

Ce que peut nous apprendre l'étude du Petit Âge Glaciaire

Sylvain DULOUTRE mai 2010

Sylvain.Duloutre@e.ujf-grenoble.fr

Résumé

La période du Petit Âge Glaciaire est la seule des nombreuses variations climatiques depuis le dernier maximum glaciaire qui a été soumise à des forçages climatiques naturels similaires à ceux présents et pour laquelle nous disposons de nombreuses archives humaines.

L'exploitation de ces archives complétées par des mesures indirectes de paramètres climatiques permet d'avoir une bonne connaissance d'un climat passé sur une longue période et d'évaluer quantitativement les forçages en présence.

Une meilleure connaissance de cette période est donc utile pour affiner les modèles climatiques actuels et évaluer les nouveaux forçages d'origine anthropique.

1. Introduction

Les observations du climat, défini comme "la moyenne des conditions météorologiques sur une période donnée" (typiquement une trentaine d'année) nous indiquent qu'il existe une variabilité climatique temporelle et spatiale.

L'étude des variations climatiques passées récentes (soumises à des forçages climatiques naturels similaires à ceux encore en action aujourd'hui, mais précédant les modifications des teneurs de gaz à effet de serre d'origine anthropique), a trouvé un regain d'intérêt grâce à la multitude de travaux sur le réchauffement climatique actuel, et à la nécessité de comprendre et d'évaluer quantitativement les mécanismes de forçage d'origine anthropiques par rapport aux forçages naturels.

2. Notion de Petit Âge Glaciaire

Le Petit Âge Glaciaire (PAG ou LIA pour Little Ice Age dans la littérature anglo-saxonne), décrit une période climatique récente, caractérisée par une

température moyenne plus basse de 0,5 à 1,5 °C que les températures moyennes du XX^e siècle [1].

Il n'y a pas de consensus sur la datation et la durée exacte de l'événement qui débute suivant les auteurs, entre le XIII^e et le XV^e siècle, avec un paroxysme de froid entre 1570 et 1730. La fin de la période, plus généralement admise, se situe environ au milieu du XIX^e siècle.

Appliqué à la glaciologie, le Petit Âge Glaciaire désigne plus spécifiquement la période d'extension maximale des glaciers à l'époque moderne, qui va du XVI^e siècle jusqu'aux années 1850-1860, période caractérisée par une forte crue des glaciers alpins, avec quelques maxima autour de 1600, au cours du XVII^e siècle, vers 1820 et enfin dans les années 1850.

L'amplitude du phénomène climatique reste faible et est à replacer dans le contexte plus général de l'Holocène, période climatique relativement stable couvrant les derniers 10 000 ans.

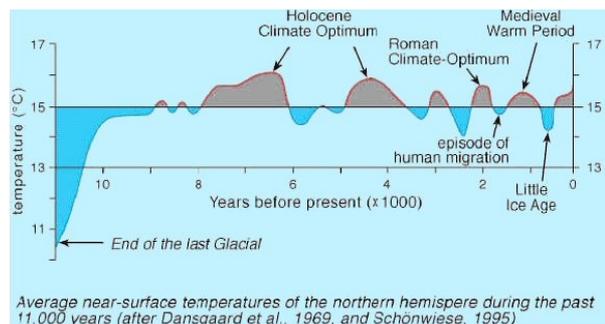


Figure 1: températures moyennes de surface dans l'hémisphère Nord durant l'Holocène [1]

3. Comment reconstruire le climat passé

Les mesures directes des paramètres pouvant définir le climat (températures, précipitations, etc) ne sont pas disponibles sur la majeure partie de la période à considérer. Les instruments associés sont d'invention récente (par exemple, 1593,

Thermomètre de Galilée). Les observations sont souvent artisanales et sporadiques. Des séries de mesures sont disponibles principalement à partir du XIX^e siècle.

Ce manque de mesures directes des paramètres climatiques conduit à l'utilisation de différentes méthodes alternatives, qui, utilisées conjointement, permettent de reconstruire le climat passé.

3.1. Méthodes instrumentales et historiques

Les données numériques de paramètres climatiques sont rares avant le XIX^e siècle. On peut citer par exemple, la variation des dates de vendanges en France qui sont consignées depuis environ 1370. Cette série très longue peut être utilisée pour estimer le climat passé à l'échelle annuelle dans la mesure où ces dates sont corrélées avec la température: des vendanges tardives indiquent *en général* que le printemps et/ou l'été ont été plus frais, même si ces dates n'ont pas l'exactitude d'un thermomètre étalonné.

On notera également des séries de données relative à l'observation de l'activité solaire au cours du XVIII^e siècle (voir chapitre 4.1)

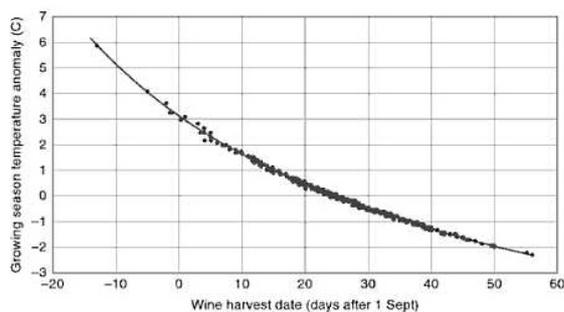


Figure 2: *Corrélation entre la date des vendanges en Bourgogne entre 1370 et 2003 comparée avec l'anomalie de température pendant la phase de croissance (Avril à Septembre) dérivées d'un ensemble de proxy et d'observation de température [9]*

Par contre, les données qualitatives ou ponctuelles sont nombreuses (notamment du fait de la vulnérabilité des sociétés médiévales aux aléas climatiques), dans les registres paroissiaux ou registres de doléances, montrant des conditions climatiques plus froides qu'à présent.

«La fin de l'année 1788 a été remarquable par un froid continu et très rigoureux, depuis le 10 novembre ; la Saône et le Rhône ont été gelés ; les arbres dans la montagne ont été très endommagés par du verglas dont la pesanteur a cassé des

branches qui avoient plus de six pouces de diamètre. Le thermomètre est descendu le 31 décembre à 16 degrés 1/3 au dessous de la glace, étant exposé au nord dans la maison de La Chaux de cette paroisse... Ce jour'hui 7 janvier 1789 le thermomètre est encore à 12 degrés au dessous de la glace. De mémoire d'homme on ne se rappelle d'avoir eut un hyver aussi constamment rigoureux.. » (Registres paroissiaux de Lentilly)

Certains témoignages picturaux, tels "Les Chasseurs dans la Neige" de Bruegel l'Ancien au XVI^e siècle, nous décrivent des hivers plus froids qu'aujourd'hui. La reproduction ci-dessous est souvent utilisée pour illustrer le Petit Âge Glaciaire, mais en laissant suggérer de manière erronée que la période fut uniformément froide.



Figure 3: *Pieter Bruegel: Les Chasseurs dans la Neige – 1565 © Kunsthistorisches Museum Wien*

Beaucoup de ces enregistrements historiques sont d'une utilité limitée d'un point de vue scientifique dans la mesure où ils ne dénotent souvent que des événements exceptionnels (par exemple la Tamise gelée à Londres). Cela indique un hiver froid, mais ne permet pas d'évaluer précisément les conditions de température. De la même manière, un gel ou une baisse de température notable pourra être consigné si elle a provoqué des dégâts agricoles ou a impacté la vie économique. Un événement de même amplitude se produisant à un moment où la végétation est moins vulnérable passera inaperçu. Notons enfin que les témoignages artistiques (peintures) n'ont pas vocation à être un reflet exact de la réalité.

Néanmoins, certains de ces témoignages peuvent permettre de compléter des séries de données.

3.2. Méthodes indirectes (proxies)

Les variations climatiques passées peuvent être reconstruites plus ou moins précisément en mesurant un certain nombre d'indicateurs enregistrés dans les

sédiments ou les glaces et qui permettent d'accéder indirectement (d'où la notion de *proxy*) à certains paramètres climatiques passés (température, humidité, etc).

Les *proxies* partagent les caractéristiques suivantes, dont il faut tenir compte lorsqu'on les utilise:

- La plupart des proxies ne mesurent pas directement un seul paramètre météorologique ou climatique. Par exemple, la largeur des cernes de croissance des arbres (voir dendrochronologie ci-dessous) est une fonction complexe de la température et de l'humidité, non seulement pendant la saison de croissance, mais également pendant la saison froide (rechargement des nappes phréatiques durant l'hiver, ayant un impact sur l'eau disponible pendant la croissance ultérieure des arbres).
- Certaines sources d'information peuvent être perturbées par des processus naturels: par exemple, la résolution d'événements en étudiant les sédiments est affectée par le faible taux de sédimentation, le fait que ce taux peut varier en fonction du temps et que des animaux fouisseurs peuvent impacter la stratigraphie des couches.
- Certaines séries sont interrompues et ne sont pas disponibles sur toute la durée de la période à considérer (plusieurs siècles pour le Petit Âge Glaciaire).
- Enfin, dans de nombreux cas, les mesures ne sont disponibles que dans un petit nombre de lieux, ce qui rend difficile la généralisation des paramètres climatiques à l'échelle d'une région, d'un hémisphère ou de la Terre.

Du fait de la faible durée du Petit Âge Glaciaire par rapport à l'histoire géologique de la Terre, les proxies disponibles abondamment et fournissant une résolution annuelle seront privilégiés:

Dendrochronologie

La dendrochronologie est une méthode scientifique permettant de dater des échantillons de bois en repérant ses anneaux de croissance et en attribuant à chacun d'entre eux un millésime de formation. Elle peut avoir une résolution fine (datation à l'année) dans les régions tempérées avec croissance saisonnière

marquée et apporte des indices quant à la température et la pluviométrie lors de la croissance de l'arbre.

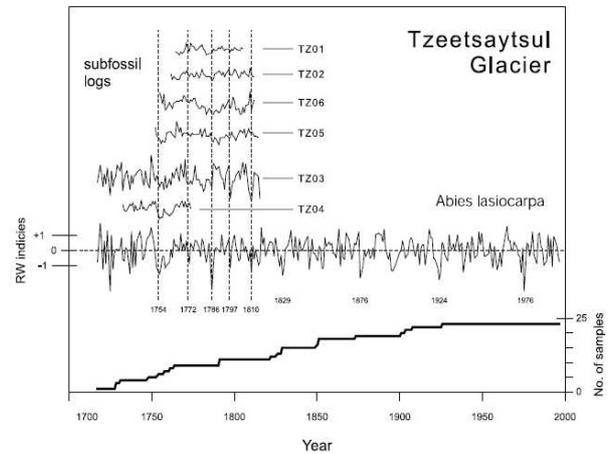


Figure 4: Résumé des études dendroglaciologiques menées au glacier de Tzeetsaytsul. La partie supérieure de la figure montre les périodes couvertes par les échantillons interdatés de bois. Le graphique inférieur montre le nombre d'échantillon [3]

En prenant des échantillons dans différents sites d'une même région et ayant poussé à des époques différentes mais se recoupant, il est possible de recomposer une séquence sur plusieurs siècles permettant de réaliser des études paléoclimatiques en considérant que "la largeur des cernes est un bon indicateur de températures favorables en période de croissance tandis que la densité des cernes du bois d'hiver renseigne sur la température hivernale." [2].

Rapport des isotopes $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

L'utilisation de deux isotopes stables de l'oxygène, ^{16}O représentant 99.76% de l'oxygène contre 0.04% pour ^{18}O pour reconstituer le climat repose sur le fait que la vapeur d'eau contient peu de ^{18}O , plus lourd que ^{16}O , comparativement à l'eau en phase liquide.

Pendant une phase glaciaire, une partie des précipitations s'accumule sous forme de glace. De ce fait, l'eau des océans est appauvrie en ^{16}O par rapport à ^{18}O . Le rapport du $\delta^{18}\text{O}$ augmente dans l'océan. Lorsqu'il y a un réchauffement climatique, la fonte des calottes glaciaires libère ce ^{16}O immobilisé, ce qui diminue les concentrations en ^{18}O dans l'océan.

En étudiant les variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ piégé dans les sédiments ou dans les carottes de glaces, on peut avoir accès à des indicateurs climatiques en supposant que la relation $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ soit valide et constante pour le passé récent.

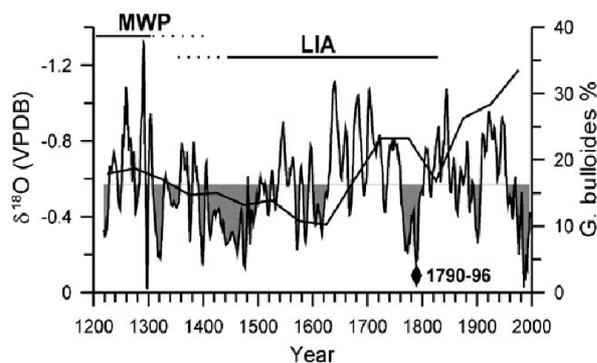


Figure 5: Exemple de comparaison de $\delta^{18}O$ avec une augmentation du niveau des océans (exprimé en abondance de bulloïdes - plancton) en mer d'Oman (ligne noire). [4]

Sédimentologie

Certains milieux réagissent avec le maximum de sensibilité aux oscillations du climat et peuvent dans certains cas assurer un enregistrement continu des paramètres du climat passé.

Les lacs, marais et tourbières qui se développent à proximité des glaciers, tels les lacs du Jura, constituent des milieux intéressants, car leur sédimentation est importante (avec un taux d'accumulation annuel jusqu'à 1 ou 2 m par millénaire, contre 10 cm en milieu océanique par exemple), et dépend de l'évolution du glacier. L'étude des sédiments (nature du sédiment, granulométrie, composition etc) pour reconstituer les variations du climat revient à reconnaître à quelle profondeur ils se sont déposés en identifiant des marqueurs bathymétriques.

Les moraines glaciaires remobilisées lors des avancées et retraits ainsi que la datation radiocarbone des sols ensevelis permettent d'évaluer la chronologie des fluctuations glaciaires. Cependant, les fluctuations des glaciers dépendent pour une large part de conditions locales [5] et sont difficilement corrélable sur de courtes périodes à la température. Certains glaciers peuvent "avancer" et d'autres reculer de manière synchrone dans un même massif, rendant difficile une corrélation avec des variations climatiques à une échelle régionale ou plus globale.

En ce qui concerne les pulsations glaciaires du PAG, les études récentes du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement de l'Université de Grenoble suggèrent que les avancées glaciaires en Europe seraient plutôt dues à une augmentation notable des précipitations, plus qu'à une baisse significative des températures. Ainsi, l'avancée des glaciers serait la conséquence d'une

hausse de plus de 25% des chutes de neige hivernales, tout particulièrement durant la première partie du PAG. Ceci a favorisé l'accumulation glaciaire, faisant basculer le bilan de masse dans le sens d'une réavancée des glaciers [6].



Figure 6: Variation du front du glacier de la Mer de Glace: en 1644 (vert), 1821 (rouge) et 1895 (orange). ©: S. Nussnaumer/FNS

Palynologie

Le développement des végétaux dépend fortement du climat. Des analyses polliniques réalisées généralement dans les tourbières et les lacs, où une sédimentation s'est faite de manière régulière, permettent de distinguer des variations climatiques grâce au changement de végétation associé.

Mais dans la plupart des cas, il est difficile voir impossible de distinguer le PAG d'après la palynologie seule, les variations climatiques étant de faible ampleur et la durée du phénomène insuffisante pour impacter de manière significative la végétation [2]. De plus, les variations d'origine anthropique (par exemple, modification des modes culturels et de l'utilisation des sols) peuvent induire des erreurs de mesures significatives.

3.3. Des mesures à la reconstruction climatique

L'estimation quantitative des changements climatiques passés se base sur des enregistrements d'indicateurs souvent incomplets, sur des périodes courtes, avec un petit nombre d'échantillon. Certains indicateurs ne sont pas ou partiellement corrélés sur de courtes périodes tel le Petit Âge Glaciaire, alors que des tendances plus franches peuvent émerger sur des périodes plus longues.

Ces analyses de données nécessitent des traitements numériques visant à réduire les erreurs ou dérives inhérentes à l'indicateur ou à la méthode permettant

de se ramener à un changement d'indicateur climatique (température). Cela revient à ajuster les données en utilisant un modèle statistique. Une combinaison de méthode est en général utilisée, se basant sur de multiples proxies pour fournir une estimation plus rigoureuse qu'avec un seul proxy, en identifiant par exemple les dérives saisonnières dans les estimations.

Amplitude du PAG

A la vue des extensions conséquentes des glaciers au cours du PAG en Europe, on pourrait imaginer un abaissement conséquent de température. Cependant, il y a une convergence de vue dans la communauté scientifique pour considérer le PAG comme un modeste refroidissement de moins de 1°C par rapport aux températures moyennes du XX^e siècle dans l'hémisphère Nord, avec de fortes disparités locales, et entrecoupées de périodes plus chaudes.

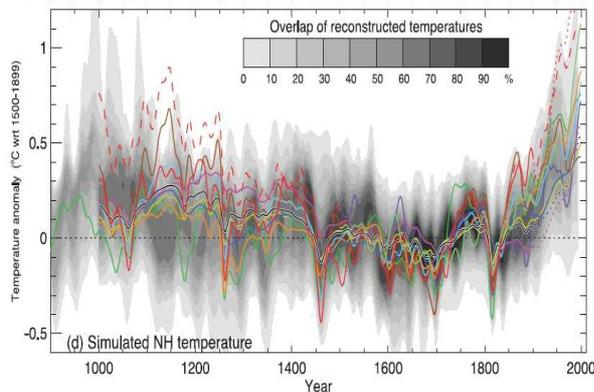


Figure 7 : Reconstruction des températures pendant le PAG avec différents proxies. Source IPCC 2007 chapitre PaleoClimat

Un phénomène global ?

La majorité des séries de données disponibles relatives au Petit Âge Glaciaire concerne l'hémisphère Nord où il semble que le PAG soit identifié un peu partout, mais avec des intensités variables.

Si le phénomène fut d'abord identifié dans l'hémisphère Nord, des études récentes [10] suggèrent également l'existence d'épisodes plus froids en Patagonie, en Afrique du Sud concomitant avec le PAG dans l'hémisphère Nord, principalement par observations de glaciers. Mais les dates de maximum d'avancées varient considérablement entre ces différentes régions, ce qui peut laisser supposer que ces événements sont régionaux et ne correspondent pas nécessairement à une augmentation de la

glaciation au niveau global.

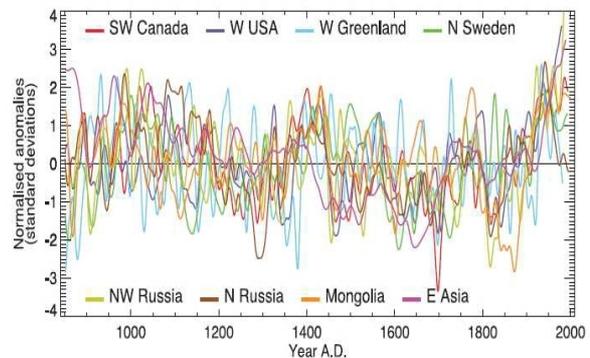


Figure 8 : Estimation des variations de température pendant les derniers 1000 ans montrant la difficulté à estimer le PAG au niveau global. © IPCC 2007

4. Causes possibles du Petit Âge Glaciaire

Il est généralement admis qu'il y a pas une cause unique à la baisse des températures moyennes notamment dans l'hémisphère Nord, mais plusieurs causes distinctes dont les importances relatives sont incertaines.

4.1. Variation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est de loin la source première d'énergie de la Terre, donc toute variation de la quantité d'énergie reçue peut avoir des impacts climatiques.

La durée du Petit Âge Glaciaire, de l'ordre de quelques centaines d'années, exclut a priori des causes liées à des variations des paramètres de l'orbite terrestre, tels l'obliquité, la précession des équinoxes et l'excentricité, qui ont des périodes de plusieurs ordres de grandeurs supérieures.

Par contre, l'activité solaire a sa variabilité propre, notamment via le phénomène de taches solaires, réglé par plusieurs cycles dont un cycle principal d'une période moyenne de 11,2 ans:

Les taches solaires sont des phénomènes temporaires et localisés d'origine magnétique à la surface du Soleil. Ces régions se caractérisent par des températures légèrement plus faibles (entre 4800°C et 5900°C) que le reste de la photosphère (environ 6400°C) et une activité magnétique intense. Le rayonnement d'un corps de température T étant proportionnel à T^4 , d'après la loi de Stefan-

Boltzmann, ces taches apparaissent comme des zones sombres observables depuis la Terre.

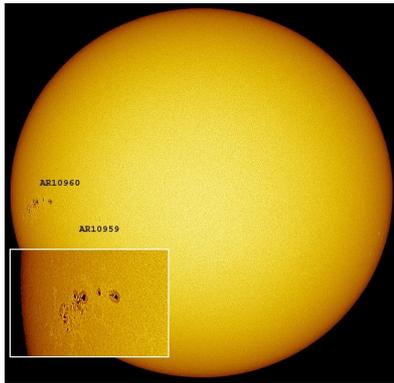


Figure 9 : Exemple de taches solaire en Juin 2007
2007 Copyright © 2001-2009, Anthony Ayiomamitis

Le **Minimum de Maunder** décrit une période de 30 ans entre 1645 et 1715 durant laquelle les astronomes et observateurs de l'époque, observèrent un très petit nombre de taches solaires.

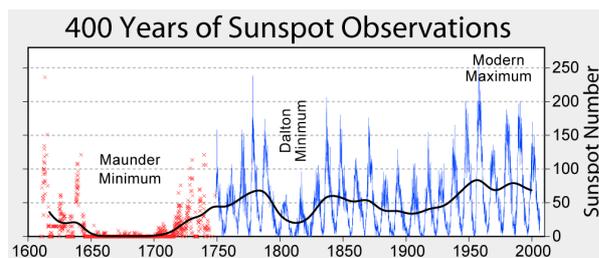


Figure 10 : Variation du nombre de taches solaires observées depuis 400 ans. Source: Wikimedia Commons

Bien que les taches solaires soient moins chaudes que le reste de la photosphère, le pourtour des taches est plus chaud; globalement, la constante solaire (représentant le flux énergétique reçue par la Terre) augmente légèrement avec le nombre de taches, de l'ordre de 0.1% (soit 1.3 W m^{-2} pour une constante solaire moyenne de 1366 W m^{-2}).

Des données récemment publiées [8] suggèrent également que le Soleil se dilata durant le Minimum de Maunder et que sa rotation fut plus lente, ce qui pourrait avoir eu un impact négatif sur la constante solaire.

4.2. Activité volcanique

Plusieurs théories [6] ont été avancées pour expliquer l'existence et surtout la persistance du Petit Âge Glaciaire. La première, basée sur les découvertes réalisées en stratigraphie relie le PAG des années 1800 à l'éruption très violente de plusieurs volcans,

dont le Tambora, en Indonésie. En effet, les cendres et nuages de poussières expulsés par certains volcans peuvent nettement diminuer l'efficacité du rayonnement solaire. Cependant, le petit âge glaciaire a débuté dès le XIII^e siècle et l'activité volcanique ne peut expliquer seule le phénomène.

4.3. Modification des circulations océaniques et atmosphériques

Circulation océanique

La circulation thermohaline joue un rôle climatique important en transférant de grandes quantités d'énergie vers les hautes latitudes. Tout changement de cette circulation peut avoir des effets significatifs.

La circulation thermohaline passée est mal connue, de part la difficulté à modéliser ce phénomène et de par la rareté des proxys et sites ayant enregistré ces variations. Il faut en effet trouver des sédiments s'étant accumulés de manière importante sans avoir été remobilisés spatialement. La Mer des Sargasses, dans l'Atlantique, a ces caractéristiques grâce à une sédimentation abondante (2m par millier d'année [12]) stabilisées par des courants (gyres).

Des études [12] suggèrent des eaux de surface de l'ordre de 1°C plus froide il y a 400 ans qu'à présent, pouvant indiquer une modification de la circulation océanique.

D'autres travaux [14] suggèrent que "entre 1200 et 1850, le Gulf Stream aurait ralenti d'environ 10 % par rapport aux 31 millions de mètres cubes d'eau qu'il transporte chaque seconde aujourd'hui. Ce qui implique une baisse d'autant de la chaleur transportée du sud vers le nord. Il pourrait donc y avoir un lien entre le ralentissement de ce grand courant de l'Atlantique Nord et le climat qu'a connu l'Europe durant le petit âge glaciaire.". Mais la relation de cause à effet n'est pas établie et il n'est pas prouvé qu'un ralentissement du Gulf Stream près de la Floride ait des impacts sur le climat européen.

Circulation atmosphérique

La variabilité climatique naturelle, tels l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) peut également avoir eu un impact mais il n'y a pas consensus à ce sujet concernant le Petit Âge Glaciaire.

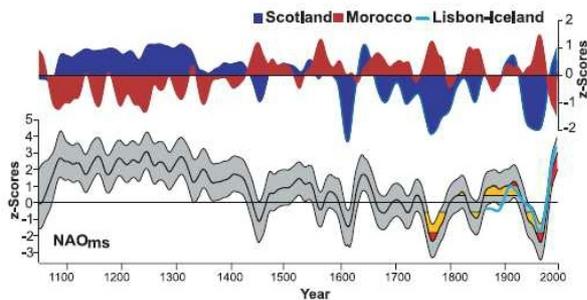


Figure 11: Exemple d'estimation des variations de la NAO [11]

4.4. Facteurs anthropiques

Le Petit Âge Glaciaire est situé majoritairement avant l'ère industrielle et avant l'utilisation à grande échelle des énergies fossiles ayant eues un impact sur les teneurs en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Cependant, la modification de l'utilisation des sols (défrichement, agriculture etc) a des effets climatiques en modifiant localement l'albédo.

Certains auteurs [13] ont proposé qu'une réduction significative de la population en Europe et Moyen Orient suite à la Peste Noire a provoqué une baisse de l'activité agricole, provoquant une reforestation importante et des baisses locales de températures et une fixation accrue du CO₂, gaz à effet de serre.

4.5 Comparaison des principaux forçages

Une estimation quantitative des principaux forçages et leur importance respective est nécessaire pour pouvoir évaluer les causes du Petit Âge Glaciaire. Il semblerait que les 2 forçages principaux soit l'irradiance et l'activité volcanique.

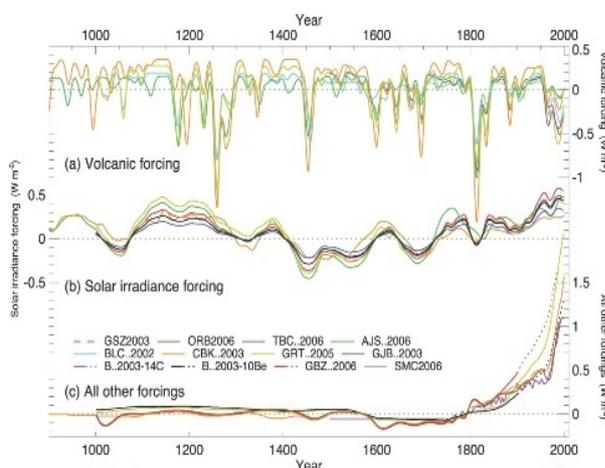


Figure 12 : Importance relative des différents forçages. Source: IPCC 2007 chapter 6 paleoClimate

5. Conclusion

Les paramètres climatiques du Petit Âge Glaciaire peut être reconstruits grâce aux nombreuses archives naturelles et humaines disponibles.

Au delà des discussions académiques visant à définir la durée ou la globalité du phénomène, le principal intérêt de l'étude du Petit Âge Glaciaire réside dans l'identification des forçages climatiques ayant gouvernés ces variations de températures afin de pouvoir les utiliser pour caler les modèles climatiques visant à prédire le climat futur.

En effet, ces modèles devraient pouvoir reproduire les mécanismes et variations passées pour être utilisés en simulation avec un degré de confiance raisonnable.

6. Références

- [1] Archibald, D., 2007, "Climate Outlook to 2030", Energy and Environment, in press.
- [2] Kubler, B., 1998, "Signatures paléoclimatiques du petit âge glaciaire dans les sédiments des lacs du transect Neuchâtel-Ilay et dans ceux de l'Atlantique Nord", VDF.
- [3] Smith D, Desloges J, 2000, "Little Ice Age history of Tzeetsaytsul Glacier, Tweedsmuir Provincial Park, British Columbia", Géographie physique et Quaternaire, vol. 54
- [4] Fleitman, D., 2004, "Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman", Quaternary Science Reviews.
- [5] Vivian R, 2003 *Glaciers du Mont-Blanc*, La Fontaine de Siloé
- [6] Vincent, C., 2005, "Alpine glaciers fluctuations and climatic change over the 19th century and the 20th centuries", EGU
- [7] Vaquero J.M., Sánchez-bajo F., Gallego M.C. (2002). "A Measure of the Solar Rotation During the Maunder Minimum". *Solar Physics*. doi:10.1023/A:1016262813525-PMID 17739301.
- [8] Robock, Alan (1979-12-21). "The "Little Ice Age": Northern Hemisphere Average Observations and Model Calculations". *Science* doi:10.1126/science.206.4425.1402. PMID 17739301.
- [9] Burrough, W, 2007 "Climate change: a multidisciplinary approach", Cambridge University Press
- [10] Kreutz et al. (1997) compared results from studies of West Antarctic ice cores with the Greenland Ice Sheet Project Two (GISP2)

[11] Trouet V, Jan Esper Nicholas E. Graham, Andy Baker, James D. Scourse, David C. Frank 2009 Persistent positive NAO mode dominated the medieval climate anomaly

[12] Lloyd, The Little Ice Age and Medieval Warm Period in the Sargasso Sea, ScienceMag.

[13] Ruddiman, W 2003, "The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago", Climatic Change 61

[14] D. C. Lund *et al.*, *Nature*, 444, 601, 2006.