

« Les changements climatiques »

Lundi 2 mars et lundi 9 mars 2020
Université de Liège

Deux demi-journées organisées par des étudiants des masters en géographie, orientation *Global Change*, et en sciences spatiales de l'Université de Liège

Dans le cadre du cours « *Les changements climatiques et leurs impacts* », les étudiants des masters en géographie, orientation *Global Change*, et en sciences spatiales de l'Université de Liège organisent les 2 et 9 mars 2020 leur douzième colloque annuel sur le thème des changements climatiques. Dans une série de mini-conférences, ils tenteront de mieux faire comprendre les changements climatiques qui affectent aujourd'hui notre planète et analyseront les impacts possibles sur l'environnement et la société. Leurs exposés aborderont notamment les questions suivantes : La Terre a-t-elle déjà connu des changements climatiques de grande ampleur dans le passé ? Quel climat connaîtra notre planète à la fin du 21^{ème} siècle ? Quelles conséquences aura la fonte de la banquise arctique ? Quels risques représente la fonte des pergélisols ? Quel sera l'impact sur la santé ?

Cette année, deux demi-journées sont organisées. Elles s'adressent principalement aux élèves des classes de 5^{ème} et 6^{ème} année du secondaire, mais sont également ouvertes aux étudiants du supérieur, aux enseignants, aux chercheurs et au grand public. Les inscriptions aux demi-journées sont gratuites.

Merci de compléter le formulaire d'inscription suivant :

<http://rejouisciences.uliege.be/activites/climat/climat-inscription/>

pour vous inscrire ou inscrire votre classe à une ou aux deux demi-journées.

Informations: Louis FRANCOIS, Institut d'Astrophysique et de Géophysique, Université de Liège, Quartier Agora, 19c Allée du Six Août, 4000 Liège. Tél. 04/3669776 ; e-mail: Louis.Francois@uliege.be



Première demi-journée « Les changements climatiques »

Lundi 2 mars 2020, 9h00 à 12h20

Université de Liège

Amphithéâtre de Zoologie, Bâtiment I1

Quai Edouard Van Beneden, 4000 Liège

9h00-9h10 **Accueil et introduction de la journée** (Louis François & Guy Munhoven)

9h20-9h40 **Va-t-on avoir la tête sous l'eau ?** (Marine Ponsard)

Les médias nous disent qu'à cause du changement climatique, le niveau des mers augmente et menace notamment les grandes villes côtières du monde, grands foyers de peuplement ainsi que certains pays tout entiers. Mais concrètement, jusqu'où l'eau va-t-elle monter ? Sommes-nous tous égaux face à cette menace ? Quelles solutions existe-t-il pour nous protéger ?

9h40-10h00 **La fonte de la banquise en Arctique : les conséquences géopolitiques** (Thomas Gérard)

L'arctique est une des régions du monde les plus touchées par les changements climatiques, la fonte de la banquise en est d'ailleurs l'illustration la plus connue. L'évolution de l'environnement arctique ouvre la voie à l'exploitation de ressources stratégiques et à de nouvelles routes commerciales. Cette importance stratégique menace encore d'avantage la région.

10h00-10h20 **Vers un refroidissement brutal de l'Europe de l'Ouest ?** (Cyril Wuest)

Est-il possible que le réchauffement climatique global que nous connaissons actuellement puisse indirectement mener à un refroidissement local, et ce, au niveau de l'Europe ? Par quels mécanismes pourrait-on connaître un coup de froid brutal sur nos terres ? Qu'est-ce que le Gulf Stream et en quoi joue-t-il un rôle prépondérant sur le climat du vieux continent ?

10h20-11h00 **Pause**

11h00-11h20 **Rôle des sols et du sous-sol dans le cycle du carbone** (Elise Dujardin)

Le gaz carbonique est un gaz à effet de serre. Son augmentation dans l'atmosphère est donc une des causes du réchauffement climatique créé par l'homme. Le gaz carbonique est au centre de l'attention avec les énergies fossiles ou la déforestation, mais le carbone est aussi présent dans le sol. Le stockage de carbone dans les sols est un vrai enjeu dans le problème climatique. Pourra-t-il fournir une solution d'atténuation du changement climatique futur ?



Première demi-journée « Les changements climatiques »

Lundi 2 mars 2020, 9h00 à 12h20

Université de Liège

Amphithéâtre de Zoologie, Bâtiment I1

Quai Edouard Van Beneden, 4000 Liège

11h20-11h40 Le climat quand le thermomètre n'existait pas (Clara Lambin)

Comprendre les climats du passé est un élément indispensable pour comprendre ceux du futur et mieux lutter contre le réchauffement climatique. Mais comment faire pour récolter des données de température, précipitation et bien d'autres à des époques où aucun appareil de mesure n'existait encore? Quelles sont les différentes archives climatiques présentes dans la nature? Une fois celles-ci établies, nous nous concentrerons sur deux archives en particulier, à savoir les carottes glaciaires et les cernes d'arbres, ainsi que tous les secrets qu'elles peuvent nous livrer sur les paléoclimats.

11h40-12h00 Vit-on le climat le plus chaud que la Terre ait connu ? (Antoine Bosly)

L'étude des climats via les pollens (et d'autres techniques présentées dans une autre présentation) permet de connaître l'évolution de la biodiversité que la Terre a connue ainsi que sa répartition. Mais des phénomènes externes, indépendants de l'homme tels que les cycles de Milankovitch, influencent aussi fortement le climat et causent des périodes glaciaires et interglaciaires. Quel est le rôle de ces études dans les prévisions du futur et comment le climat terrestre a-t-il évolué ?

12h00-12h20 Conclusions de la journée



Va-t-on avoir la tête sous l'eau ?

Marine Ponsard

Master en sciences géographiques, orientation « global change »

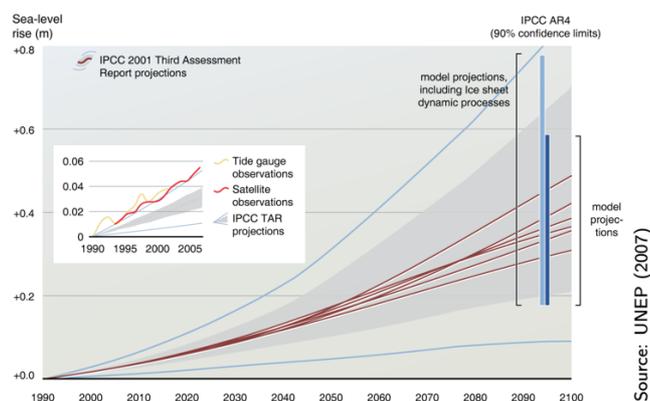
Les causes de la hausse du niveau de la mer

Il existe deux facteurs principaux qui provoquent la hausse du niveau de la mer. Le premier est l'expansion thermique de l'océan. Le changement climatique provoque un réchauffement de l'océan. Or, plus l'eau est chaude, plus elle se dilate. Autrement dit, pour une même quantité d'eau, l'eau chaude « prend plus de place » que l'eau froide. De ce fait, puisque l'eau est plus chaude, le niveau de l'océan et des mers s'élève. Voilà pourquoi le réchauffement climatique provoque une hausse du niveau de la mer, car il réchauffe l'océan.

Le deuxième facteur qui provoque la hausse du niveau de la mer est la fonte des calottes glaciaires (Antarctique, Groenland) et des glaciers continentaux (par exemple, ceux des Alpes, Himalaya, Andes...). Ici, il est important de faire la différence entre cette glace continentale et la glace de mer : cette dernière ne provoque pas de hausse du niveau des mers puisqu'elle est déjà dans la mer. La fonte de la banquise ne contribue donc pas à la hausse du niveau des mers.

La glace continentale représente un stock immense d'eau. Si toute cette glace venait à fondre, le niveau de la mer augmenterait de 73 m (66 m par l'Antarctique et 7 m par le Groenland). Évidemment, cela n'est pas ce qu'il va se produire. Toutefois, ces chiffres permettent de comprendre l'importance de la glace continentale. Or, celle-ci fond de plus en plus suite au réchauffement climatique. L'eau, devenue liquide, se déverse alors dans l'océan provoquant la hausse du niveau de la mer.

Le grand enjeu est actuellement de calculer où se situera le niveau de la mer à l'avenir. Les méthodes de reconstitution des fluctuations du niveau de la mer montrent que le niveau de la mer a déjà été plus élevé dans le passé qu'aujourd'hui. De plus, il existe des modèles qui permettent de calculer quel niveau la mer atteindra à l'avenir. Ces projections prévoient une hausse du niveau de la mer allant de 0,2 m à 1 m.



Il est très important de comprendre que ces chiffres représentent une moyenne à l'échelle planétaire. Certaines régions du monde connaîtront une hausse du niveau de la mer plus importante que d'autres. Les deux cartes ci-dessous, réalisées par le GIEC, montrent ces différences : celle de gauche montre l'évolution du niveau de la mer entre 2046 et 2065, celle de droite entre 2081 et 2100.

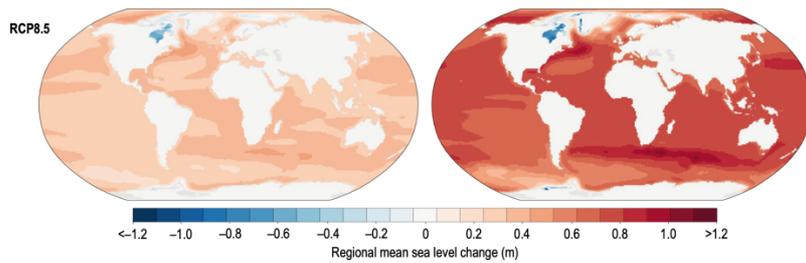


Figure 4.10 | Regional sea level change for RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 in metres as used in this report for extreme sea level (ESL) events. Results are median values based on the values in Table 4.4 for Antarctica including GIA and the gravitational and rotational effects by Church et al. (2013) for glaciers, land water storage (LWS) and Greenland. The left column is for the time slice 2046–2065 and the right column for 2081–2100.

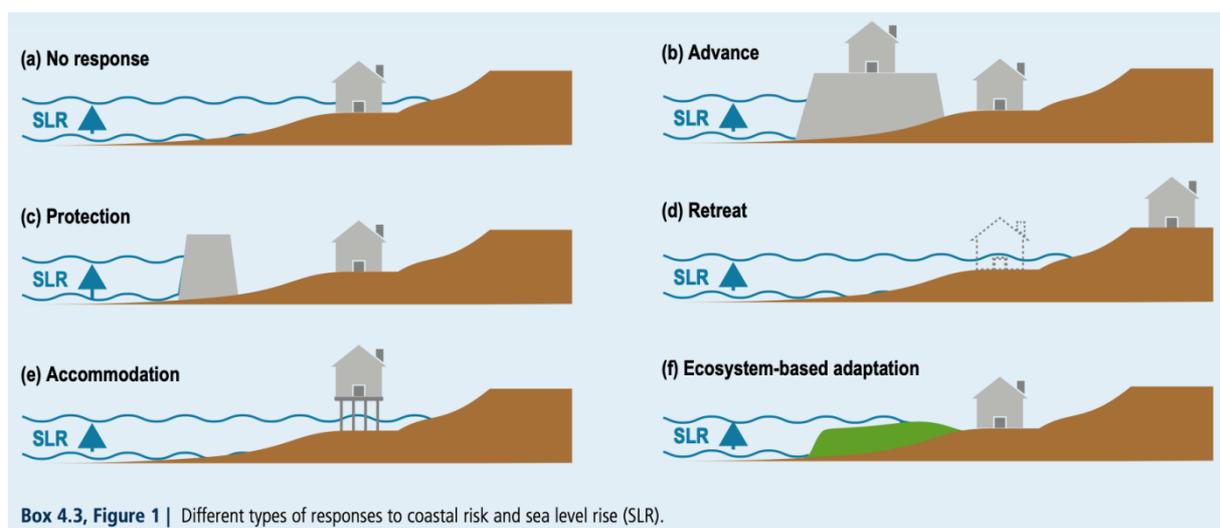
Enjeux économiques et démographiques

Parmi les premières conséquences on trouve, bien évidemment, les inondations côtières. De nombreux pays à travers le monde verront leur territoire diminuer. Tel est le cas du Bangladesh, des Pays-Bas et même de la Belgique. Ces inondations côtières vont donc provoquer une perte de territoire en plus de menacer les nappes phréatiques et les surfaces agricoles situées à proximité du littoral. C'est déjà le cas en Égypte, où la hausse du niveau de la mer rend de moins en moins fertiles les terres du delta du Nil, principale zone agricole du pays à cause de la salinisation du sol.

De plus, de grands foyers de peuplement et d'économie sont menacés. En effet, la future perte de territoire en Europe et Asie représentera une perte économique importante (1000 milliards de dollars en PIB selon l'UNEP). Quant à la population affectée, elle se situera principalement en Asie où elle concernera plus de 100 millions de personnes. Cela engendrera certainement de grands flux migratoires.

Les différentes solutions pour protéger le territoire et la population

Selon la situation, les moyens financiers et la technologie disponibles, les pays font et feront face de différentes manières aux menaces liées à la hausse du niveau des mers. Par exemple, certaines populations choisiront de s'adapter et se protéger. Certains États construiront des protections telles que des digues. C'est notamment le cas des Pays-Bas, qui a déjà construit 17.500 km de digues ! Il est également envisageable d'élever de quelques mètres les maisons en les mettant sur pilotis. La figure ci-dessous (réalisée par le GIEC) montre différentes réponses face à cette menace de la hausse du niveau de la mer.



Box 4.3, Figure 1 | Different types of responses to coastal risk and sea level rise (SLR).

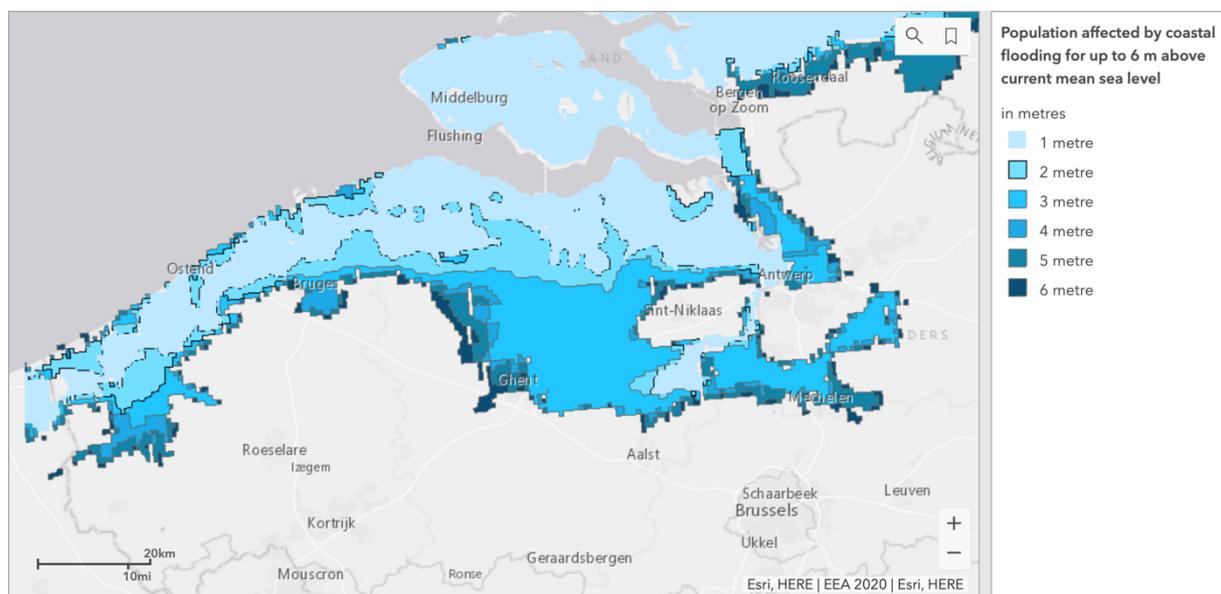
Une autre solution serait la relocalisation de la population et de zones d'habitat. L'exemple le plus important est sans doute la ville de Jakarta, ville côtière et menacée par la

hausse du niveau des mers. En effet, le gouvernement indonésien a pris la décision de déplacer la capitale, située actuellement sur l'île de Java, sur l'île de Bornéo.

Néanmoins, tous les pays ne sont pas égaux face à la menace de la hausse du niveau des mers. Ces solutions, principalement la construction d'infrastructures telles que des digues et d'îles artificielles ne seront sans doute pas accessibles aux pays les plus pauvres, qui éprouveront des difficultés à se protéger et s'adapter (par exemple, le Bangladesh, pays extrêmement menacé par la hausse du niveau des mers, mais très pauvre).

La situation de la Belgique : projections, conséquences et solutions

La Belgique est menacée par la hausse du niveau de la mer. Sur la carte ci-dessous, il est possible de constater qu'une grande partie de la Flandre pourrait être submergée même avec 1 m de hausse seulement. Certaines villes, actuellement situées dans l'arrière-pays, pourraient devenir des villes côtières (p. ex., Bruges). Certaines pourraient même être submergées (Anvers). Cela provoquera sans doute des flux migratoires dans l'avenir. L'État belge a déjà construit des digues afin de protéger le territoire. Néanmoins, cette menace reste un défi pour la Belgique, qui devra entretenir et moderniser ces digues en continu et envisager d'autres solutions.



Pour en savoir plus

- <https://www.geo.fr/environnement/montee-des-eaux-comment-la-hollande-se-prepare-194824>
- https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/hausse-du-niveau-de-la-mer-les-grandes-puissances-menacees-elles-aussi_136751
- <https://www.geo.fr/environnement/le-niveau-des-mers-va-augmenter-meme-avec-l-accord-de-paris-185227>

La fonte de la banquise en Arctique : les conséquences géopolitiques

Thomas Gérard

Master en sciences géographiques, orientation « global change »

L'Arctique est une des régions du monde les plus touchées par les changements climatiques, la fonte de la banquise en étant l'illustration la plus connue. L'évolution de l'environnement arctique ouvre la voie à l'exploitation de ressources stratégiques et à de nouvelles routes commerciales. Cette importance stratégique menace encore d'avantage la région.

La fonte de la banquise

L'organisation météorologique mondiale définit la glace de mer comme toute forme de glace qui résulte de la congélation de l'eau de mer. Toute glace formée à partir d'eau non marine, comme les icebergs ou les glaciers continentaux, n'est donc pas considérée comme de la glace de mer.

La glace de mer se forme par un refroidissement de la surface de la mer au contact de l'atmosphère. Ce refroidissement des couches superficielles induit un mouvement de convection dans l'eau qui mène à un refroidissement de la colonne d'eau. Une fois le point de congélation de l'eau salée atteint, des cristaux de glace se forment.

Les particules de glace s'accumulent progressivement à la surface de l'océan. Celles-ci s'agglomèrent sous l'effet du vent et des vagues, formant progressivement une couche de glace. Les collisions de ces différentes pièces de glace forment la banquise telle que nous la connaissons.

L'étendue de la glace de mer varie de façon cyclique avec les saisons : elle est minimale à la fin de l'été (septembre) et maximale à la fin de l'hiver (mars). Cette variation de l'étendue est due aux cycles naturels de fonte et de formation des glaces de mer. En été, la glace de mer fond et seule une partie est toujours présente en septembre. En hiver, la glace de mer se reforme jusqu'au retour des températures estivales. Les glaces qui persistent à la saison des fontes sont les glaces pérennes ou pluriannuelles.

La fonte de la banquise est l'une des illustrations les plus connues du changement climatique. On observe que l'étendue de la glace de mer a diminué quel que soit le mois de l'année et particulièrement en été. La proportion de glace de mer pérenne est de moins en moins importante. Entre 1979 et 2018, la proportion de glace âgée de cinq ans est passée de 30% à 2%. Sur la période 1975-2012, l'épaisseur de la banquise dans le centre de l'Arctique a diminué de 65%. On constate en outre que la saison de fonte commence trois jours plus tôt et finit sept jours plus tard chaque décennie. La fonte de la banquise va se poursuivre au cours du 21^{ème} siècle. Son ampleur dépend de nos émissions futures de gaz à effet de serre.

Conséquences géopolitiques de la fonte de la banquise

La fonte de la banquise a et aura de multiples conséquences sur les écosystèmes, sur l'océan, sur le système climatique en général et également sur la géopolitique de la région.

Contexte et droit de la mer

La fonte de la banquise en Arctique due au changement climatique laisse entrevoir la possible ouverture de nouvelles routes commerciales et l'exploitation de gisements d'hydrocarbures et de minerais. Au vu de ces nouvelles perspectives, beaucoup ont envisagé une course pour le contrôle de l'Arctique. Mais qu'en est-il réellement ?

La convention de Montego Bay (1982) établit les différentes règles sur les espaces maritimes. Tous les états arctiques ont signé et ratifié la convention, à l'exception des États-Unis. Cette convention définit la souveraineté et les droits des états sur base de délimitations géographiques de l'espace maritime.

Ces délimitations géographiques sont définies en fonction d'une ligne de base correspondant à la limite des basses eaux. A partir de cette ligne de base et ce jusqu'à une distance de 12 milles marins s'étend la mer territoriale. Dans sa mer territoriale un pays est souverain des ressources vivantes et minérales de la mer et des fonds marins.

Au-delà des mers territoriales et jusqu'à une distance de 200 milles marins s'étendent les zones économiques exclusives des Etats (ZEE). L'état n'est pas souverain de cette zone mais il y possède des droits d'exploitation des ressources marines et des fonds marins.

Il est possible pour les Etats de revendiquer des droits sur les ressources des fonds marins au-delà des limites de leur ZEE. La convention de Montego Bay reconnaît, en effet, le droit d'exploitation des fonds marins au-delà d'une ZEE sur base d'une délimitation du plateau continental. Un plateau continental est une prolongation du continent sous la mer. Il est donc possible de revendiquer des droits d'exploitation s'il s'avère que son plateau continental s'étend au-delà de sa ZEE.

Course au gisement en arctique ?

La fonte de la banquise, pourrait réduire le coût d'exploitation des gisements d'hydrocarbures mais peut-on réellement parler de course à l'appropriation de ces gisements en Arctique ?

On estime aujourd'hui que 29% des réserves de gaz et 10% des réserves de pétrole pas encore découvertes se trouvent en Arctique. Les réserves sont importantes, mais restent quand même limitées. La fonte de la banquise réduit certes les coûts d'exploitation, mais la viabilité de son exploitation dépend du prix des ressources sur les marchés internationaux. La majeure partie des ressources en hydrocarbures et en minerais se trouvent dans des ZEE non contestées. Seulement 5% des ressources potentielles se trouvent au-delà. Pour toutes ces raisons, il est abusif de parler de course aux gisements. Néanmoins, il y a quand même un intérêt à vouloir étendre ses droits d'exploitation sur la plus grande superficie possible.

Les revendications d'extension des plateaux continentaux reposent principalement sur la dorsale de Lomonossov. Cette chaîne de montagnes sous-marines est convoitée par le Danemark, le Canada et la Russie, qui prétendent tous qu'elle appartient à leur plateau continental et non à la croûte océanique. Ces revendications ont été soumises à la commission des limites du plateau continental. Cette commission, formée de scientifiques, analysera les données fournies par les pays pour appuyer leurs revendications et devra statuer sur l'appartenance de la dorsale à un plateau continental. Leurs décisions rendront légitimes ou non les revendications des états.

Les limites externes des ZEE sont clairement définies par la convention, mais les délimitations des limites entre états voisins le sont moins. Dans ce contexte, des désaccords existent en Arctique (p.ex., entre les États-Unis et le Canada en mer de Beaufort, où d'importantes réserves en hydrocarbures sont possiblement présentes).

Les nouvelles routes maritimes

La réduction de la glace de mer en Arctique allonge la saison navigable et fait renaître l'intérêt pour les routes maritimes qui la traversent : la route du Nord-Est et la route du Nord-Ouest. La route du Nord-Est relie l'Asie à l'Europe en longeant les côtes russes et pourrait être une alternative à la route traditionnelle passant par le Canal de Suez et l'Océan indien. La route du Nord-Ouest relie l'Europe à la côte ouest américaine et pourrait être une alternative à la route traditionnelle qui emprunte le Canal du Panama.

Les routes maritimes passant par l'Arctique sont plus courtes que les routes traditionnelles. Une distance plus courte est synonyme de gain de temps, de livraisons plus rapide, de diminution des coûts liés au personnel navigant... En réduisant la vitesse du navire, il est aussi possible d'économiser sur la consommation en carburant tout en assurant un délai de

livraison similaire à ceux d'aujourd'hui. Les routes évitent aussi le passage par des zones de piraterie et le passage payant par le Canal de Suez et le Canal de Panama.

On peut dès lors imaginer l'engouement qu'il peut y avoir autour de l'utilisation de ces routes de commerces. Mais qu'en est-il réellement aujourd'hui ?

Actuellement, ces routes sont en majeure partie utilisées par un trafic de destination lié aux activités économiques en Arctique. Le trafic de transit lié au commerce international entre les continents, reste limité. Bien que le trafic en Arctique soit en augmentation, c'est surtout le trafic de destination qui est en croissance. On est donc encore loin d'une route de transit à travers le pôle. La faiblesse du trafic de transit s'explique par les risques importants qui persistent malgré la fonte de la banquise. La présence d'icebergs, la variabilité de la couverture de glace, la météo capricieuse, la difficulté de navigation... Tous ces éléments impliquent la souscription d'assurances conséquentes. Le manque d'infrastructures portuaires le long de ces routes et le manque de services de secours jouent également en leur défaveur. De plus, la banquise n'a pas encore suffisamment fondu pour envisager une route commerciale permanente.

Choisir l'Arctique pour naviguer reste difficile en raison de l'accessibilité limitée des bateaux et de l'équilibre entre gains possible et risques encourus. Pour déterminer les perspectives d'utilisation, il faut pouvoir prédire comment vont évoluer les étendues de glace de mer au cours du 21^{ème} siècle. Des études sont en cours pour déterminer l'extension de la glace de mer en fonction de différents scénarios d'émission de CO₂. Il est possible de déterminer la durée d'accessibilité de ces routes en fonction du type de navire. On peut s'attendre à ce que, d'ici la deuxième moitié du 21^{ème} siècle, l'Arctique soit navigable toute l'année.

La route du Nord-Ouest a pour particularité de passer par les eaux territoriales canadiennes. Les États-Unis souhaitent que cette partie de la route soit reconnue comme un détroit international. Les mêmes règles que pour le détroit de Malacca ou d'Ormuz y seraient donc d'application. Le Canada considère que cette demande porte atteinte à sa souveraineté et refuse catégoriquement cette option.

Conclusion

Bien que l'intérêt pour l'Arctique grandisse, la situation n'est pas aussi conflictuelle que l'on pourrait le croire. Il est vrai qu'un océan arctique libéré de sa glace toute l'année pourrait remettre en question l'ordre actuel des choses mais cela ne se produira certainement pas avant la deuxième moitié du 21^{ème} siècle. En attendant, les états arctiques placent calmement leurs pions dans la région.

Ce qui doit davantage nous préoccuper est l'urgence environnementale dans laquelle l'Arctique s'inscrit. La fonte complète de la banquise représenterait une catastrophe écologique et un signe de dérèglement climatique majeur, de nature à perturber complètement l'équilibre de la région. L'augmentation du trafic et l'exploitation des ressources d'hydrocarbures ne ferait qu'augmenter le risque d'accident menaçant davantage encore la région.

L'Arctique illustre parfaitement le conflit entre intérêt économique et intérêt écologique omniprésent dans notre société.

Pour en savoir plus

- Lasserre, F. (2019). La course à l'appropriation des plateaux continentaux arctiques, un mythe à déconstruire. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/arctique/articles-scientifiques/la-course-a-l-arctique-un-mythe>
- IPCC (2019). *Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, chapitre 3 : Polar regions. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/>

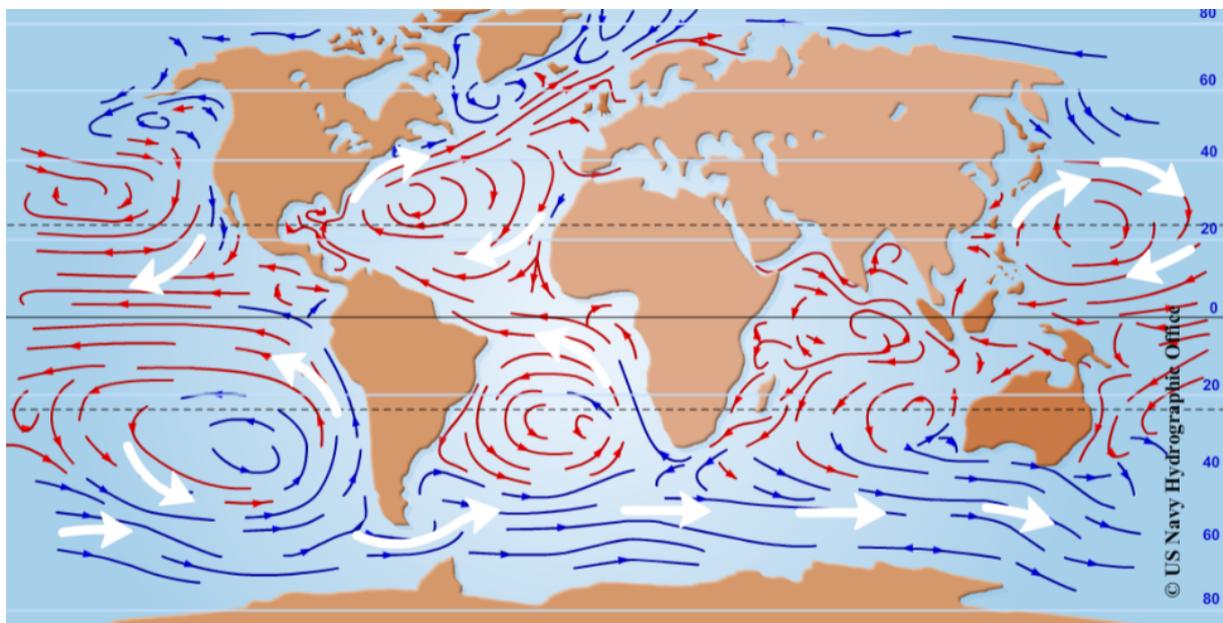
Vers un refroidissement brutal de l'Europe de l'Ouest ?

Cyril Wuest

Master en sciences géographiques, orientation « global change »

Qu'est-ce que le Gulf Stream ?

De nos jours, la Terre est recouverte à 70,8% par des océans. Ces océans sont en mouvement perpétuel, et ces mouvements sont cycliques et réguliers : les courants marins. Beaucoup de facteurs influencent ces courants, comme le vent de surface, la force de Coriolis, qui résulte de la rotation de la Terre, ainsi que les différences de température, de salinité et de densité.

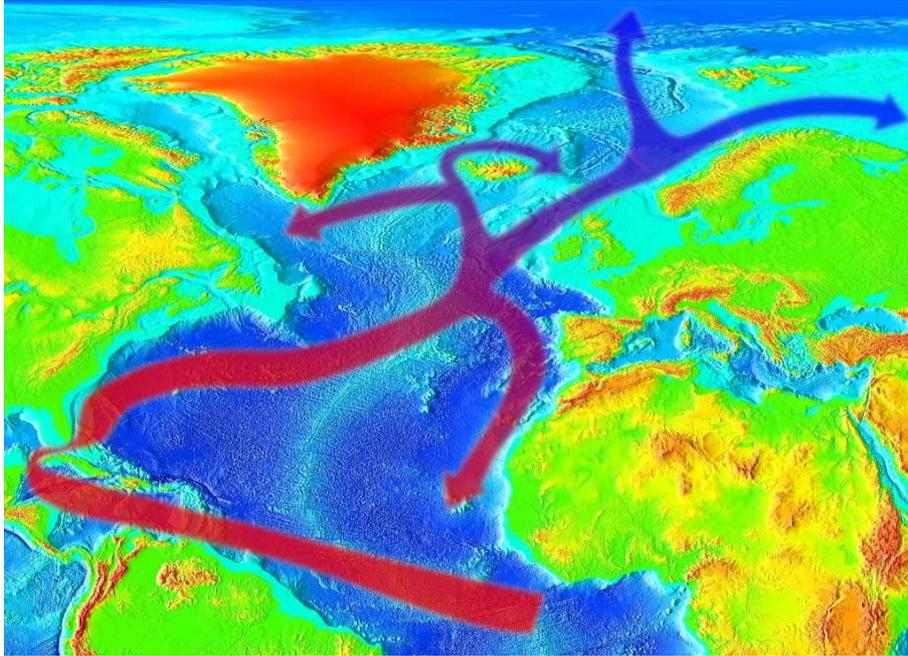


Source: MétéoFrance.com

Ci-dessus est représentée la carte des courants marins de surface (à ne pas confondre avec la circulation thermohaline, qui n'est pas représentée ici), les flèches rouges et bleues correspondent respectivement à des courants de surface chauds et froids, quant aux flèches blanches, elles représentent les vents.

Le vent est donc le facteur, qui va particulièrement nous intéresser pour évoquer le Gulf Stream, car celui-ci est directement influencé par des vents de surface importants, qu'on appelle les alizés.

Le Gulf Stream est un courant océanique chaud et permanent de l'Atlantique Nord. Il se forme au niveau du Golfe du Mexique, là où les eaux possèdent une température élevée et où les vents sont forts. A cet endroit, le Gulf Stream possède des caractéristiques colossales : 80 km de largeur, 640 m de profondeur et une vitesse de 100 à 150 km par jour.



Source : Futura-sciences.com

Son débit est estimé à 85 millions de mètres cube d'eau à la seconde et sa température est comprise entre 30 et 35°C.

Comme nous pouvons le voir sur la carte ci-dessus, le Gulf Stream qui passe ensuite entre Cuba et la Floride, dévie sa route vers l'est de l'Océan Atlantique, poussé par les eaux froides provenant du nord. En approchant de l'Europe, le Gulf Stream se divise en plusieurs « parties ». On ne parle alors plus du Gulf Stream mais de plusieurs mouvements d'eaux chauffés au préalable par ce courant du Golfe. Ils ne doivent donc pas être confondus avec une extension du Gulf Stream.

Une partie de ces courants de surface chauds replongent vers les Açores au sud et forment le « courant des Açores ». Une autre partie se dirige vers la Norvège au nord-ouest de l'Europe : c'est la « dérive nord-atlantique », dont les branches locales sont le « courant d'Irminger » et le « courant norvégien ». C'est la dérive nord-atlantique qui se manifeste comme l'objet de notre étude, car elle a une influence notable sur le climat de nos contrées.

Quel est le rôle de la dérive nord-atlantique dans le climat européen ?

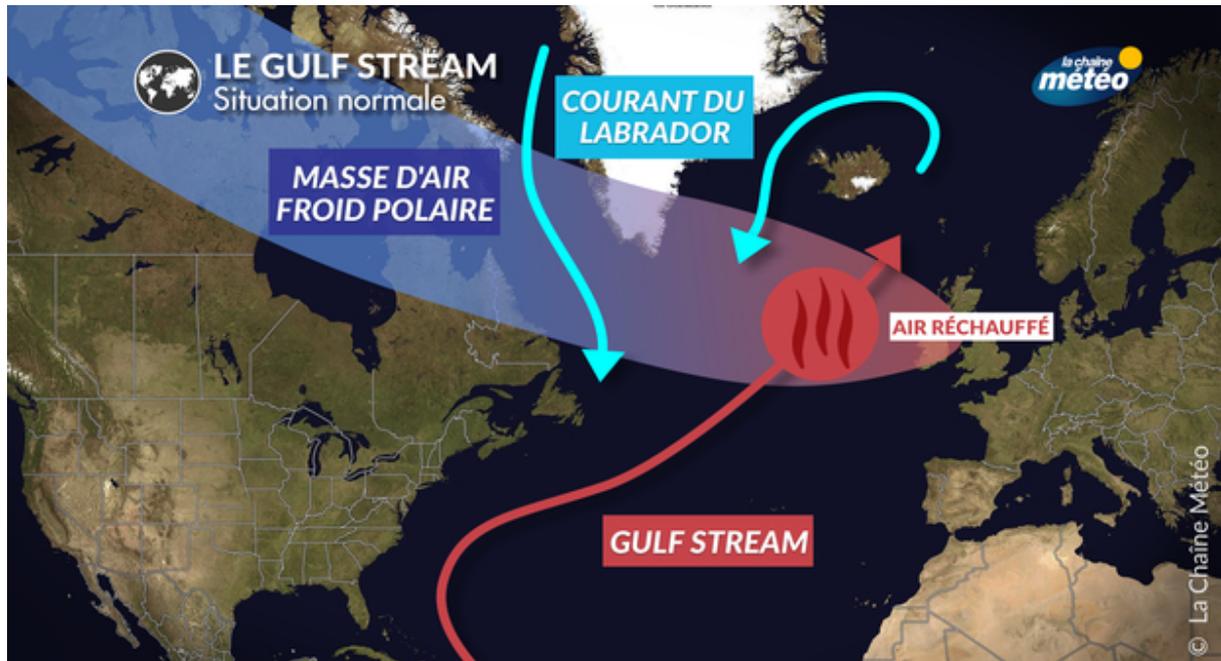
La dérive nord-atlantique, transportant des eaux chaudes, est à l'origine du climat tempéré régnant en Europe de l'ouest. Ce climat se présente même comme « doux » en hiver sur toute l'Europe de l'ouest, à l'inverse des températures moyennes qu'il y a de l'autre côté de l'Océan Atlantique.

En effet, si l'on compare le climat de Paris à celui de Montréal, on constate que les températures sont totalement différentes en hiver, alors que Paris se trouve à une latitude plus élevée que la ville de Montréal. En janvier, la température moyenne minimale de Paris est de 3°C, à Montréal, de -12°C. Le flux étant très souvent zonal sur l'Europe (c'est-à-dire océanique), ces eaux apportent beaucoup de douceur, à l'inverse du continent nord-américain, qui est plutôt sous l'influence du courant du Labrador, descendant directement de l'Océan Arctique.

Pourquoi le Gulf Stream pourrait-t-il s'affaiblir ?

Paradoxalement, c'est le réchauffement climatique actuel, qui pourrait avoir un impact sur ce courant maritime. Par le passé, le Gulf Stream a subi certaines modifications. En effet, on sait que lors de la dernière ère glaciaire, le Gulf Stream avait ralenti à plusieurs reprises et avait raccourci sa course. En conséquence, l'Europe avait subi une baisse de 5°C il y a 15,000 ans, pendant la déglaciation.

Ci-dessous, la carte simplifiée montrant la situation normale avec le Gulf Stream et la dérive nord-atlantique, qui réchauffent les eaux de l'océan, et le courant du Labrador qui les refroidissent.



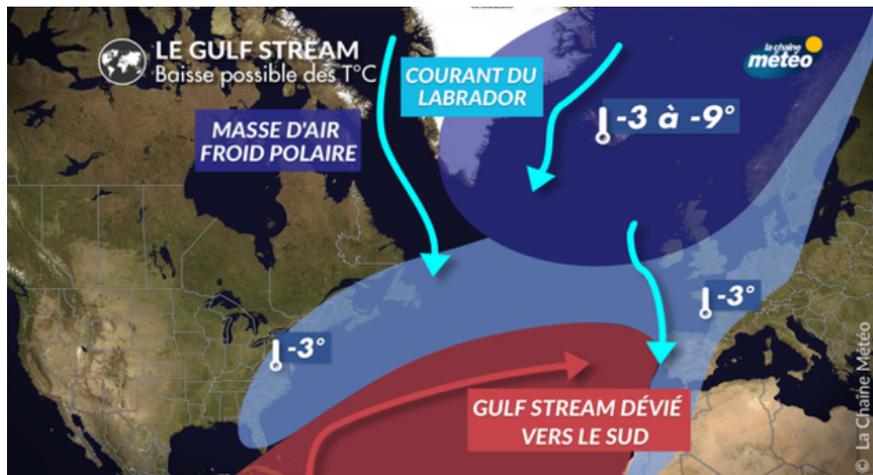
On constate sur cette image, que le Québec est en proie à l'air froid d'origine polaire et aux eaux froides du courant du Labrador. Cette masse d'air polaire se réchauffe au-dessus de l'Atlantique avant d'atteindre l'Europe. C'est donc pour cela que les températures sont douces au-dessus du vieux continent.



Aujourd'hui, la banquise arctique fond à vue d'oeil, et ce de plus en plus chaque année. En effet, en 2019, la banquise a atteint une superficie de 4,15 millions de km² à la fin de l'été, soit 2,10 millions de km² de moins que la moyenne de l'étendue minimale annuelle entre 1981 et 2010. Cette fonte de la banquise, associée à la fonte de la calotte du Groenland, aussi très importante, refroidissent les eaux de l'Atlantique Nord en apportant de l'eau froide et non salée vers le sud. Cette eau froide supplémentaire constitue un frein au courant océanique chaud du Gulf Stream. D'après plusieurs observations de la NASA, ce processus a déjà débuté. La fonte arctique peut donc perturber la circulation océanique et donc le système climatique global.

Quelles conséquences sur le vieux continent ?

En fonction de l'intensité du phénomène, la baisse des températures pourrait être plus ou moins importante. La circulation de l'Océan Atlantique s'est arrêtée à plusieurs reprises, notamment en raison d'énormes quantités de glace, qui ont libéré de l'eau froide jusqu'au niveau de l'Espagne. La baisse a été de 5 à 7°C lors de ces épisodes. De nos jours, l'étendue des glaces et inlandsis n'est plus la même et l'introduction d'eau froide dans l'océan est donc moindre. Dans le pire des cas, avec un Gulf Stream totalement affaibli et dévié vers le sud, la baisse serait de 3°C au maximum sur l'Europe, voire plus sur l'Europe du Nord, comme le montre l'image ci-dessous.



Il faut donc bien comprendre que l'impact de cet affaiblissement sur l'Europe ne serait pas si grand qu'il n'y paraît, notamment car le potentiel de fonte est limité en Arctique. L'Europe ne connaîtra certainement pas le même climat que la partie est du Canada, car les masses d'air polaires en provenance de l'Arctique sont continentales, elles sont donc forcément plus froides que si elles étaient océaniques.

Cette possibilité de « refroidissement climatique » reste toutefois intéressante à étudier, surtout dans un contexte, où le changement climatique est, plus que jamais, d'actualité.

Pour en savoir plus

- https://www.alertes-meteo.com/vague_de_chaleur/stream.htm
- <https://oceanscienceweb.wordpress.com/les-courants-de-surface/>
- <https://www.notre-planete.info/actualites/4249-Gulf-Stream-ralentissement-climat-Europe>

Rôle des sols et du sous-sol dans le cycle du carbone

Élise Dujardin

Master en sciences géographiques, orientation « global change »

Le carbone est un élément chimique qui se retrouve sous différentes formes. Dans l'atmosphère, il se trouve en majeure partie sous forme de dioxyde de carbone, appelé aussi gaz carbonique. C'est un gaz naturellement présent, qui fait partie des gaz à effet de serre, qui piègent de la chaleur dans l'atmosphère en absorbant le rayonnement infrarouge terrestre. Depuis la révolution industrielle, l'Homme émet ce gaz à effet de serre en grande quantité. Cela a pour conséquence l'accentuation du réchauffement climatique à l'échelle planétaire.

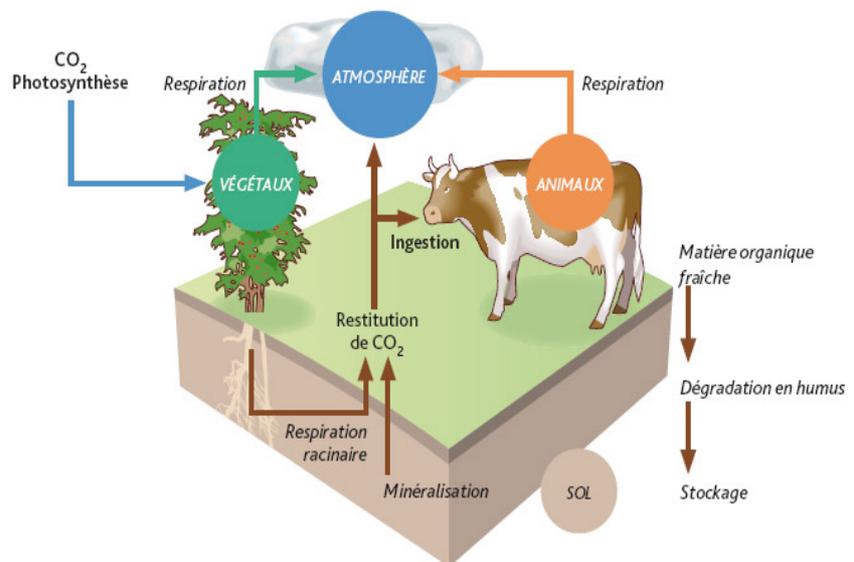
Le cycle du carbone

Le cycle du carbone est le transport de celui-ci à travers quatre réservoirs : l'atmosphère, l'océan, la végétation et le sol. La végétation est le plus petit de ces quatre réservoirs de carbone, mais elle joue un rôle clé dans le transport de carbone entre l'atmosphère et le continent.

La photosynthèse réalisée par les plantes transforme le CO_2 en matière organique et en oxygène. Une partie de ce carbone est transmis aux animaux à travers la chaîne alimentaire.

Durant leur vie, les végétaux et les animaux consomment du carbone organique dans le processus de respiration, ce qui retourne du CO_2 dans l'atmosphère. Une fois les organismes morts, la matière organique de leur corps se retrouve sur le sol et se décompose. Cette décomposition va produire une couche de sol riche en matière organique, l'humus. La dégradation de cet humus va permettre le stockage du carbone dans les sols. Sous le sol, la Terre se compose de roches. Parmi celles-ci, les roches carbonatées contiennent du carbone. Une autre source de carbone est présente dans la lithosphère : ce sont les gisements de carbone organique, comme le pétrole ou le charbon.

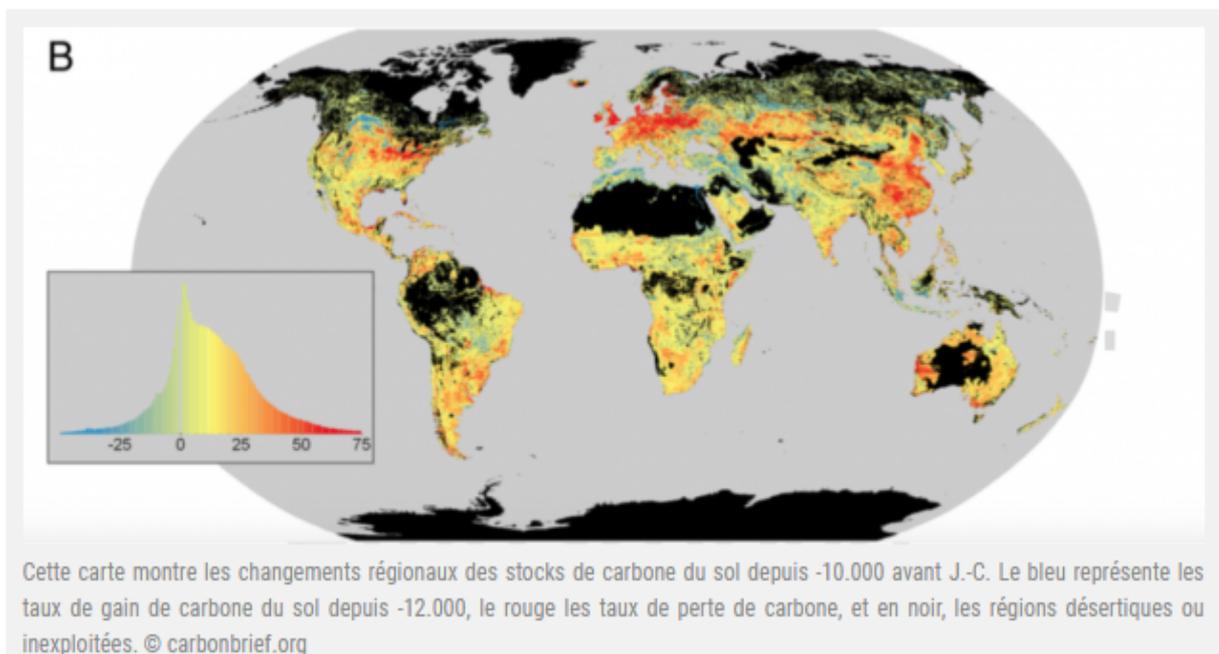
L'Homme produit des modifications sur le cycle du carbone : tout d'abord, en utilisant des énergies fossiles pour se chauffer, produire de l'électricité ou pour se déplacer. Depuis la révolution industrielle, l'Homme exploite une quantité importante de charbon, de gaz et de pétrole. Une fois extraits, ces constituants de carbone sont brûlés pour produire de l'énergie. Lors de la combustion, du gaz carbonique est émis dans l'atmosphère et va augmenter l'effet de serre. Ce flux émet vers l'atmosphère du carbone initialement piégé dans les couches profondes de la Terre. La production de ciment à partir de calcaire et la production de matières plastiques à partir du pétrole contribuent aussi aux rejets dans l'air. De plus, l'Homme relâche du carbone stocké dans la biomasse lorsqu'il utilise du bois de chauffage. Les feux de forêts anthropiques et



la déforestation en général ont un impact majeur. En déboisant, l'Homme diminue la quantité de carbone du sol et de la végétation dans un écosystème riche. En effet, une fois le sol mis à nu, la matière organique en décomposition du sol n'est pas renouvelée et l'érosion des sols est plus facile. Une dernière modification d'importance est notée : l'agriculture intensive. Dans ce type d'agriculture, le carbone du sol n'est pas renouvelé et l'érosion est facilitée.

Les flux de carbone

Les flux de carbone du sol vers l'atmosphère dus à l'agriculture sont liés à deux facteurs principaux : l'intensité de l'agriculture ainsi que sa durée et la vulnérabilité des sols à l'érosion. Le premier facteur est responsable du flux de carbone au nord-est des États-Unis et en Europe de l'Ouest. À ces endroits, l'agriculture est intensive depuis des siècles. Par contre, le flux de carbone au sud de l'Afrique, en Argentine ou en Australie n'est pas causé par le pâturage, mais par l'érodabilité des sols.



La gestion des sols

Les sols ont un effet tampon sur le réchauffement climatique. Ils permettent de stocker une partie des émissions de gaz carbonique produite par l'Homme. Même si l'agriculture rejette du carbone dans l'atmosphère, une meilleure gestion des terres pourrait permettre de stocker à nouveau une plus grande quantité de carbone dans les 30 à 100 premiers centimètres du sol.

L'exploitation de la forêt peut se faire en choisissant les arbres à abattre ou en laissant du temps au sol pour se régénérer avant d'être à nouveau utilisé. Les pâturages peuvent accumuler plus de carbone en diversifiant les espèces et en faisant une rotation des pâturages pour que le bétail ne reste pas toujours au même endroit. Les terres cultivées peuvent aussi être gérées pour stocker du carbone. Pour cela, l'agriculture traditionnelle peut être remplacée par divers types d'occupation du sol pour permettre la séquestration. Pour chaque occupation du sol, il va y avoir un apport de carbone différent dans le sol.

Forêt	4 - 8
Agroforesterie	0,2 – 0,8
Agriculture de conservation	0,1 – 0,8
Pâturage	0,05 – 0,2

Séquestration de carbone en t/ha/an selon la FAO(2002)

Le reboisement et la mise en pâturage des terres cultivées permettent un gain facile de carbone dans les sols mais ne permettent pas d'assurer l'approvisionnement alimentaire comme le font les cultures. Pour maintenir un équilibre entre l'activité humaine et la présence de carbone, il faut augmenter les apports de matière organique sur les cultures et diminuer les pertes de carbone. L'agroforesterie est une pratique, qui insert des arbres dans les grandes cultures. L'arbre a un rôle fondamental : il apporte de la matière organique, régule le cycle de l'eau et protège les cultures du vent. L'agriculture de conservation est une autre pratique de gestion des sols qui est basée sur trois principes. D'abord, il faut déranger le moins possible le sol, cela veut dire qu'il faut éviter le labour de la terre qui conduit à une perte du carbone. Ensuite, il faut couvrir au maximum le sol pour optimiser l'apport de matière organique. Par exemple, il est possible d'ajouter de la paille aux cultures. Finalement, la rotation des cultures permet un apport varié au sol et augmente sa fertilité. Plusieurs variantes de l'agriculture de conservation existent.

En 2015, des gouvernements ont mis en place une politique pour la séquestration de carbone dans les sols : « 4 pour 1000 ». Le but est d'augmenter la concentration de carbone dans les sol de 0,4 % par an. Cela est censé compenser les émissions de CO₂ produites par l'Homme. Néanmoins, cette politique a des faiblesses, car il n'est pas facile de quantifier exactement le carbone dans les sols et il se peut, que les pratiques mises en place ne permettent pas d'atteindre l'objectif. Le carbone pourrait augmenter pendant 20 ou 30 ans, mais il n'est pas prouvé que ce soit une solution à plus long terme.

Le piégeage du carbone

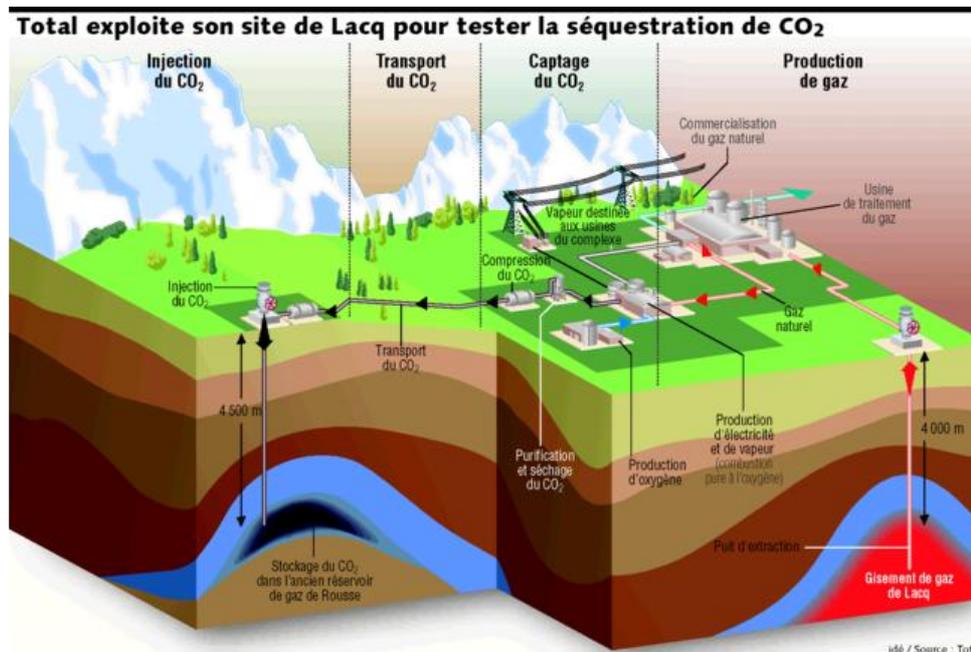
Un autre moyen pour diminuer le taux de carbone dans l'atmosphère est la technique du piégeage et stockage du dioxyde de carbone. Cela consiste à collecter le CO₂ à sa source de production et à le stocker dans les couches plus profondes de la Terre. Ce processus est réalisé en trois étapes.

La première étape est de piéger le CO₂ produit par les centrales électriques ou des installations industrielles de grande envergure. En premier lieu, le gaz carbonique est séparé des autres composants produits lors de l'activité industrielle. Pour les centrales électriques, deux techniques sont utilisées actuellement : le système de postcombustion et le système de précombustion. Une fois isolé, le gaz carbonique est purifié et comprimé dans le but de faciliter le transport et le stockage. Lors de cette première étape, il est possible de diminuer de 80 à 90% le CO₂ émis. Il ne faut pas oublier que le système consomme de l'énergie supplémentaire et que cela a un coût. Le coût du piégeage est estimé entre 0,01 et 0,03 US\$ par kWh produit.

La deuxième étape est de transporter le CO₂ vers un lieu de stockage car ce n'est généralement pas possible de le stocker sur le lieu de production. Différentes techniques de transport sont mises en place, soit des canalisations enterrées appelées des gazoducs, soit un transport de CO₂ liquide par bateau. Le transport par camion ou train est possible mais n'est pas rentable pour de grande distance. Le coût dépend de la distance et de la quantité à transporter. Pour une tonne de CO₂, il est estimé que le transport par gazoduc coûte entre 1 et 8 US\$. Pour le transport de plus de 1000 km, le transport par navire est moins coûteux, si les quantités à transporter sont suffisantes.

La dernière étape est de stocker le gaz carbonique dans les couches géologiques. Les lieux de stockage sont des formations salines, des gisements de pétrole, de gaz... Le but est de conserver le CO₂ à une profondeur de 800 m ou plus pour que sa remontée à la surface ne soit

pas possible. Les méthodes utilisées pour le stockage sont les mêmes que celles utilisées pour l'industrie du gaz ou du pétrole. Par exemple, il existe la technique de forage de puits ou la technique d'injection. Le stockage dans les couches géologiques possède un risque très faible de fuite. Néanmoins, une surveillance du stockage est mise en place. La possibilité de stocker est présente partout dans le monde et la quantité de stockage n'est pas évaluée avec certitude mais pourrait être possible durant des décennies. Le coût de stockage est compris entre 0,5 et 8 US\$ par tonne de CO₂ injecté et le coût de surveillance est compris entre 0,1 et 0,3 US\$ par tonne de CO₂.



Les Echos, 2009

La possibilité de la création de ce dispositif dépend de la rentabilité de l'infrastructure. Cela dépend donc du volume d'émission de la source, de la distance séparant la source et le site de stockage, de la concentration des émissions de CO₂... Le potentiel de piégeage du CO₂ est estimé à 21 - 45 % des émissions en 2050.

Conclusion

Pour atténuer le réchauffement climatique, l'Homme tente de diminuer la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère. Pour cela, il tente de diminuer ses émissions et d'en stocker dans les sols à travers une meilleure gestion de l'agriculture. Il a aussi développé des techniques pour empêcher la libération de carbone provenant de grande source de production. Ces techniques ont encore besoin d'être améliorées et plus largement diffusées.

La diminution des gaz à effet de serre doit être vue de manière globale. Pour y arriver, il faut diminuer les émissions anthropiques, intensifier la gestion durable des sols et développer la séquestration de carbone dans les couches géologiques.

Pour en savoir plus

- https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/agriculture/les-sols-agricoles-pompes-a-carbone_134485
- <https://www.4p1000.org/fr>
- <https://www.greenfacts.org/fr/piegeage-stockage-co2//index.htm#1>

Le climat quand le thermomètre n'existait pas

Clara Lambin

Master en sciences géographiques, orientation « global change »

Introduction

Le réchauffement climatique est aujourd'hui un sujet au cœur de l'actualité. Mais pour pouvoir affirmer que la Terre connaît une hausse des températures anormale due à l'Homme, il faut pouvoir comparer les données climatiques présentes avec celles du passé et établir leur évolution. L'étude des climats passés, la paléoclimatologie, permet de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les variations naturelles du climat et ainsi de mieux discerner le rôle de l'Homme dans le changement climatique que nous connaissons actuellement. Puisque les instruments de mesure utilisés en météorologie n'ont été inventés que récemment à l'échelle humaine, la paléoclimatologie doit se baser sur des indicateurs de changement climatique trouvés dans la nature pour pouvoir établir l'évolution des climats passés. Il existe divers éléments qui enregistrent les variations du climat, tels que la glace, les sédiments, les arbres, les coraux, le pollen, etc., et qui sont aujourd'hui encore disponibles dans la nature. Chaque élément permet la reconstruction du climat selon des échelles de temps et à des degrés de précision différents. Dans ce rapport, deux méthodes seront développées plus en détail : la dendrochronologie et l'étude des carottes glaciaires.

Dendrochronologie

La première méthode ici abordée est la dendrochronologie, qui comprend aussi la dendroclimatologie. La dendrochronologie est l'étude et la datation des anneaux de croissance des arbres ; la dendroclimatologie vise à tirer des informations climatiques de ces anneaux. Lorsqu'on coupe un tronc d'arbre de manière transversale, on peut y observer une succession de cercles clairs et foncés concentriques. Ces cercles forment les anneaux de croissance de l'arbre, aussi appelés cernes, et sont produits chaque année par l'arbre. Les cercles clairs correspondent au bois de printemps et d'été alors que les cercles foncés correspondent au bois d'automne et d'hiver. Un cerne est composé d'un cercle clair suivi d'un cercle foncé. Il est donc possible de connaître l'âge de l'arbre en comptant le nombre de cernes qui composent son tronc. Plus on s'éloigne du cœur du tronc, plus les cernes sont jeunes. Leur épaisseur dépend des conditions climatiques auxquelles l'arbre a été soumis durant l'année à laquelle le cerne a été produit.

Pour reconstituer le climat grâce aux arbres, il faut dans un premier temps déterminer l'année à laquelle correspond chaque cerne, rôle de la *dendrochronologie*. Dans un arbre vivant, le cerne situé directement sous la couche d'écorce coïncide à l'année en cours. A partir de là, il est facile de dater chaque cerne du tronc en remontant les anneaux de croissance vers le centre. Les plus vieux chênes permettent ainsi de remonter le temps 200 ans en arrière, alors que beaucoup de séquoias géants de Californie sont âgés de plus de 2000 ans. Toujours en Californie, dans les White Mountains, on peut retrouver certains pins à crochets vieux de 4800 ans. Pour étudier l'âge d'un arbre, il n'est heureusement pas nécessaire de l'abattre. Il existe certains instruments comme la tarière de Pressler qui permettent de prélever de fines carottes de bois d'environ 1 cm de diamètre dans les troncs. Pour une datation optimale des cernes, il est préférable que l'échantillon passe par le cœur du tronc.

Comme vu précédemment, les arbres vivants permettent de remonter le temps sur plusieurs siècles, voire quelques milliers d'années. Mais la dendrochronologie ne s'applique pas qu'aux arbres vivants. En effet, il est également possible d'analyser du bois plus ancien, comme par exemple les poutres de construction historiques qui permettent ainsi de remonter le temps jusque 12 000 ans en arrière. Pour ce faire, il faut d'abord standardiser l'épaisseur des cernes

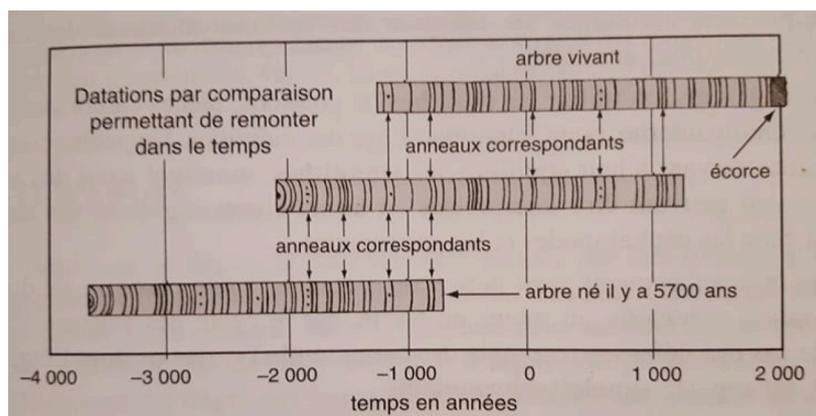


Figure 1 – Datation des échantillons de bois (Foucault, A., 2009)

des différents échantillons de bois. En effet, en supposant que les conditions climatiques restent identiques tout au long de sa vie, plus un arbre est vieux, moins les cernes qu'il produit sont épais. Standardiser l'épaisseur des cernes revient à calculer les dimensions théoriques qu'ils devraient avoir, si leur épaisseur n'avait pas été influencée par l'âge de l'arbre. Il existe pour cela diverses méthodes de calcul et formules.

Une fois les échantillons standardisés, on procède à leur synchronisation (Figure 1). À partir de l'arbre vivant dont l'année correspondant à chaque cerne est connue, on date les anneaux de croissance des échantillons plus anciens. Pour y arriver, on place l'échantillon de l'arbre vivant à côté d'un échantillon plus ancien qui, supposément, a vécu en même temps que le premier pendant un certain temps. Puisque que l'épaisseur des anneaux de croissance est fonction des conditions climatiques, on recherche les correspondances entre les cernes des deux échantillons. De ce fait, deux cernes correspondants ont été produits la même année par les deux arbres différents. Il est alors possible, par comparaison des carottes de bois, de dater la série complète d'échantillons. Il faut cependant faire attention à ce que ceux-ci soient de la même espèce d'arbre, car la croissance des cernes est différente selon les espèces et celles-ci réagissent différemment aux variations climatiques.

Lorsque l'entièreté des cernes de la série est datée, la prochaine étape consiste à tirer les informations climatiques qui en découlent. C'est le rôle de la *dendroclimatologie*. La croissance des arbres est principalement influencée par la température, les précipitations, l'humidité ambiante et l'ensoleillement. Si les conditions sont optimales, le cerne est à son épaisseur maximale. Si une des conditions n'est pas remplie à un niveau suffisant pour satisfaire pleinement la croissance de l'arbre, cette condition est appelée *facteur limitant* et fera diminuer l'épaisseur du cerne. Dans les forêts boréales, la température est le principal facteur limitant. Les variations d'épaisseur des cernes des arbres vivant dans ces régions sont donc surtout corrélées aux variations de température. S'il fait trop froid, ou trop chaud, le cerne sera plus fin que la normale, en fonction du seuil de tolérance à la température de l'espèce considérée. Aux abords de la Méditerranée, c'est l'eau qui est un facteur limitant, ce qui rend la croissance des arbres principalement dépendante aux variations des précipitations. Dans les climats tempérés, l'épaisseur des cernes est dépendante des deux facteurs en même temps, ce qui rend l'analyse climatique plus compliquée.

Prenons par exemple un arbre méditerranéen. Grâce aux données de précipitations récoltées aujourd'hui, on peut analyser comment un arbre vivant réagit aux variations de précipitations. Grâce à cela, on peut donc estimer la quantité de précipitations qu'il y a eue pendant une année déterminée sur base de l'épaisseur du cerne considéré. On peut ainsi retracer l'évolution des précipitations au cours du temps. On peut faire de même pour les forêts boréales concernant la température. Pour ce qui est des forêts tempérées, si le cerne n'est pas à son épaisseur optimale, cela peut aussi bien être dû à un refroidissement qu'à une sécheresse. Il

convient alors de comparer des séries de différentes espèces d'arbres ayant des seuils de tolérance différents en fonctions des facteurs pour affiner l'analyse.

Carottes glaciaires

La glace est un autre matériau capable d'enregistrer les variations du climat. La deuxième méthode de reconstruction paléoclimatique ici présentée est celle des carottes glaciaires. Celles-ci sont des échantillons de glace forés dans les glaciers et calottes polaires et permettent de reconstituer le climat sur des centaines de milliers d'années. Dans un premier temps, il convient d'expliquer brièvement la formation des glaciers. Nous verrons ensuite comment tirer des informations climatiques des carottes glaciaires.

Un glacier est formé par l'accumulation de couches de neige, qui se transforment peu à peu en glace au cours du temps. Une couche de neige fraîche qui se dépose à la surface d'un glacier est composée de gros flocons et l'air y circule facilement. Au fur et à mesure des années, de nouvelles couches de neige se déposent par-dessus. Écrasée par le poids de ces dernières, la couche de neige considérée se tasse et les flocons se transforment peu à peu en petits grains de glace entre lesquels l'air peut toujours circuler. La neige devient alors du névé, matériau intermédiaire entre la neige et la glace. Toujours sous le poids des couches supérieures, le névé fini par se transformer en glace. Les grains sont alors soudés entre eux et l'air ne peut plus librement y circuler : l'air y est piégé dans des bulles. Ces bulles sont alors isolées de l'atmosphère et conservent l'état que l'air avait au moment où elles ont été piégées.

Avant de se lancer dans l'analyse climatique des archives glaciaires, il convient de comprendre la notion d'isotope. Deux atomes sont des isotopes d'un même élément chimique lorsqu'ils contiennent le même nombre de protons mais pas le même nombre de neutrons. Pour l'oxygène, on trouve dans la nature l'oxygène-16 (la forme la plus abondante avec 8 neutrons), l'oxygène-17 (9 neutrons) et l'oxygène-18 (10 neutrons). Ces isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, mais pas les mêmes propriétés physiques, car ils n'ont pas la même masse atomique. Un isotope peut être stable (comme les trois isotopes de l'oxygène), ou radioactif (comme le carbone-14), c'est-à-dire qu'ils finissent par se désintégrer en une autre espèce chimique après un certain temps.

L'analyse de la proportion d'isotopes d'oxygène-16 et d'oxygène-18 présents dans les molécules de glace permet de connaître la température de l'air au moment où la couche s'est déposée sous forme de neige sur le glacier. Cela est dû à la différence de masse des deux isotopes. En effet, pour avoir des chutes de neige, il faut que l'eau s'évapore des océans pour créer des nuages. Or, les molécules d'eau qui contiennent de l'oxygène-18 sont plus lourdes que les molécules qui contiennent de l'oxygène-16. Elles s'évaporent donc moins facilement. De plus, le passage à l'état gazeux est influencé par la température : plus il fait chaud, plus l'évaporation est facile et inversement. Cela implique que, lorsque la température de l'atmosphère diminue, la quantité d'eau lourde qui arrive à s'évaporer diminue. Les nuages formés sont donc moins riches en oxygène-18 et la neige qui précipite sur le glacier contient moins d'oxygène-18 que la neige tombée lors d'une année plus chaude. Le même raisonnement peut être effectué en étudiant les proportions d'hydrogène et de deutérium (isotope stable de l'hydrogène contenant un proton et un neutron).

En datant les différentes couches de glace d'une carotte, on peut donc retracer l'évolution des températures. La plus grande carotte glaciaire, EPICA, longue de 3,2 km a été forée en Antarctique, sur le site du Dôme C et a permis de reconstituer le climat sur plus de 700 000 ans. Les méthodes de datations des carottes sont diverses. Elles impliquent le comptage direct des couches de glaces, à l'instar de la dendrochronologie, ou encore la datation grâce aux cendres volcaniques déposées sur la glace dont les dates de dépôt sont connues. On peut aussi dater la glace en comparant les résultats à d'autres enregistrements climatiques. Il existe également d'autres méthodes plus complexes, comme l'orbitochronologie ou l'étude des modifications des paramètres de l'orbite terrestre enregistrées dans la glace, qui ne seront pas développées ici.

L'analyse de la composition en gaz des bulles d'air permet, quant à elle, de connaître les concentrations en gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), qui jouent un rôle dans l'évolution des températures. Les concentrations en pollens et en

poussières permettent de tirer des informations sur la végétation et l'occurrence des éruptions volcaniques. Il faut cependant tenir compte du fait que l'âge de l'air ne correspond pas à l'âge de la glace dans laquelle la bulle est piégée. En effet, comme expliqué ci-dessus, il faut un certain temps à la neige pour se transformer en glace. L'état de l'air piégé ne correspond donc pas à l'état de l'atmosphère au moment où la couche de neige s'est déposée. L'air des bulles est bien plus jeune que la glace qui les contient. On peut néanmoins dater l'air des bulles en connaissant le temps qu'il faut à la neige pour se transformer en glace. Le fait que la neige mette du temps à se transformer en glace fait en sorte que la résolution temporelle des carottes glaciaires est moins précise que celle de la dendrochronologie.

Aperçu d'autres méthodes

Les arbres et la glace ne sont pas les seules archives climatiques. L'étude des sédiments marins est la méthode paléoclimatique qui permet de remonter le plus loin dans le temps, sur plusieurs milliards d'années, mais avec une résolution temporelle moins bonne, car l'accumulation des sédiments et leur transformation en roche est un processus lent. Elle se base sur la quantité d'oxygène-18 présente dans les sédiments. À l'inverse de la glace, plus il fait froid, plus l'eau est riche en oxygène-18 car cet isotope s'évapore de moins facilement avec la diminution de température. Concernant les archives biologiques, l'étude des coraux permet entre autres de tirer des informations sur la température de surface de l'eau de mer grâce à l'analyse de la composition en oxygène-18 de leur squelette calcaire. Cette méthode permet de remonter le temps sur quelques siècles avec une précision temporelle annuelle, voire journalière dans certains cas. La palynologie est un autre exemple d'étude d'archives biologiques. Elle consiste à analyser les pollens tombés dans les sédiments de lacs, tourbières ou mers et permet de reconstituer la végétation passée, adaptée à un certain type de climat.

Conclusion

La reconstitution des climats passés est essentielle pour comprendre le climat présent et établir le rôle joué par l'Homme dans le réchauffement climatique actuel. Il existe dans la nature de nombreux éléments, organiques ou non, qui enregistrent les variations climatiques du passé et qui permettent ainsi de les reconstituer. Les arbres et la glace font partie de ces archives climatiques. Leurs méthodes de reconstruction climatiques associées, la dendrochronologie pour les premiers et l'étude des carottes glaciaires pour la seconde ont permis de retracer le climat sur des longues périodes et ainsi d'enrichir la connaissance sur l'évolution du climat pendant le Quaternaire. Ces méthodes présentent différents avantages et inconvénients. La dendrochronologie présente une bonne résolution temporelle et permet une datation précise des variations climatiques mais elle ne permet pas de remonter au-delà de 12 000 ans, alors que les carottes de glace polaire permettent de retracer le climat sur des centaines de milliers d'années, mais avec une résolution temporelle et datation moins précises. Ces deux méthodes ne sont pas les seules utilisées en paléoclimatologie, qui comprend également l'étude des sédiments marins, des pollens, des coraux, etc. La combinaison de ces méthodes permet d'avoir une bonne vue d'ensemble des climats que la Terre a connus et de mieux comprendre les mécanismes qui y sont en œuvre.

Pour en savoir plus

- Sur la dendrochronologie : <http://www.savoirs.essonne.fr/thematiques/le-patrimoine/archeologie/dendrochronologie-les-arbres-nous-parlent/>
- Sur les carottes glaciaires : <https://www.simplyscience.ch/archives-jeunes/articles/des-carottes-glaciaires-pour-sonder-le-climat-du-passe.html>
- Sur la carotte EPICA : https://www.actu-environnement.com/ae/news/projet_EPICA_antarctique_prix_descartes_UE_4706.php4
- Sur les archives climatiques en général : <https://books.openedition.org/septentrion/52810?lang=fr>

Vit-on le climat le plus chaud que la Terre ait connu ?

Antoine Bosly

Master en sciences géographiques, orientation « global change »

Introduction

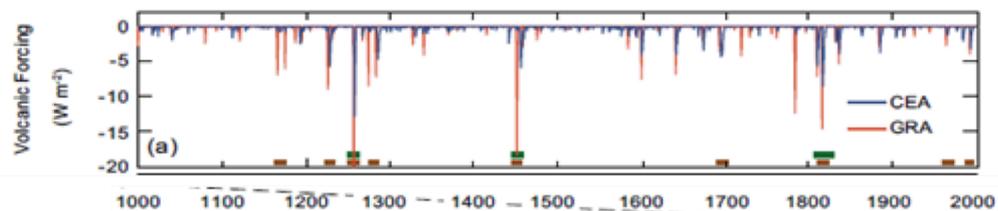
Lorsqu'on parle de climat dans les informations, on ne parle que de l'avenir et du climat qu'il fera en 2050, voire 2100. On ne parle que rarement des paléoclimats, les climats du passé, qui sont pourtant aussi importants pour comprendre le futur. Par exemple, le dernier rapport d'évaluation du GIEC compte un chapitre complet de 82 pages (le chapitre 5) dédié aux paléoclimats.

La responsabilité de l'Homme pour les changements climatiques actuels liés à l'émission de différents gaz à effet de serre est bien établie. Mais il faut aussi prendre en compte les facteurs que l'homme ne peut pas influencer afin d'expliquer les futures variations du climat et, dans le cas qui nous intéresse ici, les variations climatiques du passé. Ces facteurs ne sont pas nombreux et influencent surtout plusieurs choses : la régulation des gaz à effet de serre, la répartition de l'énergie à la surface terrestre et la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre. Il est important de signaler qu'à l'heure actuelle, ces variations sont minimes par rapport aux changements anthropiques. De plus, l'objectif de ce travail n'est pas de faire un listing précis de toutes ces causes, mais d'illustrer deux exemples. Ces différents facteurs complétés par des indicateurs de la végétation, comme les pollens, permettent de reconstituer assez bien l'environnement des époques passées et ainsi dresser un historique des climats qui se sont succédé sur la planète.

Les volcans

Commençons par un facteur impactant le climat qui est simple à comprendre : l'activité volcanique. Les éruptions volcaniques se produisent en bordure des plaques tectoniques ou au-dessus de points chauds du manteau terrestre. Ils expulsent dans l'atmosphère beaucoup de matières différentes, telles que des cendres volcaniques, du CO₂ et des aérosols.

Mais les éruptions volcaniques restent des phénomènes très locaux et épisodiques. De plus, toutes les éruptions ne sont pas capables d'influencer le climat de façon mondiale, seuls les plus importantes le peuvent. Enfin, on en trouve de traces dans les dépôts sédimentaires sous forme de fines couches de cendres facilement reconnaissables qu'on appelle téphra.



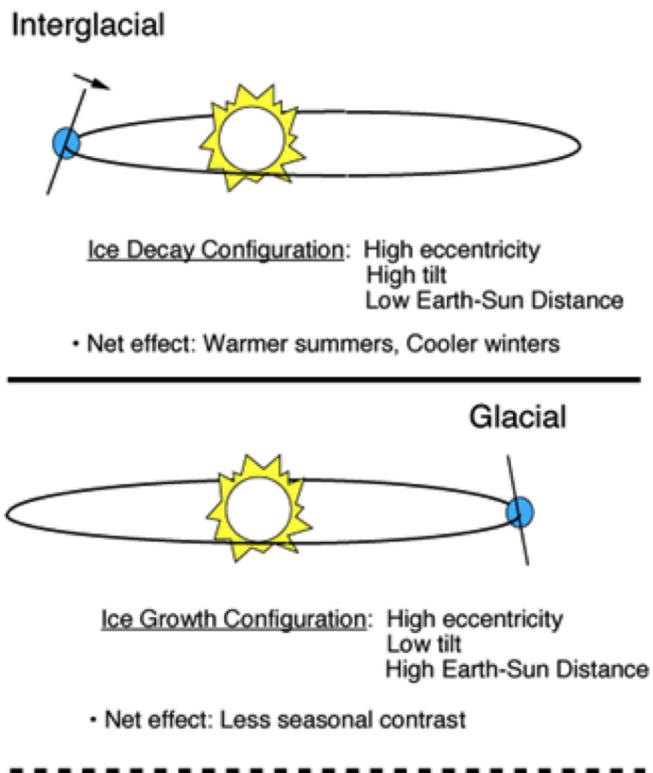
GIEC (2013)

Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessus, les éruptions volcaniques majeures ont un impact direct en refroidissant le climat notamment via l'émission de dioxyde de soufre, qui dans l'atmosphère conduira à la formation de sulfates, un aérosol qui réfléchit le rayonnement solaire ou encore peut conduire la formation de nuages. Ces deux derniers facteurs tendent à refroidir le climat. Les éruptions importantes que l'on peut déceler sur le graphique sont celles du Mont Samalás en 1257 (dont on pense, qu'elle a contribué au déclenchement du

Petit Âge glaciaire en Europe), du Mont Kuwae en 1450, du Grímsvötn en 1783-85 et du Tambora en 1815 (la plus violente éruption connue historiquement).

Les cycles de Milankovitch

Un second facteur, lui non observable à échelle humaine, est ce qu'on appelle les cycles de Milankovitch. C'est une variation des paramètres de l'orbite terrestre, mais se produisant sur des échelles de temps allant de milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années. Il y a trois



Source :

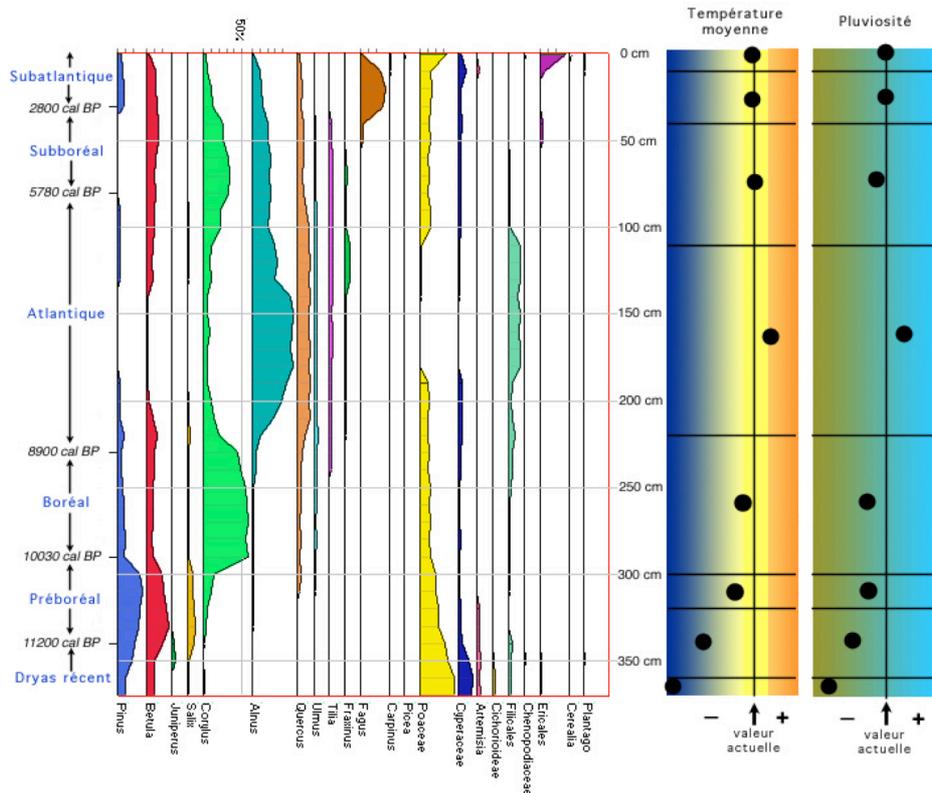
<https://eesc.columbia.edu/courses/ees/slides/climate/Orbits.G-IG.gif>

paramètres qui sont modifiés et qui changent la quantité d'énergie solaire arrivant sur Terre (l'excentricité, pouvant donner lieu à une variation de 7%) le contraste entre les saisons (la précession) et la répartition de cette énergie solaire à la surface (l'obliquité). Ainsi en fonction des valeurs de ces différents paramètres, on peut se retrouver dans une situation, où la glace peut s'accumuler d'année en année, ou bien au contraire, diminuer d'année en année. Par exemple, lorsque le contraste entre les saisons est faible, et que la distance entre la Terre et le Soleil est grande, alors les conditions pour la formation de la glace sont favorables. Mais, si au contraire, le contraste entre les saisons est plus important et la distance au Soleil plus faible, alors les conditions sont plus propices à un interglaciaire. Même s'il y a formation de glace en hiver, celle-ci va plus fondre en été dans les zones les plus limites (comme de nos jours).

Palynologie

Des géo-indicateurs, tels que les pollens, permettent de reconstruire les conditions environnementales du passé.

La majorité des plantes produisent des pollens pour leur reproduction. Ces pollens sont spécifiques à chaque espèce. Aussi, on connaît bien les conditions de développement de chacune de ces espèces aujourd'hui, c'est-à-dire les conditions de température et de précipitation pour que la plante se développe. Ainsi, lorsqu'on retrouve des pollens d'une espèce, comme, par exemple, de chêne dans des sédiments dont on connaît l'âge, on peut déduire les conditions climatiques locales au moment où ces pollens ont été déposés. Dans une région donnée, on peut ainsi établir la succession de pollens retrouvés dans une colonne verticale de dépôts et former ce qu'on appelle un *diagramme pollinique*. Ces diagrammes représentent les abondances des différents types de pollen présents en fonction de la profondeur. Ils nous renseignent donc sur les différentes conditions climatiques qui se sont succédé durant tous les dépôts et permettent ainsi de reconstituer l'évolution de la couverture végétale.



Source : https://climatic.inforef.be/palyno/manuel_palyno/manuel.htm

Mais dans ces diagrammes, on peut aussi différencier les pollens arboréens des non arboréens, c'est-à-dire des plantes herbacées, car ces dernières sont plus typiques des régions arides (dû au froid ou aux hautes températures), ce qui permet d'avoir une évolution plus générale des différentes végétations..

Les périodes glaciaires et interglaciaires

En un second temps, nous allons explorer brièvement les périodes glaciaires, caractérisées par une accumulation de glace aux hautes latitudes (en Scandinavie ou en Amérique du Nord) et aux hautes altitudes (glaciers de montagne en Patagonie, dans les Alpes ou dans l'Himalaya). Une glaciation ou période glaciaire est une période au cours de laquelle l'hémisphère Nord est significativement englacé au-delà de la seule calotte du Groenland.

Les périodes glaciaires ont démarré au début du Pléistocène, il y a 2,58 millions d'années et depuis plusieurs oscillations glaciaires-interglaciaires. Chacune de ces glaciations porte un nom bien précis, par exemple la dernière est nommée *Würm*. Mais on connaît mal les périodes glaciaires plus anciennes, car chaque nouvelle glaciation détruit les dépôts des précédentes.

Durant ces périodes, des calottes glaciaires ont pu se former dans plusieurs endroits du monde. Une calotte glaciaire est une accumulation très importante de glace s'étalant sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés et assez lourde pour déformer les couches supérieures de la Terre.

On pouvait ainsi retrouver des glaciers de montagne dans tous les massifs européens, tels que les Alpes, les Balkans, ou les Pyrénées, pour ne citer que quelques-uns. Mais, il y avait surtout une calotte très importante recouvrant toute la Scandinavie, la calotte fennoscandienne, ainsi qu'une grande calotte, coalition de plus petites, qui recouvrait une grande partie du continent nord-américain. On pouvait aussi retrouver des plates-formes de glace flottante dans l'Atlantique Nord, ainsi que des calottes glaciaires en Sibérie, tout au nord. L'Asie centrale n'avait, au contraire, que peu de glaciers volumineux. Enfin, on retrouvait des glaciers dans les massifs montagneux d'Amérique du Sud et d'Océanie.

Ces glaciers stockaient beaucoup d'eau (on peut le comprendre en considérant les deux calottes glaciaires restant au Groenland et en Antarctique qui pourraient élever le niveau des mers de plusieurs dizaines de mètres si elles fondaient complètement) ce qui avait pour conséquence de faire baisser le niveau des mers de 120 m par rapport à aujourd'hui (la Manche, p. ex., était à sec). En plus de cela, la température plus basse de 4 à 5 °C en moyenne globale par rapport à l'époque pré-industrielle, (qu'on peut comparer avec le problème de l'augmentation des 2°C ou plus à cause du réchauffement climatique) ne permettait pas de développement de grandes forêts, comme on en connaît aujourd'hui. Nos contrées étaient situées en bordure des régions recouvertes de glace et connaissaient un climat très froid, comme dans les grands déserts froids sibériens, avec une végétation éparse et de petite taille, de type toundra.

On pourrait croire que cette dernière glaciation, qui s'est terminée il y a plus de 20 000 ans, n'a pas d'impact sur la période actuelle. Cependant, les sols très fertiles, tels que ceux qu'on trouve au pays de Herve, sont composés de lœss datant de ces lointaines périodes glaciaires.

Le climat de l'Éocène : l'optimum climatique

Pour la dernière partie de cet exposé, je vais parler d'une période spéciale, appelée « *Middle Eocene Climatic Optimum (MECO)* ». Durant cette période, qui s'est passée il y environ 40 millions d'années, la température moyenne à la surface du globe était beaucoup plus importante qu'aujourd'hui. Il faisait en moyenne 24 à 26°C et jusqu'à 32°C à l'apogée du MECO et la mer était 3-4° plus chaude qu'aujourd'hui (ce qui correspond aux eaux tropicales aujourd'hui). Cela permettait le développement de plantes, comme celles que l'on peut retrouver aux tropiques avec des forêts luxuriantes, à nos latitudes. Cela était dû à une concentration de CO₂ dans l'atmosphère beaucoup plus importante qu'aujourd'hui. Cette concentration pouvait monter jusqu'à 1600 ppm au MECO ce qui causait un effet de serre beaucoup plus important (pour comparaison, la concentration actuelle de CO₂ est d'environ 410 ppm).

Conclusion

L'étude des paléoclimats, tels que les cycles glaciaires-interglaciaires ou encore les périodes plus chaudes, permettent de mieux comprendre comment l'environnement va répondre aux changements climatiques du futur. Lorsqu'on étudie des indicateurs de l'environnement tel que les pollens, on peut mieux se faire une idée de comment le climat a changé sur les derniers milliers d'années et à quoi nos régions pourraient ressembler dans le futur.

Pour en savoir plus

- Volcans : <https://www.meteocontact.fr/pour-aller-plus-loin/les-volcans-et-le-climat>
- Cycles de Milankovitch : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-cycle-milankovitch-13390/>
- Palynologie : <https://www.science-et-vie.com/nature-et-enviro/palynologie-la-diversite-des-formes-de-pollens-s-explique-enfin-49063>
- Glaciations : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/rechauffement-rechauffement-climatique-calotte-glaciaire-canada-condamnee-66774/>
- Éocène : <https://sciencepost.fr/le-climat-du-debut-de-leocene-jusqua-32-c-de-temperature-moyenne-sur-le-globe/>