

Les glaciations : découverte, étude, traces dans les paysages

Jean-Paul LEGROS

Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS-CLÉS

Glaciers, Quaternaire, glacialistes, diluvianistes, Ignace Venetz, Jean de Charpentier, Louis Agassiz, Albrecht Penck, Eduard Brückner, Milanković, Milankovic, Milankovitch, Günz, Mindel, Riss, Würm, moraines, roches moutonnées, ombilic, verrou, auge glaciaire, convois de blocs, sols polygonaux

RÉSUMÉ

Il a fallu attendre le 19^{ème} siècle pour démontrer l'existence de glaciations dans le passé récent de la Terre et le 20^{ème} pour établir leur nombre, comprendre leurs causes et estimer leurs paramètres (intensités et durées). Pour cela on a arpenté les montagnes, percé les glaces polaires et fouillé les fonds marins. Cette saga est présentée avec ses héros et découvreurs. La dernière partie de l'exposé montre en images les formes glaciaires principales, si évidentes dans les paysages alpins et nordiques et pourtant si longtemps ignorées. Ce qui est dit replace dans un contexte plus vaste le changement climatique actuellement observé.

Introduction

Très tôt les hommes ont cherché à connaître la Planète qui les hébergeait. D'abord, ils se sont intéressés à sa forme. Est-elle plate ? Puis ils ont calculé ses dimensions. La variété de ses roches étonnait. Les basaltes étaient-ils réellement d'origine sédimentaire comme le prétendaient les « neptunistes » opposés alors aux « plutonistes » ? Que trouvait-on au centre de la Terre ? Les montagnes surprenaient. D'où venaient-elles ? Est-ce que la Terre, en se refroidissant, se contractait et se ridait comme un fruit qui se dessèche ? Les savants ont aussi voulu déterminer son âge. Était-elle plus vieille que 6000 ans, valeur inférée à partir de la Bible ? On voit que les questionnements n'ont pas manqué. L'un d'entre eux agite encore les spécialistes et le grand public. C'est celui de l'évolution du climat. À ce sujet, nous allons voir seulement ce qui est à peu près sûr à savoir les modifications majeures et récentes, celles que l'on a connues dans l'ère quaternaire c'est-à-dire dans les derniers millions d'années. Comme les autres avancées des sciences de la Terre, celle-là est une vraie saga avec ses héros ignorés ou reconnus. Elle prend sa source au 19^e siècle.

L'exposé comprend trois parties : (1) la découverte des glaciations, (2) l'étude de leur nombre, de leurs intensités et de leurs rythmes, (3) enfin les traces correspondantes laissées dans les paysages. En conclusion, on soulignera l'intérêt des études relatives aux glaciers.

1. La découverte des glaciations

Au 18^{ème} siècle, une chose étonnait fort les naturalistes : la présence de blocs errants dits « erratiques » que l'on voyait un peu partout dans les vallées alpines, sur leurs flancs et même dans des plaines. D'où venaient ces blocs isolés et énormes ? Par exemple, un bloc de granite du Mont-Blanc (protogine) avait été abandonné sur le Jura calcaire. Quelle force étrange les avait ainsi déplacés ?

Des ouvrages firent l'inventaire de ces milliers de blocs énigmatiques.

Différents savants postulèrent le rôle des glaciers dans le transport de ces blocs et même soupçonnèrent l'existence de glaciations. En particulier le suisse Bernard-Friederich Kuhn (1762-1825), deux géologues écossais James Hutton (1726-1797) et John Playfair (1748-1819), le norvégien Jens Esmark (1763-1839), l'Allemand Reinhard Bernhardt (1797- 1849). Mais, en science, il ne suffit pas d'affirmer une idée. Il faut encore apporter sinon des preuves du moins des éléments de démonstration. Or, de manière générale, les savants ne croyaient guère à ces transports par la glace. Les blocs étaient situés trop hauts en altitude ou trop loin des glaciers actuels. On n'imaginait pas que, dans des époques antérieures, les glaciers fussent énormes au point d'enfouir, par exemple, la vallée de Chamonix sous mille cinq cents mètres de glace et de s'allonger depuis les Alpes jusqu'à Lyon !

À ces scientifiques croyant au transport des blocs erratiques par les glaciers disparus il faut ajouter quelques paysans de Chamonix et autres villages car ils voyaient les glaciers actuels charrier des blocs. L'un d'eux va rester célèbre. Il s'agit de Jean-Pierre Perraudin habitant de la vallée de Bagnes en Suisse. Il était chasseur de chamois et, à cause de cela, il avait parcouru ses montagnes [SHSN, 1915]. C'était aussi un intellectuel ; il fut député au grand Conseil valaisan en 1840.

Les scientifiques les plus nombreux pensaient, avec Horace Bénédicte de Saussure et avec Elie de Beaumont, c'est-à-dire, avec deux des plus grands géologues français de l'époque, à un transport par de violents courants d'eau : les textes de la Bible relatifs au déluge n'étaient-ils pas ainsi validés ? Mais comment expliquer l'accumulation d'eau au sommet des montagnes pour justifier l'intervention, sur leurs pentes, de gigantesques et brutales débâcles liquides ?

En 1818, Ignace Venetz, un hydrogéologue, est appelé en consultation au glacier du Giétroz qui a avancé, barré une vallée et provoqué l'accumulation à l'amont d'une immense masse d'eau (c'est dans le Valais, non loin de ce qui deviendra la station de ski de Verbier). Venetz fait creuser un canal dans la glace pour assurer la vidange progressive de la retenue. Cela commence bien et le lac se vide notablement. Malheureusement, en s'écoulant, l'eau érode les parois du canal jusqu'à la rupture brutale du barrage le 16 juin 1818, à 16h30. Une vague de 20 à 30 millions de mètres cube d'eau chargée de glace, de rochers et de boue, se rue dans la vallée. Il y a 44 morts, les trois quart dans la ville de Martigny qui est atteinte 90 minutes après la rupture du barrage. L'intervention de Venetz sera contestée mais sans elle les dégâts auraient été encore plus grands. L'affaire a marqué durablement les esprits au point qu'un film racontant la catastrophe est sorti le 16 juin 2018, tout juste pour le 200^{ème} anniversaire de l'évènement (*titre : La débâcle du Giétroz*).

À la suite de l'accident, Venetz s'intéresse à l'avancée et au recul des glaciers et publie en 1821 un mémoire sur les variations de température dans les Alpes suisses. Il finit par croire à de fortes alternances climatiques et imagine que toute l'Europe a pu être couverte de glace une fois dans son histoire. Il l'indique en 1829 dans une réunion de la Société helvétique des Sciences naturelles, réunie au Grand-Saint-Bernard. Une telle hypothèse paraît si farfelue qu'elle ne provoque aucune réaction. Pourtant Venetz a de solides arguments. Il a compris que les glaciers n'ont pas laissé seulement comme traces

des blocs erratiques isolés. À leur base, ils enchâssent toutes sortes de cailloux qu'ils traînent sur le fond de leur lit, polissant ainsi les rochers et les striant dans le sens de l'avancement comme le ferait un papier de verre géant. En outre, ils déposent des moraines. Elles sont constituées des débris qui tombent, depuis les parois rocheuses, sur les glaciers. Elles s'accumulent devant la langue glaciaire, sur ses flancs et parfois au milieu quand deux ou plusieurs courants de glace se rejoignent¹.

Jean de Charpentier, est l'ami et le conseiller scientifique de Venetz. Conduit sur le terrain par ce dernier, il finit par être convaincu : seule l'existence ancienne de grands glaciers explique tous les faits d'observation. En 1834, au Congrès de Lucerne, Charpentier expose les idées nouvelles. Ses explications sont scientifiques, claires, précises. Avec élégance, il s'exprime comme s'il parlait seulement au nom de Venetz : « *Monsieur Venetz pense...* ». Le retentissement est considérable. L'année d'après, un résumé de la communication paraît dans les *Annales des Mines*, à Paris [CHARPENTIER (de), 1835]. En 1836, des extraits sont publiés en Allemagne et en Angleterre. À la suite de cela Charpentier prépare un ouvrage fouillé. Il s'intitulera : *Essais sur les glaciers et sur les terrains erratiques du bassin du Rhône*. Mais il paraîtra seulement en 1841.

Citons un seul argument de Charpentier, celui qui constitue la preuve la plus subtile. Quand deux courants d'eau transportant des cailloux se rejoignent pour former une rivière plus grande, les éléments grossiers qu'ils véhiculent se trouvent mêlés. Au contraire, s'il s'agit de deux glaciers, après leur réunion, les deux coulent côte à côte. Les blocs qu'ils abandonnent alors sur les flancs gauche et droit de leur vallée commune peuvent rester de natures pétrographiques différentes en relation avec la composition géologique des vallées glaciaires de l'amont, avant la jonction. Or c'est ce que l'on voit sur le terrain.

Louis Agassiz (1807-1873) est un élève de Charpentier. Il n'est pas géologue au départ mais scientifique généraliste comme il en existait à l'époque. Il obtient les titres de docteur en philosophie et docteur en médecine. Il s'intéresse à la paléontologie et aux reptiles. Ses maîtres lui donnent à étudier des poissons fossiles. Il en devient un spécialiste reconnu et définit pour eux un système de classement. Il classe aussi oursins et mollusques. Devenu professeur à Neuchâtel, il voyage en Europe et en Amérique, rencontre Cuvier et aussi Humboldt avec lequel il entretient par la suite une correspondance suivie. En mai 1837, Auguste de la Rive, membre de l'Académie de Genève, lui offre un poste de professeur dans la capitale suisse. Mais Agassiz refuse et reste fidèle à Neuchâtel.

Piloté en montagne par Venetz et Charpentier, Agassiz est impressionné par ce qu'on lui montre. C'est un homme décidé et rapide. Un biographe de Charpentier écrira de lui : *ses forces digestives pour les travaux des autres étaient quelquefois un peu trop robustes* [LUGEON, 1920]. Président de la Société Helvétique de Sciences Naturelles, Agassiz profite de son allocution introductive lors d'une réunion, le 24 juillet 1837, à Neuchâtel, pour se lancer – hors sujet – dans une longue communication sur les glaciers. La première partie de son discours est sans faille et nourrie de ce qu'on lui a montré. Il explique que les blocs erratiques sont liés aux glaciers qui ont laissé d'autres marques :

¹ Mais, si roches striées, moraines et blocs erratiques avaient trouvé leur explication, il restait à comprendre l'origine de ce que l'on appelait à l'époque « diluvium alpin ». Il s'agissait de dépôts faits de galets mélangés à des argiles rougeâtres et à des sables. Autour des Alpes, on les trouvait partout dans les fonds de vallées ou en position de plateau. Et on ne voyait que l'action de l'eau, pour expliquer la forme arrondie des cailloux et la stratification des dépôts. On imaginait une mise en place en quelques jours de déluge alors qu'il aurait fallu considérer un lent alluvionnement agissant pendant des dizaines de milliers d'années.

les moraines, les roches polies et les roches striées. Il indique que l'hypothèse de grands déluges d'eau ou de boue ne tient pas car il n'en reste aucune trace. En revanche, il ne peut anticiper les découvertes qui interviendront seulement par la suite et ses reconstitutions paléoclimatiques et géologiques laissent à désirer. Il imagine une période de grands froids survenue avant la surrection des Alpes. Il croit, sans preuves, qu'une calotte glaciaire a recouvert toute l'Europe dans le passé (le géologue allemand Albrecht Reinhard Bernhardt, 1797-1849, l'avait postulé avant lui, en 1832). Sur cette calotte, Agassiz imagine que les blocs erratiques auraient glissé comme sur un toboggan, jusqu'aux régions méditerranéennes. En fait, il n'a pas compris comment les glaciers se forment, avancent, transportent et fondent à l'aval.

Les assistants sont sous le choc car beaucoup croient au déluge d'eau. En plus, à l'époque, les géologues estiment que la Terre se refroidit régulièrement depuis l'ère primaire. Or Agassiz prétend qu'elle s'est réchauffée depuis la glaciation !

Le lendemain, 25 juillet 1837, un certain nombre de contradicteurs se font entendre en particulier Léopold von Buch (1774-1853) et Jean-André Deluc (1727-1817). Mais, n'osant probablement pas s'attaquer directement au président de la Société, ils s'en prennent à Charpentier et Venetz... qui ont les mêmes idées, l'antériorité en plus. Les discours sont courtois et il faut peut-être faire litière des indications suivant lesquelles, pendant le discours d'Agassiz de la veille, des participants auraient quitté la salle, horrifiés en invoquant à leur secours les mannes d'Horace Bénédicte de Saussure. La bataille était donc engagée entre les partisans du déluge, les « diluvianistes » et les partisans des glaciers anciens, les « glacialistes ». Le combat devait durer plus d'un demi-siècle [FALSAN et CHANTRE, 1879].

En 1867, Charles Martins, professeur à Montpellier et Membre de notre académie, fera le bilan des idées de l'époque dans la revue des Deux Mondes. Il écrira :

« Mal venues auprès des princes de la science, dont elles troublaient la quiétude en ébranlant leur empire, ces nouveautés rencontraient chez le peuple scientifique des ennemis non moins redoutables : la paresse d'esprit, qui répugne à l'effort, et l'ignorance absolue des effets d'un nouvel agent différent de l'eau, de l'air et du feu, qu'on connaissait seuls auparavant ».

À la suite de cela Agassiz se rend compte qu'il est encore trop ignorant sur le sujet. Il veut en savoir plus. Humboldt ne l'encourage pas dans cette reconversion vers la glaciologie, il lui écrit :

« Je pense que vous devriez concentrer, cher ami, vos forces pécuniaires et surtout vos forces morales sur ce bel ouvrage des « Poissons fossiles ». Vous rendriez par là plus de services à la géologie positive que par ces considérations générales (un peu glaciales) [sic] sur les révolutions du monde primitif, considérations qui, vous le savez bien, ne laissent de conviction qu'à ceux qui les enfantent ».

Le destinataire n'écoute pas car il comprend l'enjeu scientifique considérable : la planète aurait-elle subi une modification climatique majeure, catastrophique, expliquant par exemple la disparition des mammoths et celle d'autres espèces ? L'étude des glaciers pourrait lui apporter une grande notoriété.

Agassiz partage ses idées avec le botaniste allemand Friedrich Schimper (1803-1867), son ami intime depuis leurs études communes à l'université d'Heidelberg. Ce dernier – nous sommes toujours en 1837 - invente l'expression « âge de glace ». Elle fera florès jusqu'à inspirer de nos jours les studios Wald Disney pour le titre d'une série de dessins animés. Par ailleurs, Agassiz, grâce à l'étude des poissons fossiles, est en contact avec le géologue britannique Charles Lyell (1797-1875) et avec le paléontologue William Buckland (1784-1856), de même nationalité et doyen de Westminster. Agassiz les rejoint en Angleterre où il leur montre des blocs erratiques, des moraines et des roches polies. Ces savants sont alors convaincus de l'existence ancienne d'une calotte glaciaire

qui a recouvert toute l'Europe. Or, par leurs écrits, ils apparaissent comme les deux plus grands géologues européens de l'époque.

Agassiz est jeune et sportif. Il a à peine plus de 30 ans. Il multiplie les excursions en haute montagne. Il est amical, charismatique même ; des équipes importantes et largement bénévoles l'accompagnent. En 1838 et 1839, les efforts se concentrent sur le glacier de l'Aar. Les savants ont l'idée de bivouaquer non pas sur la terre ferme mais sur une moraine médiane c'est-à-dire sur un radeau de blocs portés par la glace. Là, ils s'abritent sous une énorme dalle schisteuse plus ou moins bien bloquée par des murs rapidement montés en pierres sèches. Comme le glacier bouge, il y a des craquements, des fissurations. La nuit, à plusieurs reprises, les explorateurs craignent de finir écrasés. Mais leur situation inconfortable leur permet de constater et même de mesurer la vitesse de déplacement de leur cabane et des rochers positionnés sur le glacier. C'est de l'ordre de 50 à 80 m par an suivant les endroits. La bicoque, par dérision, est nommée « l'hôtel des Neuchâtelois ». Les journaux en parlent, les journalistes s'y précipitent. Dans la Revue de Géographie Alpine, Jules Blache le rappelle en 1929. Il écrit qu'à l'époque : « *Les savants, les hommes politiques viennent en pèlerinage chez ces dévots des glaciers* ».

En 1840, Agassiz publie *Études sur les Glaciers* (350 pages). C'est un an avant la sortie du livre de Charpentier à qui Agassiz devait les idées nouvelles.

Le texte est accompagné d'un atlas de 32 planches dessinées et gravées par Joseph Bettanier qui travaille à Neuchâtel dans l'atelier de lithographie appartenant à Hercule Nicolet. Les dessins sont un peu ratés ou pour le moins naïfs et peu scientifiques mais ils ouvrent au lecteur une fenêtre sur la haute montagne et sur le passé de la Terre. Le succès est immédiat. Concernant les roches erratiques, Agassiz indique superbement :

« *Elles nous permettent de suivre comme à la piste, les anciens glaciers jusqu'en des lieux où on ne les aurait jamais soupçonnés* ».²

À la fin du mois d'août 1841, Agassiz et quelques compagnons réussissent l'ascension de la Jungfrau, alors qu'il a neigé et qu'ils n'ont à peu près pas d'équipement technique. C'est un exceptionnel et dangereux exploit.

Agassiz eut son vulgarisateur personnel. Ce fut Edouard Desor, géologue suisse d'origine française (village de Marsillargues), secrétaire et collaborateur. En 1844, ce dernier publie toute l'aventure en 680 pages, chez des éditeurs à Neuchâtel et Paris. Il cite Töpffer dont la vie a été évoquée à l'Académie dans une autre conférence [LEGROS, 2017]. Nous sommes dans une période où les Alpes sont très à la mode. Dans ce contexte, des mécènes soutenaient Agassiz dont les moyens propres étaient très limités.

Mais Agassiz, trop vite célèbre, avait des défauts. Il considérait comme démontrées les nombreuses idées qu'il émettait. En particulier, il ne s'était pas rangé derrière l'hypothèse raisonnable émise avant lui par Horace Bénédicte de Saussure et par le Chanoine Rendu : les glaciers avancent du fait de la pesanteur parce qu'ils possèdent une certaine fluidité renforcée par l'eau formant une mince pellicule entre la glace et l'encaissant rocheux. Pour Agassiz, comme d'ailleurs pour Charpentier, les glaciers se dilataient quand venait à geler l'eau qui se glissait dans les fissures. Cela entraînait leur gonflement et, en particulier, leur déplacement vers l'aval³.

² Les géologues modernes se sont efforcés de déterminer l'ampleur et le sens d'écoulement des grands glaciers du passé en exploitant toutes leurs traces (blocs erratiques roches striées, moraines...). Ils ont par exemple montré que la région de Lyon avait été atteinte moins par le glacier circulant dans la vallée du Rhône que par celui de l'Isère [COUTTERAND *et al.*, 2009].

³ L'écosais James-David Forbes, qui avait parcouru les Alpes avec Agassiz et qui l'avait même accompagné jusqu'au sommet de la Jungfrau en 1841, n'eut pas de mal à démontrer dans son ouvrage, paru en 1843, que l'hypothèse ne tenait pas car elle ne collait pas avec de nombreux faits

Par la suite, en septembre 1846, Agassiz émigra aux États Unis où il devint professeur de géologie et paléontologie à Harvard, dans le Massachusetts. Amusé ou vengeur, il écrit alors à Elie de Beaumont qui fut diluvianiste convaincu : « *Ici toutes les roches sont polies* [par les glaciers] ».

Il s'y remarie. Avec sa femme, Agassiz réalise des voyages d'étude, écrit des livres, ramène des collections naturalistes. Pour les exposer, ils créent ensemble le musée de zoologie d'Harvard.

Il revient ensuite à ses amours premières : la classification d'êtres vivants. Mais il a l'imprudence de s'intéresser à l'homme, en particulier aux noirs qu'il découvre en arrivant en Amérique. Il compare la variété des types humains à celle des races de singes ! Juste après la guerre de Sécession (1861 à 1865) il s'interroge, comme les autres intellectuels américains, sur l'avenir des esclaves libérés. Il est clairement pour une sorte d'apartheid : les noirs doivent rester au sud du continent dans des climats chauds et les blancs au nord, dans des climats plus tempérés. Il est très défavorable au métissage. Ses lettres, conservées et publiées par sa femme, ont été expurgées [CARY-AGASSIZ, 1887]. Mais les versions originales, exhumées par un de ses successeurs à Harvard, révèlent ce qu'il faut bien appeler du racisme [GOULD, 1982]⁴.

Ses idées lui valent actuellement, dans les Médias, de violentes attaques rétrospectives. En septembre 2018, on a débaptisé l'allée qui portait son nom au sein de l'Université des lettres de Neuchâtel. Agassiz laisse donc la place à « *Tilo Frey, femme, métisse et pionnière de l'égalité* ». En outre, une pétition a été lancée pour demander aux Suisses de débaptiser le pic Agassiz dans les Alpes Bernoises. Sans succès jusqu'à maintenant.

D'ailleurs, pour priver rétrospectivement Agassiz de toute sa gloire, il y aurait fort à faire. Son nom est celui de plusieurs glaciers, montagnes, rues, écoles, médailles, etc. Cela intéresse même un relief sur la Lune et un cratère de Mars baptisé en l'honneur de « *l'américain naturalist Jean L. Agassiz* »⁵.

La statue d'Agassiz orne l'entrée de l'université de Stanford en Californie ; à Harvard le théâtre porte le nom d'Elizabeth Cary-Agassiz.

Dans chaque discipline, il se trouve à un moment donné un homme pour rassembler les connaissances de l'époque, en faire la synthèse et les diffuser au grand public (Haroun Tazieff, Yves Coppens et tant d'autres). Il s'agit toujours de personnages importants, esprits brillants, souvent universitaires, ayant accès aux journaux scientifiques et à la Presse. Même avec la plus grande honnêteté, même avec hommage rendu chaque fois aux prédécesseurs, ce type de scientifique monopolise l'attention via ses discours et écrits. La postérité oublie souvent les autres. En glaciologie, Agassiz fut celui-là⁶.

L'ouvrage en anglais du professeur de géologie écossais Jame Giekie (1839-1915), publié en 1878 est fascinant. Il mentionne les théories qui deviendront les vérités

d'observation. Par exemple, si Agassiz avait eu raison, les glaciers auraient cessé d'avancer l'hiver puisqu'à cette saison, il n'y a pas de phénomène dégel-regel [FORBES, 1843]. Les relations entre les deux hommes se distendirent.

⁴ Certains ont vu comme une juste punition, le renversement de la statue d'Agassiz par le tremblement de terre de San Francisco en 1906.

⁵ Toutes choses égales par ailleurs, pour être célèbre en sciences, il vaut mieux être américain...

⁶ Mais Venetz fut probablement le plus grand des glacialistes. Comme suite à des études de terrain très précises, en 1857 et 1858, il prend des notes numérotées dans lesquelles il explique avoir constaté quatre extensions glaciaires successives ce qui est magnifiquement vu. Mais il meurt en avril 1859, à l'âge de 71 ans. Ses compagnons de la Société helvétique des sciences naturelles ont publié son manuscrit en 1861, heureusement pour l'histoire de la glaciologie. Dans celui-ci, la dernière phrase de Venetz est la suivante : Mais quelle est la cause de ces différentes extensions ?

de la géologie moderne y compris la dérive des continents. Mais manquent encore des preuves.

Ensuite, les connaissances concernant les climats du Quaternaire vont avancer grâce aux Allemands Penck et Brückner. En 1909, ils publient un ouvrage dont le titre traduit est : *Les Alpes à l'âge de glace*. Leurs travaux démontrent l'existence de plusieurs glaciations et intègrent le diluvium alpin, les soi-disant terrains du déluge, dans les explications. Tout cela va constituer, pendant un demi-siècle, l'alpha et l'oméga des connaissances relatives au sujet. Penck et Brückner eurent des précurseurs, Venetz bien sûr, mais aussi le suédois Otto Torell (1828-1900) qui ne publia que des notes manuscrites.

Penck et Brückner ont constaté qu'à l'amont, dans les vallées alpines, les alluvions des rivières et ruisseaux se raccordent aux moraines glaciaires. C'est compréhensible : en fondant progressivement à son extrémité, un glacier génère un ruisseau qui emporte des éléments de la moraine frontale. À l'aval, comme les bras des cours d'eau divaguent avec le temps, les matériaux fournis par les glaciers sont étalés et finissent par emplir de vastes vallées. Mais si le climat se réchauffe, le glacier meurt et n'alimente plus le cours d'eau en éléments à transporter. Et l'eau de fonte, qui est présente alors en énorme quantité, se rue à l'aval, recréant ses apports antérieurs. Évidemment, elle n'enlève pas tout. En général, sur les flancs des vallées, il reste des marches d'escalier, témoins de niveaux d'accumulation plus élevés et anciens. Ce sont les terrasses fluviatiles.

Pour Penck et Brückner, les quatre niveaux de terrasses généralement observés sur les flancs de nos vallées européennes correspondent donc à autant de périodes glaciaires. Les auteurs leur ont donné le nom de rivières bavaroises. Ils les ont choisies petites pour marquer des surfaces limitées et bien typiques de ces phénomènes de nivellement. Ces rivières sont donc un peu difficiles à trouver. Trois sont des affluents du Danube (région de Offingen et de Oberdischingen) ; la quatrième est un affluent de la Meuse (région de Kempen). En bref : « Günz, Mindel, Riss, Würm » sont donc à la fois des cours d'eau, des niveaux de terrasses et des glaciations. Dans les paysages, les aplanissements du Günz sont les plus hauts, ceux du Würm les plus bas.

On était donc passé d'un âge de glace, à quatre, voire six en certaines contrées !⁷

2. Origine et rythme des glaciations

Dès le milieu du 19^{ème} siècle et même avant, des mathématiciens avaient mis en évidence quelques irrégularités dans la rotation de la Terre et dans sa trajectoire autour du Soleil. Ces savants avaient pensé que cela pouvait faire varier l'irradiation reçue et donc la température. Parmi eux, il faut citer au moins le français Joseph-Alphonse Adhémar (1797-1862) et l'écossais James Croll (1821-1890). Leurs idées étaient fort bonnes dans le principe mais leurs calculs étaient plus ou moins faux et de toute manière impossibles à valider à l'époque par d'autres approches.

En 1920, puis en 1941, c'est-à-dire peu après les travaux de Penck et Brückner, le serbe Milutin Milanković, encore orthographié Milankovic ou Milankovitch (1879-1958), précise les choses. Il publie en français et en France, la première théorie

⁷ Les glaciations n'ont pas affecté que l'Europe. Il a donc fallu trouver les correspondances entre les systèmes de terrasses-glaciations des différentes régions du Monde. Par exemple le Würm est l'équivalent du Wisconsinien en Amérique du Nord et du Vistulien en Scandinavie.

expliquant l'entrée périodique de la Terre en glaciation. Le mécanisme, légèrement amendé par la suite, est le suivant :

En hiver, la neige tient naturellement en montagne. Donc, une glaciation peut s'enclencher dans les montagnes de l'hémisphère nord si l'été est assez froid pour que la neige ne fonde pas complètement en altitude et s'accumule, siècles après siècles, sous forme de glace. Or, toujours d'après l'auteur cité, trois paramètres cosmographiques modifient, au cours des temps géologiques, les quantités de chaleur fournies par le Soleil à l'hémisphère nord. Le minimum d'énergie est reçu quand :

- la terre est très redressée sur son axe car alors les rayons du Soleil restent un peu obliques à la belle saison ; est donc en cause *l'inclinaison sur l'écliptique* ; elle varie avec un cycle de 41 000 ans.
- Il y a aussi diminution de l'énergie reçue si, l'été, c'est-à-dire la saison où l'hémisphère nord regarde le Soleil, se produit quand la Terre est loin de son étoile et se trouve donc en bout d'ellipse (aphélie). À cause de la *précession des équinoxes*, cela se produit tous les 26 000 ans en moyenne,
- Enfin, dans la durée, l'orbite terrestre est plus ou moins allongée ou circulaire (*excentricité*). L'allongement renforce le précédent facteur en augmentant encore la distance Terre-Soleil quand l'été survient à l'aphélie. Ce cycle-là est de 100 000 ans.

Les trois phénomènes sont indépendants et coïncident ou pas. Mais, dans le dernier million d'année, ils se sont superposés à peu près tous les 100 000 ans. La terre aurait subi des glaciations à ce rythme. En revanche, entre -1 et -2 millions d'années, la périodicité combinée aurait été de 40 000 ans. Au total, de nombreux épisodes glaciaires se seraient succédés pendant le Quaternaire.

Les travaux du théoricien Milanković ne passionnèrent pas les esprits. Passer de 4 périodes froides à 50 voire 60, cela faisait beaucoup de glaciations à avaler d'un seul coup. Et elles n'auraient pas laissé de traces ?! En plus, théorie n'est pas démonstration ! Dans l'ouvrage « *L'homme et la Terre* » publié en 1974 par Larousse et Paris-Match, il est écrit en conclusion du chapitre sur les glaciers « *Aucune théorie n'a réussi à expliquer complètement les soudains changements de climat survenus dans le dernier million d'années de l'histoire terrestre* » [GROUEFF, 1974].

Mais des faits allaient être établis qui confortent les idées de Milanković. En 1959, les Américains se sont installés au Groenland en un lieu dit « Camp Century ». Là, ils ont creusé une base secrète sous la glace avec pour objectif (ensuite abandonné !) d'y menacer les Russes avec des engins nucléaires. Un carottage vertical de glace a été réalisé. Il a été exploité par le Danois Willi Dansgaard qui dès 1953 avait inventé la notion de *thermomètre isotopique* et l'a perfectionnée par la suite.

L'eau, on le sait contient de l'oxygène qui peut être de deux types : oxygène « 16 », ordinaire, à 8 protons et 8 neutrons et oxygène « 18 » à 8 protons et 10 neutrons. Ce dernier, le ^{18}O , est plus lourd. Lorsque l'eau passe à l'état vapeur, elle s'appauvrit en ^{18}O . Inversement, quand il y a condensation sous forme de pluie ou neige, les précipitations sont plus concentrées en ^{18}O que la vapeur dont elles sont issues. Quand l'air monte vers les pôles, il fait de plus en plus froid et il y a de plus en plus de condensation et donc de moins en moins d' ^{18}O dans les nuages. Au bout du compte, on peut établir une relation assez fiable liant linéairement les teneurs en ^{18}O de la glace et la température de formation correspondante. Comme ces teneurs en ^{18}O sont très faibles, on ne les exprime pas en valeur absolue, mais en pourcentage par rapport à une valeur standard.

La glace naturelle est, on le sait, de la neige qui, par compaction, change de structure. Dans une carotte de glace prélevée de haut en bas dans un glacier, on peut identifier, de plusieurs façons, l'alternance des périodes de dépôt de la neige en surface (été versus hiver). En effet les teneurs en divers isotopes, teneurs en poussières, densité

de la glace varient en fonction des saisons. Sous certaines conditions, on peut compter les dépôts successifs et ainsi avoir une mesure du temps. Une autre façon de mesurer l'âge de la glace est d'utiliser la désintégration de l'uranium présent dans les poussières piégées. En plus, certains événements majeurs sont retrouvés dans les glaces accumulées, par exemple les cendres d'éruptions volcaniques datées. Par ailleurs, dans la glace, on peut prélever les bulles d'air et mesurer leur concentration en CO₂. C'est celle de l'atmosphère au moment où la neige est tombée. Au total, les glaces sont des archives climatiques extraordinaires. Elles permettent de savoir quelle température et quelle atmosphère précise on avait à telle date donnée du passé.

Bien sûr, l'épaisseur de la glace n'est pas infinie. On remonte dans le temps jusqu'à atteindre le soc rocheux, sous le glacier. C'est environ à 3000 m de profondeur au Groenland ce qui correspond à 125 000 ans en arrière (sondage NorthGRIP).

Dans ce contexte, la calotte glaciaire du continent Antarctique, plus épaisse, est d'autant plus intéressante et maintenant prospectée. Le climat étant plus sec, les dépôts annuels y sont minces. Là, 3620 m de profondeur offrent 800 000 ans de recul. Certes l'altitude des stations de sondage ne dépasse pas 3500 m alors que l'épaisseur de glace est supérieure aux mêmes lieux. En effet, à la base de la calotte, le continent a sa surface sous le niveau de la mer. Cela n'obère pas l'intérêt du Groenland, bien au contraire car on peut faire des comparaisons entre les climats passés des deux hémisphères. Sont-ils corrélés, décalés ou opposés ?

Réaliser un carottage dans ces milieux froids est difficile. D'abord, il faut acheminer des derricks et toutes sortes de matériels lourds. Ensuite, on descend seulement de quelques dizaines de mètres par jour. Il faut donc une installation pérenne pour les hommes : habitations, chauffage, ravitaillement... Enfin, la glace est fluide et le sondage se refermerait si on ne prenait pas les dispositions nécessaires. Bref, ces travaux sont couteux et délicats.

Compte tenu de l'importance qui est actuellement accordée aux problèmes de changement climatique, les moyens financiers nécessaires ont été réunis grâce à l'association de plusieurs nations. En conséquence, les sites de percement des calottes glaciaires sont nombreux, les plus célèbres étant Vostock, GRIP, EPICA au dôme C (*European Project for Ice Coring in Antarctica*)...

Ce qui a été dit plus haut concernant l'oxygène 18 est vrai aussi concernant le deutérium c'est-à-dire l'isotope lourd de l'hydrogène. Plus précisément les glaces des régions froides sont moins riches en deutérium et cela aussi peut constituer un thermomètre isotopique.

Mais ce n'est pas tout. Puisque les glaces polaires s'appauvrissent en oxygène 18 quand il fait froid, cela veut dire que dans le même temps, les océans s'enrichissent en ce même isotope. En effet, les grandes réserves d'eau sur la planète sont les glaciers et les mers. Or, de petits coquillages, les foraminifères, construisent leur coquille avec du calcaire (CO₃Ca). Ces organismes ont donc une teneur variable en oxygène 18. En mourant, ils stratifient dans les boues du fond des mers. Il y a donc, là aussi, de quoi reconstituer des thermomètres isotopiques sur des durées qui montent cette fois à presque 6 millions d'années. Ceci a été compris par Cesare Emiliano dès les années 50.

Les variations des teneurs en oxygène 18 et deutérium des glaces antarctiques et des fonds marins permettent de reconstituer huit grandes périodes froides dans la dernière partie de l'ère quaternaire. Cela correspond exactement aux prévisions de Milutin Milanković faites sur la base de considérations astronomiques, soit une glaciation tous les 100 000 ans. Celui-ci a donc connu une célébrité tardive, après sa mort en fait. En plus, les strates que l'on trouve partout sur la Terre, dans les marnes et calcaires marneux, longtemps inexplicables, sont maintenant rapportées à des oscillations climatiques liées aux cycles de Milanković. Cela permet d'affiner les chronologies

géologiques locales. La NASA a pu écrire que ce savant avait sa place dans le panthéon des plus grands scientifiques des Sciences de la Terre.

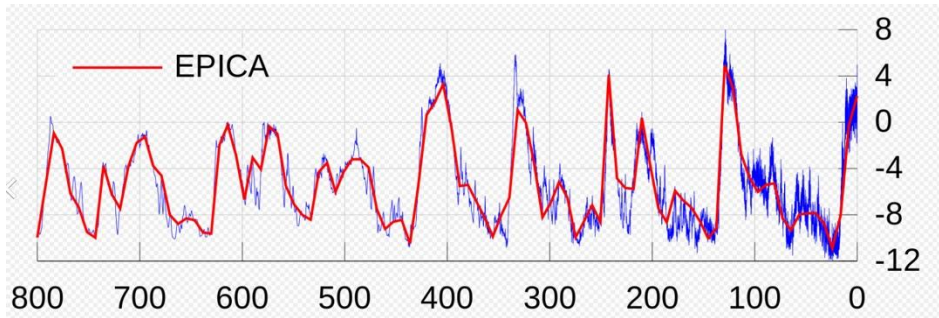


Figure 1 : Valeurs de températures trouvées pour le sondage EPICA en Antarctique.
Abscisse : dates en milliers d'années avant l'actuel ; ordonnée : différences de température par rapport à la valeur actuelle ; en bleu mesures, en rouge courbe lissée. Source : Wikipédia d'après Autopilot- travail personnel, CC BY-SA 3.0.

Mais tout n'est pas clair. Si l'hémisphère nord regarde moins le soleil, c'est le contraire pour l'hémisphère sud qui devrait alors se réchauffer. En fait, les variations de l'énergie reçue par la Terre au total ne dépendent que de l'excentricité et sont faibles : soit 2 ou 3 $W.m^{-2}$ seulement sur un total valant de l'ordre de 240 $W.m^{-2}$ et par an. Cela suffit-il pour expliquer des glaciations ? Il faut alors invoquer des effets de feed-back. Il y en a semble-t-il deux principaux. D'une part, en se développant, la calotte glaciaire de l'hémisphère nord renvoie la lumière du soleil ce qui accroît son refroidissement. D'autre part, en se refroidissant, les océans peuvent absorber davantage de gaz carbonique ce qui diminue l'effet de serre et donc aide à la chute des températures. Dans un célèbre article, trois américains ont dit que les variations de l'orbite de la Terre étaient moins les causes que le régulateur (pacemaker) des variations de température.

Les rapports O^{18} sur O^{16} montrent qu'aux oscillations majeures de température s'ajoutent des oscillations de détail plus ou moins importantes mais récurrentes. À la limite, on peine pour savoir si telle pic de température correspond à une période interglaciaire ou simplement à une période moins froide au sein d'une glaciation. Les calottes des pôles avaient-elles disparu à l'époque ? C'est pourquoi, on préfère s'en tenir à une vision plus descriptive et distinguer seulement les *stades isotopiques ou Marine Isotope Stage (MIS)*. Ils sont caractérisés par des rapports $^{18}O/^{16}O$ à peu près stables donc par des températures à peu près constantes. Dans les derniers 900 000 ans, c'est-à-dire pour 8 glaciations, on en compte 20 (et 100 pour tout le Quaternaire).

Il reste à comprendre le pourquoi de toutes ces variations thermiques de détail qui s'ajoutent aux grandes oscillations dont rend compte le modèle de Milutin Milanković. On a identifié au moins quatre causes :

- Les irrégularités de la trajectoire de la Terre sont liées à l'attraction des autres planètes, certaines parce qu'elles sont proches (Vénus et Mars), d'autres parce qu'elles sont grosses (Jupiter et Saturne). Le tour de la question n'a pas été fait même si des scientifiques comme André Berger y travaillent. Aux trois cycles détectés par Milanković, il convient d'en ajouter un quatrième de 405 000 ans et peut-être un autre de 9 millions d'années !
- En octobre 2019, l'université de Lund, en Suède, a publié un article expliquant la glaciation de l'Ordovicien, il y a 466 millions d'années, par la collision de deux corps célestes. Ils auraient créé un énorme nuage de poussière dans lequel la Terre aurait tourné quelque temps. Certes, l'Ordovicien c'est l'Ère primaire et non pas

- quaternaire, mais cela illustre le rôle possible des poussières qu'elles viennent du ciel ou des volcans terrestres.
- La même année, certains chercheurs ont identifié sous les glaces du Groenland les traces d'une météorite. Elle aurait déstabilisé la calotte glaciaire et accéléré le réchauffement à la fin du Würm.⁸
 - Des phénomènes terrestres interviennent en sus. Par exemple, à la fin du Würm, on a observé un retour temporaire du froid, le Dryas. Le nom vient de Dryas octopetala, petite fleur qui pousse en haute montagne. La plus probable des explications est la suivante : en se retirant, la calotte glaciaire nord-américaine a créé à son pied d'immenses lacs qui se déversaient dans le Mississippi, puis se retirant encore, elle a dégagé le passage vers le Saint-Laurent dans lequel les lacs se seraient vidangés rapidement. Cela aurait arrêté le Gulf Stream dont le fonctionnement normal est réglé par de subtiles nuances de salinité et de température dans l'Atlantique. L'Europe aurait été brutalement refroidie. Enfin le courant marin aurait repris sa marche normale, 2000 ans plus tard. L'Europe se serait alors réchauffée brutalement, en très peu d'années, avec effet de rattrapage. On notera que l'un de ces anciens lacs fut nommé « lac Agassiz ».

Chez nous en montagne, on observe surtout, pour ne pas dire seulement, les moraines externes des deux dernières glaciations Riss et Würm. C'est pendant le Riss que les glaciers sont venus jusqu'à Lyon. En revanche, au-delà des zones antérieurement englacées, les terrasses fluviatiles plus vieilles que le Riss n'ont pas disparu car les fleuves se sont trop enfoncés avec le temps pour que des crues, même énormes, puissent nettoyer les vallées de toutes les traces anciennes. C'est donc paradoxalement, non pas dans les zones antérieurement englacées, mais à leur aval, que les traces des glaciations ont été les mieux conservées. Dans le Monde, on a identifié quelques cours d'eau présentant une bonne douzaine de terrasses correspondant à des stades isotopiques froids sinon glaciations indépendantes [BRIDGLAND ET AL, 2009]. C'est le cas de la Tamise, de certains affluents de la Volga, du Colorado, de l'Oronte près de Homs en Syrie, etc. La conservation de ces nombreux niveaux d'alluvionnement a été favorisée par des mouvements de la croute terrestre qui ont fait remonter les socles rocheux et ont donc offerts en permanence aux cours d'eau des matériaux neufs à inciser ou redistribuer. Dans ces cas-là, les terrasses les plus récentes semblent liées à des cycles de 100 000 ans ; les plus anciennes à des cycles de 41 000 ans. Les hypothèses de Milanković sont encore une fois confortées.

Voyons maintenant plus en détail quelles traces ces phénomènes nous ont laissées.

3. Traces des glaciations dans les paysages

On se limitera à l'essentiel ; beaucoup de formes morphologiques liées au froid seront oubliées. Pour bien voir, il faut distinguer les espaces glaciaires, là où les glaciers sont passés et les espaces périglaciaires correspondant à des zones non englacées mais soumises à des froids intenses. Mais les deux vont ensemble. En effet, les fragments de

⁸ C'est l'occasion de remarquer que certains changements climatiques majeurs, subis par notre planète au cours de sa longue histoire, ont pour origine des chutes de très grosses météorites.

roches arrachés aux parois des montagnes par desquamation tombent sur les glaciers qui les emmènent pour former des moraines à l'aval.

D'après les travaux des géomorphologues du CNRS de Caen, l'influence du froid n'est pas prioritairement lié aux phénomènes de gel – dégel de l'eau dans les fissures car même des matériaux imperméables sont attaqués. Ce qui compte c'est la différence de température entre la surface de la pierre et l'intérieur. En hiver, au soleil, une surface bien exposée peut atteindre +25 ou +30 degrés alors que le reste de la matière minérale est encore à une température négative. Il y a dilatation différentielle. Avec le temps, il en résulte des cassures. Les parois reculent et des débris tombent sur les glaciers.

Des gros blocs peuvent se fendre. D'autres, à force de s'éplucher en périphérie, disparaissent et laissent la place à des fleurs de pierres anguleuses. Si on est dans un contexte où les éléments grossiers sont de diverses natures pétrographiques, chaque fleur de pierre a sa couleur propre. Dans les Alpes, certains spécialistes reconnaissent la trace de blocs erratiques aux petits pierriers qui les ont remplacés localement [BEAUDEVIN, 2012].

Le terme moraine est d'origine vernaculaire. Il était employé par les paysans de Chamonix et il a été pris en compte par Saussure dans le premier tome de ses voyages dans les Alpes (1786, p. 455). Ces moraines sont aisément reconnues lorsqu'elles sont fraîches et situées à proximité du glacier qui les a formées. Les moraines sont moins faciles à identifier quand le glacier a disparu et qu'elles ne sont plus que de vagues collines plus ou moins élevées et scindées par les cours d'eau. C'est pourquoi on a mis tant de temps à les reconnaître dans la région de Lyon. Mais alors, il faut observer leur composition : une moraine est l'accumulation de débris de toutes tailles, moins arrondis que des galets fluviaux et de natures pétrographiques mélangées.

En plus de transporter des matériaux, le glacier agit comme une sorte de ponceuse. Il polit les rochers sur lesquelles il passe, nous l'avons dit. C'est souvent spectaculaire. Les stries qui demeurent indiquent la direction du déplacement des glaces.

Si on prend un peu de recul, on voit des creux et des bosses. Le grand Horace Bénédicte de Saussure a donné le nom de « roches moutonnées » à ces formations car elles dessinent collectivement comme les dos d'un troupeau de moutons et ressemblent aussi aux perruques ondulées du grand siècle (tome 4, p. 313, région de Martigny). Louis Figuier, membre de notre académie, a illustré cela dans son ouvrage « La Terre avant le déluge » (1863).

Si on prend encore du recul, on observe que tout le paysage revêt un aspect raboté voire lissé. C'est particulièrement visible sur les matériaux durs et à grain fin, les granites par exemple. C'est moins net en zone calcaire car la roche a tendance à se déliter et les blocs, au lieu de se polir sur place, sont emportés. Cependant, même dans ce cas, on subodore le passage antérieur du glacier.

Mais il n'y a pas aplanissement. Le glacier manque de plasticité et se comporte un peu comme une automobile arrivant trop vite sur un ralentisseur. L'obstacle est heurté à l'avant et à peine effleuré à l'arrière. Finalement, il n'est pas supprimé. De même qu'il décolle sur les points hauts, le glacier s'écrase dans les points bas dont il peine pour s'extraire, toujours à cause de sa faible plasticité. En conséquence, il respecte les bosses, donc les passages durs et hauts de sa vallée, tandis qu'il agrandit les creux. Il en résulte des vallées glaciaires caractéristiques faites de verrous (les bosses) et d'ombilics (les creux). Après la disparition des glaciers, les ombilics se remplissent d'eau et deviennent des lacs. Souvent il s'agit de petits trous d'eau successifs, plus ou moins ronds et alignés comme les perles d'un chapelet. Dans le monde anglo-saxon, on les nomme alors « *pater noster lakes* ». Mais parfois les lacs sont plus considérables (lac Léman, lac d'Annecy,

Lac du Bourget). Ils étaient encore bien plus grands lors de la fusion des glaces. En effet, ils rétrécissent avec le temps car leur fin naturelle est de se remplir de sédiments.

Les glaciers rabotent et lissent aussi le flanc de leurs vallées qui sont alors qualifiés de murs d'auge. Il en résulte, le profil caractéristique en U que tout le monde connaît.

Mais, même pendant les grandes glaciations, certains sommets continuaient d'émerger. Ils n'ont pas été polis. Bien au contraire, soumis à d'intenses phénomènes de gel – dégel faisant éclater leurs parois, ils se sont aiguisés. Ainsi reconnaît-on facilement dans les Alpes les formes arrondies des zones autrefois englacées et les formes anguleuses qui émergeaient de la calotte glaciaire. On les appelle *nunataks*. C'est un mot esquimau. La limite basse des nunataks est aussi la limite haute de l'ancienne calotte glaciaire. C'est la *trimline*.

Un glacier, nous l'avons vu, peut faire barrage et bloquer une rivière. S'il fond par à-coups, le barrage s'établit successivement à des niveaux de plus en plus bas, déterminant derrière lui autant de niveaux d'alluvionnement. Dans ce cas, le phénomène ne matérialise pas plusieurs glaciations mais des stades de déglaciation échelonnés dans une brève période de temps. On parle de terrasses de Kame. À Thonon-les-Bains, on observe sur la rive gauche de la rivière Dranse de magnifiques terrasses de kame bien étagées et soulignées par des ruptures de pente boisées. Elles sont 13 ; c'est le record de France ! Toutes sont très récentes et contemporaines des soubresauts thermiques de la fin du würm, dernière période froide subie.

Les glaciers meurent lentement. À leur surface, les débris se concentrent et la glace disparaît. En profondeur, elle est associée en très forte proportion, à des graviers, à des cailloux ou à des blocs. On parle de glacier rocheux. Il garde des propriétés plastiques et descend lentement les pentes au rythme de quelques centimètres par an. À l'échelle près, on dirait de la guimauve ou du caramel mou qui se rassemble au fond d'un récipient. Partout ce sont des rides, des boursouflures, des étirements. L'agonie du glacier peut durer longtemps, quelques milliers d'années sans doute car la glace fond lentement dans des zones d'altitude élevée où la température moyenne annuelle ne dépasse guère zéro. Ces glaciers rocheux sont innombrables en montagne. Sébastien Monnier, qui a fait sa thèse sur le sujet, en compte 160, rien qu'en Vanoise.

Dans le Massif Central, l'altitude est plus faible et les températures plus élevées. On retrouve là les traces de glaciers rocheux qui, peut-être n'ont jamais été des glaciers vrais. Quoiqu'il en soit, ils ont maintenant perdu leur glace et sont tout à fait morts. Mais ils restent spectaculaires. Dans la montagne du Lingas (massif de l'Aigoual), le Mont Lozère, le massif du Pilat (Saint-Étienne), en Margeride ou encore en Aveyron (Roquelaure), on observe des sortes de fleuves de pierre dont la pente longitudinale (20% environ) est trop faible pour que la gravité soit seule responsable de leur mise en place (il aurait fallu 65% !). En regardant bien, on note que leur surface est ondulée, que leurs blocs ont des arêtes vives et qu'ils sont redressés comme s'ils avaient subi une poussée latérale. La glace, aujourd'hui disparue, a probablement assuré la plasticité de ces formations. Sur le flanc sud du Mont Lozère on croit rencontrer des vraies moraines frontales⁹. Charles Martins, professeur de botanique à Montpellier, avait déjà perçu et décrit ces formes dans une communication consignée dans le bulletin de notre Académie.

⁹ Mais la morphologie est un peu différente. D'une part on ne trouve pas de cirque glaciaire à l'amont, d'autre part ces accumulations ne forment pas de bosses dans les paysages où elles se contentent de remplir des vallons qui sont effacés, sauf dans leur partie aval non envahie.

Les moraines, sont reconnaissables même quand elles sont réduites à quelques galets ensevelis sous des dépôts plus récents car ces éléments sont alors striés ce qui n'est pas le cas des galets fluviaux ou marins.

Enfin, les « drop stones » sont des blocs charriés par les icebergs, lâchés en mer par la fonte, puis ensevelis dans les fonds marins qu'ils sont venus percuter.

Au total, on dispose de toutes sortes d'éléments pour pister les glaciers du passé, même ceux qui ont disparu depuis des centaines de millions d'années.

À l'heure actuelle, dans les plaines humides situées en limite de l'Océan Glacial Arctique, tant au Canada qu'en Russie, on trouve d'étranges figures géométriques. D'abord le sol gèle ; ensuite sous l'influence du froid intense il se comporte comme un solide c'est-à-dire se rétracte et se fissure en grands polygones d'une vingtaine de mètres de développement. On voit cela depuis les satellites (Google Earth). Ultérieurement, les fissures s'emplissent d'eau, de glace, parfois d'éléments minéraux. Or, ce type de figure polygonale se retrouve sur la costière du Gard ! Cela a été observé à la fin des années 60 quand on s'est mis à utiliser de gros tracteurs labourant plus profondément. Bien sûr, les matériaux ainsi remontés de 40 cm de profondeur se mélangent, au cours du temps, avec la couche de surface à cause du travail du sol. Donc toute cette imagerie a disparu depuis. Le cliché présenté, que l'on doit à la CNABRL, est précieux : il témoigne des climats froids qui ont affecté notre région méditerranéenne, il y a plus de 12 000 ans.

Les surfaces terreuses sans végétation sont sujettes à l'érosion éolienne. Elles sont de trois types principaux : les déserts chauds et secs mais aussi les déserts froids à proximité des glaciers et encore les marges continentales dégagées par le reflux de la mer car la salinité y empêche le développement normal de la végétation. Or, en période de glaciation les déserts froids s'étendent. C'est la même chose pour les marges continentales car le niveau des mers descend, l'eau du globe étant partiellement immobilisée sous forme de glace. Autrement dit, le froid favorise les surfaces sans végétation et l'érosion éolienne. Alors les sols, au moins leurs particules fines, sont arrachés par le vent, transportés par voie aérienne. À proximité des glaciers on obtient des dunes de sable ; plus loin ce sont des accumulations plus fines, les lœss. Aux USA, dans l'État de Washington, le relief montre bien qu'il s'agit d'anciennes dunes façonnées par les vents. En Chine, les lœss occupent des milliers de km² sur des épaisseurs de 200 mètres voire plus. Souvent, ils ont été sculptés par l'homme c'est-à-dire taillés en terrasses. Cela correspond à des régions très fertiles, bien cultivées mais creusées de rigoles d'érosion à cause d'une grande sensibilité au ruissellement hydrique. En France, nous avons aussi des lœss principalement dans le Bassin de Paris et dans la vallée du Rhône entre Valence et Lyon. Leur épaisseur est parfois considérable. Ils comptent parmi les meilleurs sols de notre pays. Les immenses surfaces lœssiques observées en Europe du Nord, en Russie, en Chine, aux USA sont des révélateurs de l'importance des glaciations. Directement ou indirectement, une moitié de la surface terrestre porte les traces des froids anciens.

Conclusion

En résumé, toutes les méthodes, qu'elles scrutent les glaces continentales ou les sédiments marins, l'oxygène 18 ou le deutérium, ou encore le niveau des mers (non traité ici), disent la même chose : en l'absence de toute action humaine, la planète subit des variations climatiques intenses et périodiques. Les plus importantes sont corrélées aux

paramètres de Milanković. On parle de forçage orbital du climat. Les autres ne sont pas toutes expliquées et gardent encore une part de mystère.

Un grand nombre de glaciations, plus de 50, ont successivement affecté le Quaternaire et changé, on l'a vu, la surface de la Terre. Les températures clémentes ne durent que 10 000 ou 30 000 ans environ tandis que les périodes froides successives représentent chacune 70 000 ans au moins. Chaque fois le refroidissement intervient de manière progressive tandis que la remontée en température est assez brutale. Mais, entre une glaciation et un épisode interglaciaire, la différence de température moyenne de la Terre n'est que de 5 à 7 degrés même si elle atteint 12 degrés aux pôles.

Les travaux récents montrent que la période actuelle, Quaternaire, est l'une des plus froides connues par notre planète dans son histoire.

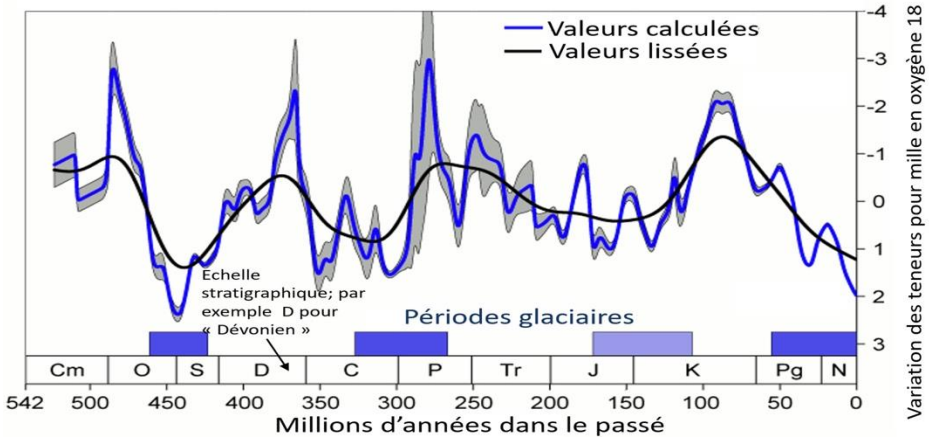


Figure 2 : Evolution des teneurs en ^{18}O depuis 540 millions d'années. Exprimées en valeurs relatives (pour % et par rapport à une valeur standard), elles rendent compte assez fidèlement de l'évolution des températures. Le delta ^{18}O est positif quand les températures sont faibles car les mesures sont réalisées sur des roches initialement déposées au fond des mers. Source Wikipédia, (CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=184098>).

Et le niveau des mers, même s'il est monté de 120 m depuis la fin de la dernière glaciation, a été rarement aussi bas qu'actuellement dans la même période de l'histoire de la Terre.

Dans ce contexte, le changement climatique, actuel et anthropique, apparaît limité. La planète en a vu d'autres ! Mais il reste inquiétant à cause de sa rapidité. Cela veut dire qu'il faut éviter de jouer aux apprentis sorciers et protéger l'environnement dans lequel le développement de l'homme moderne s'est inscrit. Nous avons intérêt à réduire la pollution et notre consommation des réserves fossiles (pétrole, charbon, métaux, etc.).

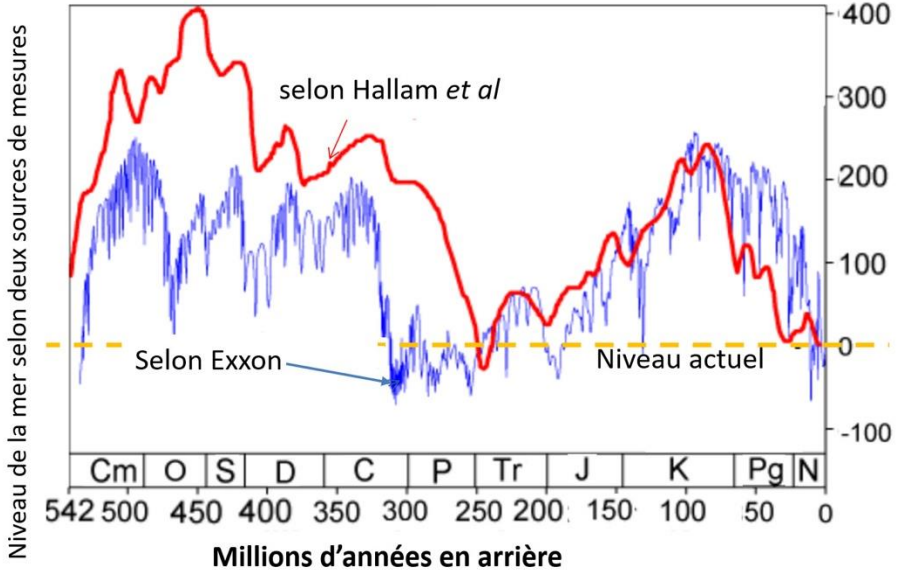


Figure 3. Évolution du niveau des mers depuis 540 millions d'années
Source : Wikipédia d'après figure de Robert A. Rohde, ici traduite et retournée pour que la période actuelle demeure à droite.

Sur Mars, on vient de découvrir des calottes glaciaires qui renferment très certainement de la glace d'eau. Et il y a des moraines assez semblables à ce que l'on voit sur Terre. On a aussi repéré sur cette planète toutes sortes de figures qui semblent la matérialisation de processus périglaciaires. Ses sédiments présentent des rythmes de dépôts dont on se demande qu'ils ne sont pas liés aux paramètres de Milanković qu'il a fallu calculer pour cette planète !

La surface d'Europe, satellite de Jupiter, est une mer prise en glace. On y observe des lignes de fissures qui, à la taille près, ressemblent à ce que l'on trouve en Antarctique.

Encore plus loin de nous, à presque 6 milliards de km, la surface de Pluton récemment photographiée par la sonde « New horizons » révèle une calotte glaciaire et un système de polygation.

Bref, l'étude des glaciers et glaciations terrestres est nécessaire pour trois choses : (i) analyser le passé de notre Planète, (ii) prévoir son avenir climatique, (iii) comprendre ce qui se passe sur les corps célestes car beaucoup de ces derniers contiennent de l'eau et sont glacés.

Belle revanche des naturalistes dont les gouvernements modernes des États ont cru, un temps, qu'ils ne servaient à rien !

BIBLIOGRAPHIE

AGASSIZ L., 1840. *Études sur les glaciers*. Neuchâtel, aux frais de l'auteur, en commission chez JENT et GASSMANN, libraires à Soleure, 346 p.

BEAUDEVIN, 2012. *Les paysages glaciaires*. http://www.geoglaciaire.net/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=53

- BRIDGLAND D., WESTAWAY R., CORDIES S., 2009. *Les causes de l'étagement des terrasses alluviales à travers le Monde*. Quaternaire, 20 (1), pp. 5-23.
- CARY-AGASSIZ E., 1887. *Louis Agassiz : sa vie et sa correspondance* ; trad. de l'anglais par Auguste Mayor, Paris Librairie Fischbacher, 613 P.
- CHARPENTIER (de) J., 1835. *Sur la cause probable du transport des blocs erratiques de la Suisse*. Mémoire des Mines, troisième série, tome VIII, pp. 219-236, Paris.
- COUTTERAND Sylvain, SCHOENEICH Philippe, NICOU D Gérard, 2009. *Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : glacier du Rhône ou/et glaciers savoyard ?* Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8, pp.11-22, <halshs-00389085>
- CRUCIFIX M., 2018. A-t-on enfin compris la cause des cycles glaciaires-interglaciaires. Conférence donnée le 13/2/2018 à l'Observatoire Midi Pyrénées (Film YouTube).
- FALSAN A., CHANTRE E., 1879. *Monographie géologique des anciens glaciers et du terrain erratique de la partie moyenne du bassin du Rhône*, Lyon Imprimerie Pitrat Aîné, 658 p.
- FORBES J-D, 1843. *Travels Through the Alps of Savoy and Other Parts of the Pennine Chain*. Adam and Charles Black, Edinburgh and London, 424 p.
- GOULD S.J., 1982, *Le pouce du Panda*. Grasset, 318 p.
- GROUEFF, 1974. *L'homme et la Terre, Ed : Larousse et Paris-Match*, 396 p.
- LEGROS J.P., 2017. Rodolphe Töpffer : Voyages en zigzag entre Nouvelles, Romans et Bandes dessinées. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, bulletin n° 48.
- LUGEON M., 1920. Jean de Charpentier, Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles Band (Jahr) : 53
- MARTINS Ch., 1867. Les Glaciers actuels et la Période glaciaire, Revue des Deux Mondes, 2e période, tome 67, 1867 (p. 588-615).
- SHSN, 1915. Centenaire de la Société Helvétique de Sciences Naturelles. Notices historiques et documents réunis par la Commission. Tome L des nouveaux mémoires, 332 p.

SOURCES COMPLEMENTAIRES :

- ARCHIAC (D) A., 1848. Histoire des progrès de la géologie de 1834 à 1845. Ed. Société Géologique de France, tome 2, 439 p.
- BJÖRNSSON H., 2017. The Glaciers of Iceland, A Historical, Cultural and Scientific Overview, Atlantis Press, 613 p.
- COUTTERAND S., 2010. Études géomorphologiques des flux glaciaires dans les Alpes Nord-occidentales au Pléistocène récent, thèse, Université de Savoie, 472 p.
- GASSMANN F., 1996. Effet de serre, Modèles et Réalités, 141 p. https://www.researchgate.net/profile/Fritz_Gassmann/publication/263603334_Effet_de_serre_modeles_et_realites_Reflexions_d'un_physicien_sur_l'evolution_du_climat/links/56e96f8e08ae47bc651c735c/Effet-de-serre-modeles-et-realites-Reflexions-dun-physicien-sur-levolution-du-climat.pdf

Communications présentées en 2019

SANSJOFRE P., Le HIR G., 2018. Le paradoxe de la Terre boule de neige. In Pour La Science, n°486, avril, pp. 26-33.

SHSN, 1837. Actes de la société helvétique de sciences naturelles, Neuchâtel, Imprimerie de Petitpierre, 134 p.

WOLFF E.W et al, 2015. Interglacials of the last 800 000 years. Reviews of geophysics, AGU Publications.