nous-appren-d-dernier-rapport-rechauffement-climatique-49406/>
- ❑ <https://www.climato-realistes.fr/giec-rapport-sr15-critique-gwpf/>
- ❑ <https://www.youtube.com/watch?v=9QvckfB7F3U>
- ❑ <https://www.youtube.com/watch?v=T4LVXCCmIKA>
- ❑ <https://www.youtube.com/watch?v=gXVxS2rBSeY>
- ❑ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_fr.pdf

Sources partie III :

- ❑ <https://cedric.ringenbach.com/2009/07/19/correlation-entre-co2-et-temperature/>
- ❑ <https://www.planetoscope.com/>
- ❑ <https://fr.statista.com/statistiques/486554/consommation-de-carburant-moyenne-voiture-france/>
- ❑ <https://fr.statista.com/statistiques/1050503/projection-pour-total-global-forest-superficie/>
- ❑ <http://www.leparisien.fr/societe/10-milliards-d-humains-en-2050-voici-a-quoi-ca-pourrait-ressembler-20-06-2019-8098530.php>