

Changements Climatiques

Plusieurs forces différentes peuvent influencer le climat :

- Quand l'activité solaire augmente, la planète reçoit plus d'énergie et se réchauffe.
- Lorsque des volcans entrent en éruption, ils émettent des particules dans l'atmosphère qui renvoient la lumière du soleil et la planète se refroidit.
- Quand il y a plus de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la planète se réchauffe...

Aujourd'hui, pour beaucoup d'observateurs la force motrice dominante provient des activités humaines et des émissions de gaz à effet de serre additionnelles provoquées par ces activités. Les changements climatiques passés ne nous disent pas que les humains ne peuvent pas influencer le climat, au contraire, ils nous disent que le climat est très sensible aux gaz à effet de serre dont nous contribuons à fortement augmenter la présence dans l'atmosphère terrestre.

Même si la température moyenne globale augmente moins vite depuis 10 ans, la décennie 2000-2009 a été la plus chaude jamais enregistrée depuis 1850 ! Le 5ème rapport du GIEC rappelle aussi que depuis 1980, chaque décennie a été significativement plus chaude que n'importe quelle décennie passée depuis 1850.

De plus, l'explication du réchauffement climatique repose sur plusieurs facteurs. S'il est naturel de commencer par la température de l'air, un examen plus approfondi devrait aussi inclure la couverture neigeuse, la fonte des glaces, les températures au sol, au-dessus des mers et même celle de la mer elle-même. Aujourd'hui, chacun de ces indicateurs atteste d'un réchauffement global des températures.

Lorsqu'il analyse les tendances de long terme, le GIEC ¹ montre par exemple qu'entre 1880 et 2012, la température moyenne globale a augmenté de 0,85°C. De même, la période 1981-2010 a été la plus chaude depuis 1400 ans.

¹ Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) a été créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme pour l'Environnement des Nations Unies (PNUE) ; il représente tous les gouvernements. Il évalue et synthétise les travaux publiés de milliers de climatologues sous forme de rapports, analysant les tendances et prévisions mondiales en matière de changements climatiques. Un rapport du GIEC est donc une compilation des travaux scientifiques réalisés depuis le précédent rapport. Il fait la

Les températures moyennes globales sont aujourd'hui plus élevées que celles connues au Moyen-Âge.

Même si dans certaines régions (dans l'Atlantique Nord par exemple) on a observé que la température au Moyen Âge était plus élevée qu'aujourd'hui, si l'on étudie les températures atmosphériques globales, on voit qu'il fut une période plus froide que la période actuelle. De plus, des phénomènes naturels permettent d'expliquer la relative chaleur de l'époque : au Moyen Âge, l'activité volcanique (qui contribue à refroidir le climat) était très faible ; à l'inverse, l'activité solaire (qui réchauffe le climat lorsqu'elle est importante) était très forte. Ces phénomènes, bien connus, sont moins intenses aujourd'hui ; seules les activités humaines et les émissions de gaz à effet de serre permettent d'expliquer le réchauffement constaté depuis 1950.

« Le Groenland ² était vert, recouvert d'herbe, lorsqu'il a été découvert par les Vikings il y a 1000 ans ! »

Les carottages sur place montrent que la calotte glaciaire du Groenland existe depuis au moins 400 000 ans !

97 % des scientifiques de la planète, compétents en matière climatique, s'accordent à dire qu'il y a bien un réchauffement climatique et que ce phénomène est en partie d'origine humaine.

Le fait que les activités humaines soient la cause du réchauffement planétaire est la position prise par les académies des sciences de 19 pays (dont la France), en plus des organismes scientifiques qui étudient la climatologie (dont le GIEC).

Disparition d'espèces.

On assiste déjà à l'extinction d'un grand nombre d'espèces, celles-ci ne pouvant pas s'adapter assez vite à des changements climatiques aussi rapides.

Historiquement, les extinctions massives d'espèces ont été très souvent causées par des changements climatiques trop rapides. Le mode d'adaptation le plus classique d'une espèce est la migration.

Aujourd'hui, la vitesse à laquelle le climat évolue, ainsi que certaines activités humaines dévastatrices pour les habitats (changement d'usage des sols avec leur artificialisation par exemple), pourraient ne pas laisser suffisamment de temps

synthèse de nombreuses analyses et modélisations ; en cela il ne s'agit pas d'un travail partisan et orienté, mais bien d'une analyse pondérée.

² Mot qui signifie littéralement la « Terre Verte »

aux espèces pour migrer et donc survivre aux changements imposés. Il faut généralement plusieurs milliers d'années pour que se consolide une biodiversité.

Le coût d'une action aujourd'hui (tant qu'il est encore temps) est minime, comparé à ce que les changements climatiques nous coûteront à l'avenir si on ne fait rien. Agir aujourd'hui, c'est dépenser un petit peu pour ne pas avoir à le faire beaucoup ensuite pour panser les plaies des changements climatiques. En effet, le coût de l'inaction serait bien supérieur au coût qu'aurait une politique volontariste de réduction des émissions de gaz à effet de serre aujourd'hui.

Au début des années 2000, des experts estiment que plus de la moitié des espèces alors vivantes pourraient s'éteindre avant 2100.

Fin 2014 une nouvelle évaluation, publiée dans la revue Nature, conclut qu'il reste impossible de précisément quantifier toute la biodiversité, mais que pour les espèces connues la situation s'aggrave : les amphibiens sont les plus menacés (41 % d'espèces en danger), devant les oiseaux (26 %) et les mammifères.

60 % des coraux pourraient mourir avant même 2050. Si l'on considère la fourchette d'une évaluation prospective (36 000 espèces disparaissant par an vers 2010-2014) la 6e extinction (75 % des espèces auraient alors disparu) pourrait advenir vers 2200 (si rien de plus n'est fait pour l'éviter).

Aux causes anciennes et naturelles d'extinction (chasse, surexploitation...) se sont ajoutées des causes anthropiques récentes telles que les effets des pollutions, de la surexploitation des ressources naturelles, de la destruction des habitats ou de l'insularisation induite par la fragmentation écologique croissante des paysages. Ces effets pourraient dans un proche avenir être exacerbés par les effets du dérèglement climatique. Depuis 1900, les disparitions d'espèces ont été multipliées par 100, soit un rythme sans équivalent depuis l'extinction des dinosaures.

Le responsable, c'est le Soleil ?

Durant les 35 dernières années, au cours desquelles le climat s'est réchauffé, l'activité du soleil a eu tendance à diminuer.

Le soleil « cause du réchauffement climatique » est l'un des mythes les plus tenaces et les plus communément répandus. Effectivement, sur les périodes passées, il a été démontré que l'activité solaire a souvent influencé le climat.

Le 5^e rapport du GIEC montre comment les différentes variations naturelles, comme celles de l'activité solaire, peuvent expliquer les variations de températures constatées dans le passé, jusqu'à la moitié du XX^e siècle. Mais depuis 1950, le réchauffement constaté est explicable principalement du fait des activités humaines.

El Niño³ est un phénomène influant sur la température moyenne globale, mais ce phénomène est éphémère et n'a donc pas d'impact sur la tendance de long terme.

« Il n'y a pas à s'inquiéter, c'est un phénomène naturel, un cycle »

Un cycle naturel répond à un forçage, une force motrice elle-même naturelle. Or aucune force motrice connue ne peut expliquer le réchauffement observé, si ce n'est les émissions de gaz à effet de serre provoquées par les activités humaines.

Des épisodes de réchauffement / refroidissement, connus sous le nom d'événements de Dansgaard-Oeschger, sont observés dans les enregistrements de la dernière période glaciaire (entre -100000 et -10000 ans approximativement) avec une durée de retour de l'ordre de 1500 ans. Ils se caractérisent par un réchauffement rapide de l'Atlantique Nord accompagné d'un refroidissement plus lent de l'Antarctique et d'une migration des zones pluvieuses tropicales. Ainsi ces cycles montrent plutôt une réorganisation des gradients de température, et l'hypothèse la mieux étayée pour les expliquer est une variation de la circulation océanique et du transport de chaleur associé.

À l'inverse, le réchauffement climatique observé depuis 1850 concerne l'ensemble des deux hémisphères et notamment la totalité des océans de la planète, ce qui indique un déséquilibre énergétique global d'importance et pas seulement une réorganisation des transports de chaleur ou un phénomène régional. Et ceci alors que les gaz à effet de serre, au cours de cette même période, ont eu nettement plus d'impacts que le rayonnement solaire, les aérosols (fines particules en suspension dans l'atmosphère) et les éruptions volcaniques.

³ Le phénomène El Niño désigne un phénomène climatique particulier qui se caractérise par des températures de l'eau anormalement élevées dans la partie Est de l'océan Pacifique équatorial. Lorsque ce phénomène se manifeste, on assiste à une forte hausse des températures annuelles. Cependant, ce phénomène ne perdure pas (d'où le terme d'« oscillation »), et ne peut pas expliquer les tendances de long terme.

Augmentation de la concentration en vapeur d'eau ?

La vapeur d'eau n'est pas un moteur des changements climatiques ; elle ne fait qu'y réagir, et peut l'amplifier.

Mais le rôle croissant de la vapeur d'eau (H₂O), à cet état gazeux dans l'air, est de loin le plus important quantitativement des gaz à effet de serre. Mais son taux est contrôlé par la température (+7 % par °C) et non par les émissions directes d'H₂O. Contrairement au CO₂, elle se condense et retombe au sol sous forme de pluie ou de neige : sa durée de vie est donc courte.

Avec le réchauffement (+0.85°C depuis 1880), l'air de la basse atmosphère (de 0 à 8 à 15 km d'altitude) contient plus d'humidité, ce qui provoque une absorption supplémentaire de rayons infrarouges et amplifie l'augmentation initiale de température provoquée par les gaz à effet de serre à longue durée de vie (CO₂, CH₄...). La vapeur d'eau de la basse atmosphère est donc un effet amplificateur du réchauffement et non sa cause. Celle de la haute atmosphère est un effet du méthane (CH₄), deuxième gaz à effet de serre qualitativement le plus important après le CO₂, or le permafrost sibérien fondant est en train de libérer des volumes colossaux de méthane et ...de pathogènes potentiels !

Danger : la fonte du pergélisol !

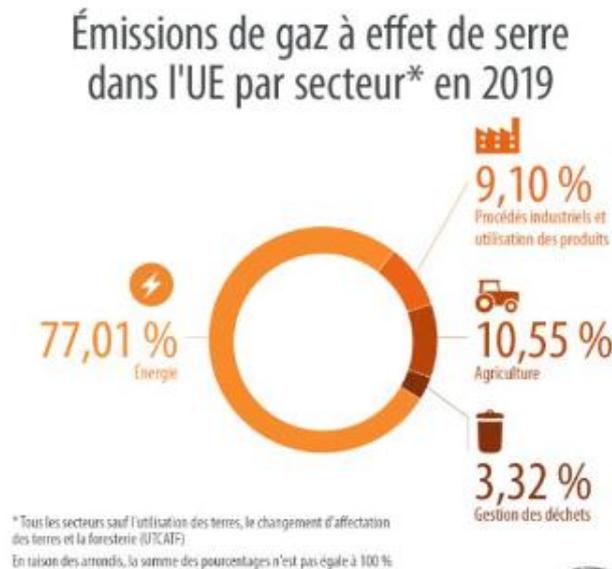
Dans un article publié le 9 mars 2022, le Jet Propulsion Laboratory (JPL), antenne de la Nasa en charge de missions d'exploration spatiale telles que Perseverance ou Curiosity, explique que la fonte du pergélisol⁴ pourrait libérer dans l'atmosphère de fortes doses de particules carbonées et des bactéries, virus et microbes. Cette analyse se base sur une étude publiée dans la revue Nature le 11 janvier 2022, portant un regard sur les émissions de carbone dans le cercle polaire arctique. Au cours du XXI^e siècle, la fonte pourrait réellement devenir une véritable bombe à retardement climatique et biologique.

En 2016, le journal Scientific American révélait que des cas de contamination à l'anthrax en Sibérie étaient probablement dus à la libération de bacilles du charbon, bactéries vectrices d'infections parfois mortelles. En 2014, des scientifiques exposaient dans une étude, déjà publiée par Nature, avoir « ressuscité » un virus piégé dans le pergélisol depuis 30.000 ans.

⁴ On trouve du pergélisol sur plusieurs continents et régions du monde. Ces étendues de sols glacés composent 90 % du Groenland, 80 % de l'Alaska et 50 % de la Russie, avec une grande partie concentrée en Sibérie. Le pergélisol joue un rôle clé dans le développement de certains écosystèmes et pour la biodiversité acclimatée à ces milieux austères.

L'air plus chaud et plus humide confère donc une énergie accrue aux épisodes de précipitations qui deviennent plus intenses.

Les émissions à effet de Serre ont été bien identifiés (voir le schéma ci-dessous) :



Les facteurs naturels.

Des facteurs naturels externes au système climatique, comme des changements de l'activité volcanique, de l'émission d'énergie solaire et de l'orbite de la Terre autour du Soleil, peuvent altérer le climat de la planète.

Parmi ceux-ci, donc, les deux facteurs qui sont déterminants à des échelles temporelles pour les changements climatiques contemporains sont les changements à l'activité volcanique et les changements au rayonnement solaire. En ce qui a trait à l'équilibre énergétique de la Terre, ces facteurs agissent principalement sur la quantité d'énergie reçue. Les éruptions volcaniques sont épisodiques et exercent des effets sur le climat pendant une durée relativement courte. Les changements de l'irradiation solaire ont contribué aux tendances climatiques au cours du dernier siècle, mais, depuis la révolution industrielle, l'effet des apports de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a été environ 50 fois plus marqué que celui des changements de l'émission d'énergie solaire.

Théorie astronomique du climat.

Issue de la théorie proposée en 1924 par le yougoslave Milankovitch, cette théorie explique les variations de l'ensoleillement des différentes régions sur Terre suite à l'évolution du mouvement de la Terre autour du Soleil.

Trois paramètres indépendants caractérisent la position de la Terre par rapport au Soleil, et donc définissent l'énergie solaire reçue selon les différentes saisons. Chacun de ces paramètres varie au cours du temps avec des périodes indépendantes; leur conjonction va rendre plus ou moins favorable la construction (ou disparition) des calottes glaciaires de l'hémisphère nord.⁵

L'excentricité qui caractérise la forme de l'orbite décrite par la Terre en un an autour du Soleil, orbite qui n'est pas circulaire mais elliptique et dont le soleil occupe l'un des foyers.

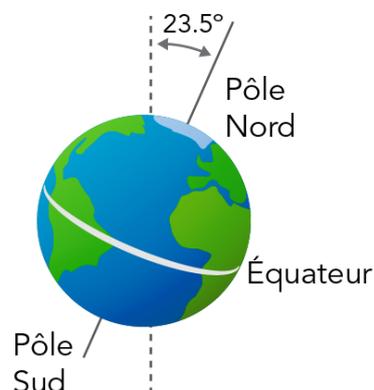
La distance Terre-Soleil, qui est en moyenne de 149 millions de km, varie donc au cours de l'année, la Terre passant tous les 6 mois au périhélie (point le plus près du soleil) puis à l'aphélie, (point le plus loin).

L'écart entre ces deux distances est fixé par l'excentricité.

Si celle-ci est nulle, l'ellipse devient un cercle; si elle est de 0,015 (valeur proche de la valeur actuelle) la distance Terre-Soleil varie de 3% (2 fois l'excentricité) entre la position la plus proche et la position la plus éloignée. L'énergie solaire qui parvient à la Terre (1367 w/m² en moyenne au cours de l'année) varie alors de 6% (4 fois l'excentricité) passant de 1408 W/m² au point le plus proche à 1326 W/m² au point le plus éloigné.

Cette excentricité évolue au cours du temps avec comme principales périodes 412 800 ans et un ensemble de périodes proches de 100 000 ans. Par exemple, lors de la précédente période interglaciaire, il y a 128 000 ans, l'excentricité était proche de 4% et l'énergie reçue par la Terre entre le périhélie et l'aphélie variait d'environ 16%.

L'inclinaison (actuellement proche de 23°5) de l'axe de rotation de la Terre sur l'écliptique, plan dans lequel se déplace la Terre autour du Soleil au cours de l'année.



⁵ Marie-Antoinette Mélières, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'Environnement (C.N.R.S.) Grenoble.

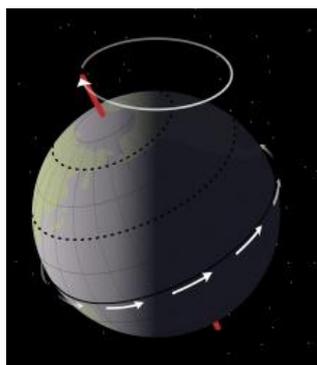
La Terre tourne en 24 heures autour de cet axe. La direction de cet axe est facilement matérialisable car, lorsqu'on regarde la voûte céleste la nuit, une étoile située dessus doit rester immobile au cours des 24 heures de rotation de la Terre : c'est actuellement le cas de l'étoile polaire. Cette direction ne bouge quasiment pas au cours de l'année (l'étoile polaire reste l'étoile fixe sur la voûte céleste).

L'inclinaison de cet axe est responsable de l'existence des saisons : pas de saisons si l'inclinaison est nulle, et plus l'axe est incliné, plus l'écart est fort entre l'été et l'hiver. La position de cet axe oscille entre 21° et $24,5^\circ$, avec une période principale de 41 000 ans. Plus l'axe est incliné, plus les étés sont chauds, en particulier aux hautes latitudes où les jours sont longs. Inversement, moins il est incliné, plus les étés sont frais.

Par exemple, passer d'une inclinaison de 21° à $24,5^\circ$ entraîne en été à la latitude de 70° une augmentation de l'insolation reçue.

Ceci conduit, environ tous les 20 000 ans, soit à une situation favorable à la fusion de calottes glaciaires aux hautes latitudes de l'H.N. (inclinaison forte, étés chauds) soit à une situation favorable à la croissance des calottes (inclinaison faible, été frais). Mais ce paramètre n'est pas le seul à influencer sur l'établissement des époques glaciaires / interglaciaires : l'influence de la précession est au moins aussi importante.

La précession⁶ de l'axe de rotation de la Terre



Mouvement de précession (flèche blanche au niveau du pôle).

⁶ La précession des équinoxes est le décalage progressif de la direction où sont vues les étoiles, d'un siècle à l'autre, à raison d'une rotation complète, tous les 26 000 ans environ, effet produit par un lent changement de direction de l'axe de rotation de la Terre, dans la même durée.

Tout en gardant son inclinaison proche de 23° au cours des milliers d'années, l'axe de rotation précesse autour de l'axe de l'écliptique (il décrit un cône) avec un cycle de l'ordre de 22 000 ans (en fait les principales périodes de précession sont proches de 19 000 et 23 000 ans).

La conséquence de cette précession est que le solstice d'été dans un hémisphère donné (moment où l'hémisphère reçoit le maximum de chaleur), aura lieu alternativement tous les 11 000 ans soit au périhélie (c'est-à-dire près du Soleil), soit à l'aphélie (loin du soleil). Donc, dans cet hémisphère, les étés seront tous les 11 000 ans soit plus chauds soit plus frais, l'écart d'énergie reçue étant fixé par l'excentricité de l'ellipse.

Si la Terre décrivait un cercle autour du Soleil, la distance Terre-Soleil étant alors constante, la précession n'aurait aucune influence sur les saisons. En fait ceci conduit tous les 11 000 ans, soit à une situation favorable à la fusion de calottes glaciaires aux hautes latitudes de l'H.N. (étés chauds) soit à une situation favorable à la croissance de ces calottes (été frais).

On caractérise l'évolution de cette situation par la distance Terre-Soleil au 21 juin (solstice d'été de l'hémisphère nord). Ainsi, il y a 11 000 ans dans l'hémisphère nord, nous recevions en été 6% de plus d'énergie solaire qu'à l'heure actuelle. Inversement, en hiver il y a 11 000 ans, nous recevions 6% de moins d'énergie solaire qu'à l'heure actuelle.

La combinaison des deux paramètres (distance Terre-Soleil le 21 juin et inclinaison de l'axe de rotation de la Terre) vont conduire à des situations plus ou moins favorables à la dynamique des calottes dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord. Cette dynamique est enregistrée dans l'évolution du niveau marin dont la baisse caractérise le volume des glaces stockées dans les calottes glaciaires.

On constate que les enregistrements des niveaux marins dans les sédiments océaniques sur les deux derniers millions d'années présentent bien les 3 périodes clés (19 et 23 000, 41 000 et 100 000 ans) des trois paramètres astronomiques décrits ci-dessus. Ce fait a été la première confirmation éclatante de la validité de la théorie astronomique du climat. La combinaison de l'ensemble des fréquences conduit à l'émergence en moyenne environ tous les 100 000 ans d'un interglaciaire marqué suivant une glaciation importante. De la même manière, en moyenne, les périodes interglaciaires (dont les durées peuvent s'étendre de quelques milliers d'années à plusieurs dizaines de milliers d'années, selon la conjoncture astronomique) durent en moyenne une dizaine de milliers d'années.

Les Glaciations. ⁷

Le quaternaire a été marqué par la succession de nombreux épisodes de froids glaciaires " au cours desquels d'immenses glaciers ont recouvert une grande partie du globe.

L'extension de ces glaciations à leur paroxysme était difficilement concevable : un quart des terres émergées étaient couvertes de glace sous forme d'inlandsis dans les hautes latitudes, analogue à l'actuel Groenland, et sous forme de grands glaciers de vallées, dans l'ensemble du massif alpin.

Dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, près de 50 Millions de Km³ de glace étaient stockées dans les inlandsis qui recouvraient de deux à trois mille mètres de glace l'Amérique du Nord et une grande partie de l'Europe du Nord.

Le niveau des océans avait baissé de 120 m !!!

Depuis deux millions et demi d'années la terre a été touchée par les premiers épisodes glaciaires.

Une vingtaine de glaciations au moins se sont succédées recouvrant et modelant le massif alpin.

Chaque glaciation, une tous les 100 000 ans environ, bouleversa toute la vie sur Terre (faune, flore, hommes, environnement).

À chaque fois, les espèces durent s'adapter ou disparaître.

Afin d'assurer sa subsistance au cours des périodes glaciaires, l'homme domestiquera le feu vers - 450 000 ans.

Seules les traces des deux dernières périodes glaciaires, celles du Riss et du Würm qui prit fin il y a 10 000 ans, sont encore observables dans le massif Alpin.

Si la calotte glaciaire antarctique a commencé à se former il y a quelque 20 millions d'années, celle du Groenland s'est formée il y a seulement 6 millions d'années.

Les premiers glaciers des Alpes seraient quant à eux apparus il y a 4 ou 5 millions d'années.

Depuis, leur histoire n'est qu'une longue suite de va et vient.

Il y a 70 000 ans commence la dernière glaciation du " Würm".

Pendant son maximum voici 25 000 ans, toutes les vallées alpines sont occupées par les glaces issues des hauts massifs.

⁷ Sylvain Coutterand.

Elles s'écoulent lentement puis sortent du massifs Alpin, recouvrant en de vastes lobes les plaines et les collines de la bordure des Alpes ; le froid (entre 6 et 8 °C de moins qu'aujourd'hui) favorisant l'accumulation des précipitations neigeuses pendant des millénaires, puis le développement des glaciers.

Tous les glaciers du massif du Mont-Blanc se réunissent par écoulement pour former le grand glacier de l'Arve qui remplit totalement sa vallée jusqu'à Genève.

Les travaux récents (COUTTERAND, BUONCRISTIANI 2001) permettent maintenant de préciser l'englacement de la vallée de l'Arve et du massif du Mont-Blanc au maximum de la dernière glaciation.

Imaginer le paysage de cette époque demande un gros effort pour nous habitants du 21^e siècle : La vallée que nous connaissons de nos jours disparaît totalement sous la glace, c'est un vaste plateau glaciaire enneigé hivers comme étés ; aux Houches : une épaisseur de glace de 1100 m recouvre tout, seule l'Aiguillette (enneigée hivers comme été) émerge de cette immense plateau neigeux.

La surface du flux glaciaire s'abaisse ensuite régulièrement vers l'aval : 1800 m d'altitude au-dessus de Sallanches et 1200 m d'altitude sur Genève.

Ce fleuve de glace, en mouvement permanent sous l'effet de son poids, conflue ensuite avec le puissant glacier du Rhône qui occupe le bassin Lémanique et surcreuse la cuvette de l'actuel lac Léman.

Il s'écoule vers le sud, puis forme au Sud-Ouest de la Dent du Chat, un vaste lobe glaciaire " lobe de piémont " dont le front s'avance quelques kms de Lyon (Grenay, Satolas).

De nombreux blocs erratiques de granite du Mont-Blanc que l'on rencontre aujourd'hui jalonnent le parcours du glacier.

Depuis 20 000 ans, à la faveur du réchauffement climatique, les glaciers fondent progressivement, leur retrait est ponctué de stades de stabilisation.

14 000 ans avant nous, la Vallée de Chamonix est encore occupée par la glace, tous les glaciers du massif sont jointifs.

Le climat se réchauffe rapidement, c'est la fin de la glaciation du " Würm".

Quelques centaines d'années plus tard, la vallée est totalement déglacée et occupée par un vaste lac entre les Tines et les Houches, son origine est liée au profond surcreusement de la vallée par les glaciations passées.

Ce vaste plan d'eau sera en quelques millénaires comblé par les alluvions de l'Arve.

Le lit rocheux se situe vraisemblablement quelques centaines de mètres sous la surface de la vallée actuelle.

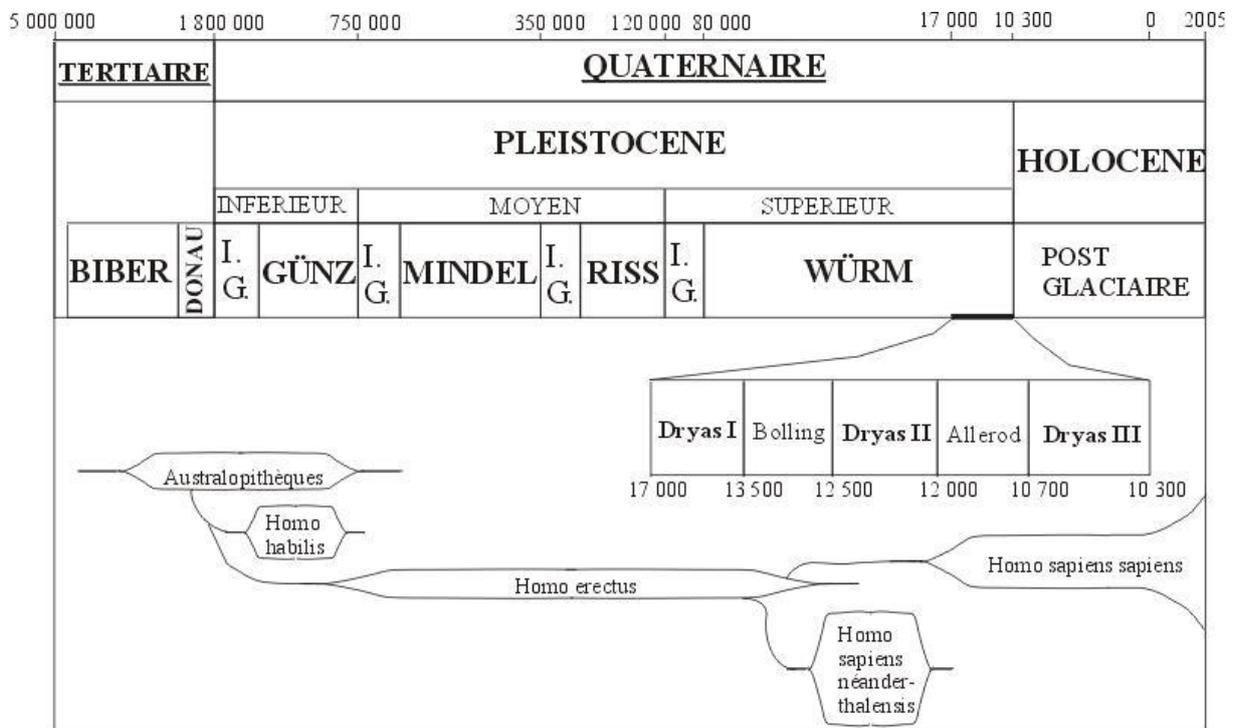
Il y a 11 000 ans : Un dernier coup de froid d'une durée d'un millénaire provoque une importante récurrence des glaciers dans la vallée : Au stade de Chamonix, la Mer de Glace obstrue la vallée principale.

Le Glacier d'Argentière, qui s'étale largement dans la vallée principale, présente un visage analogue, comme en témoigne la moraine latérale du Planet.

Tous ces indices nous permettent de concevoir une coalescence des glaciers du Tour, d'Argentière et de la Mer de Glace.

En avant du front de la Mer de Glace, c'est à dire vers l'aval le complexe glaciaire Taconnaz, les Bossons obture totalement la vallée ; tout prouve que la récurrence de ces deux glaciers s'est déroulée en milieu lacustre, la masse de glace scindant en deux cuvettes le paléolac qui occupait le fond de la vallée à cette époque.

La Vallée de Chamonix se présente sous l'aspect d'un magnifique complexe glacio-lacustre .



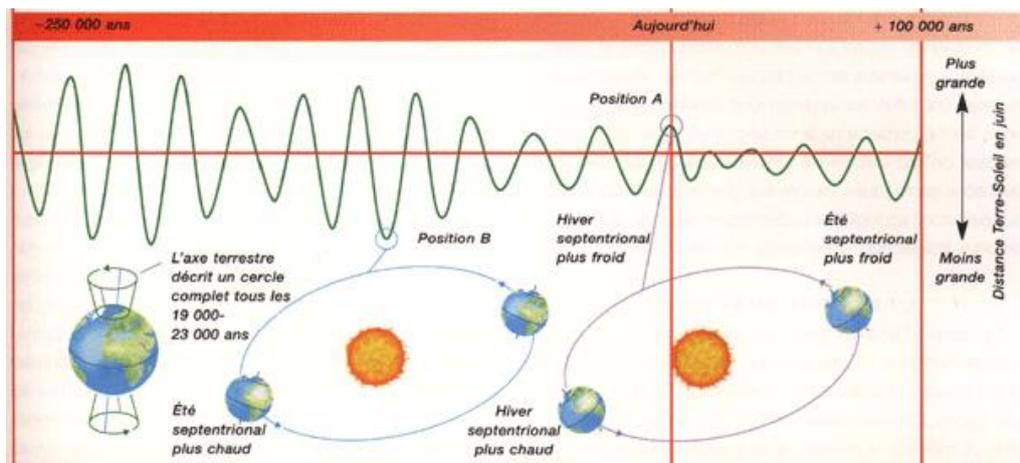
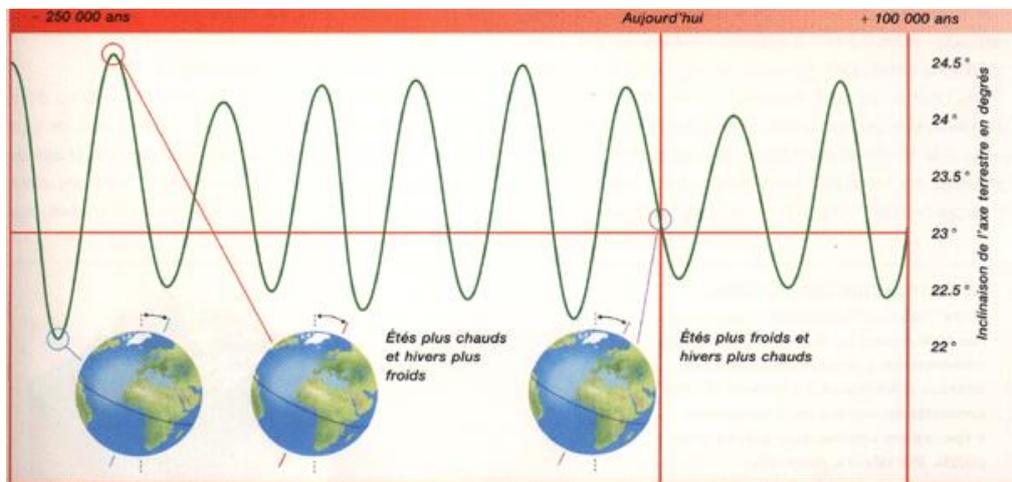
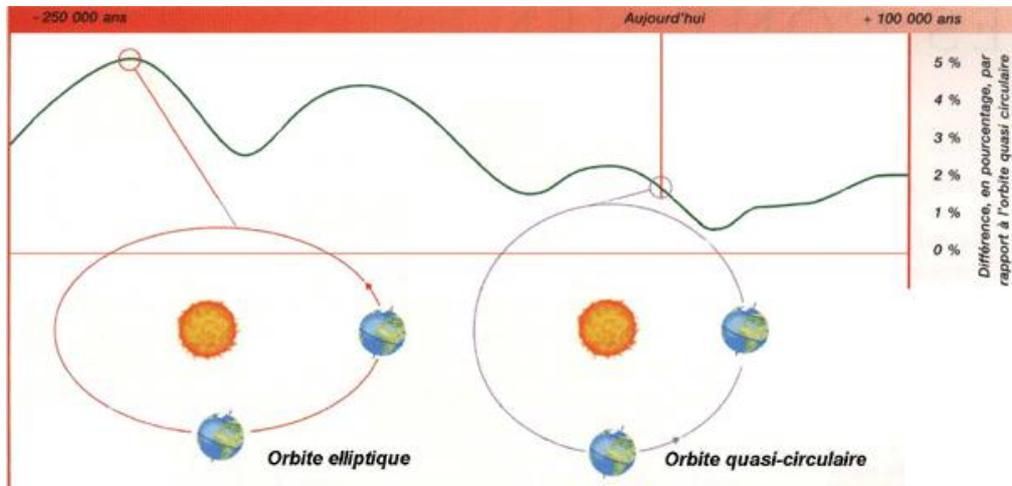
Les glaciations

Inclinaison, excentricité et précession se sont donc combinées de façon particulièrement favorable pour conduire il y a 128 000 ans à l'avant dernière grande déglaciation (position de la Terre en été de l'H.N. proche du Soleil et forte inclinaison de l'axe de rotation, atteignant $24,2^\circ$). Une conjonction semblable, favorable à la déglaciation, a eu lieu il y a 11 000 ans avec la distance Terre-Soleil faible en été H.N. et une forte inclinaison ($24,2^\circ$), qui a conduit à l'établissement de ***l'interglaciaire actuel***. Cependant, l'excentricité ayant été plus forte il y a 128 000 ans qu'il y a 11 000 ans, le précédent interglaciaire a connu des étés plus chauds que l'actuel, ce qui s'est traduit par une température moyenne plus élevée (une estimation d'environ 2 degrés semble plausible) ainsi qu'un niveau des mers plus haut de quelques mètres (une estimation d'environ 2 mètres semble également plausible).

Depuis le précédent interglaciaire (centré sur environ 125 000 ans) les situations qui, à chaque cycle de précession, correspondaient à une distance Terre-Soleil faible en été (H.N.), n'ont pas été renforcées par une forte inclinaison : il y a 100 000 ans, l'inclinaison était particulièrement faible et n'a conduit qu'à un interstade chaud où le niveau des mers est resté d'environ 16 mètres plus bas que le niveau actuel.

La théorie astronomique du climat ⁸

Sur les schémas ci-dessous : en haut : excentricité, au milieu : inclinaison, en bas : précession



⁸ CNRS Contact : Sagascience@cns-dir.fr site CNRS : <http://www.cnrs.fr>

L'interglaciaire actuel

Il y a 11 000 ans, dans l'HN, la Terre se trouvait le plus proche du soleil en été (configuration étés chauds, hivers froids). Actuellement au cours de l'année c'est en été (de HN) que la Terre se trouve le plus éloigné du soleil (configuration étés frais, hivers doux). Ceci peut être mis en relation avec le fait qu'au cours des dix mille dernières années, les hautes latitudes de l'hémisphère nord se sont progressivement refroidies : le pergélisol initialement restreint aux très hautes latitudes a progressé vers le sud.

Le futur ?

Dans le cas actuel, l'excentricité de l'ellipse étant particulièrement faible, alors que l'inclinaison est loin d'être à son minimum, la situation est peu favorable au retour d'une glaciation; de plus, cette situation va évoluer progressivement à l'établissement d'étés de plus en plus chauds en H.N. (diminution de la distance Terre-Soleil en juin, au cours des prochains milliers d'années (voir la figure Théorie astronomique du climat/précession). Tout indique l'absence de construction d'une calotte dans les prochains siècles, prochains millénaires, mais à nouveau un réchauffement naturel des étés de l'H.N.

Que nous enseigne le passé ?

Cette configuration astronomique est rare au cours des dernières centaines de milliers d'années (faible excentricité) mais s'est produite il y a environ 400 000 ans, où l'interglaciaire a été particulièrement long (environ 30 000 ans). A cette époque, le balancier des 11 000 ans a peu joué, et le nouveau cycle de 22 000 ans s'est établi alors que le niveau des mers était encore élevé. Bien que la reconstitution du climat de cette époque soit encore difficile, les données actuelles suggèrent un état plus chaud que la moyenne des interglaciaires (cela semble être la seule époque où l'on ait trouvé des pollens de vigne sauvage dans le Vercors), et un niveau des mers plus élevé (une dizaine de mètres ?).

Un précurseur : Milankovitch.

Milankovitch ⁹ est un ingénieur de formation, mais rapidement il décida de consacrer sa vie à la recherche fondamentale sur le climat. Il était né à Dalj en 1879 et est mort à Belgrade en 1958. Il fut dès lors contemporain d'Alfred Wegener (1880–1930), qu'il rencontra grâce au beau-père de celui-ci, le climatologue allemand Vladimir Köppen (1846–1940).

⁹ A. Berger, M.F. Loutre, C. R. Geoscience 336 (2004).

Le premier livre de Milankovitch, rédigé en français, date de 1920 et fut publié chez Gauthier-Villars à Paris. Son œuvre fondamentale fut toutefois publiée plus tard, en 1941, et rédigée cette fois en allemand. Elle allait être traduite en anglais en 1969 et cette version vient d'être rééditée, en 1998.

Pour une entrée en glaciation, Milankovitch requiert l'existence d'été frais dans les hautes latitudes nord de façon à empêcher la neige tombée en hiver de fondre et à lui permettre ainsi de s'accumuler année après année. Cette théorie est aussi basée sur l'hypothèse que les latitudes polaires nord sont les plus sensibles aux changements d'énergie que la Terre reçoit du Soleil, car largement occupées par des continents. C'est aussi pourquoi, la courbe la plus populaire calculée par Milankovitch est celle de l'insolation d'été à la latitude de 65° N. C'est sur celle-ci qu'il identifia les quatre âges glaciaires que Penck et Brückner avaient reconstruits pour l'Europe dès le début du XXe siècle.

La théorie de Milankovitch fut critiquée jusqu'au début des années 1970 et il n'eut pas le plaisir de la voir confirmée.

Les critiques reposaient sur le fait que les reconstructions étaient très fragmentaires et les échelles de temps imprécises et sur l'affirmation que le climat devait être insensible aux petites variations d'insolation calculées par Milankovitch. De plus, au vu de nos connaissances actuelles, nous devons bien admettre que la théorie de Milankovitch – bien que fondamentale – allait devoir être modifiée et complétée. En particulier, le problème planétaire du mouvement de la Terre autour du Soleil et de son axe de rotation avait besoin d'être précisé.

Les premiers tests quantitatifs de la théorie de Milankovitch furent basés sur la correspondance visuelle et statistique entre les minima et maxima de sa courbe d'insolation estivale à 65° N et les reconstructions du climat. On comprendra aisément la précarité d'une telle démarche, vu les hypothèses qui sous-tendent cette théorie, en particulier, celles liées à la sensibilité des latitudes polaires nord et à l'importance des saisons. C'est pourquoi d'autres auteurs utilisèrent d'autres latitudes et saisons, voire des combinaisons pondérées des trois paramètres astronomiques, et ce, afin de construire des courbes reproduisant mieux les observations, en particulier la forme en dents de scie du cycle de 100 000 ans.

Pendant ce temps, les premiers modélisateurs du climat après Milankovitch, Budyko, Sellers, Saltzman et Vernekar, tentaient de simuler une réponse du

système climatique au forçage astronomique. Celle-ci s'avéra malheureusement bien trop faible pour ressembler aux reconstructions paléoclimatiques des géologues.

L'impact astronomique sur le climat

Afin de tester l'influence possible sur le climat des variations à long terme de l'insolation, un modèle climatique de complexité réduite a été construit. Il a été appliqué pour simuler de multiples événements climatiques qui caractérisent les trois derniers millions d'années.

En particulier, le forçage astronomique ¹⁰ accompagné d'un scénario de la concentration atmosphérique en CO₂ allant de 320 ppmv il y a 3 Ma (Ma : million d'années) à 200 ppmv au dernier maximum glaciaire (21 ka BP) ont permis de reproduire l'entrée en glaciation il y a 2,7 Ma, le cycle de 41 ka qui caractérise le climat de la fin du Pliocène – début du Pléistocène, l'émergence du cycle de 100 ka vers 850 ka BP et l'allure des cycles glaciaire–interglaciaire du Pléistocène supérieur. Des tests de sensibilité ont montré toute l'importance des rétroactions liées à l'albédo ¹¹ planétaire, à la vapeur d'eau, à l'altitude et la continentalité des inlandsis et à la réponse isostatique de la lithosphère sous-jacente. Ils ont également confirmé que, dans le modèle, le forçage astronomique seul pouvait engendrer des cycles du type glaciaire–interglaciaire, mais uniquement si la concentration en CO₂ était inférieure à 230 ppmv. Par contre, si le forçage astronomique est maintenu constant, les variations du CO₂ seul ne peuvent pas reproduire les variations du volume de glace telles qu'elles sont observées au cours des cycles glaciaire–interglaciaire. L'utilisation des variations d'insolation et de la concentration en CO₂ dans l'air, cette fois déduites de la carotte de Vostok, a conduit à une réponse du modèle en plus ou moins bon accord avec les reconstructions du volume de glace au cours des 400 000 dernières années. Par ailleurs, on a montré que l'interglaciaire du stade isotopique 11 était un bien meilleur analogue de notre Holocène que l'Éémien, tout au moins du point de vue de la théorie astronomique. C'est à partir d'une telle analyse qu'une projection du climat futur à l'échelle de plusieurs dizaines de milliers d'années a été faite. Elle a conclu à une durée exceptionnellement longue de notre interglaciaire (~50 ka) et ce, même en l'absence de toute

¹⁰ Le terme de forçage climatique désigne une perturbation d'origine extérieure au système climatique qui impacte son bilan.

¹¹ L'albédo est une valeur physique qui permet de connaître la quantité de lumière solaire incidente réfléchie par une surface.

perturbation anthropique, laquelle conduirait à un super-interglaciaire avec disparition de l'inlandsis du Groenland entre 10 et 20 ka AP !!!

Conclusions

Il semble actuellement de plus en plus admis que les variations astronomiques de l'énergie que la Terre reçoit du Soleil sont le métronome des variations climatiques du Quaternaire aux échelles de temps allant de dizaines à plusieurs centaines de milliers d'années. Les mécanismes de rétroaction – dont ceux liés aux gaz à effet de serre, tels le dioxyde de carbone et le méthane – sont indispensables pour amplifier le signal astronomique et donner aux variations l'allure des cycles glaciaire–interglaciaire reconstruits à partir de l'analyse des carottes prélevées dans les glaces, les sédiments du fond des océans et sur les continents.

La simulation des climats anciens permet non seulement de mieux comprendre comment le système climatique fonctionne sur des situations climatiques largement différentes du présent et du passé récent, mais aussi d'espérer faire des projections réalistes pour le futur. C'est pourquoi, en plus de l'acquisition des données qui permettent la reconstruction des paléoclimats, des modèles, de diverses complexités, doivent être élaborés pour confirmer ou non les résultats.

Le Petit Âge glaciaire ne correspond pas à une glaciation à proprement parler mais à une fluctuation climatique froide à l'intérieur de l'Interglaciaire Holocène, d'autant mieux mis en évidence qu'il est récent.

L'hémisphère Nord a connu un net refroidissement, entamé dans la seconde moitié du XIV^{ème} siècle — avec un minimum thermique au XVII^{ème} siècle — qui a persisté jusqu'au début du XIX^{ème} siècle. Appelée « petite glaciation » ou « Petit Âge Glaciaire », il s'agit d'une période centrée sur le « minimum de Maunder » (1645-1715 proprement dit), qui semble correspondre à une faible activité solaire (ses taches étaient d'ailleurs peu visibles). Elle fut marquée par une série d'hivers particulièrement rigoureux, accompagnés de disettes et de famines.

Les conséquences de cet épisode froid ne sont pas négligeables, le climat en Islande et au Groenland était relativement doux pendant les trois cents premières années qui suivirent la colonisation viking. Il s'est ensuite fortement refroidi, y interdisant l'agriculture et y faisant disparaître les forêts.

Le XIX^{ème} siècle aurait vu les températures descendre jusque vers 1900-1910 dans le cadre d'un cycle lent de 5 000 ans dû à la mécanique orbitale, pouvant faire craindre un nouvel âge glaciaire, mais la tendance se serait alors inversée. Selon les paramètres de Milanković, le forçage orbital dû aux cycles de l'orbite terrestre autour du Soleil a, pendant les deux mille dernières années, provoqué une tendance au refroidissement dans l'hémisphère nord à long terme, tendance qui s'est poursuivie pendant la période médiévale et le petit âge glaciaire. La vitesse de refroidissement de l'Arctique est d'environ 0,02 °C par siècle. Cette tendance aurait pu être amenée à se poursuivre conduisant à un véritable âge glaciaire, mais les relevés de température à partir du XX^{ème} siècle montrent une inversion soudaine de cette tendance, avec une hausse des températures mondiales attribuée aux gaz à effet de serre.

Plusieurs théories ont été avancées pour expliquer l'existence et surtout la persistance du petit âge glaciaire. La première, fondée sur les découvertes réalisées en stratigraphie, relie le petit âge glaciaire des années 1800 à l'éruption très violente de plusieurs volcans, dont le Tambora. Il est en effet connu que les aérosols expulsés par un certain type de volcan peuvent nettement diminuer l'efficacité du rayonnement solaire. Le début du petit âge glaciaire au XIII^{ème} siècle pourrait ainsi être lié, en partie, à un phénomène de forçage volcanique.

En 2013, une équipe scientifique française dirigée par Franck Lavigne estime, au regard des éléments analysés, que cette période de refroidissement serait causée par l'activité volcanique du volcan indonésien Samalas, qui serait entré en éruption en 1257 lors d'une explosion qualifiée de méga-colossale.

Une seconde explication, sans être nécessairement contradictoire, serait à trouver dans l'effet de l'activité du Soleil. Il semble qu'elle ait été particulièrement faible pendant une bonne partie de la période du petit âge glaciaire. Au cours de la période 1645-1715, dans le milieu du petit âge glaciaire, il y a eu une période de faible activité solaire connue sous le nom de minimum de Maunder. Le minimum de Spörer a également été identifié avec une période de refroidissement significatif entre 1460 et 1550.

Le dernier minimum que l'on peut associer à cette période est le minimum de Dalton, qui a eu lieu entre 1790 et 1830. D'autres indicateurs de la faible activité solaire durant cette période sont les niveaux d'isotopes du carbone 14 et du béryllium 10. Dans une étude de Miller et al. (2012), ils lient le petit âge glaciaire à « une longue période inhabituelle d'activité volcanique avec 4 grandes

éruptions volcaniques tropicales riches en soufre explosif, chacune avec une charge globale de sulfate supérieure à 60 GT » et notent que « des changements importants dans l'irradiance solaire ne sont pas nécessaires ».

Le petit âge glaciaire correspond concrètement à un léger refroidissement climatique, de l'ordre de moins de 1 °C. Cette diminution peut paraître faible mais elle était suffisante pour provoquer des hivers rigoureux et ralentir les activités humaines, notamment la production agricole, en particulier au XVII^{ème} siècle. Des archives historiques ou commerciales, des peintures de l'époque témoignent d'hivers rudes et enneigés. En Savoie, on organise même des processions dans l'espoir de conjurer l'avancée des glaces. Le paroxysme de froid est atteint entre les années 1570 et 1730.



Pieter Brueghel Le Jeune, 1616.

Le petit âge glaciaire a surtout été décrit et commenté en Europe et en Amérique du Nord, bien que d'autres régions du monde aient été concernées. Au milieu du XVII^{ème} siècle, les glaciers des Alpes suisses avançaient rapidement, engloutissant fermes et villages.

En Angleterre, la Tamise gèle (pour la première fois en 1607, pour la dernière fois en 1814, en 2022 elle s'assèche !) ; quand bien même certains aménagements urbains, des ponts notamment, aient pu favoriser le phénomène en entravant le flux des eaux, la fréquence de l'événement est un bon exemple de la persistance du refroidissement en Europe. De la même façon, les embâcles sont fréquents dans presque toutes les rivières. Les canaux et rivières des Pays-Bas se muent en glace lors de plusieurs hivers ; ainsi celui de 1794-1795, pendant lequel la cavalerie française menée par Charles Pichegru s'empare de la flotte hollandaise, prise dans les glaces.

Sous Louis XIV, la Seine gèle à plusieurs reprises en hiver et on est obligé, à Paris, de débiter le vin des tonneaux à la hache. L'hiver 1709 est particulièrement glacial en France.

Ainsi, sous le règne du roi-soleil, les années 1693 et 1694 voient mourir entre 1,5 et 2 millions de Français et la fin du règne de son règne a été marquée par l'hiver 1709 qui a connu sept vagues de froid dont la seconde fut selon Saint-Simon particulièrement dure (la température descend en dessous de -16 °C, faisant perdre la plupart des fruitiers, noyers, oliviers et pieds de vigne). Néanmoins cet hiver a causé bien moins de morts que les précédents, grâce notamment à l'autorisation donnée par les pouvoirs publics de semer de l'orge au printemps, alors qu'on manquait de grain ; on a ensuite parlé du « miracle de l'orge » rappelle l'historienne Anouchka Vasak.

Tous ces hivers particulièrement rigoureux affectent plus ou moins directement et violemment la vie des populations déclenchant des famines réitérées qui seront l'une des causes de la Révolution française !

PhJC