

LA PHASE DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ACTUELLE : L'APPORT DE LA GÉOGRAPHIE PHYSIQUE AU DÉBAT SUR SES ORIGINES

Brigitte COQUE-DELHUILLE (1), Robert MOUTARD (2), †Henri ROUGIER (3)

- (1) Professeur émérite de Géographie, Université de Paris VII, membre de la Société de Géographie de Genève
(2) Agrégé et Docteur en Géographie, Université de Lyon III, membre de la Société de Géographie de Genève
(3) †Professeur émérite de Géographie, Université de Lyon III, membre de la Société de Géographie de Genève

*Nous dédions cet article à notre ami Henri ROUGIER, décédé le 14 septembre 2020.
Il avait commencé avec nous la mise au point du plan et la rédaction des premières pages. Terminer et
publier cet article à la Société de Géographie de Genève est un honneur pour nous et un hommage que
nous lui rendons.*

Brigitte Coque-Delhuille et Robert Moutard

Résumé

Les origines de la phase de réchauffement climatique actuelle posent encore question.

Après une analyse des changements climatiques à diverses échelles temporelles, plus particulièrement à l'Holocène et depuis l'époque romaine, l'essentiel de l'article s'attache à l'apport de la géographie physique à cette recherche.

Les glaciers des Alpes occidentales (France et Suisse) sont très riches d'informations géographiques (relief, modelés, dépôts) et il existe de nombreux témoins datés par des méthodes très variées (14C, ISL/ORSL, dendrochronologie, lichénométrie, palynologie, biologie végétale, isotopes cosmogéniques).

Le peuple Walser, installé en altitude dans les Alpes suisses au Moyen-Age illustre bien également la phase d'optimum climatique médiévale.

Dans les déserts tropicaux (ex. Sahara et Yémen), ont été analysées des phases plus humides et plus arides au cours de l'Holocène et à l'échelle historique.

Dans le rapport entre les dangers naturels et le changement climatique, deux études de cas sont analysées : la Flandre maritime française et les tempêtes, puis les méga-feux aux USA et en Australie.

Les pas de côté spatio-temporels que constituent ces diverses études de cas, procèdent de l'analyse multi-scalaire propre à la géographie. Ils conduisent *in fine* à reconsidérer les parts respectives des facteurs naturels et anthropiques dans le processus de réchauffement climatique actuel.

Abstract

The origins of the current phase of global warming are still unanswered questions.

After an analysis of the climate changes at different time scales, specially during the Holocene and since the Roman Period, this paper aims to show the physical geography contribution to this research.

The western Alps glaciers (in France and Switzerland) are very rich in date informations, landforms and dated witness deposits by numerous scientific methods (14C, OSL/IRSL, dendrochronology ; lichenometrie, palynology, plant biology, cosmogenic isotopes).

The walser people, established at high altitude in the Swiss Alps during the Middle Age, is also a good example of the medieval climatic optimum phase.

In the tropical deserts (Sahara and Yémen, for example), more humid and more arid phases have been studied during the Holocene and at the historical scale.

In the relation between natural hazards and climate change, two studies are analyzed : the French maritime Flanders and storms, and the mega-fires in the USA and in Australia.

The spatiotemporal steps aside of these various case studies, characterize the multi-scalar analysis specific to the geography. *In fine*, they lead to reconsider the respective shares between the natural and the anthropic factors of the current phase of global warming.

Dans la vaste question du réchauffement climatique actuel, quel état des lieux pouvons-nous dresser en tant que géographes physiciens, spécialistes des paléoenvironnements quaternaires et historiques, ainsi que des environnements actuels, en milieux tempérés océaniques, dans la montagne alpine, notamment en France et en Suisse, et dans les déserts tropicaux ? L'observation de terrain constitue la base de l'information du géographe, l'analyse des formes et des modelés, associée aux données sédimentologiques et bioclimatiques, entre autres.

Il convient aussi d'essayer de démêler le vrai du faux parmi les très nombreuses publications sur ce thème. Nous souhaitons également fournir une vision réaliste et inclusive des nombreux paramètres responsables des changements climatiques de notre planète Terre qui ont toujours existé à différents pas de temps, faute de quoi nous passerions à côté de bien des perspectives que propose la pensée complexe chère à Edgar Morin. Dans la problématique abordée ici, il s'agit de ne pas laisser un rapport de causalité unique, à savoir les activités anthropiques dissipant des gaz thermogènes, éclipser d'autres facteurs pourtant indéniables que sont les mécanismes astrophysiques.

Certes, nos sociétés et leurs instances politiques n'ont pas de possibilités de les modifier, alors qu'elles peuvent réguler les émissions de gaz à effets de serre. Mais focaliser l'attention sur cette seule source du surcroît de chaleur atmosphérique, risque de conduire à une déception majeure. En effet, si l'on se réfère à la première phrase du Manuel d'Épictète selon laquelle « Des choses dépendent de nous, les autres ne dépendent pas de nous », on peut transposer ce précepte bien simple dans la distinction entre les facteurs d'origine humaine et ceux qui relèvent des radiations thermiques solaires et de la dynamique des mouvements de la Terre. Sur ces derniers, aucune politique n'aura de prise, quelle que soit l'étendue de son champ d'application. Or, ces mécanismes étaient à l'œuvre bien avant les temps contemporains, et ont laissé leurs signatures sous forme d'indices de fluctuations paléoclimatiques recueillis par des scientifiques de diverses disciplines.

LA PHASE DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ACTUELLE

La Terre et ses changements climatiques à long terme

Depuis les origines de la Terre, les climats ont profondément changé au cours des ères géologiques, avec prédominance de climats tropicaux plus ou moins humides à l'ère primaire (où néanmoins une époque glaciaire est reconnue au Sahara au cours de l'Ordovicien), puis à l'ère secondaire sans aucun glacier, « la période chaude des dinosaures », puis pendant l'essentiel de l'ère tertiaire, avec cependant un signal majeur, le début de la formation de l'inlandsis antarctique dès le Miocène, voire même la fin de l'Oligocène, marquant le tout début d'un refroidissement. Enfin, l'ère quaternaire apparaît extrêmement originale avec l'alternance bien connue de phases glaciaires et de phases interglaciaires.

Dans cette étude, nous ne remonterons pas aux climats très anciens d'il y a des dizaines voire des centaines de millions d'années. En effet, la répartition des terres et des océans était très différente, de même que la composition de l'atmosphère.

A l'échelle du Quaternaire, seules les 400000 dernières années sont bien connues, avec leur alternance de glaciaires et d'interglaciaires, grâce à l'étude des glaces de l'Antarctique, du Groenland et aux données des glaciers de type alpin, pour les phases les plus récentes.

C'est dans un espace de temps plus court, celui de l'échelle historique, des changements climatiques de l'Antiquité romaine à nos jours que nous nous situerons et principalement du Moyen-Age à l'Actuel.

Les variations climatiques depuis l'Antiquité romaine

Il est impossible d'envisager le réchauffement climatique actuel sans connaître les fluctuations du climat qui ont affecté toutes les périodes historiques de l'Antiquité à l'Actuel. Parler du changement climatique en se référant seulement à quelques années ou dizaines d'années ne permet pas d'expliquer quoi que ce soit.

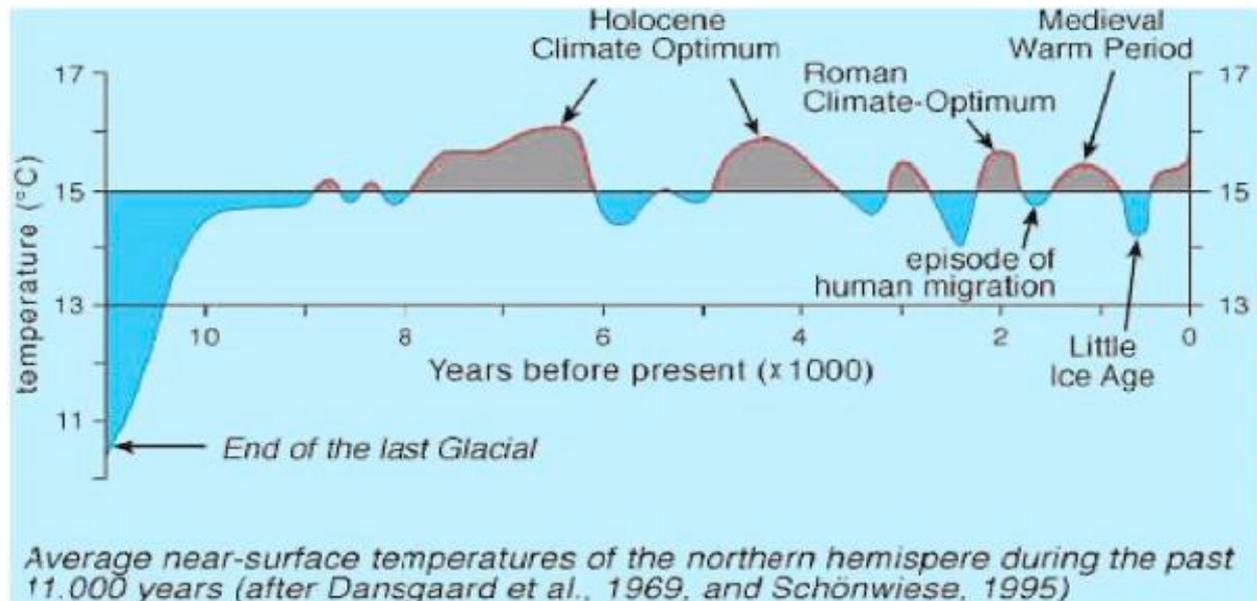


Schéma des moyennes de températures proches du sol depuis la fin du dernier Glaciaire, le Würm, vers 11000 ans BP. En gris apparaissent les phases les plus chaudes, ou Optimum climatiques, ceux de l'Holocène, l'Optimum Romain, celui du Moyen-Age et l'Optimum actuel, où les températures sont supérieures à la moyenne, et en bleu les phases intermédiaires plus froides dont le plus connu est le Petit Age Glaciaire (Little Ice Age) ; schémas in Prétat A., 2019, d'après Dansgaard et al., 1969 et Schönwiese, 1995.

Les méthodes utilisées et phases majeures des variations historiques

La connaissance des climats anciens historiques s'appuie sur plusieurs types de méthodes et de données.

- Les informations *archéologiques et sédimentologiques* : le croisement des données archéologiques avec celles de la sédimentologie (analyse des dépôts antérieurs, contemporains et postérieurs à chaque site) permet de préciser les paléoenvironnements de l'époque et leurs changements (ex. le Yémen à l'époque du royaume de Saba (1500 BC – IVème siècle AD) et les variations de l'aridité).

- Les *textes anciens* tels ceux d'Eratosthène, Ptolémée, Strabon.

La géographie est d'abord mathématique et descriptive. Puis *Strabon* (64-53 BC – 21-25 AD), qui fait le point des connaissances de l'Antiquité grecque et voyage jusqu'aux frontières de l'Ethiopie, écrit une « Géographie » en 17 livres (Aujac Germaine, 1966). Il y développe déjà des concepts de base de la géographie physique : relief terrestre, climats et vents, mouvements des eaux et une notion capitale, celle de l'extension relative des continents et des mers par la découverte de coquilles marines fossiles loin à l'intérieur des terres. L'alternance de transgressions et de régressions est envisagée avec une hypothèse climatique, la variation importante des volumes d'eau selon la variabilité de l'humidité ou de la sécheresse du climat.

- *Histoire et climat* apportent dans leur étroite relation, de très précieuses informations tant sur les réchauffements que les refroidissements, l'humidité, la sécheresse.

E. Le Roy Ladurie, dans sa magistrale « *Histoire humaine et comparée du climat* », en 3 tomes (2004, 2006 et 2009) fait appel aux dates des moissons, des vendanges, à celles des disettes et des famines au fil des siècles, et pour la période actuelle, les observations thermométriques et pluviométriques, l'élevage, le tourisme, et des connotations relatives à la qualité du vin et aux millésimes.

Il rappelle les grandes fluctuations climatiques depuis 5000 ans BC, alors que l'Homme ne jouait encore aucun rôle sur le climat :

- Optimum majeur de la Préhistoire (5000 – 3000 ans BC)
- Petit Optimum de l'âge du Bronze entre 1500 et 1000 ans BC
- Optimum romain (250 BC à 400 AD environ)
- L'Optimum médiéval de 900 à 1300 AD
- Le Petit Age de Glaciaire (PAG) lui succède de 1550 à 1850 AD.
- Enfin, le réchauffement climatique actuel depuis 1850.

Sur ces 3 dernières périodes étudiées par l'auteur, la précision descend à la dizaine d'années, voire à des années exceptionnelles sur le plan météorologique.

Pour les XXème et XXIème siècles, nous disposons d'une abondance de *données météorologiques et climatiques*. Aux relevés de températures classiques sur tous les continents et sur les océans, s'ajoute l'apport incomparable de l'imagerie satellitaire avec les nombreux satellites météorologiques.

- Les *données géomorphologiques* (glaciers, modalités de l'érosion...) et celles de *la géographie globale des milieux physiques* fournissent de nombreuses informations utiles à la connaissance des fluctuations climatiques à l'échelle des temps historiques et des dernières décennies.

La phase de réchauffement climatique en cours depuis 1850 n'a rien d'exceptionnel ni d'inquiétant

Depuis la fin du Petit Age de Glace (PAG) vers 1850, la Terre est entrée dans une phase de réchauffement. Elle suit le PAG, comme d'autres périodes historiques antérieures. Ce réchauffement s'avère toutefois actuellement, un peu moins puissant que celui du Moyen-Age où les langues glaciaires alpines ont reculé encore plus haut (Holzhauser H. et al., 1999), et à un moment où l'Homme n'avait guère de rôle sur le climat.

L'évolution des températures depuis 1850 (fin du Petit Age de Glace)

-Élévation et oscillations des températures depuis le milieu du XIX^e siècle

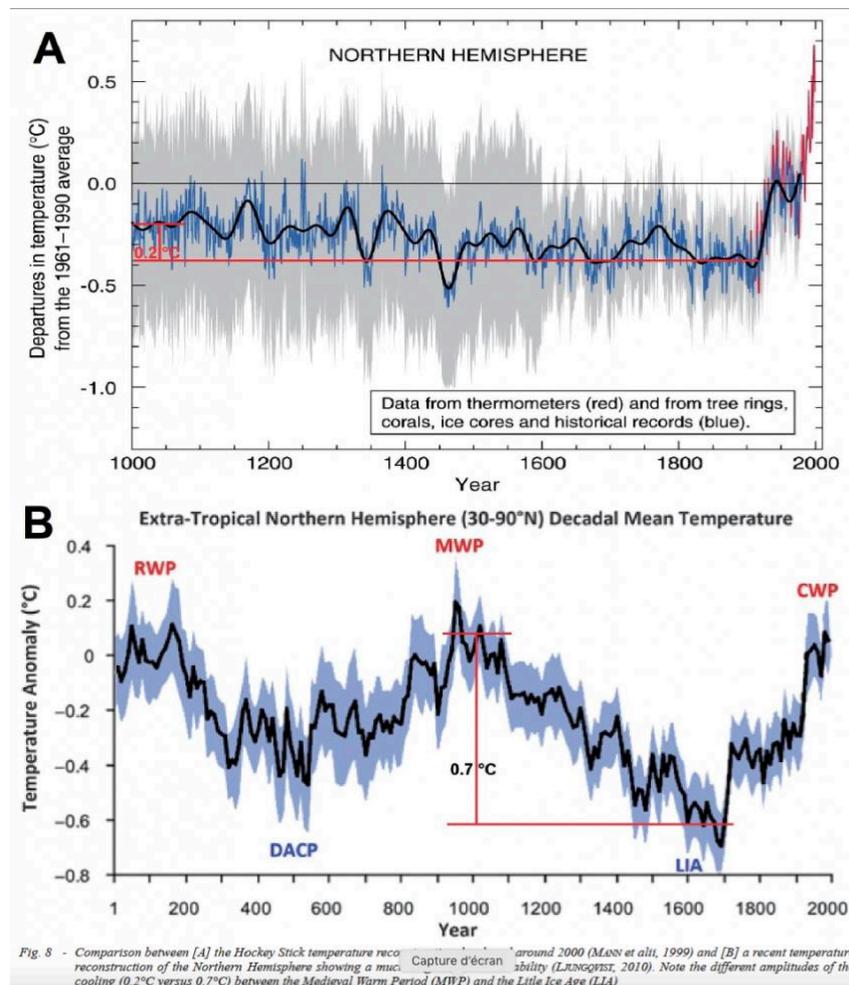
Depuis la fin du Petit Age de glace, nous sommes entrés dans une nouvelle phase de réchauffement climatique, soit depuis plus de 170 ans, et les températures moyennes se sont élevées. Les estimations depuis le milieu du XIXème siècle sont de l'ordre de 1°C et ceci avec des variations d'une dizaine d'années de baisse ou de hausse des températures, en relation principalement avec les paramètres solaires (cf.infra).

-Les écarts à la moyenne mesurés depuis 1850 varient très sensiblement selon que l'on se situe à l'échelle mondiale ou à l'échelle d'un pays, de la France, par exemple. Dans le premier cas, l'élévation de température est d'environ un degré, et de 1,3 à 1,4°C dans le second. Les premières valeurs concernent une moyenne océans/continents, les secondes, un ensemble continental aux latitudes moyennes. Néanmoins, s'observe une élévation sensible des températures depuis 1880-1890. Mais, elle varie d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre, d'où la prudence avec laquelle il faut considérer ces données. ***La moyenne des températures sur l'ensemble de la planète n'est pas une température moyenne ressentie sur Terre.*** De nombreux paramètres géographiques font varier ces températures : latitude, altitude, proximité de la mer ou d'un océan, ou à l'inverse, la

continentalité, tandis que les mesures sur les océans subissent moins de contrastes saisonniers. Il est en effet essentiel pour des géographes d'appréhender les différenciations spatiales des phénomènes. Celui de l'évolution des climats n'échappe pas à cette règle.

Pas de montée exponentielle des températures au cours des dernières décennies.

On est donc dans une phase de réchauffement climatique qui succède au PAG. Mais, aucune évolution anormale ni extrême. Depuis la fin du XXème siècle, une hausse plus importante de la température moyenne est relevée. L'évolution sur 170 ans est de type sinusoïdal et nous sommes dans la partie ascendante d'un cycle de 11 ans, avant d'en redescendre. Il n'y a donc aucun alarmisme et l'on voit bien que la *courbe de Mann en crosse de hockey*, montrant une élévation exponentielle des températures actuelles et futures, est erronée : une sinusoïde ne se prolonge pas par une droite et le GIEC ne retient d'ailleurs plus cette hypothèse.



Comparaison de 2 courbes de températures. En A, la fameuse courbe en forme de crosse de hockey de Mann et al. 1998 du GIEC, et les variations depuis l'An mil dans l'hémisphère nord, et en B les variations de températures de l'hémisphère nord, hors zones tropicales (30-90°N). Schémas dans Prétat A., 2019, repris de Scafetta 2019. Il apparaît clairement que la figure A du GIEC ne montre absolument pas l'Optimum Médiéval et le Petit Age de Glace. Quant à la hausse exponentielle des températures depuis environ 1950, elle est erronée. Légende de B : RWP Roman Warm Period, DACP Dark Age Cold Period ou période froide post-romaine, MWP Medieval Warm Period, LIA Little Ice Age, CWP Current Warm Period.

Tout ceci va dans le sens qu'un seul paramètre, comme l'augmentation du CO2, ne saurait expliquer l'élévation des températures à un moment de l'histoire de la Terre. ***Le système Terre est bien plus complexe que cela et les variations de températures mettent en jeu une infinité de paramètres (cf. infra).***

La phase de réchauffement climatique actuelle s'inscrit dans des fluctuations de l'ordre de 2 à 3 siècles, avec des cycles internes de l'ordre de 11-12 ans et autres.

LA VISION DU GÉOGRAPHE PHYSICIEN

GEOGRAPHIE PHYSIQUE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'HOLOCÈNE EST RICHE D'ÉPISODES ÉQUIVALENTS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ACTUEL. TÉMOIGNAGES PUISÉS DANS LA CRYOSPHERE ALPINE

Les glaciers des Alpes occidentales, témoins des oscillations climatiques

Des fluctuations consécutives à celles des températures et des précipitations

Le glaciologue savoyard S. Coutterand (2019) récapitule, sur la base des travaux de C. Schlüchter (2004) dix épisodes de réchauffements climatiques couvrant au total 5400 ans sur les 11 000 qu'a duré l'Holocène. Le détail de cette chronologie est reproduit à la fin de cet article.

Les avancées et les rétractions des appareils glaciaires dépendent de deux groupes de facteurs. Le premier relève de la configuration du relief dans lequel ils s'inscrivent : l'hypsométrie et les profils en long des vallées encaissantes, ainsi que leurs expositions. L'autre variable, plus déterminante encore car directement liée aux facteurs climatiques, est le bilan qui s'établit entre l'accumulation et l'ablation de leurs masses. À cet égard, ils répondent avec un temps d'inertie à deux composantes clés : les températures – essentiellement estivales – et les précipitations. Le premier groupe de ces facteurs, combiné à la longueur de l'appareil glaciaire, influe sur le temps de réponse aux apports et à l'ablation des glaces. C'est ainsi que le glacier d'Aletsch, le plus long d'Europe, réagit en différé par les variations de ses dimensions aux facteurs agissant sur son bilan de masse. De telle sorte que la latence de ses ajustements dimensionnels « lisse » les oscillations climatiques. À l'opposé, des formats modestes comme celui de Teppey sur les flancs de la chaîne de Belledonne, manifestent des avancées ou des reculs plus rapides (Leroy, 2012 ; Francou et al., 2007).

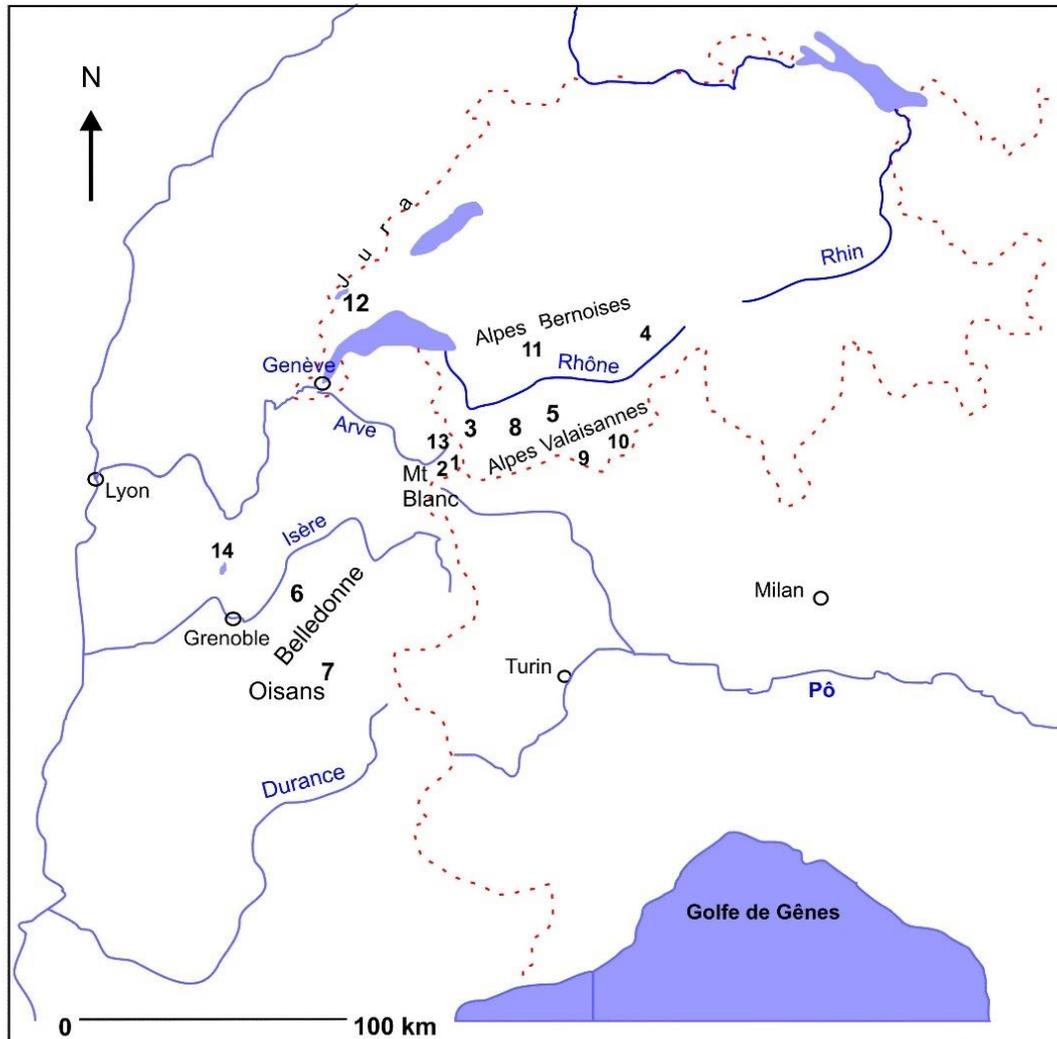
Une amplification du signal des fluctuations climatiques

Nombreux sont les observateurs constatant que dans les milieux montagnards comme aux hautes latitudes, les manifestations des variations climatiques récentes sont en général plus marquées qu'elles ne le sont dans les espaces d'altitudes plus basses qui les environnent. Tout se passe comme si les signaux de ces phénomènes se trouvaient amplifiés.

« Les glaciers de montagne sont l'un des meilleurs indicateurs des changements climatiques du fait de leur réponse rapide à de faibles variations des paramètres de forçage et de leur large distribution sur la planète. Les chronologies glaciaires représentent de ce fait des enregistrements de référence parmi les reconstitutions paléo-environnementales. » (Leroy, 2012).

De plus, les vallées glaciaires présentent l'avantage d'être bien circonscrites dans l'espace, par leurs attributs hypsométriques, topographiques et géomorphologiques. Ceci permet une délimitation spatiale précise des phénomènes qu'elles révèlent. La contrepartie est leur relative exigüité. D'où l'importance d'en étudier un échantillonnage aussi varié que possible pour compenser leur hétérogénéité en termes d'étendues, de relief, et surtout d'altitudes et d'expositions. Ces deux derniers paramètres revêtent une importance particulière en matière de glacioclimatologie. C'est ce à quoi a bien pris garde M. Leroy (2012) dans la conception de la

thèse qu'il a consacrée à la reconstitution des fluctuations glaciaires holocènes dans les Alpes occidentales, prenant en compte une douzaine de glaciers se répartissant dans les Alpes occidentales en Suisse et en France (fig. 1).



Sites glaciaires livrant des bois subfossiles

- 1 Mer de Glace
- 2 Les Bossons
- 3 Trient
- 4 Aletsch
- 5 Glacier du mont Miné
- 6 Teppey
- 7 Glaciers de l'Oisans: Le Rateau, Les Etages
- 8 Alpages de Tortin

Tourbières

Anciens passages en hautes altitudes

- 1 (id. Mer de Glace): col du Géant
- 9 Col de Théodule
- 10 Col d'Hé

Gisements d'artefacts de l'Age du bronze

- 11 Col de Schnidejoch

Lacs

- 12 Joux
- 13 Anterne
- 14 Paladru

Figure 1 : localisation des principaux sites étudiés à des fins de datations paléoclimatiques

Le dépérissement des appareils glaciaires : un spectacle a priori emblématique du réchauffement climatique actuel

L'évolution spectaculaire de la cryosphère alpine focalise aussi bien les regards des scientifiques, que ceux d'un large public parmi les milliers de randonneurs et d'alpinistes qui parcourent les glaciers alpins ou visitent leurs abords. Les dirigeants politiques sont eux-mêmes interpellés, ainsi qu'en témoigne la visite, le 13 février 2020, du Président de la République française à la Mer-de-Glace, au Montanvers. Il était accompagné pour la circonstance du glaciologue Luc Moreau, grand connaisseur de ce site, qui a prodigué des commentaires tant à l'adresse du Président qu'à celle des journalistes (H. Rougier, 2020).

On pourrait établir une certaine parenté entre cet événement médiatique et une nouvelle spécialité proche du géotourisme sans se confondre avec lui. Elle est étudiée dans la dernière publication de 2021 de la revue universitaire suisse *Géo-Regards* (Bussard et al., 2021). Cette contribution interroge sur la tendance à visiter des sites où le paysage est marqué par des processus de dépérissement des appareils glaciaires qui les occupent encore. La Mer-de-Glace, est l'une des deux études de cas retenues pour illustrer ce thème.

Des ouvrages interpellent directement un lectorat sensible à la dégénérescence visible des appareils glaciaires, par des intitulés au ton connoté de pathos : « Adieu glaciers sublimes » (Funk-Salami, Wuilloud, 2013).

Voir en amont du temps présent

Ne considérer que les temps actuels, en omettant de les mettre en perspective des fluctuations glaciaires des millénaires antérieurs, reviendrait à occulter l'essentiel de la dynamique climatique alpine. On s'enfermerait alors dans l'illusion d'optique classique de l'« arbre qui cache la forêt », en négligeant la dimension temporelle des variations de dimensions des appareils glaciaires alpins et ce qu'elles peuvent révéler des événements climatiques auxquelles elles furent liées.

Pour comprendre cette mise en garde, il convient de s'attarder dans un premier temps sur le phénomène abondamment documenté du Petit Âge glaciaire – ou Petit Âge de Glace – qui a sévi du XV^e au XIX^e siècle. Lui sont attachées des images de glaciers en crue, s'aventurant aux marges de l'écoumène au début du XVII^e siècle, endommageant des hameaux proches de Chamonix. Il s'agissait du glacier d'Argentière et surtout de la Mer de Glace, encore appelée à l'époque « Glacier des Bois ». À ne retenir que ce segment d'histoire, l'effet de contraste n'en est que plus saisissant avec son retrait accéléré depuis la fin du XIX^e siècle. Voilà qui fixe la représentation du paysage glaciaire en référence au temps révolu de sa puissance. Les artistes-peintres des XVIII^e et XIX^e siècles ainsi que les premiers photographes qui l'ont immortalisé par leurs images, ont activement œuvré en ce sens (photo 1).

En revanche, on ne dispose d'aucune représentation picturale des périodes antérieures, qui, elles, auraient pu contraster avec le Petit Âge de Glace. Pour celles-ci, il est plus ardu de trouver des indices. Les plus accessibles sont les lectures de chroniques historiques. D'autres nécessitent de recourir à des notions scientifiques, plus ardues, dont la plus classique est la dendrochronologie. Les plus récentes de ces disciplines font référence à l'astrophysique. Ce dénuement relatif d'images représentant les périodes d'optima climatiques ayant précédé le Petit Âge de Glace, confère à celui-ci une notoriété exagérée à double titre. D'abord, par son contraste avec les temps présents. Ensuite, par le fait qu'il éclipse dans l'esprit du grand public les périodes qui l'ont précédé. On est bien là sous l'effet perceptif de l'arbre cachant la forêt.

Les méthodes d'investigations en vue de reconstituer la chronologie des fluctuations glaciaires

Il ne paraît pas inutile de procéder ici à un rappel des méthodes de datation des variations de l'étendue et des altitudes des surfaces alpines englacées, ne serait-ce que pour faire pièce aux assertions sceptiques à l'égard de certains optima climatiques qui ont précédé la phase de réchauffement actuelle. L'intitulé d'une de ces publications comporte le terme anglo-saxon « hoax » signifiant « canular », pour assimiler l'optimum climatique médiéval à « un argument avancé par les climato-sceptiques pour relativiser l'ampleur du réchauffement » [actuel] (Foucart, 2015).

Pour éclairer ce débat, on peut puiser dans deux domaines méthodologiques, assez différents en termes de portées chronologiques et de rigueur scientifique. Le moins bien doté en ces deux domaines couvre les temps historiques.

À l'échelle de l'Histoire : transmissions de récits et consultation des chroniques

Si l'on s'en tient à l'acception classique des sciences historiques, on est conduit *a priori* à rechercher des témoignages essentiellement écrits, qui ne peut théoriquement couvrir, dans l'absolu, une durée au-delà de six millénaires. Pour les phénomènes qui nous intéressent dans la chaîne alpine, on ne pourrait guère remonter qu'à la colonisation romaine, soit un peu plus de deux mille ans B.P. Dans les temps historiques qui ont précédé le Petit Âge de Glace, deux séquences s'inscrivent en antithèse relative par rapport à cet épisode de péjoration climatique : les optima climatiques médiéval et romain.

Les témoignages de l'Optimum Climatique Médiéval dans les récits et chroniques

Cette période, définie à l'origine par H. Lamb (1965) est marquée par la première ondulation sinusoïdale positive en termes de courbes de températures, que l'on rencontre en remontant le temps depuis le Petit Âge de Glace (fig. 2).

Elle ne concerne pas que la chaîne alpine, comme le rappellent de nombreux auteurs (Lamb, 1965 ; Leroy-Ladurie, 1983, 2020 ; Preat, 2019). Bien que le concept d'Optimum Climatique Médiéval soit controversé quant à son ubiquité spatiale dans l'hémisphère Nord et sa durée pluriséculaire (GIEC, 2001 ; NOAA, 2006), il s'est manifesté dans l'évolution glacioclimatique alpine (Leroy, 2012, Francou et al., 2007, Coutterand, 2019, Leroy, 2012).

Comme le remarque J. Corbel (1963), on ne dispose d'aucun texte concernant la cryosphère ou le climat de la vallée de Chamonix avant 1550. Toutefois, des récits font état de hauts cols aujourd'hui englacés, qui livraient passage à des transhumances pastorales ou à des échanges commerciaux. Ils ne sont pas référencés avec précision, et s'apparentent davantage à des transmissions de traditions. Ainsi en est-il du col du Géant dans le massif du Mont-Blanc, dont des chroniques font état de son franchissement par des vaches chaussées pour la circonstance de dispositifs antidérapants et protégeant du froid. Même si le glaciologue L. Moreau estime cela possible, il considère ces récits avec circonspection.

En revanche, les évocations de circulations humaines sont plus nombreuses et mieux référencées. À une altitude de 3355 mètres, le col du Géant permettait au XVII^e siècle encore des relations, via le glacier éponyme, entre la vallée de la Doire Baltée qui mène à Courmayeur, et celle de l'Arve où se loge Chamonix. La plus ancienne carte de Haute Lombardie mentionne le nom d'un « Col Major » qui pourrait être ce passage devenu impraticable à partir du XVII^e siècle, suite à des accumulations de glace et des éboulements. À ce propos, R. Vivian (2005) cite les témoignages recueillis par W. Windham, l'un des « inventeurs » du Mont-Blanc, auprès de guides affirmant que des générations antérieures pouvaient gagner la vallée d'Aoste en six heures de marche seulement à partir de la vallée de Chamonix. M.T. Bourrit (1773) confirme les mêmes témoignages. Non

seulement ce franchissement du col du Géant n'avait rien d'exceptionnel, mais il était pratiqué par des montagnards non-alpinistes. Faut-il voir là une réminiscence des temps beaucoup plus cléments qui ont précédé le Petit Âge de Glace ? C'est ce même passage qui permettait aux Chamoniards de se rendre en plein hiver – le 31 janvier – à la foire de Saint-Ours instituée à partir de l'An mil, pour y acquérir des outils agricoles. De nos jours, seuls des grimpeurs sur glace confirmés ou des skieurs d'altitude aguerris suivent cet itinéraire à cette époque de l'année.

À la fin du Moyen Âge, d'autres très hauts passages comme le col valaisan d'Hé à 3462 mètres d'altitude, était emprunté par les Walser entre Zermatt et Évòlène (Röthlisberger 1976). Le col de Saint Théodule (3296 m) reliait également la vallée de Zermatt au Valtournenche jusqu'au milieu du XVI^e siècle, avant que le retour des glaces ne le rende impraticable au siècle suivant. Il a permis des échanges commerciaux non négligeables entre les deux vallées. On peut en déduire que les populations vivant en ces hautes vallées bénéficiaient au Moyen Âge de conditions climatiques moins rigoureuses que celles que nous connaissons aujourd'hui.

H. Gams (1949) note les mentions du « phénomène si curieux de la transhumance des troupeaux de moutons par-dessus des cols actuellement recouverts par des glaciers (par exemple dans les hautes vallées de Savoie, d'Engadine, d'Oetz et de Ziller, etc ...) ainsi que les nombreuses légendes parlant de pâturages et de bois ensevelis par des glaciers ou de cols glaciés fréquentés autrefois doivent chercher leur origine au Moyen Age, voire même à l' Âge du bronze ».

En remontant le cours de l'Histoire jusqu'à l'époque romaine, on a affaire à un autre optimum climatique. Les témoignages qui lui sont attachés sont beaucoup plus rares : on n'en trouve guère d'échos dans les chroniques ou récits, comme c'est généralement le cas à partir de 5 siècles B P lorsqu'il s'agit de repérer et authentifier les phénomènes climatiques. Mieux vaut alors recourir à des méthodes empruntées aux Sciences de la Terre.

La sédimentologie lacustre

À Colletière, au bord du lac de Paladru situé en position de piedmont préalpin dans le département de l'Isère (fig. 1), des carottages menés dans des dépôts sédimentaires ont révélé, dans l'Antiquité tardive, des variations bathymétriques corrélées à des séquences paléoclimatiques plus chaudes et sèches que celles qui les précédaient et qui leur ont succédé (Brochier et al, 2007). Selon les auteurs de cette étude, « (...) la phase de bas niveaux [du lac] se corrèle avec une phase de forte activité solaire ». On voit mal en effet d'autres causes que celles d'origine astronomique, pour expliquer cette période de réchauffement, à une époque où les activités humaines n'avaient atteint ni l'importance ni l'ubiquité qu'elles connaissent de nos jours au point de se trouver incriminées dans l'évolution climatique.

Cette période de réchauffement de l'Antiquité tardive des IV^e-V^e siècles AD est considérée « comme le maximum d'un cycle de réchauffement du climat, à égale distance entre les phases de refroidissement du premier Âge du Fer et du Petit Âge Glaciaire » (Brochier et al, 2007). Selon ces auteurs « la pédogenèse fut d'une durée relativement courte » pour cet optimum climatique.

En revanche, celle qui s'est développée durant son homologue médiéval fut beaucoup plus conséquente, s'étalant sur trois siècles de 900 à 1200 AD. Il ne faut toutefois pas croire que ce dernier événement s'est écoulé dans une parfaite continuité. Il serait plutôt la somme d'une succession d'épisodes thermiques de même tendance (Brochier et al, 2007). Il n'empêche que les auteurs de cette étude considèrent que « l'optimum du X^e au milieu du XI^e siècle ap. J.C. apparaît comme un événement majeur et particulier de l'Holocène ».

Le lac de Joux dans le Jura suisse et celui d'Anterne dans la réserve naturelle de Sixt-Passy en Haute-Savoie (fig.1), ont eux aussi connu de bas niveaux correspondant à l'Optimum climatique médiéval. Ils offrent à cet égard « deux enregistrements paléoclimatiques à haute résolution », notamment pour ce qui est des températures estivales dans l'environnement du deuxième site

(Magny, 2009). Un des objectifs affichés par ces auteurs était d'identifier les parts respectives revenant aux facteurs naturels et anthropiques dans les variations du climat.

Comme le lac de Paladru, le lac de Joux ne se situe pas directement dans l'enveloppe spatiale de la cryosphère alpine actuelle. Toutefois, des sondages dans sa plateforme littorale fournissent des données sédimentologiques témoignant d'une activité biologique requérant un contexte climatique clémente malgré l'altitude. Il s'agit de strates de tourbes, craies lacustres et dépôts carbonatés.

À une altitude nettement plus élevée (2060 m), et à proximité immédiate du Massif du Mont-Blanc, le lac d'Anterne d'origine glaciaire a lui aussi été sondé, dans sa partie centrale. Les carottes sédimentaires prélevées montrent des indices de niveaux paléo hydrologiques faisant apparaître un déficit comparable à l'actuel, datable de l'Optimum climatique médiéval. Une analyse qualitative des sédiments, portant notamment sur les éléments biotiques qu'ils renferment comme des larves de *Chironomidae* permettent de reconstituer les températures estivales des eaux du lac, de l'ordre de 10° c. entre 680 et 1350 AD. Sur cette base, cette période est estimée comme relativement chaude. Cette constatation, jointe à celle du déficit hydrique, ferait de cet horizon stratigraphique une signature supplémentaire de l'Optimum climatique médiéval alpin. Les auteurs de cette étude indiquent qu'il ne s'agit pas d'inférer à partir d'un cas isolé : les données issues du lac d'Anterne peuvent être mises en regard de celles qui ont été collectées en de nombreux autres sites alpins selon différentes méthodes d'investigations. Ainsi, il correspond à des variations dimensionnelles et altitudinales du glacier d'Aletsch (Holzhauser et al, 2005), ou à des températures estivales reconstituées par dendrochronologie de troncs de mélèzes à une plus large échelle dans les Alpes suisses (Büntgen et al., 2006).

Les apports scientifiques de la biologie végétale

Lichénométrie, palynologie et paléobotanique palustre

Moins utilisée que la dendrochronologie, la lichénométrie se fonde plus spécifiquement sur la mesure de l'extension des lichens à la surface de roches dans les délaissés glaciaires. À condition de disposer d'une courbe des temps de croissance des thalles recouvrant des supports rocheux, il est possible d'estimer la durée pendant laquelle ceux-ci sont demeurés libres de glace, sous laquelle les lichens ne peuvent vivre. Mais la portée temporelle de cette méthode d'investigations est assez limitée, car les surfaces rocheuses sur lesquelles se développent les thalles sont exposées à des agressions mécaniques très variées et actives en altitude. Elles le sont plus encore sur les marges glaciaires, lieux d'avancées sporadiques de la terminaison des appareils, riches en éléments morainiques.

C'est sans doute pour cette raison que, se fondant sur les travaux de W. Karlen (1973) et de J.A. Matthews (1974), R. Vivian (1975) prévient que la fiabilité des renseignements issus de la lichénométrie n'excède guère deux siècles. Se référant aux travaux de Innes (1985) et Matthews (2005) sur la fin de l'Holocène, M. Leroy (2012) concède une portée chronologique plus longue, pouvant aller jusqu'à 8 siècles. Avec, toutefois, des incertitudes significatives au-delà de 200 à 300 ans BP. De tels ordres de durées s'avèrent significativement moins longs que ceux sur lesquels peuvent compter les experts en dendrochronologie, devenue classique en matière de glaciocronologie.

La dendrochronologie, discipline de référence pour la reconstitution des paléoclimats

Ce procédé de datation est sans doute le plus connu et le plus couramment utilisé par les archéoclimatologues. Parmi eux, J. Corbel (1963), E. Leroy-Ladurie (1967) et R. Vivian (2005) ont largement eu recours à la dendrochronologie, dont le principe consiste à examiner l'épaisseur et le nombre de cernes de croissance de troncs d'arbres subfossiles.

On peut les trouver dans un assez bon état de conservation grâce à l'anoxie des argiles des moraines qui les ont recouverts.



Photo 1. Prélèvement d'un pin cembro dégagé à des fins de datation dendrochronologique dans une moraine de la Mer de Glace

(Source : Site internet de S. Coutterand Glaciers-climat adresse : <https://www.glaciers-climat.com/gp/mer-de-glace/>)

Les procédés d'investigations au sein de cette discipline se sont affinés avec l'examen densitométrique des cernes (Polge, 1966) et davantage encore avec la mesure isotopique des composants du bois (Daux, 2013), car « Les variations de la composition isotopique de la cellulose ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) sont des indicateurs paléoclimatiques robustes, de plus en plus utilisés pour reconstituer différents paramètres (températures estivales, précipitations, couverture nuageuse...) » (Leroy, 2013).

Dans les Alpes françaises du Nord et suisses, de nombreux sites ont livré des bois subfossiles, surtout d'essences résineuses, inclus dans les moraines des marges proglaciaires (photo 1, et fig. 1) ou apparaissant en positions sous-jacentes à ces formations. Une telle configuration indique logiquement qu'une végétation arborée s'est développée dans un intervalle climatique favorable à sa croissance, avant qu'une crue glaciaire ne la détruise et ne la recouvre (fig. 2). D'où cette observation formulée par H. Gams (1949) : toute avancée glaciaire annihile en grande partie la végétation qui s'est développée durant la phase climatique l'ayant précédée. De sorte qu'on ne retrouve souvent que des parts dégradées et retraits de vestiges à analyser.

Les séquences paléoclimatiques permettant la croissance d'arbres sur plusieurs décennies, voire sur quelques siècles répartis en plusieurs sites, peuvent être considérées comme des optima climatiques. Cependant, les alternances de rétractions et de crues glaciaires répondent – avec un temps de latence proportionnel à la taille des glaciers – aux séquences atmosphériques qui les ont générées. D'où l'extension logique du concept de dendrochronologie dans celui de la glaciochronologie (Leroy-Ladurie, 1967; Leroy et al, 2009).

Le recours aux isotopes cosmogéniques

Nous sommes ici dans le domaine des sciences physiques.

Le principe se fonde sur le fait que le rayonnement cosmique exerce sur les composants de l'atmosphère qu'ils traversent des spallations productrices de particules secondaires. Celles-ci sont transférées par les précipitations à la surface de la lithosphère. Leur taux de production, de même que leur vie radiative, sont fonction du temps dont l'écoulement a été intégré dans des modèles sur lesquels fonctionnent des calculateurs traitant des échantillons calibrés en divers sites. Dans ses travaux, M. Leroy (2012) a utilisé les nucléides de Béryllium produits dans le quartz par spallation de ses composants atomiques oxygène et silice. Ces corps ont été analysés et mesurés par spectrométrie de masse à l'aide d'accélérateurs de particules.

L'auteur affirme que « les datations cosmogéniques sont devenues un outil incontournable pour contraindre les fluctuations glaciaires à l'échelle du Quaternaire récent ». Pour autant, il les allie à la méthode dendroglaciologique. Ce faisant, M. Leroy rejoint d'autres auteurs dans l'identification de séquences glacio-climatiques, tant pour les phases de progression des appareils glaciaires que pour leurs rétractions.

La régression actuelle de la cryosphère alpine n'est pas un épisode glacio chronologique inédit

À l'échelle générale : la portée de la discussion

C'est ce que suggère B. Francou (2007) en formulant cette interrogation « (...) et si le recul actuel [des glaciers] observé depuis le dernier quart du XX^e siècle n'était finalement qu'une réplique amplifiée des fluctuations naturelles qui ont ponctué le dernier millénaire ? » Le terme de « naturel » est loin d'être anodin, si on l'introduit dans un débat portant sur le climatoscepticisme inversé consistant à mettre en doute ou à minimiser les optima climatiques des temps historiques et de l'ensemble de l'Holocène. En effet, les causes anthropiques qui dans la pensée dominante actuelle occultent toute autre origine dans le réchauffement que nous connaissons, ne devraient logiquement pas être invoquées avant la Révolution industrielle, avec laquelle a débuté la diffusion massive des gaz à effets de serre. Ceci, bien que certains auteurs avancent une théorie – controversée – selon laquelle cette époque aurait été préfigurée précocement au cours de l'Holocène, notamment par les effets de défrichements consécutifs à l'extension des espaces cultivés (Ruddiman, 2003).

À l'échelle temporelle de tout l'Holocène, B. Francou (2007) affirme que « si l'on se fie à ces découvertes [résultats des investigations glaciochronologiques], et si l'on cumule les temps pendant lesquels les glaciers des Alpes étaient plus en retrait qu'à notre époque, on constate que cela représente un peu plus de la moitié des dix derniers millénaires ». Ce que confirme S. Coutterand (2017) : « Les optima climatiques, maintenant avérés, de l'Âge du Bronze et de l'époque romaine ont connu des glaciers plus restreints qu'aujourd'hui (...) »

Quelques études de cas spatio-temporels significatifs

Retour sur l'optimum glacio-climatique médiéval

Des journalistes s'aventurant dans le champ de la climatologie estiment que tenir cette époque comme un optimum climatique relèverait d'un « canular » à l'échelle de l'hémisphère nord (Foucart, 2015). Cette assertion quelque peu provocatrice incite à voir de plus près ce qu'il peut en être à l'échelle plus restreinte mais plus précise des vallées alpines.

Si les chroniques historiques sont fort rares pour la vallée de Chamonix à cette époque, il n'en va pas de même de ce que livrent les examens de bois subfossiles découverts sur les marges proglaciaires de la Mer de Glace. Des peuplements de conifères ont préexisté à des stades d'avancées du glacier, et cela, à des altitudes supérieures à celle que nous connaissons actuellement. C'est ce que rapportent de très nombreux glaciologues et paléoclimatologues connaissant ces sites (Corbel, 1963 ; Vivian, 2005 ; Leroy et al, 2009 ; Leroy, 2013 ; Francou, 2007, 2021). Ces auteurs font état de véritables peuplements forestiers, et non pas de quelques individus ayant chuté sur le glacier. La présence d'horizons pédologiques sous-jacents aux moraines ou intercalés en elles, au contact desquels se trouvent les restes d'arbres, atteste d'épisodes climatiques assez cléments pour permettre le développement de véritables écosystèmes végétaux. M. Leroy (2013) date ces bois subfossiles de la fin du XIII^e siècle pour le niveau supérieur. Ils succèdent à d'autres du XII^e siècle, trouvés dans un niveau plus ancien.

En Suisse, J. Corbel (1963) fait état d'arbres de la fin du XII^e siècle dans les marges morainiques du glacier d'Aletsch.

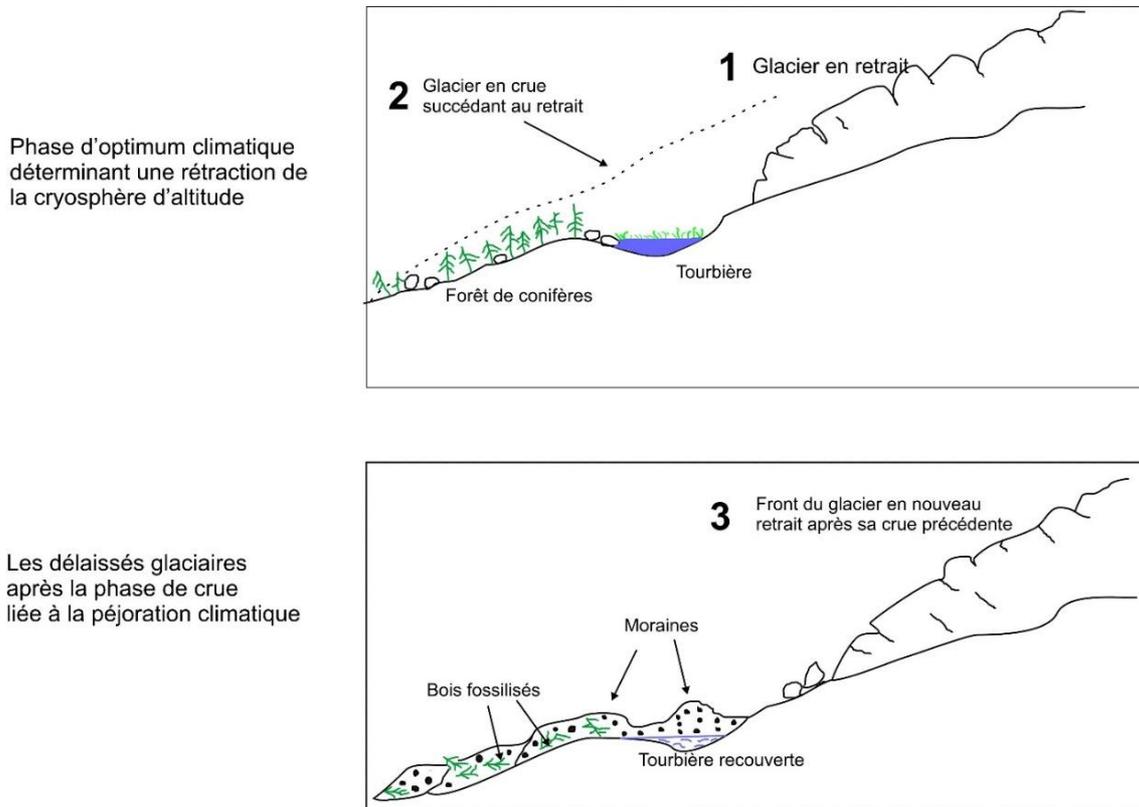


Figure 2. Témoignages phytogéographiques des crues et rétractions glaciaires (Croquis R. Moutard)

Le glacier de Trient a livré des Pins Cembro morts aux XII^e et XII^e siècles. Auparavant, certains ont eu le temps de devenir pluri centenaires, puisqu'ils ont atteint l'âge cambial moyen de 310 ans – avec une marge d'approximation de +/- 25ans (Leroy, 2013).

Sur les alpages valaisans de Tortin, dans la région de Nandaz, des sondages de tourbières d'altitude ont permis d'authentifier la présence d'une abondante végétation palustre ayant prospéré aux XI^e et XV^e siècles, témoignant d'une période de réchauffement suffisante pour permettre le développement d'alpages, accompagnée de défrichements, attestés par la présence de bois calcinés, dès le XI^e siècle. « Le glacier de Tortin ne descend durant les périodes chaudes que jusque vers 2700-2800 m, altitude où il se trouve actuellement. » (Biéler, 1978).

L'auteur de cette étude ne manque pas de lier cette rétraction glaciaire relative à celle qui a été révélée par l'examen de la tourbière de Bunte Moor en aval du glacier tyrolien de Fernau. C'est là qu'E. Le Roy-Ladurie (1975) a établi des périodisations polliniques et daté au ¹⁴C des horizons de tourbe, complétant les investigations précédentes de Mayr (1964). Il en ressort que « (...) la forêt fossile de Grindelwald a vécu sur les sites aujourd'hui totalement dénudés qui environnent le « glacier d'en bas » du VII^e au XIII^e siècle, c'est-à-dire à l'époque même où toute une série d'indices convergents permettent de placer le petit optimum du Moyen Age et des environs de l'an mil » (Le Roy-Ladurie, 1975). À propos des dimensions de cette époque du glacier de Fernau qui domine le site des tourbières, E. Le Roy-Ladurie les estime « plus rétrécies même peut-être que celles pourtant racornies déjà qu'on connaîtra de nos jours ».

S'intéressant au glacier d'Aletsch pour les mêmes raisons que pour celui de Fernau, E. Le Roy-Ladurie y a trouvé d'« importantes datations médiévales (...) de nature archéologique, documentaire ou radioactive (carbone 14) ». Kinzl dès 1932 s'attaqua au problème de l'Oberriederin d'Aletsch, ancienne conduite d'eau d'âge haut-médiéval destinée à l'irrigation des prairies elles-mêmes situées en aval du front glaciaire. Le tracé de l'Oberriederin au temps où elle fonctionnait prenait en effet sa source en un point d'eau qui aujourd'hui encore est recouvert par le glacier. Il faut donc admettre que « le glacier d'Aletsch était un peu plus court pendant le Haut Moyen Age qu'il ne le sera pendant ses maxima du XVIII^e siècle ou même pendant l'époque contemporaine » (Leroy-Ladurie, 1975).

Toujours à propos du glacier d'Aletsch, B. Francou, et C. Vincent (2007) concluent de leurs investigations que (...) « le XII^e siècle et la première moitié du XIII^e sont caractérisés par une belle expansion de la végétation : elle s'étend alors jusqu'aux limites du glacier qui sont celles de 1957 sans qu'aucune crue d'ampleur de celui-ci n'ébranle cette longue période de contraction, qui durera au total près de quatre siècles, de 900 à 1300 environ. Aletsch enregistre donc la clémence du climat du Petit Optimum Médiéval, une clémence favorable en Europe aux défrichements, à la croissance de la production agricole, et en conséquence à la démographie ».

Donc l'examen des fluctuations de la cryosphère dans les vallées glaciaires des Alpes occidentales ne légitime guère le qualificatif de « canular » dont certains affublent quelque peu imprudemment l'optimum climatique médiéval.

L'optimum de l'époque romaine

« Plus les données s'accumulent sur ce « Petit Optimum Romain », plus on s'aperçoit que les glaciers des Alpes, et c'est le cas d'Aletsch, s'étendaient sur des surfaces plus réduites que de nos jours » (Francou, 2007).

Comme pour l'époque médiévale, les tourbières de Bunte Moor livrent des éléments du même ordre pour étayer le fait qu'à l'époque romaine, un climat local était assez clément pour permettre une phytogenèse, dont des sphaignes (Leroy-Ladurie, 1975, Leroy, 2013).

Dans les vallées de Chamonix, sur le site des Bossons, M. Leroy (2013) a examiné des bois subfossiles du IV^e siècle AD, dont la présence témoigne d'une ambiance thermique permettant l'installation d'un peuplement arboré. L'auteur estime très fiable cette source d'indices dendrochronologiques. En effet, leur mode de gisement dans les formations morainiques du glacier permet d'écarter le fait que les arbres étudiés proviennent d'une chute depuis des positions isolées sur les versants sus-jacents. Ils ont bien préexisté à des crues glaciaires.

Ce peuplement atteste, comme ses homologues appartenant aux temps médiévaux, de conditions climatiques ayant provoqué le retrait de la partie terminale du glacier à des altitudes supérieures à celles auxquelles a été opérée l'extraction des bois subfossiles en ce début du XXI^e siècle.

À l'Âge du bronze, la dernière randonnée d'Ötzi

L'homme ainsi appelé par les archéoanthropologues après la découverte de son corps naturellement momifié, le 19 septembre 1991, à 3210 mètres d'altitude sur le versant italien du col de l'Hauslabjoch dans le Tyrol méridional, n'était pas spécifiquement équipé pour cheminer sur des pentes englacées. Il s'agissait d'un montagnard vraisemblablement en déplacement de chasse lorsqu'il trouva la mort. Il évoluait sur les hauteurs proches de la chaîne de Similaun il y a 5200 ans, au milieu du Néolithique, à l'Âge du Bronze. On peut en déduire qu'à cette époque, l'englacement sommital des versants dominant la haute vallée de Senales était suffisamment modéré pour permettre la circulation d'hommes ne recherchant pas d'exploits alpinistiques à proprement parler. En tout cas, le paléoclimat du milieu dans lequel a été trouvé Ötzi n'était pas

plus englacé que lors de sa découverte en 1991. Effectivement, le milieu du Néolithique connaissait des températures de 2° C supérieures à celles du XX^e siècle (Francou, Vincent, 2007).

Cette découverte a été, pendant un temps, considérée comme exceptionnelle. Or depuis, dans la première décennie du XXI^e siècle, d'autres ont corroboré la présence d'hommes en des sites d'altitudes partiellement englacés aujourd'hui, toujours à l'Âge du Bronze, et toujours dans les Alpes suisses.

A. Hafner (2012) fait état de trouvailles d'objets se rattachant à cette époque, au Schnidejoch, col de la région du Wildhorn situé à une altitude de 2 756 m, dans l'ouest des Alpes bernoises. Les très nombreux fragments inventoriés ont été fabriqués dans du cuir, du bois, des écorces cousues, des tissus fibreux, donc en des matériaux organiques se prêtant à la datation par isotopes carboniques. « Ces découvertes datent de la période néolithique, du début de l'Âge du bronze, de l'Âge du fer, de l'époque romaine et du Moyen-Âge, ce qui s'échelonne sur 6000 années (...). Cet endroit a permis de découvrir les plus anciennes preuves d'activité humaine de la période néolithique en haute altitude dans les Alpes (...). Ce site prouve nettement que dès le cinquième millénaire av. J.-C., l'être humain avait accès aux régions en haute montagne. Par ailleurs, la répartition chronologique des découvertes indique que le col du Schnidejoch était principalement utilisé en périodes de recul des glaciers ». (Hafner, 2012).

M. Leroy (2013) indique qu' « au cours du cinquième millénaire BP un troisième optimum climatique a pu être mis en évidence. Il est marqué par une limite supérieure de la forêt élevée (Bircher, 1982 ; Nicolussi, 2009), et une recolonisation végétale des marges proglaciaires dans le Valais (Holzhauser, 2007) »

En remontant plus loin dans l'Holocène

En s'éloignant des temps historiques, on quitte nécessairement le champ des témoignages et indices de nature anthropique utiles à des reconstitutions paléoclimatologiques. Il faut alors se tourner vers des données empruntées uniquement aux Sciences de la Vie et de la Terre.

Les recherches menées sur de telles bases amènent à cette synthèse : « Il y a environ dix mille ans, les fronts des glaciers alpins avaient déjà reculé jusqu'à des positions proches de celles de la fin du XX^e Siècle » (Nussbaumer et al, 2012).

Toutefois, les millénaires qu'embrasse cette rétrospective se sont écoulés au rythme des alternances entre des phases de régressions et de crues glaciaires répercutant les oscillations climatiques. Ceci, avec des temps de latences variables selon la morphologie des appareils glaciaires et la configuration des vallées qui les contiennent.

Se référant aux travaux de Nicolussi et Patzelt (2000, 2001), de Hormes et al (2001) et de Joerin et al (2008), Nussbaumer et al (2012) placent l'optimum climatique holocène le plus marqué entre 7500 et 6500 BP et estiment qu'il a connu « un englacement plus réduit qu'à l'heure actuelle ». Ceci, sur la base d'études dendrochronologiques menées sur des bois subfossiles exhumés de moraines de la Mer de Glace.

Pour cette même période de l'Holocène moyen, M. Leroy (2013) remarque « que la limite supérieure des arbres atteint ses plus hauts niveaux ». S'appuyant sur les travaux de Ravazzi et Aceti (2004), de Nicolussi et al, de Talon (2010), il estime que « les températures estivales se situent alors au niveau de celles de la fin du 20^e siècle et du début du 21^e ». Dans la synthèse chronologique qu'il dresse, M. Leroy désigne cet intervalle comme le deuxième des six optima climatiques marquants associés à des périodes de rétractions dans la cryosphère des Alpes occidentales, au cours de l'Holocène.

Pour le début de l'Holocène, H. Gams (1949) estime que « tous les glaciers ont reculé avec une telle vitesse que les limites actuelles de la majorité des essences forestières ont été atteintes vers 5500 avant J.C. au plus tard. De nombreuses trouvailles de bois subfossiles, et surtout les analyses polliniques d'une quantité de dépôts lacustres et de tourbières prouvent que, dans les Alpes, ces limites ont été dépassées de 400 à 500 mètres, à deux reprises, vers 4000 et 1000 avant notre ère ».

H. Gams fait remarquer aussi qu'à l'Holocène moyen, les tourbières dont certaines en Valais et en Tyrol se rencontrent parfois jusqu'à plus de 2 800 mètres d'altitude, ont pris place en aval de la limite supérieure des espaces boisés. En fonction de quoi H. Gams estime que l'Epicéa atteignait 2.400 mètres dans les Alpes centrales, le Mélèze jusqu'à 2.600 mètres, et l'Arolle jusqu'à 2.800 voire 3.000 mètres. Alors qu'actuellement, cette essence peine à s'élever jusqu'à 2500-2700 mètres.

À l'échelle de tout l'Holocène, de nombreux auteurs désignent les phases de réchauffement les plus anciennes comme étant celles qui couvrent les périodes 9900 à 9550 et 9000-8050 BP, donc correspondant aux chronozones de la fin du Préboréal et du Boréal.¹

(Vivian, 1976, Bintz, 1989, Schlüchter, 2004, Leroy et al, 2009, Leroy, 2012, Coutterand, 2017). Faisant référence aux datations par ¹⁴C menées par les chercheurs des universités de Bern et Innsbruck sur des bois subfossiles trouvés sur les fronts glaciaires actuels, M. Leroy et al (2009) indiquent que les séquences de retraits glaciaires les plus prononcées concernent surtout la première moitié de l'Holocène. « Le cumul de ces intervalles indique même que les glaciers ont été moins étendus qu'ils ne le sont actuellement pendant au moins la moitié de l'Holocène (Ivy-Ochs *et al.*, 2009). Les troncs retrouvés sont supposés avoir poussé pendant des périodes plus chaudes dans et/ou sur le bord de bassins de sédimentation situés actuellement sous la glace (...) Les travaux menés sur ce site par Joerin *et al* (2008) indiquent que l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire (LEG) était plus de 220 m supérieure à celle de l'année de référence (1985) pendant les différentes périodes où des arbres ont pu pousser sur ce site (vers 9200 cal. BP, de 7450 à 6650 cal. BP, et de 6200 à 5650 cal. BP). (...) On peut noter en outre que ces optimums holocènes reconstitués d'après les glaciers coïncident avec les reconstitutions d'une limite supérieure des arbres bien supérieure à l'actuelle dans les Alpes orientales (Nicolussi *et al*, 2005).»

« L'évolution de la végétation durant le Préboréal souligne clairement l'amélioration définitive du climat. L'augmentation appréciable des températures (...) entraîne un relèvement sensible des groupements forestiers. Bien que toute estimation altitudinale soit difficile, il semble que la limite supérieure de la forêt ait pu atteindre 1900 mètres dans la zone intra-alpine. » (Bintz et al, 1989). Pour l'époque suivante, R.Vivian (1976) estime que « la présence de troncs à l'altitude des fronts glaciaires actuels laisse supposer qu'il y a 8000 ans, c'est-à-dire à l'époque boréale, les glaciers étaient plus petits qu'aujourd'hui puisque le climat local était suffisamment doux pour permettre la croissance d'arbres dont les souches et les troncs retrouvés montrent qu'ils avaient pu atteindre alors une taille respectable ».

Cette remarque invite à dresser un bilan du tour d'horizon paléoclimatique à l'échelle de l'Holocène auquel il vient d'être procédé. On en retire l'impression d'un « piétinement » des avancées et régressions d'appareils glaciaires dans les vallées alpines. Ce terme imagé est emprunté à P. Veyret, l'ancien Doyen de l'Université de Grenoble, lorsqu'il résumait la teneur de la thèse de R. Vivian (1976) qu'il a codirigée avec E. Leroy-Ladurie.

Esquisse d'une synthèse sur les variations chronologiques des glaciers alpins durant l'Holocène

Les méthodes d'investigations sur lesquelles se sont fondés les auteurs évoqués dans cette étude sont on ne peut plus diverses, puisqu'elles vont de l'exploitation de chroniques historiques pour les époques les plus récentes aux techniques scientifiques issues des Sciences de la Vie et de la Terre, lorsque les témoignages humains font défaut pour les plus anciennes. Parmi ces disciplines scientifiques, la palynologie et surtout la dendrochronologie occupent toujours une place centrale. Mais elles sont de plus en plus complétées par les apports de la sédimentologie lacustre et de la

¹ Nous nous fondons ici sur la périodisation établie par P. Bintz et al dans leur étude spécifiquement dédiée à l'Holocène dans les Alpes du Nord (1989).

physique nucléaire. Cet éventail scientifique confère aux auteurs qui l'emploient une fiabilité accrue dans les résultats qu'ils dégagent de leurs études.

Lorsque l'on considère les millénaires de l'Holocène, l'image des récurrences de crues glaciaires, a tendance à occulter celle des retraits de la cryosphère d'altitude, dont elles détruisaient d'ailleurs les traces (fig.2). Mais il convient de remarquer que celles-ci sont rendues accessibles – notamment lorsqu'il s'agit de vestiges d'arbres subfossiles – par la fonte actuelle des glaces qui les recouvraient. Cela signifie que les fronts glaciaires actuels, bien qu'affectés par un réchauffement marqué, se situaient à des niveaux d'altitudes plus élevés encore par le passé puisque c'est lors de leur descente qu'ils ont recouvert les espaces boisés.

Il en découle – et là est le propos essentiel de la présente étude – que les optima climatiques dans lesquels s'inscrivirent les rétractions des appareils glaciaires alpins permettent de relativiser sans la minimiser la présentation très médiatisée de la phase de fonte et de réchauffement actuels. Elle n'est pas sans de nombreux précédents. Certes, le fait que « les glaciers alpins étaient moins étendus que maintenant durant plus de la moitié des dix derniers millénaires » (Coutterand, 2017) n'enlève rien au fait que la situation présente soit ressentie comme préoccupante.

Mais une rétrospective des épisodes de réchauffements climatiques alpins devrait fournir matière à relativiser les inquiétudes suscitées par l'état actuel des choses. En ce sens, on peut s'appuyer sur une récapitulation chronologique dressée par S. Coutterand (2017a) qui s'appuie pour cela sur les travaux de C. Shlüchter (2004). Cette recension, présentée dans le tableau suivant, concerne des périodes de l'Holocène durant lesquelles des fontes de glaciers s'expliquaient par des températures de 1 à 1,5° C supérieures à celles de l'époque actuelle

Années calendaires avant 1950	Durées
9900 - 9550	350
9000 - 8050	950
7700 - 7500	200
7350 - 6500	850
6150 - 6000	150
5700 - 5500	200
5200 - 3400	1800
2800-2700	100
2300 - 1800	500
1450 - 1150	300
TOTAL	5400

Mais les rétractions de la cryosphère alpine ne devaient rien, avant la fin du XIX^e siècle, aux causes d'origines anthropiques incriminées aujourd'hui de manière univoque. Les optima climatiques qui se sont succédés au cours de l'Holocène étaient dus à des facteurs astrophysiques. Il est à noter que pour l'époque présente, leur part relative dans le réchauffement global en regard des causes anthropiques n'est pas précisément chiffrée ni volontiers publiée. La tendance médiatique dominante actuelle tend à les occulter en n'évoquant que les émissions de gaz à effet de serre.

Paradoxalement, omettre les fluctuations de l'activité solaire à la merci de laquelle se trouve la Terre en permanence, peut avoir des effets indésirables sur notre conduite dans le contexte du réchauffement que nous vivons. Ce dernier est régi par deux groupes d'acteurs. Le premier est l'ensemble des forces d'origines exogènes à notre planète. Seul le second, qui est endogène, est d'essence anthropique. La population mondiale n'a de prise que sur ce dernier.

Or, si selon toutes probabilités le premier est déterminant alors que l'on se focalise sur les seules émissions des GES, on court le risque d'une inévitable déception si l'on attend un effet décisif des seules mesures que les populations humaines sont à même de mettre en œuvre. Le propos ici n'est pas de vouloir faire considérer ces actions comme inutiles. Il consiste au contraire à prévenir un désappointement massif, générateur à terme de découragements et de démobilisations tant dans les politiques que dans les comportements citoyens s'attachant à éliminer ou à réduire les facteurs de réchauffement atmosphérique. Un tel découragement ne serait pas à exclure. Il pourrait procéder d'une disproportion constatée entre les résultats obtenus par une politique de mesures rompant avec les anciens paradigmes énergétiques, et de trop grandes espérances investies dans un tel programme.

Le peuple Walser installé en altitude dans les Alpes suisses au Moyen-Âge

Le peuple Walser, étudié par Henri Rougier (ouvrage à paraître aux Editions LEP, Mont-sur-Lausanne), illustre parfaitement le rôle des variations climatiques sur leur installation en altitude au Moyen-âge.

Le mot Walser vient de la contraction du terme allemand *Walliser* qui désigne les Valaisans. Ce peuple d'éleveurs montagnards établis initialement dans le val de Conches, vallée supérieure du Rhône, dans le Valais germanophone, depuis le VIIIème siècle, a bénéficié d'un climat plus chaud que celui que nous connaissons aujourd'hui.

Le Petit Optimum Médiéval (environ du VIIIème au XIIIème siècles), leur a fourni de nombreuses conditions favorables, températures plus élevées, recul des glaciers à une altitude supérieure à l'actuelle régression, limites de la végétation plus hautes qu'à présent, cultures céréalières pouvant même être pratiquées à plus de 2000m d'altitude et alpages encore plus hauts. Les espaces disponibles pour l'élevage étaient donc importants et furent comblés progressivement dans ce secteur.

Mais, l'augmentation rapide de la population walser, en raison de familles pléthoriques, aboutit à la nécessité de migrer. C'est aux XIIIème et XIVème siècles principalement que s'opèrent les grandes migrations de ce peuple montagnard, la plus grande de l'histoire des Alpes. Les vallées aux bons sols étant déjà occupées, il ne leur restait que des espaces vierges à l'amont des vallées, aux conditions topographiques difficiles, le moindre replat étant occupé. Mais les conditions climatiques demeuraient favorables. Ils partirent vers l'Est, jusque dans le Rheinwald, le Tessin et la région de Davos ainsi que les plus hautes vallées du canton des Grisons.

Par contre, avec l'arrivée du *Petit Age de Glace* vers le milieu du XVIème siècle, les Walser eurent à faire face à des conditions climatiques plus rudes, plus froides. Ainsi, ils subirent des incidences néfastes : abandon des parcelles les plus hautes, diminution des rendements des prés de fauche et des cultures vivrières et un raccourcissement de la période végétative. Il s'en est suivi un départ nécessaire de la population vers des lieux un peu moins rudes à des altitudes quelque peu plus faibles.

Le peuple Walser évoque donc parfaitement les relations entre les changements climatiques au Moyen-Age puis pendant le Petit Age Glaciaire et leurs adaptations à ces fluctuations (Rougier H., 2002 et 2013).



Replat occupé par les Walser à Sparru (1800 m), près de Jungu. (photo Henri Rougier)

Les phases holocènes plus humides et plus arides dans les déserts (ex. Sahara et Yémen).

Bien loin des montagnes alpines, les déserts tropicaux, tels le Sahara, le désert arabo-yéménite, connurent aussi des phases holocènes et historiques plus humides et plus arides. Ces variations climatiques eurent des conséquences sur l'occupation humaine au Sahara et sur les irrigations de crues au Yémen aride.

L'extension des milieux arides a varié considérablement au cours du Quaternaire y compris à l'Holocène. Aux alternances de Glaciaires et d'Interglaciaires dans les montagnes des milieux tempérés, les déserts ont vu une succession de phases plus arides et de phases plus humides. Les calcaires lacustres que l'on trouve au *Sahara*, témoignent de la présence d'anciens lacs autour desquels la vie était favorable et où l'on trouve des vestiges archéologiques. Des gravures rupestres d'animaux, éléphants, girafes, signalent une faune qui n'est présente aujourd'hui que dans les savanes.

Un exemple remarquable est celui du bassin de Taoudenni (Mali) situé sur le Tropique du Cancer (22-24°N) et où le climat est actuellement hyperaride (environ 10mm seulement de précipitations par an). A l'optimum climatique holocène, aussi appelé l'Holocène humide, entre 8500 et 6500 ans BP, d'importants lacs se sont développés et n'ont été asséchés que vers 4500 ans BP, soit 2500 ans seulement avant notre ère (Petit-Maire N., 2012). Cette région bien connue pour son sel accumulé par évaporation de certains lacs, donne encore lieu à son exploitation et à la dernière grande caravane qui sillonne régulièrement le Sahara.

A l'échelle historique, depuis l'Antiquité, les données sont plus disparates et encore incomplètes.

Par contre, dans le *désert intérieur du Yémen*, les recherches archéologiques et géoarchéologiques qui y ont été menées (pendant la décennie des années 1990 jusque vers 2000), notamment les études géomorphologiques, sédimentologiques et les datations absolues des limons d'irrigation de crue, ont permis de préciser le contexte paléoclimatique au cours de l'Antiquité sudarabique lors des royaumes de Saba, Qataban, Awsan et Hadramawt.

Le Yémen intérieur aride étudié, tourné vers le désert d'Arabie (Rub al Khali), se situe entre 14°30'-15° Nord et 45°40'- 46°30' Est. Il est encadré par les hauts plateaux volcaniques tertiaires (2000-3700m) à l'Ouest, le plateau de l'Hadramawt (1300-1400m) à l'Est et les montagnes du

socle sudarabique au Sud d'une altitude de 1500-1800m dans la région de Bayhân à près de 2600m au Sud des wâdîs Dura' et Abadan.

De larges vallées d'une altitude moyenne de 1000-1150m au débouché des gorges, sont orientées SSW-NNE. Elles sont inscrites dans le socle granitique et métamorphique et comportent de puissants remblaiements alluviaux plio-quadernaires. Les écoulements de crues se perdent dans le désert du Ramlat As-Sabat'Ayn, ce qui en fait une région endoréique. Ces vallées possèdent un climat fortement aride, à la limite de l'hyperaridité (indice P/ETP autour de 0,03 à 0,04). Par contre, leur impluvium montagneux vaste, élevé, aux pentes fortes dans des roches imperméables et dépourvues de végétation, génère des crues allogènes résultant des pluies de type « mousson » en mars-avril et juillet-août.

Dès l'Antiquité sudarabique, ces crues ont été maîtrisées au moyen d'ingénieux ouvrages hydrauliques en pierres (déflecteurs, partiteurs, vannes...), permettant l'édification de périmètres d'irrigation limoneux et la mise en culture de portions de vallées où il n'existait aucun sol. Ainsi, au cours des siècles, se sont édifiées des terrasses anthropiques dont le sommet correspond aux derniers champs antiques (Coque-Delhuille B. et al., 1994). L'épaisseur de ces dépôts atteint jusqu'à 15m à Al-Hinwa dans le wâdî Dura'.



Périmètre d'irrigation antique d'Al-Hinwa (wâdî Dura'). Les limons d'irrigation ont ici une épaisseur de 15m
(photo Brigitte Coque-Delhuille).

Ces derniers ont été datés pour la première fois, par la méthode de luminescence optique OSL-IRSL, les plus anciens remontant à 3500 ans BP. Les âges obtenus à Al-Hinwa, situent le début de l'irrigation vers 3400 +/- 400 ans BP et la fin vers 1500 +/- 200ans BP (Balescu S. et al., 1998). Vers l'aval, les vestiges d'irrigation sont plus dégradés et recouverts de sable en bordure de l'erg Sabatayn'. Les datations obtenues à ce jour, montrent que l'irrigation s'est arrêtée plus tôt à l'aval et que les cultures ont dû être progressivement rétractées vers l'amont, en raison de crues de moins en moins puissantes vers le début de notre ère (« Common Era »). Une fluctuation du climat vers plus d'aridité accompagne donc la fin des royaumes sudarabiques.



Périmètre d'irrigation antique à l'amont du wâdî Dura'. Depuis l'abandon des champs antiques, vers 1555 +/-150 ans BP, les dépôts limoneux ont été érodés par les eaux de ruissellement et les sables des anciens canaux par érosion éolienne. Depuis, seuls des éboulis venus des versants dominants recouvrent partiellement les dépôts antiques (*photo Brigitte Coque-Delhuile*).

Actuellement, le climat reste fortement aride dans les vallées, identique à ce qu'il était au début de notre ère. Toutefois, l'agriculture n'y est plus dépendante des crues, les puits et les motos-pompes permettent de puiser l'eau dans la nappe phréatique. Cela assure de subvenir aux besoins d'une population de plus en plus nombreuse, surtout depuis que les travailleurs yéménites ont été chassés d'Arabie Saoudite lors de la 1^{ère} guerre du golfe (1990-1991). Mais cet accès à l'eau plus facile fait baisser rapidement le niveau de la nappe phréatique, de l'ordre d'un mètre par an. Il faut des puits de plus en plus profonds et nombre de yéménites très pauvres ne peuvent assumer les coûts importants que cela représente.

DANGERS NATURELS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les tempêtes en milieu littoral sont-elles plus nombreuses aujourd'hui ? Exemple de la Flandre maritime depuis le début de notre ère.

La Flandre maritime dans la région de Dunkerque est une plaine d'une grande platitude située entre +2 et -2m d'altitude. Une grande partie se situe sous le niveau de la mer.

Avec la remontée majeure de la mer (plus de 100m), suite à la déglaciation würmienne, la transgression flandrienne dépose une assise sableuse. Puis, la régression post-flandrienne, au cours de l'Empire Romain, permet le développement d'un niveau de tourbe d'eau douce. Une nouvelle transgression dite « dunkerquienne », débutant au II^{ème} siècle B.C. va déposer des argiles, argiles sableuses puis des sables lors de plusieurs épisodes, jusqu'au XI^{ème} siècle.

C'est alors que s'édifient les cordons de dunes récentes qui protégeront, en partie, le littoral. Parallèlement les premiers endiguements furent construits pour protéger la plaine.

A partir du XIII^{ème} siècle, un réseau de watergangs, petits canaux de drainage qui sillonnent la plaine, est réalisé. Les eaux aboutissent dans un canal exutoire et sont évacuées à marée basse par ouverture d'une écluse communiquant avec la mer et qui empêche les eaux marines d'envahir la plaine à marée haute. La plaine maritime est donc devenue *un polder*, grâce aux aménagements humains (Coque-Delhuille B., 1972).

Néanmoins, au Moyen-Age, de très fortes tempêtes engendrèrent de lourdes catastrophes humaines et matérielles (Gantois T., 2000). Ainsi, dans la nuit du 22 novembre 1334, une très puissante tempête emporte les digues et cause d'immenses dégâts en Flandre française et belge, en Hollande et en Frise. De nombreux villages disparaissent sous les flots et les sables. De même, en 1421, un cataclysme dévastateur (tempête de submersion) affecte les côtes de la Flandre française à la Hollande. 72 localités et près de 100.000 personnes furent englouties sous les flots. A Zuydcoote, après différentes tempêtes majeures au Moyen-Age, celle de la nuit de la Saint-Sylvestre 1776, fut très violente, provoquant le déplacement des dunes dont le sable couvre en partie le village; s'y ajoute une pluie torrentielle qui sape les maisons.

Ces tempêtes majeures et destructrices seraient-elles liées au climat plus chaud du Moyen-Age ? Les connaissances actuelles sont trop parcellaires pour le certifier. Cependant, la plus forte occurrence de ces tempêtes sévères plaide en faveur d'un réchauffement climatique au cours du Moyen-Age.

Aujourd'hui le littoral évolue localement sous la seule influence des processus d'érosion marine. Ailleurs, comme à Dunkerque avec les importantes extensions portuaires, l'érosion est considérablement affectée par les actions anthropiques. Ces constructions majeures modifient la dérive littorale, avec un engraissement à l'Ouest et un amaigrissement à l'Est. Pour en limiter les effets, ont été construits de nouvelles digues, des perrés, des épis...

L'ancienne DIREN Nord-Pas-de-Calais devenue DREAL a lancé un long travail d'investigation et de recherche pour la « *Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord - Pas-de-Calais* » (Kerambrun G., 2013). Grâce aux brise-lames installés entre 1978 et 1984, le trait de côte de la plage de Malo-les-Bains a été stabilisé. Ainsi, le transport sédimentaire a repris plus à l'est jusqu'à la frontière belge. Sur ce secteur possédant d'importants cordons dunaires, le trait de côte recule peu. Une zone est même en progradation. Seul un événement tempétueux puissant pourrait générer ponctuellement un recul du trait de côte allant jusqu'à 20m.

Ce littoral le long de la Mer du Nord est bien protégé par de solides édifices (digues, perrés...) et un cordon dunaire végétalisé par des oyats de 8 à 10m de hauteur. Si l'on regarde la réévaluation à la baisse de la montée eustatique du niveau marin pour le XXI^{ème} siècle (GIEC, 2007), elle ne serait que de 28 à 43cm. Il en suivrait, d'après les calculs du DREAL, un recul du trait de côte de l'ordre de 6 à 9m pour une échéance de 100 ans.

Toute annonce d'une région de Dunkerque totalement sous les eaux en 2100, ce qui a été publié récemment dans certains médias, ne relève donc que d'un scénario sans fondement, dans la droite ligne du catastrophisme ambiant.

Quant à la fréquence des tempêtes, Emmanuel Garnier (2012) qui a étudié ces dernières entre 1500 et 2000, montre qu'il y a eu un peu plus de phénomènes de force 10 et plus au XVIIIème siècle qu'au XXème siècle. De même pour les tempêtes de submersion, aussi bien pour les côtes atlantiques que celles de la mer du Nord, le XVIIIème siècle fut aussi le plus touché, devant largement le XXème puis le XIXème siècle.



Watergang dans la région des Moères près de Dunkerque (photo CAUE Nord).

Les Méga-Feux : milieux physiques spécifiques et actions anthropiques

Depuis quelques années, les méga-feux font régulièrement les gros titres de nombreux médias. De quoi s'agit-il ? Ce terme de méga-feu désigne des incendies de grande ampleur, hors-normes, affectant d'importantes zones de forêts et ayant aussi des conséquences majeures sur la faune, les populations, avec des victimes et des dégâts parfois incommensurables.

Ces méga-feux sont le plus souvent mis en relation unique avec le réchauffement climatique. Qu'en est-il en réalité ? On ne peut comprendre un tel phénomène que si l'on prend en compte tous les paramètres pouvant expliquer ces types de feux et les origines de leur déclenchement : étudier dans quels types de milieux physiques spécifiques ils se déclenchent (climat, topographie, biogéographie etc.) et quelles actions anthropiques entrent en jeu (Yang J. et al., 2014).

Nous prendrons 3 exemples récents: les incendies en Californie centrale (2017), le feu Marshall dans le Colorado en décembre 2021 et ceux qui ont affecté l'Est de l'Australie en 2019.

Le cas de la Californie

Mass et Owens (2019) ont montré que les feux d'octobre 2017 en ***Californie centrale***, à proximité du littoral, ne relèvent que pour une très faible part du réchauffement climatique général. Le climat des étés est suffisamment chaud et sec pour assécher la végétation, notamment herbacée. S'y ajoute, à l'automne des vents forts venus du littoral qui accentuent la sécheresse et permettent la propagation des feux. L'accroissement de leur fréquence est lié à plusieurs facteurs : herbacées très inflammables, arbres primaires détruits à près de 95% lors de la ruée vers l'or puis remplacés par des résineux plus sensibles au feu et surtout l'extension gigantesque des banlieues dans les milieux forestiers, dans certaines vallées et sur les versants. Les habitants et leurs biens sont donc de plus en plus dans des milieux où l'aléa incendie est élevé.

Une très grande majorité des déclenchements de feux est d'origine humaine, involontaire ou criminelle. Pourtant la fréquence des feux a diminué depuis 1400 ans (études citées par Mass et Owens (2019)). Mais, leur intensité et leur extension sont majeures. Les populations amérindiennes pratiquaient l'écobuage pour enrichir les sols et contrôler la destruction de la strate herbacée et détruire les branches mortes par le feu. Aujourd'hui, cette pratique est devenue obsolète et les sous-bois ne sont plus entretenus.

Les mêmes facteurs associés ont été responsables du *gigantesque feu de Paradise* (Californie, USA) en novembre 2018, entraînant le décès de 85 habitants et l'anéantissement de 19 000 maisons et bâtiments.



Photo d'un quartier de la ville de Paradise après le passage du feu. Les habitations sont rasées et l'on voit leur localisation au cœur d'une zone boisée (photo City News, AP Photo, Noah Berger, 2018).

Le feu Marshall dans le Colorado en décembre 2021

Ce méga-feu a touché la ville de Superior, située entre Denver et Boulder dans *le Colorado*, au pied des Rocheuses. Il a été déclenché par un feu de broussailles d'origine humaine et sous l'effet de vents très puissants de plus de 160 km/h, il s'est rapidement déplacé vers les zones peuplées. Deux personnes y ont trouvé la mort, 1000 maisons ont été détruites ainsi que des bâtiments commerciaux.

Un article publié en janvier 2022 par Cliff Mass : « *The Colorado Wildfire and Global Warning : Is there a Connection?* », démontre que l'on ne peut établir de lien entre cet événement et le réchauffement climatique :

- 1- Cet incendie est d'origine humaine et non déclenché par la foudre;
- 2- Il a été poussé par des vents très forts sur le flanc oriental de la chaîne des Rocheuses. Il s'agit de *foehn* ou *Chinook*, son nom local. Il accentue la sécheresse du versant oriental par ses vents descendants selon le principe de l'adiabatique sèche. En décembre 2021, ces vents ont atteint entre 161 et 185 km/h, ce qui est déjà considérable mais loin des records historiques de 230 km/h en 1972 et de 225 km/h en 1982;
- 3- Ce feu a été alimenté par des herbes très sèches des vastes prairies situées à l'Ouest de Superior. Le taux d'humidité relative n'était que de 23% le jour de la tempête rendant ces herbacées très inflammables;
- 4- L'énorme augmentation de la population depuis une cinquantaine d'années dans ce secteur a considérablement accru la possibilité de départs de feux accidentels.

Entre 1950 et 2020, n'a été observé aucune tendance à la hausse ou à la baisse des températures et l'indice de sécheresse ne montre pas non plus de tendance significative.

Ainsi, parmi les facteurs responsables de ce méga-feu, figurent l'expansion exponentielle d'un habitat dense, suite à l'augmentation conséquente de la population, sa localisation à proximité de prairies sèches de la fin de l'été au début de l'hiver, dans un environnement géomorphologique soumis à des vents de foehn violents qui descendent le long du flanc oriental du « *Colorado front range* ».

Les méga-feux dévastateurs dans l'Est de l'Australie en 2019

Ces méga-feux ont tué une trentaine de personnes, entre 500 millions et un milliard d'animaux ont péri dans les forêts et dans la brousse, au moins 1500 maisons ont été détruites et 10 millions d'hectares de brousse et de forêts ont été brûlés.

Ces feux ont affecté principalement le ***Sud-Est de l'Australie***, en Nouvelle-Galles du Sud, dans les zones les plus peuplées, du secteur oriental des Blue Mountains.

Comme le signale à juste titre Alexis Metzger (2021), « *Ainsi, en Australie, les grands incendies de forêts de 2019, qui ont détruit plus de 5 millions d'hectares de forêt, sont liés à un ensemble de facteurs* ».

En effet, ni le réchauffement climatique (augmentation des températures en Australie sur un siècle, de l'ordre de 1°C selon le Bureau Météorologique Australien), ni aucun autre facteur pris isolément ne saurait expliquer ce désastre.

Il faut prendre en compte les caractéristiques climatiques de l'Australie. Située à cheval sur le tropique du Capricorne, cette île-continent comporte essentiellement des zones arides et surtout semi-arides, aux températures très élevées. Le Nord-Est est tropical humide vers Cairns et Darwin, le centre Est et le Sud-Est ont des climats subtropicaux à méditerranéens dans les parties méridionales. On est donc dans un contexte de climats chauds à tempérés chauds avec d'importantes périodes de sécheresse, à l'exclusion de l'extrême Nord.

Ces méga-feux australiens se déclenchent donc sous l'effet de plusieurs facteurs :



Méga-feux dans l'Est de l'Australie vus de satellite, avec d'énormes panaches de fumée sur les littoraux et l'océan Pacifique. Cette image montre aussi nettement la multitude de départs de feux dans la forêt ou des endroits défrichés (*photo Google Earth*)

- 1- Les conditions climatiques évoquées favorables aux feux de brousse ou « *bush* ». Ceux-ci sont annuels et furent pendant très longtemps déclenchés et contrôlés par les populations aborigènes qui pratiquaient l'écobuage. Aujourd'hui, les espaces naturels sont protégés et ces pratiques ont cessé. Aussi, le bush brûle par endroits chaque année, sans contrôle et le feu se propage aux *forêts d'eucalyptus*, plante *pyrophyte* dont l'essence est particulièrement inflammable. Si ajoute l'absence d'entretien de ces forêts et notamment du sous-bois.
- 2- Les vagues de chaleur et de sécheresse accrues sont récurrentes en Australie. Répertoirees depuis 1851, celle de 1896 fut aussi très intense. Au XXème siècle, on peut citer celle de 1939 dans le Sud-Est, de 1960 avec un record de température de 50.7°C à Oodnadatta, hameau situé dans le Nord de l'Australie méridionale, vers 27°N.
- 3- L'importante augmentation de la population dans la partie orientale de l'Australie où se localisent les grandes villes. Leurs banlieues, notamment celle de Sydney, se développent jusqu'au pied des Blue Mountains dont le nom vient de la couleur de l'espèce d'arbres dominante, l'eucalyptus, très inflammable. La population du pays a quintuplé en un siècle, avec un pourcentage encore plus élevé dans ces régions orientales. Les départs de feu s'y multiplient par l'action humaine, involontaire ou criminelle.
La photo ci-dessus de Google Earth, montre clairement que les départs de feux sont multiples, dans des zones défrichées ou dans la forêt elle-même.

Ainsi, on voit bien que ces méga-feux résultent de facteurs multiples qui convergent pour les rendre beaucoup plus dangereux qu'auparavant, en termes de vies humaines, de biens détruits par les flammes, et d'une biodiversité également très affectée.

Un degré supplémentaire en un siècle ne saurait rendre responsable de ces méga-feux la phase de réchauffement climatique actuelle.

Au total, si l'Homme a une responsabilité majeure dans les catastrophes « naturelles » actuelles, le réchauffement climatique n'y joue qu'un rôle secondaire.

Quels sont donc les paramètres qui modifient le climat ?

LES FACTEURS DE LA PHASE DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ACTUELLE

Les facteurs naturels récurrents des variations climatiques

Les variations climatiques ont toujours caractérisé la Terre, quel que soit le pas de temps considéré, à long terme, à l'échelle du Quaternaire, à l'échelle historique et même dans la phase de réchauffement actuelle. Dans l'histoire de notre planète, l'Homme est apparu très récemment et pourtant des variations climatiques se sont toujours produites, en dehors donc de son influence potentielle.

Des paramètres naturels, fondamentaux et récurrents, sont principalement responsables de ces changements dont les facteurs astronomiques et solaires.

Les paramètres astronomiques et les cycles de Milankovitch

Trois paramètres astronomiques, les paramètres de Milutin Milankovitch (1941), définissent des cycles climatiques à différentes échelles de temps.

L'excentricité terrestre.

L'orbite terrestre forme une ellipse qui s'excentre d'environ 18 millions de km avec une périodicité de 100.000 ans (M. Tabeaud, 2014). Cette caractéristique entraîne des variations climatiques majeures, telles les grandes glaciations du Quaternaire.

L'obliquité terrestre

L'obliquité de la Terre correspond à l'inclinaison de l'axe des pôles avec la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Si elle forme actuellement un angle de $23^{\circ}27'$, celui-ci peut varier entre $22,1^{\circ}$ et $24,5^{\circ}$. La « Constante solaire » subit donc des variations et ses effets sont les plus importants aux pôles (nuits plus ou moins longues, selon cette fourchette d'inclinaison, avec un bilan thermique qui y fluctue plus qu'à d'autres latitudes).

La précession des équinoxes

La Terre tourne sur son axe de rotation, non comme un ballon, mais comme une toupie (Société d'Astronomie de Rennes). Cet axe décrit un cône autour de la perpendiculaire au plan de l'écliptique « selon un cycle principal d'environ 23 000 ans et un autre de 19 000 ans » (M. Tabeaud, 2014). Cette précession résulte du fait que les attractions du Soleil et de la lune ne sont pas uniformes sur Terre. Ce mouvement entraîne une précession des équinoxes et une dérive des saisons au cours du temps.

Au total, ***ces paramètres astronomiques se combinent pour créer des mouvements complexes de la Terre et des changements de son climat sur des périodes de temps variables***, le cycle de 100 000 ans correspondant à celui des glaciations du Quaternaire. Mais d'autres s'y emboîtent de 40 000 ans et 20 000 ans environ, et même des fluctuations de période très courte de 18,6 ans. Ces dernières résultent du phénomène de *nutaton* lié à la perturbation de la précession, par l'attraction de la Lune et du Soleil.

Les variations de l'activité solaire

Taches solaires et éruptions solaires

L'activité solaire n'est pas constante mais variable, en fonction du nombre de taches présentes sur le Soleil. Celles-ci correspondent à des régions plus sombres et moins chaudes du Soleil (4200 K au lieu de 5800 K). Il s'y produit des explosions gigantesques dites *éruptions solaires*. Le flux d'énergie rayonné par le Soleil, ou *irradiance*, varie donc. Il s'ensuit que la « *constante solaire* » varie un peu, même si c'est faiblement (0,1%), (Delague Gilles, 2021). En période de forte activité solaire, la couche d'ozone s'agrandit et la chaleur, davantage conservée dans l'atmosphère, entraîne une augmentation des températures. L'inverse se produit en période de faible activité du soleil, avec une baisse des températures terrestres (Bard E. 2011 ; Zharkova V., 2020).

Cycles solaires et leur influence sur les changements climatiques

L'activité des taches solaires varie selon un cycle de 11 ans, mais aussi selon un cycle plus long de 200-300 ans (Tabeaud Martine, 2014). Ces cycles correspondent aux phases historiques majeures de réchauffement (Moyen-Age) ou de refroidissement (Petit Age de Glace). Ce dernier voit alors une forte diminution du nombre de taches solaires, notamment de 1790 à 1830.

Ainsi, les facteurs naturels externes jouent un rôle sur le climat de la Terre pris dans sa globalité, mais aussi sur les climats de la Terre formant une mosaïque aux éléments multiples (Connolly et al., 2021).

Il faut aussi, pour ces derniers, prendre en compte le rôle essentiel de la latitude, de l'altitude, de la répartition des continents/océans, de la circulation thermohaline et du volcanisme, entre autres.

Part des facteurs anthropiques dans la phase de réchauffement climatique actuelle et le rôle du CO₂

L'effet de serre

Définition

Le terme d'*effet de serre* atmosphérique vient de la comparaison avec la serre de l'horticulteur. Dans les deux cas, il s'agit d'un phénomène de piégeage du rayonnement infrarouge. Les parois de verre des serres de jardiniers, comme les atmosphères planétaires, ont la propriété de laisser passer le rayonnement solaire visible et de bloquer partiellement le rayonnement infrarouge émis par les objets à température ambiante situés à l'intérieur de la serre. Toutefois, en ce qui concerne la Terre, ce serait une serre ouverte vers le haut et la comparaison n'est donc qu'une approximation.

L'effet de serre est d'abord un *phénomène naturel* qui protège la Terre de températures excessives. Sans son influence, la température moyenne de la surface terrestre serait voisine de -18°C , ce qui rendrait toute vie impossible. Avec l'effet de serre, la température de la basse atmosphère se maintient autour de $+15^{\circ}\text{C}$ en moyenne, soit 33 degrés de plus, rendant ainsi toute forme de vie possible sur Terre. Ainsi s'affirme le **bienfait de l'effet de serre naturel sur la Terre**.

Les gaz qui interviennent dans l'effet de serre sont *très minoritaires dans l'atmosphère*, généralement moins de 1% du total, à l'exception de la vapeur d'eau, le GES le plus représenté dont le pourcentage a une valeur moyenne autour de 1% (à 15°C et au niveau de la mer). Le CO₂, tant incriminé, n'a une concentration dans l'atmosphère que de 0,04%. Le NO₂, protoxyde d'azote, 0,00005%, le CH₄, méthane, 0,0365%, l'ozone O₃, gaz très rare (environ 0,000001%) et les chlorofluorocarbures (aérosols, gaz réfrigérants) : 0,0002041%.

Le rôle de ces gaz à effet de serre est aussi fonction de leur *capacité d'absorption des radiations infrarouges* émises par la Terre. Ainsi, leur pouvoir de réchauffement global (PRG) s'établit comme suit pour les principaux GES. Si l'on exprime en équivalent CO₂ en donnant à celui-ci la valeur de 1, on obtient 8 pour la vapeur d'eau H₂O, 23 pour le méthane CH₄, de 120 à 12000 pour les chlorofluorocarbures (HFC). Le CO₂ est donc loin d'avoir le PRG le plus élevé et ne représente que 0,04% en volume.

La part anthropique de ces GES génère **un effet de serre additionnel** dont le rôle sur la phase de réchauffement climatique est à discuter.

Actions anthropiques et effet de serre additionnel

De quelles actions humaines proviennent ces gaz à effet de serre additionnel?

La vapeur d'eau (H₂O) est de loin le principal gaz à effet de serre. Mais, il est essentiellement d'origine naturelle (évaporation des océans, des lacs) et très secondairement d'origine anthropique (irrigation, retenues d'eau), aussi ce gaz majeur dans l'effet de serre est-il très peu évoqué par le GIEC.

Le dioxyde de carbone (CO₂) provient de la biomasse végétale et de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). A l'inverse, les plantes absorbent du carbone par photosynthèse et le CO₂ étant soluble dans l'eau, les océans en absorbent en très grande quantité. Depuis le début de l'ère industrielle, la part du carbone a certes augmenté mais la part anthropique ne serait que de 0,4ppm sur un CO₂ total de 390ppm. Les calculs de F. Gervais (2013) inspirés de spécialistes de l'atmosphère donnent une augmentation de température de $0,0005^{\circ}\text{C}$ par an soit $0,05^{\circ}\text{C}$ par siècle, sous l'effet anthropique. La situation n'est donc pas alarmiste.

Le méthane (CH₄) d'origine anthropique provient de la fermentation anaérobie par le bétail et l'agriculture (ruminants et riziculture) mais aussi de la combustion des énergies fossiles, d'incendies de la biomasse (feux de forêt pour la déforestation, comme en Amazonie) et de

l'activité microbienne dans les décharges. Le PRG du méthane est assez élevé, mais son pourcentage dans l'atmosphère n'est que de 0,0365%.

Le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone (O₃) et les CFCs (chlorofluorocarbures) n'ont, quant à eux, qu'un rôle extrêmement limité dans le réchauffement d'origine anthropique.

Ainsi, il apparaît que le CO₂ anthropique n'a, somme toute, qu'un impact secondaire dans l'effet de serre.

Le GIEC

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ou GIEC (IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change), a été créé en 1988, conjointement par l'OMM Organisation météorologique mondiale et le Pnue (Programme des Nations unies pour l'environnement). L'objectif était de recueillir les informations sur le changement climatique en cours provenant d'articles scientifiques et d'en publier un bilan. Mais ceci devait aboutir à un « *consensus* » de l'ensemble des pays participants, difficile à établir et qui ne saurait répondre à la diversité scientifique des approches des fluctuations climatiques (rapports de synthèse, 2014 et 2021).

Les quatre idées principales de cet organisme onusien sont les suivantes :

- il y a un réchauffement climatique important et dangereux pour la planète
- il résulte de l'effet de serre
- le CO₂ en est le facteur déterminant
- ce GES résulte des activités humaines depuis le début de l'ère industrielle.

Tout scientifique qui n'adhère pas à ces affirmations est considéré comme « *climato-sceptique* ».

La position du GIEC ne prend pas en compte, par exemple, la complexité des phénomènes impliqués dans les évolutions climatiques, avec pour conséquence des décisions prises pour les contrecarrer mais dont on peut douter des effets sur le climat.

Un scientifique se doit de douter des causes uniques et de rechercher l'ensemble des paramètres responsables du réchauffement actuel, qui n'a rien d'alarmiste mais se situe dans une phase normale de hausse des températures qui suit la période froide du Petit Age Glaciaire (PAG). Cette élévation des températures n'est d'ailleurs pas aussi excessive qu'on nous le laisse entendre (jusqu'à +6°C à la fin de ce siècle).

En fait, des variations de températures de 10, 20 ou 30 ans s'observent et ces dernières n'augmenteraient plus depuis 1998 ou très peu, comme le confirment de célèbres instituts spécialisés, GISS (Goddard Institute for Space Studies de la NASA), UAH (University of Alabama at Huntsville), HadCRUT (Hadley Center, britannique), RSS (Remote Sensing System de la NASA), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), déjà cités en 2013 par François Gervais, les cycles solaires actuels montrant de moins en moins de taches (cycles 21,22,23,24 et le cycle 25 en cours). Ceci laisse présager un retour du froid, peut-être aussi intense que lors du PAG dans quelques dizaines d'années, avec une descente progressive des températures. Nombreux sont les scientifiques qui montrent que le *réchauffement climatique actuel*, postérieur au PAG, *est fondamentalement naturel* (facteurs orbitaux et solaires) et non provoqué par le CO₂ produit par les actions anthropiques ou de manière extrêmement minoritaire.

De leur côté, Kauppinen et Malmi (2019) montrent que le GIEC ne prend pas en cause le rôle des nuages et que depuis une centaine d'années la température n'a augmenté que de 0,1°C à cause du CO₂ global soit seulement de 0,01°C du fait du CO₂ d'origine anthropique. *Ce sont les nuages bas qui contrôlent principalement la température.*

Démonstration par des scientifiques du rôle mineur du CO2 anthropique

Le livre remarquable de François Gervais (2013) montre clairement que *le CO2 n'est pas responsable du réchauffement climatique ou pour une part infime*. Il l'estime à un échauffement de 0,0005°C par an, soit 0,05°C par siècle (p. 142-143). De son côté, Jean-Marc Bonnamy (2018), par une très belle démonstration scientifique, apporte la preuve que le CO2 est « innocent », selon son expression. En effet, le phénomène de *saturation du CO2 dans l'atmosphère*, clairement démontré, confirme que le réchauffement actuel « *ne peut être attribué au gaz carbonique* ».

Vahrenholt F. (2012), scientifique allemand, militant écologiste, membre du SPD avec des fonctions écologistes et entrepreneur dans les énergies renouvelables, fut aussi membre du GIEC dont il fut le relecteur du rapport AR 3 en 2007, mais le quitta suite aux erreurs factuelles et aux conclusions biaisées qu'il y trouva. De cette expérience, il a écrit un livre « *Die Kalte Sonne* », 2012, *le soleil froid*, disponible uniquement en allemand. Il y remet en cause la thèse du réchauffement climatique par le CO2 d'origine humaine. Il conclut que « *La manière dont le carbone a été instrumentalisé dans le cadre des études sur le climat est un véritable scandale scientifique et humain* ». Il en découle des dépenses de milliards de dollars pour arriver, peut-être, à une énergie totalement décarbonée, ce qui ne changera rien au réchauffement climatique.

Et surtout, nous savons, à présent, que ***l'élévation de la quantité de CO2 dans l'atmosphère suit tout réchauffement climatique et non l'inverse***. Cette donnée est essentielle.

Les courbes des variations climatiques et de la concentration en CO2 de l'atmosphère pour les 400 000 dernières années, obtenues à partir de l'analyse des bulles d'air contenues dans les glaces de l'Antarctique, montrent une apparente coïncidence entre leurs élévations lors des phases interglaciaires. Mais, à l'échelle du graphique, la réalité n'apparaît pas. En fait, à un pas de temps plus réduit, a été démontré un décalage de 1000 ans, l'augmentation du CO2 suivant systématiquement celle de la température (Harde H. et al. 2019, Deheuvels P., 2020). Quand les océans se réchauffent, le CO2 contenu se dégage davantage par procédé de dégazage.

Tous ces aspects, mis en évidence par des scientifiques, témoignent qu'*il n'y a aucune urgence climatique*. Rappelons que le CO2 est nécessaire pour la planète et notamment pour la biosphère, grâce à la photosynthèse (Gervais F., 2018 et 2020, Gerondeau C., 2019).

Les modèles mathématiques et les climats futurs

Les nombreux modèles mathématiques, qui tentent de déterminer les climats futurs, aboutissent à des propositions aussi diverses qu'aberrantes, pouvant aller de 1,5 à 6°C d'augmentation des températures en 2100. Il faut avoir à l'esprit qu'il n'y a que 10°C d'écart, aux latitudes moyennes, entre une phase glaciaire et une phase interglaciaire.

Les divergences sont énormes d'un modèle à l'autre. En effet, ceux-ci ne prennent en compte qu'un nombre limité de paramètres faisant évoluer les climats. En fait, les facteurs de l'évolution climatique sont extrêmement nombreux, comme nous l'avons vu, et difficilement intégrables dans une équation ou un algorithme. Il y a donc une inévitable simplification de la réalité et l'on ne peut préjuger d'une élévation continue sur un siècle ou plus, en n'utilisant que des données sur quelques dizaines d'années. Les variations sur des pas de temps de 10 et de 100-200 ans ne sont pas prises en compte. Ces projections sont donc par nature très peu fiables.

Les modèles numériques de simulation pour le futur sont donc loin d'être à même de fournir des informations crédibles. Il faudra pouvoir intégrer beaucoup plus de paramètres du très complexe système climatique quand on comprendra beaucoup mieux son fonctionnement global.

BILAN ET PERSPECTIVES

-Aucun paramètre unique ne saurait expliquer le changement climatique actuel

et encore moins le CO₂ d'origine anthropique comme l'ont démontré des scientifiques de spécialités différentes. C'est une idée simple et qui culpabilise l'Homme.

Penser que ce dernier aurait de tels pouvoirs sur notre Terre soumise à un nombre énorme d'interactions au sein du système solaire est sans fondements.

-Des études pluridisciplinaires sont nécessaires pour pouvoir comprendre le fonctionnement du système Terre : il faut redonner toute sa place à la SCIENCE.

-Il n'y a pas un climat général mais des climats sur Terre, qui s'emboîtent à des échelles spatiales différentes : grands milieux bioclimatiques, climats régionaux, climats locaux, microclimats.

-Importance des échelles de temps considérées

On ne peut évoquer la phase de réchauffement climatique actuelle sans connaître celles de l'époque historique (optimum romain, optimum médiéval), à un moment où l'homme n'avait aucun rôle dans une quelconque production de CO₂.

-Réchauffement climatique et pollution sont à dissocier.

La pollution, contrairement aux climats, est bien entièrement le fait des Hommes. Il y a là une lutte intense à développer contre la pollution des villes, des campagnes, des déchets plastiques dans les océans etc.

-La vision globale du géographe physicien apporte donc une connaissance concrète et comparée des changements climatiques, dans une perspective spatio-temporelle, basée sur celle du terrain, des formations superficielles informant sur les systèmes d'érosion et leurs changements et de datations par des méthodes de plus en plus nombreuses (14C, ISL/ORSL, dendrochronologie, lichénométrie, palynologie, biologie végétale, isotopes cosmogéniques). Elle permet aussi de déterminer le facteur anthropique dans le développement de catastrophes naturelles, en fonction des sites d'occupation (lits majeurs, couloirs d'avalanches), des déforestations irresponsables dans les milieux tropicaux humides, là où les sols sont minces, abandon de terrasses de cultures en milieu méditerranéen exacerbant l'érosion hydrique, comportements à risques responsables de feux de forêts dont les sous-bois sont mal gérés, amplifiés par la présence d'espèces facilement inflammables (ex. eucalyptus en Australie).

La connaissance du passé qui manque aux alarmistes de l'évolution climatique, permet aux géographes physiciens d'envisager la question du réchauffement climatique actuel avec réalisme et dans toute la complexité du système Terre. Nous ne sommes pas non plus des climato-sceptiques car le réchauffement climatique postérieur au Petit Age de Glace est un fait, mais nous sommes des climato-réalistes, la part de l'Homme dans ce réchauffement étant très faible. La Science permettra progressivement de mieux comprendre ces phénomènes multifactoriels et l'Homme continuera de s'adapter aux variations des climats comme il l'a toujours fait. Le climat actuel n'est pas « dérégulé », il a toujours été fluctuant et le sera toujours.

Alors, n'ayons pas peur du climat de demain.

BIBLIOGRAPHIE

- AUJAC Germaine, 1966, Strabon et la science de son temps. Ed. Les Belles Lettres, Paris, 326p.
- BADER Stéphane et KUNZ Pierre, 1998, Climat et risques naturels – La Suisse en mouvement, Ed. Georg, Genève et ETH Zürich, 312p.
- BALESCU Sanda, BRETON Jean-François, COQUE-DELHUILLE Brigitte, LAMOTHE Michel, 1998, La datation par luminescence des limons de crue: une nouvelle approche de l'étude chronologique des périmètres d'irrigation antiques du Sud-Yémen, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, Volume 327, Issue 1*, July 1998, p.31-37.
- BARD E., « Influence du soleil sur le climat », La lettre du Collège de France [en ligne], 31 juin 2011, mis en ligne le 25 novembre 2011, URL : <http://journals.openedition.org/lettre-cdf/1210>.
- BARO Aurélien, 2014, Les Cycles de Milankovitch – La Théorie astronomique du climat, site internet Aurélien Baro, 15p.
- BIELER P. L., 1978, Le paléoclimat de la région de Nendaz: nouvelles interprétations au sujet du réchauffement post-würmien. *Bulletin de la Murithienne*, (95), p. 9-20.
- BINTZ, P., BOCQUET, A., BOREL, J. L., & OLIVE, P., 1989. Tableau diachronique de l'Holocène et du Tardiglaciaire dans les Alpes du Nord et leur piémont Préhistoire et paléoenvironnement. *Bulletin de la Société préhistorique française*, p. 51-60.
- BONNAMY Jean-Marc, 2018, Réchauffement climatique. Le pavé dans la mare ! Le CO2 innocent : la preuve. L'Harmattan, Paris, 157p.
- BOURRIT M.T., 1773. « *DESCRIPTION DES GLACIERES, GLACIERS ET AMAS DE GLACE DU DUCHE DE SAVOIE* ». Réimpression éd. Slatkin, Genève, 1977.
- BROCHIER, J. L., BOREL, J. L., & DRUART, J. C., 2007. Les variations paléoenvironnementales de 1000 avant à 1000 après JC et la question des «optima» climatiques de l'Antiquité tardive et du Moyen Age sur le piémont des Alpes du nord à Colletière, lac de Paladru, France. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 18(3), p. 253-270.
- BÜNTGEN U., FRANK D. C., NIEVERGELT D., & ESPER J., 2006. Summer temperature variations in the European Alps, AD 755–2004. *Journal of Climate*, 19 (21), p. 5606-5623.
- BUSSARD J., SALIM E., WELLING J., 2021. Visiter les glaciers, une forme de géotourisme ? Le cas du Montanvers (Mer de Glace, France) et de Jökulsárlón (Breidamerkurjökull, Islande), *Géoregards* n°14, 2021, p. 139-155.
- CONNOLLY R. et al. 2021, How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends ? An ongoing debate, *Res. Astron. Astrophys.* 21, 131.
- COQUE-DELHUILLE Brigitte et al., 1994, « Erosion historique et actuelle et environnement humain dans le Sud du désert arabe (Yémen du Sud) », de *Colloque ORSTOM sur "L'environnement humain de l'érosion"*, Paris-Bondy, Septembre 1994.
- COQUE-DELHUILLE Brigitte, 1972, Recherches sur les formations quaternaires et le modelé de la Flandre maritime dunkerquoise, Cahiers de Géographie Physique, Institut de Géographie, Université des Sciences et Techniques, Lille, p.45-63.
- CORBEL J. 1963, Glaciers et climats dans le massif du Mont-Blanc. *Revue de géographie alpine*, 51(2), 321-360.
- COUTTERAND S., 2017a. Les optima climatiques des temps post-glaciaires : des forêts sous les glaciers. Consulté sur le site internet Glaciers-climats de l'Université Savoie-Mont-Blanc, Laboratoire EDYTEM <https://www.glaciers-climat.com/wp-content/uploads/Apera%CC%81u-3-Post-glaciaire.pdf>, le 23.03.2022.
- COUTTERAND S., 2017b. *Les glaciers des Alpes*. Vandelle.
- CRAWLEY TJ, 2000, Causes of climate change over the past 1000years, *Science*, 289 : 270-277.
- DEHEUVELS P., 2020, Le réchauffement climatique – Mythes et réalité, https://static.climato-realistes.fr/2020/02/Deheuvels_Climat-.pdf, 14 p.

DELAYGUE Gilles (2021), Variabilité de l'activité solaire et impacts climatiques : le cas des derniers siècles, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/variabilite-de-activite-solaire-impacts-climatiques/>.

FOUCART S., 2015. « Hoax climatique # 5 : en l'An mil il faisait bien plus chaud qu'aujourd'hui » *Le Monde*, 4 novembre 2015. https://www.lemonde.fr/cop21/article/2015/11/05/hoax-climatique-5-en-l-an-mil-il-faisait-bien-plus-chaud-qu-aujourd-hui_4804173_4527432.html consulté le 25.03.2022

FRANCOU B., VINCENT C., 2007. « *LES GLACIERS A L'EPREUVE DU CLIMAT* », IRD-Belin.

FUNK-SALAMI F., WUILLOUD C., 2013, « *ADIEU GLACIERS SUBLIMES* ». Iterama.

GAMS H., 1949, Variations des limites de la végétation alpine et variations des glaciers. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie, Société nationale de protection de la nature* p.178-193.

GANTOIS Th., 2000, Victimes des éléments naturels, les villages disparus..., in *Généalogie et Histoire du Dunkerquois / G.H.Dk.*, 10 p.

GARNIER Emmanuel, 2012, Histoire des Tempêtes, in : Risques, les Cahiers de l'assureur, n° 91, 8p.

GERONDEAU Christian, 2019, Le CO2 est bon pour la planète. Climat, la grande manipulation, Ed. de l'Artilleur / Toucan, Paris, 299 p.

GERVAIS François, 2013, *L'Innocence du Carbone. L'effet de serre remis en question. Contre les idées reçues*. Ed. Albin Michel, 315p.

GERVAIS François, 2018, *L'urgence climatique est un leurre. Prévenir un gâchis économique gigantesque*. Ed. de l'Artilleur – Toucan, Paris, 302 p.

GERVAIS François, 2020, *MERCI AU CO2. Impact climatique et conséquences : quelques points de repères*. Ed. de l'Artilleur – Toucan, Paris, 120 p.

GIEC, 2014: Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

GIEC, 2021 : 5 conclusions à retenir ; premier volume du sixième rapport d'évaluation du climat.

GODEFRIDI Drieu, 2010, *Le GIEC est mort. Vive la Science*, Ed. Texquix, Lonrai, 119 p.

HAFNER, A., 2012. Archaeological discoveries on Schnidejoch and at other ice sites in the European Alps. *Arctic*, p. 189-202.

HARDE Hermann, 2019, What Humans Contribute to Atmospheric CO₂: Comparison of Carbon Cycle Models with Observations, *Earth Sciences*. Vol. 8, No. 3, 2019, pp. 139-159. doi: 10.11648/j.earth.20190803.13

HOLZHAUSER H., 2007. Holocene glacier fluctuations in the Swiss Alps. In *Environnements et cultures*.
HOLZHAUSER H., MAGNY M., & ZUMBUHL, H. J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15(6), p.789-801.

HOLZHAUSER H., ZUMBUHL H.J., 1999, Glacier Fluctuations in the Western Swiss and French Alps in the 16th Century. *Climatic Change*, 43, 223–237.

HORMES A., MÜLLER B. U., & SCHLÜCHTER C., 2001. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene*, 11(3), p. 255-265.
https://hal.archives-ouvertes.fr/search/index/q/*/authIdHal_s/cecile-miramont

INNES, J. L. (1985). Lichenometry. *Progress in physical geography*, 9(2), p.187-254.

IVY-OCHS, S., KERSCHNER, H., MAISCH, M., CHRISTL, M., KUBIK, P. W., & SCHLÜCHTER, C., 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Reviews*, 28(21-22), p. 2137-2149.

JOERIN, U. E., NICOLUSSI K., FISCHER A., STOCKER T. F., & SCHLÜCHTER, C., 2008, Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierva Glacier, Eastern Swiss Alps. *Quaternary Science Reviews*, 27(3-4), p.337-350.

KARLÉN, W., 1973. Holocene glacier and climatic variations, Kebnekaise mountains, Swedish Lapland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 55(1), p. 29-63.

- KAUPPINEN J. et MALMI P., 2019, No experimental evidence for the significant anthropogenic climate change, *General Physics.gen-ph*, 6p., Cornell university, Ithaca (New York).
- KERAMBRUN Guillaume, 2013, Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais, *DREAL DHI*, 42p.
- LADURIE M. L. R., & LADURIE E. L. R., DEUBRIAS G., 1975, La forêt de Grindelwald: nouvelles datations. In *Annales. Histoire, Sciences Sociales* Vol. 30, No. 1, p. 137-147. Cambridge University Press.
- LAMB, H. H., 1965. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeography., Palaeoclimatology., Palaeoecology.*, 1: 13-37., 1972: Atmospheric circulation and climate in the Arctic since the last ice age. *Climate Changes in Arctic Areas During the Last Ten Thousand Years, Acta Univ. Ouluensis, Ser. A, (3)*, p.455-495.
- LE ROY LADURIE Emmanuel, *Histoire humaine et comparée du climat. Canicules et glaciers, XIIIe-XVIIIe, vol.1, 2004, Disettes et révolutions, 1740-1860, vol.2, 2006, Le réchauffement de 1860 à nos jours*, avec le concours de Guillaume Séchet, 2009. Ed.Fayard, Paris.
- LEAMON Robert., McINTOCH Scott, MARSH Daniel, 2021, Termination of Solar Cycles and Correlated Tropospheric Variability. *Earth and Space Science*.
- LEROY M., 2012. *Reconstitution des fluctuations glaciaires holocènes dans les Alpes occidentales. Apports de la dendrochronologie et de la datation par isotopes cosmogéniques produits in situ*. Thèse de Géographie, Université de Grenoble.
- LEROY M., ASTRADÉ L., ÉDOUARD J.L., MIRAMONT C., & DELINE P., 2009. La dendroglaciologie ou l'apport de l'étude des cernes d'arbres pour la reconstitution des fluctuations glacières holocènes, *Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie n°8*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00399860>.
- LEROY-LADURIE E., 1967. « *HISTOIRE DU CLIMAT DEPUIS L'AN MIL* », Flammarion.
- MAGNY M., MILLET L., ARNAUD F., DESMET M., GAUTHIER E., HEIRI O. & VERNEAUX V., 2008, Variations du climat au cours des deux derniers millénaires: deux cas d'étude dans le Jura et les Alpes du Nord. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 6(1), p. 51-64.
- MASS C. et OWENS D., 2019, The northern California wildfires of October 8-9, 2017: the role of a major downslope windstorm event. *Bull. Amer. Met Soc.*, 100, 235-256
- MASS Cliff, 2022, The Colorado Wildfire and the Global Warning : Is there a Connection ?, 2022, *Association des climato-réalistes. Climat, Energie et Environnement*, p1-9.
- MATTHEWS J.A., 2005, Little Ice Age glacier variations in Jotunheimen, southern Norway : a study in regionally controlled lichenometric dating of recessional moraines with implications for climate and lichen growth rates. *The Holocene* 15, 1, p. 1-19.
- MATTHEWS, J. A., 1973. Lichen growth on an active medial moraine, Jotunheimen, Norway. *Journal of Glaciology*, 12(65), p. 305-313.
- METZGER Alexis, 2021, *Catastrophes climatiques. 21 idées reçues pour comprendre et agir*. Ed. Le Cavalier Bleu, Paris, 183 p.
- NICOLUSSI K., 2009. Alpine Dendrochronologie – Untersuchungen zur Kenntnis der holozänen Umwelt- und Klimaentwicklung. In Schmidt R., Matulla C., Psenner R. (Eds), *Klimawandel in Österreich* (Innsbruck University Press) *Alpine Space – man & environment*, 6, p.41-54.
- NICOLUSSI K., 2009. Klimaentwicklung in den Alpen während der letzten 7000 Jahre. *Impulsreferate*. p. 109-124.
- NICOLUSSI K., PATZELT G., 2000. Discovery of early Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria. *The Holocene*, 10(2), p. 191-199.
- NICOLUSSI, K., KAUFMANN M., PATZELT, G., THURNER A., 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Vegetation History and Archaeobotany*, 14(3), p. 221-234.
- NUSSBAUMER S., 2012. *Mer de Glace art et science*, Esope.
- PETIT-MAIRE Nicole, 2012, « Sahara – Les grands changements climatiques naturels », Ed. Errance, 192p.

POLGE, H., 1966, Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants: applications dans les domaines Technologique et Physiologique. In *Annales des sciences forestières*, Vol. 23, No. 1, p. I-206, EDP Sciences.

PREAT Alain, 2019, L'Optimum Climatique Médiéval : Ce Grand Oublié, <http://www.science-climat-energie.be>

RAVAZZI C. ET ACETI A., 2004. The timberline and treeline ecocline altitude during the Holocene Climatic Optimum in the Italian Alps and the Apennines. In Antonioli F., Vai G.B. (Eds.), *Litho-paleoenvironmental maps of Italy during the last two climatic extremes*. Explanatory notes. 32e International Geological Congress, Firenze 2004.

RÖTHLISBERGER F., 1976. Gletscher-und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla. *Die Alpen*, vol. 52, no 3-4, p. 59-152.

ROUGIER Henri, « *A LA DECOUVERTE DES WALSER EN SUISSE. 30 lieux à visiter dans les Grisons, en Valais et au Tessin* », Ed. LEP, Le Mont sur Lausanne (à paraître).

ROUGIER Henri, 2002, « *AU PAYS DE ZERMATT. La vallée, le massif, les hommes, l'aménagement du territoire* », Ed. LEP, Le Mont sur Lausanne, 208 p.

ROUGIER Henri, 2013, « *LA SUISSE ET SES PAYSAGES. UNE MOSAÏQUE GEOGRAPHIQUE* », Ed. LEP, Le Mont sur Lausanne, 328p.

ROUGIER Henri, 2020, Du Mont-Blanc à la Mer de Glace, *La Géographie*, n° 1578, p. 26-31.

RUDDIMAN W., 2003. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change* 61, p. 261-293.

SCHLÜCHTER C., KELLY M. A., BUONCRISTIANI J. F., 2004, A reconstruction of the last glacial maximum (LGM) ice-surface geometry in the western Swiss Alps and contiguous Alpine regions in Italy and France. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 97(1), p.57-75.

TABEAUD Martine, 26/11/2014, Les variations climatiques de la Terre, in www.notre-planete.info.

TALON B., 2010, Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal. *The Holocene* 20, 1, p. 35-44.

V. DAUX, 2013, Reconstruction du climat à partir de la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des cernes d'arbres. *La Météorologie, Météo et Climat*, 8 (80), p.14.

VAHRENHOLT F., 2012, *The Kalte Sonne*, Merian ed., 444 p.

VIVIAN R., 2005. *Les glaciers du Mont-Blanc*, La Fontaine de Siloé.

VIVIAN R., 1975, *Les glaciers des Alpes occidentales, étude géographique*. Thèse d'Etat de l'université de Grenoble.

VIVIAN R., 1976, Glaciers alpins et chronologie holocène. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 53(433), 105-118.

YANG, J., H. TIAN, B. TAO, W. REN, J. KUSH, Y. LIU, AND Y. WANG (2014), Spatial and temporal patterns of global burned area in response to anthropogenic and environmental factors: Reconstructing global fire history for the 20th and early 21st centuries, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 119, 15 p.

ZHARKOVA Valentina (2020), Modern Grand Solar Minimum will lead to terrestrial cooling, *Temperature*, 7:3, p. 217-222.

<https://jeretiens.net/regulation-du-climat-les-parametres-orbitaux/>
<http://journals.openedition.org/lettre-cdf/1210> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/lettre-cdf.1210>
<https://www.climato-realistes.fr/les-feux-de-foret-en-australie>

Coordonnées des auteurs :

Brigitte Coque-Delhuille : hrbc.mcda@gmail.com

Robert Moutard : robert-moutard@orange.fr