

LES THEMES DE SCIENCE-CLIMAT-ENERGIE

SCE a vu le jour en juin 2018 sous l'impulsion de plusieurs professeurs d'universités européennes. Plus de 250 articles ont été publiés après examen par un Comité Editorial. Les articles sont repris dans une liste des auteurs ([ici](#)) et permettent un dialogue entre lecteurs et auteurs ou lecteurs entre eux, à travers une rubrique 'commentaires' dont les règles ont été fixées ([ici](#)).

Au terme de ces 5 ans, nous avons décidé de regrouper les articles sous forme de .pdf reprenant chaque fois un thème précis. Cela permet de disposer pour tout lecteur d'un document complet sur un sujet précis, plutôt que de devoir aller chercher les articles un à un sur une période de près de 5 ans. Une sélection des articles les plus représentatifs a été opérée afin de couvrir au mieux chaque thème.

Nous publierons au fur et à mesure ces documents reprenant les articles spécifiques.

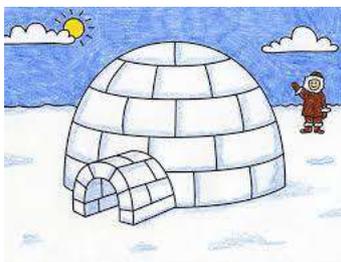
Le présent document intitulé '**Les glaces**' reprend des articles sélectionnés couvrant la période octobre 2018 à juillet 2022.

Nous espérons que ces documents seront utiles et diffusés à grande échelle.



LES GLACES

1. Pas d'erreurs pour l'Arctique !, P. Berth, p.3-7
2. Carottes de glace, CO₂ et micro-organismes, P. Berth, p.8-13
3. Une brève histoire du climat, E. Egberts, p.13-21
4. Les glaces terrestres, la cryosphère (1/3), J.C. Maurin, p.22-28
5. Les glaces terrestres, la cryosphère (2/3), J.C. Maurin, p.28-36
6. Les glaces terrestres, la cryosphère (3/3), J.C. Maurin, p.37-44
7. La péninsule Antarctique se porte bien, P. Berth, p.45-53
8. La neige n'est pas prêt de s'arrêter de tomber..., SCE, p.53-57
9. L'Antarctique géologique (1/2), A. Prétat, p.57-70
10. L'Antarctique géologique (2/2), A. Prétat, p.71-82
11. L'Arctique géologique (1/2), A. Prétat et B. Van Vliet-Lanoë, p.83-104
12. L'Arctique géologique (2/2), A. Prétat et B. Van Vliet-Lanoë, p.104-140
13. Le GIEC le confirme, l'Antarctique est resté stable depuis 1979 !, SCE, p.140-142
14. 18 navires piégés dans la glace près de la Russie, SCE, p.142-144
15. L'Arctique se réchaufferait depuis les années 1890, N. Jean, p.144-148
16. Retour sur les glaciers, J.C. Pont, p.148-150
17. Robert Vivian et les icebergs, J.C. Pont, p.150-152



1. Pas d'erreurs pour l'Arctique !

Mis en ligne SCE : 21.10.2018

Comme mentionné [dans un article précédent](#), le [DMI](#) (Danish Meteorological Institute) publie régulièrement l'évolution temporelle, mois par mois, de l'étendue de la glace de l'Arctique en millions de km². Le dernier graphique publié (Fig. 1) nous montre l'étendue de la glace au mois de septembre entre 1979 et 2018 (c'est au mois de septembre que l'étendue de glace arctique est la plus faible, moins de 10 millions de km²). Une droite, dont la pente est négative, est tracée parmi les points : tous les 10 ans, la surface semble diminuer de 11,4%. Si l'on extrapole la droite on peut calculer qu'il n'y aura plus de glace en Arctique dans 60 ans. Cependant, ne remarquez-vous rien d'étrange sur ce graphique?

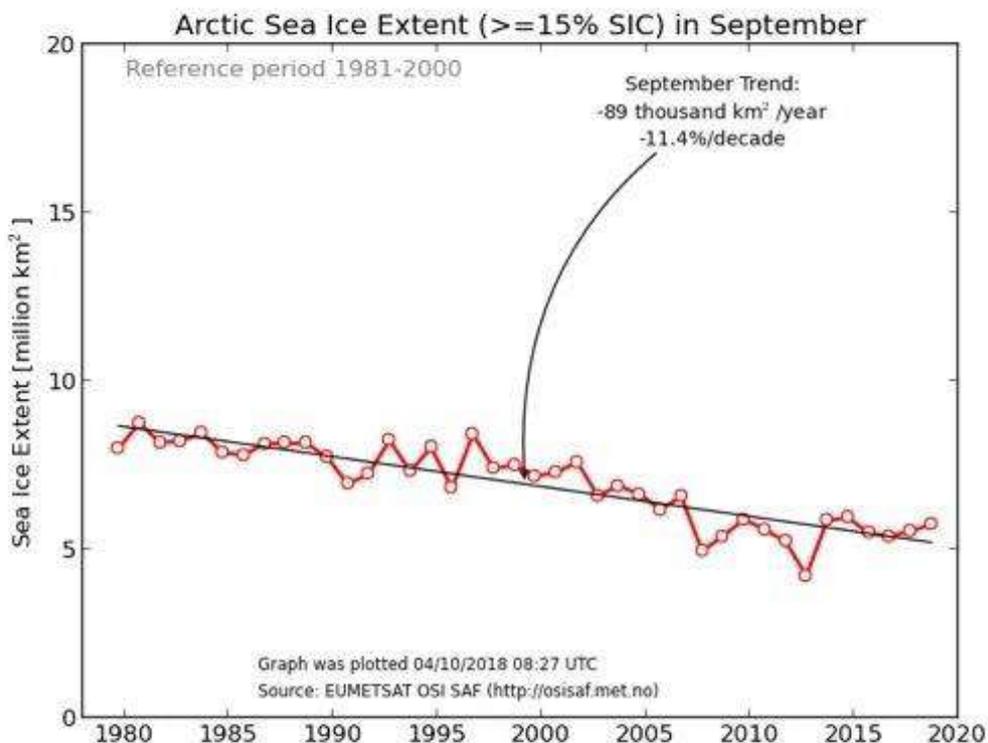


Figure 1. Etendue de la glace de mer en Arctique en Septembre. Source : DMI.

Et bien oui, il y a quelque-chose d'étrange : il n'y a pas de barres d'erreur pour chacun des points! Consultons maintenant le rapport du GIEC sur la cryosphère [\[1\]](#). Ce rapport nous donne à la page 326 un graphique comportant des barres d'erreur (Figure 2).

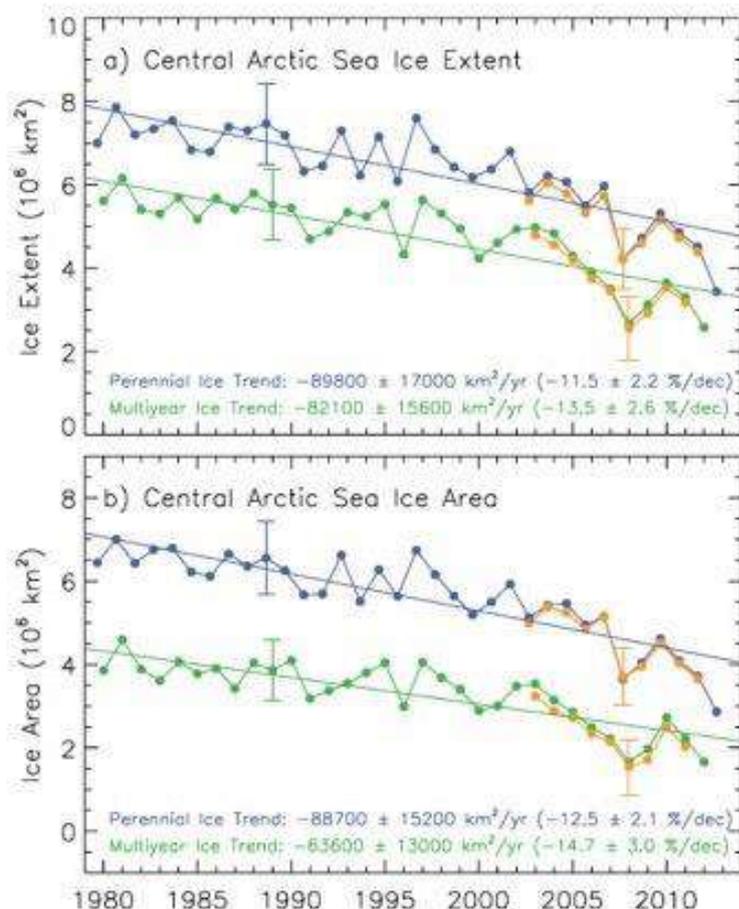


Figure 2. Etendue de la glace de mer en Arctique entre 1980 et 2012, selon le GIEC (AR5). En bleu, glace annuelle; en vert, glace âgée de plus de 1 an. Nous voyons qu'une incertitude est placée sur les courbes au niveau des années 1989 et 2008.

Nous voyons par exemple que sur la figure du GIEC (Figure 2a), la mesure de $7,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ de septembre 1989 est accompagnée d'une barre d'erreur valant ± 1 million de km^2 . Sur le graphique ci-dessous (Figure 3), des barres d'erreur de 1 million de km^2 ont donc été rajoutées sur le graphique du DMI, et ce pour les 10 dernières années. Bien entendu ceci est approximatif, mais comme les vraies barres d'erreur ne sont pas disponibles il faut bien en placer soi-même pour se faire une idée de ce qu'il se passe.

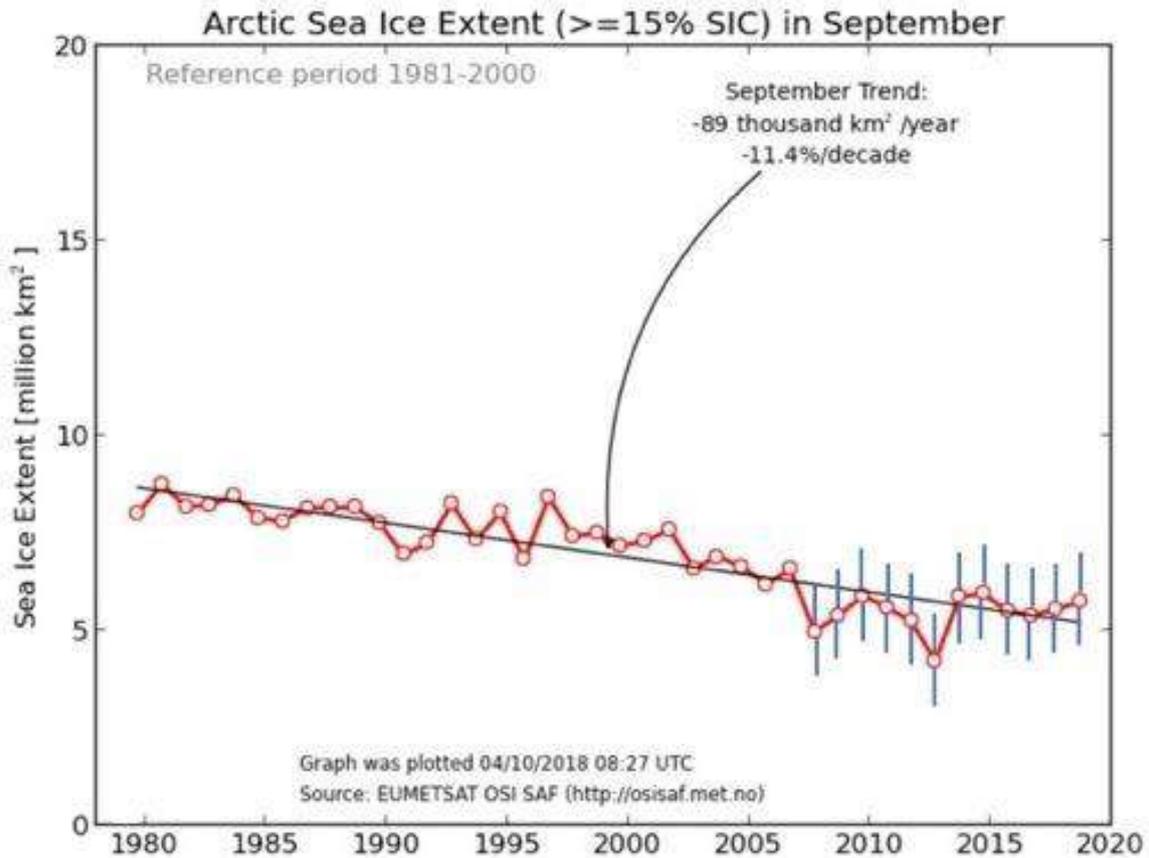


Figure 3. Etendue de la glace de mer en Arctique en Septembre, entre 1980 et 2018, avec des barres d'erreur de ± 1 million de km^2 pour les 10 dernières années (traits bleus).

Nous pouvons ainsi voir sur la Figure 3, qu'à part une valeur qui semble significativement plus basse en 2013, la surface de la glace atteinte en septembre ces 10 dernières années est relativement stable. Il est clair que la surface des glaces était plus grande en 1980, mais concernant les 10 dernières années **il n'y a probablement aucune différence significative entre les valeurs observées pour la période 2008–2018** (excepté 2013). Il faudrait bien entendu placer les véritables barres d'erreur sur le graphique et réaliser une étude statistique rigoureuse... Les puristes pourront toujours réclamer auprès du DMI.

Pourquoi la mesure est-elle si peu précise? 1 million de kilomètres carrés c'est quand-même grand... Par exemple, c'est plus ou moins la surface de l'Égypte (Figure 4), le chiffre exact étant 1 001 450 km^2 . La France, ne fait que 643 801 km^2 , quant à la Belgique n'en parlons pas, elle fait à peine 30 528 km^2 . Pour la surface d'autres pays [voir ici](#).



Figure 4. L'Egypte possède une surface de 1 million de km². Cette surface correspond à l'erreur commise par les satellites qui estiment la surface des glaces.

Pourquoi une si grande erreur? Pour le savoir, consultons les documents fournis par l'organisme chargé de collecter et de diffuser les données satellitaires ([Eumetsat OSI SAF](#)). Pas besoin d'être un spécialiste, ces documents sont très clairs :

*« Known limitations of the reprocessed sea ice concentration products are listed in this section. All the aspects listed apply in large extent to the other existing Sea Ice Concentration datasets based on Passive Microwave Radiometer (PMR) measurements. Users of the OSI SAF and other similar data sets, **should be fully aware of these so that not to bias their conclusions.**[2]«*

Voici les principaux biais selon Eumetsat :

- De la vraie glace peut être invisible pour les satellites, particulièrement dans les zones où la concentration de la glace est faible. Ceci provient du traitement appliqué aux données pour enlever le bruit de fond dû aux nuages.

- En été, la glace fond légèrement en surface (sur quelques cm) et le satellite détecte de l'eau, alors qu'il y a de la glace sous les quelques cm d'eau.
- Lorsque la glace est trop fine (<30 cm) le satellite n'est pas performant et ne voit pas la glace.
- De nombreuses données sont manquantes, dans l'espace et dans le temps. De l'interpolation spatiale et temporelle est donc réalisée afin de combler les lacunes.
- La résolution spatiale est faible. En effet, selon le canal utilisé par le satellite (la fréquence micro-onde détectée par le radiomètre embarqué), la zone analysée et considérée comme un point peut être aussi grande que 148 km x 95 km (c'est le cas par exemple pour le détecteur micro-ondes de type SMMR sur NIMBUS-7). Ceci vient du fait que pour obtenir suffisamment de micro-ondes au détecteur il faut considérer une très grande surface, car la Terre émet très peu de micro-ondes. Vraiment très peu... Pour s'en rendre compte il suffit de visualiser la courbe de Planck pour 300 K avec [SpectraCalc.com](https://www.spectracalc.com) (en plaçant « upper limit » à 1000 microns, là où commence le domaine micro-ondes).
- Des problèmes de détection sont constatés à l'interface entre les côtes et la glace de mer. Dans ces zones, le satellite ne sait pas s'il s'agit de terres, de mer ou de glace. Et donc des erreurs sont commises.

Conclusions

– Sans barres d'erreurs, un graphique ne veut rien dire. Impossible de dire si la tendance observée est significative.

– Il est indéniable que la surface des glaces arctiques en septembre 1980 (± 8 millions de km²) était plus élevée qu'actuellement (± 6 millions de km²) et que c'est significatif. En effet, pas besoin de test statistique pour voir que 8 ± 1 est significativement plus grand que 6 ± 1 .

– Les satellites ne sont pas très précis lorsqu'ils mesurent la surface des glaces. L'erreur sur la mesure vaut environ 1 million de km², c'est-à-dire la surface de l'Égypte.

– Pour les 10 dernières années (2008–2018), étant donné l'erreur sur la mesure, les valeurs ne semblent pas significativement différentes les unes des autres, si ce n'est la valeur plus basse de 2013. Les réalistes y verront une stagnation alors que les optimistes y verront bien entendu une augmentation!

Références

[1] Vaughan, D.G., J.C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen and T. Zhang, 2013: [Observations: Cryosphere](#). In: [Climate Change 2013](#): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] Sørensen et al. 2017. [Global Sea Ice Concentration Climate Data Record. Product User Manual. Product OSI-450](#). Document version: 1.0. Data set version: 2.0. DOI: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008. March 2017.

2. Carottes de glace, CO₂ et micro-organismes

Mis en ligne SCE : 22.11.2018

Les microbulles de gaz emprisonnées dans les carottes de glace sont fréquemment utilisées pour estimer le taux de CO₂ de l'atmosphère du passé. Il s'agit de méthodes de mesure indirectes. Par exemple la carotte de glace EPICA Dome C en Antarctique nous suggère que le CO₂ de l'atmosphère a varié entre 180 et 300 ppmv pendant les derniers 650 000 ans (Brook 2005). Cependant, le taux de CO₂ observé dans ces carottes de glace représente-il vraiment l'atmosphère du passé? Nous allons montrer ici qu'**un paramètre est souvent négligé** par les glaciologues, **et que ce paramètre pourrait avoir un effet considérable sur le résultat des analyses** : il s'agit de la présence de micro-organismes dans la glace et les microbulles.

2.1. Des micro-organismes sont présents dans la neige et la glace

Commençons par rappeler que les micro-organismes (bactéries, archées et micro-eucaryotes) sont ubiquistes et bien présents dans la neige et la glace, aussi bien en Arctique qu'en Antarctique, et ce de la surface jusqu'à très grande profondeur (Miteva 2008). La littérature scientifique est très abondante à ce sujet (e.g., Skidmore et al., 2005; Nkem et al., 2006; Miteva et al., 2009; Zhang et al., 2009; Branda et al., 2010; Anesio and Laybourn-Parry, 2012; Price and Bay, 2012; Møller et al., 2013; Stibal et al., 2015; Zawierucha et al., 2015; Kaczmarek et al., 2016; Chen et al. 2016).

Les chercheurs Priscu et Christner (2004) ont calculé que le nombre total de bactéries pour les calottes glaciaires en Antarctique et au Groenland, atteint 9.61×10^{25} cellules, ce qui correspondrait à un stock de carbone de 2.65×10^{-3} Gt (1 Gt = 10^9 tonnes). Ces micro-organismes sont apportés par les vents, se déposent sur la neige et finissent par être emprisonnés dans la glace lors de la compaction de la neige. Ils peuvent donc se retrouver dans les microbulles analysées par les glaciologues. Notons qu'il n'y a pas que des micro-organismes qui sont emprisonnés : nous trouvons également des virus, des pollens, et de nombreuses particules minérales et organiques (fragments d'insectes, de plantes, etc.). La glace est donc loin d'être pure, ce qui explique d'ailleurs ses nombreuses couleurs.

Lorsque la glace est très claire c'est qu'elle contient peu de particules minérales. La densité des micro-organismes est alors faible, de l'ordre de 10^2 à 10^4 mL⁻¹ (i.e., 100 à 10 000 cellules par millilitre ou centimètre cube de glace). Lorsque les particules minérales sont plus nombreuses la quantité de micro-organismes est plus élevée et peut atteindre 10^9 mL⁻¹ (Tung et al. 2006). Il existe donc clairement un lien entre quantité de particules minérales et quantité de micro-organismes (Miteva 2008). Ceci n'est pas étonnant car les particules minérales représentent des sources de nutriments, particulièrement pour les micro-organismes autotrophes, c'est-à-dire ceux capables de fixer le CO₂ atmosphérique.

2.2. Les micro-organismes de la glace sont fort diversifiés ainsi que leur métabolisme

Une étude récente, menée en Arctique et en Antarctique (Knowlton et al. 2013), nous montre que de nombreux groupes bactériens sont présents dans la neige et la glace, et ce jusqu'à de grandes profondeurs dans la glace. Notons par exemple la présence systématique de bactéries appartenant aux groupes **Firmicutes** et des **Cyanobactéries**.

La présence de **Cyanobactéries** est très importante à souligner : en effet, il s'agit de micro-organismes autotrophes, capables de fixer le CO₂ gazeux pour le transformer en matière organique. En faisant cela elles produisent de l'O₂. Par leur activité, ces Cyanobactéries peuvent donc modifier le taux de CO₂ et d'O₂ des microbulles de gaz emprisonnées dans les glaces. Ceci peut se faire lorsque la bulle de gaz vient de se fermer et que suffisamment de lumière pénètre encore dans la glace.

Quant aux **Firmicutes**, ces bactéries n'ont pas besoin de lumière et peuvent également fixer du CO₂ (Vos et al. 2009). Les Firmicutes réalisent généralement de la fermentation de matière organique en anaérobiose (comme le genre *Clostridium* : de petites molécules organiques sont alors métabolisées et génèrent CO₂ et H₂). Les Firmicutes peuvent également présenter un métabolisme hétérotrophe classique, en générant du CO₂ tout en consommant de l'O₂ et de la matière organique. Mais notons que ces deux métabolismes, fermentation et hétérotrophie classique, requièrent de la matière organique **et que celle-ci est peu abondante dans la neige et la glace**. En effet, la glace est un milieu pauvre, que l'on caractérise d'**oligotrophe** (Maccario et al. 2015). Heureusement, les Firmicutes peuvent également vivre en complète absence de matière organique et de lumière, elles sont alors qualifiées de **chimio-lithotrophes** et réalisent dans ce cas la **fixation du CO₂ par la voie réductive de l'acétyl-CoA** en employant un peu d'hydrogène (Erb 2011). Ce type de Firmicutes, fixant du CO₂, est très abondant sur Terre, notamment dans les zones de subsurface (zone de la biosphère comprise entre 10 cm et 4 km de profondeur) (Magnabosco et al. 2016). Il n'y a donc pas que les Cyanobactéries qui sont capables d'abaisser le taux de CO₂ des microbulles, il faut donc ajouter les Firmicutes chimio-lithotrophes.

En plus des Cyanobactéries et des Firmicutes notons la présence de Protéobactéries alpha, beta et gamma, trois groupes bactériens ubiquistes présentant des métabolismes variés et de nombreux genres chimio-lithotrophes capables de fixer du CO₂ en absence de lumière (Knowlton et al. 2013). Ces bactéries sont détectées à toutes les profondeurs dans la glace. En plus de ces bactéries, des champignons microscopiques (Fungi) sont également présents.

2.3. Les micro-organismes de la glace sont actifs, même à très basse température

Il est connu depuis longtemps que de nombreux micro-organismes restent actifs en-dessous de 0°C. Par exemple, *Planococcus halocryophilus* croît et se développe parfaitement à la température de -15°C (Mykytczuk et al. 2013). Le record d'activité microbienne est assez bas et atteint -39°C (Panikov et al. 2006). Ces micro-organismes se développant dans le froid sont qualifiés de **psychrophiles** par les microbiologistes. Des psychrophiles sont présents dans tous les groupes de micro-organismes. Une synthèse de l'activité métabolique des psychrophiles à très basse température a été publiée récemment (Sengupta et Chattopadhyay, 2013). Les auteurs citent par exemple des expériences avec des molécules organiques marquées avec du ¹³C et placées dans de la glace qui montrent que ces molécules se retrouvent dans les bactéries vivant dans la glace. L'activité métabolique des psychrophiles à basse température, bien que faible, est indiscutable et a été maintes fois démontrée.

Voici brièvement les adaptations des psychrophiles. Il y a trois stratégies de résistance : (1) La fluidité de la membrane cytoplasmique est augmentée (synthèse d'acides gras insaturés par expression de désaturases); (2) Des molécules antigel sont accumulées dans le cytoplasme (solutés osmocompatibles, protéines anti-gel, protéines de liaison à la glace); (3) L'efficacité catalytique des protéines est maintenue, notamment par réduction des interactions hydrophobes internes (Maccario et al. 2015).

Les psychrophiles ont également des adaptations aux environnements hypersalés. En effet, lorsque de l'eau congèle les sels sont exclus de la glace et se retrouvent dans des poches ou des films d'eau

(dans les microbulles) où l'eau reste liquide (Maccario et al. 2015). Les poches d'eau hypersalée (« brine » en anglais) présentent des diamètres jusqu'à quelques centaines de micromètres. Selon le type d'eau qui a congelé, eau douce ou eau de mer, la salinité de ces zones d'eau liquide dans la glace peut varier de 30 à 230 ppt (part per thousand, ou ‰) (Maccario et al. 2015). Il n'est donc pas étonnant de constater que les micro-organismes de la neige et de la glace possèdent également diverses adaptations à la vie sous une pression osmotique élevée. Par exemple, ces organismes synthétisent et accumulent des composés osmocompatibles comme la glycine, la bétaine, la choline, la sarcosine, ou le glutamate (Simon et al 2009). Les micro-organismes ont également une grande proportion de protéines membranaires acides, ce qui évite leur précipitation en présence de grandes concentrations en sels (Saum et al. 2013).

Nous voyons donc que de nombreux micro-organismes sont actifs et très bien adaptés à la vie à très basse température.

2.4. Les micro-organismes de la glace peuvent modifier l'atmosphère des microbulles

Ceci a été démontré *in situ*, en 2017 par l'équipe de Redeker (Redeker et al. 2017), à la fois pour l'Arctique et pour l'Antarctique. Cette étude ne concernait pas le taux de CO₂ mais celui d'autres gaz pouvant être enfermés dans les bulles (les halogénures de méthyle). L'étude démontre clairement que des micro-organismes sont actifs *in situ* et peuvent modifier la composition des microbulles de gaz dans la neige et la glace. Si c'est le cas pour les micro-organismes capables de traiter les halogénures de méthyle, pourquoi ne serait-ce pas le cas pour le CO₂ des microbulles étant donné la présence de Cyanobactéries ainsi que d'autres bactéries chimio-lithotrophes?

2.5. Les études les plus citées concernant le taux de CO₂ des microbulles dans la glace ne prennent jamais en considération les micro-organismes

Par exemple, les études suivantes, toutes très célèbres et focalisées sur les microbulles des carottes de glace, ne comportent pas le mot « Bacteria » dans le texte :

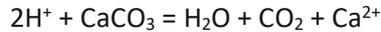
- Neftel et al. (1988) Nature 331:609–611.
- Fischer (1999) Science 283:1712–1714.
- Petit et al. (1999) Nature 399:429–436.
- Monnin et al. (2001) Science 291:112–114.
- Brook (2005) Science 310:1285
- Louergue et al. (2007) Clim Past 3:527–540.
- Shakun et al. (2012) Nature 484:49–55.

En d'autres termes, ces études ne considèrent pas la possibilité que les taux de CO₂ des microbulles puissent être affectés par les bactéries vivant dans la glace. Ceci pourrait être expliqué par le fait que la microbiologie des glaces est un domaine de recherche récent et que les glaciologues ne collaborent pas assez avec les microbiologistes.

2.6. En plus des micro-organismes, l'atmosphère des microbulles peut également être affectée par d'autres phénomènes

De nombreux problèmes peuvent survenir lors de la mesure des gaz emprisonnés dans les microbulles de la glace. Ces problèmes sont traités par Jaworowski (2007). [Voir aussi ici](#). Les carottes groenlandaises sont par exemple impropres à la mesure des teneurs en CO₂ atmosphérique lors des

transitions climatiques (Delmas 1993). En effet, des modifications post-dépôt peuvent affecter la composition de la glace et de ses bulles d'air : par exemple, les carbonates contenus dans les poussières peuvent produire du CO₂ en réagissant avec des espèces acides de l'atmosphère (H₂SO₄, HNO₃). Ce CO₂ produit (cf. l'équation générale ci-dessous) n'était donc pas présent à l'origine dans la microbulle et les résultats sont faussés :



Des réactions avec des composés organiques peuvent aussi entrer en jeu. L'Antarctique semble moins affecté par ces modifications post-dépôt (Monnin et al. 2001), aussi **ce sont essentiellement les carottes antarctiques qui sont utilisées pour suivre l'évolution du CO₂ atmosphérique** lors des glaciations et déglaciations (outre le fait que les carottes groenlandaises ne fournissent pas d'enregistrements antérieurs à 120 000 ans du fait d'un fort taux d'accumulation).

2.7. Conclusions

- De nombreux micro-organismes (de 10² à 10⁹ bactéries par cm³) sont présents dans les carottes de glace utilisées par les glaciologues pour estimer le taux de CO₂ de l'atmosphère du passé, mais les glaciologues n'en tiennent jamais compte. Les glaciologues considèrent que la glace est stérile;
- Les micro-organismes présents dans la glace sont cependant actifs et bien adaptés aux très basses températures. Ils se développent dans des poches et des films d'eau liquide hypersalée, où la température peut descendre plus bas que –20°C et restent même actifs jusque –39°C;
- Les micro-organismes de la glace sont capables de modifier l'atmosphère des microbulles emprisonnées. Ceci a été clairement démontré pour certains gaz (halogénures de méthyle);
- Les micro-organismes de la glace sont surtout représentés par des Cyanobactéries et des Firmicutes qui possèdent tout l'arsenal génétique permettant de faire chuter le taux de CO₂ des microbulles. Ces micro-organismes y ont tout intérêt, car c'est quasi la seule source de carbone disponible dans ce milieu fermé fortement oligotrophe. Cette fixation de CO₂ peut se dérouler en l'absence de lumière pour les bactéries chimio-lithotrophes. En d'autres mots, des micro-organismes ont pu faire baisser le taux de CO₂ des microbulles emprisonnées dans la glace, et ce dès l'instant de leur formation;
- Les taux de CO₂ du passé renseignés par les carottes de glace sont donc potentiellement biaisés et pourraient même être assez loin de la réalité. Nous pouvons en conclure que les données de CO₂ atmosphérique fournies par les carottes de glace doivent être interprétées avec beaucoup de précaution ;
- Il est urgent de réaliser des études de terrain où des microbulles sont étudiées dès leur formation, et d'analyser systématiquement leur contenu microbien. Le couplage de la microbiologie de la glace environnante et des données atmosphériques locales (CO₂ et température) devrait en effet être mieux contraint.

2.8. Références

- Anesio A.M., Laybourn-Parry J. (2012). Glaciers and ice sheets as a biome. *Trends Ecol Evol* 27:219–225.
- Branda E., Turchetti B., Diolaiuti G., Pecci M., Smiraglia C., Buzzini P. (2010). Yeast and yeast-like diversity in the southernmost glacier of Europe (Calderone Glacier, Apennines, Italy). *FEMS Microbiol Ecol* 72:354–369.
- Brook EJ (2005) Tiny bubbles tell all. *Science* 310:1285–1287.
- Chen Y, Li XK, Si J, Wu GJ, Tian LD, Xiang SR (2016) Changes of the bacterial abundance and communities in shallow ice cores from Dunde and Muztagata glaciers, Western China. *Front Microbiol.* 2016 Nov 1;7:1716.
- Delmas RJ (1993) A natural artefact in Greenland ice-core CO₂ measurements. *Tellus B*, 45:391–396.
- Erb TJ (2011) Carboxylases in Natural and Synthetic Microbial Pathways. *Appl Environ Microbiol* 77:8466–8477.
- Jaworowski Z (2007) CO₂ : the greatest scientific scandal of our time. *21st CENTURY Science & Technology*, Spring/Summer 2007, 14–28.
- Kaczmarek Ł, Jakubowska N., Celewicz-Goldyn S., Zawierucha K. (2016). Cryoconite holes microorganisms (algae, Archaea, bacteria, cyanobacteria, fungi, and Protista) – a review. *Polar Res* 52:176–203.
- Knowlton C, Veerapaneni R, D’Elia T, Rogers SO (2013) Microbial analyses of ancient ice core sections from greenland and antarctica. *Biology (Basel)* 2(1):206-32.
- Maccario L, Sanguino L, Vogel TM, Larose C (2015) Snow and ice ecosystems: not so extreme. *Res Microbiol* 166:782–795.
- Magnabosco C, Ryan K, Lau MC, Kuloyo O, Sherwood Lollar B, Kieft TL, van Heerden E, Onstott TC (2016) A metagenomic window into the 2-km-deep terrestrial subsurface aquifer revealed multiple pathways of organic matter decomposition. *FEMS Microbiol Ecol* 94(10).
- Miteva V (2008) Bacteria in snow and glaciers ice. In : R. Margesin et al. (eds.) *Psychrophiles: from Biodiversity to Biotechnology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- Miteva V., Teacher C., Sowers T., Brenchley J. (2009). Comparison of the microbial diversity at different depths of the GISP2 Greenland ice core in relationship to deposition climates. *Environ Microbiol* 11:640–656.
- Møller A.K., Søbørg D.A., Al-Soud W.A., Sørensen S.J., Kroer N. (2013). Bacterial community structure in High-Arctic snow and freshwater as revealed by pyrosequencing of 16S rRNA genes and cultivation. *Polar Res* 32:17390.
- Monnin E, Indermühle A, Dällenbach A, Flückiger J, Stauffer B, Stocker TF, Raynaud D, Barnola JM (2001) Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination. *Science* 291:112–114.
- Mykytczuk NC, Foote SJ, Omelon CR, Southam G, Greer CW, Whyte LG (2013) Bacterial growth at -15 °C; molecular insights from the permafrost bacterium *Planococcus halocryophilus* Or1. *ISME J* 7(6):1211-26.
- Nkem J., Wall D., Virginia R., Barrett J.E., Broos E., Porazinska D., et al. (2006). Wind dispersal of soil invertebrates in the Mc Murdo Dry Valleys, Antarctica. *Polar Biol* 29:346–352.
- Panikov NS, Flanagan PW, Oechel WC, Mastepanov MA, Christensen TR (2006) Microbial activity in soils frozen to below –39 °C. *Soil Biol Biochem* 38:785–794.
- Price P.B., Bay R.C.(2012). Marine bacteria in deep Arctic and Antarctic ice cores: a proxy for evolution in oceans over 300 million generations. *Biogeosciences* 9:799–3815.

Priscu J.C., Christner BC (2004) Earth's icy biosphere, pp. 130-145, In : Microbial Diversity and Bioprospecting, A. Bull (editor). Chap 13. ASM Press, Washington, D.C.

Redeker KR, Chong JPJ, Aguion A, Hodson A, Pearce DA (2017) Microbial metabolism directly affects trace gases in (sub) polar snowpacks. J R Soc Interface. 2017 Dec;14(137). doi: 10.1098/rsif.2017.0729.

Saum SH, Pfeiffer F, Palm P, Rampp M, Schuster SC, Müller V, et al. Chloride and organic osmolytes: a hybrid strategy to cope with elevated salinities by the moderately halophilic, chloride-dependent bacterium Halobacillus halophilus. Environ Microbiol 15:1619–33.

Sengupta D, Chattopadhyay MK (2013) Metabolism in bacteria at low temperature: A recent report. J Biosci 38:409–412.

Simon C, Wiezer A, Strittmatter AW, Daniel R. Phylogenetic diversity and metabolic potential revealed in a glacier ice metagenome. Appl Environ Microbiol 75:7519–26.

Skidmore M., Anderson S.P., Sharp M.J., Foght J.M., Lanoil, B.D. (2005). Comparison of microbial community composition in two subglacial environments reveals a possible role for microbes in chemical weathering processes. Appl Environ Microbiol 71:6986–6997.

Stibal M., Gözdereliler E., Cameron K.A., Box J.E., Stevens I.T., Gokul J.K., et al. (2015). Microbial abundance in surface ice on the Greenland Ice Sheet. Front Microbiol 6:225.

Tung HC, Price PB, Bramall NE, Vrdoljak G (2006) Microorganisms metabolizing on clay grains in 3 km deep Greenland basal ice. Astrobiology 6:69–86.

Vos P et al. (2009) [Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Volume 3: The Firmicutes.](#)

Zawierucha K., Koliccka M., Takeuchi N., Kaczmarek Ł. (2015). What animals can live in cryoconite holes? A faunal review. J Zool 295:159–169.

Zhang X.-J., Ma X., Wang N., Yao T. (2009). New subgroups of Bacteroidetes and diverse microorganisms in Tibetan plateau glacial ice provide a biological record of environmental conditions. FEMS Microbiol Ecol 67:21–29.

3. Une brève histoire du climat

Mis en ligne SCE : 12.09.20189

ATTENTION ! Cet article pourrait permettre d'économiser des milliards d'euros...

Après un été avec des températures au-dessus de 40°C, les prédictions de catastrophes sont allé bon train. "Si on ne fait rien, ..." Nos politiques, pressés par une (petite) partie de leur électorat, proposent des mesures à faire pâlir les contribuables impuissants que nous sommes. Pensez aux **mille milliards d'euros que veut dépenser la nouvelle présidente de la Commission européenne pour juguler le climat** et limiter le réchauffement climatique.

Dans l'ensemble, on traite cette question sans aucun regard en arrière. Comme si le changement climatique était un phénomène nouveau, qui nous est tombé dessus parce qu'on roule en voiture. Cependant, il ne s'agit pas d'un phénomène nouveau et le monde francophone est particulièrement bien placé pour le savoir. Nous possédons un livre fouillé sur l'évolution du climat entre l'an 58 avant Jésus-Christ et 1842 A. D., un véritable trésor ! Pourquoi ? Parce que cela nous donne le recul indispensable pour mieux comprendre ce qui nous arrive aujourd'hui. En 1845, Joseph-Jean-Nicolas Fuster a publié son livre de 503 pages *Des changements dans le climat de la France : histoire de ses révolutions météorologiques* aux éditions Capelle à Paris.^[1] Son livre nous résume ainsi l'évolution du climat pendant presque deux millénaires.

Le livre de Joseph-Jean-Nicolas Fuster (Figure 1) est divisé en quatre sections : 1. Des changements de notre climat; 2. De la nature des changements de notre climat; 3. Des grandes intempéries de la France; 4. Des causes des changements de notre climat. **Le but du présent article est de relever de ce long livre les choses qui nous semblent pertinentes dans l'appréciation des changements climatiques récents et de mettre en évidence les liens éventuels entre climat et météo.** Nous terminerons par quelques conclusions par rapport à notre actualité.

Les références au livre de Fuster se trouvent entre parenthèses. Attention, les pages du livre ne correspondent pas à la pagination du PDF. Il y a une différence de 14 pages.

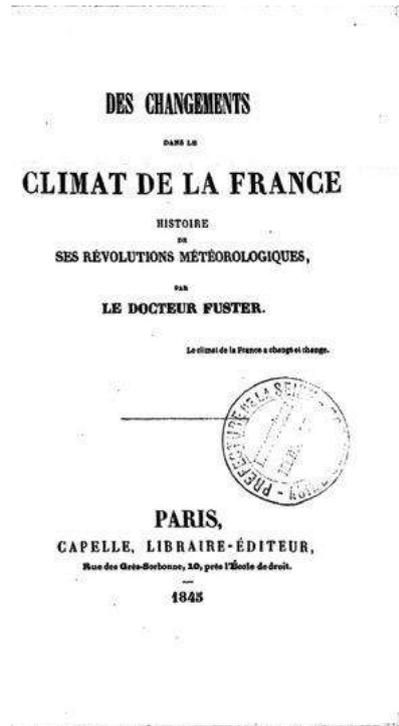


Figure 1. Livre de Joseph-Jean-Nicolas Fuster publié en 1845.

3.1. Le climat

Quand Jules César envahit la Gaule [2], celle-ci connaît un climat très différent d'aujourd'hui. L'hiver commence en octobre et dure jusqu'à mai, de sorte que César mène ses campagnes de conquête dans les mois de l'été, de juillet à la mi-septembre. L'hiver gaulois est rude, huit mois d'un froid excessif, des pluies diluviales, et une humidité exubérante, des vents impétueux et des tempêtes furieuses (83). Selon Diodore : *"Toutes les rivières navigables (ce qui signifie les rivières les plus profondes) de la Gaule gèlent aisément."* (71). Cela inclut le Rhône (6). Afin de mieux saisir la différence avec les temps récents, même au plus fort de la période froide suivante, il n'y a eu que trois hivers où toutes les rivières ont gelé au point de permettre à des charrettes de les traverser. Ce furent les hivers de 1709, 1789 et 1830 (85). Au temps de César, le renne et l'élan peuplent la Forêt Noire (56). Même le Danube inférieur gèle en hiver (58) et cela jusqu'au cinquième siècle (59). En Gaule aussi, jusqu'à 400 ans après César, le froid de l'hiver est mordant et la neige très abondante, et cela dès l'équinoxe de l'automne (63). Même au temps du roi Théodoric le Grand, qui régna entre 493 et 526, la guerre en Gaule ne commença pas avant le 24 juin (64).

Le climat détermine l'agriculture. Comme on ne possède pas des relevés de température pour le passé,[3] on doit procéder autrement pour suivre l'évolution du climat. Fuster se sert principalement de la présence de la vigne et, accessoirement, de l'olivier, du figuier et des agrumes.

Dès 218 avant Jésus-Christ, la culture de l'olivier est signalée dans les Basses-Alpes, au temps du passage de l'armée d'Anibal de Carthage. La vigne, présente au moins 150 ans plus tôt, était limitée à la Gaule transalpine, et ne poussaient donc pas plus au nord. Même à Vienne, au sud de Lyon, elle ne produisait pas un bon vin (83). Au temps d'Auguste, le début de l'ère chrétienne, l'Aquitaine ne connaît pas encore la vigne. Y poussait seulement du millet (87). Trente ans plus tard, la vigne y est cultivée. Le climat commence lentement à se réchauffer. Avant la fin du premier siècle, la vigne a atteint l'Auvergne et la Franche-Comté. En 358, elle est en région parisienne et en 379 en bord de Moselle. Le figuier également se retrouve à Paris, tant que l'on l'empaille et l'hiver de Lutèce est vanté pour sa douceur (96). En 356, les blés étaient mûrs au solstice de l'été entre Sens et Reims (97). Mais il pouvait encore geler fort. En 357, l'empereur Julien, l'Apostat, parle de la Meuse et du Rhin complètement gelés (106). En fait, le climat de la Gaule mettra 500 ans à s'échauffer d'un bout à l'autre (112).

Devenue entretemps la France au sixième siècle, le temps des Mérovingiens, le pays était plus chaud qu'au milieu du 19^e siècle (113). Le palmier à dattes pousse en Provence (115) et la vigne s'étend jusqu'en Lorraine, en Normandie et en Bretagne. Dans les années ordinaires, il n'y a plus ni gelées ni neige selon Grégoire de Tours en 589 (118). En 660, on mentionne les vignes à Corbie dans la Somme. Du septième au neuvième siècle, la vigne est seulement absente des Flandres à cause des marécages nombreux (122). Au dixième siècle, on mentionne des vendanges en Flandre, dans le Hainaut, dans le Brabant jusqu'à Liège et Louvain (128), et même jusqu'en Pologne en cette fin du premier millénaire (132) et jusqu'au seizième siècle, même si le vin n'était plus très bon (133). Au douzième siècle, les vignes de Gloucester sont réputées pour la qualité de leur vin (134).

Pourtant, vers le milieu du neuvième siècle, le temps se gâte. A la terreur des hommes du Nord, les Vikings,[4] s'ajoute un temps de plus en plus capricieux[5]. Des vignes disparaissent à divers endroits, comme en la future Normandie (192). Une lettre de 1468 mentionne l'absence de la vigne en Flandre, en Artois et en Picardie (197). Ce n'était pas un changement dans les goûts. On continue à s'en procurer à grands frais. Mais le climat ne permet plus de planter la vigne dans ces régions. De même, la vigne disparaît de l'Angleterre dès le quatorzième siècle (199). Les Normands en sont réduits à boire du cidre "par une espèce de malédiction du Ciel", dit-on à Paris au temps de Henri III (200). En Ile de France, la vigne prospère encore quelques siècles, pour se détériorer à partir du seizième. La même chose se passe pour les vignes d'Anjou, de la Saintonge et de l'Orléanais (201).

Avec l'hiver de 1709, le climat commence aussi à se dégénérer dans le Midi. Dans cette région, les orangers, les limoniers, les citronniers, les dattiers et même la canne à sucre poussaient en pleine terre et produisaient un excellent fruit (202ss). Mais le 18^e siècle va enrayer tout cela. Même le raisin ne rougit plus en Languedoc en 1789. Dès 1765, la culture de l'olivier quitte la région de Montélimar, son point le plus éloigné de la Méditerranée, pour se rapprocher de plus en plus de la côte (214).

Voici donc en quelques lignes la grande courbe du climat pendant ces presque 2000 ans. Nous ne parlons pas ici des soubresauts de la météo. Cela constitue un autre sujet. Il est indéniable que le climat de notre partie du monde a connu une grande oscillation en cette longue période. D'un climat froid, voire très froid au temps de César, le climat s'est réchauffé dès le début du premier siècle pour trouver des valeurs probablement supérieures à nos temps modernes. Puis, à partir de la fin du neuvième siècle, nous entrons dans une nouvelle période de froid, même si celui-ci n'atteint pas les valeurs du temps de César. Jusqu'au moment où Fuster écrit son livre, entre 1842 et 1844, cette

vague de froid a perdurée. Ce n'est que plus tard qu'une nouvelle période de réchauffement est perceptible, période qui se poursuit jusqu'à aujourd'hui.

3.2. La météo

Pour observer le changement du climat, il faut du recul. Ce n'est pas la même chose pour les excès de la météo. On en parle tout le temps, et cependant, on l'oublie souvent tout aussi vite. C'est ce qui nous donne l'impression que le temps n'a jamais été aussi exécrationnel qu'aujourd'hui et que tous les records sont battus. En fait, nous avons oublié le passé très chahuté de la météo sous nos latitudes.

La troisième partie du livre de Fuster concerne ce qu'il appelle "les intempéries". Voici ce qu'il en dit (255) : "... le climat et ses perturbations ne marchent pas nécessairement d'accord : le climat est la condition ordinaire de l'air, l'expression de ses qualités communes, son état habituel ou moyen; ses écarts en indiquent au contraire les conditions exceptionnelles, les états excentriques ou anormaux, les manières d'être insolites ou extraordinaires ..." Il commence par donner un tableau qui mentionne ces intempéries telles que les ont enregistrées des témoins "dignes de foi et presque toujours présents à ces perturbations". En voici donc la liste établie par le Dr Fuster :

Siècles	Grands hivers	Grands étés	Grandes pluies	Grandes sécheresses	Grandes vicissitudes	Total
IV	6	0	1	1	0	8
V	2	0	1	0	2	5
VI	2	7	8	2	4	23
VII	1	0	1	1	0	3
VIII	1	1	2	1	1	6
IX	11	3	9	3	6	32
X	1	3	3	4	5	19
XI	7	1	11	3	6	28
XII	9	3	6	7	9	34
XIII	14	1	5	5	6	31
XIV	11	8	13	8	18	58
XV	14	3	4	0	9	30
XVI	15	14	14	3	11	57
XVII	15	5	7	9	5	41
XVIII	25	23	15	15	29	107
XIX	10	13	13	13	19	68
Sommes	147	85	113	75	130	550

Les détails pour chaque siècle se trouvent dans le [PDF joint](#).

Par la force des choses, les détails qui suivent devront être plus que lacunaires.[6]

Hivers : Même en pleine période de réchauffement du climat, il était possible d’avoir un hiver extrêmement rude : “La rigueur de l’hiver de **994** s’étendit du 15 novembre au 15 mai” (268). L’hiver de **1218** commença le 28 septembre. Des gelées détruisirent la majeure partie du raisin. Puis, du 30 octobre jusqu’au 6 décembre, on pouvait traverser les lacs et les rivières, comme la Loire et la Seine. Après un court relâchement, gelées et neiges devinrent continuelles jusqu’au milieu du mois de mars. Au milieu du mois de mai, les champs avaient à peine quelques épis, et la vigne quelques bourgeons (269). L’hiver de **1458** fut si rigoureux qu’une armée de 40.000 hommes put camper sur le Danube (279). Le froid de l’hiver de **1589** fut si rude qu’il gela entièrement le Rhône; les mulets, les voitures, les charrettes, tout le traversait à Tarascon comme sur une grande route, même les canons (271). L’hiver de **1638** vit le port de Marseille gelé. L’hiver **1829-1830** a commencé en début octobre. La Seine, le Rhin et le Rhône gelèrent et purent être traversée à pied en décembre et en février (274). La température allait de -10,1°C à Marseille à -28,1°C à Mulhouse (302). A ceci, on peut ajouter les “frost fairs”, les foires sur glace, sur la Tamise qui s’est gelée complètement par moment durant 23 hivers entre 1309 et 1814.^[7]

Etés : En plein refroidissement climatique, en **1684**, l’été a été parmi les plus chauds : 68 jours à 25°C entre midi et 15 heures, 16 jours à 31°C et 3 jours à 35°. En **1701**, 62 jours à 25°C, 11 à 31°C, 9 à 35°C et un jour à 40°C. (304s). En **1705**, à Montpellier, on pense que la température à l’ombre a atteint les 42°C et au soleil les 100°C, température de l’eau bouillante (318). L’été de **1793** fut exceptionnel. Les mois de mai et de juin, il avait gelé continuellement, mais dès le 1 juillet commencèrent les grandes chaleurs et pendant un mois, la température oscilla entre 26°C et 40°C. Durant ces chaleurs, le vent était au nord (307s).

Sécheresses : La sécheresse de **357** permit de passer le Rhin à gué (330). En **1325**, la sécheresse fut telle qu’on ne comptait à peine la valeur de deux jours de pluie sur quatre mois (324). Celle de **1632** dura depuis le 12 juillet jusqu’au 15 septembre (325). Aux Pays-Bas, l’armée de Louis XIV pouvait passer les fleuves à gué, le 5 juin **1672**, l’année de toutes les catastrophes en ce pays (330).

Pluies : En **580**, le Rhône et la Saône inondèrent Lyon, détruisant un grand nombre d’édifices et une partie du mur. Les habitants se réfugièrent sur les collines de Saint-Just et de Saint-Sébastien, craignant un nouveau déluge. La grêle, des tremblements de terre, les explosions de la foudre et un ouragan terrible vinrent ajouter au spectacle de cette désolation. La pluie était tombée pendant 20 jours de suite (337). L’affreuse famine de **1030-1033** eut pour cause l’excès de la pluie ... Le sol resta tellement trempé durant ces trois ans, “qu’il n’offrit pas un seul sillon propre à recevoir le grain (339). En **1544**, le Rhône renversa 390 mètres du rempart d’Avignon et en **1583**, il renversa les remparts d’Arles (353). Les pluies de l’automne **1766** ravagèrent Albi, Montauban, Sète, Montpellier, la Provence et le Roussillon (353s).

Vicissitudes : Au milieu du mois d’avril **1063**, il survint quatre jours d’un hiver si âpre avec des vents et des neiges, que la plupart des arbres et des vignes périrent, et que les oiseaux et les troupeaux moururent de froid (358). Depuis le grand ouragan (il abattit le haut de l’église Saint-Louis sur les assistants (369) de **1701**, et pendant 10 ans, les saisons étaient chamboulées. Saint-Simon affirma que, pendant cette période et s’aggravant de plus en plus, “on n’a plus du tout de printemps, qu’on a peu d’automne, et que l’été se retrouve réduit à quelques jours.” (360) L’hiver rude de **1789** semblait avoir consommé le froid pour les trois hivers suivants. Toutefois, les printemps et les étés de ces quatre années connurent un froid très rigoureux. La nuit du 30 au 31 mai **1793**, les vignes gelèrent dans toute la France (362).

Orages et tempêtes : Vers **753**, il y eut dans toute la France une si horrible tempête que le tonnerre dura 22 heures : elle fit mourir de frayeur 3000 personnes et plus de 24000 bêtes (366). En **823** ou

824, des grêles énormes ravagèrent les campagnes. Vers le solstice de l'été, et les témoignages sont unanimes, dans le pays d'Autun en Bourgogne, on vit tomber du ciel de véritables blocs de glace (Fuster souligne sa certitude des mesures et cite ses différentes sources) de 4,873 mètres (15 pieds) de long sur 1,949 mètres (6 pieds) de large et de 0,650 mètres (2 pieds) d'épaisseur (367). La grêle tombée le 24 juin **1778** à Saint-Pierre-du-Regard en Basse-Normandie forma une masse de glace qui se conserva durant six jours malgré la chaleur (370).

Fuster souligne l'augmentation de ces intempéries au fur et à mesure des siècles. Il dit que si on les compte par période de deux siècles, on obtient la progression suivante de la fréquence de ces intempéries : 12, 26, 37, 47, 65, 88, 98 et 175, le dernier chiffre ne comprenant qu'un siècle et demi. Si les premiers siècles de l'ère chrétienne connaissaient sans doute une pénurie d'observateurs, ce ne fut pas le cas des 7^e et 8^e siècles. Les chiffres pour ces siècles seraient donc plutôt fiables et la différence avec les siècles suivants n'en est que plus marquante.

Les intempéries, nous l'avons déjà dit, correspondent à notre vécu de la météo. Y a-t-il pourtant un lien entre celles-ci et le climat ? L'augmentation régulière de ces intempéries semble indiquer un certain lien. Elles sont nettement plus nombreuses au fur et à mesure que le climat se refroidit. Elles n'en sont pas la cause, mais elles semblent l'accompagner. Bien que présentes en un certain nombre durant 6^e et 9^e siècles, le climat froid des siècles suivants semble les favoriser et les aggraver particulièrement. Est-ce que cela veut dire qu'elles sont moins en évidence dans notre aire géographique depuis que le climat se réchauffe à nouveau ? Ce serait sans doute une étude à faire.

Notons autre chose. Nous sommes tous assez enclins à croire que nous sommes particulièrement mal lotis pour ce qui est le temps. La description abondante de Fuster permet de corriger cette idée. Nous sommes plutôt favorisés par des intempéries, dans l'ensemble, plus clémentes que ce qu'ont connu nos peuples dans les siècles précédents. Peut-être qu'il nous faut apprendre à nous plaindre un peu moins du temps !

3.3. Conclusions de Fuster

Fuster écrit une dernière section sur les causes du changement climatique. Nous aimerions nous y arrêter courtement et le comparer ensuite à d'autres causes, invoquées de nos jours.

Pour Fuster, la cause derrière le changement du climat est liée à son temps. Il se trouve au bout d'un refroidissement climatique de plusieurs siècles, sans aucun signe de changement à venir. Pour lui, les causes sont à chercher sur terre ou dans l'atmosphère, mais ni plus haut, comme notamment le pouvoir calorifique et lumineux du soleil (400), ni plus bas, comme dans le cœur chaud de la planète. Il passe en revue la géographie : l'abaissement des collines et des montagnes, laissant s'engouffrer le vent froid, le changement des côtes, particulièrement des embouchures des fleuves, comme le Rhin et le Rhône. Puis, il y a l'influence de l'homme qui modifie profondément la nature. Pour Fuster, cela n'était pas un méfait, une calamité, mais plutôt le contraire. Par son action, l'homme a amélioré le climat. Les immenses forêts du temps de César étaient, selon lui, une des causes principales du climat très froid. Dès l'invasion romaine, on va réduire la forêt et permettre au sol de se réchauffer. Cette destruction de la forêt était d'une part une nécessité impérieuse pour César : la forêt jouait en faveur de la résistance gauloise. D'autre part, cette destruction massive pendant les 10 ans de campagnes militaires "tarit d'un seul coup une puissante source de froid, de pluies et d'humidité. Le soleil [...] échauffa désormais très vivement des plaines dénudées ; les pluies devinrent moins abondantes en l'absence de hautes futaies, et l'excès d'humidité échappé jadis des masses d'arbres

ou dégagé d'un terrain sous leur abri, ne manqua pas de diminuer." (429s) Aux effets météorologiques s'ajoutèrent peu à peu des changements climatiques : plus de chaleur, moins d'intempéries. En trois siècles, la culture de la vigne atteint la région de Lutèce. La conclusion de Fuster est donc que les grands défrichements, toutes autres choses étant égales, réchauffent le climat (439).

Le 5^e siècle met tout cela en grand danger. Les invasions des barbares, Vandales, Goths, Huns, Francs pour ne mentionner qu'eux, saccagent le pays. Mais ce fut la christianisation de ces barbares qui empêchait une calamité plus grande. Dès le 6^e siècle, on revient à la gestion romaine du territoire. Les établissements monastiques, de plus en plus nombreux, vont en étendre encore les bienfaits en s'établissant dans les régions les moins hospitalières. Fuster : "Le climat recueillit le fruit de ces travaux : il n'avait jamais été jusque-là, et il n'a jamais plus été depuis aussi chaud, aussi égal ni aussi paisible." (457)

Dès la mort de Charlemagne, les choses changent. La guerre civile, les invasions des Vikings, le dépeuplement causé par les croisades, les invasions hongroise et mongole à l'Est, la Peste noire, les guerres de religions, tout cela contribue à l'abandon des cultures. Partout il y avait des champs en friche et des landes incultes couvertes de bruyères. Des troupes de loups venaient jusqu'aux abords des villes. L'équilibre entre forêts et agriculture était brisé.

Fuster conclut son livre ainsi : "Une heureuse transformation du sol, sous un concours d'influences privilégiées, avait amené les améliorations des neuf ou dix premiers siècles de l'ère chrétienne. Une transformation en sens inverse, sous un concours d'influences désastreuses, a opéré les détériorations des neuf ou dix autres siècles." (498)

Est-ce que ses conclusions sur les causes du changement du climat sont recevables ? Que la présence importante des forêts influence le temps, et peut-être le climat, ne fait pas beaucoup de doute. En ce sens, la raison indiquée par Fuster pour l'entame du réchauffement dès le début de l'ère chrétienne n'est sans doute pas à négliger. Ce qu'il n'arrive pas à prouver, c'est le retour massif de la forêt à haute futaie à partir du 10^e siècle. Que l'époque soit devenue calamiteuse est une évidence. Mais l'effet de cela sur la couverture forestière n'est pas prouvé. Il faut donc rejeter la preuve comme insuffisante.

3.4. Ce qui nous amène à notre temps.

Commençons par faire quelques comparaisons avec les 1900 ans décrits par Fuster. Il avait relevé un cycle d'environ 1800 ans. Une période de réchauffement d'environ neuf siècles, suivie d'une période d'environ neuf siècles de refroidissement. Bien sûr, Fuster est bien trop proche du début du réchauffement qui est attesté à partir de 1815 pour en avoir l'idée. Il ne l'a pas détecté du fait que les débuts de ces grandes périodes sont trop difficiles à détecter de près. Il faut beaucoup plus de recul. Notons aussi que le cycle froid qui se termine de son temps est pourtant relativement moins froid que celui dont témoigne César. Les cycles ne sont donc pas de simples répétitions.

La courbe à dessiner atteint une température plus basse entre les années -58 à 0 que lors du "petit âge de glace" qui commence au 14^e siècle pour se terminer au 19^e siècle. Quant à la période de réchauffement qui va de l'an 0 jusqu'à la fin du neuvième siècle, nous savons que la température moyenne s'est élevée suffisamment pour qu'en environ dix siècles, la vigne s'étend jusqu'en Belgique, en Angleterre bien au nord de Gloucester et jusqu'en Pologne. Dans la période de

réchauffement actuel, nous n’observons pas une étendue comparable, même si, en 2006, on annonce une première récolte de thé dans le Cornwall anglais.

Aujourd’hui, nous connaissons des extrêmes de chaleur, jusqu’à 42°C en France. Mais cela se passe en pleine période de réchauffement. Pourtant, les mêmes températures ont été notées en France en pleine période de *refroidissement*, 1701, 1705 et 1793 ! Quelles températures ont dès lors été atteintes pendant le cycle de *réchauffement* précédent ? Nous l’ignorons, mais voici ce dont parle Fuster : En **584**, les roses fleurirent au mois de janvier. Les arbres qui avaient porté des fruits en juillet en portèrent de nouveau en septembre (303). En **921**, il y eut une chaleur intense et une sécheresse extrême presque sans interruption pendant les mois de juillet, août et septembre, détruisant beaucoup de récoltes (323). L’été **1078** fut très chaud au point qu’on vendangeât abondamment au moins d’août. Les chaleurs intenses de **1183** et **1188** tarirent les fleuves et les puits. En **1384**, une chaleur sèche et insupportable régna dans toute la France depuis le printemps jusqu’au milieu du mois d’août (304).[8]

Ce que nous constatons aussi, et cela marque une différence claire avec le cycle précédent, c’est que la vigne a atteint la Belgique en un bon siècle et demi de réchauffement si nous commençons cette période vers 1815. Autrement dit, le cycle est infiniment plus court. Cela veut-il dire que ce cycle pourrait être suivi bientôt par un nouveau cycle de refroidissement tout aussi rapide ? Cela, bien sûr, personne ne le sait.

Les deux causes principales auxquelles on attribue le réchauffement aujourd’hui n’ont rien à voir avec les causes indiquées par Fuster. Lui se trouvait à la fin (même s’il l’ignorait) d’un cycle de refroidissement. Nous nous trouvons vers la fin (même si nous l’ignorons encore) d’un cycle de réchauffement. Cela influence sérieusement l’appréciation des causes ! En plus, Fuster était un catholique convaincu et on est loin de l’attribution de culpabilité à tel ou tel groupe de personnes, même s’il tire des conclusions dans lesquelles nous ne pourrions pas le suivre. Aujourd’hui, l’influence de la foi chrétienne est devenue minime. Observons, avec étonnement, l’habitude païenne – on la retrouve aujourd’hui en Afrique et probablement ailleurs – de chercher un coupable. Dans le paganisme, quand quelqu’un meurt, le sorcier part à la recherche du coupable, car on ne meurt pas sans que quelqu’un y soit pour quelque chose. Aujourd’hui, il en est ainsi pour le climat. Si tout va mal, il doit y avoir un coupable et ce coupable devra payer par le sacrifice.

3.5. Passons rapidement en revue les deux coupables modernes à la lumière des cycles climatiques précédents et concluons.

L’homme serait le grand coupable. Moins d’êtres humains correspondra à moins de réchauffement. On se rappelle le prince Harry annonçant qu’il ne veut pas plus que deux enfants “pour la planète”. Le passé, rapporté par Fuster, ne valide pas ce genre de raisonnement. Notre planète a vu des exterminations massives à tout moment des cycles climatiques. Du million de morts au temps de César aux millions de morts sous Napoléon, pour ne rien dire des environ 300 millions de morts des temps modernes. Les boucheries ont été absolument terrifiantes, mais elles n’ont eu aucune influence sur le climat. Cette raison n’en est donc pas une.

Le CO₂ est l’autre grand coupable moderne. Ce gaz à effet de serre serait la cause principale du réchauffement. Cependant, le cycle de réchauffement précédent n’avait manifestement *aucun* lien possible avec le CO₂ ! On peut donc être certain que cette fois-ci, c’est pareil. Ce n’est pas là la *cause* du réchauffement.

Ces deux grandes causes s'évanouissent dès qu'on se met à l'étude du passé. Comme nous l'avons remarqué dès le début de cet article, nous sommes particulièrement bien placés dans le monde européen francophone pour le savoir. Car nous avons un rapport détaillé de l'évolution du climat sur 1900 ans. Ne pas en tenir compte revient à cacher sa tête dans le sable !

Quelle est alors la cause derrière nos changements climatiques ? Y aurait-il une "danse" du climat comme l'un des rythmes fondamentaux de notre planète ? Nous connaissons cela pour les saisons. Leur valse est irrégulière dans leur régularité. Cela revient chaque année, mais avec des variations fréquentes pour des raisons que nous ignorons. Et s'il y avait une grande danse du climat, avec un rythme exprimé en siècles, parfois plus long, parfois plus court ? Si nous savons ce qui influence les saisons, nous tâtonnons encore pour les grands cycles du climat. Est-ce le soleil et ses éruptions qui en est la vraie cause ? Peut-être. Mais on n'en a pas encore la certitude. **Cependant, si travailler pour mieux limiter les effets du climat est une excellente chose, travailler pour *changer* le climat sera toujours une prétention humaine qui le conduira à la vanité de son œuvre. C'est courir après le vent. Il nous semble que l'on n'en a ni les moyens, ni le temps.**

L'étude du livre de Fuster est un exercice en humilité et en modestie. **Nous ne sommes pas les maîtres du climat. La sagesse est de vivre avec ou malgré le climat, tout en nous armant au mieux contre ses excès.**

Références

[1] On peut le télécharger ici : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k772359.image>.

[2] En fait, la Gaule du Nord. La Gaule transalpine était déjà romaine. Sa frontière nord allait, grossièrement, de Lyon à Toulouse tout en passant au sud des Cévennes.

[3] Il faudra attendre 1779 pour en obtenir (228).

[4] Quelle était la cause des incursions des Normands ? Parmi plusieurs causes, on mentionne le réchauffement climatique en Scandinavie et la croissance de la population. Si tel est bien le cas, nous avons là un exemple de réfugiés climatiques bien encombrants !

[5] Cf. le chapitre suivant.

[6] Cf aussi l'article suivant qui a suscité mon intérêt pour le livre du Dr Fuster : <https://www.contrepoints.org/2018/08/08/322023-la-canicule-ici-et-lhiver-de-la>.

[7] Cf. <http://www.latamisse.com/les-frost-fairs-foires-sur-glace/>. La plus renommée des frost fairs eut lieu pendant le *Grand Gel* de 1683-84, le pire hiver que connut l'Angleterre. La Tamise fut complètement gelée pendant deux mois. La glace avait alors une épaisseur impressionnante de 28 cm ! Au début des années 1800, le climat s'adoucit et les hivers devinrent moins rudes. La dernière foire sur glace s'est tenue en janvier 1814. Bien qu'elle ne dura que 4 jours, ce fut l'une des plus importantes. Des milliers de gens passèrent quatre jours sur la glace pour profiter des événements exceptionnels qui furent proposés cette année-là. Un éléphant fut même exhibé sur le fleuve à hauteur de Blackfriars, pour le plus grand plaisir du public.

[8] Cité dans l'article de Contrepoints, indiqué en note 7.

4. Les glaces terrestres, la cryosphère (1/3)

Mis en ligne SCE :13.03.2020

Partie 1/3 : Ordres de grandeurs selon l'AR5

On désigne par cryosphère l'ensemble des glaces terrestres. Son évolution, lors des dernières décennies, est souvent présentée comme préoccupante: il en résulterait une forte hausse des niveaux marins et un changement d'albédo et donc du bilan énergétique de la Terre. Cette première partie de l'article présentera quelques ordres de grandeurs pour les glaces terrestres.

On utilisera principalement les données du chapitre 4 du rapport AR5 WG1 (5th Assessment Report, Working Group 1) qui a été publié en 2013 par l'organisme intergouvernemental GIEC.

4.1. Ordres de grandeurs des volumes glaciaires

Le chapitre 4 [1] de l'AR5 indique quelques ordres de grandeurs pour l'ensemble des glaces terrestres (Figure 1 et original du tableau [ici](#)).

Ice on Land	Percent of Global Land Surface ^a	Sea Level Equivalent ^b (metres)
Antarctic ice sheet ^c	8.3	58.3
Greenland ice sheet ^c	1.2	7.36
Glaciers ^c	0.5	0.41
Terrestrial permafrost ^d	9–12	0.02–0.10 ^e
Seasonally frozen ground ^d	33	Not applicable
Seasonal snow cover (seasonally variable)	1.3–30.6	0.001–0.01
Northern Hemisphere freshwater (lake and river) ice ^e	1.1	Not applicable
Total^a	52.0–55.0%	–66.1
Ice in the Ocean	Percent of Global Ocean Area ^a	Volume ^f (10 ³ km ³)
Antarctic ice shelves	0.45 ^g	~380
Antarctic sea ice, austral summer (spring) ^h	0.8 (5.2)	3.4 (11.1)
Arctic sea ice, boreal autumn (winter/spring) ^h	1.7 (3.9)	13.0 (16.5)
Sub-sea permafrost ^g	–0.8	Not available
Total^a	5.3–7.3	

Figure 1. Tableau 4.1 (page 321 Chapitre 4 de l'AR5) [1]

Antarctique [2] et Groenland (Ice Sheet ou calotte glaciaire) sont donnés en équivalent de hauteur d'eau sur l'océan (Sea Level Equivalent soit SLE = 58,3 m et SLE = 7,36 m) alors que les banquises (Sea Ice ou glace de mer) sont données directement en volume, ce qui **ne facilite pas** les comparaisons.

La légende du tableau 4.1 (ice density = 917 kg m⁻³, seawater density = 1028 kg m⁻³, océan area = 362,5 Mkm²) permet d'élaborer un tableau plus lisible (Figure 2a) et de tracer ensuite un graphe de type secteur ou camembert (Figure 2b).

LES GLACES

Selon Tab 4.1 Ch4 AR5	Sea Level Equivalent (m)	Volumes (10 ⁶ km ³)	Ratios	Masse (10 ⁶ Gt)
Antarctic	58,3	25,44	89,05%	23,330
Greenland	7,36	2,92	10,23%	2,681
Glaciers	0,41	0,162	0,57%	0,149
Divers	0,05	0,020	0,07%	0,018
Banquise Sud	3,4 à 11,1 milliers km ³	0,0073	0,025%	0,0066
Banquise Nord	13 à 16,5 milliers km ³	0,0146	0,051%	0,0133
Total	66,1	28,57	100%	26,198
<i>Banquises N+S</i>		0,022	0,076%	0,0200
<i>Banquises N+S , Glaciers</i>		0,184	0,644%	0,1686
<i>N+S, Glaciers, Divers</i>		0,204	0,713%	0,1867
Antarctic + Greenland		28,37	99,29%	26,011

Figure 2a. Tableau des composantes de la cryosphère [3].

La surface océanique variant en cas de hausse des niveaux marins, le calcul du volume pour 'Antarctic' et 'Greenland' utilise les facteurs de conversion (SLE → volume) de l'AR4.

Les glaces de mer (banquises ou sea ice) présentent une variation annuelle : on a donc reporté la moyenne. Permafrost, Snow, et Lake & River Ice sont regroupés dans la rubrique « Divers ». Le tableau sur fond bleu permet des comparaisons supplémentaires. 1Gt = 1 gigatonne = 10¹² kg, 1 km³ = 10⁹ m³

SCE publie chaque mois l'évolution de l'étendue de la banquise Nord : notons que le volume de glace en Antarctique représente 25,44 / 0,0146 ≈ **1750** fois le volume moyen de la banquise Nord.

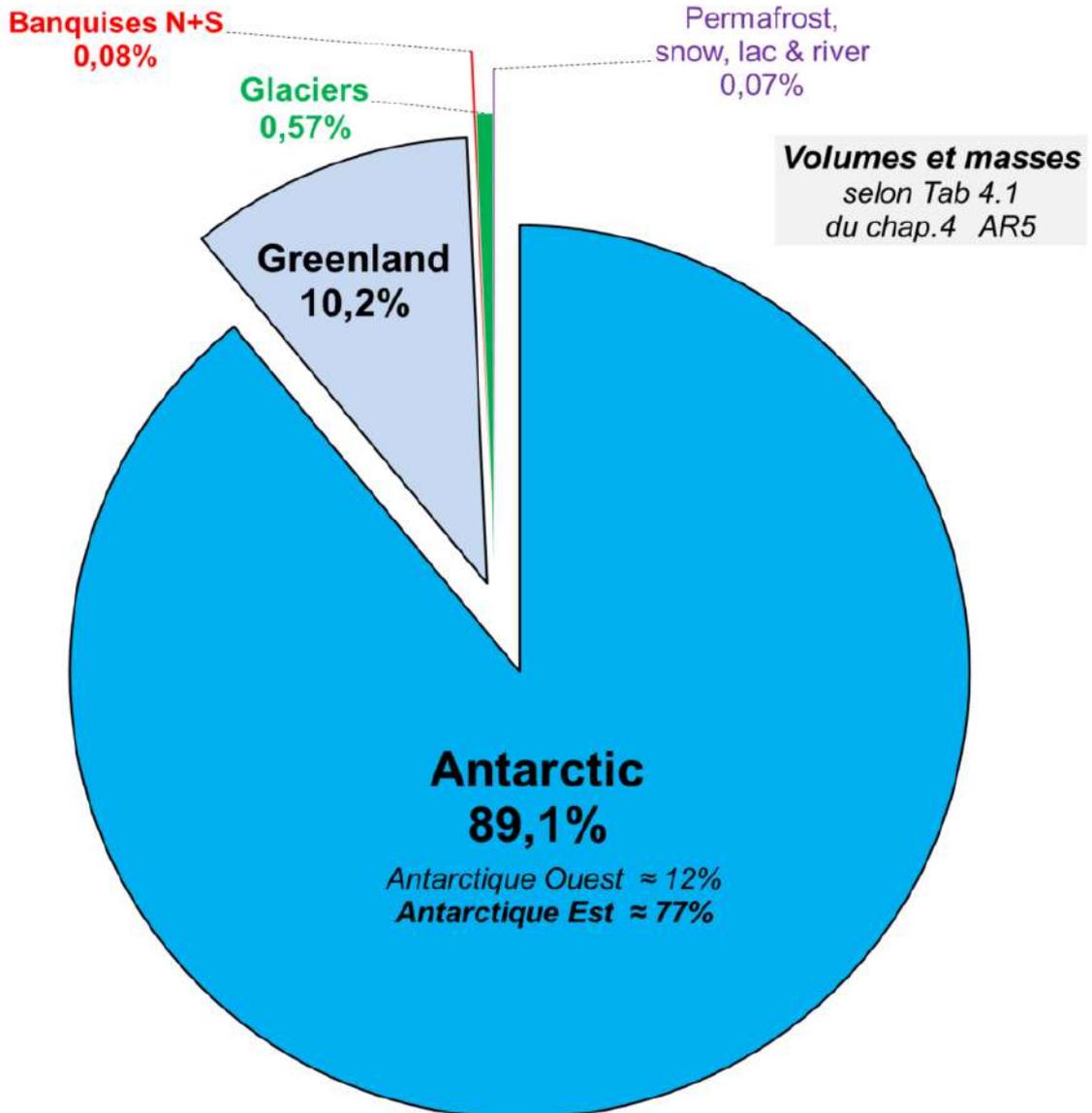


Figure 2b. Graphe en secteurs des composantes de la cryosphère [3]
Selon l'AR5, la masse totale de la cryosphère serait $\approx 26,2 \cdot 10^{21}$ kg, et son volume $\approx 28,6 \cdot 10^{15}$ m³. La somme (banquises + glaciers + permafrost, snow, lac & river) correspond à $0,204 \cdot 10^6$ km³ soit 0,7% de la cryosphère. Le volume de glace en Antarctique (89,1% de la cryosphère) est donc **125 fois plus grand**.

Le volume de glace en Antarctique, de loin le premier contributeur au volume de la cryosphère, ne semble pas être connu très précisément : en effet, dans le **précédent rapport** AR4 [1] du GIEC, la Table 4.1 en page 342 donnait pour ice sheet Antarctica SLE $\approx 56,6$ m alors que l'AR5 [1] donne désormais SLE $\approx 58,3$ m (Figure 1). La figure 3 illustre l'ampleur de cette correction sur l'Antarctique, à 6 ans de distance, entre AR4 et AR5.

Tables 4.1	Sea Level Equivalent (m)		Volumes (10 ⁶ km ³)		
	Antarctique		Antarctique	Total cryosphère	Banquises + Glaciers
AR4	56,6		24,700		
AR5	58,3		25,442	28,57	0,184
Correction	1,7		0,742		
Correction (%)		2,9%	2,6%	403%	

Figure 3. Correction AR4 AR5 [3]
 La différence 58,3 – 56,6 = 1,7 m correspond à une correction de 2,9% sur l'Antarctique ou bien à un volume de 0,742 millions de km³. La correction du volume de glace en Antarctique entre AR4 et AR5 est **4,03 fois plus grande** que la somme des volumes (Banquises + Glaciers).

4.2. La principale composante de la cryosphère : l'Antarctique

Le continent Antarctique est découvert vers 1820. Dumont d'Urville y débarque en 1840, il y a donc **seulement 180 ans**. On distingue deux parties dans l'Antarctique suivant que l'on se trouve à l'Est ou à l'Ouest de la chaîne Transantarctique. Le seul Antarctique Est contiendrait plus de 85% des glaces de l'Antarctique soit plus de 75% de la cryosphère (ici).



Figure 4. L'Antarctique (ici) La carte de France (0,5 Mkm²), ici en bleu, permet d'apprécier l'échelle de l'Antarctique (14 Mkm²), voir également ici. Les stations scientifiques, pour la plupart, se situent en bordure du continent, particulièrement sur la péninsule Antarctique (ici). Le premier observatoire à l'intérieur du continent (Amundsen Scott) est situé au pôle Sud, il date de 1956, suivi par celui de Vostok en 1957. Les observatoires en Antarctique Est comme Dôme Fuji (1995), et Concordia (1997) sont largement postérieurs.

- Les observations sont donc **assez récentes en Antarctique Est** (≈ 77% de la cryosphère), et les rares observatoires sont répartis sur une surface bien plus grande que l'Europe. Les

estimations récentes des volumes glaciaires, en Antarctique et au Groenland, sont surtout basées sur des observations aériennes (altimétrie et gravimétrie), complétées par des modélisations;

- Le chapitre 4 de l'AR5 (page 352, Fig. 4.16) indique une **perte** de masse glaciaire de -2050 Gt (1Gt = 1 gigatonne = 10^{12} kg) dans le bilan gain/perte (1992-2012) en Antarctique (cette perte de masse représente 0,009% de la masse de glace en Antarctique).

Mais, *a contrario*, certains articles [2] postérieurs à l'AR5, donnent un **gain** dans le bilan gain/perte 1992-2012. Le manque de recul, sur les techniques de gravimétrie ou d'altimétrie, sur la modélisation, ainsi que la rareté des observations *in situ*, doivent inciter à une certaine prudence sur le bilan gain/perte, surtout **en Antarctique Est** ($\approx 77\%$ de la cryosphère).

La deuxième composante, le Groenland (10,2% de la cryosphère), est mieux connue que l'Antarctique. L'AR5 indique une perte de masse glaciaire de -2985 Gt (1992-2012), ce qui correspond à -0,1% de la masse de glace du Groenland.

4.3. Ordres de grandeurs en énergie [3]

4.3.1 Albédo

La puissance moyenne atteignant la haute atmosphère de la Terre, en provenance du Soleil, est estimée à $\approx 176 \cdot 10^{15}$ W. Environ $123 \cdot 10^{15}$ W finiront par être réémis en infrarouge vers l'espace et environ $53 \cdot 10^{15}$ W seront renvoyés sous forme visible (albédo = $53/176 \approx 0,3$).

Selon l'AR5 (Fig 2.11 en page 181 [ici](#)), les nuages et l'atmosphère seraient responsables d'environ 76% des $53 \cdot 10^{15}$ W renvoyés en visible.

Sur les 24% restants, moins de la moitié est imputable à la cryosphère : les surfaces englacées interviennent dans l'albédo mais jouent actuellement un rôle secondaire. Parmi les composantes de la cryosphère, les zones proches du pôle Sud sont prépondérantes pour les surfaces englacées (Figure 5).

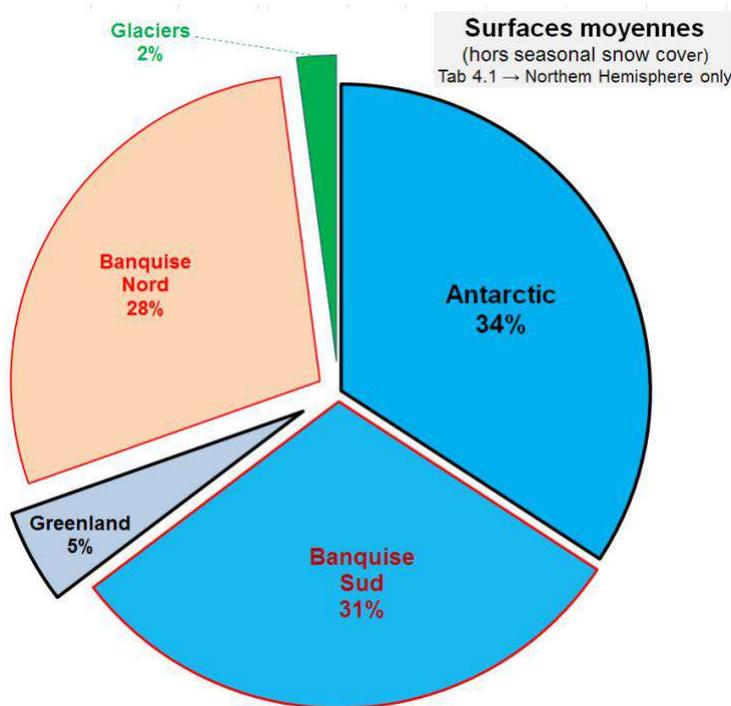


Figure 5. Surfaces moyennes des composantes de la cryosphère [1] [3].

Les surfaces proches du pôle Sud, à savoir Antarctique (ice sheet + ice shelves + sea ice), correspondent en moyenne à $\approx 25 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Les surfaces Greenland + Glaciers + Arctic sea ice correspondent en moyenne à $\approx 12,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, soit ≈ 2 fois moins. *La couverture neigeuse est omise car le tableau 4.1 de l'AR5 donne seulement l'hémisphère Nord (en moyenne annuelle, l'étendue $\approx 15,8 \cdot 10^6 \text{ km}^2$). Voir également [cet article de SCE](#).* La surface totale correspondant au graphe en secteur est $\approx 37,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ soit 7,3% de la surface terrestre $\approx 510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$.

4.3.2 Fonte de la cryosphère

La fonte complète des glaces terrestres ($\approx 28,6 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$ soit $26,2 \cdot 10^{18} \text{ kg}$) nécessite une énergie $E = E1+E2$.

Avec 333,5 kJ pour la fonte de 1 kg de glace à 0°C , on obtient l'estimation $E1 \approx 8,75 \cdot 10^{24}$ joules.

On doit également ajouter l'énergie $E2$ nécessaire pour réchauffer la glace jusqu'à sa température de fonte.

($E2 \approx 1,05 \cdot 10^{24}$ joules pour réchauffer $28,6 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$ de glace depuis -20°C vers 0°C) [3].

L'ordre de grandeur pour la fonte complète de la cryosphère est donc $E1+E2 \approx 9800 \cdot 10^{21}$ joules soit $E = 9800 \text{ ZJ}$.

Cette énergie E est considérable comme le montrent les comparaisons suivantes :

- Les différentes sources d'énergie fournissent annuellement à l'humanité $E_h \approx 0,6 \text{ ZJ}$. L'énergie E pour fondre l'ensemble des glaces correspond donc à $9800/0,6 = 16\ 000$ années de consommation.
- Les théories « effet de serre » ou « échanges radiatifs » permettraient le calcul d'un « forçage radiatif ». Le chapitre 8 de l'AR5 (Fig 8.15 AR5 p.697) chiffre la part anthropique de ce « forçage radiatif » entre 1 et $3,5 \text{ W/m}^2$. En prenant $2,3 \text{ W/m}^2$, sur la surface terrestre, pour une durée d'un an, on obtient l'énergie $E_{fr} = 37 \cdot 10^{21} \text{ J}$. Le ratio avec l'énergie de fonte E est $9800/37 \approx 265$ (2 à 3 siècles seraient donc au minimum nécessaires). En réalité, la grande majorité de l'énergie E_{fr} serait absorbée par l'océan et la durée serait bien plus longue. Cette durée pourrait même être infinie (si $E_{fr} \approx 0$) car les notions « effet de serre » ou « forçage radiatif », mises en œuvre dans les programmes de modélisation climatique, **ne sont pas** admises par l'ensemble des physiciens : voir cet [article sur SCE](#) ou bien [celui-ci](#).

4.4. Conclusions

- La cryosphère c'est en premier lieu les zones proches du pôle Sud : banquises et glaciers ne représentent ensemble que 0,7% du volume de la cryosphère alors que la seule partie Est de l'Antarctique, bien moins connue, représente plus de 75% de la cryosphère, soit **107** fois plus.
- La simple correction du volume de glace en Antarctique, entre les rapports du GIEC AR4 (2007) et AR5 (2013), est **4 fois plus grande** que le volume (Banquises + Glaciers).
- Les variations actuelles de la cryosphère restent négligeables si on les compare à celles du passé : l'ensemble des glaces terrestres, il y a 20 millénaires, devait avoir un volume au moins double du volume actuel. En effet, la fonte des glaces (entre -18 ka et -8 ka) fait monter le niveau des océans de $\approx 120 \text{ m}$ contre 66 m SLE (Sea Level Equivalent à la Figure 1).

La deuxième partie de l'article (2/3) commentera les choix rédactionnels du GIEC pour le chapitre 4 de l'AR5 et donnera des ordres de grandeurs complémentaires pour les banquises et les glaciers.

NOTES

[1] Rapports du GIEC

Ch.4 AR5 (2013) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter04_FINAL.pdf

Ch.8 AR5 (2013) https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

Ch.4 AR4 (2007) <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter4-1.pdf>

Spécial Report Océan and Cryosphère (2019) <https://www.ipcc.ch/srocc/>

[2] **Antarctique** Les observatoires en Antarctique https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_bases_antarctiques

Refroidissement en Antarctique: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017JD027435>

Neige en Antarctique: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0356-x>

Les gains à l'Est sont **inférieurs** aux pertes à l'Ouest :

Constraining the mass balance of East Antarctica <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017GL072937>

Bamber et al (2018) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aac2f0/meta>

Les gains à l'Est sont **supérieurs** aux pertes à l'Ouest :

'Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses' Zwally et

al (2015) doi:10.3189/2015JG15J071 <https://pdfs.semanticscholar.org/7cca/82fa14de7865472b781289636c1f172c459f.pdf>

[3] [Le tableur « Cryosphère 1 »](#) met en forme les données dans 4 feuilles de calcul.

5. Les glaces terrestres, la cryosphère (2/3)

Mis en ligne SCE : 27.03.2020

Partie 2/3 : Lecture critique du chapitre cryosphère de l'AR5

Cette deuxième partie de l'article examine la composition du chapitre 4 du 5ème rapport du GIEC (AR5) [1].

Dans ce chapitre, qui concerne les différentes composantes de la cryosphère, les banquises [2] et glaciers [3] sont particulièrement mises en avant par les rédacteurs du GIEC.

A propos de ces 2 composantes mineures (0,65 % du volume de la cryosphère), l'article développe certains éléments d'appréciation que les rédacteurs de l'AR5 n'ont pas mis en exergue.

LES GLACES

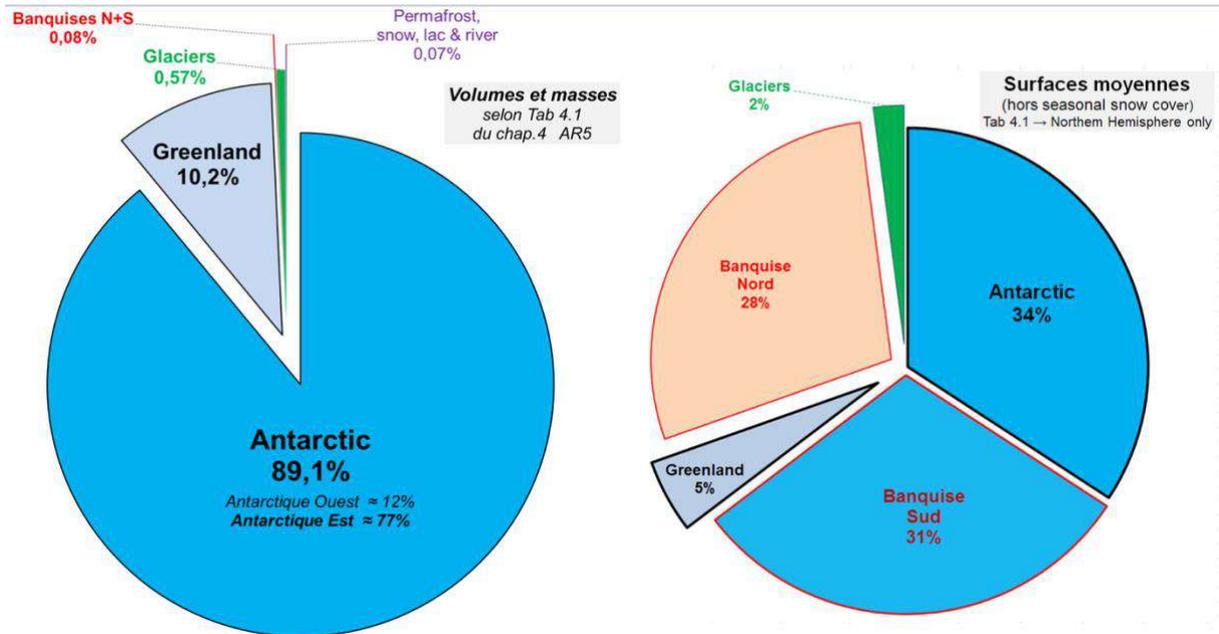


Figure 1. Graphes en secteurs des composantes de la cryosphère selon Tab 4.1 de l'AR5 [4]
 A gauche, volumes ou masses: la masse totale de la cryosphère serait $\approx 26,2 \cdot 10^{18}$ kg, son volume $\approx 28,6 \cdot 10^{15}$ m³. A droite, surfaces englacées : la surface totale serait $\approx 37,5 \cdot 10^{12}$ m² soit 7,3% de la surface terrestre.

Les rédacteurs du chapitre 4 de l'AR5 utilisent des figures numérotées de 4.1 à 4.25.

Parmi ces 25 figures, on ne trouve **aucune** représentation similaire à la Fig.1 pour les composantes de la cryosphère.

5.1. Analyse statistique du chapitre 4

Ce paragraphe va examiner la 'place' occupée par les différentes composantes de la cryosphère présentées dans le chapitre 4. Celui-ci comporte 65 pages et 40 illustrations, répertoriées dans le tableau ci-dessous.

CH4 AR5	Début	Introduction	Sea ices	Glaciers	Ice sheets	Seasonal Snow	Lake and river ice	Frozen ground	Synthesis etc.	Total
Paragraphe		4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7		
page d'entrée	317	321	323	335	344	358	361	362	367	382
Nb de pages	4	2,5	12	11	14	3	0,5	5	13,5	65
					(11,5 + 2,5)		Divers = 9		(2,5 sheets)	
Figures		1	6 (+1)	5 (+1)	6	3	0	3	1	25
Tableaux		1	0	4	1 (+4)	1	0	1	(4 sheets)	12
FAQ, Box		0	1	1	0	1	0	0	0	3
Illustrations		2	8	11	11	5	0	4	1	40
							Divers = 9			
Volumes			0,08%	0,57%	99,30%		Divers = 0,07%			100%

Figure 2. Examen statistique du chapitre 4. [4]

Certains textes ou illustrations ont une double affectation ou bien sont repris dans un autre paragraphe. 'Ice sheets' correspond aux calottes Antarctique et Groenland tandis que 'Sea ices' correspond aux banquises. On rappelle à la dernière ligne du tableau les contributions au volume de la cryosphère (voir Fig. 1).

Dans la mesure où les rédacteurs du GIEC considèrent les banquises et les glaciers comme de bons indicateurs du climat, ils leur accordent donc une 'place' qui excède (x2? x5?) leur seule contribution en volume.

Le tableau de la figure 2 va justement permettre de chiffrer cette importance relative: 'Sea ices' concernent 12 pages et 8 illustrations pour un volume glaciaire ≈ 0,08% de la cryosphère, alors que 'Ice sheets' concernent 14 pages et 11 illustrations pour un volume glaciaire ≈ 99,3% de la cryosphère.

L'importance **relative**, pour le texte, est donc : $(99,3/14) / (0,08/12) = 1064$.

Pour les illustrations, on a $(99,3/11) / (0,08/8) = 903$, la moyenne texte/illustrations donne ≈ 983 (cette valeur doit être considérée comme un simple ordre de grandeur).

Finalement, on constate que les rédacteurs du GIEC ont composé le chapitre 4 de l'AR5 de telle sorte que **1 km³ de glace 'Sea ices' occupe la même 'place' que ≈ 983 km³ de glace 'Ice Sheets'**. Un calcul similaire montre que 1 km³ 'Glaciers' occupe la même 'place' dans le chapitre 4 que ≈ **155 km³ 'Ice sheets'**

Une telle importance accordée par le GIEC aux banquises (x983) et glaciers (x155) n'est-elle pas excessive?

A propos de ces 2 composantes **ultra minoritaires** (0,65% du volume), le paragraphe suivant donne quelques informations que l'AR5 ne met pas particulièrement en avant.

5.2. Les deux composantes mises en exergue dans l'AR5

5.2.1 Remarque préliminaire

Le GIEC corrige le volume de la calotte Antarctique entre les rapports AR4 et AR5 : cette simple correction de volume est **4,03** fois plus importante que les volumes cumulés des banquises et glaciers (Fig. 3).

Tables 4.1	Sea Level Equivalent (m)	Volumes (10 ⁶ km ³)		
	Antarctique	Antarctique	Total cryosphère	Banquises + Glaciers
AR4	56,6	24,700		
AR5	58,3	25,442	28,57	0,184
Correction	1,7	0,742		
Correction (%)		2,9%	2,6%	403%

Figure 3. Correction du volume de glace en Antarctique entre AR4 et AR5 [1] [4]
 Cette correction ne bénéficie guère de commentaires ou d'illustrations de la part des rédacteurs du GIEC.

5.2.2 Banquises ou 'Sea ices' (0,08% de la cryosphère)

Dans le chapitre 4 de l'AR5, un km³ 'Sea ices' occupe donc une 'place' équivalente à ≈ **983 km³ 'Ice Sheets'**.

Les rédacteurs consacrent 8 pages à la banquise Nord (§ 4.22) contre 4 pages à la banquise Sud (§ 4.23).

Les variations des banquises dépendent de la « température » de la basse atmosphère, mais elles dépendent davantage de la température et des courants de l'eau de mer.

5.2.2.1 Surfaces

Depuis 1980, grâce aux satellites, on dispose d'observations globales et directes sur la surface des

banquises.

On désigne par étendues ou 'extents' les surfaces maritimes pour lesquelles la glace excède 15 %. La mesure de l'étendue Nord est donnée à ± 1 million de km^2 (voir [cet article](#) paru sur SCE).

La figure ci-dessous reprend certains des graphes utilisés dans le chapitre 4 de l'AR5.

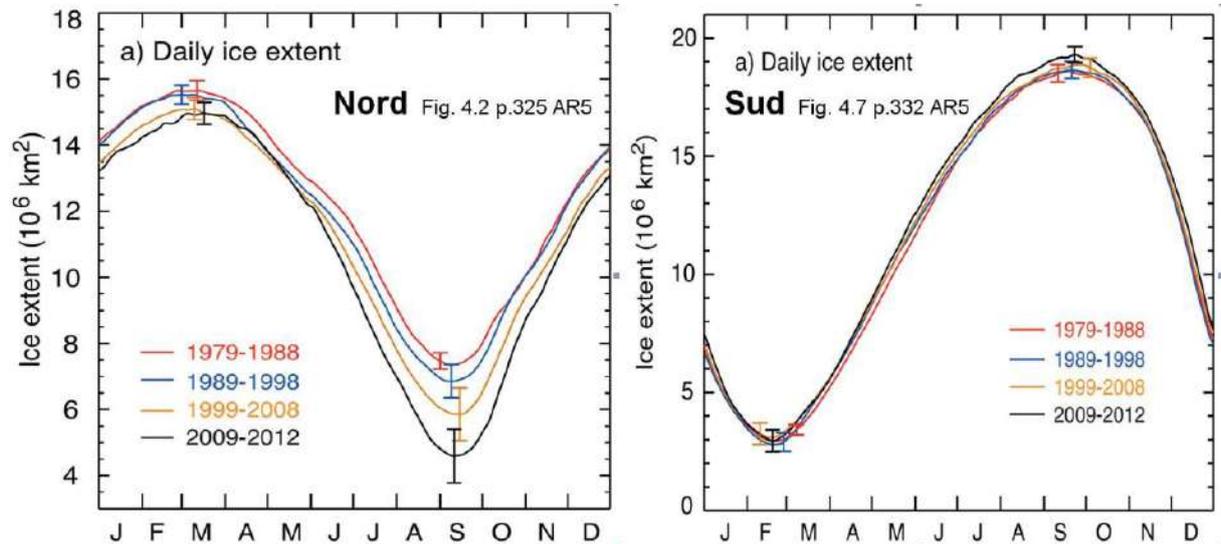


Figure 4. Evolution des étendues Nord et Sud sur 4 décennies selon Fig. 4.2 et Fig. 4.7 du chapitre 4 de l'AR5.

Remarques sur les choix des rédacteurs du GIEC:

– Ces graphes utilisent une représentation usuelle: l'axe horizontal s'étale sur une année et on empile les années.

– L'AR5 utilise des échelles différentes pour les graphes Nord et Sud : pour la banquise Nord, l'axe vertical ne part pas de zéro et l'échelle **n'est pas la même** (3 à 18 au Nord contre 0 à 20 au Sud).

La figure ci-dessous propose une représentation que les rédacteurs du GIEC n'ont pas utilisée : on trace la somme des étendues Nord et Sud. L'axe horizontal du graphique **n'empile pas** les années et l'axe vertical démarre à 0.

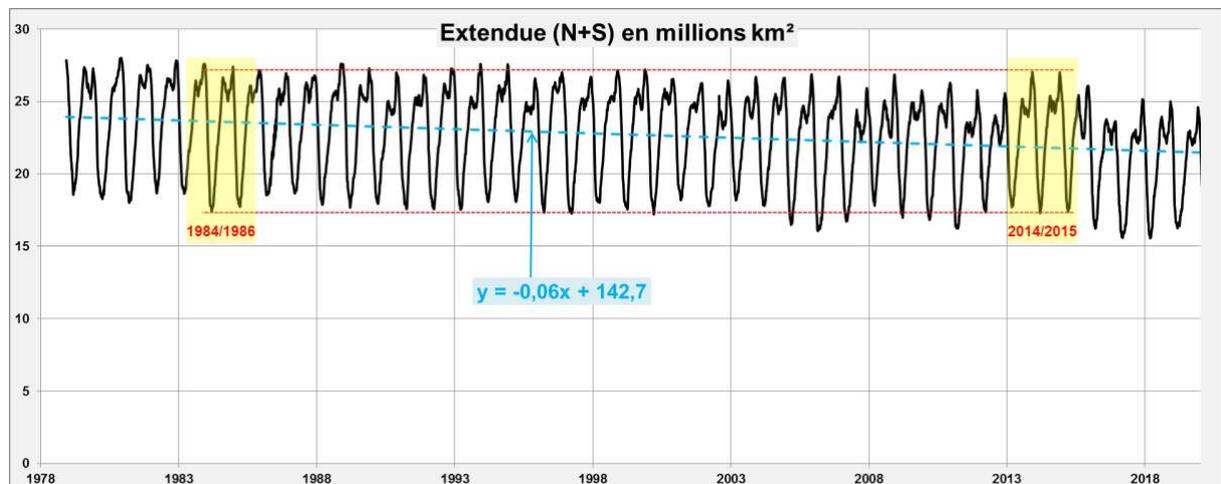


Figure 5. Somme des étendues des banquises Nord et Sud. Les séries temporelles proviennent de l'Arctic Data archive System [2] et sont mises en forme. [4]. Les extrêmes annuels des étendues Nord

et Sud étant opposés, la somme présente une variation annuelle réduite ≈ 9 millions de km^2 . La marge d'erreur sur la somme des étendues devrait être de l'ordre de ± 2 millions de km^2

En l'absence de cette représentation, les rédacteurs du GIEC ne pouvaient pas faire les remarques suivantes :

- La somme des étendues des banquises en 2014/2015 est comparable à celle de 1984/1986 (pointillés rouges).
- En 1979, la moyenne annuelle de l'étendue Nord+Sud s'élève à $23,97 \cdot 10^6 \text{ km}^2$.
- En 2019, on passe à $20,54 \cdot 10^6 \text{ km}^2$: il subsiste donc encore **86% de l'étendue de 1979**. [4] La baisse sur 40 ans est-elle significative avec une marge d'erreur de l'ordre de $\pm 2 \cdot 10^6 \text{ km}^2$?
- Les craintes à propos d'une modification notable de l'albédo terrestre devraient être apaisées par la quasi-stabilité de la surface **totale** des banquises. Notons également que, (selon la Fig 2.11 en page 181 de l'AR5) seulement **24%** de la lumière solaire réfléchi provient de la surface terrestre ($510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$), pour laquelle la surface des banquises compte seulement pour $\approx 4\%$ ($21 \cdot 10^6 / 510 \cdot 10^6$).
- La courbe de tendance (pointillés bleus) montre une perte annuelle de $0,06 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. A ce rythme, en 2100, il subsisterait $\approx 16,6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ (33 fois la surface de la France), soit encore 70% des étendues Nord+Sud de 1979 (121 ans auparavant).
- Selon cette courbe de tendance, il faudrait **théoriquement** patienter jusqu'en 2378 pour que la somme des étendues Nord+Sud soit proche de zéro. Mais les prévisions sur plusieurs siècles sont hasardeuses (celles sur quelques décennies le sont déjà). En effet, la disparition **modélisée** de la banquise Nord tarde tellement que les navires qui viennent imprudemment constater le phénomène sont parfois pris dans les glaces ([ici](#)) .

5.2.2.2 Volumes

Depuis quelques décennies, via des observations aériennes, on tente d'estimer l'épaisseur de banquise pour accéder ainsi au volume [2].

On trouve [ici](#) la variation annuelle de l'épaisseur de la banquise Nord (observations du satellite Cryosat lancé en 2010 + **modélisation**). L'épaisseur entre 2010 et 2020 semble stable (hors variation annuelle) et sa valeur **moyenne** serait $\approx 1,5 \text{ m}$. Le tableau 4.1 du chapitre 4 [1] permet de **déduire** les épaisseurs moyennes des banquises selon l'AR5 : $\approx 1,3 \text{ m}$ pour la banquise Nord et $\approx 0,7 \text{ m}$ pour la banquise Sud [4].

5.2.3. Glaciers (0,57% de la cryosphère)

Dans le chapitre 4 de l'AR5, **un km^3 'Glaciers'** occupe une 'place' équivalente à $\approx 155 \text{ km}^3$ 'Ice sheets'. Le volume des glaciers varie en fonction de la « température » de la basse atmosphère mais également des précipitations neigeuses. Selon l'AR5, les glaciers seraient les premiers contributeurs à la hausse du niveau des océans.

5.2.3.1 Ordres de grandeurs selon l'AR5

L'AR5 s'appuie notamment sur le catalogue RGI (Randolph Glacier Inventory) [3]

Dans le paragraphe de l'AR5 consacré aux glaciers, le tableau 4.2 page 336 [1] donne les valeurs suivantes:

Nombre total de glaciers \approx **168 000**, surface totale des glaciers \approx **726 000 km²**, masse totale \approx **153 000 Gt**, volume total \approx **167 000 km³** (917 kg/m³). Une carte présentant l'ensemble des glaciers est visible [ici](#).

Suivant l'exemple du RGI, le tableau 4.2 de l'AR5 répartit les 168 000 glaciers en 19 zones géographiques.

Les glaciers les mieux connus se trouvent en Europe, aux USA et en Scandinavie.

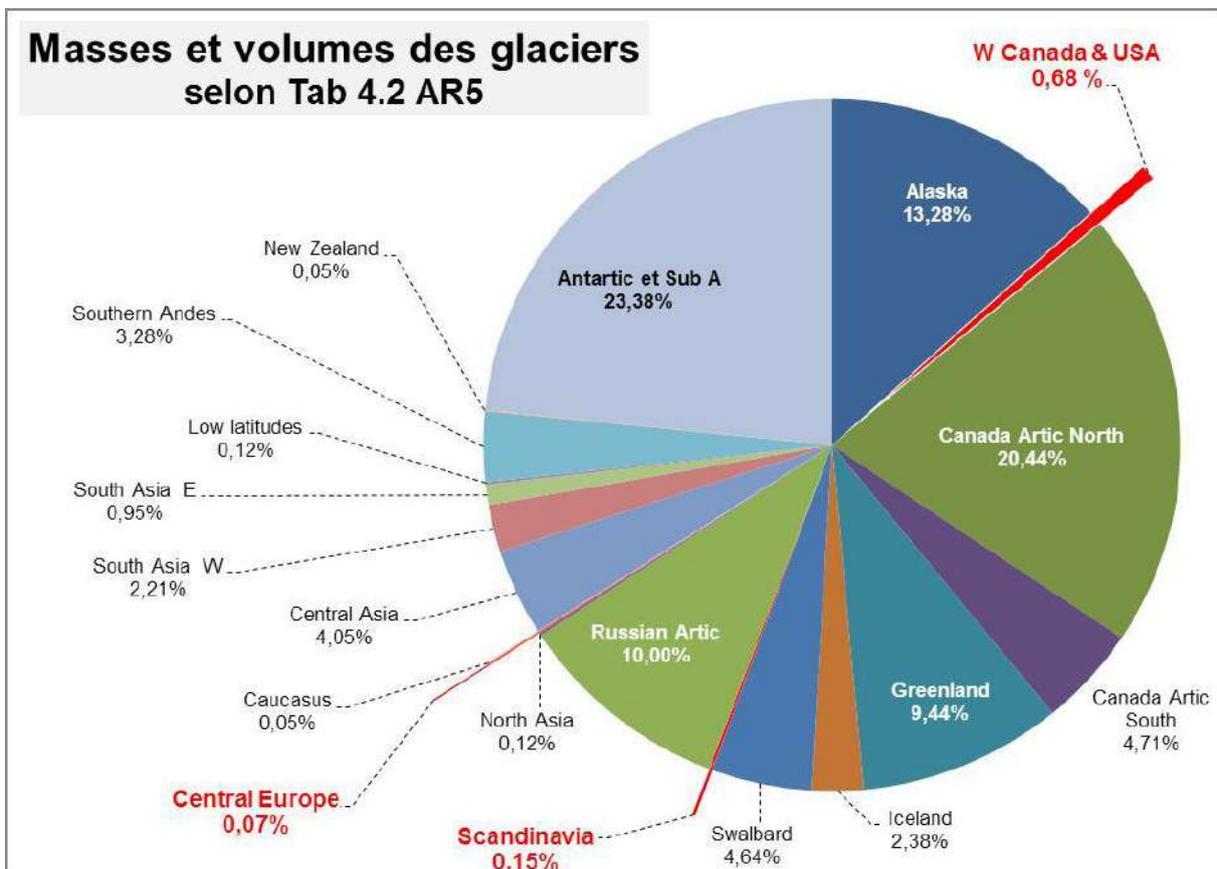


Figure 6a. Les masses et volumes des glaciers selon le tableau 4.2 de l'AR5 [4]. Les glaciers les mieux connus sont figurés en rouge. Les glaciers en périphérie des calottes glaciaires ne doivent pas être confondus avec les calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique.

On constate que la **majorité** des glaciers sont des glaciers circumpolaires Nord et Sud. Selon la Fig.6 de l'article Huss et Farinotti (2012) [3], les glaciers de montagne constitueraient \approx **13 %** du volume des glaciers terrestres. Parmi les 13% des glaciers de montagne, les glaciers alpins sont les mieux connus et disposent de nombreuses données historiques.

5.2.3.2 Les glaciers alpins (Central Europe) sont-ils représentatifs ?

Parmi les glaciers de montagne, comparons les glaciers alpins (Central Europe) avec les glaciers himalayens (Central Asia).

Tab 4.2 AR5 p.336	Nombre	Surface (km ²)	Surface %	Masses en Gt ou 10 ¹² kg				Ecart relatif
				Max	Min	Moyenne	Ecart max-min	
Central Europe	3920	2058,1	0,28%	125	109	117	16	13,7%
Central Asia	30200	64497	8,88%	8591	4531	6561	4060	61,9%
Ratio Asia/Europe	8	31	31			56		5
Ratio C.Europe/Total	2,3%	0,3%	0,3%			0,1%		3,73
Total glaciers	168331	726258	100%	191879	113915	152897	77964	51,0%

Figure 6b. Comparaisons à partir des valeurs du tableau 4.2 page 336 de l'AR5. [4]

La masse des glaciers 'Central Asia' représente **56 fois** celle des glaciers alpins. Pour les surfaces, le ratio est **31 fois**. L'écart relatif entre l'estimation maximale et minimale de la masse est 13,7% pour les glaciers alpins contre 61,9% pour l'Himalaya : les glaciers alpins sont bien mieux connus mais bien plus petits que ceux de l'Himalaya.

Les glaciers alpins couvrent \approx **0,3%** de la surface de tous les glaciers, leur masse \approx 117 Gt correspond à $117/152897 \approx$ **0,1%** de la masse de tous les glaciers: **les glaciers alpins ne sont donc pas nécessairement représentatifs de l'ensemble des glaciers.**

La fonte totale des glaciers alpins provoquerait une hausse du niveau marin de **0,3 mm**, valeur trop faible pour être mesurable (Tab 4.2 AR5).

5.2.3.3 Les volumes et masses des glaciers sont-ils bien connus ?

Malgré les 11 pages et 11 illustrations du paragraphe 4.3 'Glaciers', les rédacteurs du GIEC n'ont pas trouvé la place pour faire les remarques suivantes :

– Il existe un **écart relatif de 51%** (Fig .6b) entre l'estimation maximale et minimale de la masse totale des glaciers.

– Les glaciers se trouvent surtout dans les zones circumpolaires, d'accès malaisé, avec des conditions climatiques extrêmes. Les observations *in situ* ne peuvent donc avoir lieu qu'à la belle saison : il en résulte que les archives sur les glaciers circumpolaires (**la majorité des glaciers**) sont peu nombreuses.

Les articles Huss et Farinotti. (2012) ainsi que Pfeffer et al. (2014) [3] donnent la méthode d'estimation des volumes glaciaires: elle est principalement basée sur les observations aériennes des contours des glaciers et sur la modélisation. Une calibration sur une centaine de glaciers est utilisée. On reproduit ci-dessous une figure (article Pfeffer et al.) qui montre que les observations sont **récentes** (1995) pour la plupart des glaciers.

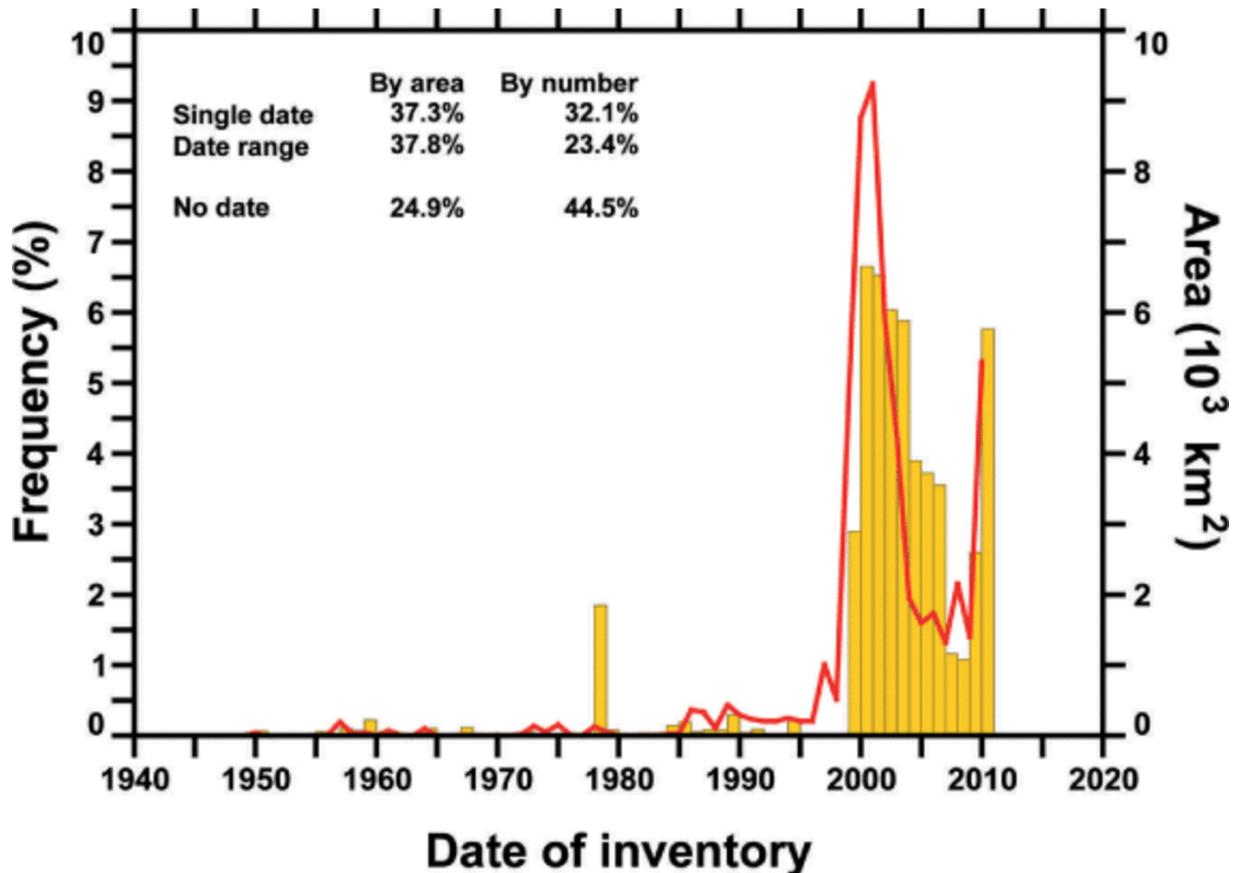


Figure 6c. « Frequency distribution of known dates and date ranges in the RGI by glacierized area (red line) and glacier number (yellow histogram) » (Selon Fig. 2 de l'article Pfeffer et al. 2014) [3]

Les glaciers alpins sont les mieux étudiés et sur une plus longue durée, mais ne représentent que **0,1%** du volume des glaciers. **La bonne connaissance des glaciers alpins n'implique pas nécessairement une bonne connaissance des glaciers en général.**

La difficulté à estimer le volume des glaciers est soulignée dans cet extrait de la conclusion de l'article Pfeffer et al. (2014) :

“ Further, the problem of uncertainty in glacier volume, at all scales from the single glacier to the world, is intractable. Measurements of volume are few, and understanding of the relationships between volume and the observable quantities is limited. Nevertheless, uncertainty in glacier volume is a problem of wider significance than uncertainty in glacier area, and deserves continued attention.”

5.3. Conclusions

- La focalisation des médias et des organisations intergouvernementales sur la banquise **Nord** et les glaciers **alpins** n'est guère justifiée par leur masse : ils représentent ensemble **≈ 0,05%** de la masse de la cryosphère.
- La connaissance de la cryosphère n'est satisfaisante ni sur l'ensemble des glaciers (0,57% de la cryosphère) ni sur l'Antarctique Est (75% de la cryosphère).
- Après les rapports AR4 (2007), puis AR5 (2013), le GIEC consacra sans doute un chapitre à la cryosphère dans le futur rapport AR6.
Pour améliorer la composition de ce chapitre, les rédacteurs du GIEC auront alors l'opportunité:

- de présenter l'**ensemble** des composantes de la cryosphère sous forme d'un graphe (secteur ou autre).
 - de compléter, pour 'Sea ices', les graphes usuels par un graphe de la série temporelle de la **somme** des étendues Nord et Sud.
 - de développer le paragraphe 'Ice sheets', ou bien de réduire le paragraphe 'Sea ices', afin d'éviter que un km³ 'Sea ices' occupe une 'place' équivalente à **983** km³ de glace en Antarctique ou au Groenland.
- Suite à la correction de 0,742 millions de km³ du volume des glaces de l'Antarctique entre AR4 et AR5 (**4 fois** le volume banquises + glaciers), peut-être serait-il prudent, de la part des rédacteurs du futur AR6, **d'être moins optimistes sur les marges d'erreurs**, notamment sur le bilan gain/perte qui sera l'objet de la dernière partie de l'article.

Dans cette troisième partie de l'article (3/3), l'examen des marges d'erreur conduira à s'interroger : une diminution de la cryosphère lors des dernières décennies est-elle-démontrée dans l'AR5 ?

Références

[1] Rapports GIEC

- Ch.4 AR5 (2013) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter04_FINAL.pdf
- Ch.4 AR4 (2007) <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter4-1.pdf>
- Spécial Report Océan and Cryosphère (2019) <https://www.ipcc.ch/srocc/>

[2] Glaces de mer ou banquises

- Arctic Data Archive system Extent <https://ads.nipr.ac.jp/vishop/#/extent>
- National snow and ice Data <https://nsidc.org/>
- Sea ice <http://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-ice-graph/>
- Cryosat <http://www.cpom.ucl.ac.uk/csopr/seaice.html>

[3] Glaciers

- WGMS World Glacier Monitoring Service <http://www.wgms.ch>
[obal Glacier Changes: facts and figures](#)
- GTNG Global Terrestrial Network for Glaciers https://www.gtn-g.ch/data_catalogue/
- Huss et Farinotti (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. Journal of Geophysical Research. <https://doi.org/10.1029/2012JF002523>
- Pfeffer et al. (2014). The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers. Journal of Glaciology <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J176>

- [4] [Le tableur « Cryosphère 2 »](#) met en forme les données dans 4 feuilles de calcul.

6. Les glaces terrestres, la cryosphère (3/3)

Mis en ligne SCE : 10.04.2020

Partie 3/3 : La diminution de la cryosphère est-elle démontrée dans l'AR5?

La contribution de la cryosphère à la hausse du niveau des mers est abordée dans le chapitre 4 du rapport AR5 du GIEC [1]. Les banquises [2] ne figurent pas parmi les contributeurs car leur fonte ne peut affecter les niveaux marins.

Le GIEC est persuadé que la masse de la cryosphère a diminué entre 1992 et 2012. Cette certitude de l'organisme intergouvernemental est fondée sur sa grande confiance dans des modèles gravimétrique/altimétrique et sur des marges d'erreur **très optimistes**, particulièrement en Antarctique [3] et sur *les* glaciers [4].

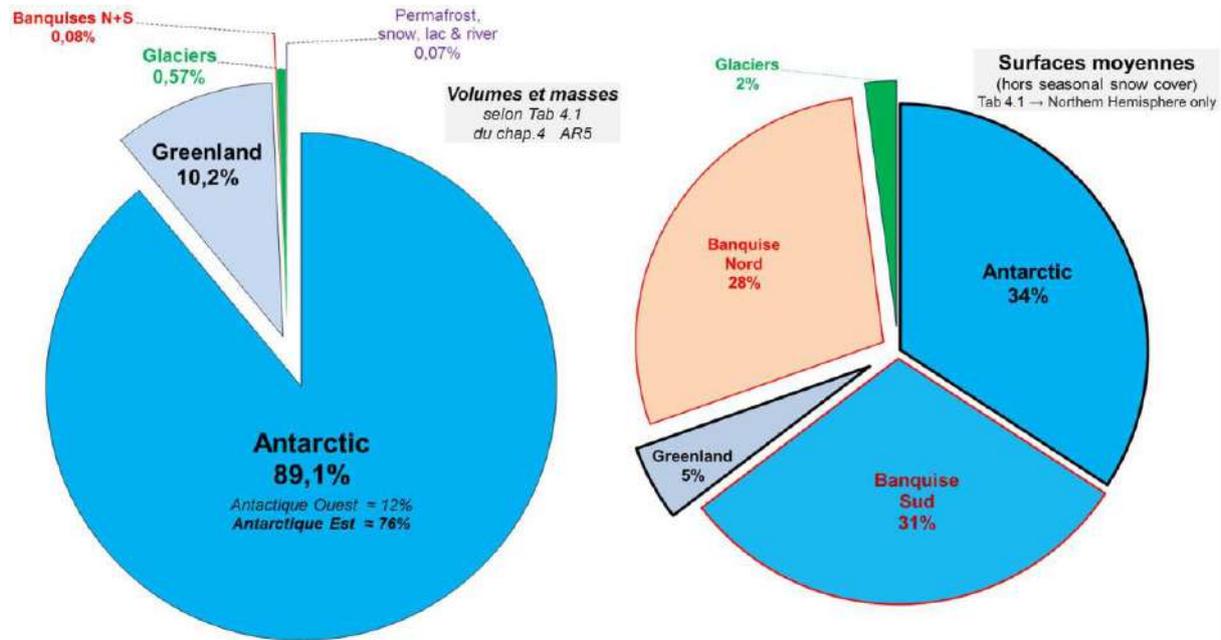


Figure 1a. Graphes en secteurs des composantes de la cryosphère [5].
A gauche, volume ou masse: la masse totale de la cryosphère serait $\approx 26,2 \cdot 10^{18}$ kg, son volume $\approx 28,6 \cdot 10^{15}$ m³. A droite, surfaces englacées: la surface moyenne totale est $\approx 37,5 \cdot 10^{12}$ m² soit 7,3% de la surface terrestre.

Tables 4.1	Sea Level Equivalent (m)		Masses (10 ⁶ Gt) 1 Gt = 10 ¹² kg		
	Antarctique		Antarctique	Total cryosphère	Banquises + Glaciers
AR4	56,6		22,650		
AR5	58,3		23,330	26,2	0,1686
Correction	1,7		0,680		
Correction (%)			2,9%	2,6%	403%

Figure 1b. Correction de la masse de glace de l'Antarctique entre AR4 et AR5 [5].
La différence de 1,7 m correspond à une correction de 2,9% sur l'Antarctique ou bien à une masse de 680 000 Gt. La correction sur la masse

de glace en Antarctique entre AR4 et AR5 est **4,03** fois plus importante que la masse banquises + glaciers.

6.1. Bilan gain/perte pour la cryosphère selon le GIEC

6.1.1 Bilan Gain /perte

Selon les rédacteurs du GIEC, trois composantes contribuent à la hausse des niveaux marins. Les glaciers [4] seraient les premiers contributeurs, suivis par 'Greenland' et enfin par 'Antarctica'. Ces trois composantes constituent 99,9% de la cryosphère (Fig. 1a).

Contribution of Glaciers and Ice Sheets to Sea Level Change

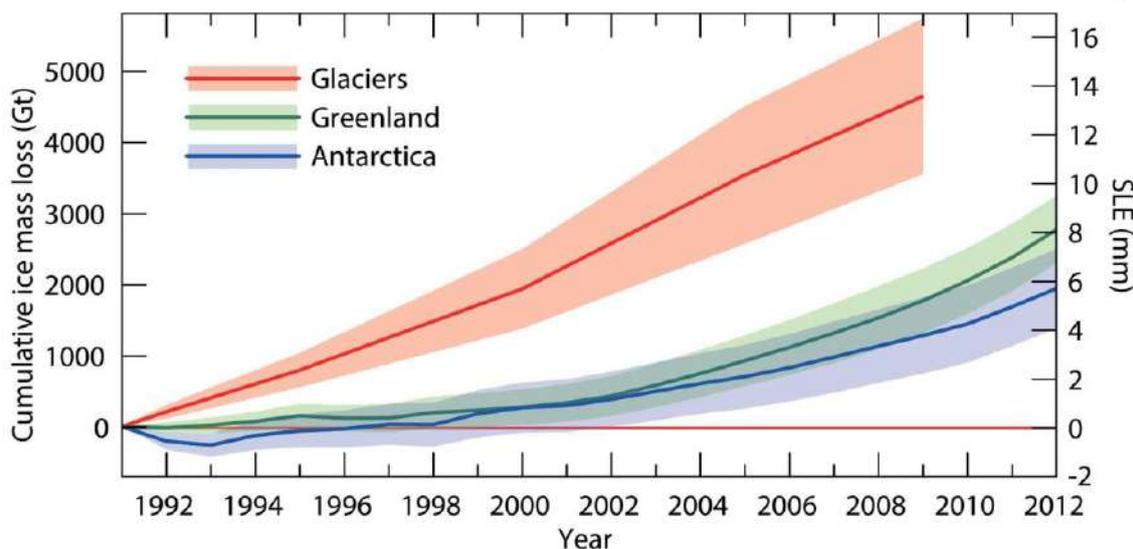


Figure 2a. Bilan gain/perte entre 1992 et 2012 (selon AR5 Fig. 4.25 page 367).

La fonte de la cryosphère ferait monter le niveau des mers : une double échelle verticale est donc utilisée : en gigatonne (1Gt = 10¹²kg) et en mm (SLE = Sea Level Equivalent, c'est-à-dire la hausse du niveau de la mer que provoque la fonte des glaces).

L'AR 5 est publié en 2013 : l'axe horizontal couvre les 2 décennies précédentes.

L'AR5 présente en page 41 du 'Technical Summary' ce même graphique mais avec la légende suivante : *Distribution of ice loss determined from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) time-variable gravity.*

Le tableau ci-dessous reprend les bilans gain/perte (selon le GIEC) de ces trois composantes de la cryosphère.

	Selon figs 4.6, 4.15 et 4.25 WG1 AR5	Contribution au niveau marin (1992-2012)		Bilan net 1992-2012	
		S.L.E. (mm)	Erreur (mm)	Gain-Perte (Gt)	Erreur (Gt)
1	Glaciers	16	± 3	-5810	± 1090
2	Greenland	8	± 1,5	-2905	± 545
3	Antarctica	5,5	± 1,5	-1995	± 545
4	Total	29,5	± 6	-10710	± 2180
3'	Antarctica (Zwally)	-5,6	± 2,7	2040	± 980
4'	Total (Zwally)	18,4	± 7,2	-6675	± 2615

Figure 2b. [5] Le tableau reprend (en mm) et complète (en gigatonne = Gt = 10¹² kg) les données de la figure 4.6 p. 350. Pour les

contributions 'Greenland' et 'Antarctica', on se base sur les figures 4.15 p 352 et 4.25 p.367 de l'AR5. On utilise l'équivalence : fonte de 363 Gt de glace = 1 mm Sea Level Equivalent. Toutes les valeurs sont arrondies.

Pour les années 1992-2012, les trois contributions selon l'AR5 (lignes 1, 2 et 3) entraîneraient une **hausse** totale des niveaux marins de **29,5 mm ± 6 mm**, soit une **diminution** de la cryosphère de - **10710 Gt ± 2180 Gt**.

Cette marge d'erreur (selon l'AR5) montre que le GIEC est certain d'une diminution de la cryosphère. En revanche, une marge d'erreur ≥ bilan gain/perte (-10710 Gt) signifierait : « nous ne savons pas »

A des fins de **comparaison**, on utilise aussi (ligne 3') pour Antarctica un article de Zwally et al. (2015) [3], **postérieur** à la publication AR5. La substitution de la ligne 3 par 3' donnerait un **nouveau** bilan total (ligne 4') de -6675 Gt ±2615 Gt [5].

Ce nouveau bilan serait sensiblement différent de celui de l'AR5 (-10710 Gt ± 2180 Gt).

6.1.2 Remarques complémentaires

- Il est instructif de comparer la correction AR4/AR5 (Fig. 1b) sur la masse de l'Antarctique + **680 000 Gt** avec le bilan gain/perte de la cryosphère (AR5) de **-10 710 Gt** et la marge d'erreur **±2180 Gt**
- La diminution **selon l'AR5** (-10710 Gt) de la cryosphère est très faible, comparée à sa masse: - 0,0107 10⁶ Gt / 26,2 10⁶ Gt = **-0,04%**. Une diminution aussi faible est-elle mesurable ? Le tableau ci-dessous donne des éléments d'appréciation.

AR5 CH4 Table 4.1		AR5 Chap. fig 4.25		AR5 Chap.4 fig 4.25	
Sea Level Equivalent (mm)		Variation SLE (mm) 1992-2012	ratio	Erreur variation SLE (mm)	ratio
1	Glaciers 410	16	3,902%	±3	0,73%
2	Greenland 7360	8	0,109%	±1,5	0,020%
3	Antarctica 58300	5,5	0,009%	±1,5	0,003%
4	Total cryosphère 66200	29,5	0,04%	±6	0,009%
Antarctica correction AR4/AR5 1700 100%		29,5 1,74%	(x 58)	±6 0,35%	(x 283)

Figure 2c. Comparaisons entre stock total de glace (fond gris), variation 1992-2012 (fond bleu), marge d'erreur (fond rouge) [5]. Tous les ratios sont calculés relativement au stock de glace (fond gris) de chaque contributeur.

6.2. Les marges d'erreur

6.2.1

Introduction

- Les extraits suivants de l'AR5 illustrent les marges d'erreur selon le GIEC:
 - 'At present, it is not possible to quantify all sources of uncertainty in mass budgets' (Volume and Mass Change Measurements page 337, AR5);
 - If uncertainties can be quantified probabilistically, an author team can characterize a

finding using the calibrated likelihood language or a more precise presentation of probability (Box S1 page 36 Technical Summary);

– In Antarctica, available data are inadequate to assess the status of change of many characteristics of sea ice (e.g., thickness and volume).{4.2.3}. On a global scale the mass loss from melting at calving fronts and iceberg calving are not yet comprehensively assessed. The largest uncertainty in estimated mass loss from glaciers comes from the Antarctic, and the observational record of ice–ocean interactions around both ice sheets remains poor {4.3.3, 4.4} (TS 6.1 page 114 Technical Summary).

La tonalité **pessimiste** de ces extraits de l'AR5 se traduit pourtant par des marges d'erreur **réduites** (Fig. 2c). Le GIEC est donc optimiste sur la connaissance de la cryosphère (marge d'erreur réduite = optimiste). Les paragraphes suivants vont amener quelques éléments en faveur de marges d'erreur plus larges, donc moins optimistes.

6.2.2 Marge d'erreur 'Glaciers' (principal contributeur selon l'AR5)

- La marge d'erreur sur la **variation** 'Glaciers' (± 3 mm soit $\pm 0,73\%$ de 410 mm) peut utilement être rapprochée de la marge d'erreur sur le **stock** 'Glaciers' : $\pm 26\%$ (masse glaciers = 152897 Gt \pm 3898 Gt) [5]. [ici § 2.3](#),
Pour les glaciers, la connaissance des variations de masse serait donc $26 / 0,73 = 35$ fois **meilleure** que la connaissance de leur masse totale: la marge d'erreur sur les variations ne serait-elle pas optimiste ?
- Le tableau 4.5 en page 344 de l'AR5 permet de **calculer** la variation 1992-2012 SLE 'all glaciers' = 15 mm \pm 5.4 mm, [5, onglet verif glaciers], que l'on peut comparer avec la marge d'erreur dans le bilan selon l'AR5 = 16mm \pm 3 mm (Fig. 2b). Y aurait-il transformation d'une erreur 2 sigma en une erreur 1 sigma ? (sigma [voir ici](#));
- Le nombre de glaciers suivis par des mesures *in situ* est **très faible**: le **World Glacier Monitoring Service** [ici] ne dispose des bilans de masse que pour ≈ 300 glaciers sur les 200000 répertoriés (**0,15%** des glaciers répertoriés) [4, Mazeiron et al. 2012];
- La consultation du bilan selon le [WGMS \(Table 2\)](#) conduit aux interrogations suivantes :
1) l'échantillonnage est-il suffisant?
Sur les 200 000 glaciers, seulement une **quarantaine** de glaciers de référence (0,02%) ont des séries temporelles supérieures à 40 ans.
2) l'échantillonnage est-il représentatif ?
Sur les 40 glaciers de référence, on en trouve 19 en Scandinavie ou dans les Alpes, soit **48%** des glaciers de référence. Malheureusement, la masse des glaciers alpins et scandinaves ne représente que **0,22%** de la masse totale des glaciers.
A ce sujet, un lecteur intéressé peut (re)lire dans la [partie 2/3](#) le paragraphe 2.32 et consulter la Fig. 6a;
- Rappelons surtout que la composante 'Glaciers' serait (selon l'AR5) **le premier contributeur** à la hausse du niveau des océans.

6.2.3 Marge d'erreur 'Ice Sheets'

- Les estimations du bilan gain/perte reposent principalement sur des techniques de gravimétrie et d'altimétrie.

Celles-ci supposent une connaissance précise du mouvement du sol **sous-jacent** à la couche de glace. Ce mouvement est essentiellement **modélisé** : le résultat des observations par altimétrie/gravimétrie **dépend fortement** du choix du **modèle GIA (Global Isostatic Adjustment)**;

- La marge d'erreur pour l'Antarctique ($\pm 1,5$ mm) serait comparable à la marge d'erreur ($\pm 1,5$ mm) pour le Groenland, alors que **l'Antarctique est 7 fois plus étendu que le Groenland**.

Le paragraphe suivant examine les articles cités par le GIEC pour justifier son bilan gain/perte en Antarctique et au Groenland.

6.3. Articles justifiant le bilan gain/perte de l'AR5

Les pages 380/382 de l'AR5 (appendix 4.A) [1] listent les articles utilisés.

Les rédacteurs du GIEC distinguent des articles « used » et « not used » (for calculation of ice loss).

Le tableau ci-dessous récapitule l'analyse statistique succincte des 68 articles.

Appendix 4A	Sources	Moy. bilans (Gt)	Moy. erreurs (Gt)	Extrêmes (Gt)
Antarctica used	11 (10)	-2656	1016	de -1560 à -4400
Antarctique AR5	27 (20)	-1995 ± 545		5/11 "used" incompatibles
Antarctica NOT used	16 (10)	-1488	1149	de +540 à -3000
Greenland used	20 (14)	-3631	588	de -140 à -4960
Greenland AR5	41 (30)	-2905 ± 545		
Greenland NOT used	21 (16)	-2910	630	de 220 à -6260

Figure 3. Statistiques sur l'appendix 4.A [1].

La colonne 'Sources' indique le nombre total d'articles et () ceux basés sur altimétrie/gravimétrie. Les données sont ramenées (voir remarques ci-dessous) sur 20 ans (1992-2012) [5 onglet Appendix 4A]

Remarques sur la Fig. 3 :

On lit en page 350 de l'AR5 : « *The error limits used in this assessment are derived from the absolute maximum and minimum mass balance estimate for each year. These have been converted to the 90% confidence interval (5 to 95%, or 1.65 σ). The cumulative error is weighted by $1/\sqrt{n}$, where n is the number of years accumulated* »;

La pondération $1/\sqrt{n}$ n'est applicable (dans la théorie de la mesure) que dans certaines conditions qui ne semblent pas réunies ici. En conséquence, dans le tableau de la Fig. 3, on n'a **pas** utilisé de facteur de pondération ($1/\sqrt{20} = 0,22$) ni de conversion vers 1.65σ ;

Dans **ces** conditions, on remarque :

– Pour Antarctica, les 27 sources donnent (en moyenne et sur 20 ans) un bilan gain/perte ≈ -1964 Gt ± 1093 Gt, ce qui est comparable au bilan de l'AR5 $\approx -1995 \pm 545$ Gt. En revanche, la marge d'erreur moyenne des 27 sources est ± 1093 Gt soit **le double** des ± 545 Gt, selon l'AR5.

– En prenant seulement les 11 sources 'used', on a toujours une marge d'erreur bien plus grande (± 1016 Gt versus ± 545 Gt).

Autres remarques sur le bilan en Antarctique

- La dispersion est très importante parmi les 27 sources: les bilans sont compris entre +540 Gt et -4400 Gt.

Pas moins de 5 sources 'used' ont des valeurs qui sont **incompatibles** (marge d'erreur comprise) avec le bilan selon l'AR5 à savoir -1995 ± 545 Gt ou $[-1450 -2540]$.

On constate que 14 sources sur 27 utilisent GRACE (gravimétrie) et 6 autres utilisent le radar (altimétrie) : la marge d'erreur devrait **croître** avec la **surface** mesurée. Pourtant la marge d'erreur Antarctica est comparable avec celle de Greenland (7 fois moins étendu).

6.4. Discussion à propos de la marge d'erreur en Antarctique

- De nombreux articles scientifiques ont été publiés depuis la parution de l'AR5. Examinons 2 d'entre eux :
 - Selon l'article *Zwally et al.* 2015 [2] [5] l'Antarctique **gagnerait** de la masse entre 1992 et 2012 : le bilan serait $+2040$ Gt ± 980 Gt, ce qui est **fort peu compatible** avec le bilan en Antarctique selon l'AR5 (-1995 Gt ± 545 Gt).
 - Selon l'article '*Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*' [2] le bilan serait de $-2\ 720 \pm 1390$ Gt, soit 7.6 ± 3.9 millimètres (**errors are one standard deviation**). Avec un intervalle de confiance à 2 sigmas, le bilan serait -2720 ± 2780 Gt ($7,6 \pm 7,8$ mm SLE) il n'est alors plus certain que l'Antarctique perde de la masse.

Normalisation avec la surface.

La valeur du bilan de masse (1992-2012) en Antarctique retenu par l'AR5 (Fig. 2b) est donc **-1995 Gt ± 545 Gt**.

La figure 4 permet l'examen d'une normalisation de la marge d'erreur avec **la surface**.

– **Le tableau A** (Fig. 4) reprend les marges d'erreur selon le GIEC et calcule une 'erreur surfacique' (erreur en Gt/ surface en Mkm²). On obtient ± 1557 Gt par Mkm² pour les glaciers, $\pm 320,6$ Gt par Mkm² pour Greenland, mais **seulement ± 44 Gt** par Mkm² pour Antarctica

([surface ice sheets](#)) .

Tableau A					
	Surface (Mkm ²)	Erreur (Gt)	Erreur (Gt/Mkm ²)	Bilan cryosphère gain/perte (Gt)	
1	Glaciers (-5810 Gt)	0,7	1090	1557	-10710 ± 2180
2	Greenland (-2905 Gt)	1,7	545	320,6	
3	AR5 Antarctica (-1995 Gt)	12,4	545	44 ?	
Tableau B					
	Surface (Mkm ²)	Erreur (Gt)	Erreur (Gt/Mkm ²)	Bilan cryosphère gain/perte (Gt)	
3'	Zwally Antarctica (+2040 Gt)	12,4	980	79	-6675 ± 2615
3''	Antarctica (Greenland)	12,4	3975	320,6	-10710 ± 5610
3'''	Antarctica (Glaciers)	12,4	19309	1557	-10710 ± 20944

Figure 4. Marges d'erreur proportionnelles à la surface et conséquences sur le bilan cryosphère [5]

– **Le tableau B** remplace l'erreur surfacique initiale d'Antarctica (± 44 en ligne 3) par celle du Groenland ($\pm 320,6$ en ligne 3'') ou des glaciers (± 1557 en ligne 3'''). On en déduit alors l'erreur sur la surface totale d'Antarctica : le **bilan** cryosphère ne change pas (-10710 Gt) mais **la marge d'erreur** est modifiée.

La ligne 3' rappelle le résultat de la Fig. 2b : la substitution des valeurs tirées de l'article de Zwally donne un bilan pour la cryosphère de -6675 Gt ± 2615 Gt.

Dans le cas particulier d'une erreur surfacique identique à celle des glaciers, on obtient pour la cryosphère un bilan gain/perte -10710 Gt ± 20944 Gt : Il n'est alors **pas certain** que la cryosphère soit en diminution lors des dernières décennies.

6.5. Conclusions

- La basse atmosphère de la Terre subit probablement un très faible réchauffement depuis la fin du Petit Âge de Glace (≈1850). Il est donc possible, **mais pas certain**, que la diminution des glaciers alpins puisse refléter une diminution plus générale de la cryosphère.
- L'observation de l'**ensemble** de la cryosphère date seulement de l'ère des satellites. Selon le chapitre 4 de l'AR5, ces observations récentes permettraient de démontrer que la cryosphère est en diminution lors des dernières décennies.
- La diminution **relative** de la cryosphère est très faible (-0,04%), et ce résultat est basé principalement sur des observations aériennes récentes, associées à de la modélisation. A cet égard, on doit s'interroger : ces moyens d'observations et la modélisation associée permettent-ils vraiment de voir les très faibles variations de masse ? (« **Assurons-nous bien du fait avant que de nous inquiéter de la cause** »).
- La littérature récente montre que le sens de variation est incertain en Antarctique (**89,1%** de la cryosphère).
La marge d'erreur du bilan gain/perte en Antarctique semble **très** optimiste.
La **faible** marge d'erreur du contributeur **principal** 'Glaciers' doit aussi être interrogée : la localisation de l'IPCC et du WMO à Genève, à proximité des glaciers **alpins**, a-t-elle pu influencer le jugement ?
- Les considérations ci-dessus fragilisent le bilan gain/perte selon l'AR5 : **une diminution (1992-2012) de la cryosphère est-elle vraiment démontrée ?**

Epilogue

- Le travail des rédacteurs du GIEC est certainement difficile : leur rapport risque d'être entièrement lu avec attention, éventuellement par des scientifiques critiques, qui pourraient même vérifier les moindres détails.
- Dans le prochain AR6, les rédacteurs devront intégrer certaines publications scientifiques postérieures à 2013.

Selon l'article Zwally et al. (2015), la marge d'erreur du bilan gain/perte en Antarctique, **ne recouvre pas** celle de l'AR5. Jay Zwally semble être un auteur qualifié aux yeux du GIEC car il est cité à 2 reprises (p. 383 AR4) puis à 5 reprises (p. 379 AR5). L'article Zwally et al. (2015) [3] sera-t-il retenu pour l'AR6? Les marges d'erreur très optimistes de l'AR5 seront-elles revues?

Le travail des rédacteurs de l'AR6 n'est pas seulement difficile, il est aussi cornélien lorsque il faut résoudre certains problèmes apparemment inconciliables, par exemple :

- une **révision à la hausse des marges d'erreur** entraînerait une faible certitude de la diminution de la cryosphère, voire aucune certitude.
- une **révision à la baisse du bilan gain/perte** aurait des conséquences ennuyeuses : dans le chapitre 13 [1], les rédacteurs de l'AR5 avaient fait état d'une hausse des niveaux marins de **3,2 mm/an ± 0,4 mm/an**. Il faudrait donc que les rédacteurs du futur AR6 parviennent à trouver une explication à une hausse du niveau des océans de 56 mm à 72 mm en 20 ans.

– Mais le problème le plus épineux des rédacteurs réside, peut-être, dans l'opposition entre l'investissement dans un rapport de ≈ 1500 pages soutenu par de nombreux organismes intergouvernementaux, et le difficile aveu :
« Nous ne savons pas ».

REFERENCES

[1] Rapports GIEC

- Ch.4 AR5 (2013) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter04_FINAL.pdf
- Ch.8 AR5 (2013) https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- Ch.13 AR5 (2013) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf
After accounting for the ~ -0.3 mm yr⁻¹ correction related to the increasing size of the global ocean basins due to GIA (Peltier, 2009), a GMSL rate of 3.2 [2.8 to 3.6] mm yr⁻¹ over 1993–2012 is found by the different altimetry data processing groups → à lire en page 1150 The Satellite Altimeter Record
- Ch.4 AR4 (2007) <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter4-1.pdf>
- Technical Summary (2013) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_TS_FINAL.pdf
- Spécial Report Océan and Cryosphère (2019) <https://www.ipcc.ch/srocc/>

[2] Glaces de mer ou banquises

- Arctic Data Archive system Extent <https://ads.nipr.ac.jp/vishop/#/extent>
- NSIDC National snow and ice Data <http://nsidc.org/arcticseaicenews/chartic-interactive-sea-ice-graph/>

[3] Antarctique

- Les observatoires en Antarctique https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_bases_antarctiques
- Les gains à l'Est sont **inférieurs** aux pertes à l'Ouest:
 Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/225208/1/IMBIE_Nature_2018.pdf
<https://www.nature.com/articles/s41586-018-0179-y>
- Les gains à l'Est sont **supérieurs** aux pertes à l'Ouest :
 Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses Zwally et al (2015) doi:10.3189/2015JoG15J071 <https://pdfs.semanticscholar.org/7cca/82fa14de7865472b781289636c1f172c459f.pdf>
- IMBIE Bilans gain/perte <http://imbie.org/imbie-2012/results/>
http://imbie.org/data-files/imbie_dataset-2012_11_29.xlsx
- Refroidissement en Antarctique: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017GL072937>
- Neige en antarctique: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0356-x>

[4] Glaciers WGMS

- World Glacier Monitoring Service
<http://www.wgms.ch>
Global Glacier Changes: facts and figures
- GTNG Global Terrestrial Network for Glaciers
https://www.gtn-g.ch/data_catalogue/
- Mazeiron et al. (2012)
<https://www.the-cryosphere.net/6/1295/2012/tc-6-1295-2012.pdf>
*« The main obstacle to progress is a severe undersampling problem: direct glaciological measurements, e.g. of surface mass balances have been performed on
 ~ 300 glaciers world wide. The number of glaciers on which these types of measurements have been carried out for time periods longer than 30 yr, i.e. over periods that potentially allow for the detection of a climate change signal, is **one order of magnitude smaller.** »*

- [5] Le tableur « **Cryosphère 3** » met en forme les données dans 7 feuilles de calcul.

7. La péninsule Antarctique se porte bien

Mis en ligne SCE : 28.02.2020

Selon un récent [article du Guardian](#), des scientifiques ont mesuré pour la première fois la température de 20,75°C le 9 février 2020 sur l'île Seymour, une île située au large de la péninsule Antarctique. Cette île comporte la station de mesure Marambio où les relevés ont été réalisés. Bien entendu, cette nouvelle a été reprise par les médias, Greta Thunberg en tête. Cependant, en analysant objectivement la situation vous pourrez constater qu'il n'y a pas lieu de s'alarmer.

7.1. Localisation de l'île Seymour et température moyenne annuelle

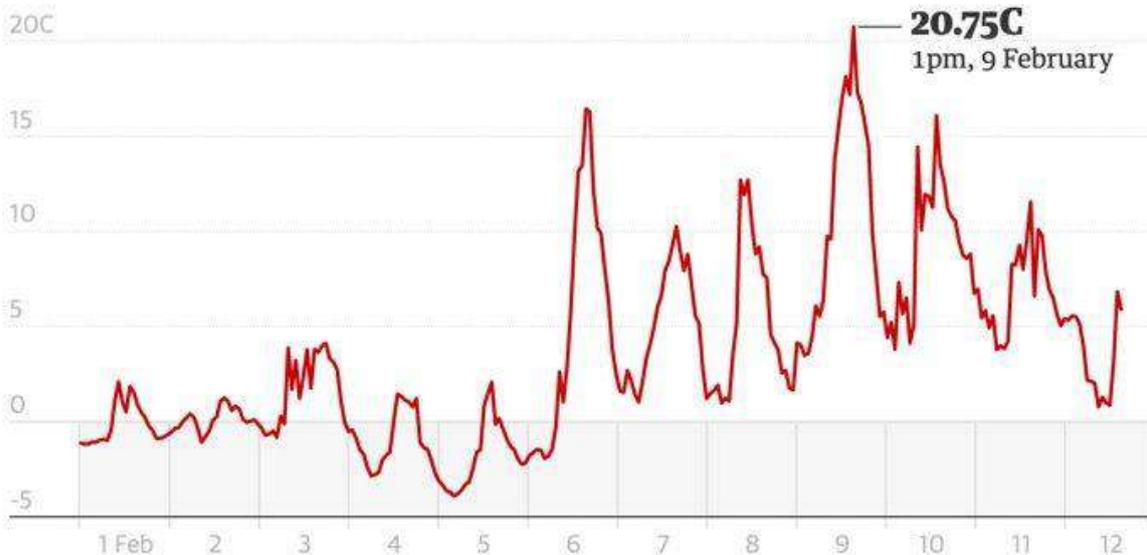
L'île Seymour est située au large de la péninsule Antarctique (Figure 1), la région la plus au nord du continent Antarctique et, quasiment, la seule partie d'Antarctique s'étendant au-delà du cercle polaire.



Figure 1. La péninsule Antarctique et l'île Seymour.

L'article du Guardian nous donne le graphique de températures suivant pour le début du mois de février 2020 (Figure 2) :

Marambio Base logged a record high air temperature on 9 February



Guardian graphic. Source: Marambio Base

Figure 2. Température de l'atmosphère au niveau du sol pour la station Antarctique Marambio entre le 1er et le 12 février 2020. Le pic à 20,75°C est indiqué. Source : Guardian (2020).

Nous pouvons voir en consultant l'axe des abscisses de la Figure 2 qu'il s'agit de températures journalières, relevées toutes les heures, avec des pics chaque jour aux heures les plus chaudes. Bien entendu il peut s'agir d'un record de température positive.

Mais **il ne faut jamais se fier à la température d'un seul jour**. Une seule mesure ne veut rien dire, car il existe peut-être dans l'année des **records de températures négatives au même endroit** dont les médias ne parlent pas (les médias ne parlent jamais des records de basses températures, comme par exemple les -65°C en janvier 2020 au Groenland, voir [ici](#)). En moyenne, il se pourrait donc que la température ne varie pas.

Pour savoir ce qu'il en est, analysons les données officielles (Figure 3) de la station Marambio (données GHCNv4 fournies par la NOAA, [ici](#)) et regardons les **températures moyennes annuelles**. Les données ont été homogénéisées par la NOAA (c'est-à-dire nettoyées et corrigées des effets non climatiques).

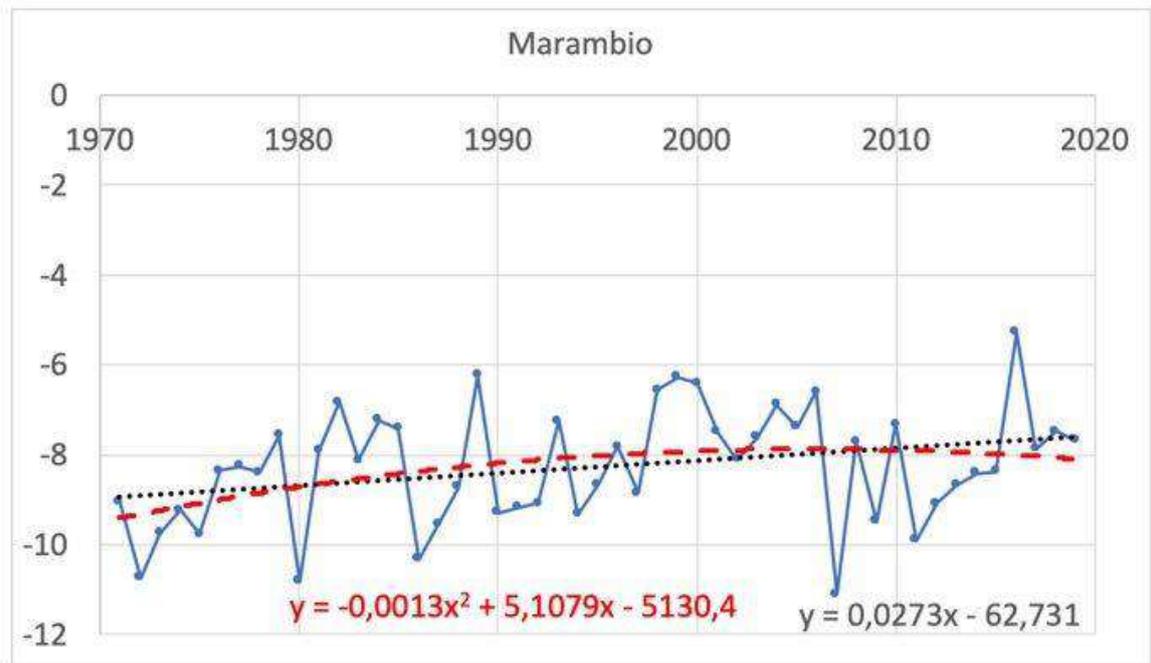


Figure 3. Températures moyennes annuelles pour la station Marambio (bleu). La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). La ligne rouge en tirets est la tendance polynomiale de degré 2 (équation rouge). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

Nous constatons les choses suivantes :

- Depuis 1971, les valeurs de température moyenne annuelle de la station Marambio sont négatives, inférieures à -5°C . Les températures annuelles moyennes les plus récentes (2019) sont de -8°C . Ceci démontre que la zone reste assez froide.

- Il existe de grandes variations d’une année à l’autre, atteignant parfois + ou $-4,5^{\circ}\text{C}$ en un an : par exemple de $-6,60^{\circ}\text{C}$ en 2006 on passe à $-11,11^{\circ}\text{C}$ en 2007.

- Si l’on trace une **droite** de régression, une très légère tendance positive est observée avec l’ensemble des données entre 1971 et 2019. La droite obtenue possède une **faible** pente de $+0,027$ (le coefficient de détermination R^2 valant $0,09$). Mais peut-on raisonnablement tracer une telle droite?

- Si au lieu de considérer une droite de régression on fait passer une **polynomiale de degré 2** parmi les données on obtient un meilleur coefficient de détermination ($R^2 = 0,12$). On constate alors (Figure 3) une légère augmentation de température entre 1970 et 1995, puis une température stable jusqu’en 2020. Depuis 1995, la température moyenne annuelle oscille autour de -8°C . Notons que dans la nature, les phénomènes sont rarement linéaires.

Concluons déjà pour la station Marambio : non, il n’y a pas d’augmentation folle de la température, particulièrement au cours des 25 dernières années.

7.2. Les autres stations de la péninsule Antarctique

Une seule station de mesure, comme celle de Marambio, ne suffit évidemment pas pour tirer des conclusions fiables. Voyons donc ce qu'il en est des stations proches (Figure 4).



Figure 4. Localisation de quelques stations météo sur la péninsule Antarctique. Source : NOAA ([ici](#)).

– Pour la station Bernardo O'Higgins, très proche de Marambio, les températures moyennes annuelles sont négatives avec une tendance stable depuis 1980 (Figure 5).

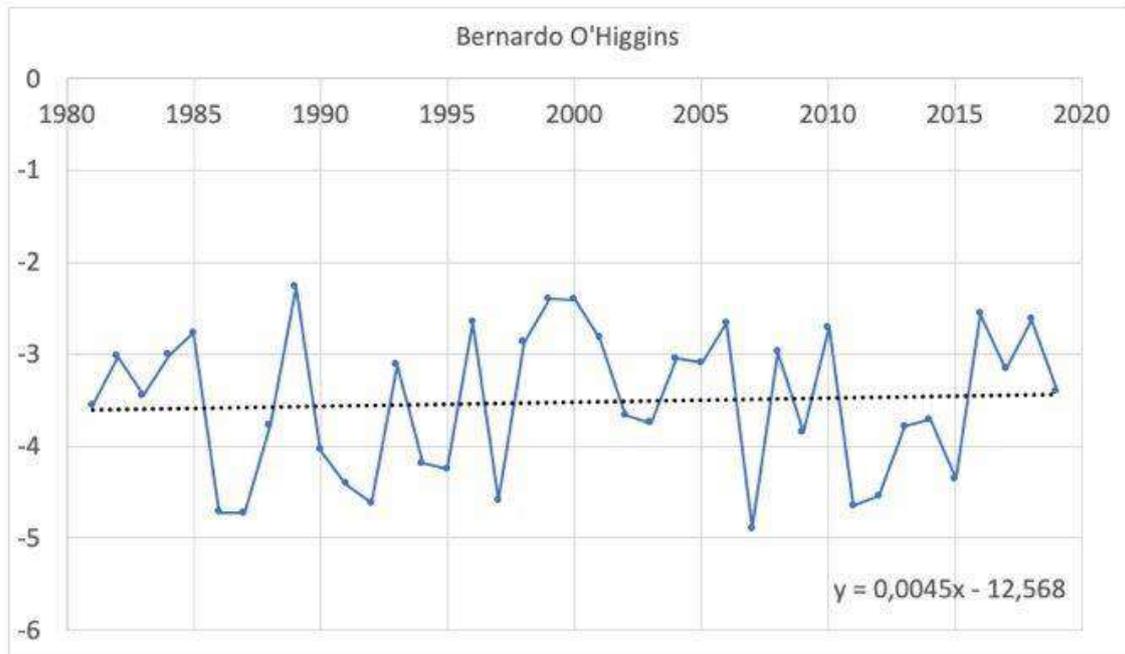


Figure 5. Températures moyennes annuelles pour la station Bernardo O'Higgins (bleu). La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

– Pour la station Arturo Prat (Figure 6) les températures moyennes annuelles sont également négatives. Encore une fois, on constate de grandes variations d’une année à l’autre, une légère pente de +0,02 si l’on trace une droite de régression avec l’ensemble des données ($R^2 = 0,20$), mais une stabilisation de la température depuis 2000 si l’on trace une polynomiale ($R^2 = 0,22$).

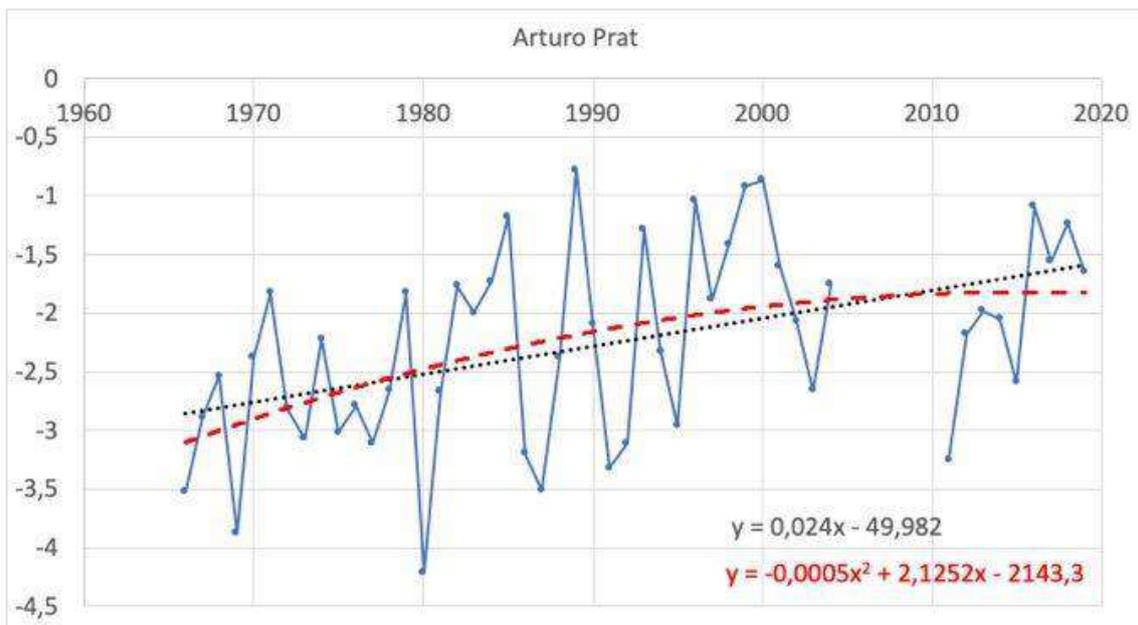


Figure 6. Températures moyennes annuelles pour la station Arturo Prat (bleu). La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). La ligne rouge en tirets est la tendance polynomiale de degré 2 (équation rouge). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

– Pour la station Vernadsky (Figure 7) nous constatons une tendance nettement décroissante en ne considérant les données que depuis l’année 2000 (pente de $-0,021$; droite verte sur Fig.7). Avec l’ensemble des données nous obtenons une droite de régression dont la pente est positive (valant

+0,04; $R^2 = 0,3904$). La polynomiale de degré 2 avec toutes les données donne encore une fois un R^2 supérieur (0,3988). Ceci montre que si l'on considère toutes les données la température moyenne est en cours de stabilisation.

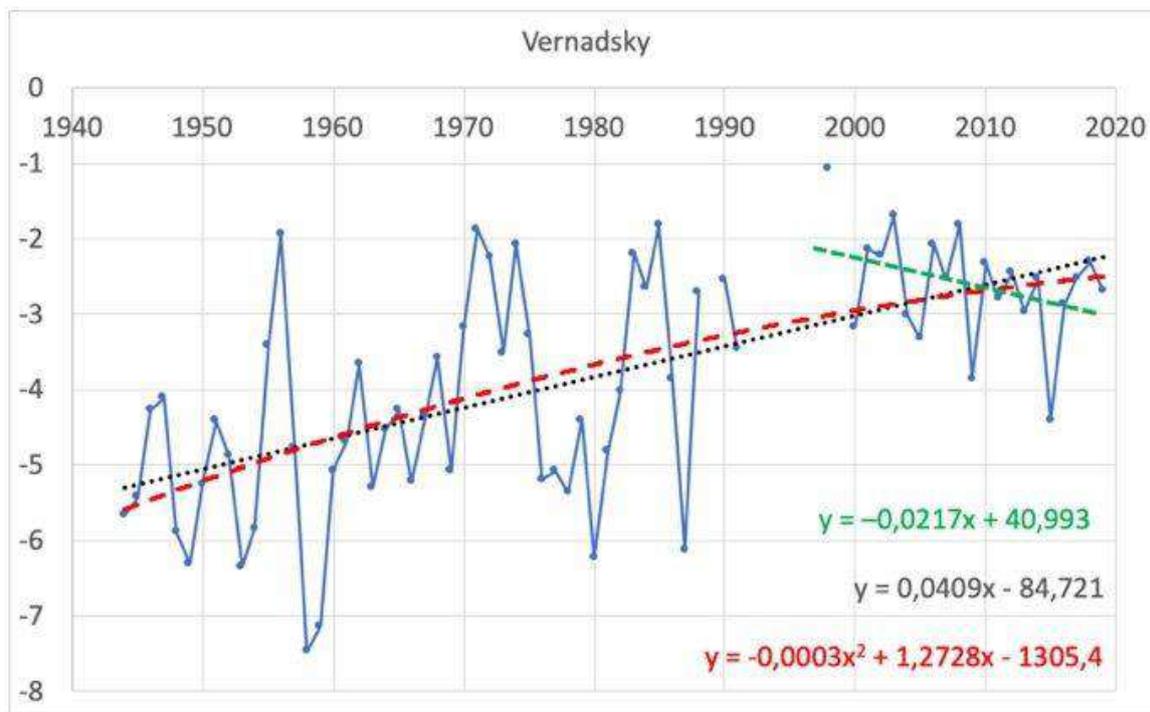


Figure 7. Températures moyennes annuelles pour la station Vernadsky. (bleu). La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire avec l'ensemble des données (équation noire). La ligne rouge en tirets est la tendance polynomiale de degré 2 avec l'ensemble des données (équation rouge). La ligne verte est la tendance linéaire depuis l'année 2000 (équation verte). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

– Pour la station Univ Wi Id 8926 Larsen Ice (Figure 8), on constate aucune tendance à l'accroissement mais une diminution depuis 1995.

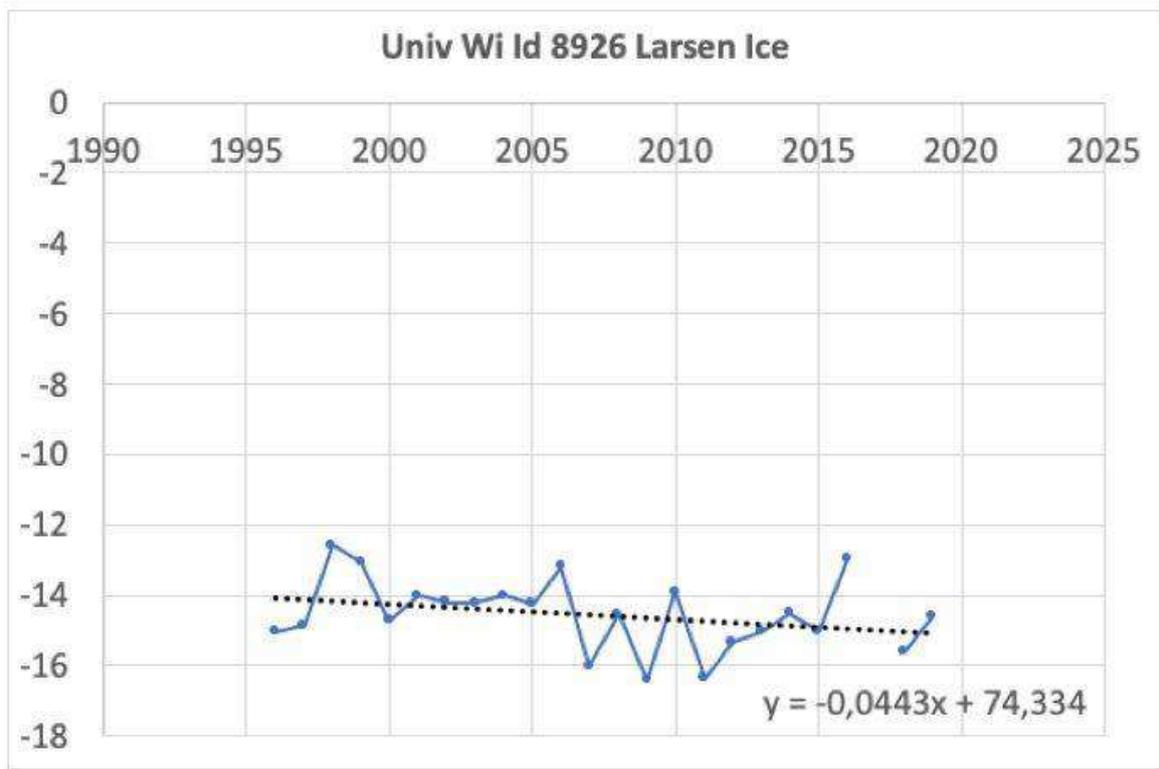


Figure 8. Températures moyennes annuelles pour la station Univ Wi Id 8926 Larsen Ice (bleu). La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

– Concernant la station Orcadas au large de la péninsule Antarctique (Figure 9) une décroissance est observée depuis 2000 avec cette fois-ci une polynomiale de degré 3 ($R^2 = 0,33$). Comme à chaque fois, une droite avec l'ensemble des données depuis 1902 montre une légère tendance positive (pente de +0,01) mais le R^2 est plus petit (0,30). Il vaut donc mieux considérer la courbe polynomiale.

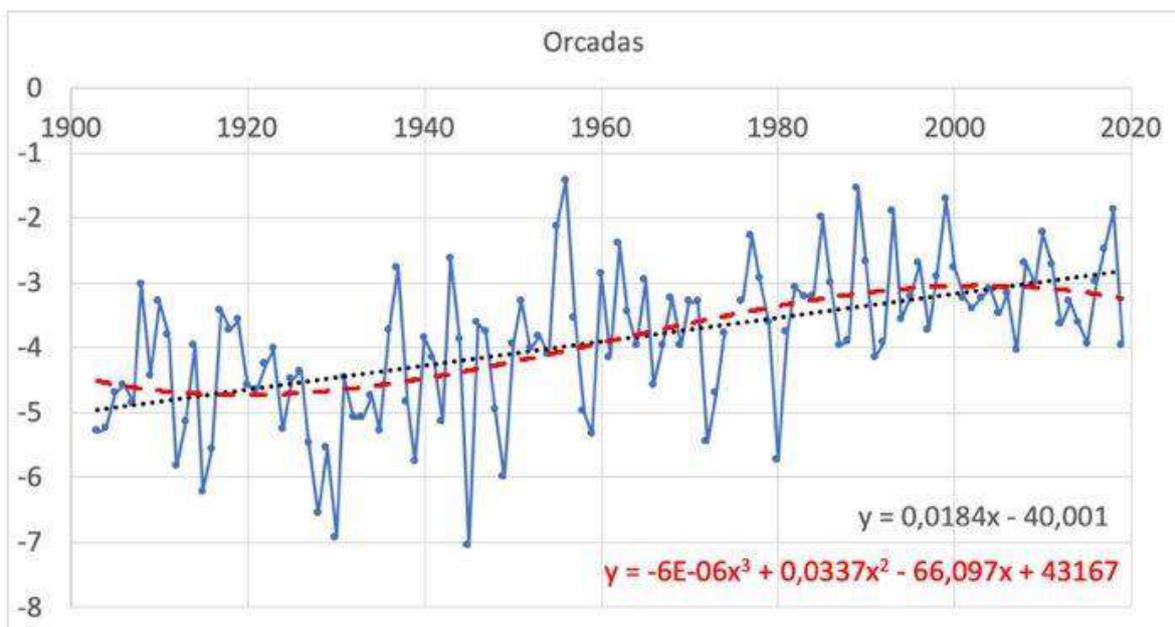


Figure 9. Températures moyennes annuelles pour la station Orcadas. La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). La ligne rouge en tirets est la tendance polynomiale de degré 3 (équation rouge). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

– Pour la station King Sejong (Figure 10) nous pouvons voir une diminution de la température moyenne annuelle depuis 1990, mais de nombreuses mesures sont manquantes.

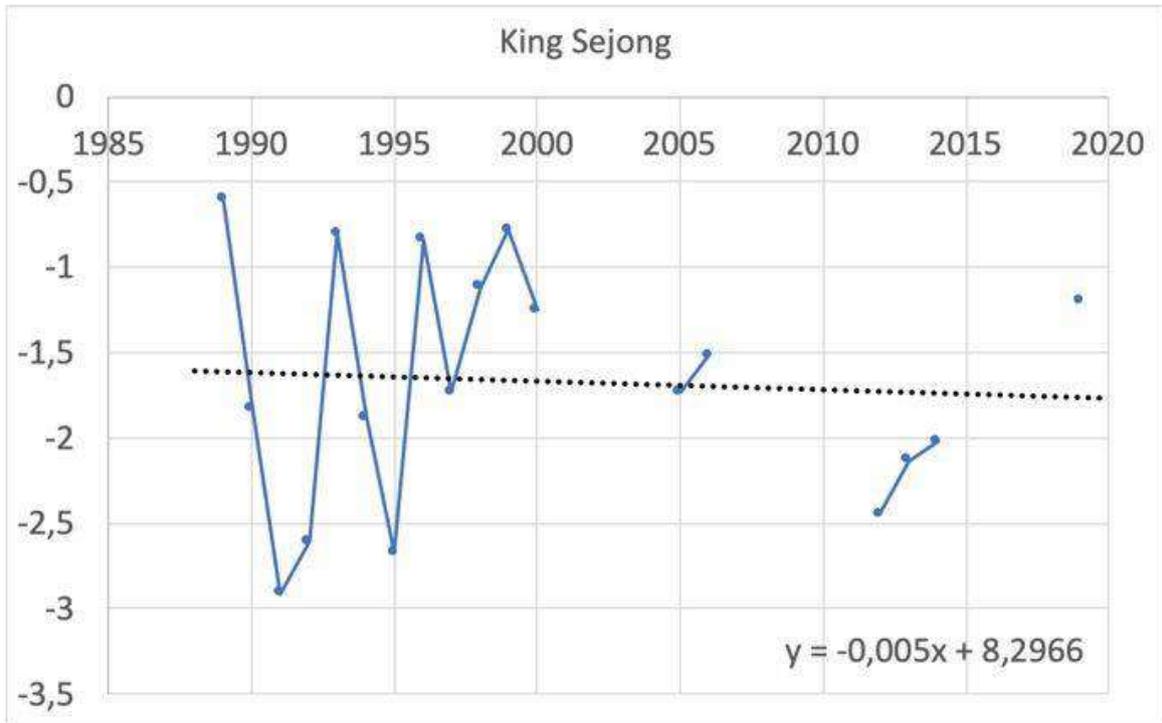


Figure 10. Températures moyennes annuelles pour la station King Sejong. La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). Source : NOAA ([ici](#)).

Finalement, pour la station Univ Wi Id 8902 Butler Isla (Figure 11) nous pouvons voir une diminution depuis 1997. Remarquons qu'en moyenne annuelle la température est ici inférieure à -14°C .

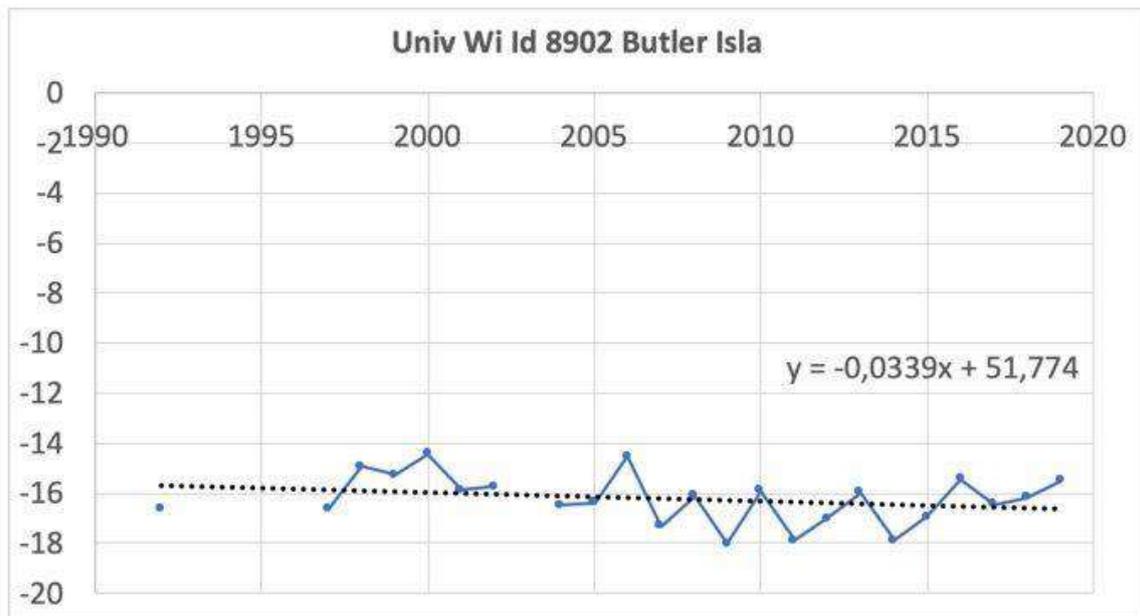


Figure 11. Températures moyennes annuelles pour la station Univ Wi Id 8902 Butler Isla. La ligne noire en pointillés est la tendance linéaire (équation noire). Données GHCN V4 adjusted-homogenized. Source : NOAA ([ici](#)).

7.3. Conclusions

– Pour comprendre ce qu’il se passe dans un jeu de données de température il ne faut pas considérer une seule mesure comme le fait l’article du Guardian; il ne faut pas non plus considérer une seule station de mesure.

– Si l’on désire faire passer des **droites** parmi les données de température, les plus longues séries disponibles sont celles de la station Orcadas (depuis 1902), qui est quand même assez éloignée de la péninsule Antarctique. On constate alors un réchauffement d’environ + 2°C en 110 ans (la courbe de tendance coupe –5°C en 1900 et –3°C en 2010). **Cependant, en considérant des courbes polynomiales dont le coefficient de détermination est meilleur on constate que les températures moyennes chutent depuis les années 2000, comme dans toutes les stations de la péninsule Antarctique présentées dans cet article.**

– Les phénomènes naturels suivent rarement des droites. Ils sont généralement cycliques, avec des périodes et amplitudes très variables. Il est donc permis de conclure que **la péninsule Antarctique ne se réchauffe pas depuis 25 ans**. Ceci est confirmé par d’autres analyses (voir [ici](#) et [ici](#)) et il est dommage qu’une fois de plus les médias ne fassent pas plus preuve de rigueur et se permettent des raccourcis donnant une information inexacte à 100%. En sont-ils seulement conscients ?

[8. La neige n’est pas prêt de s’arrêter de tomber...](#)

Mis en ligne SCE : 06.03.2020

Depuis le début des mesures satellitaires en 1967, la couverture neigeuse de **l’hémisphère nord** a augmenté en automne et en hiver. Ce phénomène incontestable a par exemple été illustré en graphiques par un laboratoire spécialisé dans les chutes de neige à la **Rutgers University** aux Etats Unis, le **Global Snow Lab**, mais également par l’Organisation Météorologique Mondiale.

Pour **l’automne**, on est ainsi passé de 18,4 10⁶ km² de neige en 1967 à environ 20,2 10⁶ km² pour 2019 (Figure 1). Pour **l’hiver**, la situation est plutôt stable ou en légère augmentation : on est ainsi passé de 45,3 à 46,0 10⁶ km² de neige dans l’hémisphère nord (Figure 2). Par contre, pour le printemps on constate une diminution de 31,5 à 28,7

10⁶ km², une chute d’environ 9% (Figure 3).

Les données de l’Institut météorologique finlandais (FMI), présentées sur le site internet d’un organe de l’Organisation Météorologique Mondiale (**Global Cryosphere Watch**), révèlent également que la masse totale de neige pour l’hémisphère Nord a été constamment supérieure à la moyenne de 30 ans pendant la majeure partie de la saison 2020 et que son taux de croissance est en augmentation (Figure 4).

Conclusion : dire que la neige disparaît en automne ou en hiver à cause du réchauffement global est donc une contre-vérité. Cela peut être vrai au niveau local, mais pas pour l’ensemble de l’hémisphère nord. Concernant cet hémisphère, une diminution n’est visible que pour le printemps.

Pour un rappel des épisodes neigeux remarquables en Belgique cliquez [ici](#).

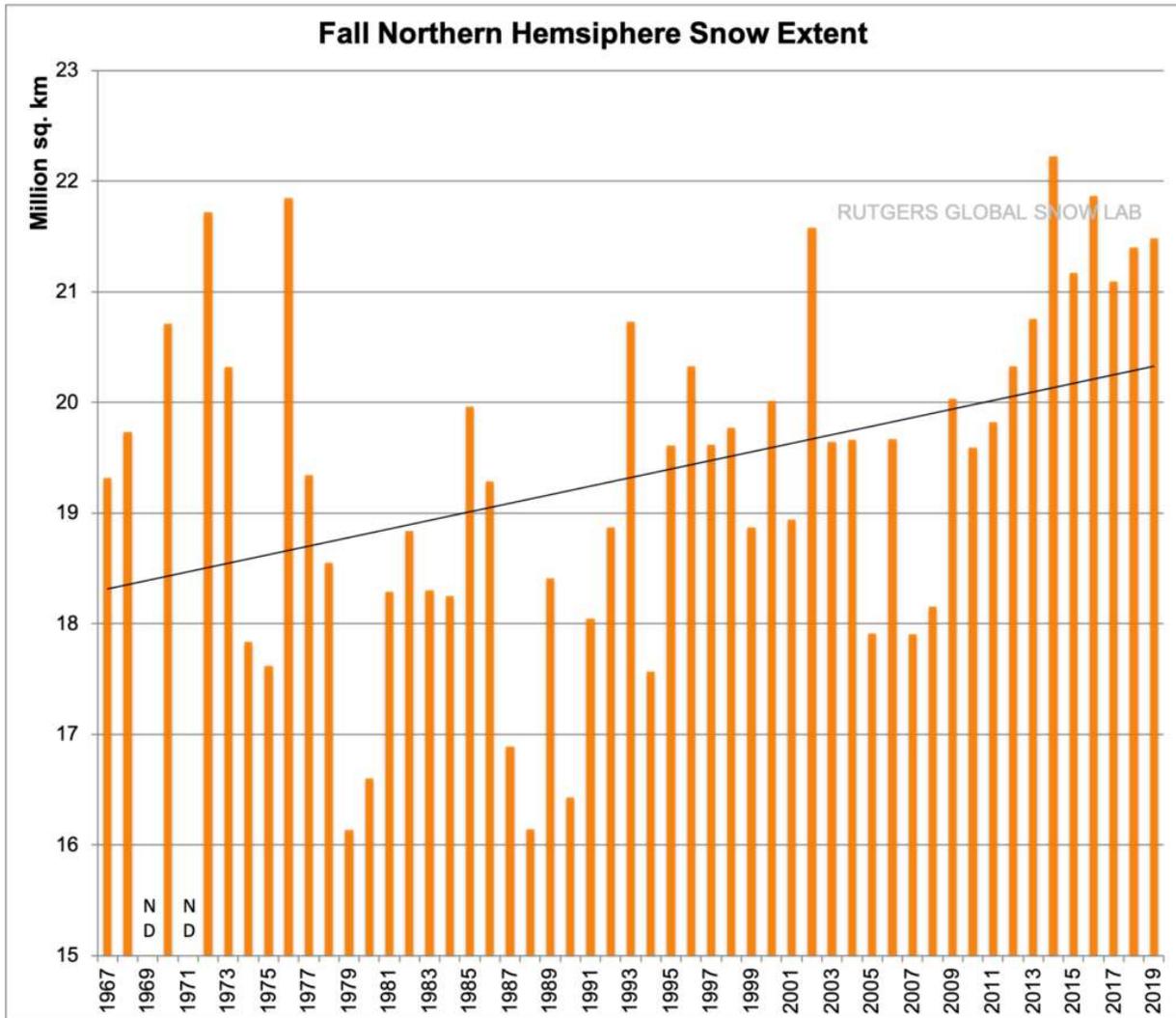


Figure 1. Couverture neigeuse en automne mesurée par satellite entre 1967 et 2019. Source: Global Snow Lab, Rutgers University, USA ([ici](#)).

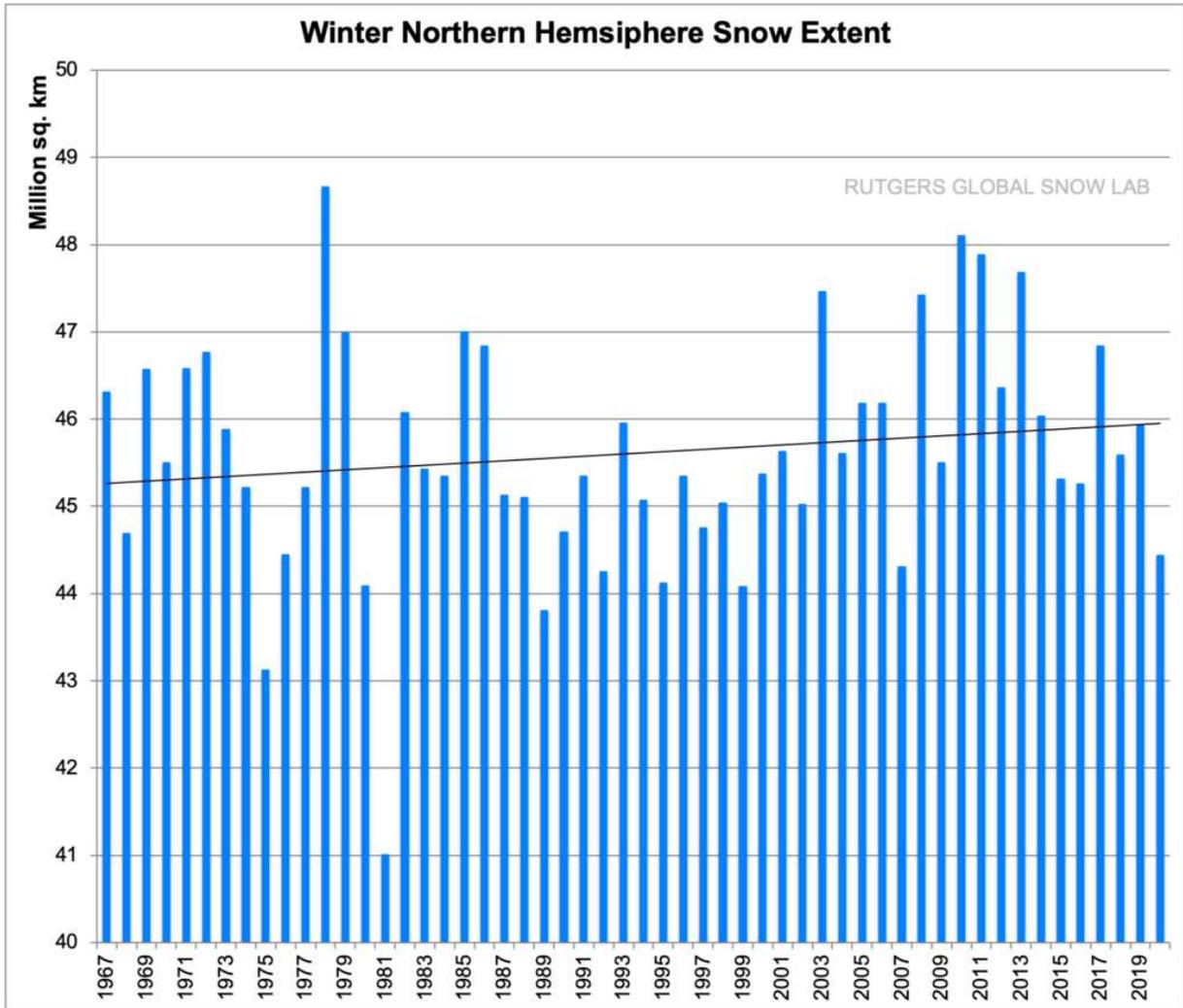


Figure 2. Couverture neigeuse en hiver mesurée par satellite entre 1967 et 2019. Source: Global Snow Lab, Rutgers University, USA (ici).

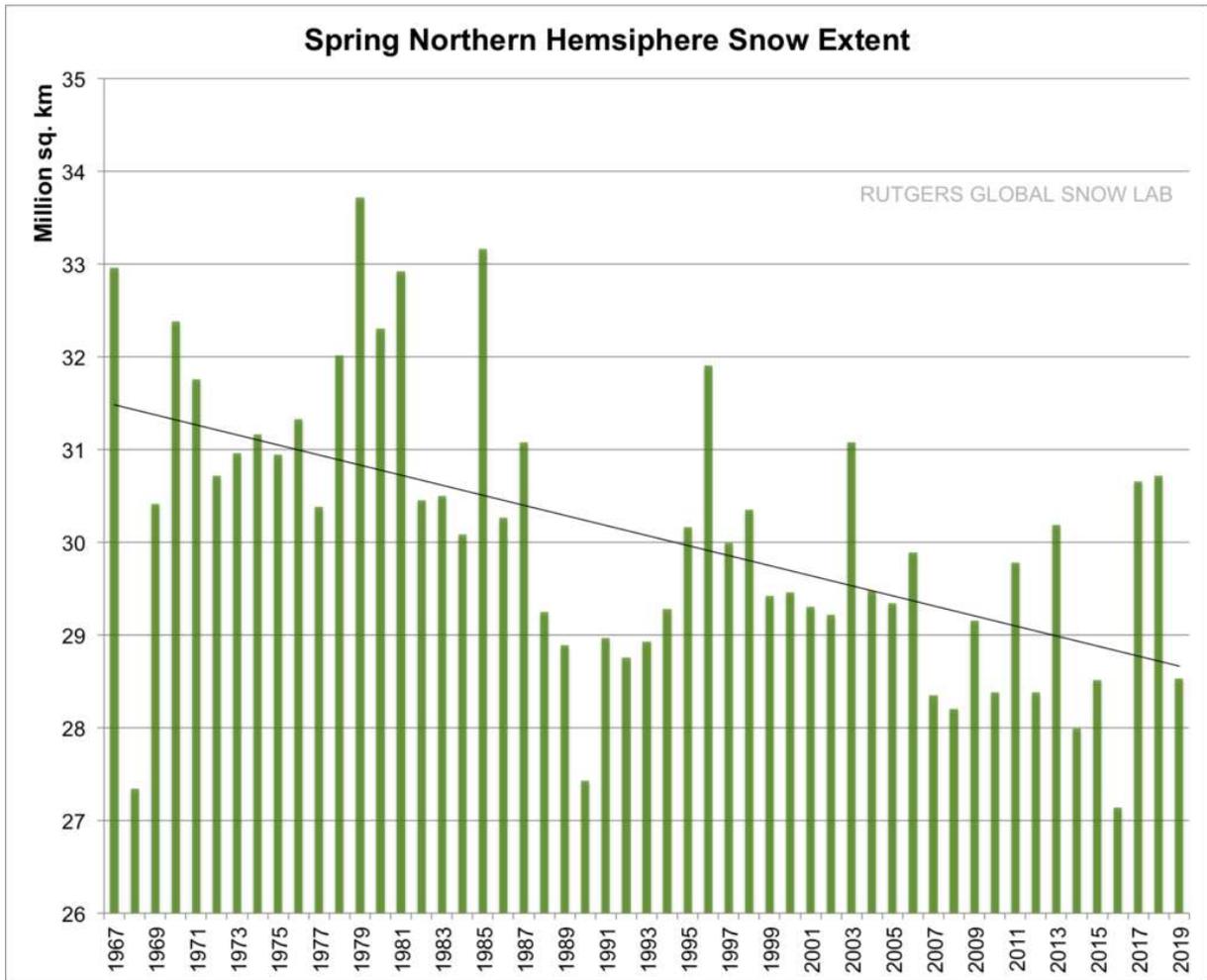


Figure 3. Couverture neigeuse **au printemps** mesurée par satellite entre 1967 et 2019. Source: Global Snow Lab, Rutgers University, USA ([ici](#)).

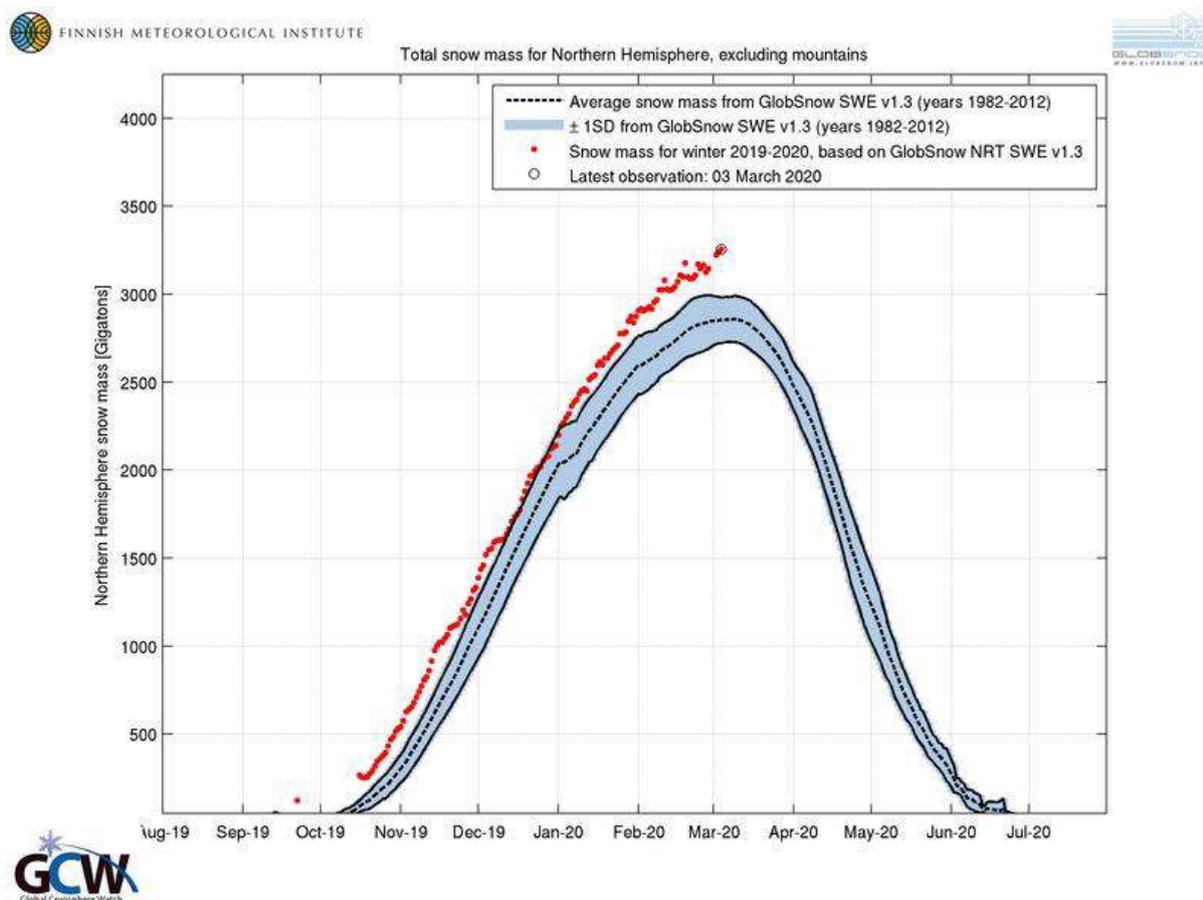


Figure 4. Masse de neige totale (gigatonnes) pour l'hémisphère nord (montagnes exclues) entre octobre 2019 et mars 2020 (points rouges). La moyenne sur 30 ans est indiquée par le trait pointillé noir (± 1 écart-type). Source : [ici](#).

9. L'Antarctique géologique (1/2)

Mis en ligne SCE : 24.04.2020

Cet article traite de l'évolution géologique de la plaque Antarctica, et fait suite aux trois récents articles publiés dans SCE par le Prof. Maurin sur la cryosphère actuelle ([1/3](#), [2/3](#), [3/3](#)).

9.1 Les glaces fascinent ...

Les glaces fascinent depuis longtemps les climatologues qui y voient un monde à part, aujourd'hui elles sont suivies 'à la loupe' car elles témoigneraient en tout ou en partie du processus de réchauffement actuel. Elles sont l'objet d'une attention médiatique constante. Pourtant elles furent souvent absentes de la Planète, elles apparurent plusieurs fois et disparurent autant de fois au cours de l'histoire géologique, le plus souvent suivant des modalités différentes à l'échelle temporelle et spatiale.

Il n'est pas possible ici de retracer la longue histoire des glaces qui commence au Précambrien, au moins à la transition Archéen et Protérozoïque (avec la glaciation [huronienne](#), il y a environ 2,4 Ga, pour l'échelle détaillée des temps géologiques voir [ici](#), et ci-dessous (Fig. 1) pour une version simplifiée) et se poursuit avec des aléas divers avec un recouvrement des glaces sur l'ensemble de la Planète à la fin du Néoproterozoïque, donc y compris dans la zone équatoriale, donnant lieu au

fameux '[Snowball Earth](#)' ou hypothèse de la Terre boule de neige ou encore 'Terre gelée' (glaciation [marinoenne](#) qui a fait suite à la -ou les ? glaciation(s) [sturtienne](#)(s)- il y a 635 Ma. Ensuite viendra la glaciation [Gaskiers](#) vers 580 Ma, c'est-à-dire vers la fin du Précambrien. Cet épisode marinoen d'englacement généralisé perdura plus d'une dizaine de millions d'années avec des calottes de glace sur l'équateur ([ici](#)) et est à l'origine du nom de l'avant-dernière période du Précambrien, à savoir le [Cryogénien](#) (partie supérieure du Protérozoïque entre 850 Ma et 635 Ma, cf. Fig. 1). **Entre ces deux grandes glaciations précambriennes (celles de l'huronien et du marinoen), soit sur un peu plus de 1,5 Ga aucune autre glaciation n'a encore été rapportée, ce qui supposerait que pendant cet intervalle de temps le climat s'est maintenu dans des conditions plutôt chaudes, avec une régulation thermique 'sans faille'** (Ramstein, 2015). Notons également pour être complet la présence de glaciers locaux à 2,9 Ga dans l'Archéen d'Afrique du Sud (glaciation 'pongolienne') ([ici](#)).

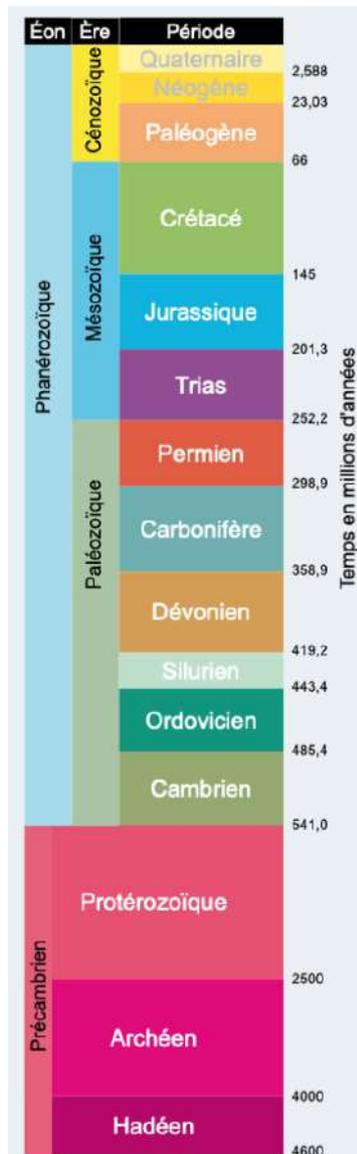


Fig. 1 : Echelle chronostratigraphique simplifiée (source [ici](#)). Pour la version détaillée se reporter au site officiel ([ici](#)).

Le 'Snowball Earth' serait-il simplement une hypothèse ? Peut-être ... car tout n'est pas absolument clair quant à la distribution exacte des [inlandsis](#) par rapport à des glaciers de montagnes liés aux élévations tectoniques de grande ampleur accompagnant sur des dizaines de millions d'années la formation d'un nouveau supercontinent de 650 à 530 Ma, le Gondwanaland (voir ci-dessous

et [Veevers, 2004](#)). Cependant en cette fin de Précambrien cette période glaciaire fut sans doute la plus importante qu'ait connue la Terre. Ensuite deux grandes glaciations, la première nommée *hirnantienne* à l'Ordovicien ([ici](#) et [Finlay et al., 2010](#)), avec par exemple une gigantesque calotte glaciaire recouvrant le Sahara ([ici](#)), et la seconde, sans doute la plus connue, celle du Permo-Carbonifère ([ici](#) et [Scheffer et al., 2003](#)) constituèrent également des événements glaciaires de grande ampleur au Paléozoïque.

L'ensemble de ces glaciations majeures s'inscrit dans une succession de variations climatiques d'intensité et d'échelle temporelles variables, d'épisodes plus froids ou « frais » et plus chauds ou arides (exemple du Dévonien et du Permien). Le monde mésozoïque qui succède est un monde plus chaud ([Holz, 2015](#)), sans glaciation de grande importance, avec des océans également plus chauds, caractérisés de nombreux événements hyperthermiques (Bender, 2013 ; [Sames et al. 2016](#)), et ce n'est qu'au Tertiaire (ou Cénozoïque) que la Planète deviendra plus froide (malgré plusieurs interruptions d'événements hyperthermiques ([ici](#)), par exemple au Pliocène moyen) et que la Terre renouera avec des glaciations sur les pôles.

Cette histoire fortement résumée est connue avec nombre de détails basés sur l'étude de *proxies* très divers et souvent complémentaires (paléomagnétisme, gravimétrie, géochimie et stratigraphie isotopiques, géochimie des éléments en traces, paléogéographie, (micro)paléontologie, minéralogie -par exemple des argiles-, susceptibilité magnétique, décharges détritiques et blocs erratiques ... radiométrie absolue, etc. **Une conclusion s'impose : les variations climatiques sont la règle et agissent suivant des *modus operandi* très différents. La teneur en CO₂ ne semble pas un paramètre déterminant dans le développement de ces épisodes glaciaires, par contre les paramètres liés aux forçages de Milankovitch sont très souvent invoqués '(ici) même s'ils ne sont pas toujours à même d'expliquer ces épisodes (cas de la glaciation hirnantienne, par exemple).**

En comparant l'ensemble de ces glaciations, celles du Précambrien semblent avoir été globales, celles du Phanérozoïque (à partir de 541 Ma) furent restreintes aux hautes latitudes uniquement de l'hémisphère sud à la fin de l'Ordovicien et au Carbonifère-Permien, également au Cénozoïque, en Antarctique à partir de l'Oligocène, puis dans les deux hémisphères à la fin du Miocène (Deconinck, 2017).

9.2 D'où vient le craton Antarctique ?

En premier lieu rappelons que l'Antarctique est l'une des nombreuses petites plaques rigides de la croûte terrestre. Elle résulte de la fragmentation de plus grandes plaques qui ont formé à plusieurs reprises des supercontinents (ou 'pangées', [ici](#)), systématiquement disloqués suivant les processus mis en évidence par la tectonique des plaques. Ces plaques, ou microplaques, ou encore [cratons](#) (ou 'aires cratonisées') peuvent être vues comme les éléments d'un puzzle changeant au gré des dizaines et centaines de millions d'années. Une fois la plaque suffisamment grande, c'est-à-dire stabilisée, elle devient relativement peu déformable et reconnaissable dans les différents cycles tectoniques.

Mentionnons les grandes lignes qui ont mené à la situation actuelle de la disposition des continents à travers la tectonique des plaques, et en particulier l'histoire de l'Antarctique. Les trois premiers grands cratons bien identifiés datent d'environ 2,5 Ga à 2,0 Ga et ont pour noms : Arctica, Atlantica et Ur. Ils constitueront les noyaux de plus grands cratons qui s'édifieront par la suite autour d'eux lors des futures phases de la tectonique des plaques, fonctionnant par accolements successifs d'aires continentales appelées '[terranes](#)' (Fig. 2 ci-dessous, également Howell, 1995).

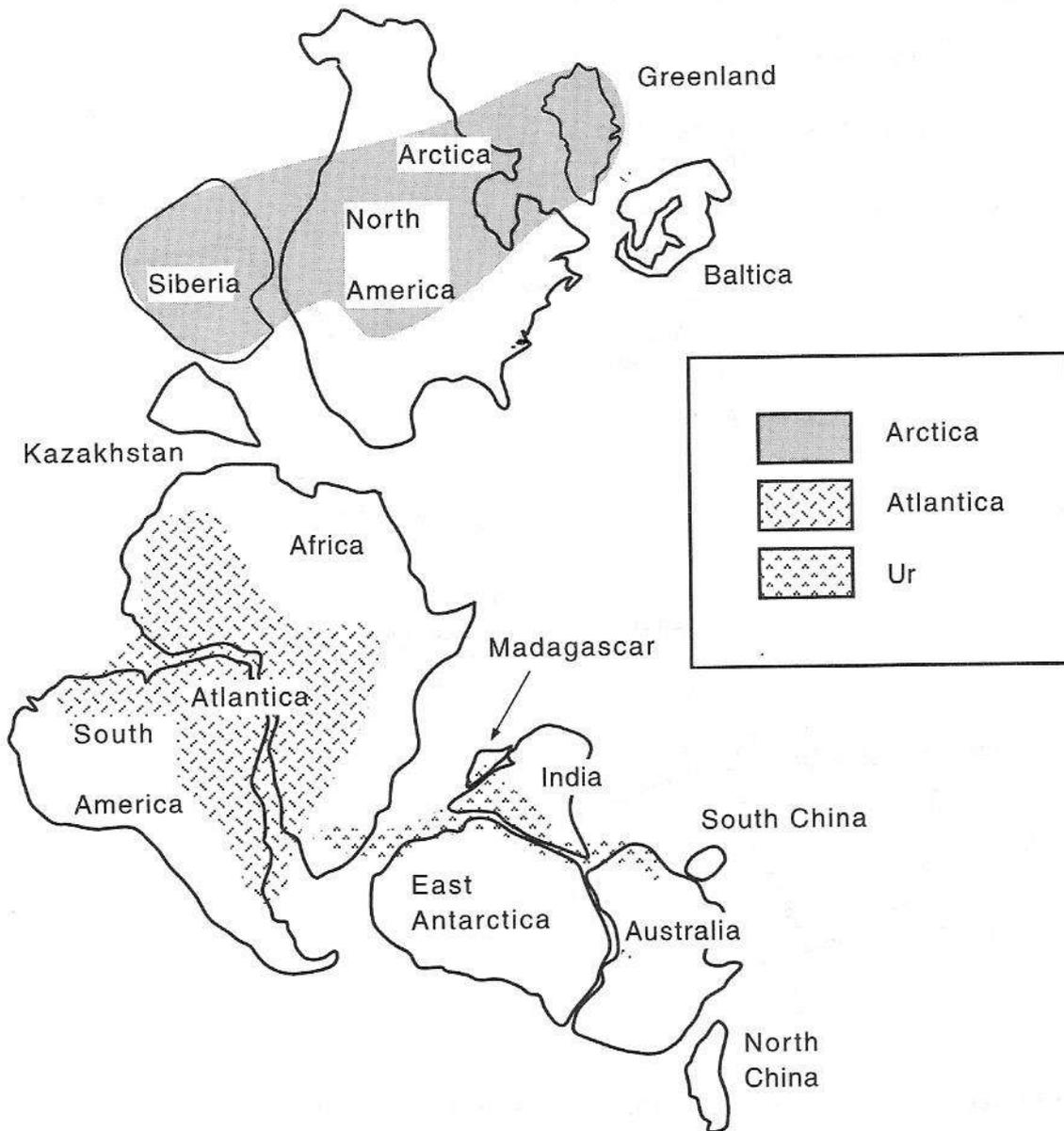


Fig. 2 : Configuration de la 'Paléopangée' d'il y a 1,1 Ga, proposée par Piper (2001) incluant les trois plus vieux assemblages continentaux (Arctica : 2,5 Ga ; Atlantica : 2,0 Ga ; Ur : 3,0 Ga). Nb: le terme 'Paléopangée' est utilisé par Piper (2001) pour rappeler la forme courbée N-S de l'assemblage des continents constituant la Pangée permo-triasique sensu stricto (voir Fig. 6). En réalité le supercontinent illustré a pour nom Rodinia (voir [ici](#) et Fig. 4). In Rogers & Santosh, 2004. Les 'vieux' cratons sont entourés de nouvelles zones cratonisées (parties blanches sur la figure constitués de 'terrane' de provenance et d'âge divers) par accolements successifs.

Suite à la valse des continents ([ici](#)), un supercontinent ou grand bloc cohérent appelé Nena, pour Northern Europe North America (d'autres noms existent, le plus célèbre étant [Columbia](#)) se forme à 1,8 Ga et révèle clairement à ce stade l'aire cratonique de l'Antarctique (Fig. 3).

LES GLACES

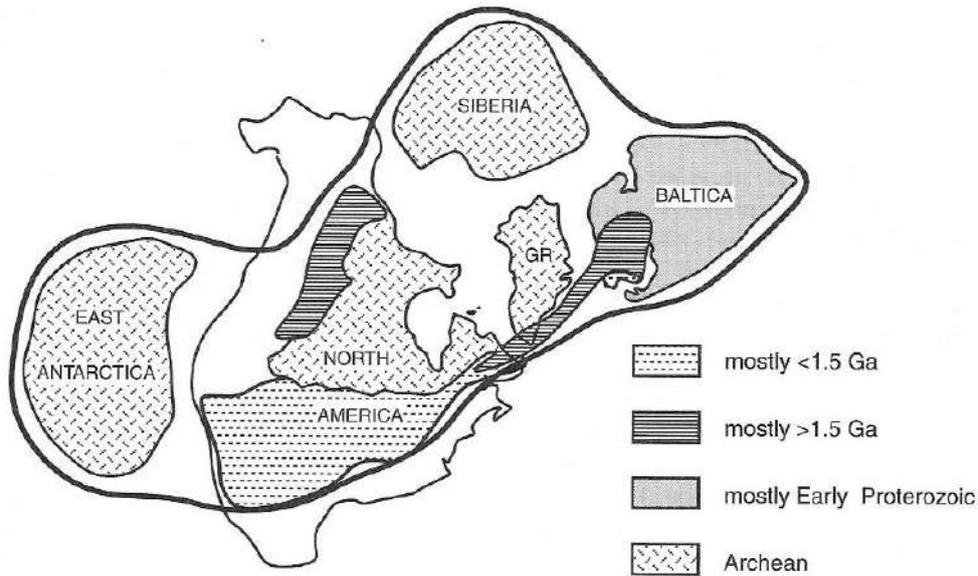


Fig. 3 : Bloc ou 'supercontinent Nena' (= Columbia) formé il y a 1,8 Ga suite à la suture de zones mobiles (subduction) des cratons East Antarctica, North America, Greenland (=GR), Baltica et Siberia. In Rogers & Santosh, 2004.

Ce supercontinent Nena se fragmente ensuite (par ripping) et donnera une série de blocs qui sont de fait séparés par de nouveaux océans, ensuite il y a rassemblement par subduction et formation d'un nouveau supercontinent Rodinia, avec les pièces du futur continent antarctique disséminées dans les latitudes nord à proximité du craton australien (30° N, cf. Rodinia vers 1,1 Ga, Fig. 3).

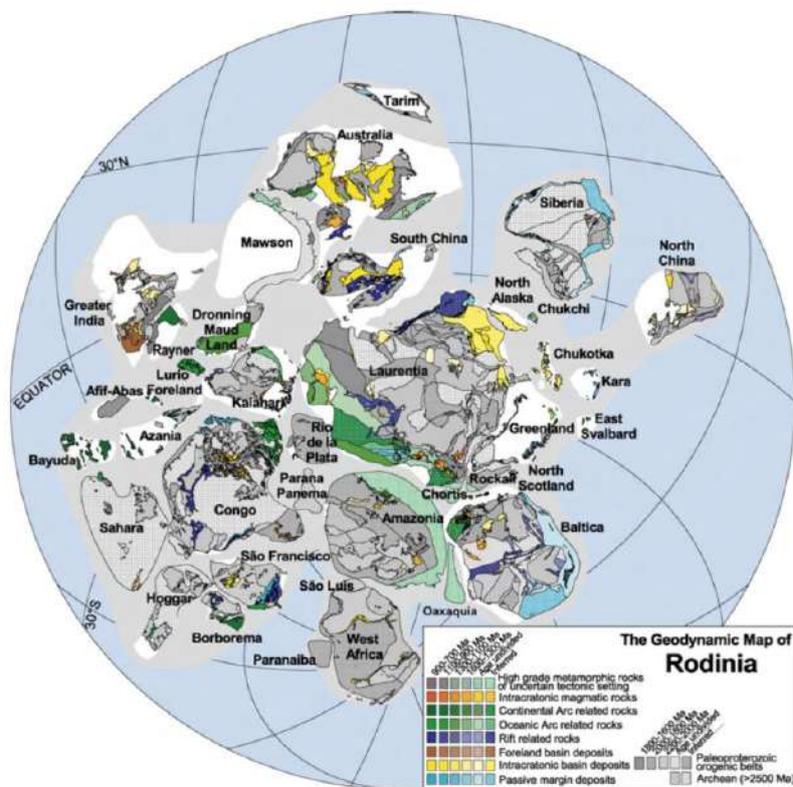


Fig. 4 : Carte simplifiée de la distribution des aires cratoniques et principaux événements géodynamiques dans le supercontinent Rodinia, vers 1,1 Ga. D'après Li et al. 2008. Cet article donne l'évolution des aires cratoniques ou des 'pièces du puzzle' à travers une succession des temps géologiques en 12 étapes depuis 1,1 Ga (Rodinia) jusqu'à 0,53 Ga (Gondwanaland), c'est-à-dire d'un supercontinent au suivant. On reconnaît déjà à ce stade (Rodinia) des éléments du craton Antarctica (Mawson, Dronning Maud Land, Rayner) en position septentrionale.

Rodinia est ensuite fragmenté, et un nouveau supercontinent se formera, le Gondwanaland vers 650-530 Ma, avec en position méridionale *East Antarctica* (Fig. 5). L'Antarctique a migré en à peu près 500 millions d'années des latitudes nord aux hautes latitudes sud (se reporter à *Li et al. 2008* pour la tranche 530 Ma).

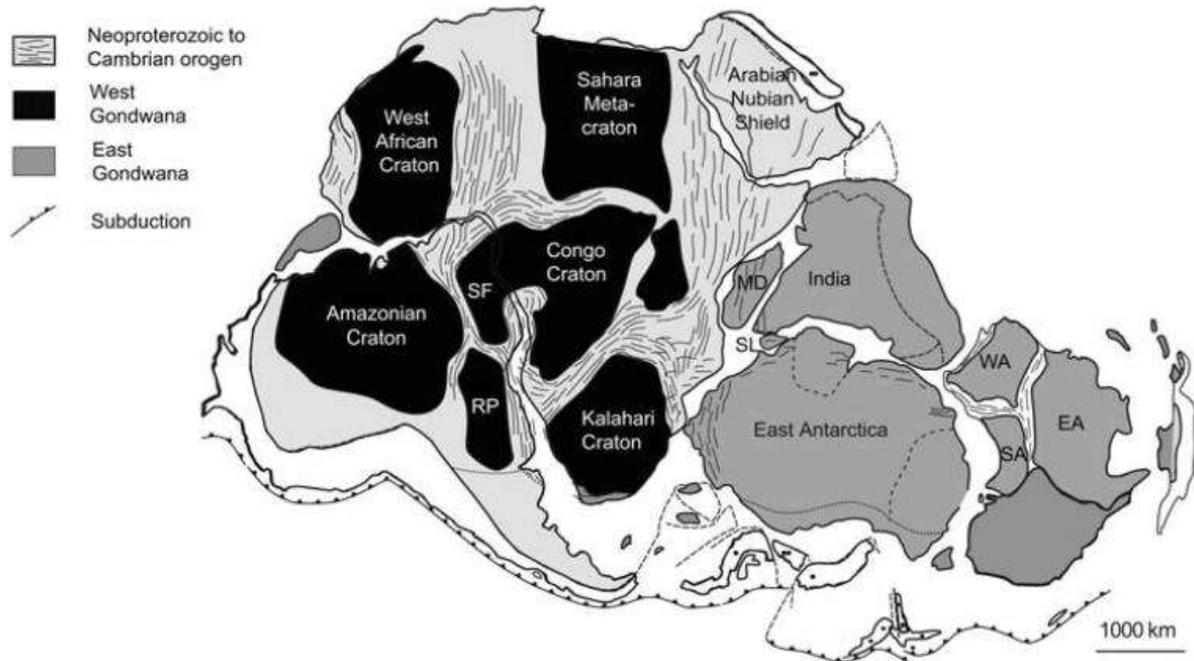


Fig. 5 : Supercontinent du Gondwanaland vers 650-550/530 Ma (à la fin du Néoprotérozoïque) montrant les régions cratoniques entourées de zones mobiles (lignes grisées plus ou moins parallèles) qui finiront par donner des chaînes de montagnes par subduction. Abréviations : SL, Sri Lanka ; MD, Madagascar ; WA, Western Australia ; EA, Eastern Australia ; SA, Southern Australia ; SF, Sao Francisco ; RP, Rio de la Plata. In Satish-Kumar et al. 2020.

Nb : la plupart des grands cratons 'sud' sont ensembles ou 'soudés' durant presque tout le Précambrien, cela changera avec la dislocation de la Pangée permo-triasique. La situation actuelle est de ce point de vue atypique avec un éclatement des cratons 'sud' face à un grand ensemble, la plaque eurasiatique. Lors de la formation de la Pangée permo-triasique tous les cratons 'sud' sont encore soudés (Fig. 6), et cet ensemble correspond au Gondwana sensu stricto. Le Gondwanaland se trouve dans les latitudes sud à la fin du Précambrien (Fig. 5).

L'histoire se poursuit..... et le supercontinent du Gondwanaland subit la même évolution que ses prédécesseurs (à savoir dispersion en blocs par rifting, ensuite rassemblement avec agencement différent de celui du départ) pour finalement arriver vers 300-250 Ma à la Pangée permo-triasique (Fig. 6), qui est le supercontinent le plus connu des non-géologues, et fut pressenti par Wegener (voir [ici](#) les grandes lignes de cette 'saga' des continents). Il faut attirer l'attention sur un risque de confusion lié au vocabulaire : la géologie s'étant édifiée en dehors de tout concept de théorie de la tectonique des plaques, des noms semblables ont été attribués à des ensembles différents et inversement. C'est le cas pour Gondwanaland et Gondwana, encore aujourd'hui la confusion est de mise. **Sans entrer dans le détail historique, retenons que le Gondwanaland est le supercontinent de la fin du Néoprotérozoïque et le Gondwana est l'ensemble qui regroupe les cratons de l'hémisphère sud (presque tous hérités du Gondwanaland) à la transition Paléozoïque-Mésozoïque ou permo-triasique. Il y a donc une durée d'un peu plus de 300 Ma entre leurs existences.**

L'ensemble de cette histoire complexe, qui débute il y a presque 3 Ga, est bien connue des géologues, elle s'inscrit dans le cadre de la tectonique des plaques qui fonctionne à peu près comme aujourd'hui depuis environ 2,9 Ga avec un premier supercontinent néoarchéen ([ici](#)).

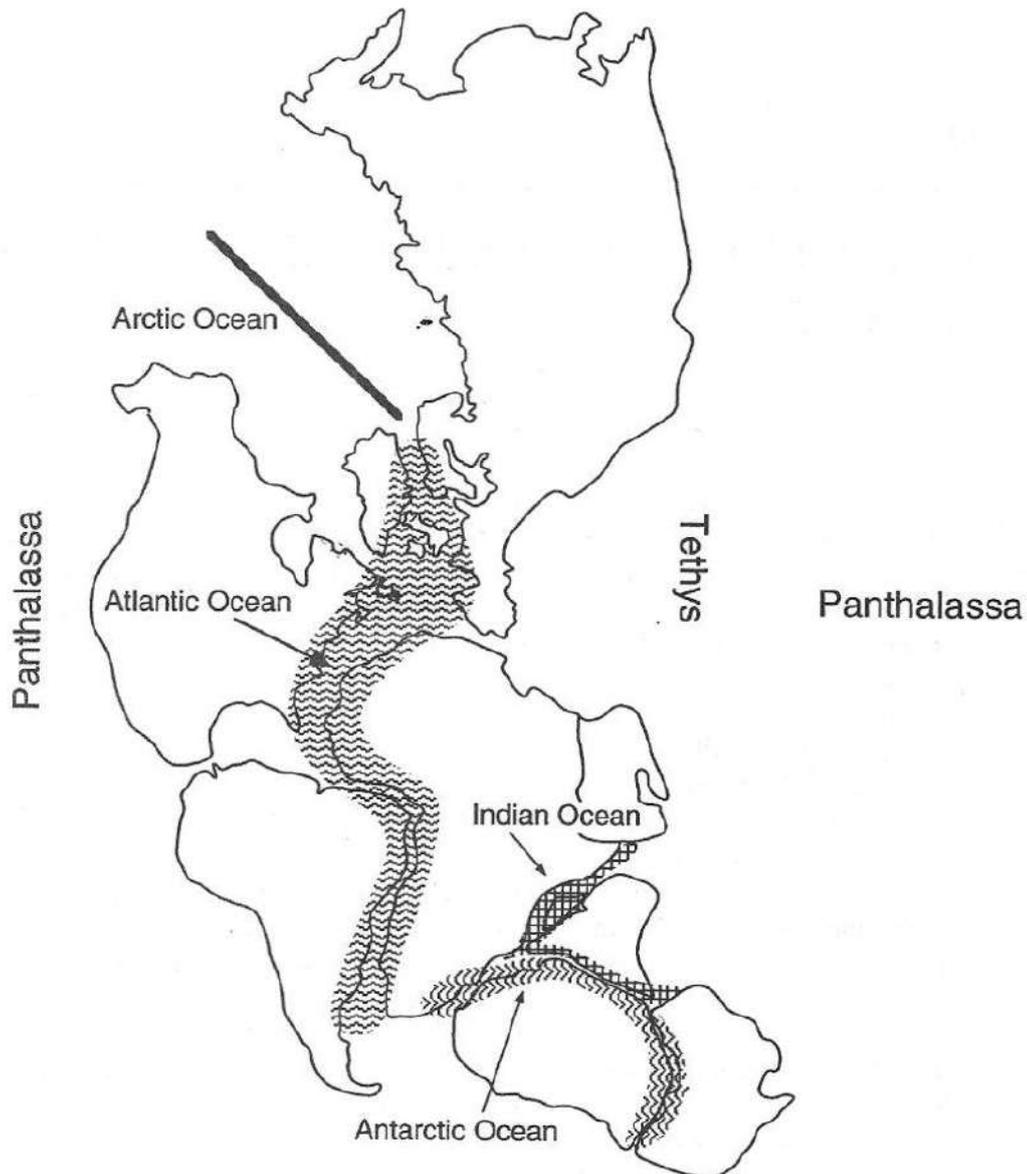


Fig. 6 : Pangée permo-triasique (chère à Wegener) formée vers 250 Ma entourée d'océans (Panthalassa sensu lato) avec formation de nouveaux océans (arctique, atlantique, antarctique, indien) suite à la fragmentation ou dislocation et dérive des continents entamée dès le Jurassique. A partir de cette période, l'Antarctique se déplacera toujours vers le Sud, comme ce fut souvent le cas auparavant. In Rogers & Santosh, 2004. Pour une carte de la Pangée avec les frontières modernes [cliquez ici](#).

La Pangée (Fig. 6) poursuit le processus de la 'valse des continents' et se disloque au Jurassique (à partir de 175 Ma). L'histoire récente (à l'échelle géologique) de l'Antarctique commence précisément à partir de phases extensives de rifting (= marges divergentes) devenant soutenues dès le début du Crétacé moyen avec importants épisodes intrusifs andéens : les terrains anciennement soudés (à travers les orogénèses antérieures) et formant à cette époque le craton antarctique, se disloquent parallèlement aux Monts Transantarctiques, s'étendant aujourd'hui sur 3200 km de long du cap Adare (extrémité nord de la terre Victoria) sur les côtes les plus australes du Pacifique à la terre de Coats, du côté atlantique (voir aussi plus loin Fig. 9) avec un amincissement de la croûte provoquant l'affaissement du rift sous le niveau de la mer. **Les 'pièces du puzzle' (Antarctique, Amérique du Sud, Afrique, Madagascar, Inde) vont progressivement se détacher de la Pangée dès le Jurassique, les deux dernières pièces (Nouvelle Zélande et Australie) s'en vont à la fin du Crétacé laissant seule la dernière pièce du Gondwana méridional, à savoir l'Antarctique (Fig. 7).**

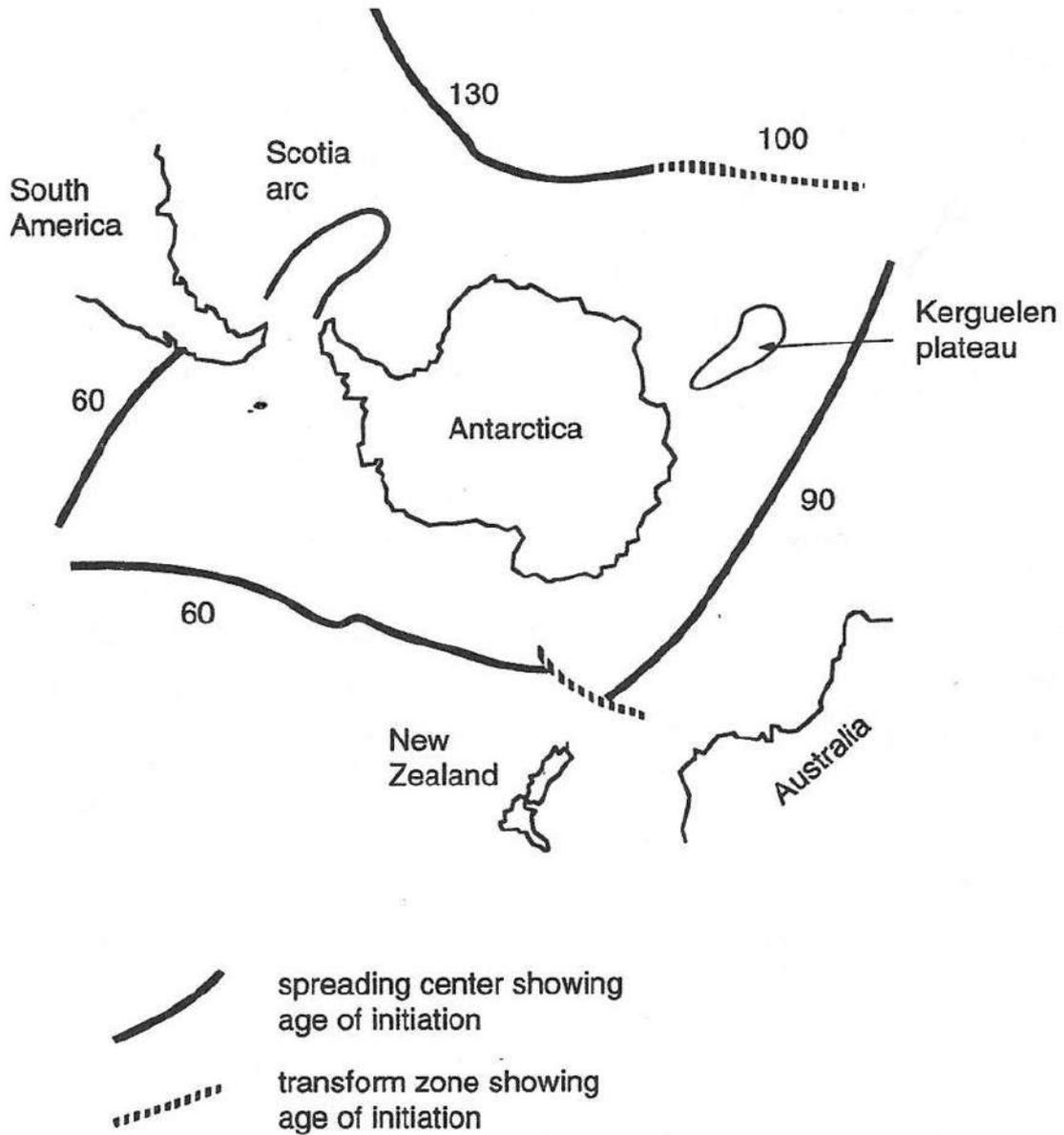


Fig. 7 : Ouverture de l'océan antarctique (sud). Les âges de divergence (dérive) sont notés en millions d'années le long des rides ou dorsales. D'après Rogers and Santosh, 2004. La séparation la plus récente (non reprise dans la figure) concerne l'Amérique du Sud et la péninsule antarctique vers 25 millions d'années, en même temps que se forme l'arc de la microplaque Scotia à partir de la lithosphère océanique.

Toutes ces pièces sont constituées de terrains ou formations géologiques d'origine commune (l'hémisphère sud du Gondwana), ils contiennent par exemple les mêmes faunes (exemple des [Lystrosaurus](#)) et flores (exemple des [Glossopteris](#)), ce qui n'échappa pas à Alfred Wegener, père de la dérive des continents préfigurant la théorie de la tectonique des plaques (Fig. 8).

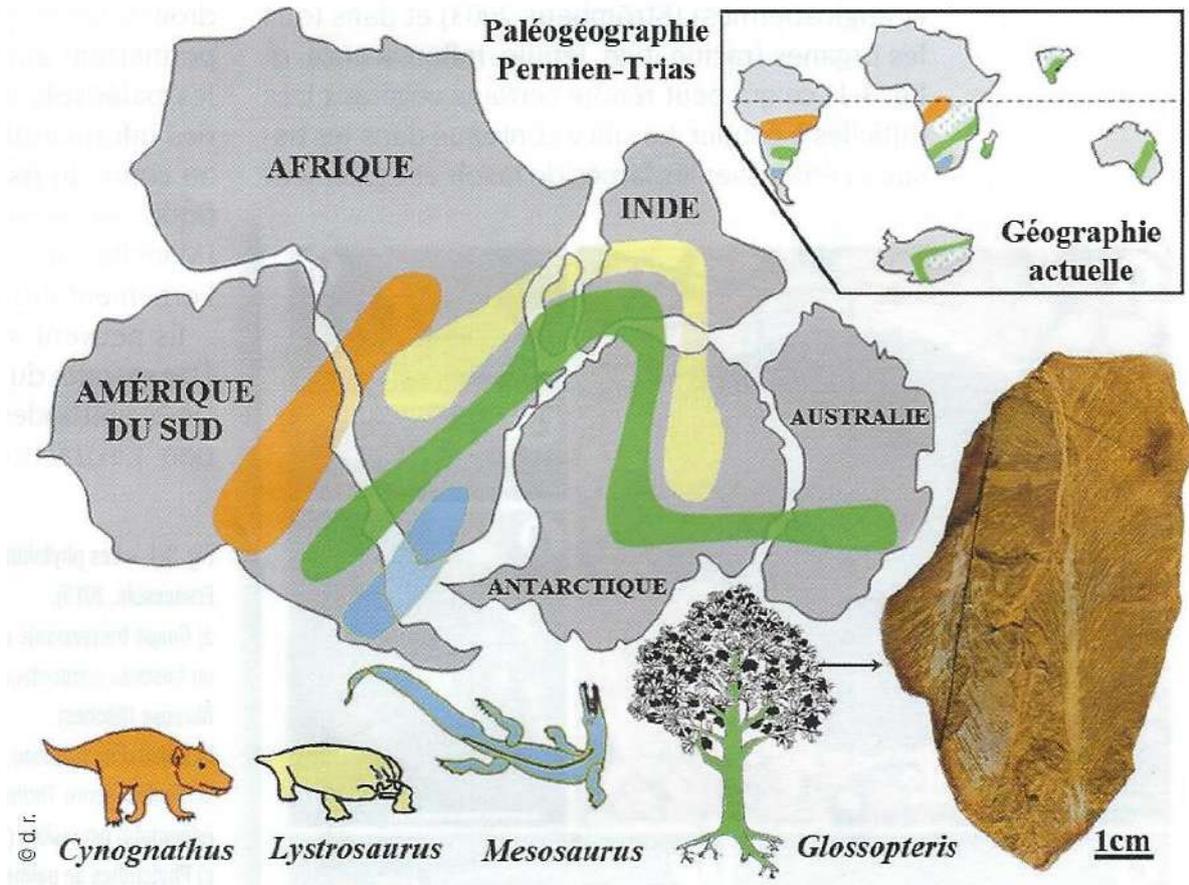


Fig. 8 : Distribution de fossiles sur les continents actuels (en haut à droite dans l'encart) et ces mêmes fossiles dans le Gondwana du permotrias. D'après Broutin (2015). Cette comparaison dans la distribution des fossiles fut une des clés qui mena au concept de dérive des continents. Ensuite les minéralisations, la géochimie ... et bien d'autres 'proxies' confirmèrent ce concept, jusqu'à l'avènement de la tectonique des plaques démontrée par les données paléomagnétiques au niveau des rides médio-océaniques (fin des années 1960').

L'histoire géologique de l'Antarctique occidentale (*West Antarctica*) est fort complexe, elle commence au Mésoprotérozoïque avec Rodinia (à environ 1,1 Ga) et vient d'être présentée de manière fort détaillée dans un excellent article de [Jordan et al. \(2020\)](#) précisant le rôle des marges passives (étirements, divergentes) ou actives (convergentes, subduction) et apports magmatiques dans des bassins d'arrière-arcs avec rifting, dans sa formation.

- Dans ce contexte et à grande échelle, l'Antarctique occidentale s'est développé le long de la bordure de Gondwana entre la plaque océanique paléopacifique et l'aire cratonique continentale de l'Antarctique orientale. La péninsule Antarctique correspond à un arc magmatique de la marge continentale, qui a surtout fonctionné entre 90 Ma et 20 Ma. La péninsule prolonge les Andes du Pacifique Sud et porte d'ailleurs des dépôts de cuivre de même type (voir l'addendum 'L'Antarctique géologique 2/2').

Notons que l'histoire géologique de l'Antarctique orientale, séparé de l'Antarctique occidentale par les Monts Transantarctiques (s'étendant sur près de 3500 km), est beaucoup plus ancienne, débutant à l'Archéen.

Le résultat de l'amincissement de la croûte continentale au niveau du rift fut l'envahissement de la zone par les eaux océaniques et la formation de la Mer de Ross (Fig. 9). La formation des Monts Transantarctiques reste encore aujourd'hui assez complexe à interpréter car ils résultent de

processus convergents ([van Wijk et al. 2008](#)) dans une situation générale d'extension (cas fréquent en géologie). Sans entrer dans le détail, ils correspondraient à un épaississement (entraînant un soulèvement) de la croûte adjacente au rift du côté de l'Antarctique occidental. Durant cet épisode les *ice sheets* (calottes glaciaires) disparaissent et des sédiments océaniques aussi jeunes que ceux du Pléistocène moyen remplissent le rift. Ces Monts constituent ce que l'on appelle communément un 'épaule de rift' (tout comme la Forêt Noire et les Vosges de part de d'autre du graben ou rift du Rhin qui s'est créé à l'Eocène).

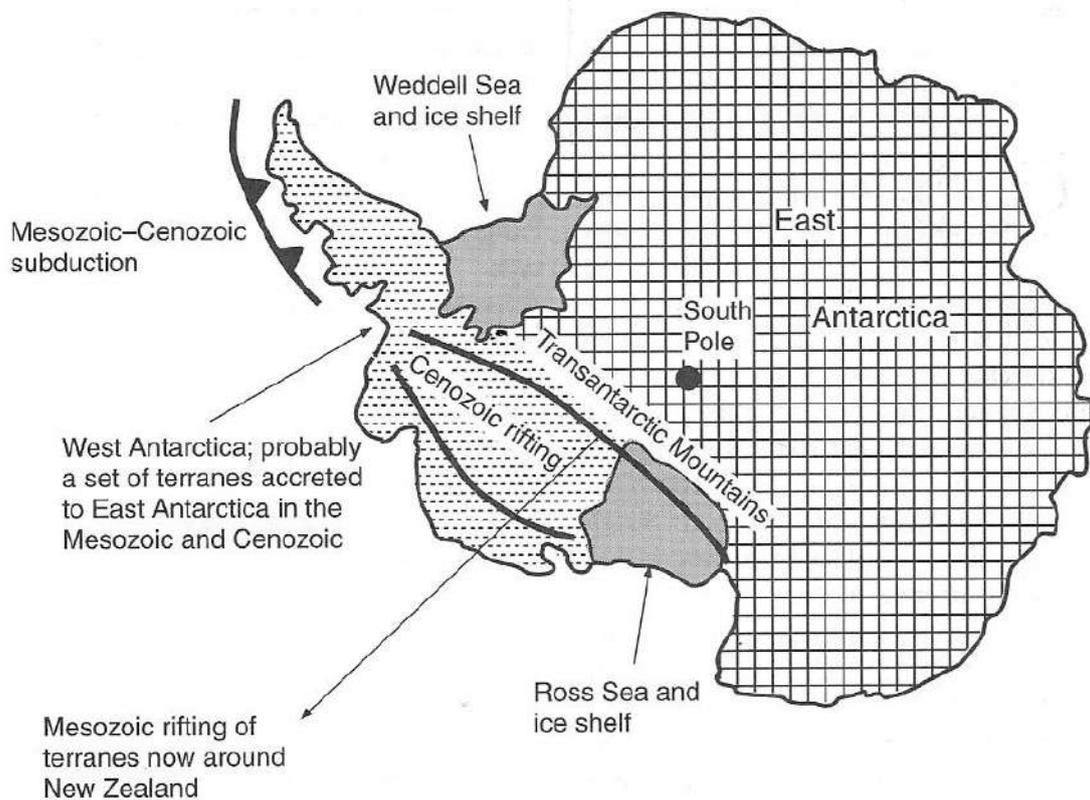


Fig. 9 : Principaux traits tectoniques structuraux méso- et cénozoïques de l'Antarctique montrant la complexité géologique de l'Antarctique occidentale formé de l'accrétion de terranes (voir explications dans le texte). La croûte du Pacifique est entrée plusieurs fois en collision avec le 'paléo'Antarctique, aujourd'hui délimité par les Monts Transantarctiques. In Rogers & Santosh, 2004.

La Figure 9 montre que l'Antarctique comprend deux parties, l'Antarctique occidentale et l'Antarctique orientale, séparées par les Monts Transantarctiques s'appuyant sur les mers de Weddell et de Ross. L'ensemble est couvert aujourd'hui à 98% par des *ice sheets* ou calottes glaciaires, Fig. 10).

- Les Monts Transantarctiques sont entrecoupés de nombreux glaciers en provenance de la calotte de l'Antarctique orientale. La formation de cette chaîne de montagnes qui culmine à 4528 mètres d'altitude (avec 20 sommets à plus de 4000 m) n'est pas encore complètement résolue, elle résulte d'une association entre rift et subduction, c'est-à-dire entre processus extensifs et compressifs entre une plaque antarctique ancienne et le bouclier de l'Antarctique orientale. Le relief actuel est dû à une surrection atteignant son paroxysme à l'Eocène.

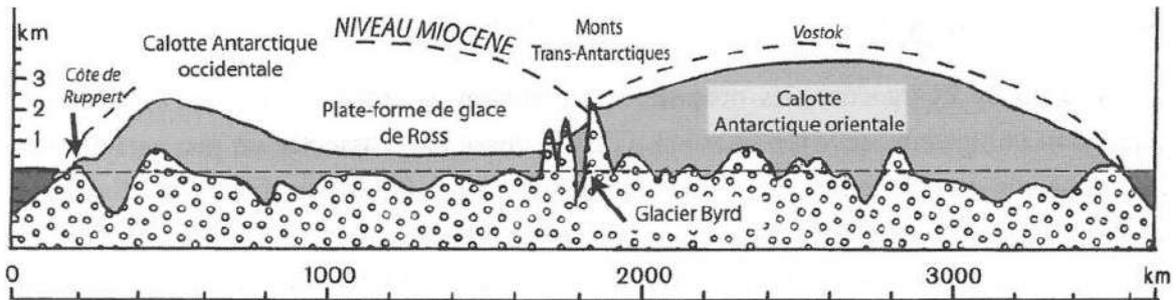


Fig. 10 : Profil actuel et miocène de la calotte antarctique (modifié de Campbell and Claridge, in Van Vliet-Lanoë, 2013). Le subsaisement montagneux avec les Monts Transantarctiques sont figurés en blanc avec les petits cercles, en gris, les calottes et la plate-forme de glace. L'Antarctique est composé de deux calottes distinctes, à l'est et à l'ouest, séparées par la chaîne des montagnes transantarctiques. Une grande partie de la calotte occidentale se situe sous le niveau de la mer et s'étend localement sur la mer pour former des «ice-shelves» ou plates-formes de glaces flottantes de grandes étendues et épaisseurs, particulièrement dans les mers de Wedell ou de Ross (Fig. 9). La calotte orientale repose principalement sur le substratum rocheux et atteint plus de 4 km d'épaisseur (par endroits jusqu'à 5 km) dans sa partie centrale et forme un plateau de très large extension. La calotte couvre une surface d'environ 14 millions de km², la plus grande partie de la glace permanente étant le fait de la calotte orientale. Reposant en grande partie sous le niveau de la mer la calotte glaciaire ouest est instable à la différence de la calotte glaciaire orientale. La péninsule se trouve en dehors des calottes et abrite principalement des glaciers de type alpin et des champs de glace importants. Notons que de nombreux lacs se trouvent également à la base de la calotte glaciaire.

- L'Antarctique oriental, actuellement séparé de 100 à 300 km de l'Antarctique occidental par les Monts Transantarctiques, s'est déplacé vers le sud au cours du dernier milliard d'années, des latitudes tropicales (cf. sa position dans Rodinia, Fig. 4) jusqu'à sa position actuelle. Ce craton ou plaque est de grande extension (10,2 millions de km²) et résulte de l'assemblage dès la fin du Précambrien de trois zones distinctes formées au Mésoprotérozoïque (appelées Provinces de Wilkes -1330-1130 Ma, de Maud -1090-1030 Ma, et de Rayner -990-900 Ma). Ce craton comprenant également des roches archéennes s'est stabilisé pour la première fois avant 1,6 Ga et devient identifiable en tant que tel lors de la formation du supercontinent [Rodinia](#) vers 1,1 Ga (cf. Mauser, Dronning Maud Land..., Fig. 4). L'Antarctique oriental se forme ainsi par amalgames (= 'soudures tectoniques' suite à des mouvements convergents de type subduction) autour de 1,1 Ga (exactement de 1,3 Ga à 0,9 Ga) ([Satish-Kumar et al. 2020](#)). L'Antarctique oriental est un bloc géologiquement hétérogène mais est stable ([Wannamaker et al. 2017](#)), ce qui permet ensuite de le suivre dans l'évolution de la 'valse des continents'. Sa structure interne est connue par la géophysique (analyses satellitaires par aéromagnétisme et du domaine marin, également par sismique) couplée à la géologie de terrain et à la géochimie.

L'englacement de l'Antarctique a lieu il y a 34 Ma (Eocène/Oligocène) suite à l'ouverture du passage de Drake ([Livermore et al. 2005](#) ; [Livermore et al. 2007](#)) qui sépare l'Antarctique (péninsule) de l'Amérique du Sud (Andes) (Fig. 11) et le passage Tasmanie ([Dingle et Lavelle 1998](#) ; [Scher et al. 2015](#)) séparant l'Australie et l'Antarctique à la même période. Ce furent les géophysiciens [Pitman et Heirtzler \(1966\)](#) qui furent les premiers à reconnaître la plaque antarctique délimitée par les anomalies magnétiques en bandes linéaires de part et d'autre de la dorsale ou ride Pacifique-Antarctique : en examinant la succession des polarités du champ magnétique ils calculèrent (facilement) un taux d'expansion de 4,5 cm par an, pour les 10 derniers millions d'années. Cette première étude en initia d'autres. Celles-ci, sur base de la rotation des fragments de continents du Gondwana par rapport au paléopôle magnétique de chaque époque considérée, montrèrent que la plaque antarctique se déplaça toujours vers le sud et les autres généralement vers le nord au cours des 200 derniers millions d'années (Frakes and Crowell, 1971 in Fogg, 1992).

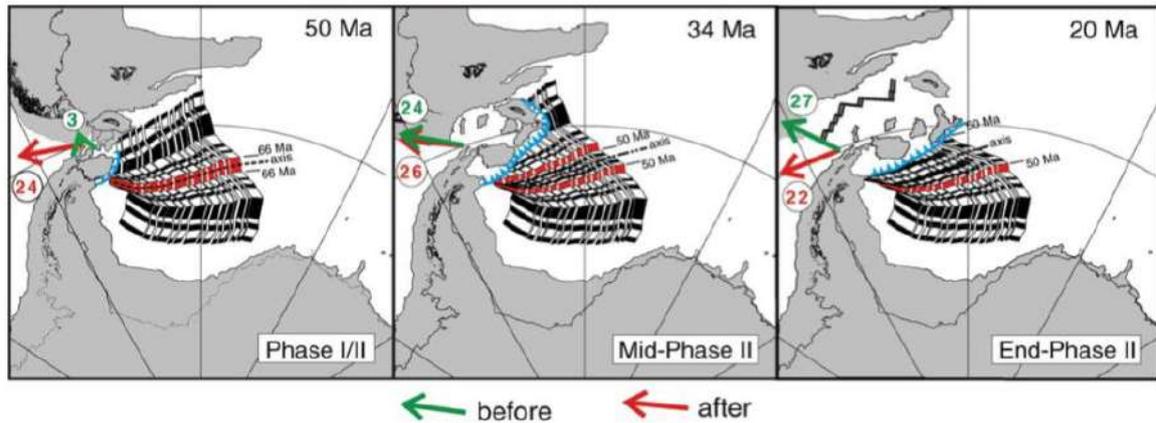


Fig. 11 : Reconstitutions de l'Amérique du Sud et de l'Antarctique, (1) à gauche 50 Ma, l'époque proposée pour l'ouverture du passage de Drake à faible profondeur (1000 m), (2) au centre, 34 Ma, l'époque la plus ancienne durant laquelle une connection profonde (2000 m) est établie par étalement à la crête ouest de Scotia, et (3) à droite, 20 Ma, lorsqu'un changement majeur du mouvement de l'Amérique du Sud et de l'Antarctique s'est produit. **Un espace s'ouvre entre les extrémités de la Terre de Feu et la péninsule Antarctique entre 50 et 34 Ma.** Les vecteurs de mouvement des plaques pour Amérique du Sud-Antarctique sont indiqués pour un point (60°S, 57°O fixé à l'Antarctique) dans le passage de Drake. Le mouvement immédiatement avant l'âge de la carte est indiqué en vert, celui immédiatement après en rouge. Les vitesses sont en km/Ma. Les lignes d'écoulement synthétiques et les isochrones sont indiqués, sur la base des nouvelles rotations, pour les deux flancs du centre d'expansion, bien qu'une grande partie du flanc nord ait été perdue par la suite par subduction sous la mer de Scotia en pleine croissance (les lignes bleues avec des dents définissent la zone de subduction). **Ces reconstitutions sont quantifiées, l'extension ou ouverture fut de 57 km suivant une direction N-S entre 66 et 50 Ma, puis de 278 km suivant une direction ONO-ESE entre 50 et 33 Ma, etc.** D'après Livermore et al. 2005.

Suite à cette évolution tectonique (Fig. 11), un courant circumpolaire se crée et va à terme isoler le continent Antarctique des eaux chaudes des tropiques. L'englacement se fera progressivement, d'abord c'est la calotte de l'Antarctique orientale qui se forme, elle s'accroîtra il y a 14 Ma et il en résulte alors une calotte proche de la calotte actuelle.

Les premières calottes apparurent vers la limite Oligocène/Miocène (au passage Paléocène/Eocène, il y a 23 Ma) avec une épaisseur de glace de 500 à 850 m au niveau des îles King George et James Ross (Davies et al. 2012). Elles fluctuèrent ensuite suivant des cycles de Milankovitch de 40 000 ans. Les premiers glaciers de type alpin datent de l'Eocène il y environ 45-41 Ma sur l'île King George. Une succession des épisodes glaciaires depuis l'Oligocène jusqu'à l'Holocène est donnée par Bethan (2018).

Cette succession est caractérisée par des avancées et retraits jusqu'au Pliocène, période à partir de laquelle l'ensemble de l'Antarctique est englacé.

Pour suivre étape par étape les grandes lignes du cycle des supercontinents et en particulier le craton Antarctique depuis 650 Ma (Néoprotérozoïque), on peut se reporter à Scotese (2001). Ci-dessous, la situation à la fin du Jurassique (Fig. 12).

Late Jurassic 152 Ma

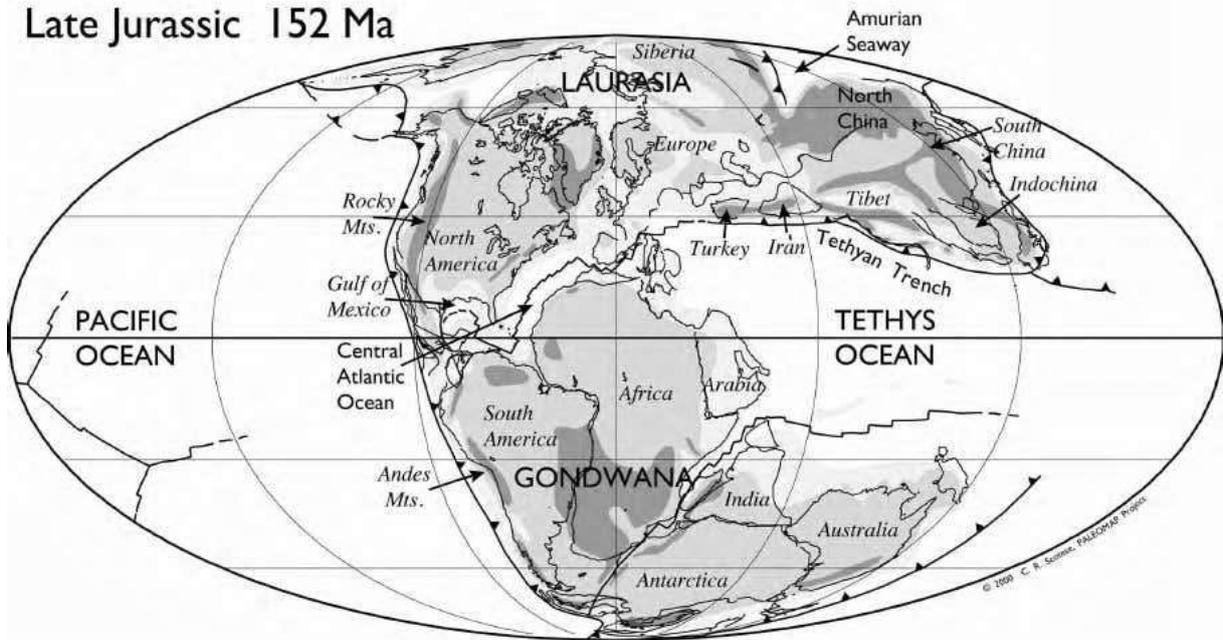


Fig. 12 : Scotese (2001) donne la succession des continents (cratons), supercontinents et océans depuis la fin du Précambrien jusqu'à aujourd'hui, avec également une extrapolation pour la distribution future de ces éléments ou 'pièces du puzzle' dans 50, 150 et 250 Ma. L'Antarctique est bien installé dans les hautes latitudes sud et constitue l'extrémité méridionale du Gondwana. Durant cette période le climat a varié et avant qu'il ne se refroidisse drastiquement avec le Cénozoïque, il faisait chaud en Antarctique comme en témoignent notamment les forêts fossilisées du Crétacé moyen (il y a 90 Ma) alors que l'Antarctique était déjà bien installé au Sud (ici) à 900 km du pôle Sud (Fig. 13).

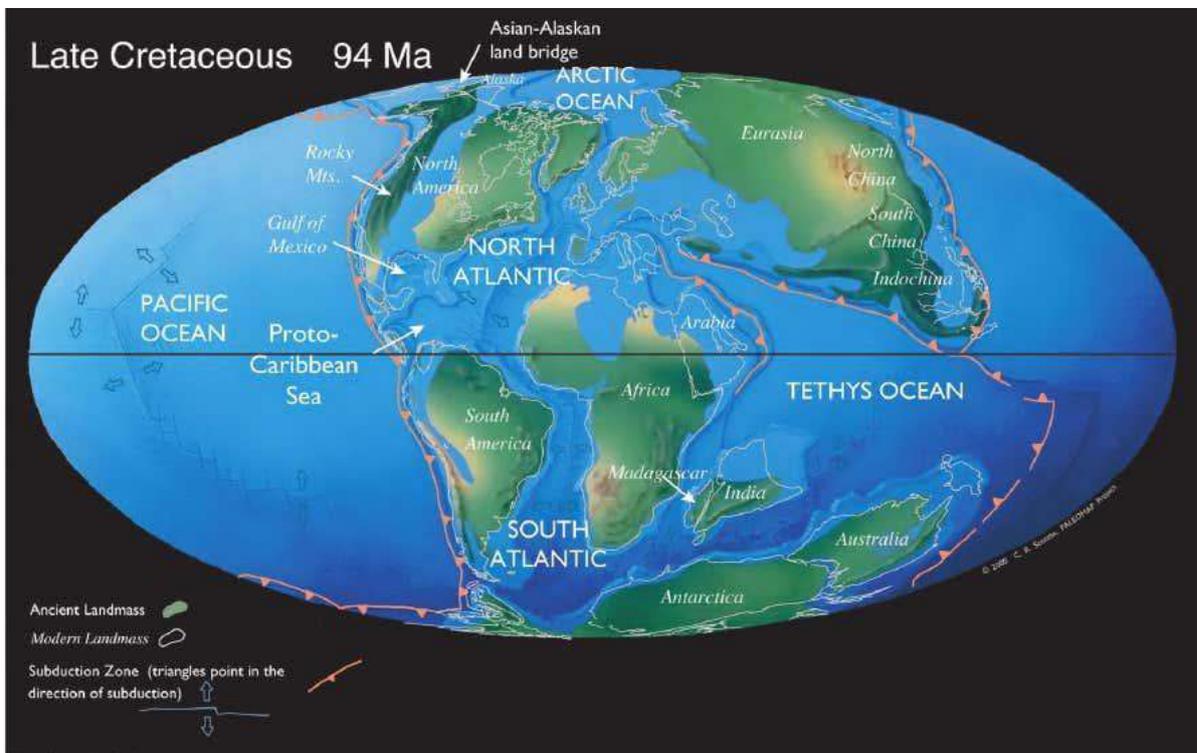


Fig. 13 : L'Antarctique, encore partiellement soudé l'Australie également voir Fig. 4) est à quelques centaines de km du pôle Sud, sous un climat assez chaud, à la fin du Crétacé. Scotese, 2001.

L'étude de Klages et al. (2020) dans Nature estime que la température annuelle moyenne était d'environ 12°C (avec des températures moyennes durant les mois d'été de 20 à 25 °C) et liée à la teneur en CO₂ qui était de 1120 à 1680 ppm (basée sur des modèles de simulation et sur 'l'hypothèse

LES GLACES

de l'effet de serre', voir discussion 'L'Antarctique géologique 2/2'). Dans ces conditions fort chaudes, il ne pouvait y avoir de calotte glaciaire sur le pôle Sud, ni d'inlandsis, et la côte de l'Antarctique occidental était marécageuse avec des forêts tropicales tempérées.

NOTES (communes aux deux parties)

Beck, RA, Sinha A. *et al.* (+3) 1998. Climatic oceanographic, and isotopic consequences of the Paleocene India-Asia collision? In Late Paleocene-Early Eocene and biotic events in the marine and terrestrial records, MP Aubrey, SG Lucas and WA Berggren Eds, Columbia University Press, 103-117.

Bender, ML 2013. Paleoclimate. Princeton University Press, 306p.

Broutin J. 2015. Glossopteris, paléophytogéographie, paléogéographie et dérive des continents. *Géochronique*, 134, p29.

Deconinck, JF 2017. Le Précambrien, 4 milliards d'histoire de la Terre. De Boeck, 210p.

Fogg, GE 1999. A History of Antarctic Science. Studies in Polar Research, Cambridge University Press, 483p.

Howell, DG. 1995. Principle of Terrane Analysis. New applications for global tectonics. Chapman & Hall, 245p.

Mered, M. 2019. Les mondes polaires. PUF, 525p.

Piper, JDA 2001. The Neoproterozoic supercontinent : Rodinia or Palaeopangea? *Earth Planetary Science Letters*, 176,131-146.

Rogers, JW and Santosh M. 2004. Continents and Supercontinents. Oxford University Press, 289p.

Ramstein, G 2015. Voyage à travers les climats de la Terre. Odile Jacob, 351p.

Rotaru, M, Gaillardet, J, Steinberg M et Trichet, J. 2004. Les climats passés de la Terre. Vuibert, 195p.

Van Vliet-Lanoë, B 2013. Cryosphère. Histoire et environnements de notre ère glaciaire. Vuibert, 405p.

10. L'Antarctique géologique (2/2)

Mis en ligne SCE : 05.01.2020

Cet article fait suite aux trois récents articles publiés par le Prof. Maurin sur SCE ([1/3](#), [2/3](#), [3/3](#)), et traite de l'évolution géologique de la plaque Antarctica. Voir également L'Antarctique géologique ([1/2](#)).

10.1 Situation récente à l'échelle géologique

10.1.1. Isolation de la plaque Antarctique

Nous arrivons ainsi à la situation actuelle avec l'Arctique et l'Antarctique, situation décrite dans les parties 1 à 3 des articles de M. Maurin (parties [1/3](#), [2/3](#) et [3/3](#)). D'où proviennent les glaciations actuelles ? Pour les comprendre il faut remonter au début de l'ère cénozoïque en considérant l'Antarctique qui était en position polaire ([Scotese, 2001](#)).

La plaque antarctique, partie intégrante de l'ensemble des continents formant le Gondwana est entourée dès le Jurassique (Figs. 7 et 12, *in L'Antarctique géologique 1/2*) de rides médio-océaniques (excepté la péninsule antarctique qui provient d'une limite de plaque convergente active avec failles transformantes séparant la plaque Antarctique et la plaque [Scotia](#)). **En conséquence, la plaque Antarctique est actuellement en expansion par rapport aux plaques adjacentes, et fut particulièrement stable et isolée par rapport aux événements tectoniques du Mésozoïque et du Cénozoïque (ici).**

Dans ce contexte, et en remontant le temps, il faut noter l'individualisation, dès l'Ordovicien, de la péninsule antarctique avec des montagnes de plus de 3200 m d'altitude constituant aujourd'hui la région la plus au nord de l'Antarctique occidentale et s'étendant au-delà du cercle polaire. **Cette chaîne de montagnes prolonge les Andes de l'Amérique du Sud dans la continuité d'une dorsale sous-marine caractérisée par un gradient géothermique élevé (voir plus loin). Ainsi on voit que l'Antarctique, depuis longtemps et encore aujourd'hui, participe à un jeu de tectonique des plaques encore active avec des effets locaux (notamment variations du gradient géothermique). Ce gradient géothermique est un élément important à prendre en considération dans la dynamique glaciaire car il favorise la fonte et ensuite le glissement des glaces.**

Notons que Arctowski (*in Fogg 1992*) avait déjà suggéré en 1901 que les Andes étaient présentes dans la pointe nord de la péninsule antarctique (Graham Land).

10.1.2. Englacement de la plaque Antarctique

En ce qui concerne plus directement le futur englacement, l'Antarctique, isolé tectoniquement à l'entrée du Cénozoïque avec l'ouverture de l'océan Antarctique Sud, subit les effets de l'orogénèse alpine traduisant un épisode important d'activité tectonique (plissement majeur). L'Antarctique

étant en position polaire (depuis le Mésozoïque), la tectonique des plaques et la modification de la circulation océanique qui en résultent expliquent une part importante des phénomènes et le refroidissement du début du Cénozoïque, notamment enregistré par les isotopes de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) des sédiments marins du Pacifique (*in* Van Vliet-Lanoë, 2013) et des tests de [foraminifères](#). Aujourd'hui la plaque Antarctique est bordée de rides divergentes (en extension) et de zones de fractures qui fonctionnent depuis environ 100 Ma (Rogers & Santosh, 2004) suite à l'éclatement du Gondwana.

La dernière séparation ayant mené à son isolement est liée au détachement de

la péninsule Antarctique de l'Amérique du Sud il y a 25 Ma (transition Oligocène/Miocène, Fig. 11, partie 1/2) et permet aux eaux de se déplacer d'ouest en est (courant circumpolaire toujours actif) autour de l'ensemble du continent antarctique. Le continent était alors isolé des eaux chaudes équatoriales qui circulaient dans le reste des océans et le refroidissement s'installa. La glaciation antarctique est donc en premier lieu liée à la tectonique des plaques, tout comme celle de l'Arctique avec la fermeture de l'Isthme d'Amérique Centrale il y a 4 Ma (au Pliocène) suite à la formation d'un arc volcanique autour des océans Caraïbes et Pacifique empêchant le mélange des eaux atlantiques et pacifiques.

Le CO_2 est parfois invoqué (par le système de [pompe à \$\text{CO}_2\$](#) , [Brady et al., 1994](#); Rotaru et al. 2006) pour rendre compte du refroidissement au cours du Cénozoïque (surtout dès la fin de l'Eocène), sa teneur aurait diminué suite à l'altération des roches soulevées lors des orogénèses himalayenne et voisines (Beck et al., 1998). Il faut cependant rester prudent car l'hypothèse de l'effet de serre est mise à mal par toute une série d'observations (voir [ici](#), [ici](#) et [ici](#)) et qu'elle est en contradiction avec certains principes élémentaires de la chimie-physique (voir [ici](#)).

Dans ce contexte évolutif des glaciers de montagnes se forment sur la chaîne transantarctique et les monts de l'Antarctique ouest (Fig. 9, partie 1/2). A la fin de l'Eocène, il y a environ 40 Ma, les premières phases de glaciation importante se marquèrent sur l'Antarctique (avec une baisse d'environ 4-5°C de la température des eaux océaniques profondes et d'environ 10° C de la température moyenne des masses continentales de hautes latitudes), ensuite il y a environ 35-34 Ma, à la transition Eocène/Oligocène, pour l'Antarctique occidental et au Miocène vers 14-12 Ma pour l'Antarctique oriental. A ce stade le continent Antarctique est entièrement recouvert de glace. Les données stratigraphiques récentes des Shetland du Sud démontrent que l'englacement de la péninsule antarctique ne commence qu'au tout début du Miocène vers 22,9 Ma avec des glaciers vêtant dans un contexte morphologique sans grand changement de 30 à 22 Ma (Van Vliet-Lanoë, 2013). Suite à l'Optimum thermique du Miocène moyen (18-15 Ma) une partie de l'Antarctique oriental est déglacé (de même que le Groenland), ensuite les processus de rifting s'accélérent et la calotte de l'Antarctique oriental atteindra sa pleine épaisseur vers 14,8 Ma (de taille équivalente à l'actuelle). On se reportera à Van Vliet-Lanoë (2013) pour l'évolution détaillée de l'ensemble qui répond aux variations régulières de différents processus (climatiques, tectoniques, orbitaux...). **Il en résulte des phases d'englacement prononcé et de déglaciations, généralement diachrones (voir plus loin).**

Avant cela, c'est-à-dire à la fin du Crétacé, le continent était morphologiquement (taille et forme) fort différent de l'actuel et ressemblait à une région sauvage alpine semblable au sud de la Nouvelle-Zélande ([Bowman et al. 2014](#)), plutôt qu'au paysage glacé et extrême qu'on lui connaît. Des relevés radar effectués au début des années 2000 par une équipe de chercheurs chinois ont montré que la topographie ressemblait effectivement à celle des Alpes européennes (Fogg, 1992). Ensuite, ce que nous savons de l'histoire de l'Antarctique nous montre que de petits glaciers au sommet des

montagnes durant l'Oligocène se sont épisodiquement retirés et se sont écoulés en suivant les changements de l'orbite terrestre. Ce faisant, ils ont creusé des vallées et modifié la topographie, ce qui a eu une incidence sur la dynamique de transport de la glace dans la région. **Puis, il y a environ 14 millions d'années, les températures ont chuté de 8 degrés dans le monde ce qui a déclenché en Antarctique le processus de congélation de la glace sur les roches. Aujourd'hui, l'Antarctique est le continent le plus froid du monde, il est recouvert à 98% de sa surface par une calotte glaciaire (profondeur moyenne de 1,6 km) dont une grande partie dépasse 3000 m d'épaisseur, jusqu'à 5000 m en certains endroits (Fig. 10, partie 1/2).** Les températures moyennes sur l'ensemble de l'inlandsis vont de -30°C l'été à plus de -60°C l'hiver, la péninsule connaît quant à elle des températures relativement clémentes avec 1°C en moyenne l'été et -10°C en moyenne en hiver. La péninsule tend à se normaliser au niveau d'un espace subantarctique (Mered, 2019) ce qui engendre depuis peu un nouveau tourisme. La calotte glaciaire de l'Antarctique contient 90% de la glace de la planète et entre 60 et 70% de l'eau douce du monde (Fig. 14).

Where is Earth's Water?

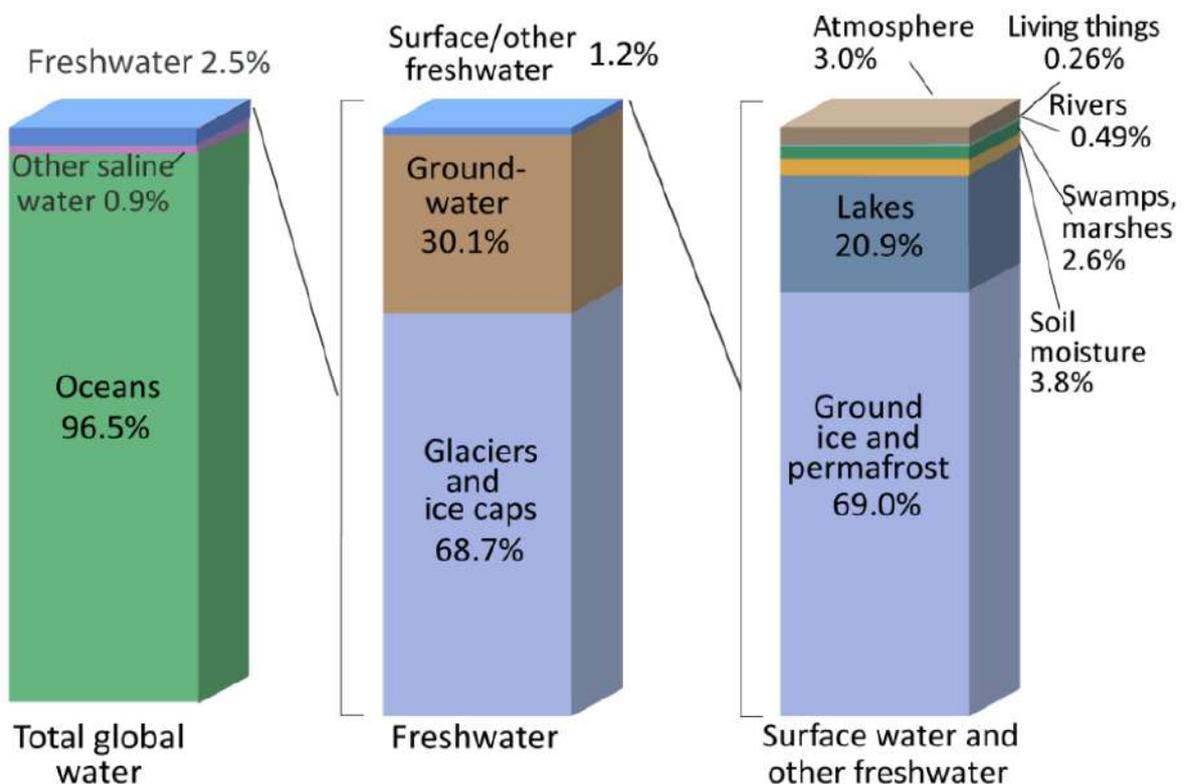


Fig. 14 :Distribution de l'eau sur, dans et au-dessus de la Terre. Source USGS, 1993 d'après I. Shiklomanov (1993) A Guide to the World's Fresh Water Resources. NB: la numérotation des figures suit celle de la première partie 1/2.

10.2. Situation récente à l'échelle historique

L'Antarctique fait l'objet d'une attention de tous les jours dans les médias qui en rapportent presque exclusivement des informations catastrophiques. Il est bon de rappeler ici que le refroidissement de ce continent n'est expliqué que par deux hypothèses : la tectonique et le CO₂, ce dernier étant aujourd'hui invoqué pour expliquer, non plus le refroidissement actuel, mais au contraire la fonte des glaces suite à l'augmentation de ce gaz dans l'atmosphère (suivant 'l'hypothèse de l'effet de serre', voir [ici](#)).

Raisonnement qui fait appel (à nouveau) à l'hypothèse de l'effet de serre. Qu'en est-il réellement ? D'abord quid de la fonte des glaces antarctiques ?

Contrairement à ce qui est (rapidement) propagé, la situation est *a minima* stable (température et glace) ([ici](#) et nombreuses références [ici](#), [ici](#), également [SCE](#)) voire *au mieux* instable ([ici](#)).

Par contre ce qui est assez systématiquement occulté est **la présence d'une source de chaleur liée à une activité volcanique de type extensive (liée au rift) sous l'Antarctique occidental** (par exemple sous le Glacier Pine Island). Cette activité a été mise en évidence par l'isotope ^3He (traduisant l'activité du manteau supérieur) et pourrait expliquer le glissement de plusieurs gigatonnes de glace dans l'océan (Loose et al. 2018 in [Nature](#)). Les auteurs concluent ainsi ***'our calculations indicate that the volcanic heat source is comparable in magnitude to the active vent fields found along ocean spreading centers. The inferred heat supply is more than ten times the heat energy released by dormant (but not extinct) shield volcanoes on land'***. Les auteurs incitent à la prudence et estiment qu'outre l'apport de chaleur par le volcanisme, d'autres facteurs peuvent déstabiliser la glace, un des plus importants étant un changement de régime des vents autour de l'Antarctique. **L'activité volcanique est également mise en évidence pour le Glacier Thwaites ([ici](#)), mais cette observation n'a pas ou à peine été relayée dans les médias. Finalement 138 volcans ont été identifiés pour l'Antarctique occidental et se suivent sur plus de 3000 km le long de l'axe du rift avec, pour la zone volcanique la plus dense, un édifice volcanique par $7800 \pm 400 \text{ km}^2$ ([ici](#), et également [ici](#)).**

La [NASA](#) (2015) rapporte également une situation stable pour les glaces antarctiques avec même un gain de 122 Gt/an de 1992 à 2001 et de 82 Gt/an de 2003 à 2008. C'est également ce que rapporte [Sonne \(2020\)](#) qui traite en détail le sujet et fournit de nombreuses références.

L'Antarctique occidentale est ainsi significativement plus chaud que l'Antarctique orientale et un réchauffement est aujourd'hui surtout observé au niveau de la péninsule Antarctique suite à cette activité volcanique de type rift (Figs. 15 et 16). Également se reporter à [Lloyd et al. \(2015\)](#).

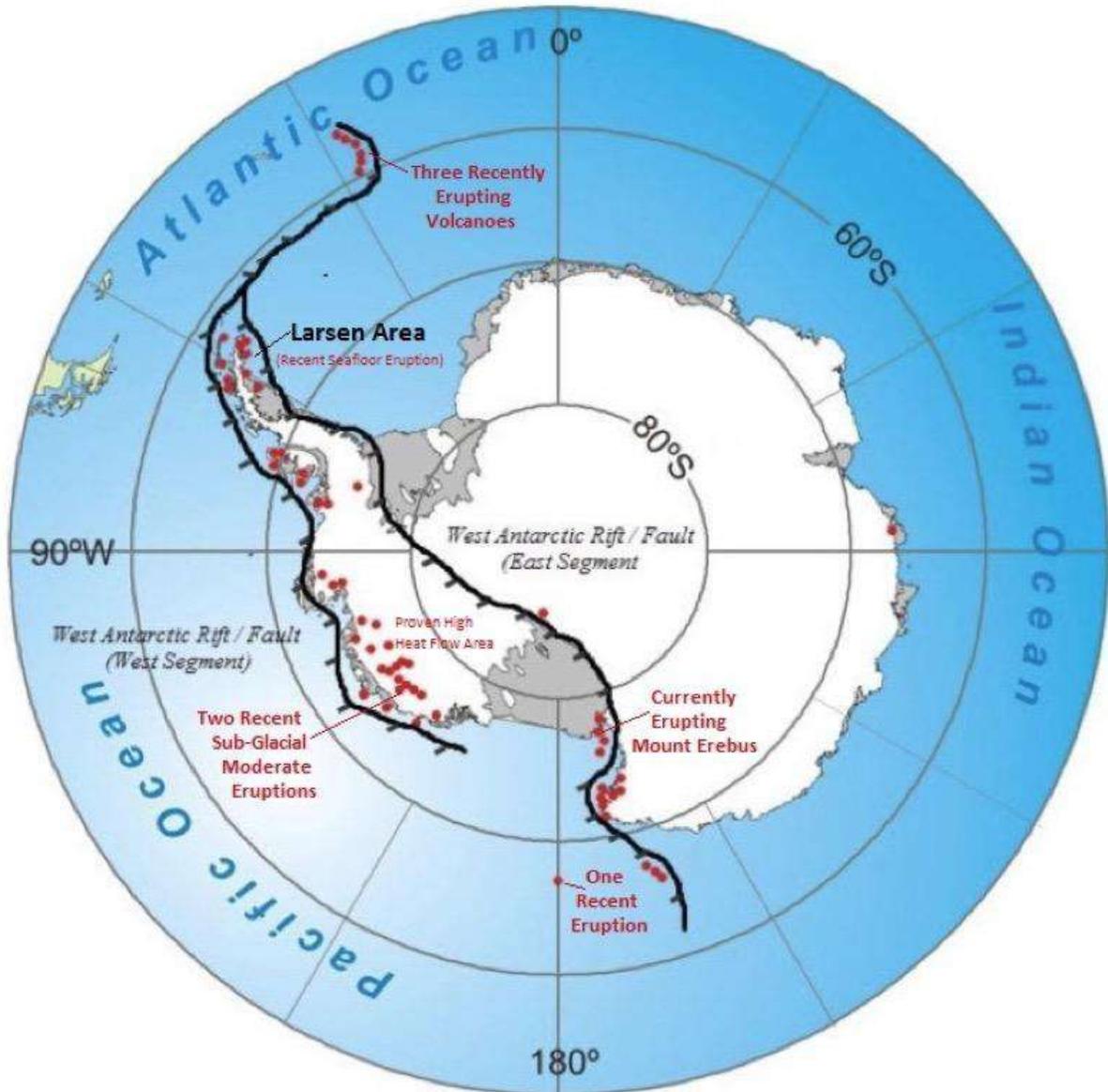


Fig. 15 : Carte des volcans du continent antarctique actuellement en éruption, actifs ou semi-actifs (points rouges). La majorité des volcans, soit 61 sur 62 sites volcaniques, sont situés le long du système de failles de l'Antarctique occidentale. Cette zone de faille active, majeure et profonde, déchire le continent (Antarctique occidentale et orientale). Ce processus de faille s'étend vers le bas dans des chambres de lave chaudes et profondes qui poussent la chaleur et le fluide chauffé vers le haut jusqu'au substratum rocheux/plancher océanique et au substratum rocheux/glace. Source [Kamis, 2017](#). Cet article est accompagné d'une bibliographie très conséquente et utile.

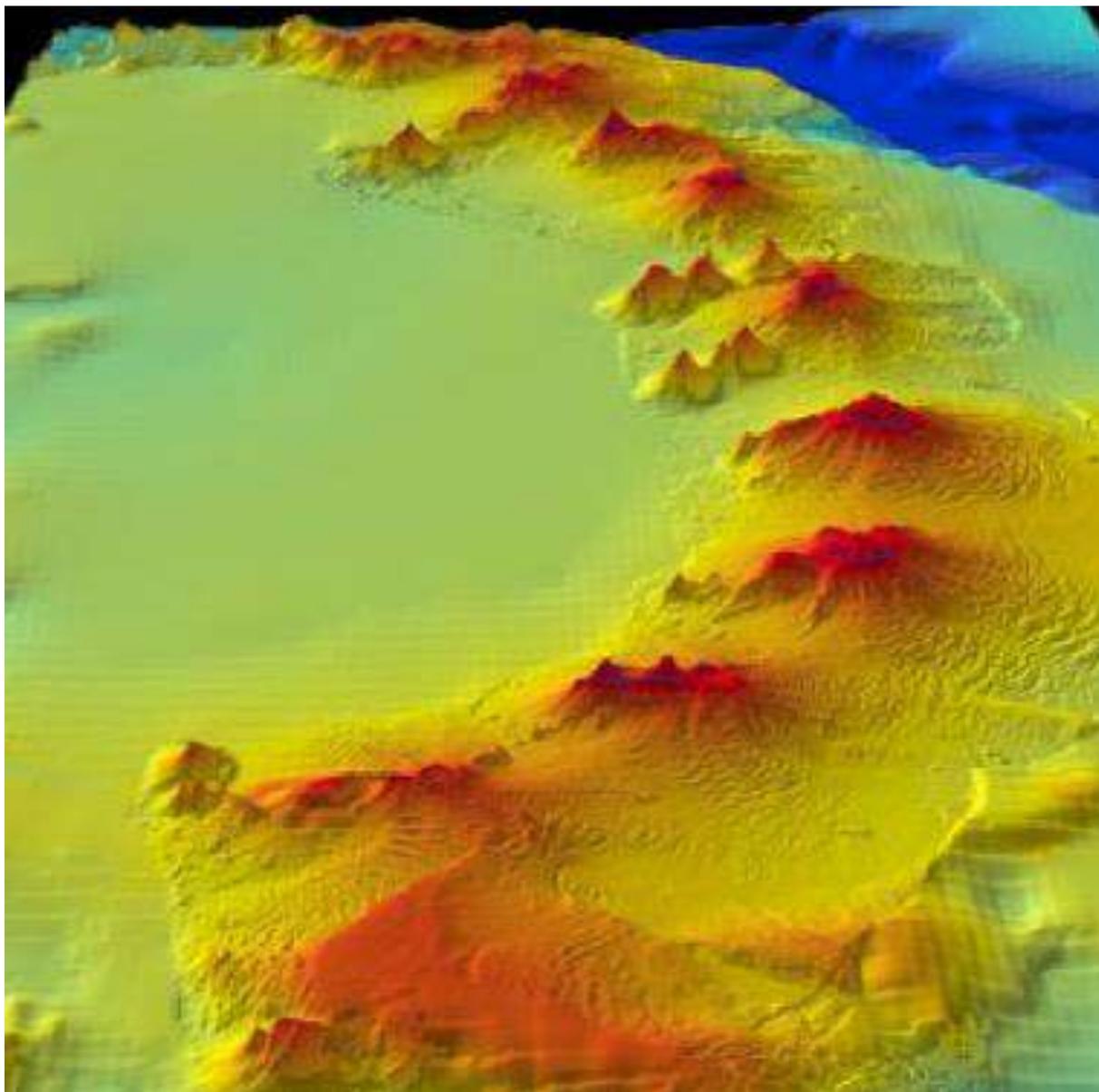


Fig. 16 : Image des fonds marins d'une chaîne de 800 km de long de plusieurs volcans actifs de 1000 m de haut situés à proximité de la partie nord du continent antarctique. D'après [Kamis, 2016](#).

Une analyse détaillée de l'évolution thermique du bassin de rift depuis l'extension du Néogène est fournie par [Lloyd et al. \(2015\)](#) à partir de la sismique du [manteau supérieur](#).

Pour la période historique signalons l'étude de [Lüning et al. \(2019\)](#) qui met en évidence l'anomalie climatique médiéval (Optimum Climatique Médiéval ou [OCM](#)) en Antarctique (Fig. 17) attribuée à l'oscillation El Nino et à l'oscillation antarctique (ou [SAM](#) pour *Southern Annular Mode*), résultant de variations de l'activité solaire suivant des dynamiques non linéaires aux échelles multi-décennale et centennale. **Cette étude révèle une variabilité naturelle du climat à l'échelle de l'Antarctique durant l'OCM (exemple des paléotempératures plus élevées dans les îles subantarctiques près de la péninsule, dans l'Antarctique occidentale, et moins élevées dans la plateforme de Ross et la mer de Wedell, cf. Fig. 17). Selon ces auteurs cette variabilité naturelle est absente dans les modèles actuels.**

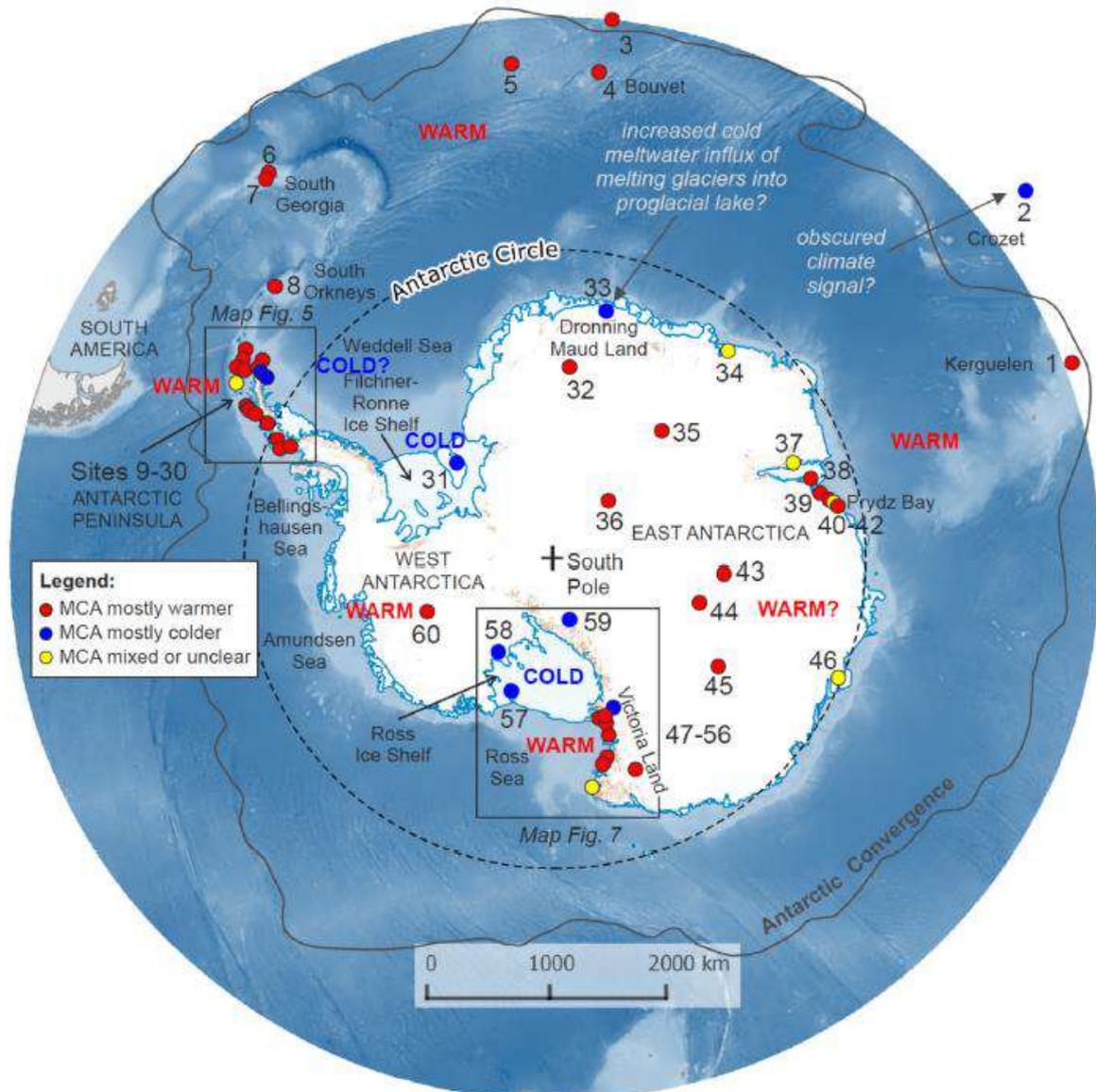


Fig. 17: = figure 6 in Lüning et al. (2019), tendances des paléotempératures pendant l'Optimum Climatique Médiéval en Antarctique. Valeurs plus chaudes en rouge, plus froides en bleu, peu claires en jaune. Carte des paléotempératures basées sur l'examen de 60 sites (cf. les numéros de localisation de chaque site) recouvrant la période 1000-1200 CE. Ces sites correspondent à des forages en mer et sur le continent.

Enfin avons-nous assez d'éléments pour une vision claire de la situation actuelle eu égard le passé et le futur ? Plus que probablement non, comme le suggère en 2015 [ce glaciologue](#) de l'Université de London qui montre combien, une fois de plus, le problème est d'une complexité insoupçonnée. Cet auteur souligne l'asynchronicité (temporelle) entre augmentation de l'englacement et déglaciation suivant les différentes parties de l'Antarctique orientale, une de ses conclusions est la suivante : *'Again and again, we learned that things are more complicated than we'd thought. For example, a key finding is that the ice-sheet's retreat from its maximum extent was asynchronous; that is, it did not respond to a warming climate in a uniform way'* complétée par celle-ci : *'It is clear from the project that the glacial history of large areas of Antarctica remains little-studied and poorly understood, and in some areas we still can't decide between competing hypotheses. It's a complicated story that highlights the complexities involved in reconstructing ancient ice sheets'*. Rien à voir à la l'aplomb des médias nous ramenant sans cesse au 'bouton CO₂' seul responsable de ce qui se passe actuellement...

Cette asynchronicité dans l'avancée ou le retrait de la calotte antarctique (Antarctique oriental) a été mise en évidence par [Bentley et al. \(2014\)](#) depuis la déglaciation entamée il y a environ 18 000 ans (le 'diachronisme' peut atteindre jusqu'à 6000 ans). Selon ces auteurs de (trop ?) nombreux facteurs interviennent, citons parmi les plus importants dans la dynamique de la calotte, des effets locaux (topographie/bathymétrie des différents bassins), des flux d'eaux océaniques de surface plus chaudes, le drainage glaciaire des bassins, le rebond isostasique et l'intrusion d'eaux chaudes profondes sur les plateformes. Et de conclure : *it is clear from the reconstructions that the level of knowledge of Antarctic Ice Sheet history is extremely variable in time and space.*

Bref, la science est loin d'être dite !

Avant de conclure, et pour preuve que la science est loin d'être dite, notons que l'étendue de la banquise en Antarctique a fortement augmenté en mars 2020 (Fig. 18) et se trouve être à la fin de ce mois, proche de la moyenne de 1981-2010. Cette carte vient d'être publiée par le très officiel Centre [NSIDC](#) (National Snow & Ice Data Center). La croissance des glaces s'est produite tout le long de la côte antarctique, mais plus particulièrement dans les régions de la mer de Ross et de l'est de la mer de Weddell. Cela met fin à une période de 41 mois de déficit par rapport à la moyenne de la période de référence (voir également [ici](#)). Bien entendu cette information n'a pas ou à peine été relayée dans les médias.

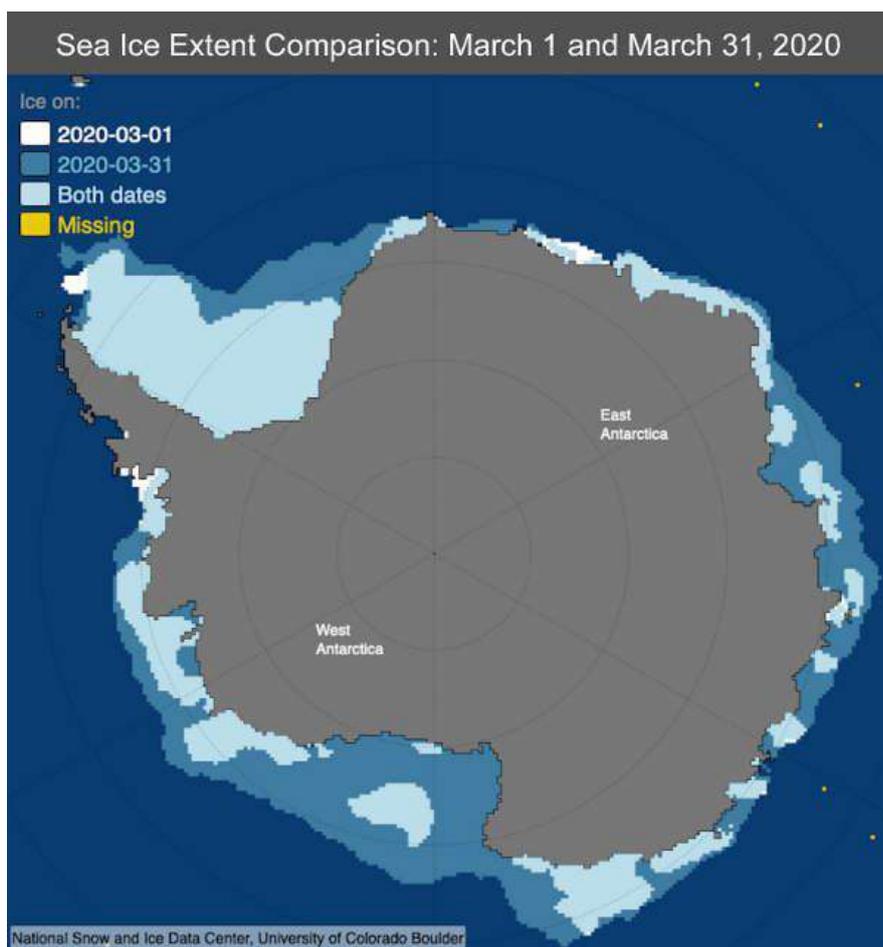


Fig. 18 : L'étendue de la banquise en Antarctique a fortement augmenté en mars 2020. D'après le [NSIDC](#) (National Snow & Ice Data Center).

10.3.Conclusion

D'abord revenons aux médias plus qu'alarmistes. Pourtant il semble bien qu'ils aient tort, pour cela il suffit de reprendre les conclusions du très sérieux [British Antarctic Survey](#) (BAS) qui se pose la question en 2017 : *Is Antarctica warming?* Et y répond comme suit '*Antarctica covers an area larger than Europe, and so naturally there are marked spatial variations in temperature trends. **Many long-term measurements from Antarctic research stations show no significant warming or cooling trends, and temperatures over most of the continent have been relatively stable over the past few decades.** However, the Antarctic Peninsula and large parts of West Antarctica warmed significantly over the second half of the 20th century. Despite warmer sea-surface and air temperatures over the Southern Ocean, there has been a slight increase in Antarctic sea-ice extent which is believed to be linked to changes in atmospheric weather patterns. In contrast, the collapse of ice shelves and land-ice reduction near coastal West Antarctica has been driven by warm ocean currents under the ice shelves*'.

Nous avons vu que l'Antarctique occidental (et la péninsule) était à l'aplomb d'un gradient géothermique élevé lié à une activité volcanique héritée de la tectonique des plaques. Notons que pour le BAS le 'non-réchauffement' de l'Antarctique est principalement dû à la baisse de la concentration d'ozone de la stratosphère.

Ensuite, la géologie montre combien ce qui se passe sur Terre est changeant, quelles que soient les échelles temporelles. Elle montre aussi que ces changements, même les plus importants, se sont toujours déroulés dans des fourchettes qui n'ont jamais perturbé le système Terre de sorte que ce sont toujours et toujours les mêmes processus qui se déroulent depuis quelques milliards d'années et qu'ils sont conditionnés tout simplement par les lois de la physique et de la chimie, même si les activités biologiques furent à même de modifier certains paramètres (par exemple passage à une atmosphère riche en oxygène, [ici](#)). Dans ce cas ce sont bien uniquement les lois physico-chimiques qui restent d'application. Les perturbations externes (par exemple le forçage orbital) ont influencé et influenceront encore notre système, à nouveau sans que cela ne remette en cause le système. Le système Terre est contingent, sans finalité aucune, et les organismes qui y survivent ne le doivent qu'à leur capacité d'adaptation comme le montre la théorie de l'Evolution. Le matraquage quotidien sur le CO₂ ne semble pas être de mise dans ce contexte, surtout si la contribution anthropique est très faible (voyez les sources ou bilans de carbone dans les rapports du [GIEC](#) (2013) rapportant des émissions anthropiques de 8,9 GtC sur 207,1 GtC, soit 4,29% de l'ensemble des émissions anthropiques et naturelles, et aussi [ici](#)) et l'attitude la plus raisonnable serait de traiter les nombreux problèmes de pollution engendrés par nos activités.

Enfin, pour ceux qui seraient quand même inquiets de la disparition des glaces, il est nécessaire de (re)lire les trois articles du professeur Maurin (publiés sur SCE) qui démontrent combien on est peu sûr de l'état la situation. Consultez également cet article récent sur la Péninsule antarctique ([ici](#)). D'une manière générale rappelons que cette situation actuelle est le résultat d'une conjonction de processus naturels que de nombreux scientifiques (ou non scientifiques) ne prennent pas en considération. Les processus naturels 'mènent la danse' depuis des milliards d'années, la géologie en est un des témoins privilégiés.

Le climat tant incriminé n'y est pour rien dans l'état de notre planète, cherchons plutôt dans le mode de fonctionnement de nos sociétés.

ADDENDUM : Les ressources minérales

En tant que géologue, il est important de donner un aperçu des ressources minérales de l'Antarctique. Pour rappel un Comité, le [SCAR](#) (Comité Scientifique pour la Recherche Antarctique) a été créé en 1958 à la suite de l'Année Géophysique Internationale. Il regroupe aujourd'hui 43 pays membres et se réunit en session plénière tous les deux ans. **Parmi ses nombreuses activités et recommandations il a formulé six obligations ou 'interdictions' approuvées par le Traité sur l'Antarctique et le Protocole de Madrid. L'une d'elle stipule qu'il est interdit d'exploiter des ressources minérales en Antarctique.**

Bien entendu une évaluation des ressources a déjà été réalisée, à partir de d'analyses de terrain et de comparaisons ou extrapolations avec les séries géologiques des cratons voisins (surtout Amérique du Sud, Afrique du Sud et Australie) qui présentent pour la plupart la même évolution. L'Antarctique pourrait receler jusqu'à **500 milliards de tonnes de charbon** (carte de distribution [ici](#)) surtout dans les Monts Transantarctiques, **jusqu'à 36 milliards de barils** (certains vont jusqu'à 200 milliards !) équivalent pétrole ([USGS, 1991](#)) situés en offshore sur le plateau continental antarctique. Le continent renferme des gisements potentiels de **cuivre** dans l'arc magmatique de Scotia (péninsule Antarctique), équivalents aux '[porphyry copper](#)' des Andes en Amérique du Sud. **L'or** serait également présent dans le Queen Maud Land dans la prolongation des séries du Witwaterstrand d'Afrique du Sud. De même le **platine** dans le Wilkes Land dans des intrusions en prolongation des [ceinture des roches vertes](#) d'Australie (voir [ici](#) pour un peu plus de détail).

Ce rapide aperçu des principales ressources montre que l'Antarctique doit être beaucoup plus riche que ce qui est connu, par extrapolation avec les cratons voisins, cette moindre connaissance est liée au fait qu'il est interdit d'effectuer des explorations géophysiques et des forages à cette fin . Les ressources estimées sont donc certainement *a minima*, car les estimations datent, et les technologies de l'exploration et de la valorisation ont fortement évolué depuis lors. **Rappelons encore que l'exploitation pétrolière du continent antarctique est abandonnée suite à la décision du Traité de Protocole du SCAR.**

Il y a cependant une région proche subantarctique, située à seulement quelques centaines de kilomètres du continent antarctique qui est activement exploitée pour hydrocarbures. Il s'agit du bassin austral et du bassin des Malouines Ouest situé au large de la Terre de Feu, de l'autre côté du passage de Drake, avec des exploitations offshore et onshore sous l'égide de l'Institut argentin du pétrole et du gaz. Cette exploitation, avec les champs de Fenix et Vega Pléyade (au large de Rio Grande, à 100 km au nord de Ushuaia, Fig. 19), représente déjà aujourd'hui 24 % de la production de gaz de l'Argentine (Mered, 2019). Il s'agit du projet le plus austral du monde sur une mer avec des vents de plus de 180km/h et des températures hivernales sous les -20°C. Cette activité est en plein essor et [Total Austral](#) avec son partenaire argentin (YPF) ont annoncé en juin 2019 un record historique de production, avec un volume de 22,8 millions de m³/j, soit plus de 150 000 barils équivalent pétrole par jour.



Fig. 19 : Vega Pleyade est situé au large de la Terre de Feu, sur le permis de Cuenca Marina Austral 1 (CMA-1) qui est opéré par Total depuis 1978. Le champ sera développé au moyen d'une plateforme tête de puits implantée dans 50 m d'eau et raccordée par un pipeline de 77 km aux installations de traitement à terre de Rio Cullen et Cañadon Alfa, également opérées par Total. Source : *Energine*, 2013.

NOTES (communes aux deux parties)

Beck, RA, Sinha A. *et al.* (+3) 1998. Climatic oceanographic, and isotopic consequences of the Paleocene India-Asia collision? In Late Paleocene-Early Eocene and biotic events in the marine and terrestrial records, MP Aubrey, SG Lucas and WA Berggren Eds, Columbia University Press, 103-117.

Bender, M.L. 2013. Paleoclimate. Princeton University Press, 306p.

Broutin J. 2015. *Glossopteris*, paléophytogéographie, paléogéographie et dérive des continents. *Géochronique*, 134, p29.

Deconinck, J.F. 2017. Le Précambrien, 4 milliards d'histoire de la Terre. De Boeck, 210p.

LES GLACES

Fogg, G.E. 1999. A History of Antarctic Science. Studies in Polar Research, Cambridge University Press, 483p.

Mered, M. 2019. Les mondes polaires. PUF, 525p.

Piper, J.D.A. 2001. The Neoproterozoic supercontinent : Rodinia or Palaeopangea? Earth Planetary Science Letters, 176,131-146.

Rogers, J.W and Santosh M. 2004. Continents and Supercontinents. Oxford University Press, 289p.

Ramstein, G. 2015. Voyage à travers les climats de la Terre. Odile Jacob, 351p.

Rotaru, M., Gaillardet, J., Steinberg M. et Trichet, J. 2004. Les climats passés de la Terre. Vuibert, 195p.

Van Vliet-Lanoë, B. 2013. Cryosphère. Histoire et environnements de notre ère glaciaire. Vuibert, 405p.

11. L'Arctique géologique (1/2)

Mis en ligne SCE : 22.05.2020

Cet article fait suite aux trois récents articles publiés par le Prof. Maurin sur SCE ([1/3](#), [2/3](#), [3/3](#)), et prolonge celui de l'évolution géologique de la plaque Antarctica ([1/2](#) et [2/2](#)), publié récemment par SCE. Dans son introduction ce dernier article a rappelé l'importance que revêtent les glaces au niveau médiatique et a fourni une synthèse de l'ensemble des glaciations qui ont affecté notre planète depuis près de 3 milliards d'années (3 Ga) (Figure 1 pour l'échelle géologique).

11.1 Le continent Arctida

La géologie d'Arctida est complexe, elle nécessite de nombreux termes temporels de l'échelle des temps géologiques. La figure 1 ci-dessous est une échelle simplifiée, elle renvoie vers l'échelle chronostratigraphique officielle, plus détaillée.

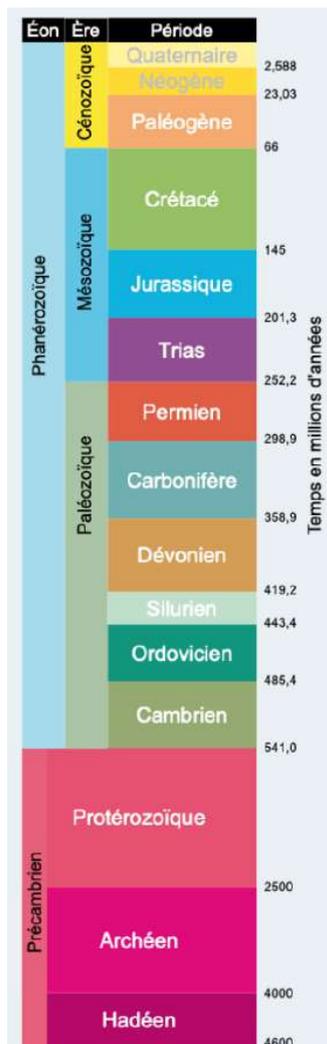


Fig. 1 : Echelle chronostratigraphique simplifiée (source [ici](#)). Pour la version détaillée se reporter au site officiel ([ici](#)).

LES GLACES

A la grande différence de l'Antarctique, l'Arctique est un océan entouré de plateaux continentaux (Fig. 2). L'océan ou bassin arctique est actuellement constitué par un double bassin, séparé une crête très importante, la ride Lomonosov : le sous-bassin canadien à croûte continentale amincie (3 600 m) et le sous-bassin eurasiatique à croûte océanique mince, de loin le plus profond (5000 m entre la crête Lomonosov et la ride océanique active de Gakkel). Il est entouré comme le long de l'Atlantique Nord par une plateforme continentale ennoyée, constituée de croûte continentale. Le bassin arctique d'abord marin et connecté au Proto-Atlantique au début du Jurassique (voir plus loin), est isolé depuis le Jurassique moyen et essentiellement de nature lacustre, modifiant le régime thermique océanique, **amenant un contexte voisin du Glaciaire au Crétacé inférieur** (au Valanginien *in* Dromart et al. 2003 ; Korte et al. 2015 ; Piskarev et al. 2018). Il ne se ré-ouvrira sur le bassin atlantique qu'à partir de l'Eocène, via l'ouverture du détroit de Fram. D'autre part le pôle magnétique terrestre (Nord) est resté sur le bassin arctique depuis le début du Jurassique, donc en position de déficit énergétique lié à l'obliquité de l'orbite terrestre.

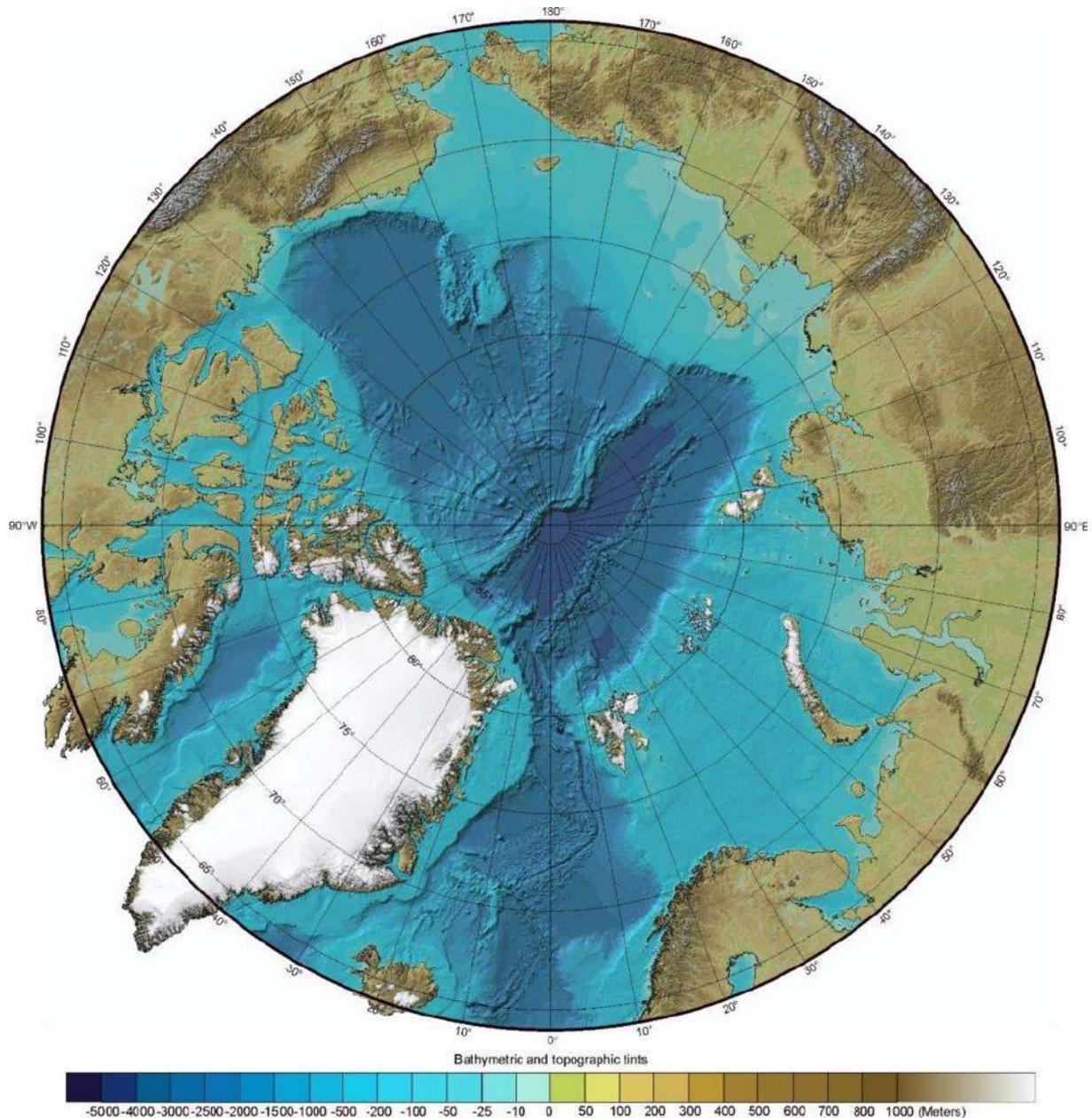


Fig. 2 Image Gebco Arctique : L'océan ou bassin arctique est actuellement constitué par un double bassin, séparé une crête très importante, la ride Lomonosov (voir texte).

Le présent article s'attache à l'Arctique qui présente une des histoires géologiques les plus anciennes, et de ce fait des plus complexes suite au recyclage des aires cratonisées (voir plus loin) au cours des orogénèses successives. L'ancien continent nommé 'Arctica' est un des plus vieux cratons identifiés sur la planète, il est reconnu à 2,5 Ga (plus précisément 2,565 Ga), précède celui de Atlantica (2,0 Ga) et suit celui de Ur (3,0 Ga). Sa localisation dans la pangée Rodinia (vers 1,1 Ga) est donnée à la Figure 3 (également [ici](#)) :

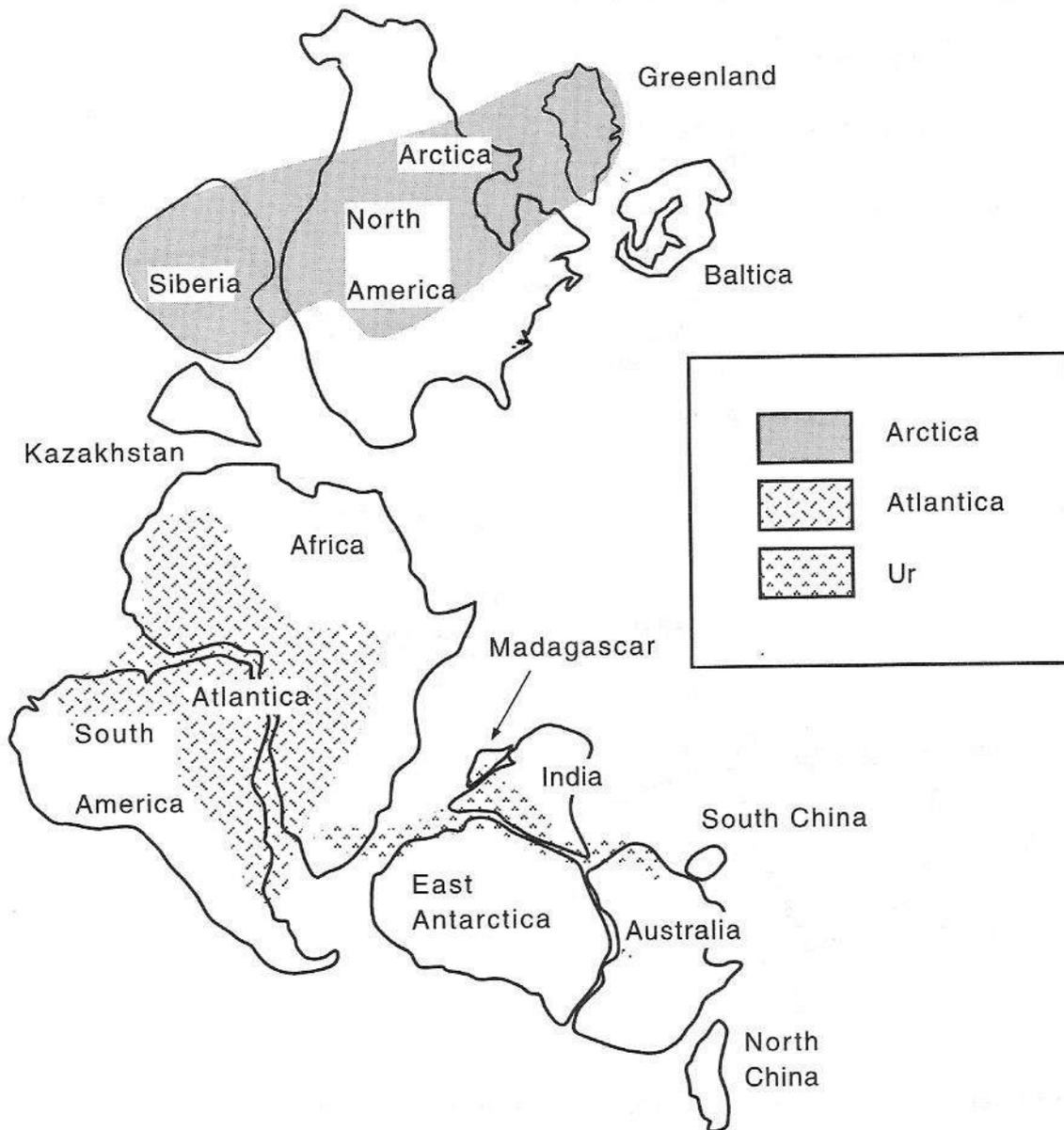


Fig. 3 : Configuration de la 'Paléopangée' d'il y a 1,1 Ga, proposée par Piper (2001, in Rogers & Santosh 2004) incluant les trois plus vieux assemblages continentaux (Arctica : 2,5 Ga ; Atlantica : 2,0 Ga ; Ur : 3,0 Ga).

Nb: le terme 'Paléopangée' est utilisé par Piper (2001) pour rappeler la forme courbée N-S de l'assemblage des continents constituant la Pangée permo-triasique sensu stricto (voir Fig. 4). En réalité le supercontinent illustré a pour nom Rodinia (voir [ici](#) et Fig. 4). In Rogers & Santosh, 2004. Les 'vieux' cratons sont entourés de 'plus jeunes' (parties blanches sur la figure constitués de 'terranes' -voir texte- de provenance et d'âge divers) par accolements successifs.

Arctida est d'âge néoarchéen (échelle géologique, Fig. 1) et comprend de nombreux cratons formés par l'accolement de 'terranes' (Howell, 1995), à savoir le craton Sibérien avec ses boucliers d'Anabar et Aldan, les cratons de Slave, du Wyoming, 'Superior', et nord-Atlantique d'Amérique du Nord. **L'océan arctique séparant les cratons sibériens et nord-américains a donné son nom au**

continent ou (micro)plaque Arctica. Arctida s'est progressivement constitué à partir de 2,5 Ga par accolements ou amalgames des boucliers canadien et sibérien et du bouclier du Groenland. Notons que le nom d'Arctida se rapporte à l'ensemble apparu pour la première fois à la transition Archéen/Protérozoïque, on parle alors d'Arctida-I pour cet ensemble, puis Arctida-II (transition permo-triasique) et finalement Arctica (Cénozoïque). La littérature consacrée n'est pas unanime sur l'appellation et signification exactes des termes Arctida et Arctica, suite aux difficultés des reconstitutions s'étalant sur une très longue période.

L'évolution tectonique d'Arctida est ainsi plus complexe que celle d'Antarctica, car formé de nombreux cratons impliqués plusieurs fois de manière indépendantes dans différentes orogènes depuis plus de deux milliards d'années. De plus, l'ensemble est vaste depuis l'Amérique du Nord (Canada) jusqu'en Sibérie. Dans le détail, Arctida fait partie du supercontinent [Kenorland](#) ([Lubnina et al. 2011](#), [Evans et al. 2016](#)) qui fut l'un des premiers supercontinents de la Terre, formé au Néoarchéen il y a environ 2,7 Ga, par accréation de cratons néoarchéens et formation d'une nouvelle croûte continentale (voir Superia et Vaalbara, Fig. 4). Kenorland comprenait alors des ensembles qui par soudures ou accolements ultérieurs (cf. les 'terranes) donneront des plaques, cratons ou continents formant chaque fois une 'pièce du puzzle' qui restera reconnaissable lors des orogènes qui vont suivre sur plus de deux milliards d'années. Ainsi se forment Laurentia (le cœur de l'Amérique du Nord actuelle et du Groenland), Baltica (la Scandinavie et la Baltique actuelle), l'Australie Occidentale et le Kalahari (Figs. 3 et 4).

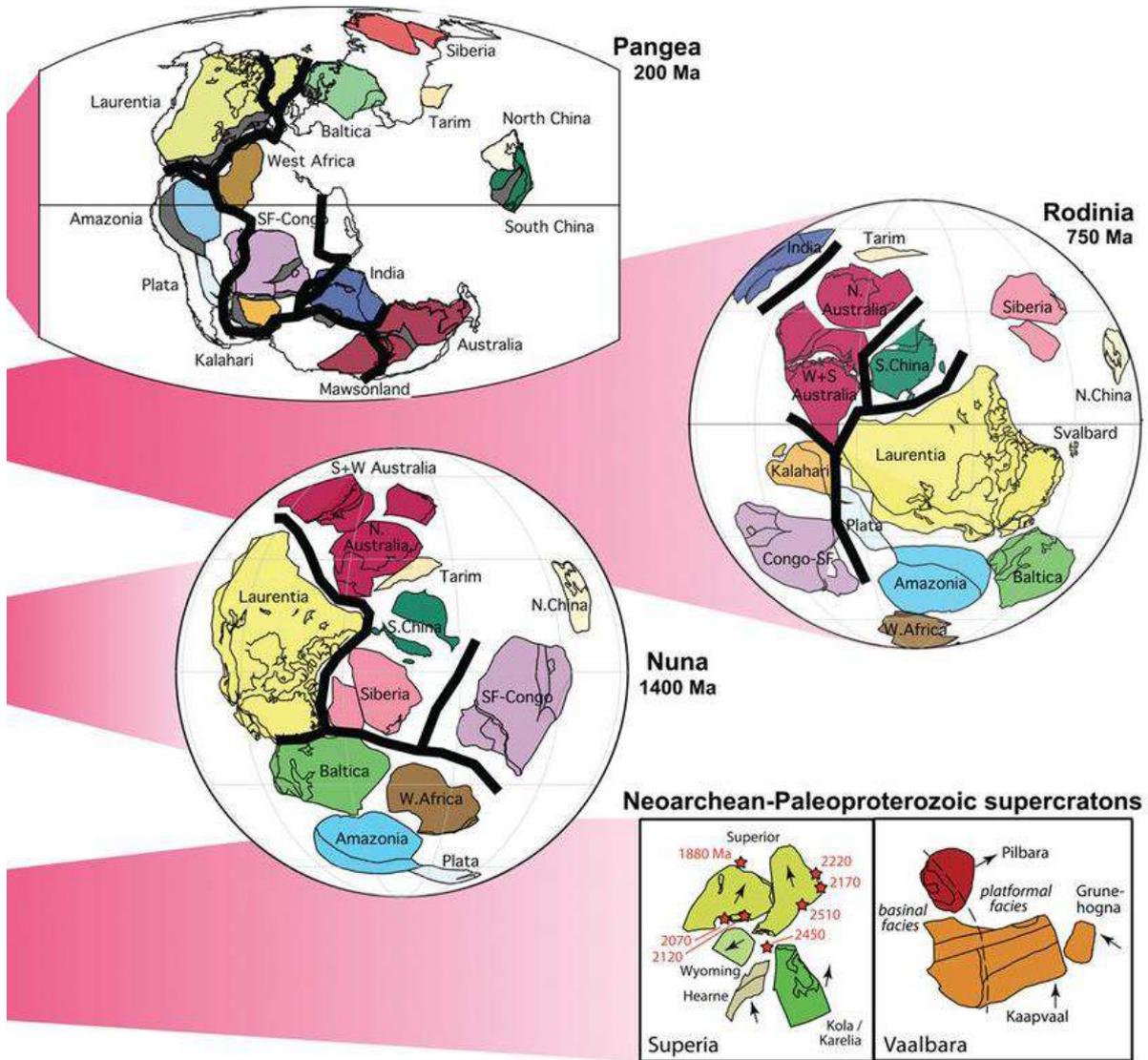


Fig. 4 : Evolution de la distribution des supercontinents, d'après [Evans \(2013\)](#). Abréviations : Ar3, Néoaarchéen ; Laur., Laurussie. Les "semi"-supercontinents sont indiqués en italique. La Pangée à 200 Ma est représentée dans le cadre de référence sud-américain actuel, la Rodinie à 750 Ma dans le cadre de référence paléomagnétique ([Li et al. 2013](#)) et le Nuna à 1400 Ma dans le cadre de référence paléomagnétique ([Pehrsson et al. 2015](#)). Les supercratons Superia ([Ernst & Bleeker 2010](#)) et Vaalbara ([de Kock et al. 2009](#)) sont représentés par des flèches indiquant le nord local actuel pour chaque bloc constitutif.

Le cœur de Kenorland est constitué du **Bouclier Baltique** faisant remonter ses origines à 3,1 Ga. Vu son ancienneté, de nombreuses reconstitutions de Kenorland sont proposées dans la littérature, de même pour le nom des cratons qui le composent, on se reportera à [Lubnina & Slabunov \(2011\)](#) pour une analyse de la question portant surtout sur la période néoaarchéenne. Une simplification des événements tectoniques est donnée par [Yakubchuk \(2019\)](#) comme suit : (1) à l'origine, nucléation de protocratons et formation du supercontinent Kenorland (2,7-2,5 Ga) ; (2) **cratonisation** suite à la fragmentation de Kenorland (2,45 Ga) et assemblage de Columbia, nouveau supercontinent (1,85 Ga) ; (3) réorganisation (après fragmentation et assemblage) en un nouveau supercontinent, Rodinia (1,0-0,72 Ga), et finalement fragmentation pour arriver à la situation actuelle avec formation du Gondwanaland (voir *Antarctique géologique 1/2*) et de la Pangée permotriassique (Figure 5).

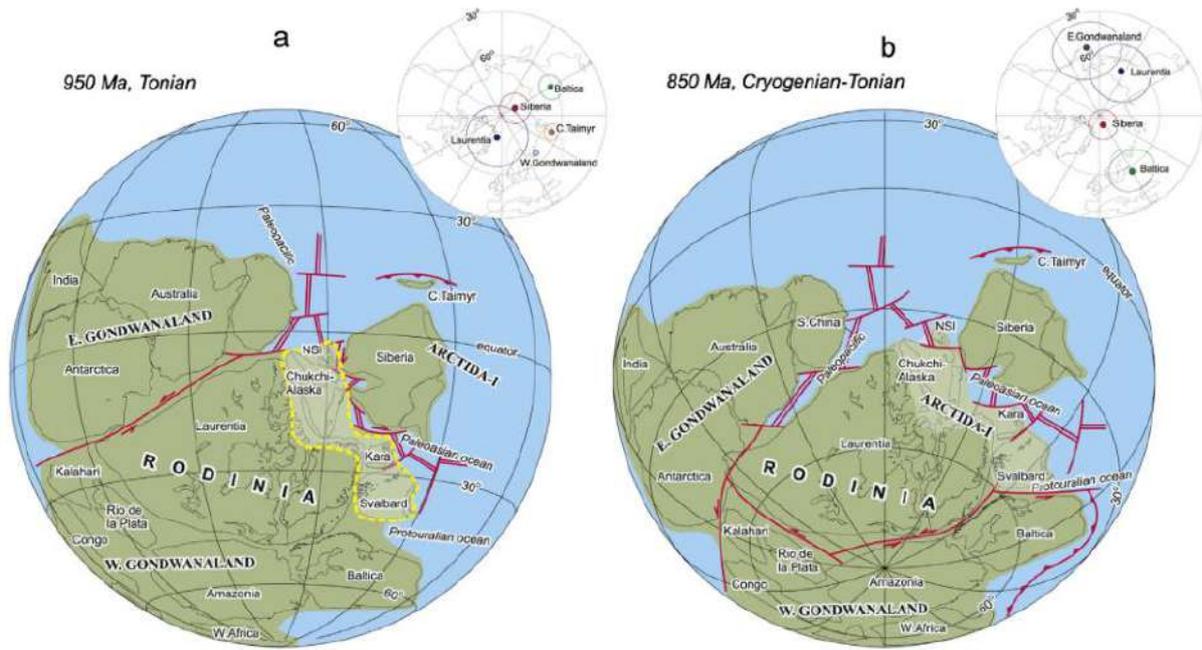


Fig. 6 : Figures 3a et 3b de Metelkin et al. (2015). Configuration tectonique des 'blocs' composant Arctida au Néoprotérozoïque (3a, Tonien - à gauche) et transition vers le Cryogénien (3b, à droite). L'échelle des temps géologiques est donnée à la Fig. 1. On voit que Arctida est en position subéquatoriale et nommée Arctida-I pour le distinguer de Arctida-II situé près du pôle Nord lors de la formation de la Pangée (Fig. 7). Baltica est dans les hautes latitudes Sud (4a) puis plus au Nord (4b). Pour la légende des principales des couleurs et traits tectoniques, se reporter à la Figure 8.

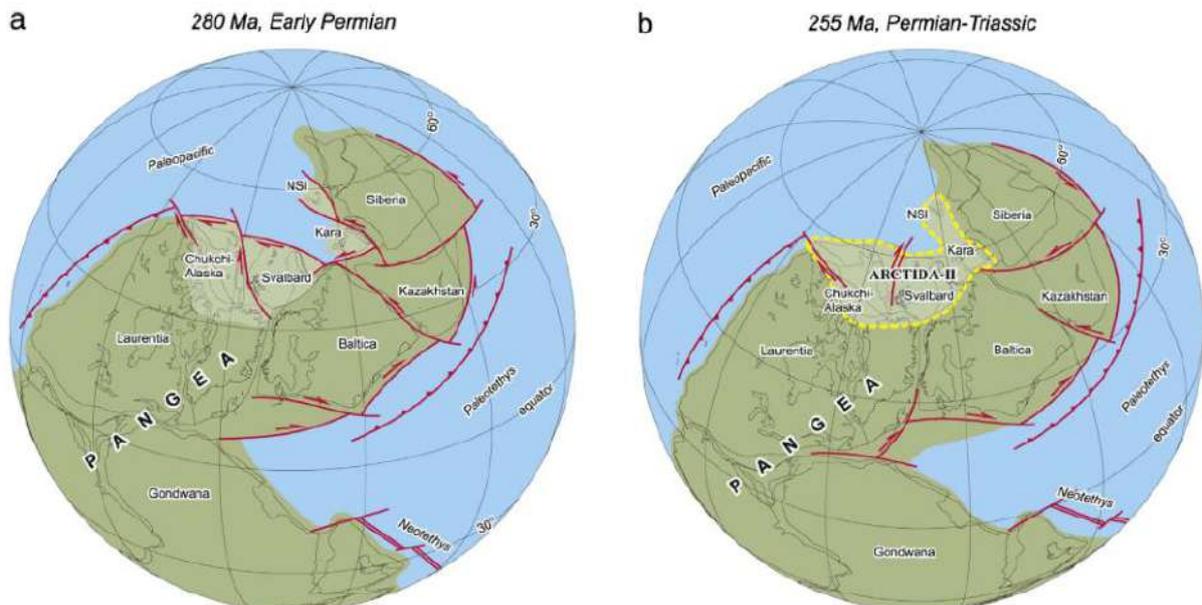


Fig. 7 : Figures 6a et 6b de Metelkin et al. (2015). Configuration tectonique des 'blocs' composant Arctida-II lors de la Pangée, au début du Permien (5a, à gauche) et à la transition vers le Trias (5b, à droite). L'échelle des temps géologiques est donnée [ici](#). On voit Arctida-II situé près du pôle Nord lors de la formation de la Pangée (Figs. 3 et 4). On voit que Baltica est dans les hautes latitudes Sud (4a) et est passé dans l'hémisphère Nord (5a et 5b) depuis la fragmentation de Rodinia (Fig. 3). Pour la légende des principales des couleurs et traits tectoniques, se reporter à la Figure 7.



Fig. 8 : 1 = Continents, 2 = blocs de Arctida, 3 = bassins océaniques, 4 = rifts et dorsales médio-océaniques, 5 = marges continentales actives et 6 = failles transformantes.

Arctida-II représente le deuxième assemblage d'Arctida formé à la limite permo-triasique. Les masses continentales de l'Arctique se trouvent au niveau du 60^{ème} parallèle dans les régions tempérées à subpolaires de l'hémisphère Nord. L'histoire méso-cénozoïque des structures arctiques de ces régions eut lieu lors de leur détachement de Laurentia (Chukchi-Alaska, Fig. 6b) et de multiples collisions avec le craton nord-oriental Siberia jusqu'à la configuration actuelle.

11.2 L'hémisphère Nord

11.2.1. L'Atlantique nord et le Groenland

C'est lors de ces événements de fragmentation d'Arctida que l'Océan Atlantique nord (Fig. 9) se formera dès le début du Cénozoïque, de même que l'Océan Arctique avec ses deux sous-bassins arctiques amériasiens et eurasiens. Il en résulte une redistribution des blocs continentaux dans l'ensemble de la partie NE de l'Arctique actuel bordé des grandes plateformes rattachées à l'Amérique du Nord et à l'Eurasie. On peut également suivre cette évolution paléotectonique dans [Scotese 2001](#) et se reporter à Gaina et al. (2014) pour plus de détails.

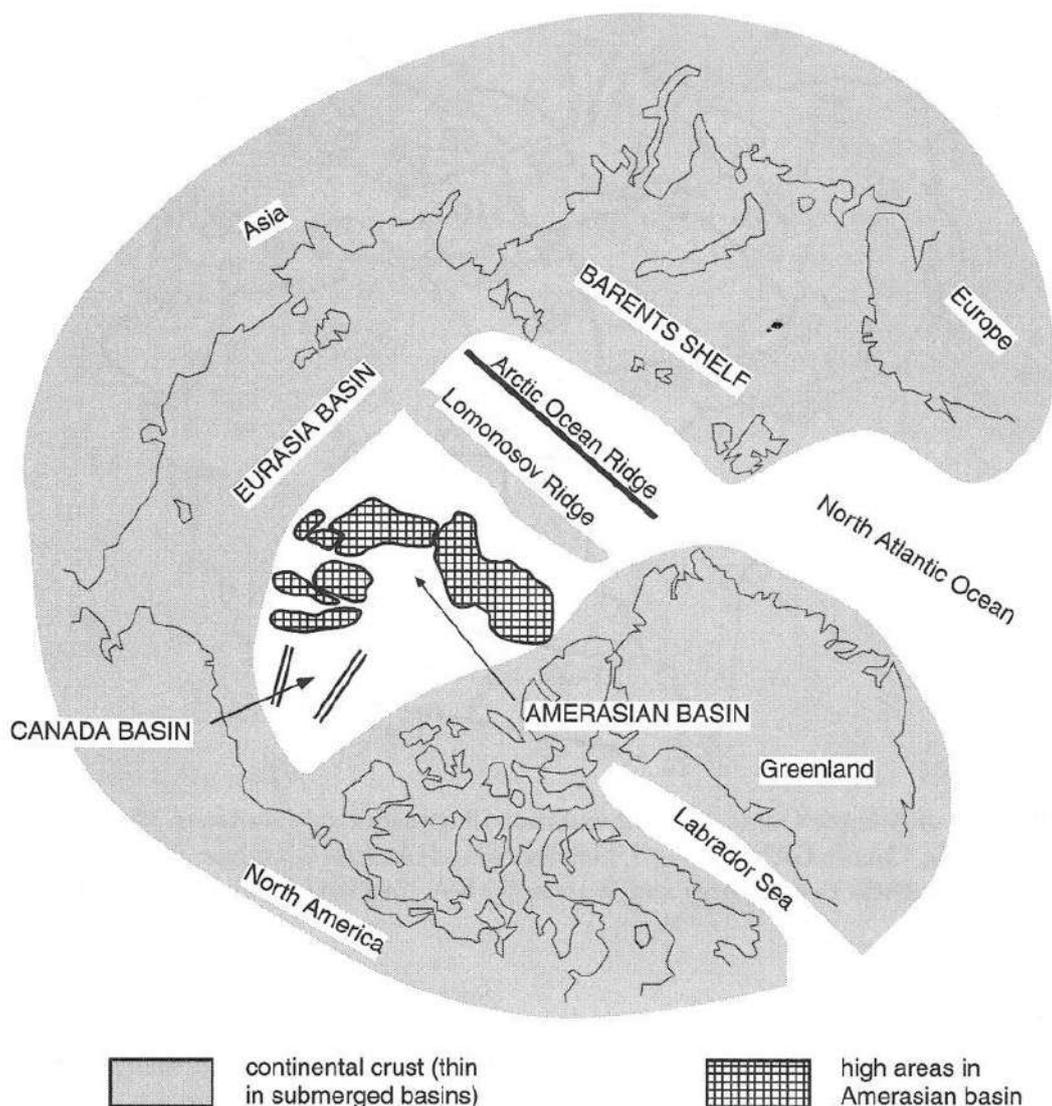


Fig. 9 : Ouverture de l'Atlantique nord au Cénozoïque suite à la séparation de l'Amérique du Nord et de la Sibérie. Les données

paléomagnétiques étant peu nombreuses, l'évolution est surtout basée celles disponibles le long de la zone de divergence du nord de l'Islande dans le bassin eurasien qui sépare la Ride de Lomonosov de la mince croûte cratonique de la Sibérie. Le bassin amérien proviendrait de la rotation de l'Alaska s'éloignant du Canada.
 D'après Rogers & Santosh, 2004. La Ride de Lomonosov est une chaîne de montagnes sous-marine située à 1000 m de profondeur, traversant tout l'océan arctique, du Groenland à la Sibérie en passant par le pôle Nord. Des stries au sommet suggèrent qu'un ice-shelf (plateforme de glace) auraient couvert le centre de l'océan arctique (Jakobsson et al. 2008).

Dans ce contexte le Groenland qui porte aujourd'hui une des deux calottes glaciaires permanentes de la planète, a une longue histoire géologique. Il renferme notamment les roches parmi les plus vieilles de la planète, à savoir les roches d'Isua (ceinture de roches vertes), âgées de 3,7 à 3,8 Ga, avec sans doute des premières traces de vie. Le soubassement du Groenland appartient au Bouclier Laurentia, qui constitue le coeur du continent Amérique du Nord stabilisé vers 1,6 Ga. Le Groenland renfermant surtout des roches intrusives archéennes et paléoprotérozoïques de 3,2 à 1,75 Ga (Fig. 10), avec localement des séries datées à plus de 3,8 Ga.



Fig. 10 : Fig. 2 in [Henriksen et al. 2009](#). Carte simplifiée (actuelle) montrant la répartition des provinces du socle archéen et paléoprotérozoïque du craton groenlandais (voir Fig. 1). Les points noirs et les cercles ouverts indiquent des roches respectivement archéennes et paléoprotérozoïques suspectées.

Les phénomènes géologiques ultérieurs se dérouleront ensuite à la périphérie du craton avec formation de bassins sédimentaires, notamment au nord et nord-est, avec remplissages de séries sédimentaires épaisses jusqu'à 18 km. Le Groenland (et le Bouclier Baltique) sera impliqué dans une série d'orogénèses durant le Paléozoïque dont l'apogée eut lieu à la transition Silurien/Dévonien (non discuté ici).

Finalement la (micro)plaque Greenland se détachera de la plaque nord-américaine ('Laurentia') au cours de plusieurs périodes de rifting, la plus importante au cours du Crétacé inférieur (il y a environ 140 Ma) avec l'ouverture de la plaque eurasienne en Baie de Baffin et Mer du Labrador; la dernière phase d'extension s'est propagée il y a environ 70 Ma à partir du sud dans l'ensemble du bassin au Crétacé final pour se terminer à l'Oligocène (Schiffer *et al.*, 2019) (Fig. 11).

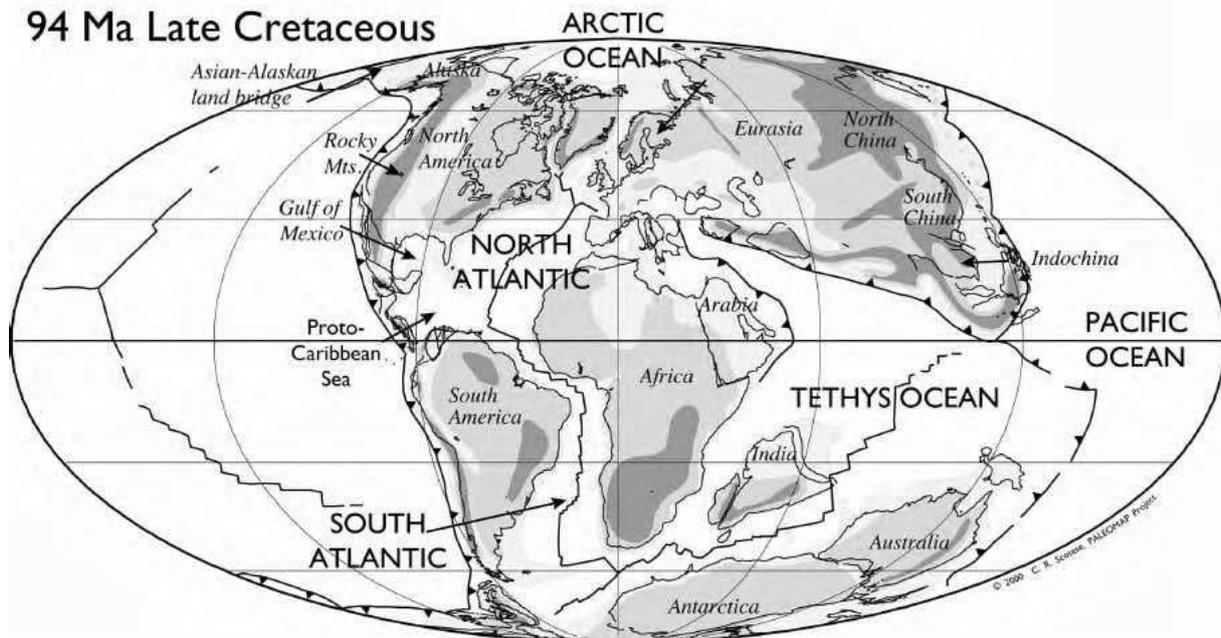


Fig. 11 : Le Groenland est séparé de la plaque nord-américaine (à comparer in Scotese 2001 avec la situation au Jurassique) en même temps qu'il s'éloigne de la plaque eurasiatique. D'après Scotese, 2001.

A l'Est du Groenland, les premiers événements de rifting à l'origine de la séparation du Groenland de la Scandinavie (Norvège) datent de la fin du Permien. Un premier rift quasi continu et relativement étroit s'est développé de la Grande-Bretagne à la Norvège de la fin du Jurassique au début du Crétacé, comme le long de la côte ouest du Groenland. Ensuite, dès l'Eocène, après l'ouverture de la mer de Labrador-Baffin l'ouverture de l'Atlantique se propage de sud au nord le long de la côte est du Groenland, vers le Détroit de Fram entre le Spitzberg et le NE du Groenland, pour se modifier à l'Oligocène (Fig. 12) avec le détachement de la microplaque de Jan Mayen et l'apparition progressive de l'Islande.

Cette dislocation de plaques continentales séparera définitivement d'abord le Groenland puis l'Eurasie de la plaque nord-américaine suivant d'abord une direction OSO-ENE jusqu'à la fin du Crétacé et ensuite NNO-SSE au cours du Tertiaire (Mosar et al. 2002) (Fig. 12) connectant le monde arctique avec le bassin de l'Atlantique. C'est avec l'ouverture du Détroit de Drake, côté Antarctique puis du détroit de Fram au Nord que se met en marche la machinerie océanique qui contrôlera l'ère glaciaire cénozoïque et les glaciations. L'extension généralisée de l'Arctique est à travers la formation de nombreux bassins ou grabens larges de 10 à 40 km sur la plateforme continentale périarctique, aussi à l'origine de la création d'une des plus grandes provinces offshore d'hydrocarbures dans les bassins sédimentaires de l'Arctique dans le nord-est du Groenland et en Sibérie orientale. Les bassins sont remplis de séries (sédimentaires) d'épaisseur maximale de 3000 mètres.

D'énormes quantités de gaz naturel ont été cartographiées (voir carte dans l'addendum, partie 2/2) sous le plateau de Barents et le plateau de Kara en tant que parties de la province pétrolière d'East Barents et de la province pétrolière de Sibérie occidentale. Le pétrole et le gaz naturel se

trouvent sous d'importantes parties du plateau des Tchoukches, du plateau de Beaufort et du bassin du Canada dans l'Arctique de la province pétrolière de l'Alaska et dans la province pétrolière d'Amérasia (partie 2/2).

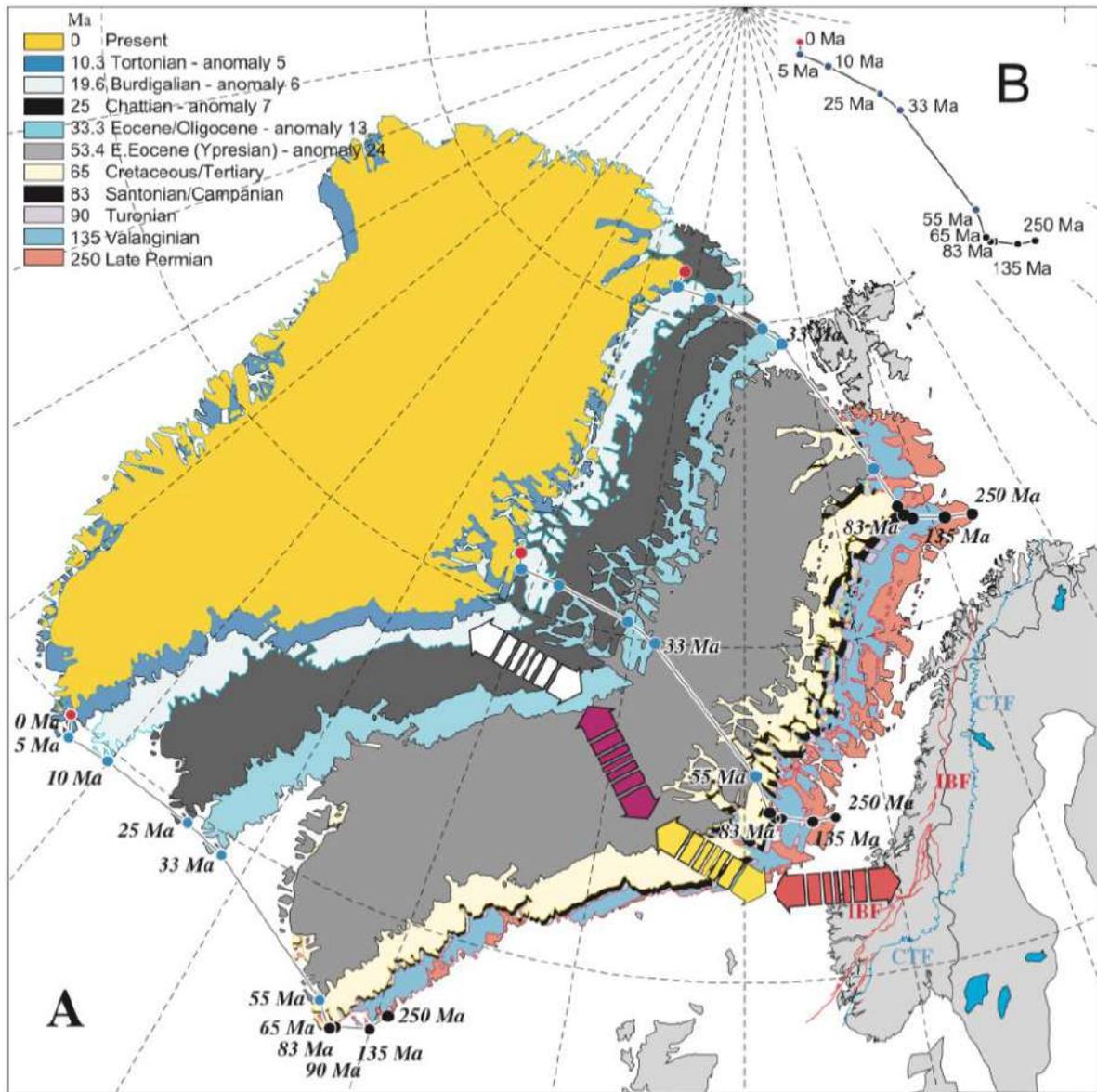


Fig. 12 : Reconstitutions des plaques pour le Groenland par rapport à l'Europe (selon les pôles de rotation révisés dans [Torsvik et al. 2001](#)) avec l'Europe fixée. (A) Les positions successives du Groenland mettent en évidence les directions d'ouverture, les points (noirs, jaunes, rouges) et lignes de jonction montrent la trajectoire de zones distinctes du Groenland. Les grandes flèches indiquent qualitativement les principales directions d'ouverture successive ; (B) Trajectoire de déplacement du point sur la Terre de Jameson (point rouge) avec attribution d'âge pour chaque étape d'ouverture successive. D'après [Mosar et al. 2002](#).

Plusieurs épisodes de volcanisme vont accompagner cette dynamique d'extension, de la zone polaire. La première série est permo-triasique (Fig. 1), comme le grabben ouest européen et, correspond aux [trapps](#) de Sibérie (centrée sur 250 Ma) et associé à un point chaud profond. Elle a été responsable de la plus grande extension de masse connue engendrée par une énorme émission de CO₂, probablement liée à son interaction sous la forme d'intrusions magmatiques dans les dépôts de charbon sibériens (Reichow et al. 2009, Ogden et al. 2012).

Une seconde phase de magmatisme s'est produite au début du Crétacé autour du bassin arctique (HALIP : province ignée du Haut Arctique) réparti sur la plateforme sibérienne, la « ride Alpha » au centre du bassin canadien et sur la côte nord de la plaque nord Américaine, avant la séparation du Groenland (Fig. 13). Son âge tourne entre 130-95 Ma. Certains y voient la poursuite de la migration du point chaud sibérien.

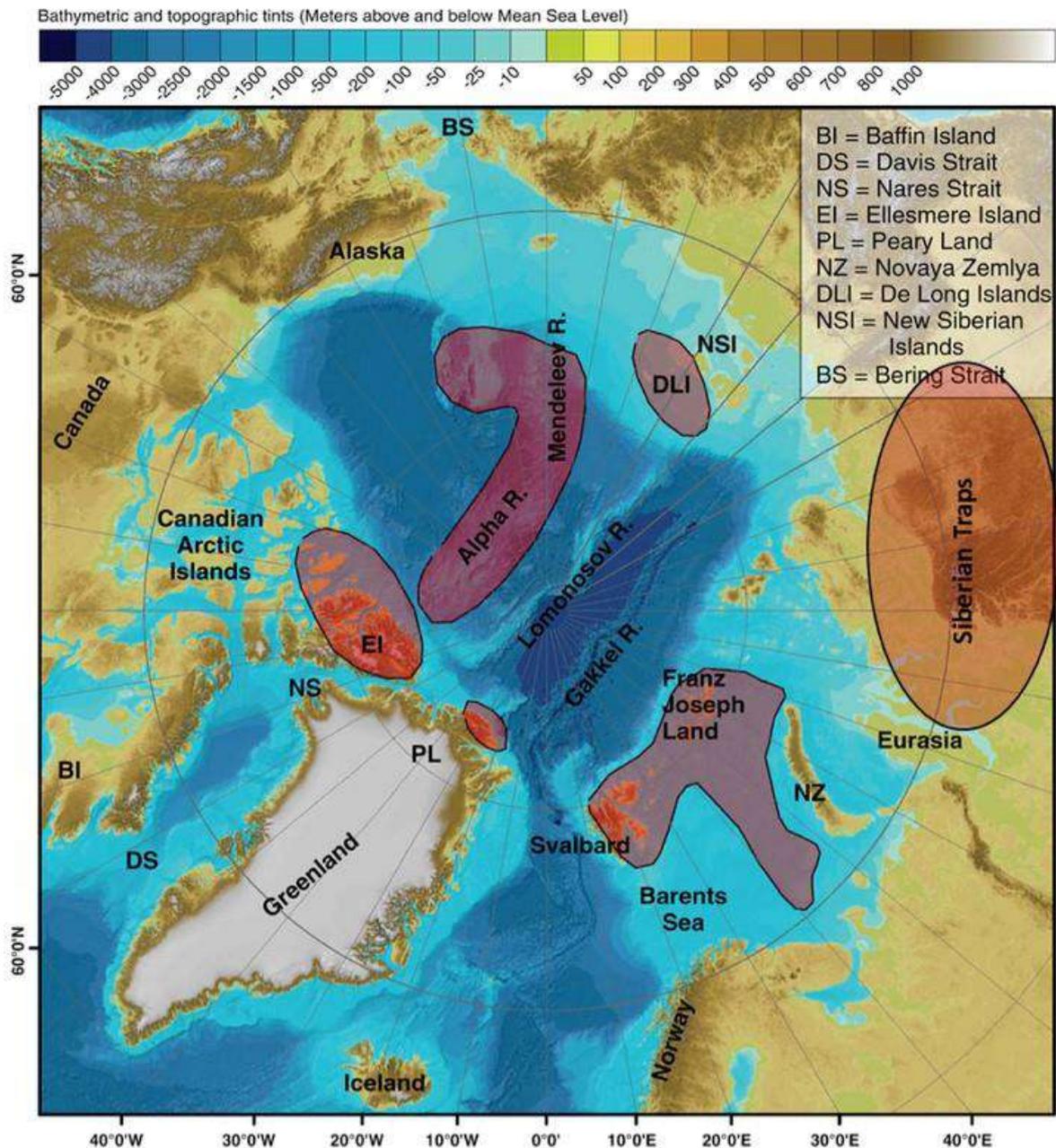


Fig. 13 : Province magmatique Crétacé du haut Arctique, (HALIP) 130-90 Ma ? D'après [Birchall et al. 2018](#).

Enfin de 67 à 40 Ma, c'est la mise en place de la NAIP (North Atlantic Igneous Province), plus connue sous le nom de basaltes de Thulé qui précèdent de peu l'ouverture de l'Atlantique. Le Groenland connaîtra également plusieurs épisodes volcaniques (début du Paléogène, à partir de 65 Ma et Fig. 14) avec formation de plateaux basaltiques épais de plusieurs centaines de mètres jusqu'à 2,5 km suivant les régions sur environ 65 000 km² ([Meyer et al. 2007](#)). **Ces injections magmatiques dans les bassins de plateformes décrits plus haut ont entraîné un dégazage de CO₂ énorme**

responsable selon certains auteurs du PETM (discussion dans Prétat et Jacobs, 2019-SCE, [ici](#)), le plus grand réchauffement abrupt du Cénozoïque à la limite Paléocène /Eocène.

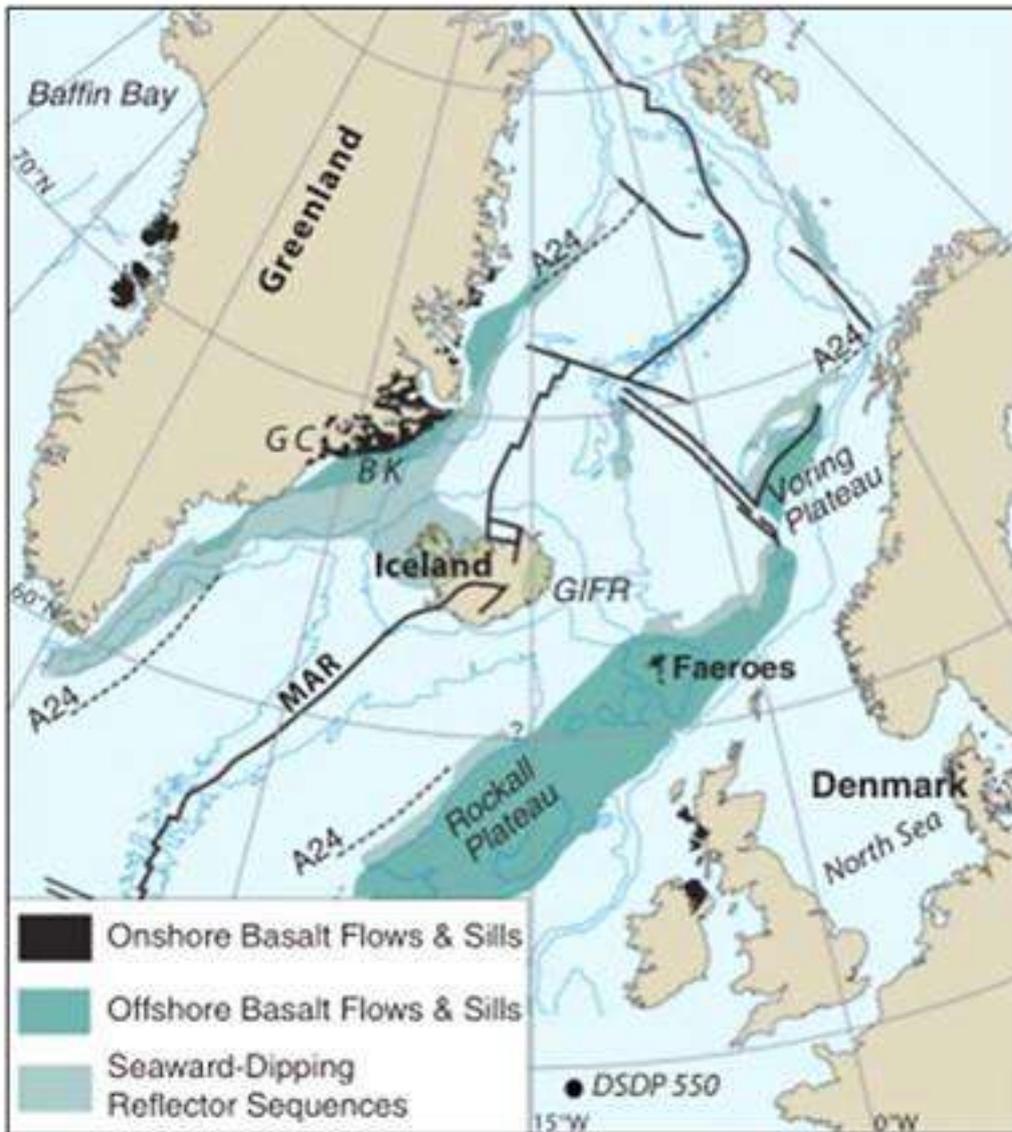


Fig 14 Carte des épanchements basaltiques thuléens d'après Storey et al. 2007. Les SDR's ou Seaward deeping reflectors sont des prismes progadants de coulées basaltiques épicontinentales qui se sont mises en place en bordure de l'océan en train de se former. A noter qu'ils ont formé la GIFR, ou ride Groenland-Islande-Faeroe, fort peu profonde à l'Ouest ride qui va jouer un rôle majeur de barrage provisoire dans l'évolution de la circulation thermohaline.

Cette activité cesse à l'Eocène moyen vers 48 Ma, sauf en Islande et sur Jan Mayen, et des dépôts marins littoraux et de grands deltas se mettent en place dans les vallées éventrant la plateforme continentale. Ils seront recouverts par les dépôts glaciaires ou *tills* depuis 9 Ma et au Quaternaire. L'érosion glaciaire sera fort intense et déposera de grands deltas de sédiments détritiques sur les plateformes continentales bordant le Groenland.

11.2.2. Le bassin arctique

Ce bassin est mal connu en raison de son englacement. Les premières données commencent à être accessible, notamment via les géologues russes.

La crête de Lomonosov traverse l'océan Arctique depuis le plateau Lincoln (au large de l'île d'Ellesmere et du Groenland) jusqu'aux îles de la Nouvelle-Sibérie au large des côtes du nord de la Russie. Elle divise l'océan Arctique en deux grands bassins : le bassin eurasiatique du côté eurasiatique de la crête et le bassin amériasiatique du côté nord-américain. Cette structure surplombe de plus de 3000 mètres au-dessus des planchers de ces bassins et à son point culminant. On pense que cette crête est un rebord de la croûte continentale eurasiatique qui s'est séparée de la marge de la mer de Barents-Kara et qui s'est affaissée à -3000 m au début de la période du Tertiaire (il y a environ 64 à 56 millions d'années, Fig. 1). Le côté de la crête faisant face à l'Eurasie est délimité par des failles de hemi-graben, plongeant à 5000 m de profondeur, alors qu'elle est en pente douce vers l'Amérique du Nord. Cela ressemble à une épaule du [rift de Gakkel](#).

Le sous-bassin amériasiatique et le sous-bassin eurasiatique, tout comme l'Atlantique nord sont entourés de vastes plateaux continentaux aujourd'hui submergés. Ils correspondent à une péninsule post-[hercynienne](#), remaniés par les transgressions mésozoïques avant d'être défoncés par les glaciations néogènes. Il s'agit notamment du plateau des Tchouktsches et du plateau de Beaufort le long de l'Amérique du Nord; du plateau de Lincoln le long du nord du Groenland; du plateau de Barents, du plateau de Kara, du plateau de Laptev et du plateau de Sibérie orientale le long de l'Eurasie. Ces plateaux sont retouchés par les bassins tectoniques colmatés par des séries sédimentaires épaisses au moins depuis le Permien, comme en Mer du Nord.

11.3. La glaciation sur l'Arctique (Miocène-Pliocène)

11.3.1. Cadre général

Au contraire de l'Antarctique, qui est un continent glacé cerné par l'océan, l'Arctique est un océan entouré de continents. Le pôle Nord est un point fictif sur le plancher océanique, sous une banquise se déplaçant au gré des courants giratoires. L'Arctique renferme plusieurs bassins profonds limités de grandes mers côtières du côté de l'Asie et de chapelets d'îles du côté de l'Amérique du Nord. Il est coupé par la dorsale médio-arctique, une dorsale lente, qui prolonge la dorsale médio-atlantique, ce qui conduit à l'éloignement de l'Asie de l'Amérique du Nord et du Groenland (Figs. 12 et 14). **Ainsi chaque année, l'océan arctique s'élargit un peu plus d'une dizaine de centimètres) poursuivant le mouvement d'expansion active des fonds océaniques entamé dès la fragmentation de la Pangée permo-triasique .**

Dans cette évolution paléotectonique, l'ère cénozoïque est une ère très active. Le démantèlement de la Pangée a cependant commencé au Jurassique, ce qui a bloqué progressivement la circulation équatoriale de la Téthys (voir Fig. 11 et Scotese 2001), très active au Crétacé, notamment par la collision Inde-Asie il y a 35 Ma et l'émersion progressive du détroit de Balboa qui deviendra l'isthme de Panama. Cette dislocation de la Pangée a également permis la migration progressive des continents en position polaire. Le rifting très actif au Crétacé, se ralentit vers 45 Ma, au cours de l'Eocène. **Au début du Cénozoïque, il ne semble pas y avoir la moindre trace de glaciers en zones polaires, sauf localement en Antarctique (Monts Gamburtsev, 3000 m). Le bassin arctique est en position polaire, lacustre (donc gèle tous les hivers) et bordé de forêts décidues jusqu'à l'aube de l'Eocène, mais une banquise existe déjà dans l'Atlantique nord dès la fin du Crétacé (Mac Leod et al. 2011).**

11.3.2. La circulation thermohaline et l'AMOC

Ainsi, tout comme pour l'Antarctique (ouverture du passage de Drake et de Tasmanie et formation du courant péri-antarctique, voir SCE, [1/2](#) et [2/2](#)), la fragmentation et la réorganisation des continents ou 'pièces du puzzle' tectonique va avoir une influence considérable sur les ouvertures et/ou fermetures de passages océaniques, également sur leurs approfondissements et sur la circulation des courants marins, la circulation thermohaline actuelle, dont notre Gulf Stream.

Les répercussions sur l'évolution du climat seront importantes et liées à une réorganisation des zones de formation d'eaux profondes qui deviennent actives aux hautes latitudes de l'hémisphère Sud au début du Tertiaire, puis au nord de l'Atlantique à la fin du Tertiaire (Ramstein, 2015). Ces eaux sursalées (denses) et froides proviennent à la fois de l'évaporation dans le zone Mer Rouge et Méditerranée et surtout de la formation de la banquise qui éjecte de la saumure en se formant. Le bassin arctique actuel n'intervient pas encore dans la circulation thermohaline par ses eaux profondes et froides: le détroit de Fram n'est pas encore assez profond, formant un seuil à - 2 545 m. Ce mouvement de bascule sud-nord s'accompagne de l'activation par étape de l'AMOC (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*) avec transports de chaleur et plongée d'eaux profondes (*Figure 3 in SCE, [ici](#)*) (Fig. 15) .

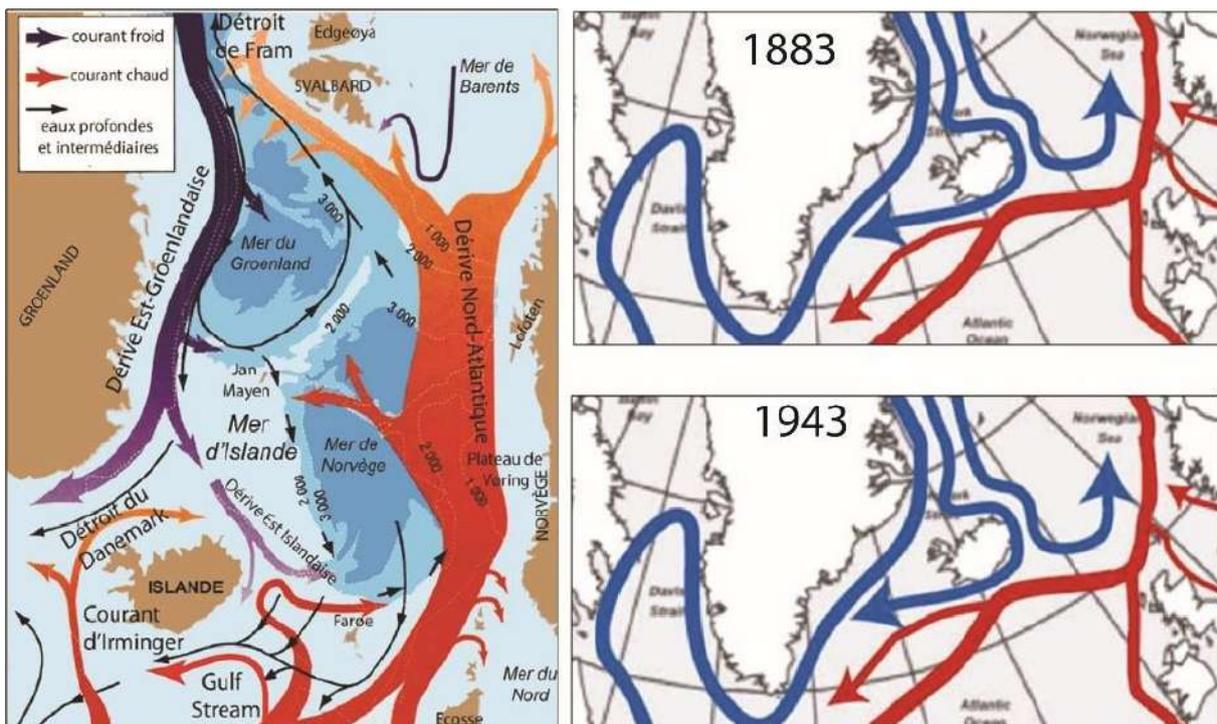


Fig. 15 . Carte des courants marins de l'Atlantique Nord et du bassin arctique. Flèches noires fines : eaux profondes froides et sursalées (NADW). A droite : circulation nord-atlantique en 1883 (reconstituée d'après Mohn, 1887) et en 1943 (carte marine US Army) (Van Vliet-Lanoë, 2018).

La circulation thermohaline existe depuis 35 Ma sous une forme réduite et devint fonctionnelle en mer de Norvège vers 23 Ma, et l'essentiel de la circulation jusqu'à 20 Ma est encore restreinte à l'est de l'Atlantique via la fosse de Rockall : le seuil entre l'Islande et les Féroé déjà s'affaissé et inondé (Uenzelmann-Neben & Gruetzner, 2018; [Edenoux 2015](#) et [ici](#)). Les derniers apports d'eaux chaudes téthysiennes disparaissent entre 16 et 15 Ma. L'isthme de Panama émerge ensuite progressivement

vers 15 Ma ([Montes et al. 2012a](#)). Ensuite a lieu une période de réchauffement climatique ([l'Optimum climatique du Miocène moyen](#)) suivie d'un refroidiss

ement important avec indices de glaciation à la fin du Miocène moyen en Haut Arctique (10 Ma ; [Montes et al. 2012b](#)). Ce phénomène a favorisé, à partir de 9,5 Ma, la croissance de la calotte du Groenland, de la plate-forme est-canadienne et des glaciers islandais (Van Vliet-Lanoë, 2013). Les événements tectoniques (zone faillée du Spitzbzerger) vont à nouveau assurer un rôle essentiel dans la poursuite de l'englacement, en parallèle avec la subsidence tardive du plateau Groenland-Islande et un approfondissement du seuil entre l'océan arctique et l'Atlantique nord ([détroit de Fram](#)) permettant le plongement d'eaux froides profondes le long de la côté Est du Groenland au Messinien, en relation avec **la première grande glaciation mondiale à 6,7 Ma** et l'ouverture du Détroit de Béring.

La plongée d'eau profonde froide est effective dans l'Atlantique Nord vers la fin du Tertiaire, il y a environ 14 Ma au cours du Miocène (Fig. 16), lors de la phase tectonique du Langhien-Serravalien (Herold et al., 2008) suite à deux événements tectoniques majeurs, d'abord la fermeture du bras [est-téthysien](#) vers 35 Ma par collision de la plaque arabe avec l'Eurasie (comparez la Fig. 17 – Miocène, avec la Fig. 11 -transition Crétacé/Tertiaire) et ensuite la fermeture progressive du paléo-détroit de Balboa par l'émersion de l'isthme de Panama à partir de 15 Ma (Miocène moyen) qui formait un bras de mer entre l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud et son émergence il y a 5-6 Ma. Suite à cette fermeture, la circulation intertropicale des eaux chaudes de surface, entraînées par les vents alizés, est déviée vers le nord pour former le Gulf Stream. Ce courant remontant de l'Afrique via les Caraïbes dans le golfe de Mexico générera une masse d'air chaud chargé d'humidité qui via le centre des USA constitua la source des neiges tombant sur la Nouvelle-Angleterre, l'Est du Canada et l'ouest du Groenland (Marshak 2010). En sortant du golfe du Mexique, le Gulf Stream vient ensuite lécher la péninsule Ibérique et les Iles britanniques, réchauffant l'Europe de l'Ouest et alimentant en précipitations la Scandinavie. Une branche continue jusqu'au Spitzberg avec une dérivation vers l'Arctique russe, alimentant le Nord de l'inlandsis Fennoscandien, c'est la Dérive Nord-Atlantique. Une autre branche part vers le NW, le courant d'Irminger, alimentant la calotte Islandaise et l'Est de la calotte groenlandaise, là où elle fond le plus actuellement.

Par conséquent, la croissance des calottes glaciaires de l'hémisphère nord est intimement liée à l'évaporation dans la zone intertropicale, donc à l'accumulation d'énergie solaire dans cette partie de l'océan mondial. Les calottes se forment toujours quand l'océan est encore chaud et le niveau marin élevé (Broecker & Denton, 1990).

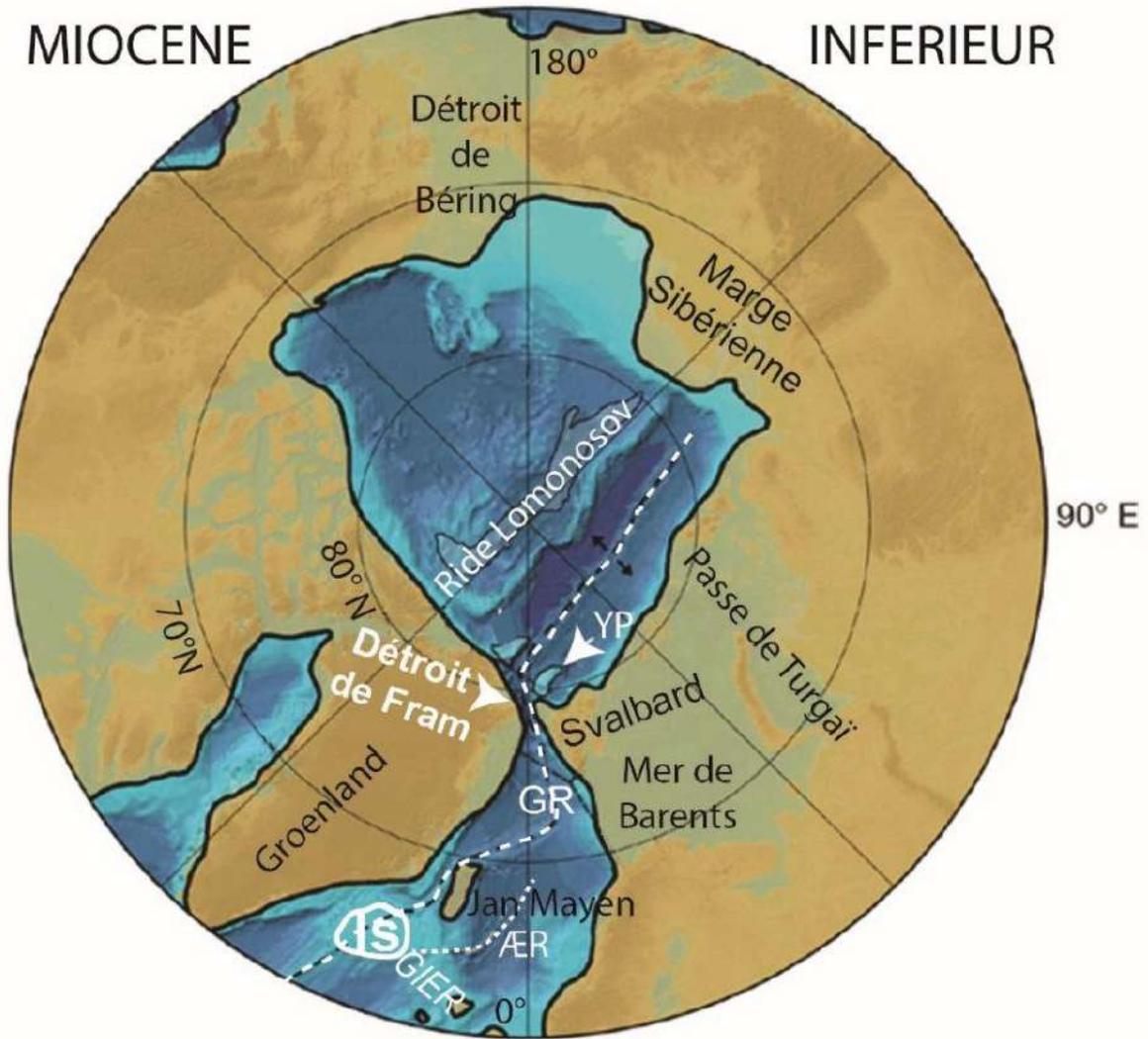


Fig. 16 : Paléogéographie de l'Arctique au Miocène inférieur final (modifié d'après [Jakobsson et al. 2008](#)).

Miocene 14 Ma

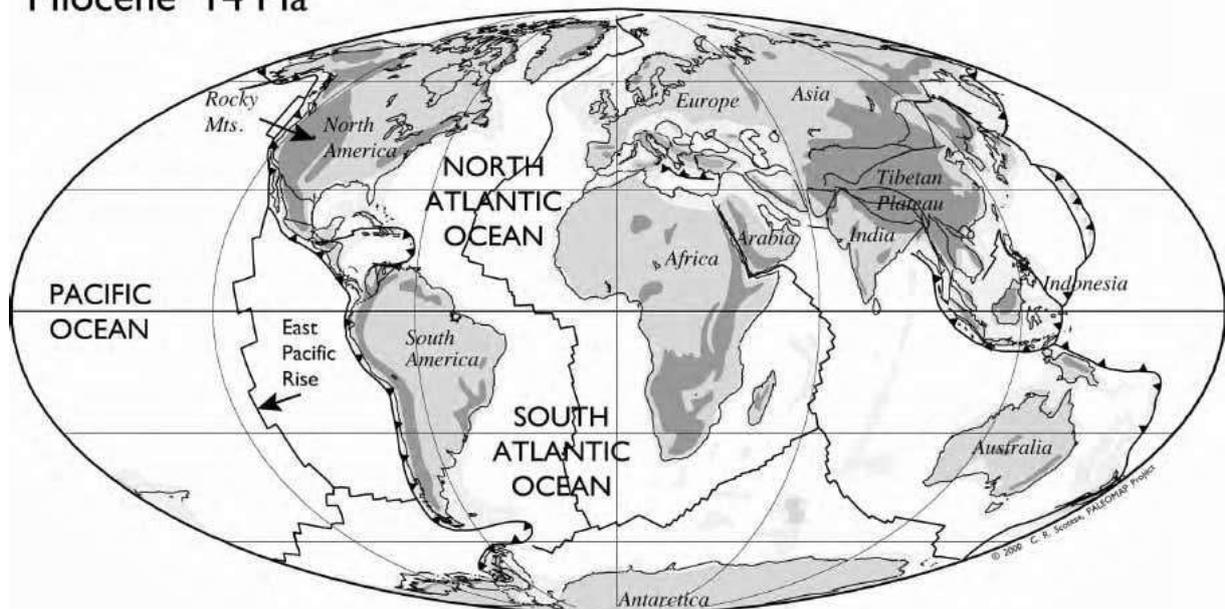


Fig. 17 : Suite à la fermeture de l'isthme de Panama et du bras est-téthysien (voir Fig. 11) au Miocène, la circulation océanique a modifié les échanges ou transports de chaleur dans l'hémisphère Nord entraînant l'activation de l'AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation).

Reconstitution paléotectonique d'après Scotese, 2001.

11.3.3. Le refroidissement Mio-Pliocène

Le refroidissement de l'Arctique est à peine plus tardif que celui de l'hémisphère Sud (Antarctique) suite à la présence d'une océan en position polaire avec une banquise dès le Maastrichtien (environ 60 Ma, Crétacé final ([Mac Leod et al. 2011](#), [Londono et al. 2011](#)) ensuite retour d'une banquise saisonnière dès 47 Ma durant l'Eocène, et un relief peu marqué (Van Vliet-Lanoë, 2013). La mer du Groenland s'ouvre un peu plus vers 33 Ma (Fig. 12) et 25 Ma en relation avec une réorganisation du rifting dans l'Atlantique nord vers 37 Ma (Van Vliet-Lanoë, 2013). **Les traces de glaciation sont observées en rebord de la plate-forme continentale du bassin arctique au début du Miocène et s'accroissent à la fin du Miocène avec la subsidence du haut fond Groenland-Islande ([Van Vliet-Lanoë, 2007](#))** . Les premières évidences sédimentaires apparaissent vers 9 Ma que ce soit au Groenland ou en Islande.

Les calottes se généralisent à la fin du Pliocène après 3,2 Ma ce qui va entraîner une baisse accélérée du niveau marin commencé à l'Oligocène avec l'englaciation de l'Antarctique vers 38 Ma (Abreu et Anderson, 1998).

Pour conclure, la morphologie du bassin de l'Atlantique Nord et celle de ses connexions au bassin arctique et à celui du Labrador sont contrôlées par la tectonique des plaques. Cette arrivée d'eau profonde est liée à l'élargissement et à l'approfondissement du détroit de Fram sous contrôle du rifting qui se prolonge dans le bassin par la ride volcanique de Gakkel entre l'Eurasie et la ride Lomonosov. Cette ride joint la ride médio-Atlantique au delta de la Léna en Sibérie.

Pour cette raison, la faible contribution actuelle de l'eau profonde du bassin arctique à la circulation thermohaline mondiale limite les échanges thermiques de celui-ci. Si le développement futur de la ride océanique atlantique ouvrait le détroit de Fram en profondeur, le régime thermique de l'océan mondial pourrait être fortement perturbé accentuant le refroidissement cénozoïque. **Le détroit de Fram est pour cette raison très important pour notre futur étant donné que l'évolution climatique mondiale des prochains 10 Ma est gérée à la fois par la migration de la plaque américaine en position polaire et par l'arrivée d'eau de fond froide et sursalée existant au fond du bassin Eurasien .**

Le déroulé des principaux événements (d'englacement) et les principales phases tectoniques sont reprises à la Fig. 18.

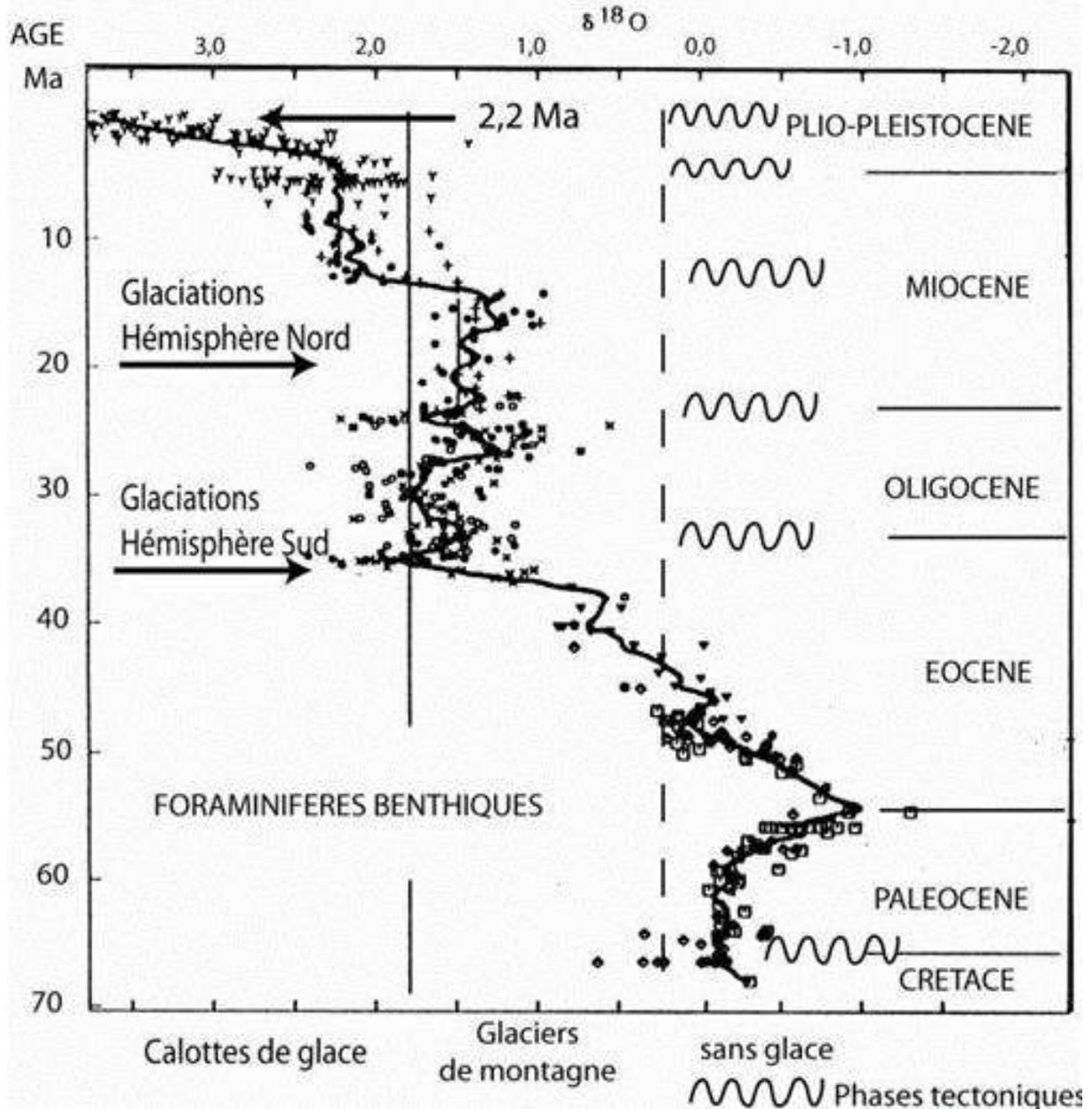


Fig. 18 : Courbe isotopique de l'oxygène et enregistrement des paléotempératures basé sur les foraminifères benthiques sur les derniers 70 Ma. Cette courbe montre un refroidissement progressif depuis 55 Ma. Les grandes calottes polaires apparaissent vers 35 Ma (Antarctique) et 20-15 Ma (les symboles caractérisent les différentes carottes utilisées). Noter les étapes de refroidissement en relation avec les phases tectoniques, cf. texte (modifié de Shackleton & Opdyke, 1973)

NOTES (communes aux deux parties)

Abreu V.S. & Anderson J.B. 1998. Glacial eustasy during the Cenozoic: sequence stratigraphic implications. Am. Ass. Petrol. Geol. 82, 1385-1400.

Balascio N.L., D'Andrea W.J., Bradley R.S. 2015. Glacier response to North Atlantic climate variability during the Holocene. Climate Past, Discuss., 11(3), 2009-2036.

Bjarnadóttir L.R., Winsborrow M.C.M., Andreassen, K. 2014. Deglaciation of the Central Barents Sea. Quat. Sci. Rev. 92, 208–226,

Björnsson H. 2017. Jöklar á Íslandi. Bókaútgáfan Opna, Reykjavík. 479 p. English translation 2019 The Glaciers of Iceland. Atlantis Adv. Quat. Sci. 2, 613 p., Atlantis Press, Springer.

LES GLACES

Broecker W.S., Denton, G.H., 1990. The role of ocean-atmosphere reorganisation in glacial cycles. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990QSRv....9..305B/abstract>

Lemieux-Dudon B. et al. 2010. Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores. *Quatern. Sci. Rev.* 29, 8–20. 9:305–341.

Cabedo-Sanz P., Belt, S.T., Jennings A.E., Andrews J.T., Geirsdóttir A. 2016. Variability in drift ice export from the Arctic Ocean to the North Icelandic Shelf over the last 8,000 years: a multi-proxy evaluation. *Quat. Sci. Rev.* 146, 99–115.

Colgan W, Box JE, Andersen ML, Fettweis X, Csathó B, Fausto RS, Van As D and Wahr 2015. [Greenland high-elevation mass balance: inference and implication of reference period \(1961-1990\) imbalance. *Ann. Glaciol.*, 56 \(70\), 105-117 \(2015\) \(doi:10.3189/2015AoG70A967\).](https://doi.org/10.3189/2015AoG70A967)

Cronin T.M. 2010. *Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present.* Columbia University Press, 431p.

De Vernal A., Eynaud F., Henry M., Hillaire-Marcel C., Londeix L., Mangin S. 2005. Reconstruction of sea-surface conditions at middle to high latitudes of the Northern Hemisphere during the Last Glacial Maximum (LGM) based on dinoflagellate cyst assemblages *Quaternary Science Reviews* 24 (7-9), 897-924

Don Easterbrook, 2016. *Evidence-Based Climate Science. Data opposing CO₂ emissions as the primary source of global warming.* Second Edition 2016. ISBN: 978-0-12-804588-6. Elsevier.

Dromart G. et al. 2003. Ice age at the Middle-Late Jurassic transition? *Earth Planet. Sci. Lett.* 213, 205–220.

Duplessy J.C., Morel P. 1990. *Gros temps sur la Planète.* Editions Odile Jacob, 297p.

Duplessy J.C., Ramstein G. 2013. *Paléoclimatologie, Tome 1 (Trouver, Dater et Interpréter les Indices), Tome 2 (Enquête sur les climats anciens).* CNRS Editions, EDP Sciences.

Dyke L.M., Andresen A.S., Seidenkrantz M.S., Hughes A.H.L., Hiemstra J.F., Murray, T, Bjørk A.A., Sutherland D.A., Vermassen, F. 2017. Minimal Holocene retreat of large tidewater glaciers in Køge Bugt, southeast Greenland. *Scientific Rep.* 7 (12330), doi:10.1038/s41598-017-12018-x.

Ezat M.M., Rasmussen T.L., Groeneweld J. 2014. Persistent intermediate water warming during cold stadials in the southeastern Nordic seas during the past 65 k.y.. *Geology*, 42 (8): 663 DOI: [10.1130/G35579.1](https://doi.org/10.1130/G35579.1)

Gaina C., Medvedev S., Torsvik, T.H., Koulakov, I.Y., Werner S.C. 2013. 4D Arctic: A Glimpse into the Structure and Evolution of the Arctic in the Light of New Geophysical Maps, Plate Tectonics and Tomographic Models. *Surveys in geophysics.* ISSN 0169-3298. 35, s 1095- 1122 . doi: [10.1007/s10712-013-9254-y](https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y)

Gjerde M., Bakke J., Vasskog K., Nesje, A. Hormes A. 2016. Holocene glacier variability and Neoglacial hydroclimate at Ålfotbreen, western Norway. *Quat Sci. Rev.* 133, 28-47.

Herbert T.D., Lawrence K.T., Tzanova A., Cleaveland, Peterson L., Caballero-Gill, R., Kelly, C.S. 2016. Late Miocene global cooling and the rise of modern ecosystems. *Nat. Geosci.* 9, 843–847.

Herold N.M. Seton, R.D. Müller, Y., M. Huber M. 2008. Middle Miocene tectonic boundary conditions for use in climate models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*,9, Q10009, doi:10.1029/2008GC002046.

Howell D.G. 1985. *Principles of Terrane Analysis. New applications for global tectonic.* Chapman & Hall, 245p.

Korte C. et al. 2015. Jurassic climate mode governed by ocean gateway. *Nat. Commun.* 6:10015 doi: 10.1038/ncomms10015.

Larsen S.H., Khan S.A., Ahlstrøm A.P., Hvidberg C.S., Willis M.J., Andersen S.B. 2016. [Increased mass loss and asynchronous behavior of marine-terminating outlet glaciers at Upernavik Isstrøm, NW Greenland. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 121, 241-256.](https://doi.org/10.1016/j.jglu.2016.05.001)

LES GLACES

- Lisiecki L.E. 2010a. Links between eccentricity forcing and the 100,000-year glacial cycle, *Nature Geoscience*, 3, 349-352.
- Lisiecki L.E. 2010b. A benthic $\delta^{13}\text{C}$ -based proxy for atmospheric $p\text{CO}_2$ over the last 1.5 Myr, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L21708, doi:10.1029/2010GL045109.
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. 2005. Pliocene-Pleistocene stack of globally distributed benthic stable oxygen isotope records. doi:10.1594/PANGAEA. 704257.
- Marcott S.A., Shakun J.D., Clark, P.U., Mix A.C. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science* 339, 1198–1201.
- Marshak S. 2010. *Terre, portrait d'une planète*. De Boeck, 833p.
- Mered M. 2019. *Les mondes polaires*. Presses Universitaires de France, 525p.
- Monnin, E. et al, 2001. Atmospheric CO_2 concentrations over the last glacial termination. *Science* 291, 112–114
- Ogde D.E., Sleep N.H. 2012. Explosive eruption of coal and basalt and the end-Permian mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(1), pp.59-62.
- Paillard D. 2001. Toward a new paradigm. <https://doi.org/10.1029/2000RG000091>
- Piskarev A., Poselov V., Kaminsky K. 2018. *Geologic Structures of the Arctic Basin*, Springer Verlag.
- Ramstein G. 2015. *Voyage à travers les climats de la Terre*. Editions Odile Jacob, 351p.
- Rasmussen T.L., Thomsen E., Moros M. 2016. North Atlantic warming during Dansgaard-Oeschger events synchronous with Antarctic warming and out-of-phase with Greenland climate. *Nature Sci. Rep.*, 6:20535, doi: 10.1038/srep20535.
- Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M. Davies, C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S. and Medvedev A.Y. 2009. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1-2), pp.9-20.
- Rogers J.W., Santosh M. 2004. *Continents and Supercontinents*. Oxford University Press, 289p.
- Schulz K.G., Zeebe R.E. 2006. Pleistocene glacial terminations triggered by synchronous changes in Southern and Northern Hemisphere insolation: The insolation canon hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.* 249 – 3 326-336 – <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.004>
- Shackleton N.J., Opdyke, N.B., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28238 : oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and a 106 year scale. *Quaternary Research*, 3, 39-55.
- Stranne C., Jakobsson M., Björk G. 2014. Arctic Ocean perennial sea ice breakdown during the Early Holocene Insolation Maximum. *Sci. Rev.* 92, 15, 123-132
- Storey M., Duncan R.A., Swisher C.C. 2007. Paleocene-Eocene thermal maximum and the opening of the northeast Atlantic. *Science*, 316(5824), pp.587-589.
- Strahler A.N. 1987. *Modern Physical Geography* October 1987 John Wiley & Sons Inc. 3rd Revised Edition.
- Trompette R. 2003. *La Terre, une planète singulière*. Belin, Pour la Science, 303p.
- Uenzelmann-Neben G., Gruetzner, J. 2018. Chronology of Greenland Scotland Ridge overflow: What do we really know? *Marine Geol.* 406, 109-118.

LES GLACES

Van Andel T.H. 1994. [New Views on an Old Planet: A History of Global Change](#). 2nd Edition. Cambridge University Press 1994, ISBN-13:9780521447553 doi: [10.2277/0521447550](#)

Van Vliet-Lanoë B. 2007a. The autocyclic nature of glaciations. Bull. SGF, 178, 4, 257-272

Van Vliet-Lanoë B. 2007b. Le prélude au Quaternaire : les modalités d'entrée en glaciation (65 Ma – 2,2 Ma). Quaternaire, 18, 2, 111-128.

Van Vliet-Lanoë B. 2013. Cryosphère, soixante millions d'années d'évolution de notre planète. Vuibert, 416p en ligne sur researchgate https://www.researchgate.net/publication/303177050_Cryosphere

Van Vliet-Lanoë B. 2018. Le réchauffement climatique actuel : une évolution thermique naturelle au forçage oublié. Mythes, Mancies & Math., WordPress, 3/03/2018. <https://mythesmanciesetmathematiques.wordpress.com/2018/03/05/le-rechauffement-climatique-actuel-une-evolution-thermique-naturelle-au-forcage-oublie/>

Vermassen F. et al. 2020. A Major Collapse of Kangerlussuaq Glacier's Ice Tongue Between 1932 and 1933 in East Greenland, Geophysical Research Letters. DOI: [10.1029/2019GL085954](#)

Von der Heydt, A., Dijkstra H. A. 2006. Effect of ocean gateways on the global ocean circulation in the late Oligocene and early Miocene, Paleoclimatology 21, PA1011, DOI:10.1029/2005PA001149.

Weiniger J.W. et al. 2019. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments. marine and Petroleum Geology, vol. 102, 455-476.

[Yousef S.](#), [SM. Amin](#), [W. Abdel-Sattar](#) 2009. The Shrinking of the Heliosphere Due to Reduced Solar Wind, DOI: [10.1012/S120027852019](#)

Zachos J.C., Dickens G.R., Zeebe R.E. 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. Nature, 451: 279–283.

Zemp M and 38 others, 2015 [Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century](#). J. Glaciol., 61 (228), 745-762 (doi:10.3189/2015JoG15J017)

[12. L'Arctique géologique \(2/2\)](#)

Mis en ligne SCE : 29.05.2020

Cet article fait suite aux trois récents articles publiés par le Prof. Maurin sur SCE ([1/3](#), [2/3](#), [3/3](#)), et prolonge celui de l'évolution géologique de la plaque Antarctica ([1/2](#) et [2/2](#)), publié récemment par SCE. Il fait également suite à l'Arctique géologique, première partie 1/2 (SCE, [ici](#)). Dans son introduction ce dernier article a rappelé l'importance que revêtent les glaces au niveau médiatique et a fourni une synthèse de l'ensemble des glaciations qui ont affecté notre planète depuis près de 3 milliards d'années (3 Ga) (Figure 1 pour l'échelle géologique, partie [1/2](#)).

12. Les cycles glaciaires arctiques (Pliocène/Pléistocène)

12.1. Introduction : le forçage orbital et l'englaciation

Le climat de la Terre est géré à un premier niveau par l'apport énergétique lié à l'apport solaire, en fonction de l'évolution cyclique de la forme de l'orbite de notre planète autour du soleil. **Ce forçage s'appelle forçage orbital et a toujours existé depuis que notre système planétaire existe. Ce forçage présente une cyclicité parfaitement calculable en fonction des interactions par attraction entre les différentes planètes du système solaire et le soleil.** Elle varie relativement peu au cours du temps.

Par contre, l'orbite terrestre est une ellipse dont l'élongation varie au cours du temps, nous éloignant ou nous rapprochant du soleil, c'est ce que nous appelons l'excentricité. De plus, l'axe de rotation de la Terre n'est pas vertical sur le plan orbital ou d'écliptique et oscille également, permettant un déficit en énergie reçue au niveau des pôles, géré par son obliquité. Enfin la Terre ne parcourt pas son orbite en exactement un an : les saisons pourront être en avance ou en retard sur l'orbite par rapport au minimum ou au maximum d'insolation : ceci s'appelle la précession des équinoxes.

L'englaciation Cénozoïque débute en position polaire sous contrôle de la tectonique des plaques, de l'évolution des océans, de la circulation océanique et des reliefs orogéniques disponibles pour stocker de la glace. Elle apparaît donc en premier sur l'Antarctique puis au Néogène, sur l'Arctique Canadien en période de faible obliquité. Ensuite, elle descendra en latitude au fur et à mesure de l'évolution de l'ère glaciaire. Un forçage primaire des ères glaciaires est probablement lié au système solaire, voir à notre galaxie : Mars a subi et subit toujours des glaciations. Le détail des phases glaciaires néogènes ou quaternaires au sein de cette ère glaciaire sera ensuite modulé par le forçage orbital. Enfin, pour chaque glaciation, le détail des fluctuations est modulé par l'activité solaire sous forme de cycles de Bond ou cycles Dansgaard-Oeschger et le stockage énergétique qui en découle dans l'océan. L'amplitude des cycles glaciaires va s'accroître au fur et à mesure de l'augmentation de la glace stockée sous formes de calotte (Abreu et Anderson, 1998 ; Lisienski et Raymo 2005) et la baisse importante du niveau marin est liée à l'extension du plancher océanique et au stockage de glace à terre. La pCO₂ atmosphérique diminue au fur et à mesure du refroidissement des eaux de fond de l'océan (Figs. 19 et 20) qui ont atteint +4°C en moyenne (densité maximale), le CO₂ étant plus soluble dans l'eau froide.

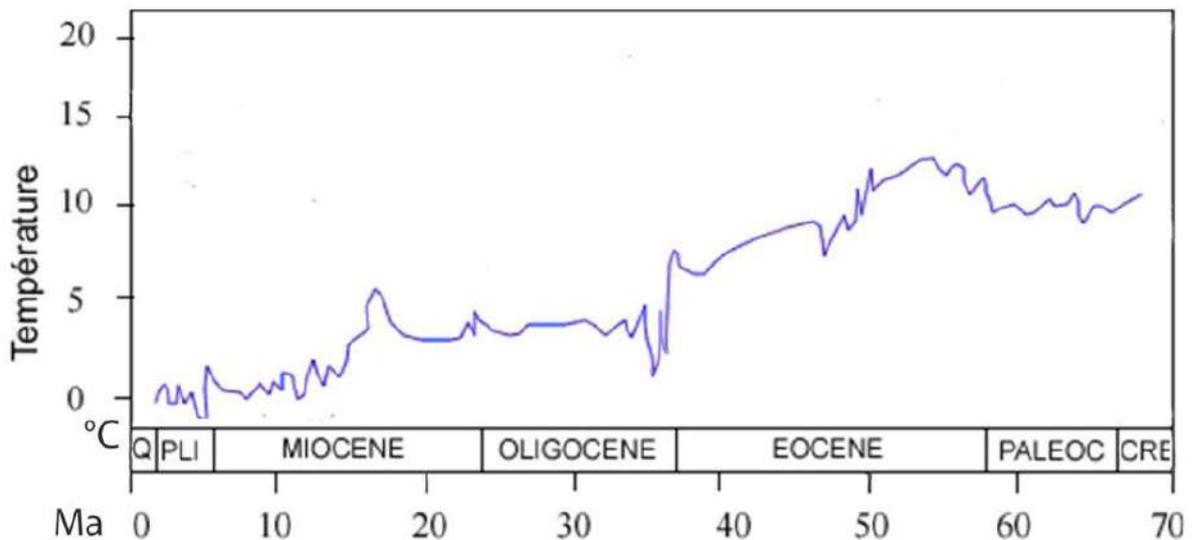


Fig. 19. Evolution des températures de fond de l'océan au Cénozoïque à latitude N moyenne, d'après Van Andel 1994. La numérotation des figures suit du précédent l'article.

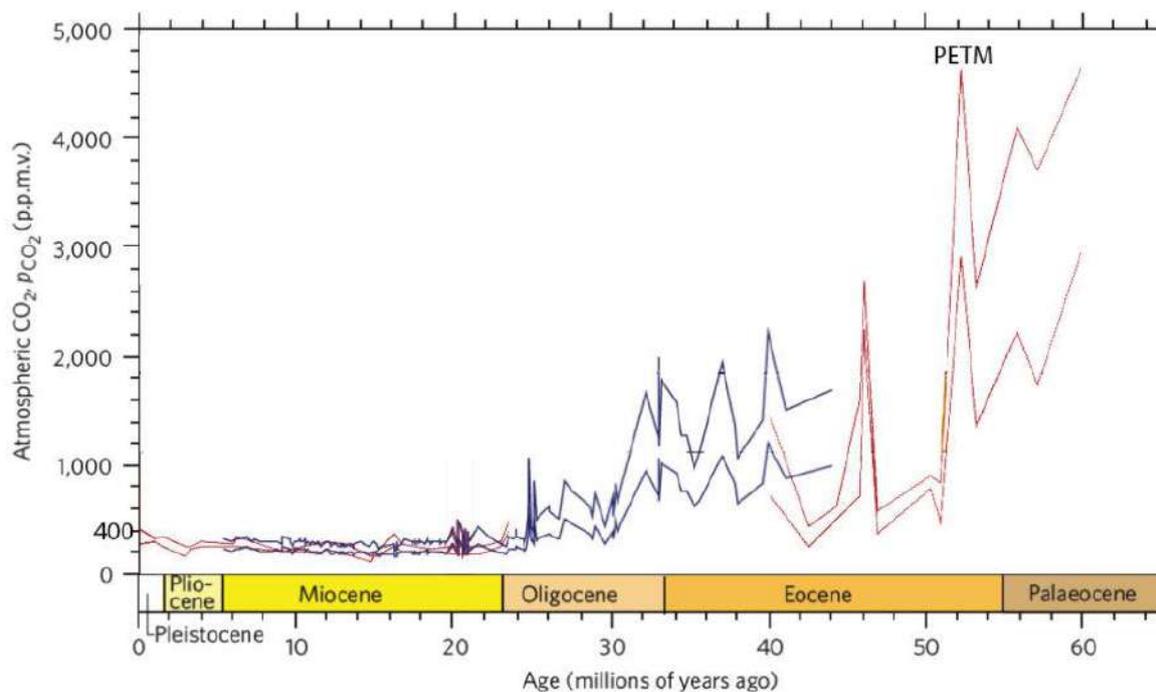


Fig. 20. Evolution de la pCO_2 au Cénozoïque d'après différents proxies, modifié de Zachos et al. 2008.

12.2. Les glaciations du Plio-Pléistocène

Le début du Plio-Pléistocène (ou début de l'Ere Quaternaire) est caractérisé par un refroidissement global majeur accompagné du développement d'une glaciation majeure à 3.2 Ma (stade isotopique M2, 3,26-3,02 Ma, voir plus loin) associée à une grande aridification en Afrique et à l'homínisation. Elle est associée à une première accentuation de la fréquence et de l'amplitude des oscillations climatiques perceptibles depuis l'Oligocène (Abreu et Anderson, 1998) (voir ci-dessous). Au début du Pléistocène, cette amplitude maximale moyenne annuelle atteint d'environ 6°C ce qui aura un fort impact sur la répartition des faunes et flores, tant océaniques que continentales. La banquise apparaît régulièrement en mer d'Islande et favorise probablement l'extension de la calotte groenlandaise (Clotten et al. 2018). **Les calottes se généralisent après 3,2 Ma. Une baisse progressive du niveau marin moyen (premier ordre) accompagne ce nouveau pas vers l'englaciation**

A partir de 2,8-2,4 Ma, de petits inlandsis apparaissent régulièrement dans l'hémisphère Nord. Le démarrage des grandes glaciations quaternaires est daté à 2,75 Ma sur le plateau de Vøring (Ouest de la Norvège) et à 2,90 Ma au NW de l'Islande. Ce décalage reflète une différence de chronologie et de croissance des calottes sur la marge Est-groenlandaise et la Scandinavie, en relation avec la circulation thermohaline. Cette intensification est marquée par un apport important de débris relâchés par les icebergs (les 'IRD') entre 2,7 et 2,4 Ma et également une durée croissante de la couverture par la banquise de 2,7 à 2,1 Ma. La cyclicité des glaciations est alors rapide, voisine de 41 ka, ce qui correspond à un déclenchement polaire des glaciations (obliquité). **Depuis 2,2 Ma, environ 25 cycles glaciaires ont été enregistrés dans les carottes océaniques. Ces cycles ou périodes glaciaires du Quaternaire, ont des durées d'environ 40 000 ans puis à partir de 400 ka passent à une cyclicité de 100 000 ans: c'est la révolution climatique du Pléistocène moyen 'MPT, Fig. 21A,B).** Ils sont séparés de périodes interglaciaires relativement chaudes, avec des durées variant de 10 000 à 20 000 ans pendant laquelle les calottes régionales fondent, ce qui relève le niveau marin. Cette évolution est liée à l'activité du rifting atlantique (Fig. 21A).

Les glaciations majeures du Mio-Pliocène se produisent à 6,7 Ma et 3,2 Ma, celles du Quaternaire (voir ci-dessous, section 4) avec les stades isotopiques marins ou MIS 16 : 680 ka, MIS 12 : 450 ka et MIS 10 : 350 ka (voir plus loin, 4.4.). Ces glaciations très froides sont relativement peu érosives. La glaciation la plus froide est celle du MIS 12 (la glaciation Anglienne) et la plus étendue est celle du MIS 6 (Saalien) : c'est cette glaciation qui a façonné l'essentiel de la morphologie actuelle à haute latitude en raison de son caractère un peu moins froid (ce qui explique son extension) et nettement plus abrasif (eau liquide à la base de la calotte).

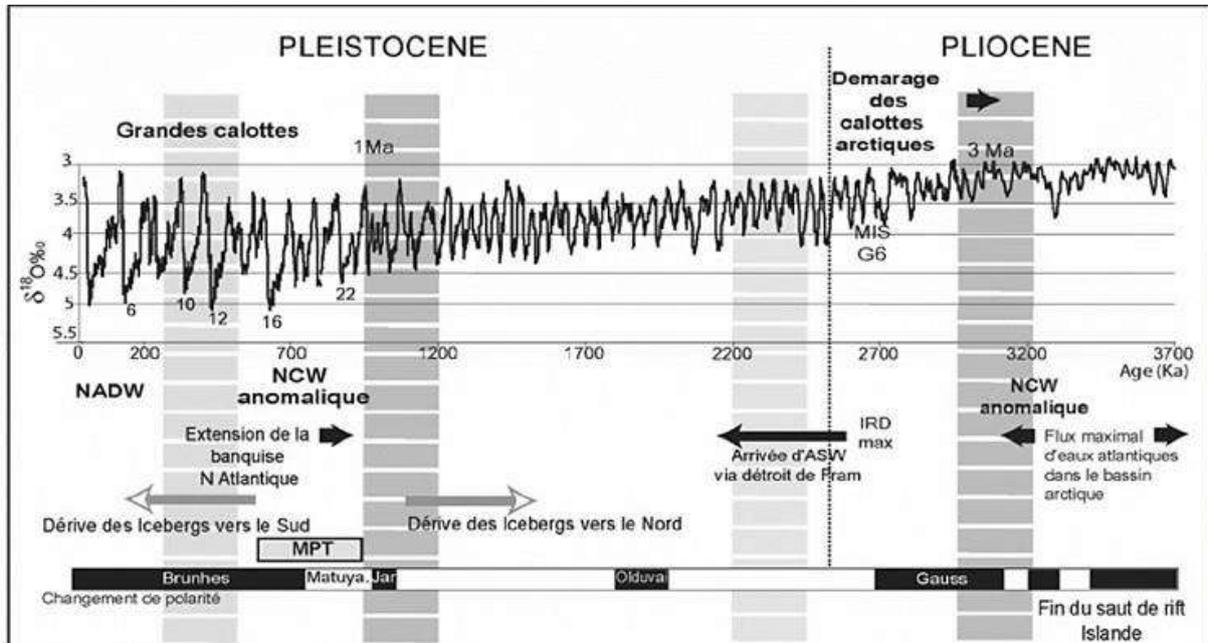


Fig. 21A : Evolution de l'englacement péri-Atlantique et de la circulation thermohaline en relation avec l'activité des rides nord-atlantiques en grisé (Fram, Jan Mayen, Islande). Courbe $\delta^{18}O$ (marin) in Lisienski et Raymo, 2005. NADW : eau profonde nord-atlantique (actuelle), NCW : arrivée d'eaux froides profondes. ASW : arrivées d'eaux arctiques de surface dans le bassin nord-atlantique. MTP : transition du Pléistocène moyen (Van Vliet-Lanoë 2013).

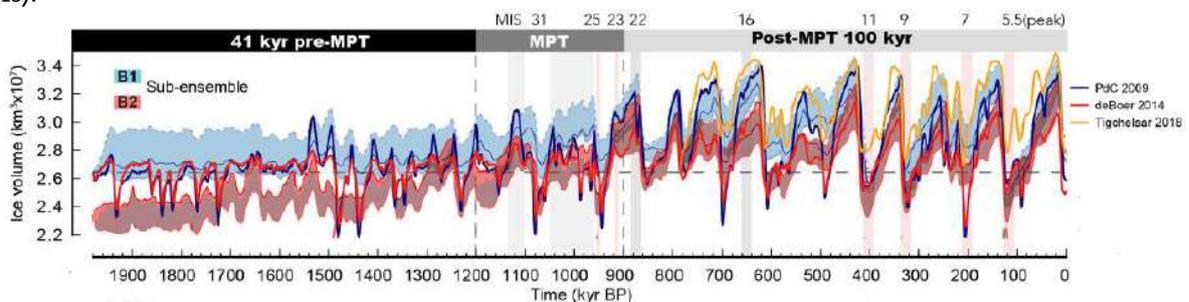


Fig. 21B : Passage de la cyclicité à 40 ka à 100 ka en terme de volume des glaces, modélisé par différents auteurs en Antarctique (synthèse dans Sutter et al. 2019). On voit très bien les glaciations majeures et une augmentation importante du volume des glaces depuis la transition du Pléistocène moyen ou MTP, plus particulièrement 900 ka.

12.3 Le Dernier Glaciaire (LGM ou Last Glacial Maximum)

Aujourd'hui la période du Dernier Glaciaire (113-12 ka) est bien étudiée à partir de carottes de sédiments marins et des carottes de glace du Groenland (GRIP, NGRIP, NEEM, GISP) qui débordent en partie sur la période tiède précédente, l'Eémien (132-113 ka). Clark et al. (2009) ont étudié en détail l'intervalle 50-10 ka, en utilisant les âges obtenus par les isotopes du ^{14}C , ^{10}Be et 3He , en vue de contraindre l'extension maximale des glaces au cours de la seconde partie du Dernier Glaciaire. Le résultat de cette étude a montré que **les glaces se sont ré-avancées vers 32 ka après un recul important lié à un réchauffement très modéré et que leur extension finale maximale était comprise entre 26,5 ka et 20-19 ka selon la région. La figure 22 montre la situation de**

l'englacement lors du LGM, et la stratigraphie du Quaternaire en regard des stades isotopiques marins de l'oxygène est donnée à la figure 23 (Ogg et al. 2008).

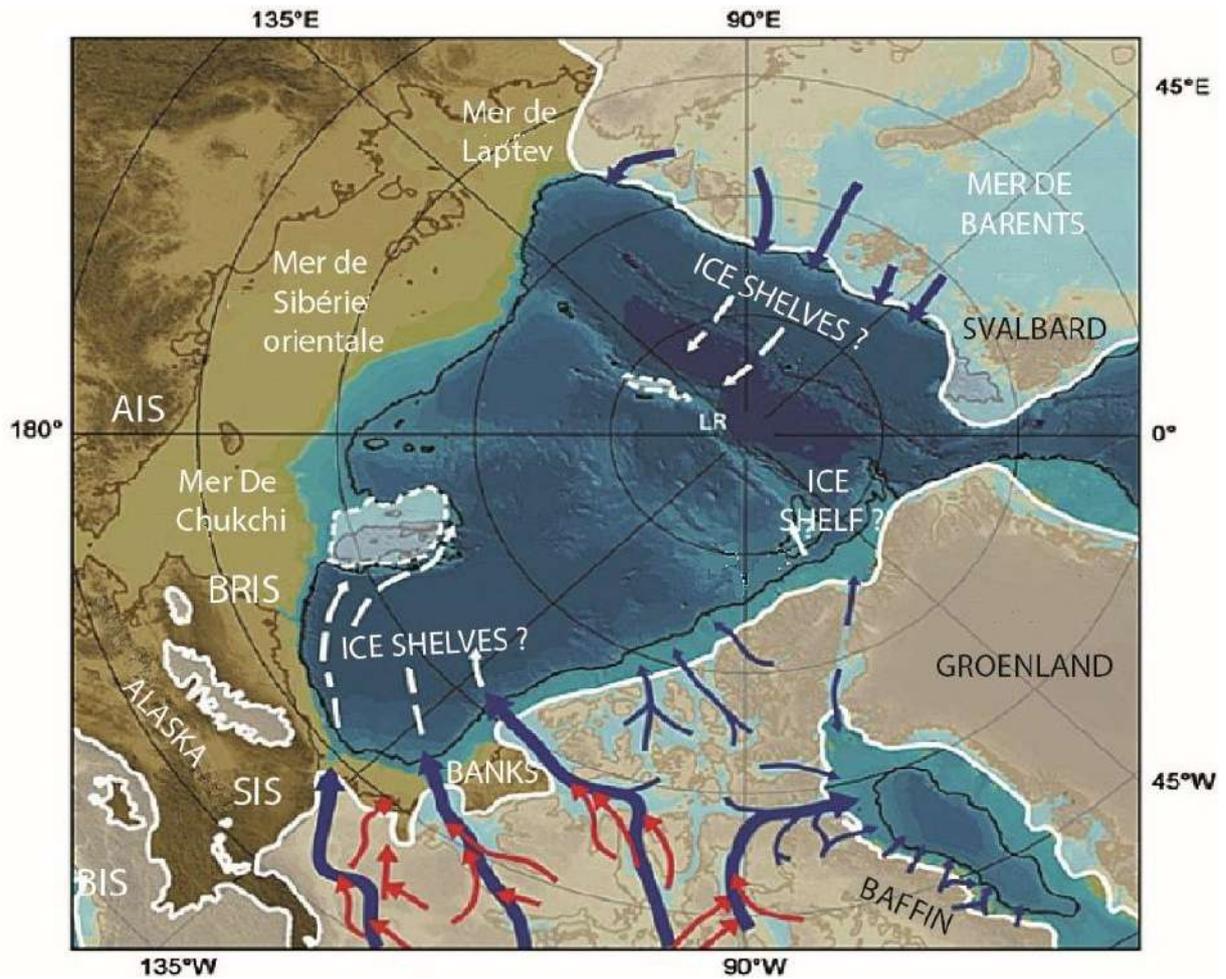


Fig. 22 : Englacement partiel de l'Océan Arctique au cours du Dernier Maximum Glaciaire avec des fleuves de glace et des plateformes flottantes de glace ou ice shelves (Bjarnadóttir et al., 2014). Notez que l'apport principal de glace vient de la zone Est américaine, du Groenland et de la plateforme ouest eurasiennne sous l'effet de la dérive nord atlantique (voir plus haut).

LES GLACES

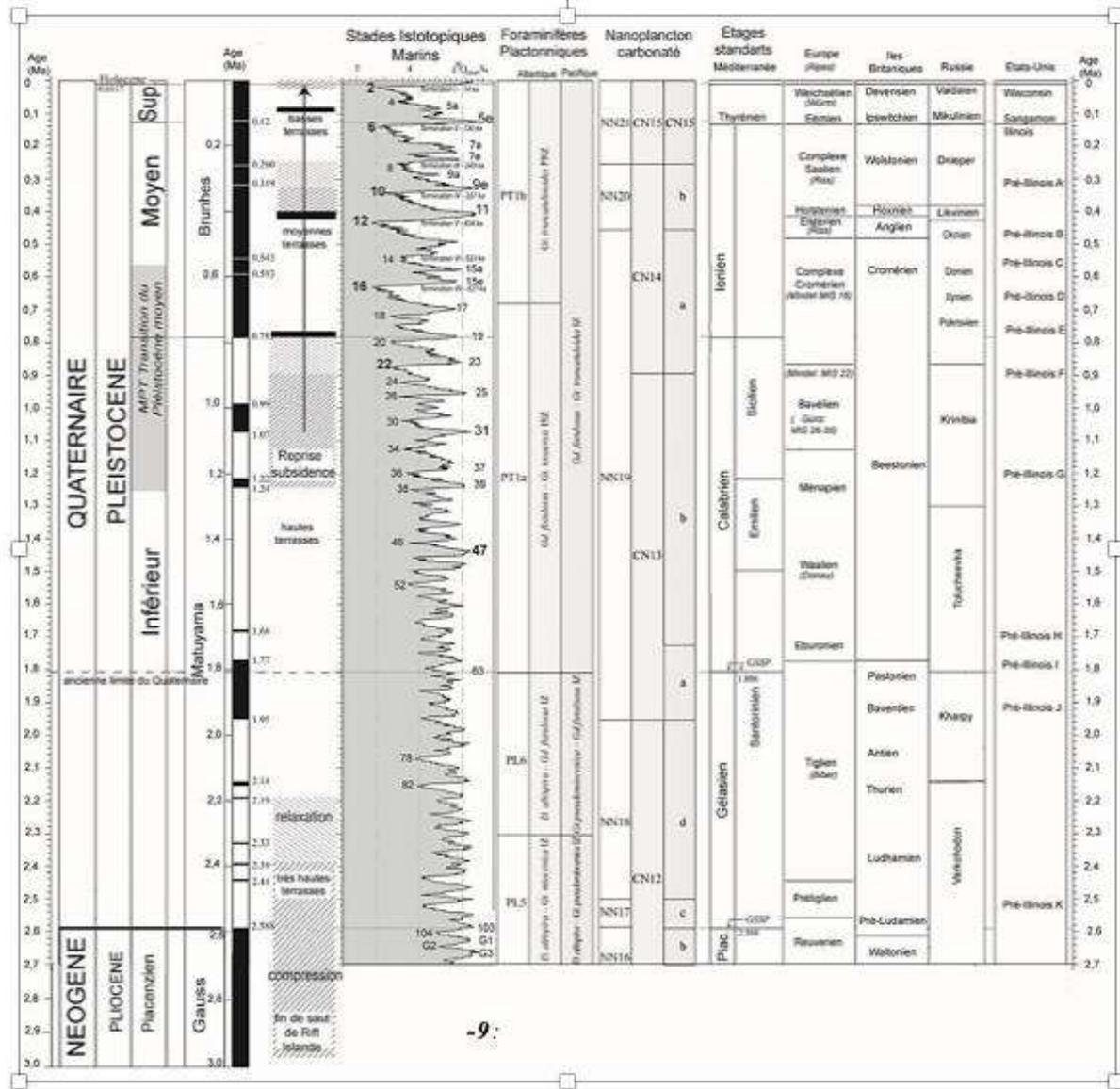


Fig. 23 : Tableau simplifié et complété de la charte stratigraphique du Quaternaire (Van Vliet-Lanoë, 2013 voir <https://stratigraphy.org/icschart/QuaternaryChart1.jpg>)

A l'échelle de l'hémisphère nord, la glaciation 'LGM' se présentait comme suit (Fig. 24)



*Fig. 24 : LGM ou Last Glacial Maximum, c'est-à-dire la glaciation du 'Dernier Glaciaire' dans l'hémisphère nord avec des plateformes de glaces débordant sur l'océan Arctique recouvert de banquise (image CLIMAP). La glace qui recouvrait une grande partie de l'Amérique du Nord, du nord de l'Europe et une partie de l'Asie était épaisse de 3 à 4 km et le niveau marin plus bas de 120 m par rapport à l'Actuel, ce qui permit des passages terrestres, inexistantes aujourd'hui suite à la remontée du niveau marin lors de la déglaciation. Cette situation est aussi à l'origine d'une aridification intense (non discutée dans cet article). **Les glaces se mirent en place vers 33 ka et leur extension maximale est comprise entre 26,5 ka et 20-19 ka (Clark et al. 2009).***

Les glaciations sont la conséquence indirecte du forçage astronomique : des températures des eaux de surface des différents océans et plus particulièrement **l'océan austral** se sont abaissées au Cénozoïque au fur et à mesure que le niveau marin baissait, limitant l'évaporation et donc les précipitations.

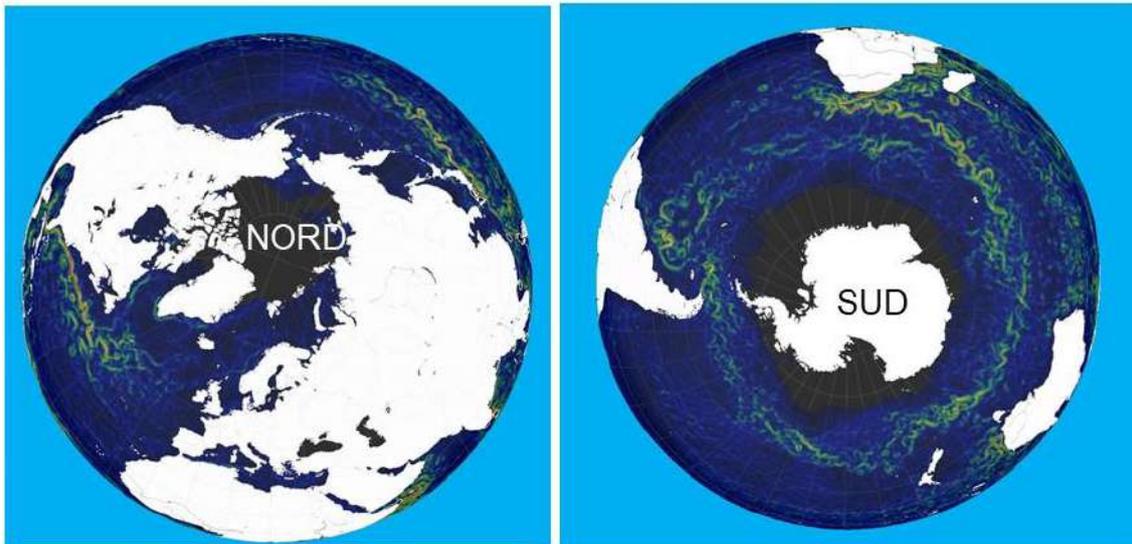
La concentration atmosphérique en CO₂ est très basse en période glaciaire en raison d'une activité végétale plus faible suite à des températures basses et de l'aridité induite. De plus un océan froid dissout de très grandes quantités de CO₂, ramenant la profondeur de dissolution des carbonates (coquilles calcaires) quasiment en surface, acidifiant très fortement les eaux au désespoir des paléontologues ! Après la tectonique des plaques, la masse océanique est le facteur contrôlant le stockage énergétique mondial gérée par le forçage orbital. Les océans occupent 70% de la surface de notre planète. **Donc l'hémisphère sud qui présente le plus d'océans en zone intertropicale est la**

région critique pour toute évolution globale de notre climat. Comme il est en retard de 3000 ans sur l'hémisphère nord (Fig. 25), un épisode de réchauffement modeste dans le sud lié au forçage orbital en couplage avec l'activité du soleil peut avoir une signature de réchauffement climatique transmis à la planète par la circulation thermohaline.

OCEAN = 70% de la surface terrestre = stockage énergie solaire
 $340 \pm 2 \text{ watt/m}^2$
Forçage astronomique

Dominant hémisphère Nord

En retard de 3000 ans, par rapport à HN



Hémisphère Nord Océan : 57%
 (62 % avec Océan Arctique)

Hémisphère Sud Océan 76,5% ,
 (82% avec Océan Circum Antarctique)

Fig. 25 : Répartition des masses océaniques des deux hémisphères, Van Vliet-Lanoë inédit 2018.

La déglaciation de l'hémisphère nord, initiée par une modeste augmentation de l'insolation d'été dans l'hémisphère sud, qui en réchauffant d'abord l'océan austral a permis la fonte des plateformes de glace en Antarctique (décalage inter-hémisphérique du forçage orbital, Fig. 25), débuta entre 20 ka et 19 ka dans l'hémisphère nord, via un transfert de chaleur par l'océan. Cette succession fut à l'origine d'une montée brutale du niveau marin.

12.4. Les stades isotopiques

Comment toutes ces glaciations furent-elles été enregistrées de manière fiable et leurs chronologies établies ? C'est la **géochimie isotopique de l'oxygène** qui permet de résoudre cette question, grâce aux travaux de pionnier de **Cesare Emiliani** et ensuite de **Nicholas Shackleton**. L'interprétation est basée sur les fractionnements isotopiques $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) enregistrés par la glace (neige, glace) et les carbonates marins (principalement dans les coquilles ou tests de **foraminifères**). Sans entrer dans le détail, mentionnons que l'interprétation des rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ donne accès aux températures (domaine marin dans notre cas) et aux volumes de glace dans le passé. Dans le cas d'un refroidissement le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la neige diminue en même temps qu'il augmente dans les carbonates marins et inversement en cas de réchauffement. **C'est de cette manière qu'Emiliani procéda et a découvert que le $\delta^{18}\text{O}$ varie d'une manière cyclique dans les sédiments marins. Il démontra ensuite que ces variations correspondent aux fluctuations climatiques prédites par**

Milankovitch. Shackleton montra ensuite que ces fluctuations sont également liées à la fonte des calottes glaciaires. L'analyse systématique du $\delta^{18}\text{O}$ des carottes de glaces et des sédiments marins ont alors mis en évidence une succession de cycles glaciaires et interglaciaires menant avec d'autres proxies (biostratigraphie, magnétostratigraphie, palynologie, chronologie absolue...) à une chronologie isotopique précise. Les cycles ont été numérotés et on parle même d'étages isotopiques (MIS pour **Marine Isotopic Stage**) pour les désigner, il s'agit en réalité de stades isotopiques (désignés OIS = **Oxygen Isotope Stages**) Fig. 26), les numéros impairs désignant les périodes interglaciaires et les numéros pairs les périodes glaciaires. On dénombre 110 OIS couvrant la période 2,8 Ma à l'Actuel (in Ogg et al. 2008).

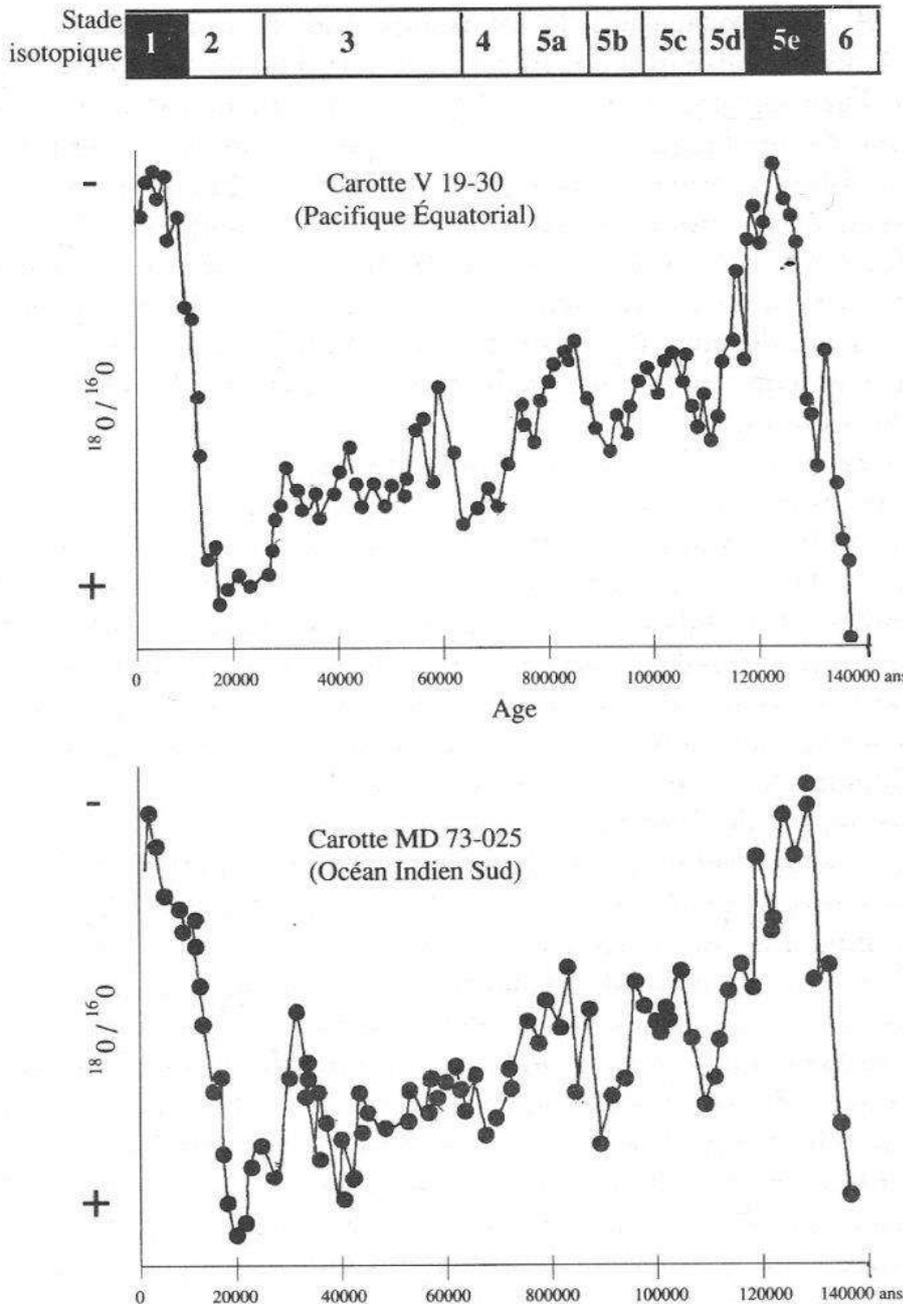


Fig. 26 : Variation du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques dans deux carottes de sédiments marins distantes de plus de 10 000 km recouvrant les stades isotopiques 1 à 6. D'après Duplessy et Morel, 1990. Les variations du $\delta^{18}\text{O}$ (exprimées en ‰) montrent une parfaite corrélation dans les deux océans et enregistre aussi les variations du niveau marin liées aux variations du volume des calottes glaciaires. On remarque l'entrée dans la glaciation au cours du stade 5a-5e. Ce sont ces fluctuations qu'Emiliani découvrit pour la première fois. Notons l'importance du MIS 5e (132 ka-113 ka) représentant l'interglaciaire Eemien, le dernier avant notre interglaciaire Holocène (ou Actuel) avec un niveau marin d'environ 6 m plus haut qu'aujourd'hui.

Rappelons que les ères glaciaires ne se produisent que lors de périodes limitées des temps géologiques, elles sont séparées par des dizaines ou centaines de millions d'années. Une des premières conditions nécessite que des masses continentales aient dérivé jusqu'aux hautes latitudes, aient des reliefs suffisamment élevés pour stocker de la glace et présentent une certaine massivité. Seule la tectonique des plaques, et les orogènes associés, permettent cette configuration à long terme vu les vitesses de déplacement des continents (en cm/an). Les courants marins chaud, eux apportent des précipitations (voir plus haut) et du potentiel de fonte (stockage dans l'océan austral).

Ensuite vient le terme 100 ka mis en évidence par les nombreux cycles glaciaires-interglaciaires (Figs. 21, 23 et 26). Ces derniers correspondent aux cycles de Milankovitch : cet auteur a montré que les régions situées aux latitudes polaires reçoivent une insolation plus importante lorsque l'axe de la Terre est presque perpendiculaire au plan orbital que lorsqu'il est incliné. Ainsi, toujours suivant cet auteur, les glaciers ont tendance à s'étendre lors des périodes où les étés sont froids à 65° Nord (précession des équinoxes et excentricité), ce qui se produit tous les 100 ka, 40 ka et 20 ka. Ces forçages externes ne sont cependant pas suffisant pour expliquer les baisses importantes de température lors de la partie finale d'une glaciation et d'autres facteurs sont à prendre en considération dont la modification de l'albédo (neige, nuage, banquise) (Marshak, 2010), la baisse du niveau marin, le ralentissement mais pas la disparition de la circulation thermohaline (Ezat et al. 2014, elle continue sous la banquise !). La teneur atmosphérique limitée en CO₂ (notamment via l'activité biologique réduite et surtout sa solubilisation dans l'océan), le volcanisme, l'érosion des sols et l'exportation de nutriments en mer ..., sont des facteurs exerçant une rétroaction positive sur le refroidissement.

Si l'entrée en glaciation à l'échelle de l'ère glaciaire (100 Ma), d'un glaciaire (100 ka) ou d'un stade froid interne à la glaciation (2 ka) est un phénomène très lent et progressif, la déglaciation est un processus très rapide aux mêmes échelles (Van Vliet-Lanoë, 2007b). De plus nous avons vu qu'à partir de 400 ka les cycles présentent une fréquence de 100 ka avec des phases très courtes de déglaciation (les interglaciaires) d'environ 10 ka à 20 ka, correspondant à une disparition des calottes glaciaires régionales. La cyclicité à 100 ka est mécaniquement sous contrôle du minimum d'excentricité (Lisienki 2010a et b) en modulation principale avec le cycle de 41 ka de l'obliquité (Huybers and Wunsch 2005).

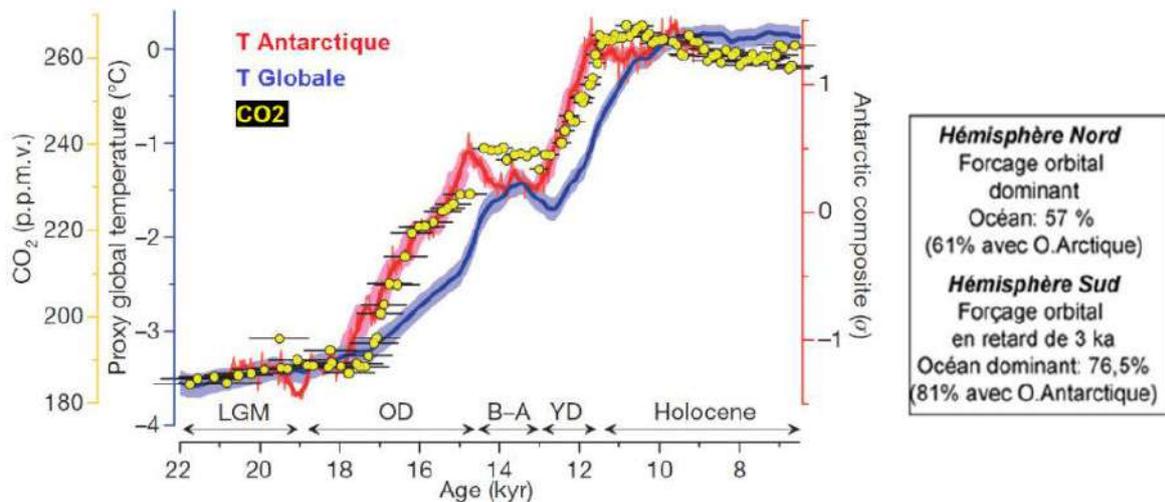


Fig.27 : Elévation précoce de la température en Antarctique (d'après Lemieux-Dudon et al. 2010) et dégazage décalé du CO₂ (en jaune, d'après Monnin et al. 2001). Le décalage est attribué à un artefact de mesure par Landais, 2020.

Le mécanisme de réchauffement de base est sous contrôle de l'activité solaire. Ces cycles d'activité solaire ont une cyclicité d'environ 1,5 ka et modulent le cours de la glaciation. Ces réchauffements sont parfaitement synchrones avec l'activité solaire (Schulz & Zeebe 2006, Stranne et al. 2014), d'autant que les glaciers ont pu s'étendre à très basse latitude, en altitude en régions tropicales, donc plus sensible à l'apport énergétique solaire direct (Van Vliet-Lanoë, 2007b).

Ces cycles liés à l'activité solaire sont connus sous le terme de cycles Dansgaard-Oeschger en période glaciaire, et sont associés à la remontée d'eaux chaudes de l'océan austral vers Atlantique par la circulation thermohaline (Rasmussen et al. 2016) et à la fonte corrélative des plateformes de glace, accompagnant une remontée du niveau marin. Ils permettent un dégazage tardif du CO₂ en retard de 1 à 0,5 ka par rapport au réchauffement de l'océan austral (Fig. 27). En période interglaciaire, comme l'Holocène, ces cycles persistent et sont connus sous le terme de 'cycle de Bond' (Bond et al. 2001) ; ils sont identiques mais de moindre intensité en terme de relèvement du niveau marin, vu le volume actuellement très limité des plateformes de glace. Le réchauffement actuel a été accompagné par une remontée d'eaux australes autour de l'An Mil (Markot et al. 2013) à la veille du Petit Age glaciaire. **Selon Landais 2020, le décalage température/CO₂ serait de l'ordre de 500 ans, soit bien plus que 'Global Warming !' (Fig. 28).**

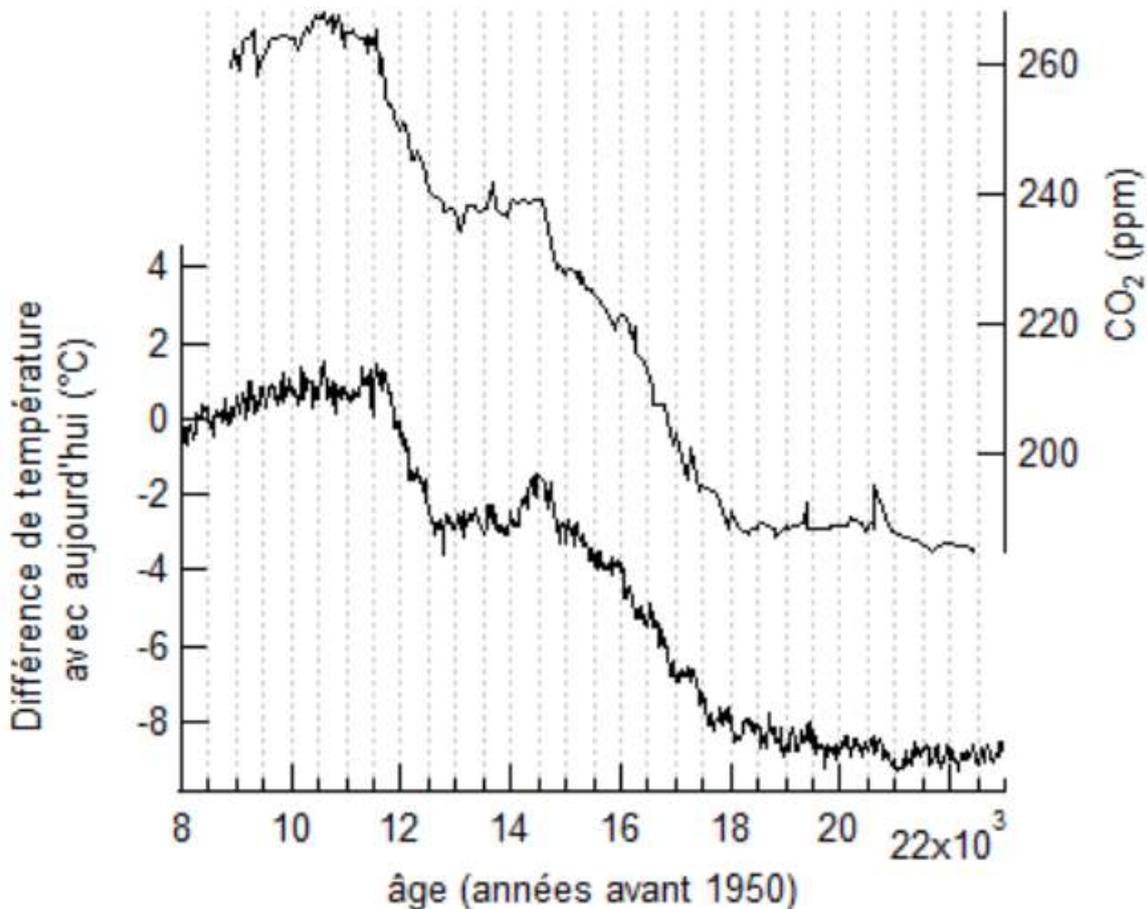


Fig. 28 : Selon Landais 2020, le décalage température/CO₂ serait de l'ordre de 500 ans, soit bien plus que 'Global Warming !'

Lors du Dernier interglaciaire la température était d'environ 8°C plus élevée au Groenland alors de l'Optimum holocène elle atteint seulement de +4°C au Groenland (65°N) par rapport à l'actuelle (reconstitution à partir des carottes de glace groenlandaises, Landais 2020) . En Europe (45°N) l'optimum thermique atteint seulement + 2°C par rapport à l'actuel.

La température moyenne mondiale lors du Dernier Maximum glaciaire chute de 5°C par rapport à l'actuel .

En tout état de cause, la tectonique est le facteur principal, le CO₂ semble n'avoir qu'un rôle marginal, pour autant qu'il en ait un. C'est également la conclusion majeure de Van Vliet-Lanoë (2007a) et Duplessy et Ramstein (2013), pour qui l'origine des grandes phases glaciaires du Plio-Quaternaire est associée aux rétroactions liées à la tectonique des plaques, avec en particulier, (i) la forme et la position variable des continents et des bassins océaniques ; (ii) l'existence de passages entre bassins ; (iii) la localisation et l'altitude des chaînes de montagnes, océaniques ou continentales, qui affectent les circulations océaniques et atmosphériques, les transferts de chaleur par l'atmosphère et les courants marins superficiels et (iv) le volcanisme, l'érosion et leurs conséquences sur la chimie et l'atmosphère et la pCO₂ atmosphérique.

Les carottes marines nous ont permis d'analyser les fluctuations isotopiques sur pratiquement tout le Cénozoïque comme le montre la synthèse de Lisienki et Raymo (2015). Les carottes de glace ne couvrent que 800 ka (Antarctique) et 130 ka au Groenland.

Sans entrer ici dans le détail signalons que l'amplitude des variations de l'atmosphère entre épisodes glaciaire et interglaciaire est de 7 à 8°C (selon les carottes de glace, effet de diffusion par la glace) ou 11°C (selon les carottes de sédiments océaniques).

12.5. Les calottes glaciaires arctiques (Plio/Pléistocène)

Nous sommes dans une ère glaciaire depuis 48 Ma. Depuis 3 millions d'années le climat a sans cesse oscillé entre périodes glaciaires et interglaciaires qui ne représentent que 15% de cette durée. Les variations de compositions isotopiques des carbonates marins traduisent celles du volume de l'océan liées fluctuations du volume des glaces. **On estime que ce volume de glace a évolué entre un volume minimum, légèrement plus faible que l'Actuel et un volume maximum jusqu'à 8 fois le volume actuel (Marshak, 2010; Cronin, 2010).**

12.5.1. Englacement jusqu'au Dernier Glaciaire

La plupart des calottes glaciaires de l'hémisphère nord se mettent en place à la fin du Pliocène, vers 3,0 Ma même si certaines sont plus précoces (Groenland).

Une première glaciation importante apparaît vers 2,8 Ma comme en témoignent des décharges d'icebergs en Arctique, et de petits inlandsis se forment de 2,8 Ma à 2,4 Ma et montrent une cyclicité rapide voisine de 41 ka (obliquité) à l'origine d'un déclenchement polaire des glaciations (Van Vliet-Lanoë, 2007b). L'extension maximale des calottes nord-américaines et scandinaves (ainsi que celle des Alpes) est enregistrée à 2,2 Ma et diminue jusqu'à 1,2 Ma suite à des températures proches des celle de l'Holocène (cf. analyse palynologiques *in* Van Vliet-Lanoë, 2013). Ensuite une succession d'épisodes plus froids et plus tempérés, parfois même chauds, a lieu avec des glaciations moins étendues que précédemment. Ces évolutions sont notamment bien enregistrées et contraintes par les divers stades isotopiques (voir Van Vliet-Lanoë, 2013 pour le détail y compris avec l'activité tectonique qui joue un rôle important non seulement sur les glaces, mais également sur le niveau marin et les processus d'érosion). Vers 0,9 Ma une cyclicité de 100 ka (voir ci-dessus, Figs. 21 et 23) se superpose aux cycles de 41 ka et 23 ka et avec une extension croissante de la banquise dans l'Atlantique Nord, le développement des grands inlandsis et de trois glaciations importantes (à partir

de 0,8 Ma) débordant la plateforme au niveau de la Norvège et en mer du Nord (cf. stades isotopiques marins 16, 12 et 10, Fig. 23).

De 0,6 Ma à 0,4 Ma, période interglaciaire suivie d'un refroidissement vers 0,4 Ma sur le bassin atlantique et pacifique avec apparition des très grands inlandsis (Laurentide, Fennoscandie, sud du Groenland. C'est une période où le forçage orbital est minimal et les amplitudes thermiques entre glaciations et interglaciaires maximales. L'interglaciaire '11' (424-374 ka) est de loin le plus chaud du Quaternaire, avec +3°C de plus de température moyenne aux latitudes tempérées et une forêt boréale sur le sud du Groenland et sur la rive nord de la Sibérie (Van Vliet-Lanoë, 2013). **On aura ensuite une succession de cycles glaciaires/interglaciaires marquée. Le dernier interglaciaire ou l'Eemien correspondant à la dernière période chaude instable de 130-110 ka BP, avec un niveau marin de 5 à 6 m au-dessus de l'actuel.** A cette époque les calottes sont légèrement moins étendues pendant l'optimum thermique (127-125 ka) que celles d'aujourd'hui. Finalement on arrive au 'Dernier Glaciaire' (= LGM, *Last Glacial Maximum* 22-20 ka) (Weichsélien de Scandinavie, Würm des Alpes, Wisconsinien de l'Amérique du Nord). Il démarre très tôt en Amérique du Nord (vers 117 ka) et plus tardivement en Fennoscandie (113 ka). La courbe de l'enregistrement du $\delta^{18}\text{O}$ correspond assez fidèlement aux variations des paramètres orbitaux (Figs. 17 et 18 in Van Vliet-Lanoë, 2013). Le maximum de froid et d'aridité est tardif vers 25 ka BP de même que le minimum du niveau marin (-120 m) à l'échelle planétaire (entre 28 et 21 ka BP). La fin de la glaciation se marque par deux événements (i) terminaison 1a avec le réchauffement brutal du Bölling au Tardiglaciaire (14,8-13,5 ka BP : disparition de la banquise dans le détroit de Fram) et la terminaison 1b (vers 11,6-10 ka BP), qui marque un second réchauffement brutal (en 60 ans, après le refroidissement du **Dryas** récent) et à la réinstallation de la circulation océanique actuelle.

Le Glaciaire enregistre une succession de stades froids et d'interstades chauds, se reporter à Cronin (2010) et Van Vliet-Lanoë (2013) pour le détail. Notons que les interstades sont corrélés avec les événements DO (Dansgaard-Oeschger) caractérisant des réchauffements quasi-cycliques de 1,5 ka \pm 0,5 ka déjà discutés dans SCE ([ici](#)). Le Groenland, par exemple, a connu plus d'une vingtaine de fois des températures de 8° à 16°C plus élevées en quelques décennies ou moins durant les derniers 80 000 ans ([Li et al. 2019](#)).

Il n'est pas possible de considérer avec plus de détail le Dernier Glaciaire (LGM). On se reportera à [Clark and Mix \(2002\)](#) pour qui le Dernier Maximum Glaciaire s'étend de 23 ka à 19 ka BP, avec une extension maximale à 20 ka BP. En Arctique la calotte fennoscandienne présente son maximum d'extension vers 80 ka, en Islande du Nord probablement vers 70 ka et plus tard en Islande du Sud. A nouveau il faut se reporter à Van Vliet-Lanoë (2013) pour le détail, **et surtout il faut retenir que le maximum d'extension des calottes semble diachrone sur l'Atlantique en raison de la persistance d'une circulation thermohaline réduite mais intensifiée lors des DO le long de la côte Ouest de la Norvège et sous la banquise. Les maxima d'englacement, pour une configuration donnée des masses continentales sont gouvernés par le forçage astronomique. Ils se produisent lorsque les niveaux eustatiques sont encore hauts (Broecker & Denton, 1990), en relation avec l'obliquité (41 ka) à haute latitude. La précession (23 ka) intervient à moyenne latitude, et l'excentricité (100 ka) basse latitude. Le LGM est ainsi diachrone.**

12.5.2. Englacement de l'Amérique du Nord

Les sections précédentes ont montré comment le refroidissement à long terme s'est produit depuis le Tertiaire, principalement suite à l'activité tectonique. Le refroidissement se marquera fortement avec l'apparition brutale de la **calotte glaciaire des Laurentides** (Fig. 27) suite à la fermeture de l'isthme de Panama entamée il y a 5 Ma, et effective il y a 2 à 3 Ma. Il est possible de reconstituer la

dynamique d'installation et de déplacement des grandes calottes glaciaires du Pléistocène à partir de la cartographie des stries et des dépôts glaciaires. **En Amérique du Nord, la calotte glaciaire des Laurentides a commencé à se développer au nord-est du Canada.** Ensuite elle a fusionné avec la **calotte glaciaire de Keewatin, du nord-ouest du Canada** (cf. '2' in Fig. 27) et celle provenant de l'ouest de la Baie d'Hudson. L'inlandsis Laurentide, le principal en Amérique du Nord recouvrait le Canada et débordait sur les USA au Sud. Un autre inlandsis bordait la majeure partie des côtes de l'ouest du Canada et du sud-est de l'Alaska (Marsak 2010). La partie ouest des Territoires du NWT était très peu englacée. Ensemble ces calottes ont fini par recouvrir la totalité des régions du Canada situées à l'est des Montagnes Rocheuses, avec une épaisseur maximale de 3 km (Marshak 2010) durant la glaciation du Wisconsinien. Ces calottes glaciaires ont fini par fusionner avec la calotte du Groenland et avec la calotte cordillère à l'ouest, étendue sur les montagnes de l'ouest du Canada et une partie sud de l'Alaska (Fig. 27). Au cours de cette glaciation, des calottes glaciaires plus restreintes (fona) et des calottes glaciaires de montagnes et des glaciers de vallée se sont développées dans les Montagnes Rocheuses, la Sierra Nevada et la chaîne des Cascades.

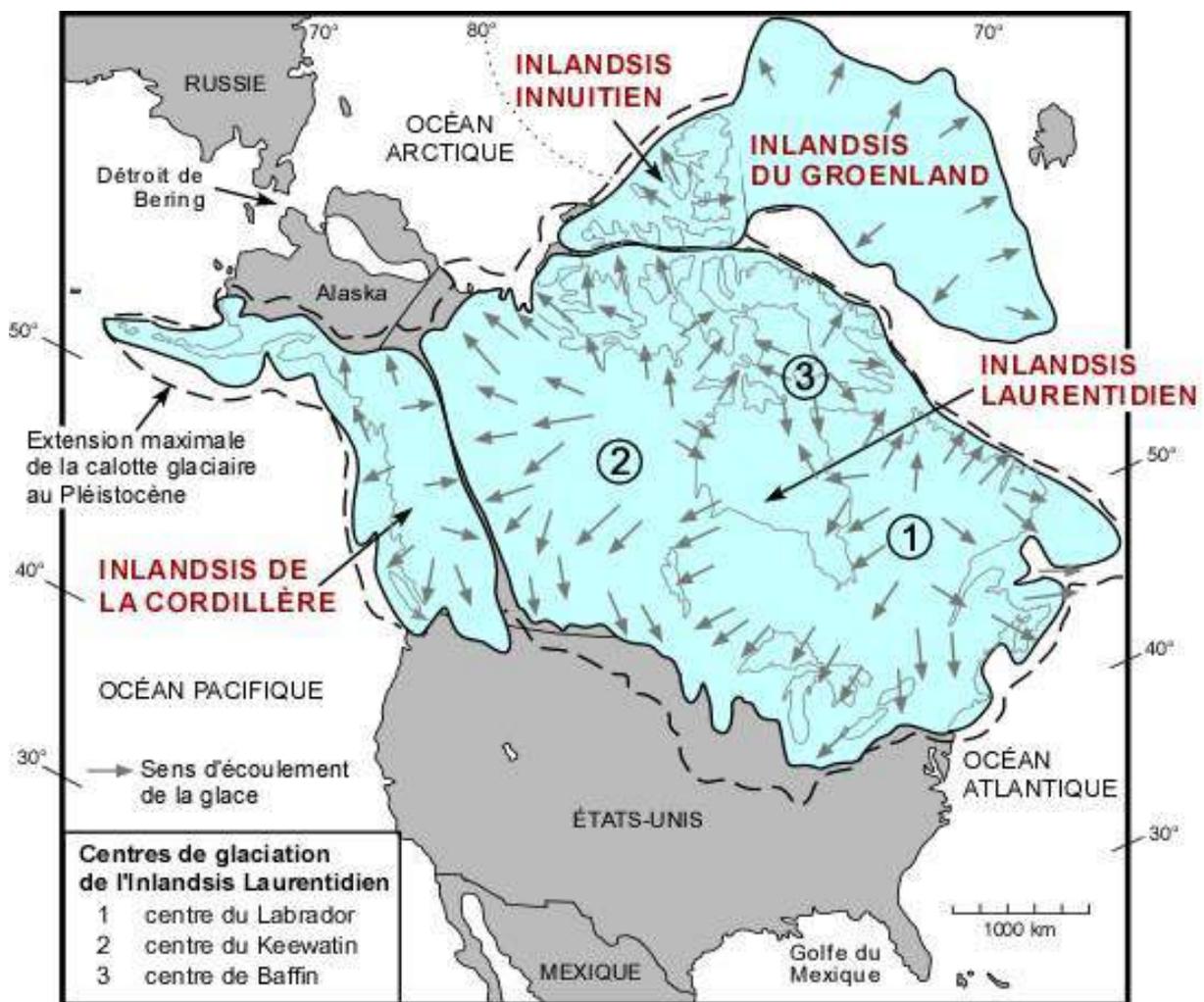


Fig. 27. Graphique d'après Bourque, Université de Laval : Au Wisconsinien (période qui s'étend de -80 à -6 Ka), la grande calotte polaire se divise en quatre inlandsis constitués d'épaisses couches de glace couvrant les surfaces continentales importantes près des pôles, à savoir : l'inlandsis de la Cordillère, l'inlandsis Inuit, l'inlandsis du Groenland, et le grand inlandsis Laurentide. Chez ce dernier, on distingue trois centres d'accumulation des glaces : centres du Labrador, du Keewatin et de Baffin. On a évalué des épaisseurs de glace allant jusqu'à 5 000 m à la hauteur de la Baie d'Hudson. Un étroit passage libre de glace s'est formé au Tardiglaciaire entre les inlandsis de la Cordillère et les Laurentides, et c'est sans doute ce passage qu'ont utilisé les premiers hommes venus de l'Asie pour peupler le continent américain (autour d'il y a 12 000 ans). A l'époque, le continent asiatique (Russie) était relié à l'Amérique au niveau de ce qui est aujourd'hui le détroit de Béring, du fait que le niveau des mers était beaucoup plus bas qu'aujourd'hui à cause du stockage des eaux dans les inlandsis. Nb : Situation lors du dernier maximum glaciaire vers 22 ka-19ka. Plus de la moitié de la calotte est épaisse de plus de 3 km (zones 1, 2 et 3), de 1,5 km à 900 m au niveau de la Cordillère et 2,2 à plus de 2,5 km vers la calotte groenlandaise (épaisseurs fournies par Dyke et al. 2002).

12.5.3. Englacement de l'Eurasie

En Eurasie une importante calotte glaciaire s'est formée dans l'extrême nord de l'Europe et les régions arctiques et certaines parties de l'Atlantique nord ont été recouvertes d'une banquise quasi-pérenne mais qui pouvait disparaître (Fig. 28). Cette calotte a progressivement recouvert l'ensemble de la Scandinavie et le nord de la Russie. D'autres calottes se sont formés plus au Sud sur les reliefs comme les Alpes, les Iles Britanniques et localement à l'est de la Sibérie où elle fut plus limitée en raison de la continentalité/aridité plus marquée. Voir également [ici](#). L'océan arctique et certaines parties de l'Atlantique nord ont été recouverts d'une banquise quasi-pérenne mais qui pouvait disparaître temporairement pendant de brefs événements chauds. La banquise hivernale a encerclé l'Islande et s'est approchée des côtes portugaises (de Vernal et al. 2005).



Fig. 28 : Fig. 1. Carte du nord de l'Eurasie montrant l'étendue maximale de la couverture de glace pendant la dernière période glaciaire (lignes blanches sur le Groenland, l'Islande et l'Eurasie tirées respectivement de Funder et al. (2011), Geirsdottir (2011) et Svendsen et al. (2004), avec de légères modifications sur la Grande-Bretagne et l'Irlande après Sejrup et al. (2005) in Hughes et al. 2015. Les lignes blanches pointillées marquent les limites approximatives des trois calottes glaciaires eurasiennes : Svalbard–Barents–calotte de Kara; SIS = Scandinavian Ice Sheet; BIIS = British–Irish Ice Sheet. Les éventails sédimentaires sous-marins qui bordent le bord du plateau continental sont délimités en orange. La topographie et la bathymétrie sont tirées de l'Atlas numérique GEBCO publié par le Centre britannique de données océanographiques pour le compte de la COI et de l'OHI (2003), in Hughes et al. (2015). La répartition terre-mer est définie par les côtes et le niveau de la mer actuels, et l'étendue actuelle des glaces sur le Groenland et l'Islande est indiquée en blanc. La calotte glaciaire sibérienne (Fig. 28) connut son extension maximale entre 100 et 50 ka alors que celle des Laurentides (Fig. 27) était à son étendue maximale vers 22-19 ka, également en décalage avec la calotte scandinave (SIS, Fig. 279) ([ici](#)).

Cette asynchronicité dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont lié à la topographie continentale, à la bathymétrie et surtout aux courants marins et aux modifications des régimes des vents liées à la position de la zone de convergence intertropicale (Cronin, 2010). **On voit à nouveau la complexité d'étude des périodes d'englacement et il en va de même des déglaciations. Ce facteur d'asynchronicité est rarement pris en considération dans la thématique actuelle de fonte des glaces, en général très rapide (environ 60 ans) , même si les échelles de temps sont différentes** (aujourd'hui la discussion porte sur l'échelle décennale, et les résolutions temporelles restent d'actualité aussi bien dans le Pléistocène que dans l'Holocène et l'Actuel).

Une vision globale de l'Arctique d'il y a environ 20 000 ans au maximum de la dernière glaciation (lors du dernier cycle glaciaire) montrent les deux grandes calottes glaciaires autour du pôle Nord. (Figs. 22, 30). Le niveau moyen des mers était environ 120 mètres en-dessous de l'actuel.

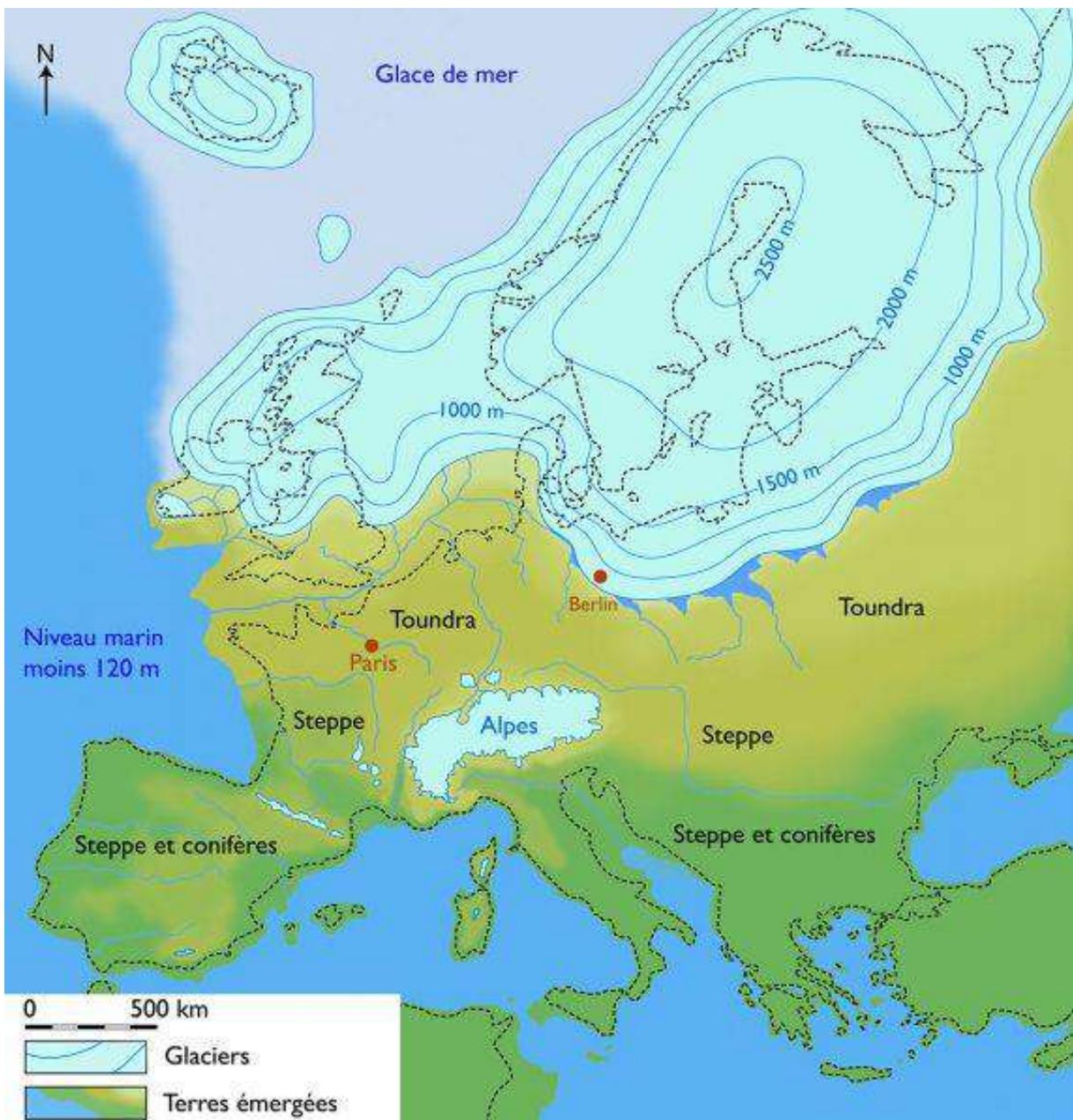


Fig. 30. Inlandsis de la Fennoscandie il y a 22 ka BP. Le niveau marin est 120 m plus bas. Source [ici](#).

12.6. La dernière déglaciation

L'interglaciaire actuel, ou **Holocène** qui a débuté il y a 11700 ans (suivant les **recommandations officielles** (CIS), présente un climat chaud relativement stable qui fait suite au Dernier Glaciaire (Weichsélien) en Europe, c'est-à-dire au dernier épisode glaciaire de durée voisine de 100 000 ans, caractérisé par un climat instable avec des variations de température de l'atmosphère de l'ordre de 4°C (à l'échelle de 1500 ans).

En moins de 10 000 ans la glace des grandes calottes (Amérique du Nord, Scandinavie, Patagonie et Nouvelle Zélande) disparaît, d'abord assez lentement de -18 ka à -15 ka, ensuite plus rapidement en association avec la remontée du niveau marin . Les calottes permanentes comme l'Antarctique ou le Groenland fluctuent peu : ils perdent leurs plateformes de glaces flottantes en périphérie. Les dernières traces de calottes glaciaires américaines disparaissent il y a 6000 ans (dernière calotte sur l'Ungava au N du Québec) (Fig. 31).

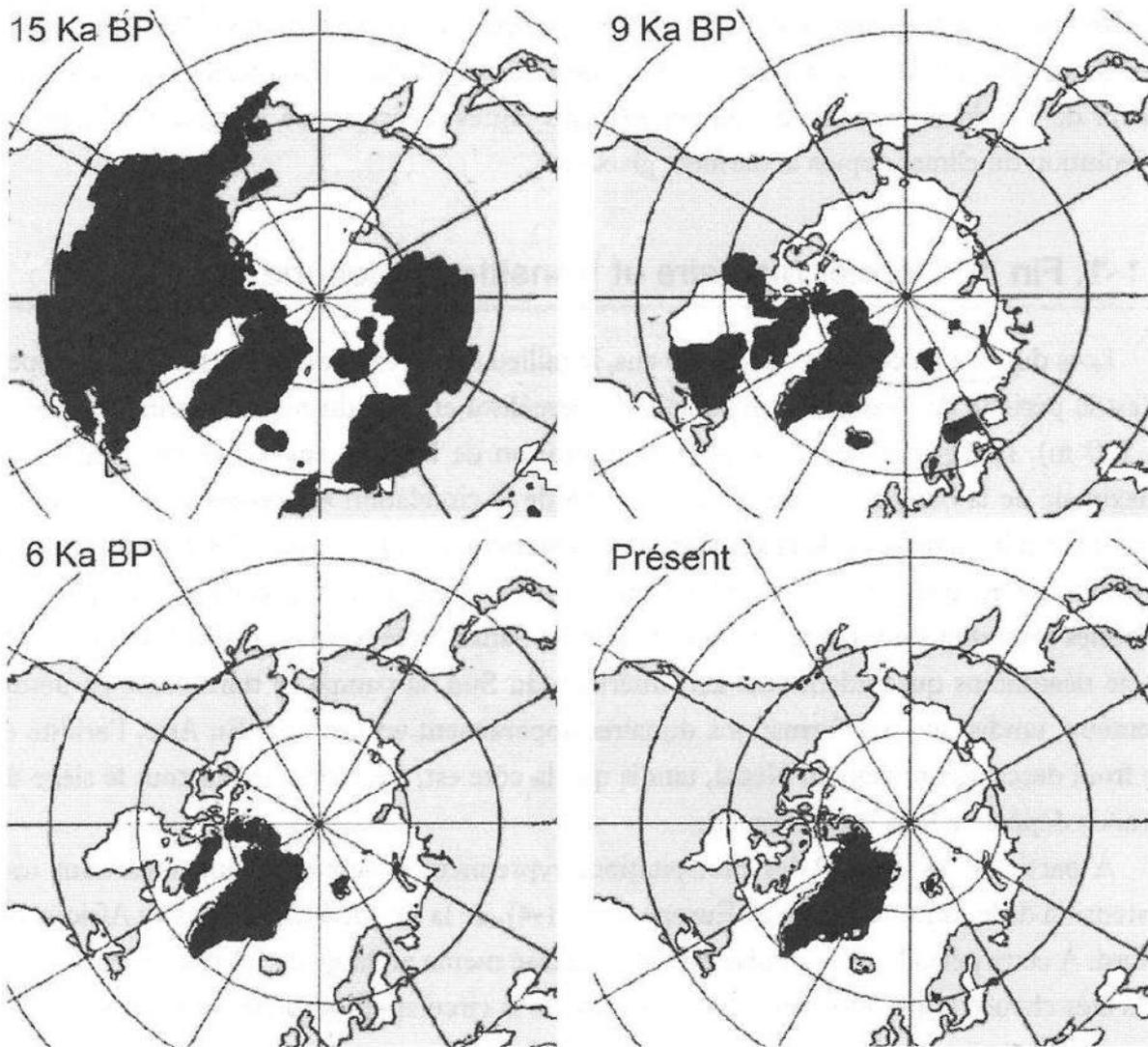


Fig. 31 : Evolution de l'extension des calottes de glace par rapport à l'actuel depuis la fin de la dernière glaciation (Van Vliet-Lanoë 2013).

Cette période de déglaciation se fait de manière brutale et pulsée avec retour de période froide (Younger Dryas, Fig. 32) sous contrôle 1° de décharges d'eaux de fontes des glaciers, stockées dans des lacs temporaires, notamment en Amérique du Nord et à l'est de la Baltique, 2° de l'activité solaire (minimum) et 3° de l'activité des volcans des deux hémisphères liées à la déglaciation (décharge).

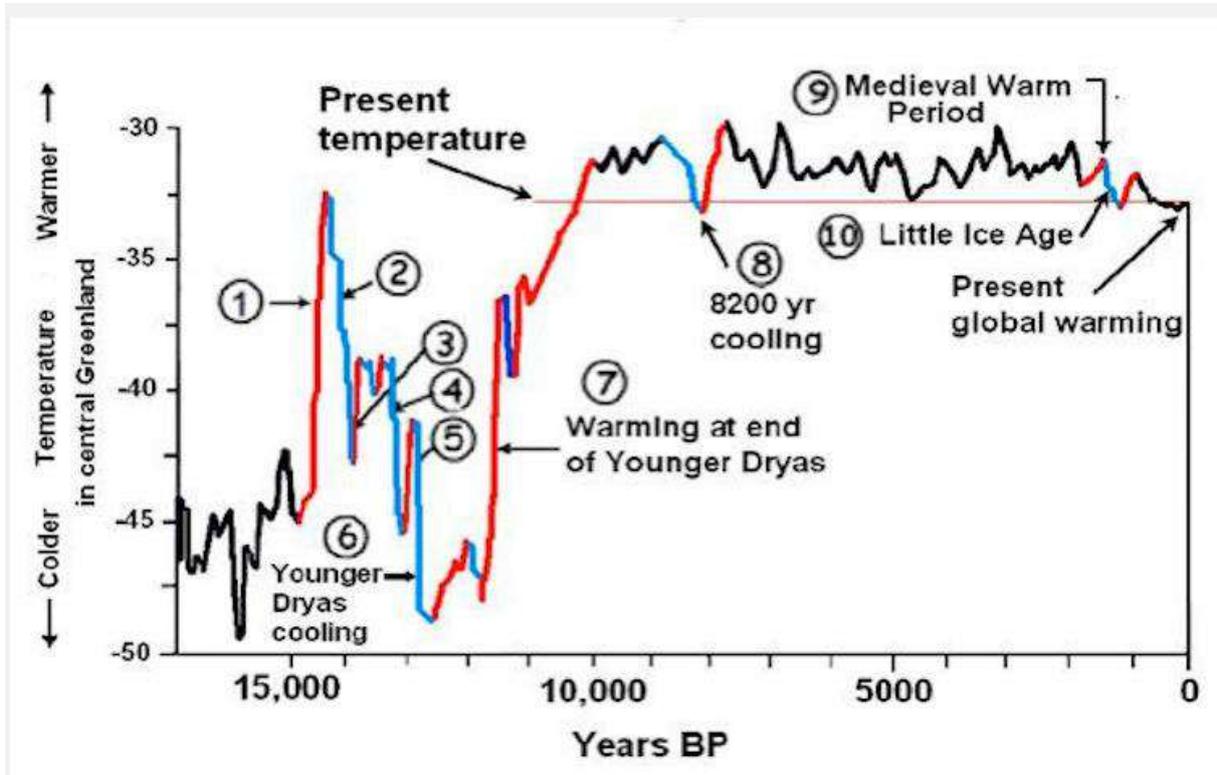


Fig. 32 : Variations des températures depuis 17 ka montrant le très fort refroidissement durant le Dryas Récent (Younger Dryas). Le Dernier Glaciaire se termine de manière très abrupte (cf cercle '1' sur la figure), vers 14,5 ka engendrant une fonte spectaculaire des inlandis : la calotte nord-américaine se disloque sous forme d'icebergs et son front a reculé à certains endroits de plusieurs kilomètres par an, les calottes scandinave et islandaise également. Ce phénomène a été accompagné par une remontée très rapide du niveau marin et une disparition totale de la banquise hivernale dans le détroit de Fram. Ensuite le climat se refroidit par pulses (cercles 2-4) . A environ 12,8 ka, les températures plongent de manière abrupte (cercle 5) et oscillent en position « froide » pendant 1300 ans (cercle 6 : deux minima) en association notamment avec un minimum solaire, de l'activité volcanique et la vidange pulsée de lacs pro-glaciaires. A environ 11,5 ka le climat se réchauffe à nouveau et met fin à l'épisode du Dryas (cercle 7). Graphique d'après Don Easterbrook (2016).

Actuellement nous sommes en fin d'interglaciaire, prévu dans 1000 ans selon les variations des paramètres orbitaux sur la qualité de l'insolation globale. Notre interglaciaire n'a rien de particulier si ce n'est qu'il est nettement moins chaud que ceux à 130 ka et 430 ka (stades isotopiques MIS 5e et 11c) pour raison orbitale (Fig. 33). Nous sommes depuis 7000 ans dans un refroidissement lent sous contrôle d'une baisse de l'intensité de l'insolation (forçage orbital). Les réchauffements au cours de l'Holocène sont gérés par l'insolation directe (activité cyclique du soleil), connu sous le nom de cycles de Bond. Depuis la période romaine (2000 ans), ce contrôle est régi 1° par le maximum d'insolation dans l'hémisphère sud, en retard de 3000 ans sur le nôtre (Van Vliet-Lanoë, 2018, Fig. 33), 2° par l'activité du soleil bien observée par les taches solaires et 3° par l'arrivée à partir de l'an Mil d'eaux chaudes de l'océan austral via la circulation océanique. Le Petit Age glaciaire (1350-1860 AD) est contrôlé surtout par plusieurs minima de l'activité solaire. Nous arrivons à la fin d'une série de cycles solaires à 11 ans très puissants. Cette conjoncture orbitale et solaire explique pourquoi les glaces fondent simultanément sur les deux hémisphères depuis 1860 AD avec des mini-reculs et avancées (Zemp et al., 2015, Van Vliet-Lanoë, 2018, Figs. 33 et 34).

LES GLACES

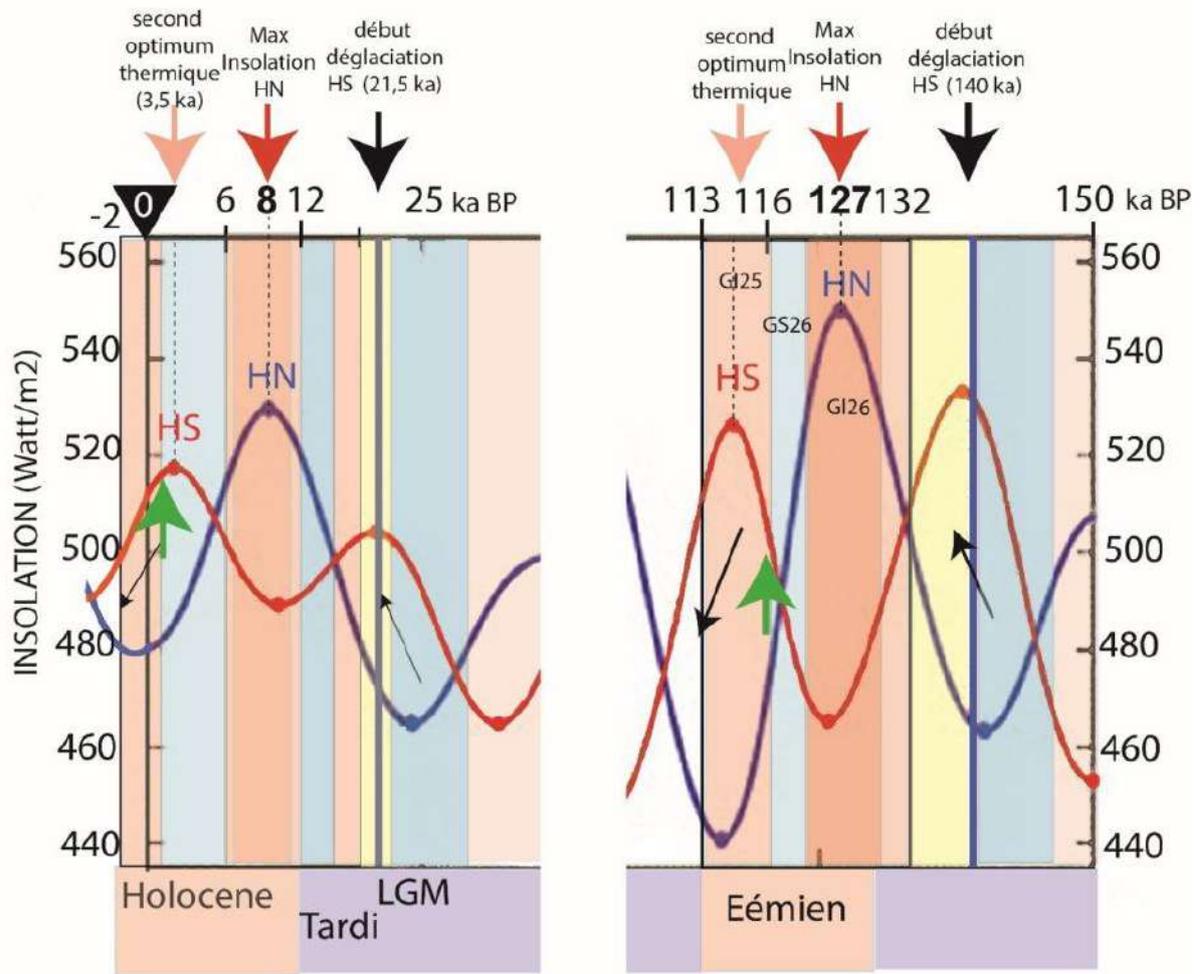


Fig. 33 : Evolution comparative du forçage orbital entre l'hémisphère N (HN) et le Sud (HS) lors du Dernier interglaciaire (Eémien) et de l'Holocène (Van Vliet-Lanoë, 2018). Les couleurs du fond donnent une idée des températures. Noter une amplitude plus faible des variations de l'insolation à l'Holocène.

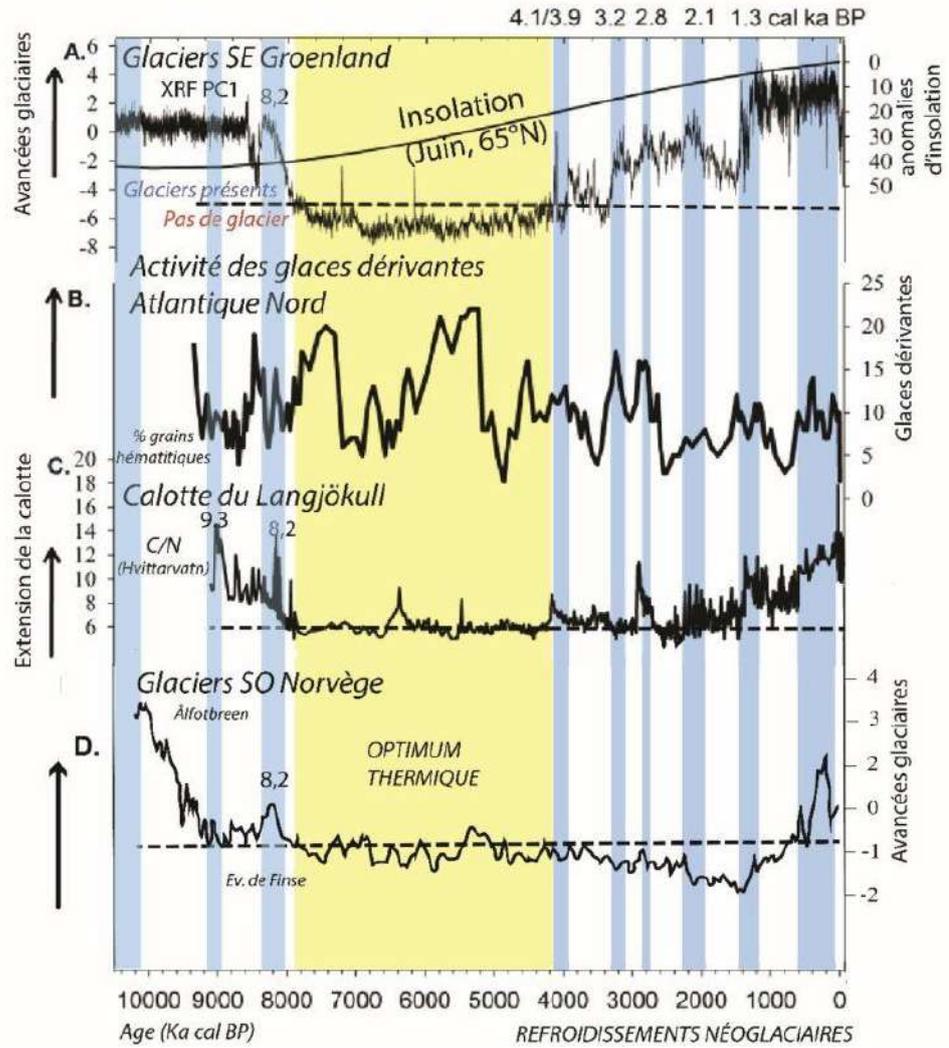


Fig. 34 Evolution holocène des glaciers dans la zone Nord-Atlantique. Noter le délai de réapparition des glaciers plus long sur la côte norvégienne sous influence du Gulf Stream ou de la dérive nord-atlantique. Modifié et complété d'après Balacio et al. (2015) et Gjerde et al. (2016). Le pointillé correspond approximativement à la ligne d'équilibre des neiges permanentes. Glaces dérivantes = banquise. Attention la valeur de l'insolation est inversée.

La banquise s'est développée avec le déficit croissant d'insolation de la seconde moitié de notre interglaciaire (Fig. 35) :

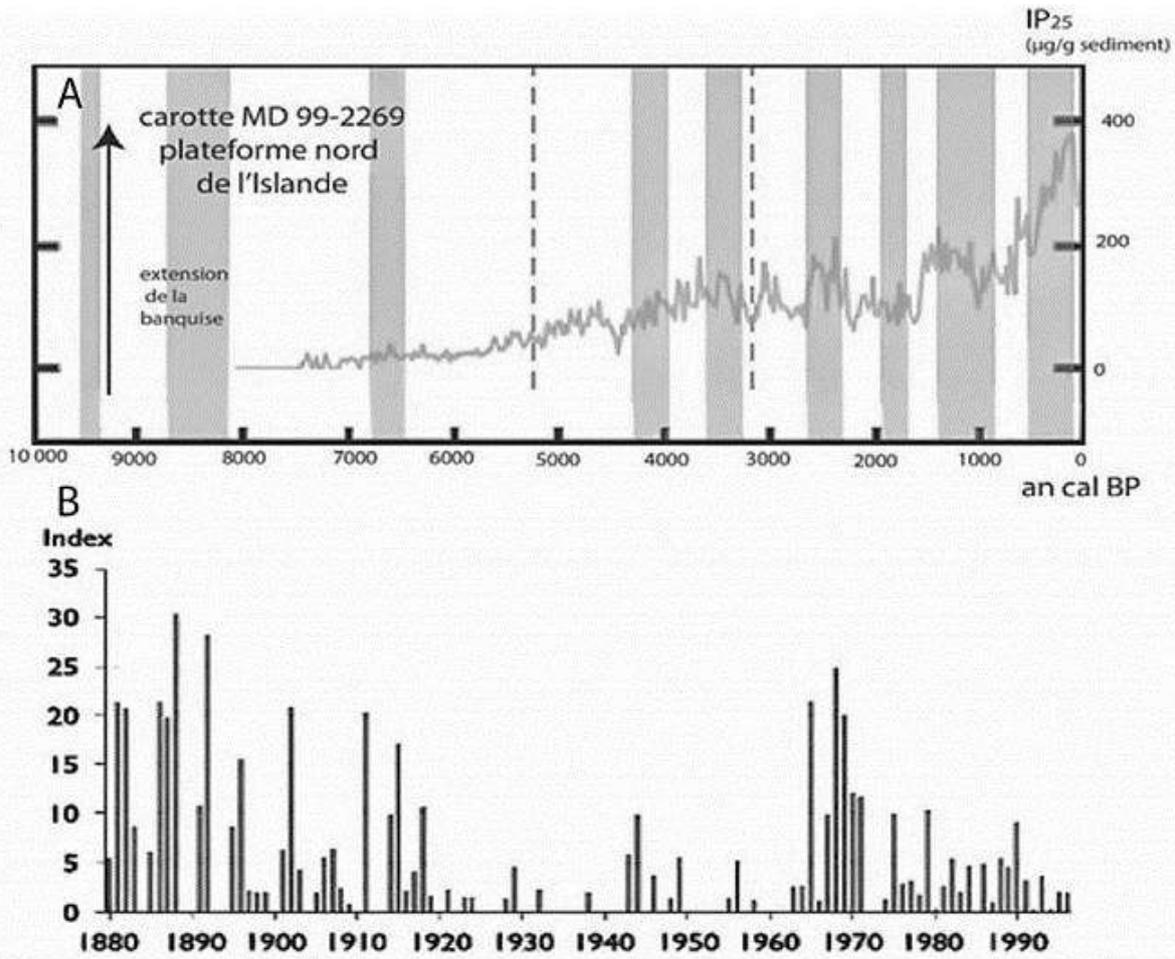


Fig. 35 : Histoire holocène de la banquise islandaise. A) extension holocène de la banquise sur la plateforme nord-islandaise (Cabedo-Sanz et al., 2016) B) index d'extension récente de la banquise autour de l'Islande. www.appinsys.com/GlobalWarming/RS_Greenland.htm

12.7. Quid de la fonte actuelle en Arctique ?

Sujet délicat s'il en est un... et surtout médiatisé à outrance.

12.7.1 La cryosphère arctique à l'Holocène, avant le GIEC

La calotte groenlandaise a survécu à l'optimum thermique holocène, 4°C plus chaud que l'actuel à 70°N sans que sa surface évolue réellement. Les glaciers arctiques vélants (qui relâchent des icebergs) reculent à basse altitude en relation 1° avec le réchauffement actuel des eaux de subsurface, en raison d'une dérive nord atlantique et un courant d'Irmingier un peu plus chaud qu'au 19^e siècle, 2° des précipitations plus élevées ce qui induit une lubrification basale des émissaires glaciaires et 3° une augmentation de la plasticité de la glace lié à des hivers moins froids et plus neigeux (Larsen et al. 2016). Avec ce réchauffement, l'évaporation et des précipitations plus importantes, amènent une fonte superficielle de la calotte en été, plus particulièrement basse altitude sur la côte ouest mais également un épaissement de 6 cm/an du centre –nord de la calotte (Institut météorologique danois, Colgan et al 2015).

Néanmoins la calotte reste relativement stable (Dyke et al. 2017). Un effondrement gravitaire des bords de la calotte groenlandaise ne s'observe pas à l'heure actuelle, en conséquence du réchauffement relatif des glaces (augmentation de la plasticité de la glace) alors qu'il s'observe actuellement en mer de Ross en Antarctique (Fig. 36), amenant la formation de langues flottantes de

glace très instables et a dû exister dans le NW de l'Islande lors de la dernière déglaciation (15 ka et 12 ka).



Fig. 36 : Effondrement gravitaire (flèche rouge) de la calotte sud antarctique (Mer de Ross), avec formation de langues de crues flottantes et vêtantes (langue de crue Drygalski issue du glacier Beacon David). Pas de flaques bleues d'eau de fonte à basse altitude comme au Groenland. La banquise est en gris. Le volcan Erebus est à 20 km sur la gauche. Google Earth.

De même, les glaciers scandinaves et du Spitzberg évoluent peu (Fig. 37). Seuls les glaciers islandais subissent une fonte accélérée depuis 60 ans, en relation avec une AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) très positive et le réchauffement du courant d'Irminger, entraînant une recrudescence des éruptions volcaniques (Ejafjallajökull, Bardarbunga ; Björnsson 2017). Une situation analogue a existé au Groenland avec le réchauffement 1920-1944 (Vermassen et al, 2020). Mais tous les glaciers arctiques ont avancé pendant la période fraîche de 1947-1980, associée à un minimum d'activité solaire, à une pollution atmosphérique industrielle importante (SO₂) et... à la famine en Islande !

LES GLACES

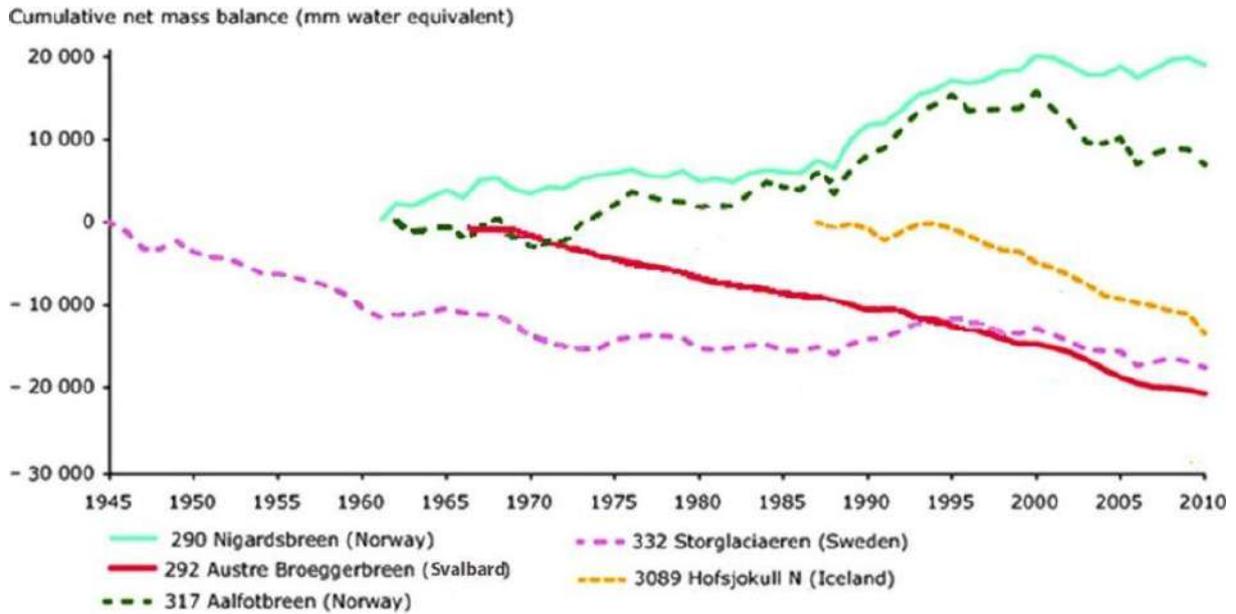


Fig. 37 : Bilan de masse des glaciers Scandinavie et Svalbard en mm/eau/an (World Glacier Monitoring Service (WGMS))

Cette période chaude (1920-1944, Fig. 38) a également été associée à un recul majeur de la banquise arctique, y compris en Islande, plus importante que le recul actuel (Fig. 38). En 1922, les rapports des explorateurs (Shackleton–Rowett Expedition 1921–1922) déclarent qu'on n'a jamais vu si peu de glace en Arctique... Un navire a atteint le 81°N sans voir de glace.... Il faut noter que l'extension de la banquise est en opposition de phase entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère sud (Fig. 40). Actuellement la banquise hivernale antarctique s'est étendue jusqu'en 2015 pendant que son homologue régressait en Arctique. La situation est en cours d'inversion.

LES GLACES

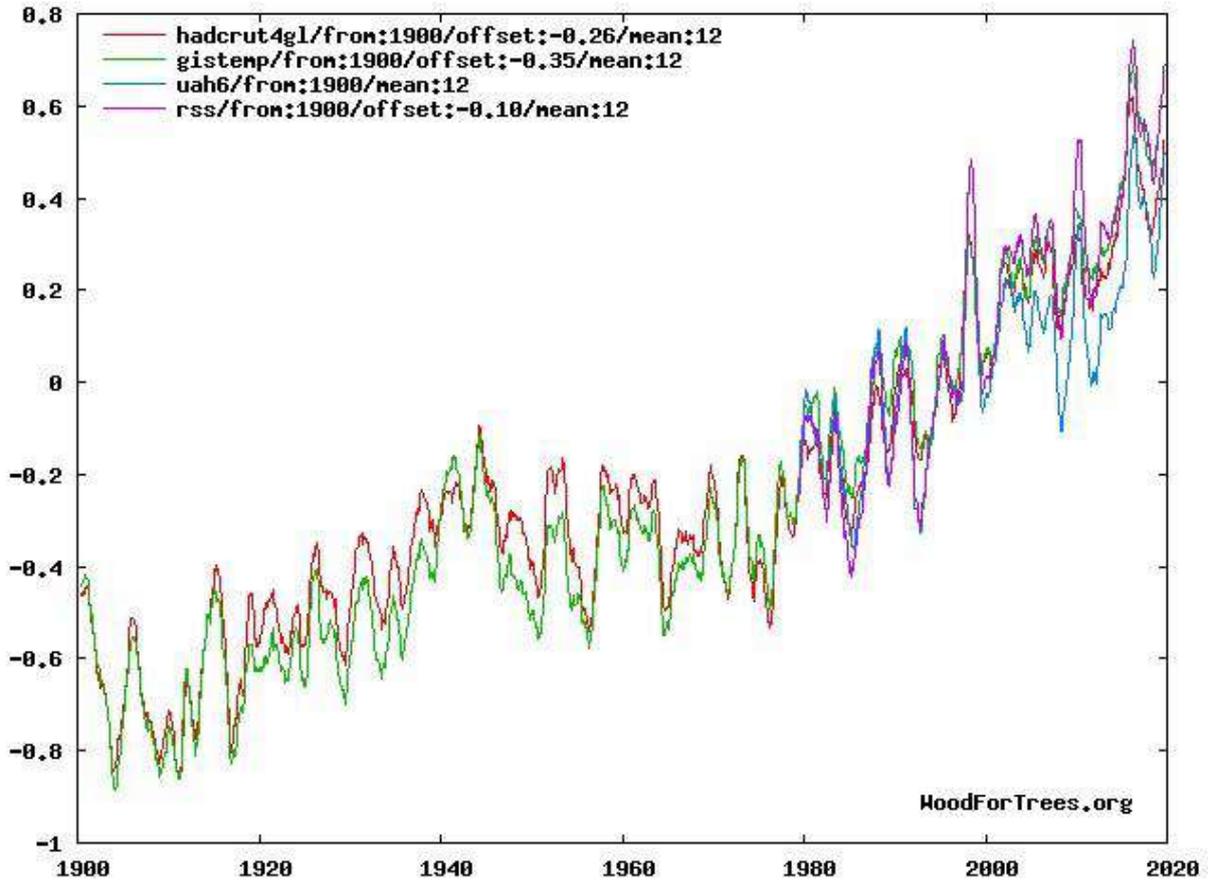


Fig. 38. Evolution des températures mondiales selon différentes bases de données. Gistemp (NOAA) et Hadcrut (GB) dépendent du groupement GIEC. Source indépendante.

L'accélération après 1980 suit l'évolution des cycles solaires (taches ou magnétiques, Fig. 39) en concurrence avec une inertie liée à la chaleur stockée dans l'océan mondial. Noter que le Nino de 1997-98 a suivi le pic de taches solaires 22 et a été accompagnée dans nos régions par des précipitations extraordinaires (pluie et neige en 1999-2000) liés à une évaporation accrue.

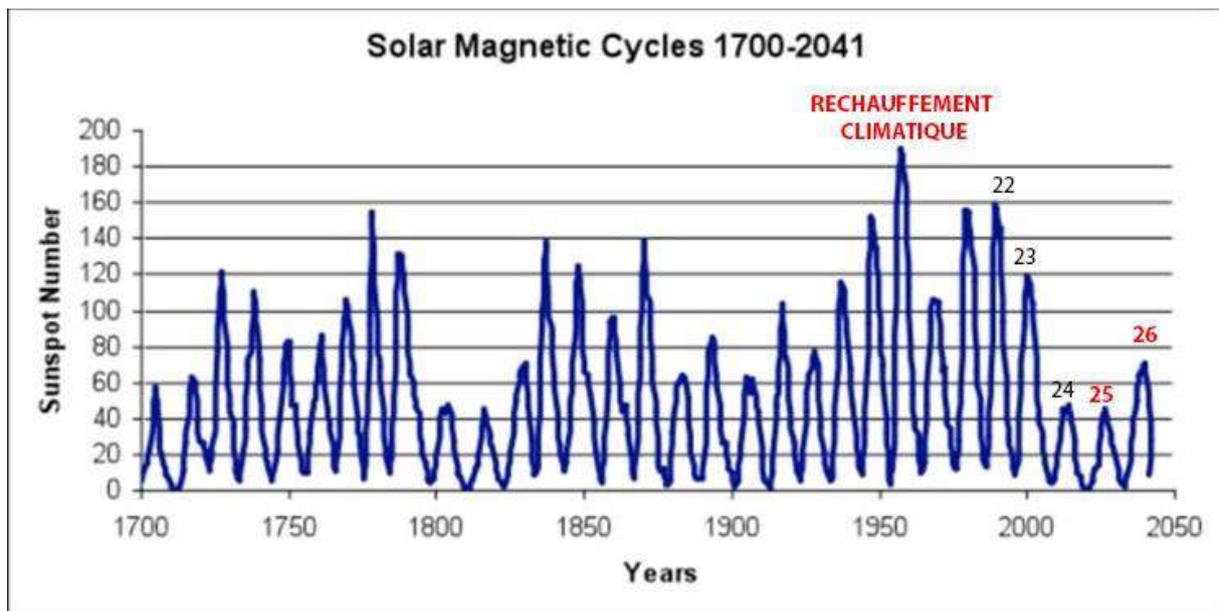


Fig 39 : Cycles d'activités magnétiques solaires échu et modélisation du cycle 25-26 en rouge (Youssef et al. 2009). Selon ces auteurs, la réduction de taille de l'héliosphère va induire un apport plus important en rayons cosmiques, induire une couverture nuageuse plus importante et par conséquent un refroidissement climatique. Ce ne sont pas les seuls chercheurs qui parviennent à cette conclusion impossible à publier dans une grande revue !. Le Nino 1997-98 est entre le cycle 22 et 23.

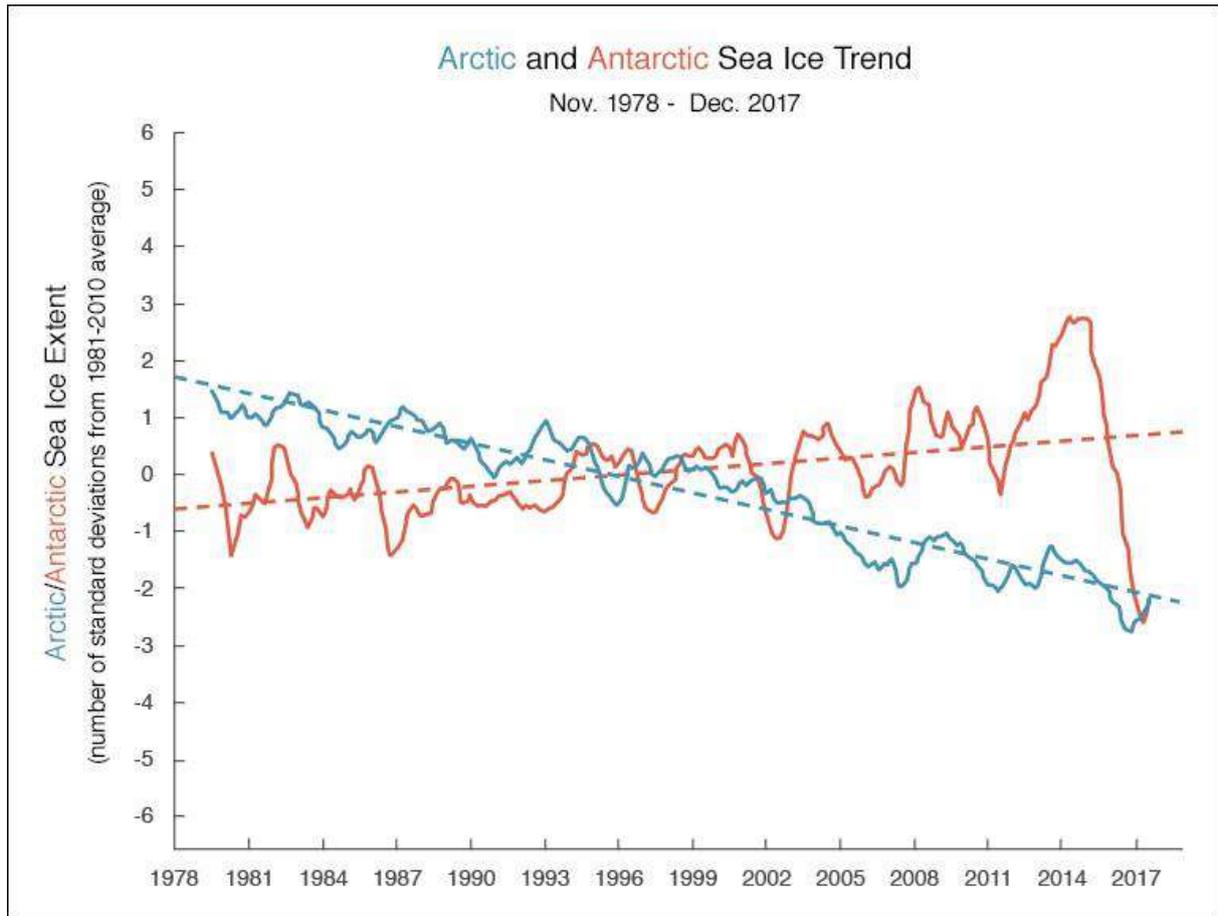


Fig. 40 : Extension des glaces de mer arctiques vs celles de l'Antarctique. NSDIC <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>

Quant à la fonte du permafrost, elle est le plus souvent le résultat de perturbations anthropiques (défrichements, feux) et si le permafrost se réduit à basse altitude dans sa zone sporadique d'extension (Température Moy. Ann comprise entre -1°C et -3°C dans les années 1980), seule sa partie active, qui fond en été, s'approfondit. Comme la calotte du Groenland, le pergélisol a survécu au maximum thermique holocène (8000-6000 ans) se rétractant en surface au-delà du cercle polaire. Le dégazage des hydrates de gaz a eu lieu principalement entre 14,5 et 12 ka BP (Osterkamp & Romanovsky, 1999), comme en atteste les cratères de dégazage sur le fond de la mer de Barents (Weniger et al. 2019). **Les phénomènes actuels de dégazage représentent de très petits volumes et le permafrost ne disparaîtra pas. Il s'est ré-étendu en Islande pendant le coup de froid des années 1947-1980.**

12.7.2. La part des choses...

Maurin (2020) a publié dans SCE trois articles (1/3, 2/3, 3/3) qui ont analysé de manière critique et en profondeur les données publiées sur ce sujet par le GIEC, dans son rapport AR5 (chapitre 4). **Il accorde une place particulière aux marges d'erreur souvent absentes dans le document mentionné.** Quelles sont ses conclusions ? Elles sont données en de son troisième article (3/3) et se présentent comme suit :

- • *‘La basse atmosphère de la Terre subit probablement un très faible réchauffement depuis la fin du Petit Âge de Glace (environ 1850). Il est donc possible, **mais pas certain**, que la diminution des glaciers alpins puisse refléter une diminution plus générale de la cryosphère ;*

- • L'observation de l'**ensemble** de la cryosphère date seulement de l'ère des satellites. Selon le chapitre 4 de l'AR5, ces observations récentes permettraient de démontrer que la cryosphère est en diminution lors des dernières décennies ;
- • La diminution **relative** de la cryosphère est très faible (-0,04%), et ce résultat est basé principalement sur des observations aériennes récentes, associées à de la modélisation. A cet égard, on doit s'interroger : ces moyens d'observations et la modélisation associée permettent-ils vraiment de voir les très faibles variations de masse ? (« **Assurons-nous bien du fait avant que de nous inquiéter de la cause** »).
- • La littérature récente montre que le sens de variation est incertain en Antarctique (**89,1%** de la cryosphère).
- La marge d'erreur du bilan gain/perte en Antarctique semble **très** optimiste. La **faible** marge d'erreur du contributeur **principal** 'Glaciers' doit aussi être interrogée : la localisation de l'IPCC et du WMO à Genève, à proximité des glaciers **alpins**, a-t-elle pu influencer le jugement ?
- • Les considérations ci-dessus fragilisent le bilan gain/perte selon l'AR5 : **une diminution (1992-2012) de la cryosphère est-elle vraiment démontrée ?** '

Selon cet auteur, la médiatisation à outrance portée sur les glaciers alpins et la banquise Nord peut fausser la vision d'ensemble concernant la cryosphère à l'échelle de la planète. Citons une partie de ses conclusions (son deuxième article 2/3) :

- La focalisation des médias et des organisations intergouvernementales sur la banquise **Nord** et les glaciers **alpins** n'est guère justifiée par leur masse : ils représentent ensemble $\approx 0,05\%$ de la masse de la cryosphère ;
- La connaissance de la cryosphère n'est satisfaisante ni sur l'ensemble des glaciers (0,57% de la cryosphère) ni sur l'Antarctique Est (75% de la cryosphère) ;

...

- Suite à la correction de 0,742 millions de km³ du volume des glaces de l'Antarctique entre AR4 et AR5 (**4 fois** le volume banquises + glaciers), peut-être serait-il prudent, de la part des rédacteurs du futur AR6, **d'être moins optimistes sur les marges d'erreurs**, notamment sur le bilan gain/perte qui sera l'objet de la dernière partie de l'article.

Et finalement dans la partie 1/1, l'Arctique est mis en perspective par rapport à l'Antarctique :

- La cryosphère c'est en premier lieu les zones proches du pôle Sud : banquises et glaciers de l'Antarctique occidentale (WAIS) ne représentent ensemble que 0,7% du volume de la cryosphère alors que la seule partie Est de l'Antarctique (EAIS), bien moins connue, représente plus de 75% de la cryosphère, soit **107 fois plus**.
- La simple correction du volume de glace en Antarctique, entre les rapports du GIEC AR4 (2007) et AR5 (2013), est **4 fois plus grande** que le volume (Banquises + Glaciers) ;

Les variations actuelles de la cryosphère restent négligeables si on les compare à celles du passé : l'ensemble des glaces terrestres, il y a 20 millénaires, devait avoir un volume au moins double du volume actuel. En effet, la fonte des glaces (entre -18 ka et -8 ka) fait monter le niveau des océans de ≈ 120 m contre 66 m SLE (Sea Level Equivalent à la Figure 1). Il faut aussi tenir compte du "GIA" (Glacisostatic adjustment), de 0,3 mm/an depuis 6000 ans, plus avant.

12.7.3. Situation actuelle

La variation de température moyenne globale est aujourd'hui de $0,14^{\circ}\text{C}/\text{décade}$ (ici), soit $0,014^{\circ}/\text{an}$. Faut-il s'affoler? Que les glaciers fondent suite à des situations locales/régionales n'a rien d'étonnant, d'autant qu'il ne s'agit pas d'une disparition définitive, depuis que le réchauffement s'est installé (ici).

Qu'il y ait fonte des glaces, quoi de plus normal en période de réchauffement. Est-ce 'normal' d'en faire tout un battage médiatique ? Et surtout relier cette fonte au seul "bouton CO_2 ? ou du méthane ? (ici). Nous avons vu ce qu'il fallait penser de l'hypothèse 'impact de l'effet de serre'. En effet Il faut cependant rester prudent car l'hypothèse de l'effet de serre est mise à mal par toute une série d'observations (voir ici, ici et ici) et qu'elle est en contradiction avec certains principes thermodynamiques élémentaires de la chimie-physique (voir ici).

Connolly et al. (2017) ont montré que l'extension de la glace arctique connaît des fluctuations avec gains et pertes au moins depuis 1901 (Fig. 41), avec une fonte plus importante à partir de 1979, avec les données fournies par l'imagerie satellitaire. Le renversement de tendance observé sur l'Antarctique n'a pas été pris en compte dans les reconstitutions ou simulations des récents modèles climatiques CMIP5 du GIEC, ce qui suggère que les modèles climatiques actuels sont encore peu fiables pour les reconstitutions antérieures des glaces de mer.

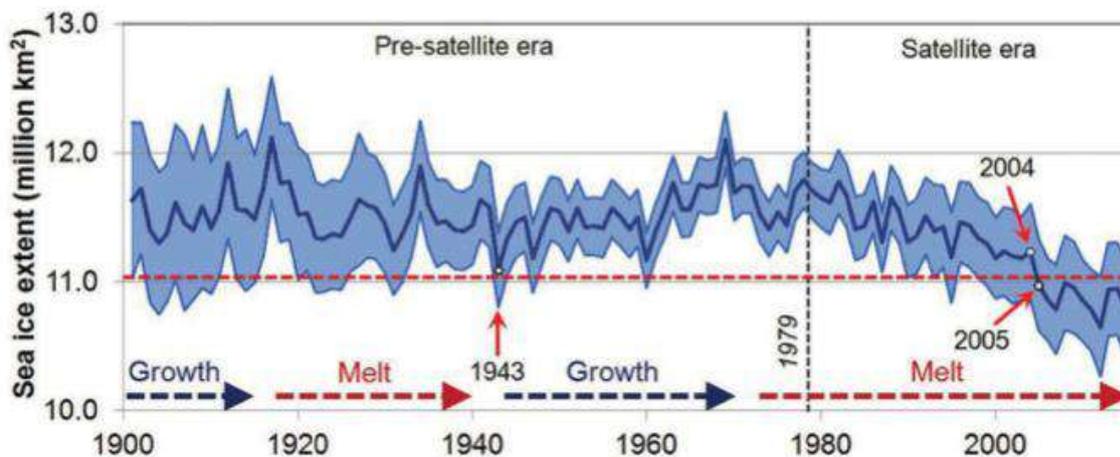


Fig. 41 : Comparaison des tendances annuelles de l'étendue de la glace de mer arctique entre l'ère pré-satellite et l'ère des satellites. Les périodes de croissance générale de la glace de mer et les périodes de fonte générale de la glace de mer sont indiquées au bas de la figure. D'après Connolly et al. (2017).

Oublions les fameuses prédictions d'Al Gore ('Science is settled'..... et fonte totale de la glace en 2013 au pôle Nord), pour nous concentrer sur les années actuelles. La glace du Sud-Est du Groenland a au moins 400 ka dans un secteur très sensible au réchauffement et celle du centre de l'Antarctique au moins 800 ka ! **Les dernières cinq années ont vu une augmentation de plus de 27 gigatonnes de neige et de glace au Groenland** (ici, voir également les actualisations mensuelles de SCE, ici) alors qu'on nous annonce sans cesse que 'presque' chaque nouvelle année est la plus chaude depuis les premiers enregistrements de température. Comprenez qui pourra ? Des records de froid (ici et ici) sont passés sous silence dans les médias ? Par contre dès qu'une fonte localisée apparaît ponctuellement, elle fait immédiatement la Une des médias (ici ou ici) alors que les récents graphiques du DMI sont nettement moins 'sensational', et montrent au fil du temps une fonte avec des fluctuations.

A nouveau avec le réchauffement actuel, surtout celui de l'océan austral, il est normal que la glace fonde et que ce processus soit naturellement amplifié par la perte d'albédo (ici). La situation n'est pas aussi 'dramatique' qu'on ne le prétend et à part d'importants pics de fonte (2007 et 2012) le bilan 'SMB' (*surface mass balance*) n'est pas très différent de celui des années 1900 à 1950 (ici). D'après Mougnot et al (2019) la fonte de la glace au Groenland, liée principalement aux glaciers vêtants, est à l'origine d'une montée du niveau marin de 13,7 mm depuis 1972, avec la moitié de cette augmentation au cours des 8 dernières années. Récemment (février 2020) le bilan de masse de surface (SMB) s'est inversé avec un gain de masse (ici et ici). Cette évolution inverse a déjà été notée pour certains glaciers dont le plus grand de tous qui s'épaissit même, celui de Jacobshavn (ici) ou pour une grande majorité des glaciers d'Alaska en crue (McNabb and Hock 2014). Selon ces auteurs **'...no corresponding change in the number of glaciers retreating nor do we see corresponding acceleration of retreat rates. To the contrary, many glaciers in the region have advanced...'** La conclusion est à peu près la même pour de nombreux glaciers du Groenland, restés stables ou sans retrait significatif de 2013 à 2019 (Andersen et al. 2019). Dans le site danois officiel Polar Portal, 2019 on note : **'Unusual weather resulted in an atypical melting season in the Arctic. The 2017-18 season in the Arctic has once again been extraordinary. A cold summer with high levels of precipitation has benefitted the Ice Sheet, whilst glaciers have continued the development seen during the last six years in which they have more or less maintained their area. The sea ice, on the other hand, has been more vulnerable, with high sea temperatures and warm winds leading to a large area north of Greenland being ice-free in two separate periods – February and August respectively.'** Notons également cette étude (Rösel et al. 2018) montrant que l'épaisseur de la glace de mer était plus importante en 2015 (1,56 m) et 2017 (1,65 m) qu'en 1955 (0,94 m). Tout ceci montre qu'il y a de nombreuses fluctuations dans le processus de fonte, comme par le passé et particulièrement la période 1930-194.5.

Un autre sujet médiatique qui fait régulièrement la Une des médias concerne les ours, contrairement à ce qui est rapporté ils se portent bien en Arctique, voir par exemple ici ou dans SCE ici parmi les très nombreuses références disponibles.

Finalement, comme nous l'avons vu tout au long de cet article, une (très) grande part de l'information médiatisée provient des modèles. Ceux du GIEC sont très peu fiables (cf. SCE ici) et il est légitime de les mettre en question (par exemple Huang et al. 2019). Une étude de plus de 27 000 relevés de température de la basse troposphère de l'océan Arctique durant la période 1950-1990 a conclu à l'absence de réchauffement conséquent (voir toutes les données accessibles compilées sur « Climate4You ») en Arctique (prévu par les modèles, et à un refroidissement de l'ouest de l'océan Arctique en hiver et en automne (Kahl et al. 1993). Les modèles du GIEC surchauffent toujours (ici) et n'incitent pas à la confiance, c'est le moins que l'on puisse dire...Alors que la banquise arctique a recommencé à se ré-étendre au grand plaisir de Nanouk, en cours de surpopulation en Sibérie....Tout comme le minimum d'activité solaire prévu pour 2030 depuis les années 1980 et qui apparemment sera à l'heure.

Au terme de ce chapitre 7, il faut à nouveau se rendre à l'évidence, à savoir la situation de la fonte des glaces et des températures arctiques sont loin d'être parfaitement comprise, non seulement à une échelle temporelle courte (pluri-annuelle ou un peu plus), mais aussi en ce qui concernent les processus à l'origine de la fonte. Cette dernière bien réelle, représente une fluctuation à l'échelle décennale (AMO), pluriséculaire ou millénaire, cette fluctuation 'thermique' (= le réchauffement) ayant débuté vers 1860 (SCE ici) en période de déglaciation du Petit Age glaciaire ou, à l'échelle des temps historiques, suite à la déglaciation ayant mis fin au Dernier Glaciaire. Si l'on se réfère aux modélisations simples (insolation), la fin de notre interglaciaire joue encore les prolongations pour environ 1000 ans (Berger et al., 2003). Si l'on s'en réfère à un forçage extra-terrestre, la température devrait commencer à se rafraîchir dans 300 ans environ (Keeling & Whorf, 2000). Remontant le

temps, la calotte glaciaire européenne est absente au-delà du Pliocène et risque de s'étendre beaucoup lors du prochain maximum glaciaire, dans 60 ka.

12.8. Conclusion

La dynamique des cycles glaciaires-interglaciaires du Quaternaire est loin d'être complètement élucidée.... Le climat en période glaciaire change de façon parfois très brutale... pour des raisons qui ne sont liées ni au forçage astronomique, ni aux variations de CO₂. Reste l'activité solaire, dont les mécanismes sont à peine entrevus. Les modèles conceptuels (...) sont très largement insuffisants pour rendre compte des interactions physiques et biogéochimiques.... Les modèles du climat les plus sophistiqués pour simuler le 21^{ème} siècle, 'ou modèles de circulation générale' sont malheureusement incapables de simuler ces changements.' etc. (Duplessy Ramstein 2013, p288).

Cette interprétation anthropocentrique « réchauffement climatique » oublie que d'autres forçages anthropiques impactent le climat en sens inverse à celui des gaz à effet de serre, comme l'érosion des sols et l'aridification générés par le défrichement de la végétation naturelle (climax) ou l'eutrophisation anthropogène de l'océan piégeant biologiquement le CO₂ et permettant la prolifération d'algues productrices d'un précurseur des aérosols sulfuriques, notre « crème solaire ». Le premier gaz à effet de serre est la vapeur d'eau, émise sous l'impact des radiations solaires ou de notre industrie, **hydrocarbures** inclus..... Notre terre est un monde à échanges thermiques convectifs, non à bilan radiatif statique, mais cela constitue un autre chapitre !

ADDENDUM : LES RESSOURCES MINERALES

Tout comme pour l'Antarctique (2/2), le géologue ne peut faire l'impasse sur les ressources avérées ou potentielles en Arctique.

L'Arctique serait-il une terre promise, un nouvel Eldorado ? En tous cas il est l'objet d'une littérature abondante dans les médias mêlant phantasmes ou sensationnalisme et réalités, et opposant une large partie de nos populations entre ceux qui veulent que l'Arctique soit un sanctuaire intouchable et d'autres qui veulent que ces ressources puissent être exploitées.

Le dilemme occupa la scène médiatique depuis 2007 suite à la construction par le Canada d'un port en eaux profondes dans le passage Nord-Ouest et la signature d'un accord entre Gazprom et Total pour le développement sur 25 ans du gisement pétrolier offshore de **Shtokman**. C'est également l'année où le passage du Nord-Ouest est entièrement ouvert à la navigation. Toujours en 2007, l'Agence spatiale européenne et le NSIDC (National Snow and Ice Data Center) américain annoncent un record historique de la fonte estivale. Et enfin ... Al Gore lors de cérémonie lié à l'obtention du Prix Nobel de la Paix qui annonce la fonte totale de l'océan Arctique pour 2013. Bref en 2007 tous les ingrédients sont réunis pour 'lancer la Bataille du Grand Nord', bataille immédiatement symbolisée par le planté d'un drapeau russe au droit du pôle Nord. La suite est 'cafouilleuse' faite de (géo)politiques, d'environnementalisme sous la pression de nombreuses ONG, d'intérêts financiers y compris le tourisme (tout comme pour l'Antarctique), etc. A nouveau la symbolique va s'affirmer, notamment avec la nomination par le gouvernement français de **Sékolène Royal** qui succède à Michel Rocard en tant qu'ambassadrice des pôles (elle sera démise en 2020). Pour certains spécialiste (Mered 2019) '*l'Arctique est l'avenir du monde.... Il concerne le futur écologique, le futur technologique, le futur logistique, le futur stratégique ...*'. Les enjeux ne manquent donc pas !

Voyons l'état des lieux concernant les ressources. De nombreux chiffres contradictoires circulent, et il faut donc considérer les fourchettes dans les estimations.

Bien entendu celles qui sont les mieux médiatisées sont celles liés aux **hydrocarbures**.

L'**USGS (2008)** estime que 412 milliards de barils équivalent pétrole conventionnel (bep) sont à découvrir en Arctique, dont 13% de pétrole (huile) et 30% de gaz à l'échelle mondiale. Ensuite, l'**USGS (2009)** estime que 30% des hydrocarbures non encore découverts sur terre se trouvent au nord du cercle arctique, dont 13% de gaz, principalement offshore par plus de 500 mètres d'eau et surtout en Russie (Figs. 43 et 44) (**Gautier et al. 2009**). Selon ces auteurs (également [ici](#)), l'huile ou pétrole (non découverts) ne sont pas susceptibles d'influencer fortement le marché toujours piloté par le Moyen Orient. Le Service géologique US estime que plus de 87% des hydrocarbures arctiques sont présents dans 7 provinces ou bassins sédimentaires, Bassin Amérasien, Bassin Arctique-Alaska, Bassin Barents-Est, Bassin Rift de l'Est-Groenland Bassin Ouest-Groenland/Est Canada, Bassin Ouest Sibérie et Bassin Yenisey-Khatanga (Fig. 42). Se reporter aux figures 43 et 44 pour 'actualisation' (2009).



Fig. 42 : Le Service géologique US estime que plus de 87% des hydrocarbures arctiques sont présents dans 7 provinces ou bassins sédimentaires (voir texte).

LES GLACES

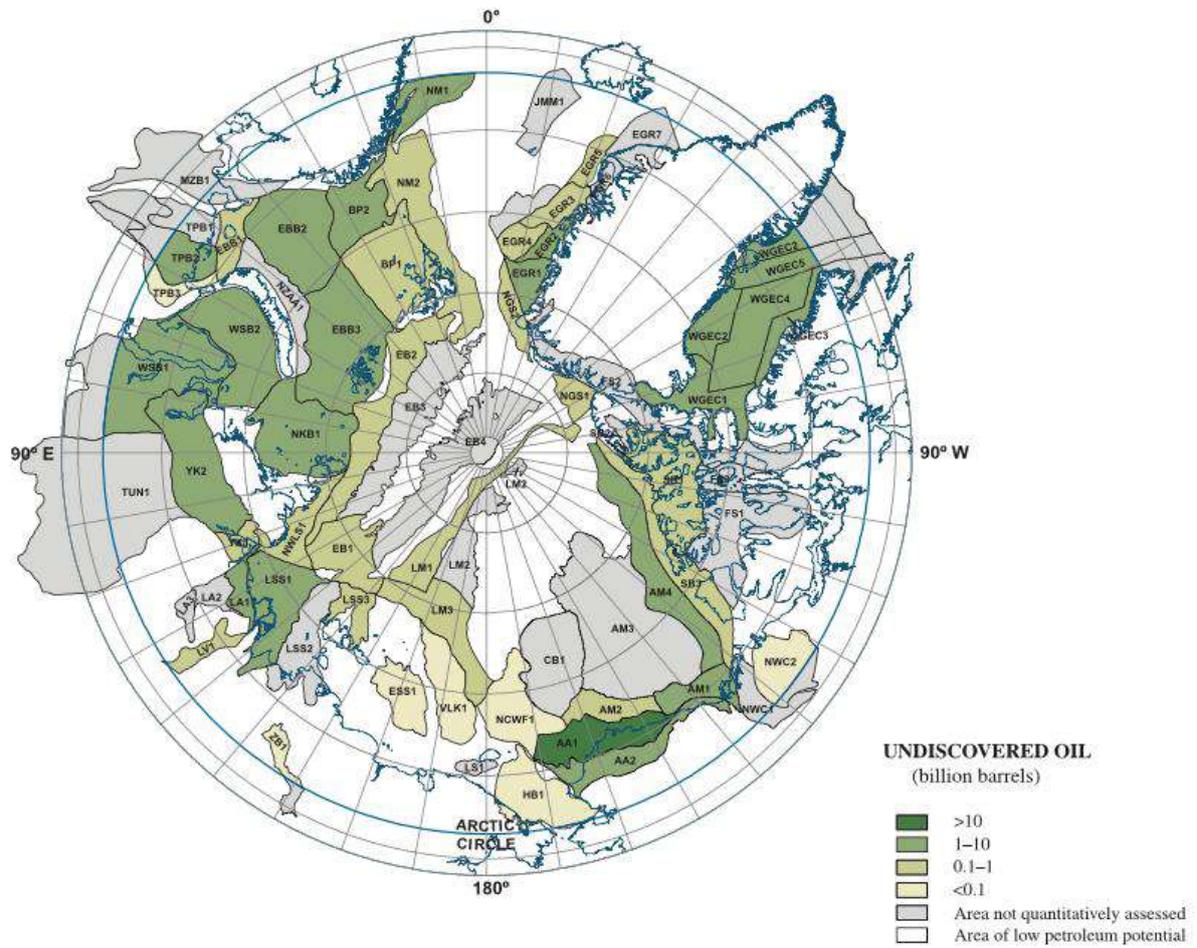


Fig. 43. Carte donnant l'estimation du pétrole (en milliards de barils) non encore découvert au nord du Cercle Arctique. D'après (Gautier et al. 2009).

LES GLACES

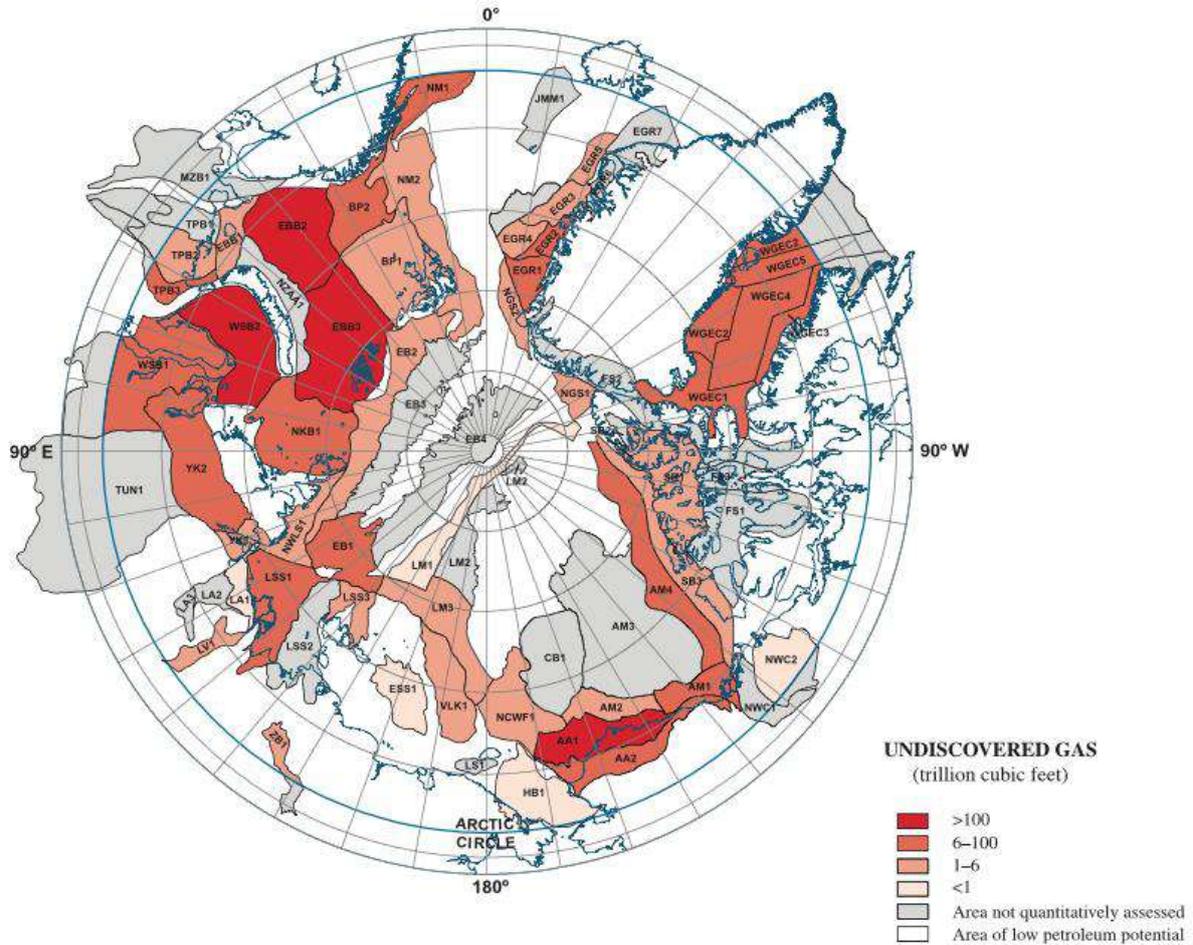


Fig. 44. Carte donnant l'estimation du gaz (en trillions de pied cubes) non encore découvert au nord du Cercle Arctique. D'après (Gautier et al. 2009). Selon l'USGS (2009) le gaz à découvrir est compris entre 770 à 2990 trillions de pied cubes, et représente une énergie trois fois plus importante que celle de l'huile et le champ le plus grand (non découvert en 2009) devrait être environ dix fois plus large que le plus grand gisement, non découvert, d'huile.

Finalement l'Arctique renfermerait ainsi en 2009, 44 à 157 milliards de barils d'huile récupérables. Depuis lors les ressources non conventionnelles (comme par exemple le gaz de schistes à travers toute la Sibérie orientale), l'huile de schiste, les sables bitumineux ont fait exploser les chiffres précédents et attiré les investisseurs. En 2015-2017 le prix du baril de pétrole 'arctique' était bas, autour de 50\$ (suite aux progrès technologiques) et ce pétrole trouvait sa place dans le marché mondial, vu la forte croissance des besoins énergétiques, et l'intermittences des énergies renouvelables, incapables (encore aujourd'hui) de pallier à ces besoins énergétiques grandissants. Dans l'ensemble de l'Arctique, 15 000 forages ont été réalisés depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale pour environ 400 champs découverts, certains peu rentables, d'autres rentables en offshore avec un seuil de rentabilité à 31\$. L'acteur dominant de la région arctique est sans contexte la Russie dont 80 % de son gaz naturel provient (en 2016) de cette région, et en particulier de la région de Yamalo-Nénétise avec de nombreux projets effectifs, par exemple avec Total (Fig. 45). De nouveau projet ont vu le jour en 2019 dans le Gand Nord, bien au-delà de la péninsule de Yamal, avec notamment le projet **Goliat** des pétroliers italiens de ENI. Des mises en production de nouveaux gisements sont prévus dès 2022 et cela ne va pas sans rencontrer des problèmes avec les opposants à l'extraction de cette ressource (ici). L'Arctique contient également des gisements de **charbon**, par exemple dans la péninsule de Kola, du Svalbard et de Vorkuta (aujourd'hui la plupart sont fermés). Les enjeux de changements géopolitiques liés à l'exploitation des ressources viennent de faire l'objet d'une synthèse par le **Sénat français (2020)**.



Fig. 45 : Yamal LNG est situé au-delà du cercle polaire, sur l'estuaire de la rivière Ob, dans une région sauvage enclavée et gelée 7 à 9 mois par an, où, en hiver, la température peut chuter jusqu'à -50°C. Pour garantir sa stabilité dans le permafrost (sol gelé en profondeur qui ne dégèle en surface que les mois d'été), l'usine a été construite sur des dizaines de milliers de pilotis de diamètre et de profondeur variables, une solution déployée à une échelle inédite sur le site de Yamal LNG. D'après Total.

Les hydrocarbures conventionnels ou non dont il vient d'être question sont associés aux roches sédimentaires présentes dans les bassins sédimentaires. Nous avons vu (partie ½) que l'Arctique géologique est surtout constitué par un puissant socle cristallin ou magmatique et métamorphique hérité à travers les cycles orogéniques depuis plus de 2,5 Ga. Les socles sont réputés pour contenir de nombreux éléments utiles assez faciles à exploiter à partir de mines ou gisements, souvent gigantesques. Citons **le nickel, le cobalt, le fer, les platinoïdes, les terres rares, la barite, l'apatite, le zinc, le chrome, les phosphates, le cuivre, l'or, l'argent, les rubis, les saphirs, les anorthosites**, exploités intensivement en Russie, Laponie suédoise et finlandaise, au Groenland et arctique nord-américain (USA et Canada). Ces mines sont souvent gigantesques, prenons seulement l'exemple des mines de Kiruna et Malmberget en Laponie suédoise. Il s'agit pour **Kiruna** et **Malmberget**, des mines à ciel ouvert et souterraine de minerai de fer, les plus grandes du monde, la seconde fut ouverte en 1745 !

Pour terminer avec cet inventaire rapide citons Mered (2019) 'Contrairement à ce qui est trop souvent relayé dans la presse, Le Grand Nord n'est ni trop cher, ni trop complexe, ni trop isolé pour y développer des projets extractifs, particulièrement en matière d'hydrocarbures. Ce n'est pas une affaire de prospective lointaine, c'est du présent et depuis bien longtemps déjà ...Peut-être d'ailleurs est-ce pour cela que c'est tant un sujet ?'

Notons aussi que l'Arctique est **une zone nucléarisée**, surtout en Russie avec 39 navires à propulsion nucléaire pour un total de 62 réacteurs. Il est prévu que cette option nucléaire se développera substantiellement dans un avenir proche, comme vient déjà de le montrer l'arrivée **d'une centrale nucléaire flottante russe** dans l'Arctique. L'objectif est aussi de construire des unités de 24 MW, d'une autonomie de 30 ans, pour servir des usines de production pétro-gazières (Mered 2019) (**ici** et **ici**). D'autres pays sont intéressés et suivront cette voie (USA, Chine...).

Pour être complet, mentionnons que **les énergies renouvelables** (éolien au Groenland, nord de l'Islande ..., géothermie à partir de la péninsule de Kamchatka et de l'Islande, biomasse, hydrogène 'vert' produit à partir d'une source géothermique ou hydroélectrique) en Arctique font actuellement l'objet de grands projets (voir par exemple le [State Grid Corporation of China](#)).

En conclusion, l'Arctique présente un fort potentiel en ressources minérales et énergétiques, et sera, si ce n'est pas déjà le cas actuellement, un nouveau théâtre de confrontations entre des acteurs aux préoccupations le plus souvent opposées. Dans ce contexte le statut juridique de l'Arctique revêt une dimension capitale ([ici](#)). Nous avons souvent cité [Mered \(2019\)](#), professeur de géopolitique des zones arctiques, aussi laissons-lui le mot de la fin pour cette partie de l'article : **'Aujourd'hui, l'Arctique n'est déjà plus tout à fait un monde polaire. C'est un espace post-polaire'**

NOTES (commune aux deux parties)

Abreu V.S. & Anderson J.B. 1998. Glacial eustasy during the Cenozoic: sequence stratigraphic implications. *Am. Ass. Petrol. Geol.* 82, 1385-1400.

Balascio N.L., D'Andrea W.J., Bradley R.S. 2015. Glacier response to North Atlantic climate variability during the Holocene. *Climate Past, Discuss.*, 11(3), 2009-2036.

Bjarnadóttir L.R., Winsborrow M.C.M., Andreassen, K. 2014. Deglaciation of the Central Barents Sea. *Quat. Sci. Rev.* 92, 208–226,

Björnsson H. 2017. *Jöklar á Íslandi. Bókaútgáfan Opna, Reykjavík.* 479 p. English translation 2019 *The Glaciers of Iceland.* Atlantis Adv. Quat. Sci. 2, 613 p., Atlantis Press, Springer.

Broecker W.S., Denton, G.H., 1990. The role of ocean-atmosphere reorganisation in glacial cycles. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990QSRv....9..305B/abstract>

De Vernal A., Eynaud F., Henry M., Hillaire-Marcel C., Londeix L., Mangin S. 2005. Reconstruction of sea-surface conditions at middle to high latitudes of the Northern Hemisphere during the Last Glacial Maximum (LGM) based on dinoflagellate cyst assemblages *Quaternary Science Reviews* 24 (7-9), 897-924

Lemieux-Dudon B. et al. 2010. Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores. *Quatern. Sci. Rev.* 29, 8–20. 9:305–341.

Cabedo-Sanz P., Belt, S.T., Jennings A.E., Andrews J.T., Geirsdóttir A. 2016. Variability in drift ice export from the Arctic Ocean to the North Icelandic Shelf over the last 8,000 years: a multi-proxy evaluation. *Quat. Sci. Rev.* 146, 99–115.

Colgan W, Box JE, Andersen ML, Fettweis X, Csathó B, Fausto RS, Van As D and Wahr 2015. [Greenland high-elevation mass balance: inference and implication of reference period \(1961-1990\) imbalance.](#) *Ann. Glac.*, 56 (70), 105-117 (2015) (doi:10.3189/2015AoG70A967).

Cronin T.M. 2010. *Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present.* Columbia University Press, 431p.

Don Easterbrook, 2016. *Evidence-Based Climate Science. Data opposing CO₂ emissions as the primary source of global warming.* Second Edition 2016. ISBN: 978-0-12-804588-6. Elsevier.

Dromart G. et al. 2003. Ice age at the Middle-Late Jurassic transition? *Earth Planet. Sci. Lett.* 213, 205–220.

Duplessy J.C., Morel P. 1990. *Gros temps sur la Planète.* Editions Odile Jacob, 297p.

Duplessy J.C., Ramstein G. 2013. *Paléoclimatologie, Tome 1 (Trouver, Dater et Interpréter les Indices), Tome 2 (Enquête sur les climats anciens).* CNRS Editions, EDP Sciences.

LES GLACES

- Dyke L.M., Andresen A.S., Seidenkrantz M.S., Hughes A.H.L., Hiemstra J.F., Murray, T., Bjørk A.A., Sutherland D.A., Vermassen, F. 2017. Minimal Holocene retreat of large tidewater glaciers in Køge Bugt, southeast Greenland. *Scientific Rep.* 7 (12330), doi:10.1038/s41598-017-12018-x.
- Ezat M.M., Rasmussen T.L., Groeneveld J. 2014. Persistent intermediate water warming during cold stadials in the southeastern Nordic seas during the past 65 k.y.. *Geology*, 42 (8): 663 DOI: [10.1130/G35579.1](https://doi.org/10.1130/G35579.1)
- Gaina C., Medvedev S., Torsvik, T.H., Koulakov, I.Y., Werner S.C. 2013. 4D Arctic: A Glimpse into the Structure and Evolution of the Arctic in the Light of New Geophysical Maps, Plate Tectonics and Tomographic Models. *Surveys in geophysics*. ISSN 0169-3298. 35, s 1095- 1122 . doi: [10.1007/s10712-013-9254-y](https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y)
- Gjerde M., Bakke J., Vasskog K., Nesje, A. Hormes A. 2016. Holocene glacier variability and Neoglacial hydroclimate at Ålfotbreen, western Norway. *Quat Sci. Rev.* 133, 28-47.
- Herbert T.D., Lawrence K.T., Tzanova A., Cleaveland, Peterson L., Caballero-Gill, R., Kelly, C.S. 2016. Late Miocene global cooling and the rise of modern ecosystems. *Nat. Geosci.* 9, 843–847.
- Herold N.M. Seton, R.D. Müller, Y., M. Huber M. 2008. Middle Miocene tectonic boundary conditions for use in climate models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*,9, Q10009, doi:10.1029/2008GC002046.
- Howell D.G. 1985. Principles of Terrane Analysis. New applications for global tectonic. Chapman & Hall, 245p.
- Korte C. et al. 2015. Jurassic climate mode governed by ocean gateway. *Nat. Commun.* 6:10015 doi: 10.1038/ncomms10015.
- Larsen S.H., Khan S.A., Ahlstrøm A.P., Hvidberg C.S., Willis M.J., Andersen S.B. 2016. Increased mass loss and asynchronous behavior of marine-terminating outlet glaciers at Upernavik Isstrøm, NW Greenland. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 121, 241-256.
- Lisiecki L.E. 2010a. Links between eccentricity forcing and the 100,000-year glacial cycle, *Nature Geoscience*, 3, 349-352.
- Lisiecki L.E. 2010b. A benthic $\delta^{13}C$ -based proxy for atmospheric pCO_2 over the last 1.5 Myr, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L21708, doi:10.1029/2010GL045109.
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. 2005. Pliocene-Pleistocene stack of globally distributed benthic stable oxygen isotope records. doi:10.1594/PANGAEA. 704257.
- Marcott S.A., Shakun J.D., Clark, P.U., Mix A.C. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science* 339, 1198–1201.
- Marshak S. 2010. Terre, portrait d'une planète. De Boeck, 833p.
- Mered M. 2019. Les mondes polaires. Presses Universitaires de France, 525p.
- Monnin,E. et al, 2001. Atmospheric CO_2 concentrations over the last glacial termination. *Science* 291, 112–114
- Ogde D.E., Sleep N.H. 2012. Explosive eruption of coal and basalt and the end-Permian mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(1), pp.59-62.
- Paillard D. 2001. Toward a new paradigm. <https://doi.org/10.1029/2000RG000091>
- Piskarev A., Poselov V., Kaminsky K. 2018. *Geologic Structures of the Arctic Basin*, Springer Verlag.
- Ramstein G. 2015. *Voyage à travers les climats de la Terre*. Editions Odile Jacob, 351p.

LES GLACES

Rasmussen T.L., Thomsen E., Moros M. 2016. North Atlantic warming during Dansgaard-Oeschger events synchronous with Antarctic warming and out-of-phase with Greenland climate. *Nature Sci. Rep.*, 6:20535, doi: 10.1038/srep20535.

Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M. Davies, C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S. and Medvedev A.Y. 2009. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1-2), pp.9-20.

Rogers J.W., Santosh M. 2004. *Continents and Supercontinents*. Oxford University Press, 289p.

Schulz K.G., Zeebe R.E. 2006. Pleistocene glacial terminations triggered by synchronous changes in Southern and Northern Hemisphere insolation: The insolation canon hypothesis. *Earth Planet. Sci.Lett.* 249 – 3 326-336 – <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.004>

Shackleton N.J., Opdyke, N.B., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105year and a106years scale. *Quaternary Research*, 3, 39-55.

Stranne C., Jakobsson M., Björk G. 2014. Arctic Ocean perennial sea ice breakdown during the Early Holocene Insolation Maximum. *Sci. Rev.* 92, 15, 123-132

Storey M., Duncan R.A., Swisher C.C. 2007. Paleocene-Eocene thermal maximum and the opening of the northeast Atlantic. *Science*, 316(5824), pp.587-589.

Strahler A.N. 1987. *Modern Physical Geography* October 1987 John Wiley & Sons Inc. 3rd Revised Edition.

Trompette R. 2003. *La Terre, une planète singulière*. Belin, Pour la Science, 303p.

Uenzelmann-Neben G., Gruetzner, J. 2018. Chronology of Greenland Scotland Ridge overflow: What do we really know? *Marine Geol.* 406, 109-118.

Van Andel T.H. 1994. *New Views on an Old Planet: A History of Global Change*. 2nd Edition. Cambridge University Press 1994, ISBN-13:9780521447553 doi: [10.2277/0521447550](https://doi.org/10.2277/0521447550)

Van Vliet-Lanoë B. 2007a. The autocyclic nature of glaciations. *Bull. SGF*, 178, 4, 257-272

Van Vliet-Lanoë B. 2007b. Le prélude au Quaternaire : les modalités d'entrée en glaciation (65 Ma – 2,2 Ma). *Quaternaire*, 18, 2, 111-128.

Van Vliet-Lanoë B. 2013. Cryosphère, soixante millions d'années d'évolution de notre planète. Vuibert, 416p en ligne sur researchgate https://www.researchgate.net/publication/303177050_Cryosphere

Van Vliet-Lanoë B. 2018. Le réchauffement climatique actuel : une évolution thermique naturelle au forçage oublié. *Mythes, Mancies & Math.*, WordPress, 3/03/2018. <https://mythesmanciesetmathematiques.wordpress.com/2018/03/05/le-rechauffement-climatique-actuel-une-evolution-thermique-naturelle-au-forcage-oublie/>

Vermassen F. et al. 2020. A Major Collapse of Kangerlussuaq Glacier's Ice Tongue Between 1932 and 1933 in East Greenland, *Geophysical Research Letters*. DOI: [10.1029/2019GL085954](https://doi.org/10.1029/2019GL085954)

Von der Heydt, A., Dijkstra H. A. 2006. Effect of ocean gateways on the global ocean circulation in the late Oligocene and early Miocene, *Paleoceanography* 21, PA1011, DOI:10.1029/2005PA001149.

Weiniger J.W. et al. 2019. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments. *marine and Petroleum Geology*, vol. 102, 455-476.

Yousef S. SM. Amin, W. Abdel-Sattar 2009. The Shrinking of the Heliosphere Due to Reduced Solar Wind, DOI: [10.1012/S120027852019](https://doi.org/10.1012/S120027852019)

Zachos J.C., Dickens G.R., Zeebe R.E. 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451: 279–283.

Zemp M and 38 others, 2015 [Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century](#). *J. Glaciol.*, 61 (228), 745-762 (doi:10.3189/2015JoG15J017)

13. Le GIEC le confirme, l'Antarctique est resté stable depuis 1979

Mis en ligne SCE : 30.09.2021

Une nouvelle étude, publiée dans *Environmental Research* ([Kumar et al., 2021](#)), rapporte que « la tendance globale » pour la température de surface de l'eau (SST) dans la mer de Weddell en Antarctique est négative, depuis 1979. En d'autres mots, il n'y a **aucun réchauffement observé dans cette région de l'Antarctique**. Cela s'est produit simultanément avec une **expansion** de l'étendue de la glace de mer. Ensuite, une autre nouvelle étude, publiée dans *Journal of Climate* ([King et al., 2021](#)) rapporte que les plus anciennes stations de mesure de température de l'Antarctique montrent une tendance au refroidissement, **depuis 1956**. Tout cela **en dépit de l'augmentation significative du taux de CO₂ atmosphérique**, y compris en Antarctique... Voici donc (encore) un sérieux problème pour l'hypothèse du « réchauffement anthropique causé par le CO₂ ». Mais en fait, que dit le GIEC sur l'Antarctique dans son dernier rapport? C'est ce que nous allons voir maintenant.

13.1. Le taux de CO₂ atmosphérique en Antarctique

Commençons par montrer l'évolution du taux de CO₂ atmosphérique au Pôle Sud, en utilisant les données officielles fournies par le « [Scripps CO₂ Program](#) ». Comme nous pouvons le voir sur la Figure 1, ce taux a augmenté significativement depuis le début des mesures en 1957 (312 ppm). Nous sommes actuellement à un taux de 413 ppm en Antarctique, soit une augmentation de 101 ppm.

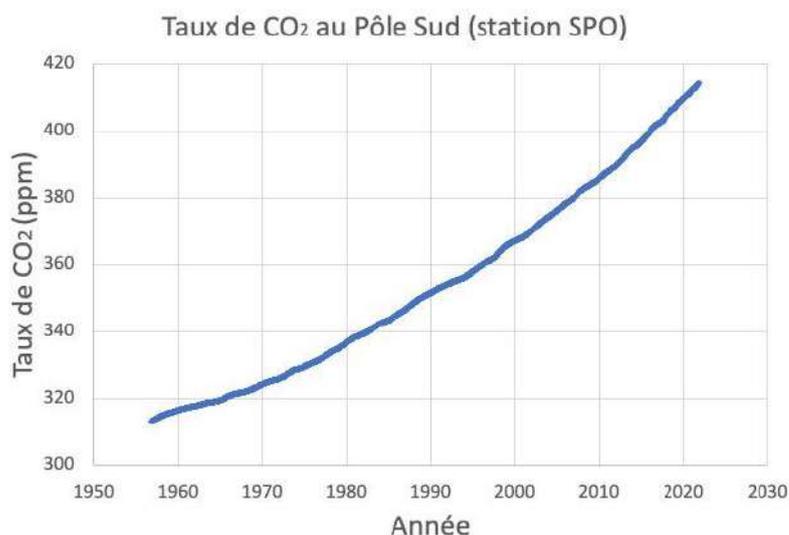


Figure 1. Évolution du taux de CO₂ (ppm) en fonction du temps, à la station SPO en Antarctique, entre 1950 et 2021. Source des données : https://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2/spo.html

13.2. L'avis du GIEC concernant l'Antarctique

Voyons maintenant ce que pense le GIEC concernant l'Antarctique. Consultons donc le résumé pour décideurs (SPM) de son dernier rapport de 2021, l'AR6. Les phrases extraites de ce rapport ont été traduites par nos soins :

- Point A.1.5. « *Il n'y a pas eu de tendance significative dans l'évolution de la zone comportant de la glace de mer en Antarctique entre 1979 et 2020, et ce en raison de tendances opposées au niveau régional ainsi que d'une grande variabilité interne.* » Et un peu plus loin : « *... il n'y a que des preuves limitées, avec un accord moyen (medium agreement), de l'influence humaine sur la perte de masse de la calotte glaciaire de l'Antarctique.* »

- Point B.2.5. « *Il y a peu de confiance dans les projections prédisant une diminution de la glace de mer antarctique.* »

Consultons maintenant le Résumé Technique (Technical Summary) à la page 43 :

« *Pour la glace de mer antarctique, il n'y a **pas de tendance significative** dans l'évolution de la superficie de glace de mer observée par satellite entre 1979 et 2020, en hiver et en été, en raison de tendances opposées au niveau régional ainsi que d'une grande variabilité interne. En raison des **inadéquations entre les simulations des modèles et les observations**, combinées à un **manque de compréhension** des raisons d'une importante divergence entre modèles, la confiance dans les projections des modèles des futurs changements de la glace de mer antarctique, en particulier au niveau régional, est faible {2.3.2, 3.4.1, 9.3.2}.* »

Puis à la page 44 :

« *Il est **probable** que la calotte glaciaire de l'Antarctique ait fondu de 2670 ± 530 Gt, contribuant ainsi à $7,4 \pm 1,5$ mm à l'élévation du niveau moyen mondial de la mer sur la période 1992-2020. Les pertes totales de masse de glace en Antarctique ont été dominées par la calotte glaciaire de l'Antarctique occidentale, les taux de perte annuels combinés de l'Antarctique occidentale et de la péninsule augmentant depuis environ 2000 (degré de confiance très élevé). En outre, il est très **probable** que des parties de la calotte glaciaire de l'Antarctique oriental aient perdu de la masse depuis 1979. Depuis les années 1970, les **chutes de neige ont probablement augmenté** sur l'ouest de la péninsule antarctique et l'est de l'Antarctique occidentale, avec une grande variabilité spatiale et interannuelle sur le reste de l'Antarctique. Les pertes de masse des glaciers de sortie de l'Antarctique occidentale, principalement induites par la fonte basale de la plate-forme glaciaire (degré de confiance élevé), dépassent le gain de masse dû à l'accumulation accrue de neige sur le continent (degré de confiance très élevé). **Cependant, il n'y a que des preuves limitées, avec un accord moyen, d'un forçage anthropique de la perte de masse observée en Antarctique depuis 1992** (avec une faible confiance dans l'attribution du processus). L'augmentation de la perte de masse des plates-formes glaciaires et des décharges intérieures continuera probablement à dépasser l'augmentation des chutes de neige au cours du 21e siècle (figure TS.11f). Une **profonde incertitude** persiste en ce qui concerne l'évolution possible de la calotte glaciaire antarctique le long des scénarios de perte de masse haut de gamme au cours du 21e siècle et au-delà, principalement liée à l'apparition brutale et généralisée de l'instabilité de la calotte glaciaire marine et de l'instabilité des falaises de glace marines. {2.3.2, 3.4.3, 9.4.2, 9.6.3, Box 9.4, Atlas.11.1, Box TS.3, Box TS.4}.*

13.3. Conclusions

- Le taux de CO₂ atmosphérique a fortement augmenté en Antarctique.
- Le continent Antarctique est resté plus ou moins stable (température, surface de glace, etc.) depuis le début des mesures en 1957. On observe toutefois une légère perte de masse qui aurait fait grimper le niveau marin de **7 millimètres** en 28 ans...
- Le GIEC est d'accord avec ce qui est écrit dans l'introduction. Il suffit de consulter l'AR6.
- L'Antarctique est un continent de 14,2 millions km² (la Belgique ne faisant que 30 689 km²) dont l'atmosphère **ne se réchauffe pas** malgré le fait que son taux de CO₂ atmosphérique ait augmenté de plus de 100 ppm. Nous pouvons conclure que **l'hypothèse de l'effet de serre ne tient pas la route** et qu'un gaz à effet de serre comme le CO₂ ne peut pas à lui tout seul réchauffer un continent... Tout ceci confirme nos précédentes remarques (voir [ici](#), [ici](#) et [ici](#)) et démontre qu'un réchauffement global causé uniquement par une élévation du taux de CO₂ est une hypothèse farfelue.

Parions que les médias ne parleront pas de cette stabilité surprenante du continent Antarctique, confirmée par le GIEC, car ils préfèrent relayer ou « colporter » des contre-vérités catastrophiques, anxiogènes et dénuées de tout fondement. Bref rien de nouveau sous le soleil!

[14. 18 navires piégés dans la glace près de la Russie](#)

Mis en ligne SCE : 03.12.2021

La mer Arctique a gelé tôt, piégeant 18 navires dans la glace près de la Russie. ##
Les prédictions du réchauffement climatique ne se réalisent donc pas comme promis.



The Mikhail Somov scientific expedition vessel was among those stranded on the Northern Sea Route. Vera Kostamo / TASS

Le navire océanographique (le Michael Somov) pris dans la glace de la route du Nord, voir [ici](#).
Voir également [The MoscowTimes](#): *Russia Scrambles to Escort Ships Stuck in Arctic Shipping Route* – Reports et [Marine Insight](#): *Russian Nuclear-Powered Icebreaking Vessels To Rescue At Least 18 Stranded Ships*.

Des preuves commencent à converger avec l'idée que ce qui se passe avec le climat actuel est lié à la l'activité de notre soleil. Le Soleil est probablement entré dans le Grand Minimum Solaire moderne (2020-2053), comme démontré par l'évolution du nombre de taches solaires en fonction du temps [1].

« Cela signifie qu'il y aura une réduction significative du champ magnétique et de l'activité solaire, comme pendant le minimum de Maunder, ce qui entraînera une réduction notable de la température terrestre », affirme Leslie Eastman, professionnelle de la santé et de la sécurité environnementales, mais aussi rédactrice scientifique et technique (voir [ici](#)).

Cette théorie s'aligne mieux avec le recordé froid dans l'Antarctique, ainsi qu'avec le gel précoce dans l'Arctique qui vient de bloquer 18 navires [2]).

Le Times rapportait ceci la semaine dernière :

Au moins 18 navires sont bloqués dans la glace de mer arctique au large de la Russie après qu'un gel précoce inattendu a pris les compagnies maritimes par surprise. Certains pourraient rester bloqués pendant des mois en attendant que des brise-glace les rejoignent.

Ces dernières années, le réchauffement climatique a permis aux navires de traverser certaines parties de la route maritime du nord de la Russie en novembre sans l'aide de brise-glace. Les armateurs avaient supposé que ce mois-ci ne serait pas différent.

Or, selon le Barents Sea Observer, un site d'information norvégien, de la glace d'une épaisseur pouvant atteindre 30 cm s'est déjà formée dans la majeure partie de la mer de Laptev et de la mer de Sibérie orientale.

La situation critique des navires, qui sont bloqués à cinq endroits différents, suscitera des inquiétudes à Moscou, où le Kremlin a investi massivement dans la route maritime du Nord, le changement climatique ouvrant le passage maritime entre l'Europe et l'Asie (voir [ici](#)).

Bien qu'en cette période automnale de l'année 2021 des navires soient bloqués par les glaces au large de la Russie, il semblerait qu'en moyenne l'Arctique se réchauffe bel et bien, mais non pas à cause du dioxyde de carbone, mais en raison de la circulation thermohaline, un processus parfois appelé « Atlantification [3] ».

Des nouvelles recherches mettent ainsi en évidence une connexion entre l'Atlantique Nord et l'Arctique entre le Groenland et le Svalbard. La région est connue **sous le nom de détroit de Fram**. C'est par là que des eaux plus chaudes et plus salées du sud se sont régulièrement infiltrées dans les eaux du nord.

« La détermination de la date exacte du début de l'atlantisation de l'Arctique peut nous donner des indices importants sur les mécanismes exacts de ce phénomène », a déclaré Francesco Muschitiello, co-auteur de l'étude.

Une chronologie plus précise du réchauffement de l'Arctique permettra également aux scientifiques de comparer l'histoire du changement climatique dans l'Arctique aux changements dans le volcanisme, l'activité solaire, l'eau douce, les gaz à effet de serre, les aérosols, etc.

Il est clair que les « experts » sont dérouterés par le climat mais qu'ils ne le disent pas trop : entre la fierté, l'amour propre, la honte de s'être trompé après avoir affiché une assurance inébranlable, et surtout la pression internationale des dirigeants politiques qui utilisent le réchauffement comme moyen de soumettre les populations à un mode de vie imposé par une minorité, sans oublier le prétexte à taxer, les scientifiques se taisent.

Faut-il donc se précipiter pour imposer des remèdes qui ne fonctionneront probablement pas, mais qui sont certains de nuire aux économies occidentales, d'abaisser le niveau de vie, de gonfler les effectifs des bureaucrates tout en et remplissant leurs poches? Et coïncidence, c'est exactement le programme marxiste de destruction du capitalisme!

Reproduction autorisée avec la mention suivante :

© Jean-Patrick Grumberg pour Dreuz.info.

[1] <https://watchers.news/2020/09/02/zharkova-study-modern-grand-solar-minimum-2020-2053/>

[2] <https://www.thetimes.co.uk/article/early-arctic-sea-freeze-traps-18-ships-in-ice-near-russia-c93lz7fkx>

[3] https://www.upi.com/Science_News/2021/11/24/arctic-warming-atlantification/2141637764455/

15. L'Arctique se réchaufferait depuis les années 1890

Mis en ligne SCE : 12.01.2022

Une publication récente ([Tesi et al. 2021](#)), parue dans *Science Advance* fin novembre 2021 et en libre accès, nous indique que l'Arctique se réchaufferait depuis au moins 1890. Ce résultat provient de l'analyse de microfossiles dans des carottes sédimentaires prélevées dans le [détroit de Fram](#). Si ce résultat est confirmé, le réchauffement actuel de l'Arctique pourrait provenir d'une modification de la [circulation thermohaline](#) datant d'il y a au moins 130 ans. C'est un phénomène qui a été appelé « atlantisation ». En d'autres termes, le réchauffement atmosphérique, les aérosols ou l'effet direct de l'ensoleillement sont loin d'être les uniques facteurs intervenant dans le réchauffement de l'Arctique. L'activité humaine sur l'Arctique est donc pour le moins discutable. Les auteurs de la publication nous montrent en outre que les derniers modèles informatiques (CMIP6) ne proposent aucun réchauffement en 1890 dans la région, ce qui est bien entendu contraire aux preuves micropaléontologiques relevées par les auteurs. Les modèles informatiques sont donc à revoir et ne peuvent en aucun cas être qualifiés de « précis », [contrairement à ce que pense le Comité Nobel](#) (2021).

15.1. L'Arctique se réchauffe, c'est un fait.

L'Arctique se réchauffe lentement, ceci n'est un secret pour personne. Ce fait incontestable est particulièrement bien visible chaque année au mois de septembre. Par exemple, en septembre 1980 la glace de mer en Arctique s'étendait sur une surface de plus de 8 millions de km² alors qu'en septembre 2021 la surface n'était plus que de 5,5 millions de km². Ces chiffres proviennent de **mesures réalisées par satellite** et SCE vous en présente chaque mois l'évolution (par exemple [ici](#)). Malheureusement, **nous ne disposons pas de mesures satellitaires pour les années antérieures à 1980**. Il est donc impossible de dire avec certitude ce qu'il s'est passé ni quand le réchauffement a

débuté. Cependant, nous disposons de nombreux « proxies » de température dans les sédiments marins. Il s'agit souvent de microfossiles dont l'analyse de l'abondance permet de déduire la température de l'eau de mer en un point donné et ce au cours d'une longue période.

15.2. La carotte sédimentaire analysée par Tesi et al. 2021.

Les auteurs de l'article publié dans *Science Advance* se sont ainsi focalisés sur une carotte sédimentaire de 112 cm de longueur prélevée à l'Est du détroit de Fram, dans le Kongsfjorden de l'île Svalbard (Figure 1). Cette région a été sélectionnée car c'est par le détroit de Fram que s'engouffrent les courants marins en provenance de l'Atlantique. Ce phénomène est connu depuis longtemps et les courants du détroit de Fram constituent une partie importante de la circulation thermohaline. Si les courants marins passant par le détroit de Fram ont significativement varié au cours du temps ceci devrait être visible en consultant les archives sédimentaires de ce détroit.



Figure 1. Position du détroit de Fram, entre le Groenland et l'île du Svalbard.

Une carotte sédimentaire a donc été prélevée dans le Kongsfjorden et les auteurs l'ont ensuite découpée, centimètre par centimètre, afin d'en recueillir les microfossiles, principalement des **foraminifères benthiques** de l'espèce *Nonionella labradorica*. Cette espèce a la particularité de proliférer lorsque l'eau du fond de l'océan devient plus chaude. Les auteurs ont également dénombré les foraminifères de l'espèce *Adercotryma glomeratum*, qui préfère les eaux chaudes et salées, ainsi que les espèces *Elphidium excavatum f. clavatum* et *Cassidulina reniforme*, qui sont des espèces préférant les eaux froides et peu salées, par exemple dans les zones où des glaciers se jettent en mer. Les différentes sections de la carotte sédimentaire ont bien entendu été datées avec précision (par une méthode radio-isotopique) et les isotopes de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) ont été analysés dans toutes les sections afin d'obtenir une idée des variations de température.

15.3. Les principaux résultats de Tesi et al.

Les principaux résultats obtenus par les auteurs sont présentés dans la Figure 2. Nous pouvons voir que les espèces de foraminifères sensibles à la chaleur (*E. excavatum* et *C. reniforme*) tendent à diminuer en abondance à partir de 1890, alors qu'au contraire, les espèces préférant les eaux chaudes ont tendance à proliférer dès 1890 (*A. glomeratum* et *N. labradorica*). Ces résultats sont conformes à ceux obtenus avec les isotopes de l'oxygène : la température de l'eau de mer s'est sensiblement réchauffée à partir de 1890 (pour plus de détails voir l'article original). Les auteurs ont également confirmé leurs résultats en analysant les lipides d'Archées présents au sein de la carotte sédimentaire.

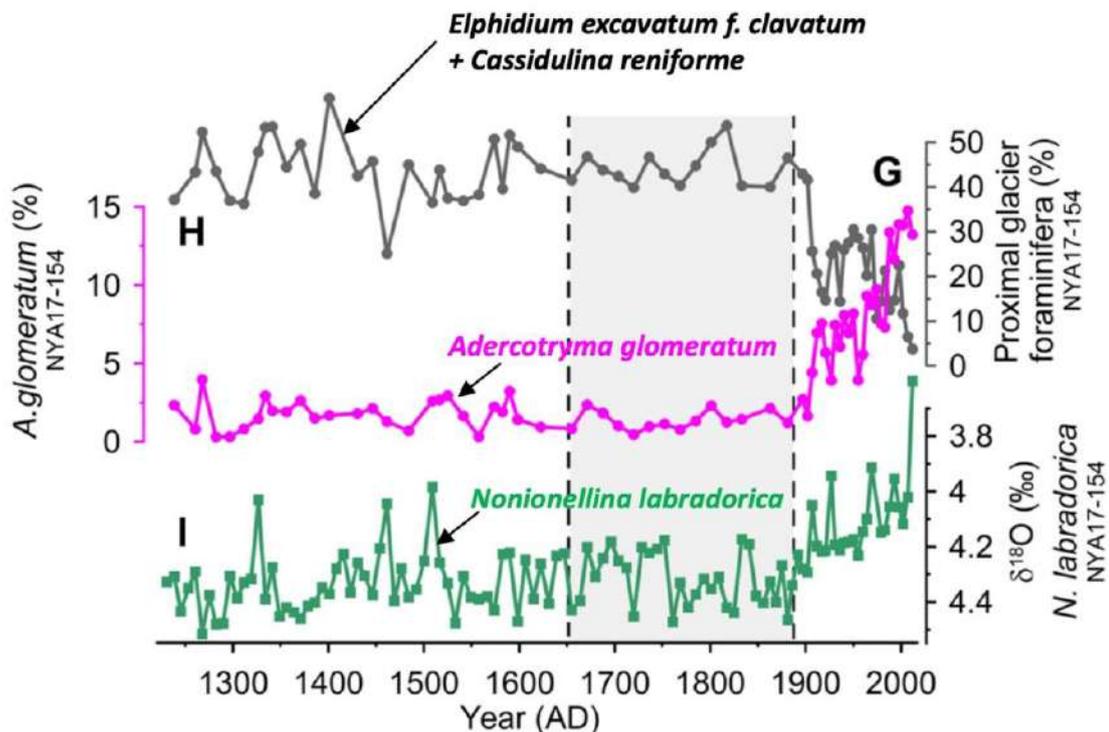


Figure 2. Évolution de l'abondance de certains foraminifères benthiques à l'Est du détroit de Fram (Tesi et al. 2021).

Le réchauffement de l'Arctique aurait donc débuté en 1890 et les courants marins pourraient en être la cause. Qu'en est-il donc de la contribution anthropique? Disons-le tout de suite : il serait douteux que l'homme soit responsable de ce réchauffement des masses océaniques en 1890. En effet, l'être humain ne peut pas réchauffer l'eau de mer. Le GIEC propose bien entendu que l'être humain soit responsable du léger réchauffement de la basse atmosphère ($\pm 1^\circ\text{C}$), explication contestable bien entendu (voir [ici](#)), mais l'atmosphère peut difficilement ensuite réchauffer les océans. Pour vous en convaincre essayez par exemple de réchauffer un seau rempli d'eau en soufflant sur la surface de l'eau avec un sèche-cheveux... De plus, en 1890 la population humaine était inférieure à 1,5 milliards d'individus et ses émissions de carbone étaient alors très faibles ([356 millions de tonnes](#) en 1890, et 9776 millions de tonnes en 2013, soit 27 fois plus). Pour ceux qui pensent que c'est le CO_2 qui 'pilote' la température (ce que SCE a de maintes fois réfuté), ajoutons qu'en 1890 le taux atmosphérique de CO_2 était 30% plus bas qu'aujourd'hui (294 ppm), que les avions à moteur n'existaient pas et que peu de personnes disposaient d'une voiture. Le lent

réchauffement de l'Arctique serait donc essentiellement la conséquence naturelle d'un phénomène appelé « atlantisation », c'est-à-dire la pénétration continue d'eau chaude et salée dans l'Arctique via le détroit de Fram (Polyakov et al. 2017, Lind et al. 2018, Årthun et al. 2012).

15.4. Vérification avec des modèles informatiques

Les auteurs ont ensuite utilisé des modèles informatiques pour essayer de reconstituer l'évolution de la température dans la région. Ils ont ainsi comparé les simulations de deux modèles sophistiqués qui contribuent à la phase 6 du projet d'inter-comparaison des modèles climatiques (CMIP6 ; MIROC-ES2L et MRI-ESM2.0). Ce sont actuellement les deux seules simulations historiques CMIP6 disponibles. Pour une comparaison directe avec les proxies, les auteurs se sont concentrés sur la salinité et la température saisonnières intégrées à la profondeur de la partie supérieure de l'océan (250 m) le long de l'ouest du Svalbard. **Les résultats des simulations climatiques sont en totale contradiction avec les reconstructions basées sur les observations (Figure 3).**

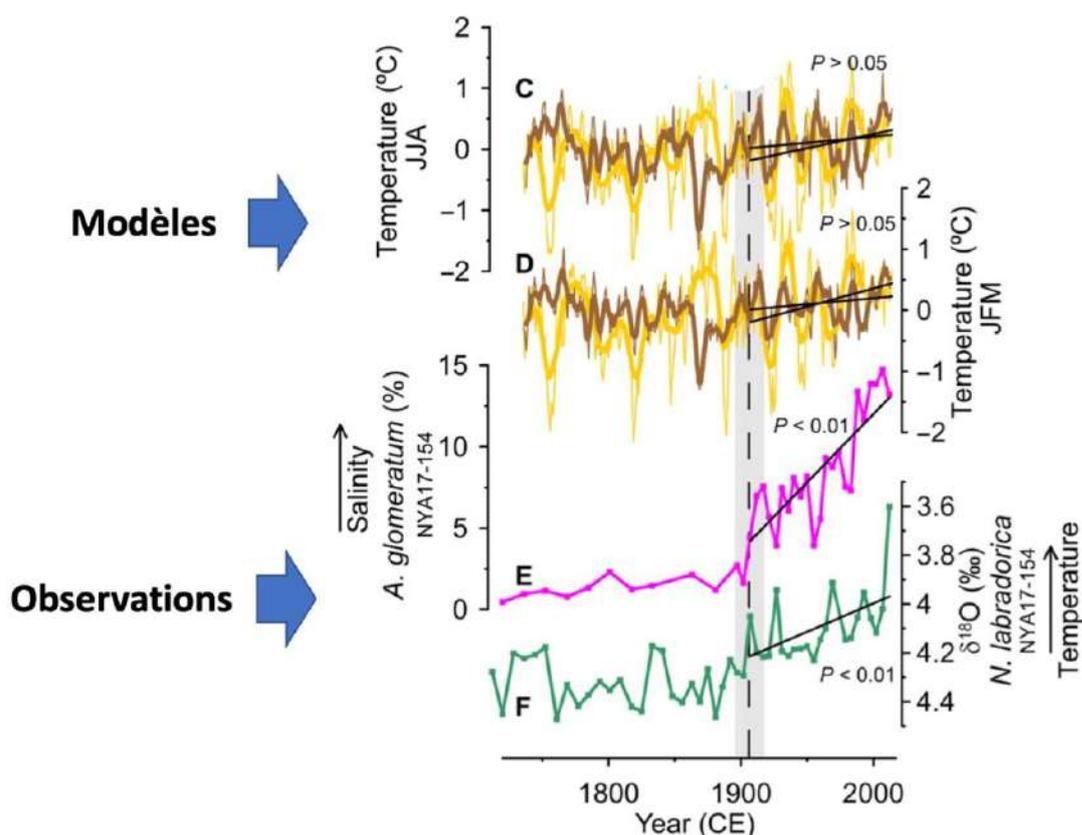


Figure 3. Résultats des modèles informatiques CMIP6 (courbes C et D) et observations basées sur les foraminifères (la courbe E concerne *A. glomeratum*, et la courbe F concerne les isotopes de l'oxygène des tests de *N. labradorica*). La température ne varie pas significativement en 1890 pour les modèles, mais varie significativement en 1890 pour les proxies.

15.5. Conclusions

- Les foraminifères fossiles nous montrent que **la circulation thermohaline s'est modifiée vers 1890 au niveau du détroit de Fram** : des quantités plus importantes d'eau chaude se sont probablement engouffrées vers l'Arctique à partir de ce moment. Cette « atlantisation » a eu d'innombrables conséquences, parmi lesquelles nous trouvons la **diminution progressive de la surface de glace de mer en Arctique**.

- La modification de la circulation thermohaline doit donc être ajoutée à la liste des causes probables expliquant le réchauffement de l'Arctique. Cette liste comprend également d'autres causes comme une augmentation de la quantité d'aérosols ou un ensoleillement plus important suite à la modification de la quantité de nuages. **L'être humain ne peut pas être la cause de ce réchauffement entamé en 1890.**
- Les modèles informatiques ne prévoient pas de variation de circulation thermohaline en 1890 dans le détroit de Fram. **Les modèles informatiques ne sont donc pas précis** et sont donc à revoir.

Références

Årthun et al. (2016) Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. J. Climate 25, 4736–4743.

Lind et al. (2018) Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. Nat. Clim. Chang. 8, 634–639.

Polyakov et al. (2017) Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. Science 356, 285–291.

Tesi et al. (2021) Rapid Atlantification along the Fram Strait at the beginning of the 20th century. Sci. Adv. 7, eabj2946.

16. Retour sur les glaciers

Mis en ligne SCE : 20.05.2022

Avertissement SCE : Cet article est celui paru dans une des Lettres (= [Lettre n°22](#)) de Jean-Claude Pont, Professeur retraité de l'Université de Genève. D'emblée l'auteur entre dans le vif du sujet, voire de la polémique en reprenant la réflexion de Imboden, 2009 (réf. dans la bibliographie de la Lettre) :

« Il existe aujourd'hui peu de sujets plus brûlants que le réchauffement climatique et ses conséquences, et il n'y a guère d'autres sujets pour lesquels il est aussi évident que l'on ne peut pas comprendre et classer les processus actuels sans connaître suffisamment les climats passés. Sans connaissance de l'histoire du climat, une évaluation fiable de ce qui se passe aujourd'hui est illusoire : il serait impossible de déterminer si les évolutions actuelles s'inscrivent dans des cycles, s'il s'agit de phénomènes singuliers ou s'ils sont comparables à quelque chose qui s'est déjà produit. »

L'article de Jean-Claude Pont est le résultat d'une recherche très fouillée intégrant les données glaciologiques confirmées depuis le Pléistocène jusqu'à aujourd'hui. Une bibliographie ciblée accrédite le propos. SCE ne peut que recommander la lecture de cette Lettre n°22.

Rappelons, suivant l'auteur, les thèses en question (réf. dans la bibliographie de la Lettre).

Le phénomène climatique, qui met aujourd'hui le monde sens dessus dessous, gravite autour de deux questions, fondamentales dans ce contexte :

1) Le réchauffement climatique, 0,7 °C, **est-il un épisode unique dans l'histoire de l'Homme, et notre époque est-elle la plus chaude jamais enregistrée**, comme on le répète *ad nauseam* de nos jours ?

Jean Jouzel, maître à penser du réchauffisme français et ancien vice-président du GIEC, a écrit les quelques lignes suivantes, qui pourraient suffire à répondre non à cette première question (6) : « Les forages effectués dans les glaces du Groenland au début des années 1980 par les équipes de Willy Dansgaard, à Copenhague, et Hans Oeschger à Berne, ont apporté une série d'indices (...) montrant, **tout au long de la période glaciaire et à la fin de celle-ci, des réchauffements importants – pouvant aller jusqu'à 10 °C d'augmentation de la température en quelques dizaines d'années – suivis de refroidissements progressifs.** »

2) Le dioxyde de carbone (appelé aussi gaz carbonique et noté CO_2) d'origine anthropique est-il responsable de ce réchauffement ?

Si l'on répond par la négative à l'une ou à l'autre de ces deux questions, le branle-bas de combat qui agite aujourd'hui la Planète perd son sens. Ce qui n'empêche bien sûr pas que **demeurent urgents et lancinants les problèmes de la vraie pollution, et pas celle prétendue, du CO_2 , qui est un gaz nécessaire à la vie, un fertilisant et non un polluant.**

Un résumé synoptique (voir ci-dessous) accompagne le texte, et montre que les faits relatifs à l'histoire des glaciers rapportés ci-dessus, sont riches d'enseignements multiples et inattaquables. Les mouvements incessants et quasi monstrueux de ces masses de glace, des variations de températures imprévisibles en l'absence de système causal satisfaisant, au long du pléistocène montrent que toute prédiction sérieuse est vouée à l'échec.

Tous ces mouvements en l'absence de CO_2 anthropique !

Résumé synoptique

- Au cours du Pléistocène (qui se termine il y a 11 700 ans) une bonne vingtaine de glaciations, dont la durée a été d'une centaine de milliers d'années.
- Depuis le début du quaternaire, le glacier du Rhône a occupé une vingtaine de fois au moins le bassin lémanique.
- 25 000-20 000 ans avant nous. Grandes parties de la Suisse sous une forte carapace de glace. Le Grand Glacier d'Aletsch qui est relié au glacier du Rhône.
- A partir de 20 000 ans avant aujourd'hui, le réseau de courants glaciaires s'est désintégré et les glaciers alpins ont fondu.
- Les glaciers se sont étendus une bonne douzaine de fois sur les plaines du Lyonnais durant le Pléistocène moyen et récent.
- Il y a 12 000 ans, les glaces descendaient jusqu'à Lyon, recouvraient le Léman, Soleure, Schaffhouse, etc.
- Les événements de Dansgaard-Oeschger, se répètent durant les 100 000 dernières années, séparés par quelques milliers d'années ; caractérisés par un réchauffement rapide, durant quelques dizaines d'années, puis refroidissement graduel sur une longue période. Il y a 11 500 ans, la température annuelle moyenne des glaces du Groenland grimpe d'environ 8 °C en quarante ans, en trois étapes de cinq ans. »

pour le .pdf de l'article, également voir [ici](#).

[17. Robert Vivian et les icebergs](#)

Mis en ligne SCE : 06.07.2022

Avertissement SCE : Cet article est celui paru dans la [Lettre n°23](#) de Jean-Claude Pont, Professeur retraité de l'Université de Genève.

Robert Vivian est un glaciologue de réputation internationale avec, à son actif, une centaine de publications, livres, articles scientifiques, et de nombreuses missions sur les glaciers du monde. Il a laissé des textes inédits ou peu connus jusqu'ici, qui sont d'un très grand intérêt pour les débats actuels autour des thèses défendues par le GIEC ([réf in .pdf Lettre 23](#)). Parmi eux, un court écrit relatif aux icebergs et à leur utilisation par les milieux de la climatologie officielle. C'est à ce texte qu'est consacrée la présente *Lettre*.

Les références du texte sont consultables dans le .pdf de la Lettre 23.



Robert VIVIAN (1936-2007), professeur d'Université

Je reviendrai en détail dans une prochaine *Lettre* sur les travaux de Vivian concernant les relations entre glaciers et climat, un domaine qui lui doit des contributions majeures. Les thèses qu'il défend rejoignent complètement celles que nous soutenons depuis plus de deux lustres, en compagnie de **dizaine des milliers** de chercheurs sérieux.

Sous le titre « Les icebergs ne se laissent pas embrigader », j'ai traité dans ma *Lettre 18* d'un iceberg de belle taille – nom de code A-76, 4300 km² – qui s'était détaché de l'Antarctique. La presse mondiale s'en était bien sûr emparée, les superlatifs s'étaient présentés en rangs serrés. A-76 avait fini par devenir « le plus grand iceberg du monde ». On oubliait A-68 et ses 5800 km², B-5 et ses 11 000 km² et notre « plus grand iceberg du monde », allait s'abîmer bien au-delà du top 10 des grands icebergs. Ainsi vont les records dans ce monde- là ! **Avec un tant soit peu d'esprit analytique, ou simplement un bon sens resté intact. on se demandera pourquoi ces informations erronées vont toujours dans la même direction, c'est-à-dire celle qui est favorable à la doxa officielle ?**

Le 20 mars 2002, l'Agence Reuters de Londres publiait l'entrefilet suivant : « La dislocation d'une énorme partie de la calotte glaciaire flottante sur les rivages de la péninsule antarctique, qui s'est faite à une vitesse ahurissante, de l'avis des scientifiques **ravive le débat sur le réchauffement climatique et ses effets sur l'environnement.** »

Le journal *Le Monde* (réf in .pdf Lettre 23) reprenait l'information dans son numéro du 22 mars 2002. Il annonçait qu'une « plaque de glace de 3275 km² (un peu moins de la moitié de la Corse), épaisse de 200 m » s'était détachée de la calotte Larsen dans la péninsule Antarctique. Selon la National Ice Center, l'accélération de la naissance des grands icebergs serait « liée au réchauffement notable de 2,5 °C observé dans la région depuis cinquante ans et à un **hiver très doux** ».

La température moyenne de l'hiver en Antarctique va de -10 à -60 °C, c'est ce que l'on appelle un « hiver très doux » dans ces milieux, une euphémisation d'occultation ! Comme c'est toujours le cas avec les textes de tendance réchauffiste autour de la question climatique, l'analyse sémiotique, qui examine la production du sens par l'analyse du vocabulaire, est riche d'enseignement !

À l'instar de ses confrères, le quotidien *Le Monde* avait salué l'événement et mêlé sa voix au cortège des prises de position mentionnant le réchauffement climatique comme coupable. Ce n'est pas la première fois que le journal attirait l'attention sur les risques encourus par la planète, du fait des

icebergs de l'Antarctique. Ainsi dans son numéro du 21 février 2001, on nous disait que le rythme des libérations des icebergs s'accélérait, « ce qui aurait **pour effet d'élever réellement le niveau des mers** ». On notera au passage cette belle erreur de physique, qui doit faire se retourner Archimède dans sa tombe ! En effet, l'apport de l'eau par cette fonte ne fera que remplacer le volume qui se trouvait dans la partie immergée et le niveau ne bougera pas.

Robert Vivian a réagi à l'article de 2002. Il rappelle que les icebergs de type tabulaire sont très nombreux, très grands, plus de quelques milliers de km², épais de 100 à 200 mètres. Il nous apprend aussi qu'en 1893 – à une époque « non suspecte de réchauffement global », note-t-il – avait été signalé un iceberg tabulaire « "aussi grand que la Corse" » [soit environ 9000 km²].

Le commentaire de Vivian se termine par cette conclusion, qui rejoint ce que nous pensons et écrivons de longue date :

« L'observation et l'événement sont intéressants et méritent d'être suivis dans le temps. Un iceberg tabulaire, fût-il parmi les plus grands observés **jusqu'ici, ne peut justifier à lui seul un quelconque changement climatique, qui plus est, consécutif aux seules activités humaines!** Il n'y a pas lieu d'affoler les populations par trop d'enthousiasme et de catastrophisme primaires ! Simplement rester vigilant, informer et s'informer. »