

4.1 La théorie glaciaire : bref historique

 geomorphologie-montagne.ch/la-theorie-glaciaire-bref-historique

La théorie glaciaire est scientifiquement formulée entre 1840 et 1841. Il s'agit d'une théorie, basée sur des observations de terrain et qui stipule que les glaciers ont connu, par le passé, des extensions plus grandes qu'actuellement.

Jean-Pierre **Perraudin** (1767-1858) ([fig. 1](#)), un paysan vivant dans le village de Lourtier, dans le Val de Bagnes (Valais), est l'un des premiers, avec le géologue écossais James **Hutton** (1726-1795), à émettre l'hypothèse que les blocs erratiques ont été transportés par des glaciers. Il expose sa théorie à des visiteurs du Val de Bagnes, dont Jean **de Charpentier** (1786-1855) en 1815, qui était à ce moment directeur des salines de Bex. Les modestes conditions de vie de Perraudin ne lui empêchent pas de faire des observations remarquables ; à travers l'observation des stries glaciaires, il émet l'hypothèse que le glacier du Val de Bagnes devait arriver jadis au moins jusqu'à Martigny.

En 1818, il a des discussions sur le sujet avec Ignace **Venetz** (1788-1859) ([fig. 1](#)), l'ingénieur d'état valaisan chargé de diriger les travaux pour la vidange du lac s'étant formé par le barrage de la vallée par le glacier du Giétro. Les mesures prises par Venetz permettent de réduire le risque mais ne permettent pas d'éviter totalement la catastrophe : le 16 juin 1818, la vidange soudaine du lac provoque une débâcle qui ravage tout le Val de Bagnes ([cf. fiche glaciers 6.2](#)). Malgré cela, Venetz continue ses observations sur les glaciers qui le porteront à la présentation, lors d'une réunion de la Société helvétique des sciences naturelles (SHSN) au Grand-Saint-Bernard en 1829, d'une théorie selon laquelle les glaciers alpins se sont étendus jusqu'au Jura. Ses argumentations suscitent la désapprobation générale. En effet, cette nouvelle proposition entre en contradiction totale avec la croyance communément admise que, depuis sa création, la Terre ne fait que se refroidir. Les croyances bibliques sont, à cette époque, encore très largement soutenues par la communauté scientifique qui tente de concilier l'histoire de la genèse avec les observations de terrain. L'existence des blocs erratiques n'avait pas échappé aux autres scientifiques de l'époque mais ces derniers avaient proposés d'autres scénarios (radeaux de glace, explosions volcaniques, déluge), qui nous paraissent aujourd'hui plutôt fantaisistes.

Ignace Venetz arrive pourtant à convaincre Jean de Charpentier, qui devient un partisan de la théorie glaciaire. Jean **de Charpentier** ([fig. 1](#)) commence alors des recherches sur les terrains erratiques de la vallée du Rhône, où il étudie les gigantesques blocs erratiques de la région de Monthey et de Bex ([fig. 2 & 3](#)). La théorie glaciaire s'affine toujours plus, mais fait peu de partisans parmi les naturalistes de l'époque. L'un d'eux, Louis **Agassiz** (1807-1873) ([fig. 1](#)), se laisse convaincre par De Charpentier et ouvre un nouveau programme d'observation des glaciers. Le 24 juillet 1837, lors d'une séance de la Société helvétique des sciences naturelles, Agassiz, qui aurait dû présenter une conférence sur les poissons fossiles, scandalise le public en prononçant son fameux

discours sur les glaciers. Les protestations sont générales, mais malgré la large contestation de la part des autres naturalistes, le discours ouvre une brèche dans les milieux scientifiques et la théorie glaciaire s'affirmera finalement entre 1840 et 1841.



Fig. 1 – Portraits de Jean-Pierre Perraudin, Ignace Venetz, Louis Agassiz, Jean de Charpentier

Les portraits de (A) Jean-Pierre Perraudin (1767-1858) (portrait présumé), (B) Ignace Venetz (1788-1859), (C) Louis Agassiz (1807-1873), (D) Jean de Charpentier (1786-1855), tous quatre artisans de la théorie glaciaire en Suisse.



Fig. 2 – Pierre des Marmettes (VS)

La [Pierre des Marmettes](#), à Monthey (VS), étudiée par Jean De Charpentier dans son « Essai sur les glaciers et sur les terrains erratiques du bassin du Rhône » de 1841.



Fig. 3 – Bloc Monstre (VD)

Photo du [Bloc Monstre](#) de la forêt des Dévens (Bex, VD), situé à quelques centaines de mètres de la maison de Jean de Charpentier. Ce volumineux bloc erratique (4'500 m³) figure à l'inventaire des géotopes suisses.

4.2 Les variations climatiques et leurs causes

 geomorphologie-montagne.ch/les-variations-climatiques-et-leurs-causes

Le climat à la surface de la Terre est en constante évolution, alternant entre périodes chaudes et périodes froides. La période géologique la plus récente, le Quaternaire, qui dure depuis 2.6 millions d'années est particulièrement influencée par les fluctuations de l'orbite terrestre.

Depuis le début du **Quaternaire**, il y a 2,6 millions d'années, le climat de la Terre est particulièrement froid. Nous nous situons dans la dernière et aussi la plus connue des ères glaciaires. Une ère glaciaire est cependant ponctuée de périodes plus chaudes (interglaciaires) et plus froides (glaciaires). La période interglaciaire dans laquelle nous évoluons aujourd'hui (Holocène) a débuté en 11'650 cal BP.

L'explication des alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires a été proposée dans les années 1910 par le mathématicien serbe Milutin **Milankovitch**, qui s'est intéressé à l'orbite de la Terre autour du soleil. Milankovitch découvre trois cycles orbitaux principaux d'une périodicité de 20'000, 41'000 et 100'000 ans.

- Le premier cycle, qui concerne l'**excentricité de l'orbite terrestre autour du soleil**, a une durée de 100'000 et 400'000 ans ([fig. 1a](#)). Lorsque l'orbite terrestre est presque circulaire, la distance entre la Terre et le soleil est la même en toute saison, ce qui affaiblit le contraste saisonnier. Lorsque l'orbite est plus elliptique, le contraste saisonnier est plus accentué.
- Le deuxième cycle concerne la **variation de l'obliquité de l'axe de la Terre** et a une périodicité de 41'000 ans ([fig. 1b](#)). Les variations de l'obliquité influencent le contraste saisonnier par déplacement des cercles polaires et des tropiques.
- Le troisième et dernier cycle de Milankovitch est la **précession des équinoxes**, avec une périodicité de 19'000 et 23'000 ans ([fig. 1c](#)). Comme les deux cycles précédents, ce cycle a une influence importante sur le contraste saisonnier, qui est maximal lorsque l'excentricité de l'orbite est forte et lorsque la distance Terre-soleil est maximale pendant l'hiver boréal.

La combinaison de ces trois paramètres permet d'expliquer de façon satisfaisante les fluctuations climatiques de premier ordre (période glaciaire/interglaciaire) et de second ordre (stade glaciaire/interstade glaciaire) du Quaternaire. Elles ne contredisent pas les effets sur les glaciers du réchauffement planétaire actuel d'origine anthropique (dont l'échelle temporelle est beaucoup plus courte, de l'ordre de la décennie et du siècle)

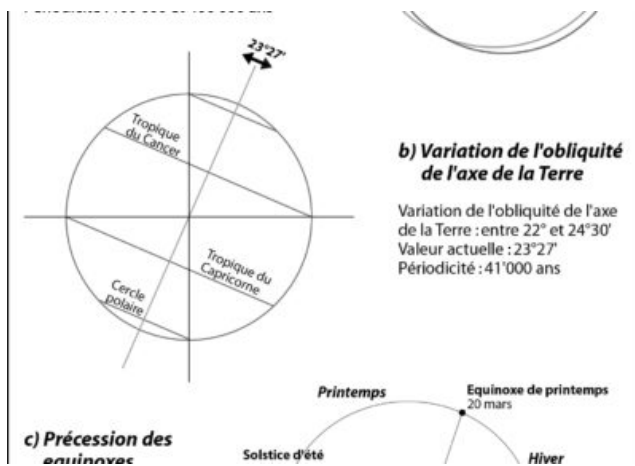


Fig. 1 – Cycles de Milankovitch

Les trois principaux cycles orbitaux de Milankovitch : la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre (a), la variation de l'obliquité de l'axe de la Terre (b) et la précession des équinoxes (c).

4.3 Les glaciations du Précambrien au Quaternaire

 geomorphologie-montagne.ch/les-glaciations-du-precambrien-au-quaternaire

La Terre, dont l'histoire climatique a été globalement plus chaude qu'actuellement, a connu au moins cinq périodes de glaciations. Un des facteurs de ces refroidissements à l'échelle de la planète est la tectonique des plaques qui modifie la position des continents sur le globe.

Pendant la majeure partie de son histoire (4.6 milliards d'années), la planète a connu un climat chaud et était complètement dépourvue de glaciers. C'était le cas durant toute la période du Mésozoïque (entre 251 et 65 Ma) ([fig.1](#)). Nous connaissons cependant l'existence de cinq périodes glaciaires. Elles ont eu lieu au Précambrien (4'600 – 542 Ma), au Paléozoïque (542 – 251) et au Cénozoïque (65 – actuellement) ([fig.1](#)).

Durant une période glaciaire, le climat de la Terre est globalement plus froid et des glaciers se forment à sa surface, à haute latitude et altitude.

Les glaciations du Précambrien ont laissé des témoignages sous forme d'anciennes moraines solidifiées dont l'âge remonte jusqu'à 2'500 Ma. Une théorie récente émet l'hypothèse que la Terre a subi au Précambrien une ou plusieurs glaciations globales qui l'auraient transformée en une énorme boule de glace (théorie du *Snowball-Earth*), avec les océans complètement recouverts par une épaisse banquise.

Le Paléozoïque a été caractérisé par les glaciations de l'Ordovicien-Silurien (440 Ma) et du Carbonifère-Permien (300 Ma). Ces périodes froides peuvent être en partie expliquées par la tectonique des plaques. L'Afrique, qui était encore soudée à l'Australie, a séjourné pendant plusieurs millions d'années à la place de l'actuel continent Antarctique. Un continent en position polaire permet la création d'une circulation circumpolaire qui induit un fort refroidissement des eaux autour du continent, ce qui a pu conduire à la formation d'une calotte glaciaire. C'est ce mécanisme qui est à l'origine de la formation de la calotte glaciaire sur l'ensemble de l'Antarctique entre 15 et 10 Ma avant nos jours. Le Quaternaire, qui concerne les 2.6 derniers millions d'années, est caractérisé par une vingtaine de glaciations qui ont en particulier fortement modelé le paysage alpin.

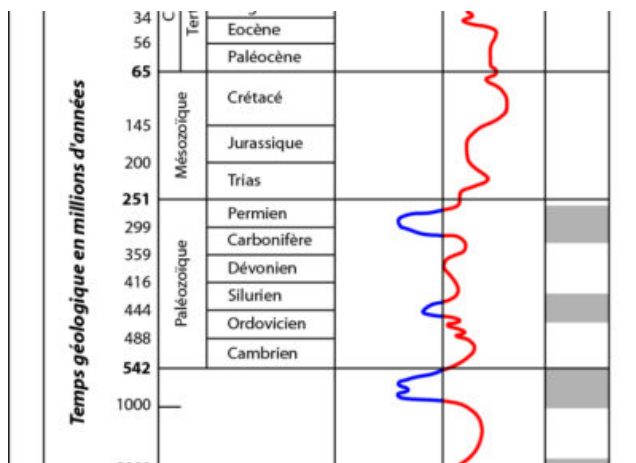


Fig. 1 – Evolution des températures pendant l’histoire de la Terre

Tableau de l’évolution des températures et des périodes glaciaires pendant l’histoire de la Terre.

4.4 Les glaciations du Pléistocène

 geomorphologie-montagne.ch/le-pleistocene-de-2-4-ma-a-10000-bp

Durant le Pléistocène, entre 2,6 millions d'années et 11'650 ans avant aujourd'hui, une vingtaine de glaciations se sont succédées, entrecoupées d'autant de périodes interglaciaires. Lors du dernier maximum glaciaire (LGM), entre 27'000 et 22'000 ans cal BP, une grande partie de la Suisse était recouverte par les glaciers. Durant le retrait généralisé des glaces qui a suivi (période tardiglaciaire, entre 19'000 et 11'650 avant aujourd'hui), les glaciers ont encore connu quelques phases de réavancées, avant d'atteindre, durant l'Holocène (de 11'650 ans cal BP à aujourd'hui), des positions proches de leurs extensions actuelles.

Les oscillations climatiques extrêmes du Quaternaire s'expliquent essentiellement par les variations des paramètres orbitaux de la Terre (voir les cycles de Milankovitch, [fiche glaciers 4.2](#)), ceci dans un contexte paléoclimatique général en refroidissement depuis l'Eocène. Cette tendance au refroidissement depuis l'Eocène est quant à elle liée à des facteurs tectoniques qui ont eu des répercussions globales sur le climat (par exemple la formation de l'Isthme de Panama conduisant à la création du *Gulf Stream*).

L'analyse isotopique des foraminifères benthiques récoltés dans les carottes de sédiments marins, a permis de mettre en évidence qu'une vingtaine de glaciations et autant de périodes interglaciaires ont eu lieu durant la période Quaternaire, selon une périodicité d'environ 100'000 ans. Ceci a beaucoup complexifié le modèle très simple à quatre grandes glaciations (Günz, Mindel, Riss, Würm) proposé par Penck & Brückner (1909) sur la base des terrasses de ces affluents du Danube. Dans un premier temps, l'ancienne terminologie a été remplacée par une nomenclature simple, dans laquelle on parle de glaciation maximale, avant-dernière glaciation et dernière glaciation ([fig. 1](#)). Récemment, une nouvelle terminologie basée sur des affleurements ou des relevés de forages situés dans le Nord de la Suisse a été définie par le Comité suisse de stratigraphie ([fig. 2](#)). On y distingue les glaciations de Möhlin (correspondant à la plus étendue), Habsburg, Hagenholz, Beringen et Birrfeld. Ces noms proviennent de localités-types présentant des enregistrements stratigraphiques et/ou des morphologies glaciaires/proglaciaires typiques.

C'est pendant ces grandes avancées et retraits que la glace a peu à peu sculpté le paysage actuel, et c'est au cours de la dernière glaciation (Birrfeld en Suisse, anciennement Würm 115'000 – 10'000 BP), que le relief a pris sa forme actuelle.

Durant le **dernier maximum glaciaire (LGM)**, la glace a atteint son niveau maximal entre 27'000 et 22'000 ans cal BP. A ce moment-là, la température annuelle moyenne était de 8 à 10°C plus froide par rapport à aujourd'hui. Le glacier du Rhône, à cette époque, se divisait en deux grands lobes, l'un parcourant le Moyen-Pays suisse et se terminant à Wangen an der Aare, et l'autre, en France, atteignant la région de Culoz. Le «lobe lyonnais» ([fig. 3](#)), anciennement attribué au glacier du Rhône, marquait la terminaison

des glaciers en provenance des vallées de l'Isère et de l'Arc. À partir d'environ 20'000 BP, le climat a commencé à se réchauffer grâce à une augmentation de l'intensité du rayonnement solaire dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

Après le dernier maximum glaciaire (LGM), la déglaciation n'a pas été constante. Dans les Alpes, on distingue au moins six récurrences glaciaires de moins en moins marquées (fig. 4). De 19'000 à 12'700 avant aujourd'hui, la différence de température par rapport à aujourd'hui est passée de -8°C (début du Dryas ancien) à -1°C (fin de l'interstade Bølling-Allerød). Cette période, le Tardiglaciaire, s'est terminée par un refroidissement brutal, celui du **Dryas récent** (12'700 à 11'700 avant aujourd'hui), marqué par une importante récurrence des glaciers alpins qu'on retrouve dans le paysage actuel sous la forme de moraines du stade d'Egesen (fig. 5). Il est intéressant de noter qu'avant ce refroidissement brutal (de -2 à -3°C dans les Alpes), une bonne partie des glaces quaternaires avait déjà fondu.

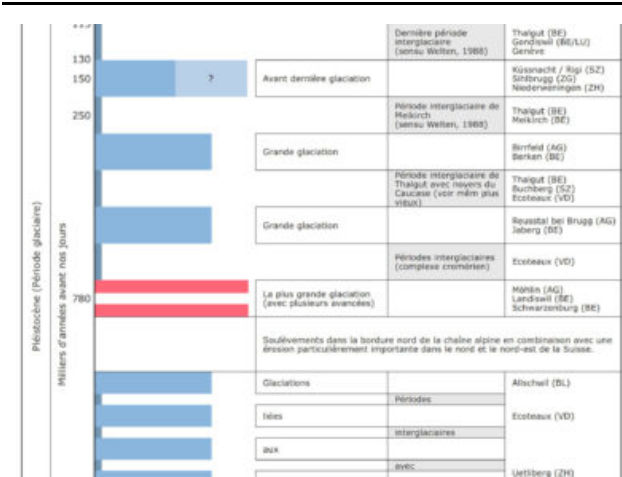


Fig. 1 – Chronologie des principales glaciations

Tableau chronologique des principales glaciations sur le versant nord des Alpes selon Schlüchter et al. (2021).

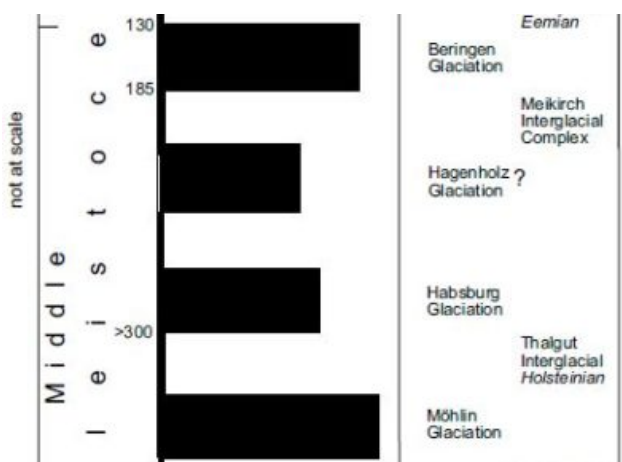


Fig. 2 – Histoire glaciaire de la Suisse

Schéma stratigraphique montrant l'histoire glaciaire de la Suisse.

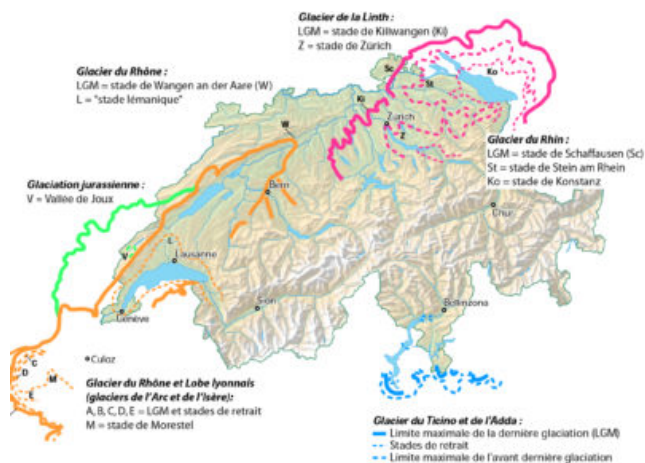


Fig. 3 – Dernier maximum glaciaire et principaux stades de retrait

Carte schématique du dernier maximum glaciaire (LGM) et des principaux stades de retrait pour les glaciers du Rhône, de la Linth, du Rhin, du Ticino et de l'Adda. Composition à partir des données de Cotti et al. (1990), Felber (1993), Hantke (1983), Schlüchter (1988) et Schoeneich (1998).

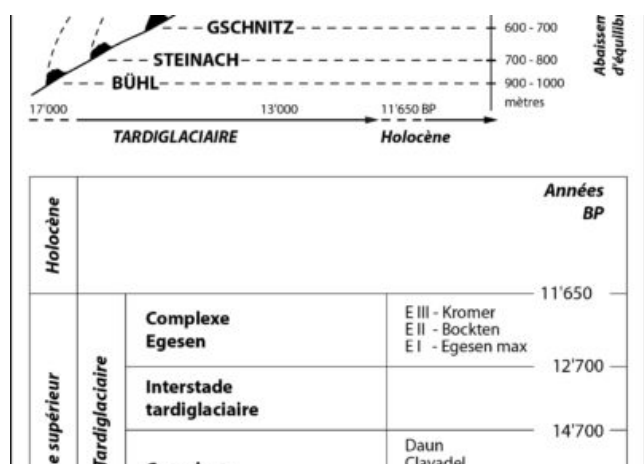


Fig. 4 – Evolution glaciaire

Graphique et tableau chronologique montrant l'évolution glaciaire et chronologique du Tardiglaciaire.



Fig. 5 – Moraine frontale du glacier de Saleinaz (VS)

Photo annotée mettant en évidence [la moraine frontale](#) déposée par le glacier de Saleinaz (Val Ferret, VS) durant le stade d'Egesen, est située à 1200 m d'altitude, ce qui permet d'illustrer l'importance de la récurrence glaciaire du Dryas récent.

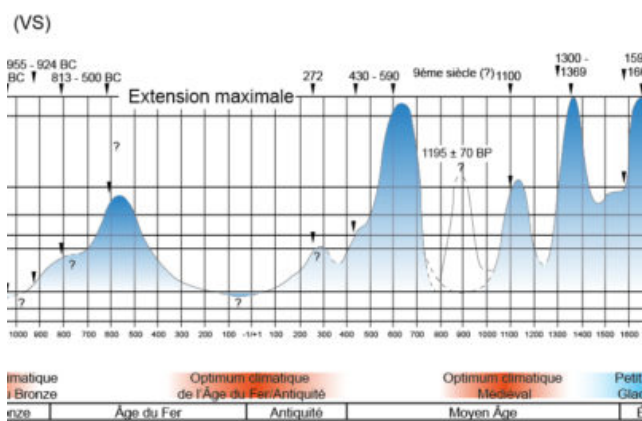
4.5 Les variations des glaciers durant l'Holocène

 geomorphologie-montagne.ch/lholocene-de-10000-bp-a-aujourd'hui

L'Holocène qui s'étend de 11'650 ans cal BP à aujourd'hui, a été relativement chaud et stable du point de vue climatique. On dénombre certes quelques fluctuations glaciaires, mais elles sont d'extension très limitée par rapport aux avancées du Tardiglaciaire et restent cantonnées dans les hautes vallées alpines. Un épisode particulièrement froid, appelé le Petit Age Glaciaire, s'est produit entre 1350 et 1850 après J.-C ([fig. 1](#)).

Les nombreuses fluctuations glaciaires qui se sont cantonnées à l'intérieur du même périmètre ont construit d'importants complexes morainiques par superposition ou accrétion latérale des moraines ([fig. 2](#)). Celles que l'on appelle généralement « moraines historiques », sont donc, dans beaucoup de cas, des complexes morainiques qui se sont construits tout au long de l'Holocène.

L'analyse de débris de bois et de tourbe au voisinage des glaciers ou dans les sandurs proches des fronts glaciaires a permis de mettre en évidence 10 épisodes chauds avec fonte des glaciers (pour un total de 5'400 ans) séparés par de nouvelles avancées glaciaires ([fig. 3](#)). Ainsi, pendant plus de la moitié de ces onze mille dernières années, l'extension des glaciers alpins était plus réduite qu'actuellement. Les phases avec une extension glaciaire plus réduite qu'aujourd'hui concordent avec des moments d'activité solaire accrue. Grâce au dégagement des cols par les glaciers, ces périodes pourraient correspondre aux périodes de colonisation des vallées alpines par les êtres humains ([cf. fiche glaciers 5.2](#)). Il est important de souligner qu'une extension glaciaire plus réduite par rapport à nos jours n'implique pas directement un climat plus chaud. Le temps de réajustement d'un glacier avec les conditions climatiques varie entre 30 et 50 ans ; aujourd'hui les glaciers alpins ne sont pas encore en équilibre avec les changements de température des dernières décennies.



Modifié d'après Hk

Fig. 1 – Fluctuations du glacier d'Aletsch (VS)

Fluctuations du [glacier d'Aletsch](#) (VS) dans la dernière partie de l'Holocène.



Fig. 2 – Moraines selon les époques

Complexe des moraines holocènes et historiques du [glacier de Tsijore Nouve](#) (Val d'Arolla, VS).

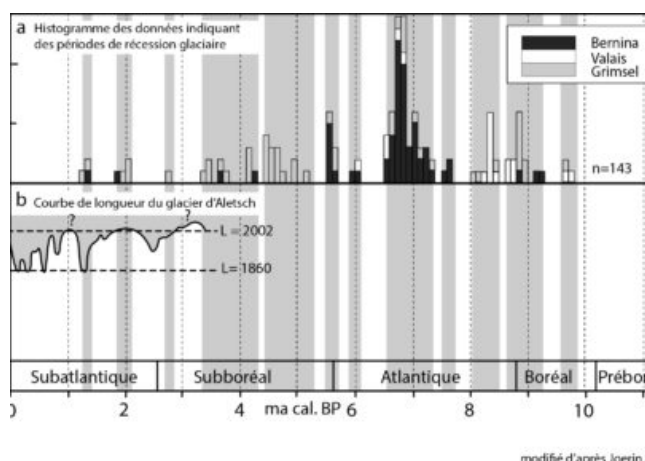


Fig. 3 – Retraits et avancées glaciaires dans les Alpes européennes

Graphique montrant une vue d'ensemble des retraits glaciaires datés, comparés aux avancées glaciaires, dans les Alpes européennes, durant d'Holocène. (a) Histogramme des retraits glaciaires datés dans les Alpes suisses, d'après une étude réalisée par Joerin et al. (2006). (b) Courbe de longueur du glacier d'Aletsch (VS) d'après Holzhauser et al. (2005) indiquant de plus faibles extensions du glacier que celle enregistrée en 2002 (L = 2002) et plusieurs positions comparables à l'étendue du Petit Age Glaciaire (L = 1860).

4.6 Le Petit Age Glaciaire et le réchauffement récent du climat

 geomorphologie-montagne.ch/le-petit-age-glaciaire-et-le-rechauffement-recent-du-climat

Entre le début du XIV^e siècle et la fin du XIX^e siècle, le climat atlantique nord connaît un brusque refroidissement. En Europe, ce refroidissement s'étend entre 1350 et 1850 après J.-C. La plupart des glaciers alpins entrent en crue. Cette période, appelée rétrospectivement **Petit Age Glaciaire (PAG)** est documentée dans les Alpes du fait des populations lettrées qui s'y étaient établies et qui en ont laissé différents témoignages (peintures, gravures, récits). Depuis la fin du PAG, le climat se réchauffe globalement et les glaciers perdent rapidement du terrain.

Le **Petit Age Glaciaire (PAG)** a été caractérisé par la plus importante récurrence glaciaire de l'Holocène, avec trois maxima vers environ 1350, 1600 et 1820/1850 ([fig. 1](#)). La baisse de température moyenne de 0,5 °C qui a caractérisé ces cinq siècles a été provoquée par la combinaison d'au moins deux facteurs : des périodes de **faible activité solaire**, appelées minimum de Spörer (1460-1550), minimum de Maunder (1645-1715) et minimum de Dalton (1790-1820), associées aux **paramètres orbitaux** identifiés par Milankovitch ([fiche glaciers 4.2](#)), accentuées par les conséquences de plusieurs **éruptions volcaniques**.

La fin du PAG coïncide avec le début des premières mesures continues sur les glaciers. En 1973 un inventaire systématique des glaciers suisses a été réalisé. La découverte principale en a été que la surface englacée des Alpes suisses s'est réduite de 25 % par rapport à 1850, passant de 1730 km² à 1300 km². Un nouvel inventaire a été réalisé pour l'année 2010, basé sur des images aériennes de haute résolution et des systèmes d'information géographique (SIG). Par rapport à 1973, la surface englacée des Alpes suisses est descendue à 944 km². Le retrait des glaciers après le PAG n'a pas été homogène. Les principales périodes avec un bilan de masse négatif dans les Alpes européennes correspondent aux périodes 1900-1910, 1920-1970 et 1980 jusqu'à aujourd'hui. Durant les décennies 1910-1920, et 1970-1980, au contraire, les bilans de masse de la plupart des glaciers ont été positifs. Les variations de bilan de masse ne peuvent pas être mises en relation directes avec les variations de longueur des glaciers. En effet, ces derniers réagissent de manière différente en fonction de leur taille ([fiche glaciers 4.7](#)). On peut cependant avancer que les variations de longueur des glaciers de taille moyenne à l'échelle alpine reflètent bien les périodes de bilans de masse positifs e/ou négatifs, comme c'est le cas, par exemple, du glacier du Rhône ([fig. 2](#)). Sur ces glaciers, les variations positives ont provoqué le dépôt de petites moraines situées à l'intérieur des moraines holocènes préhistoriques et holocènes historiques ([fig. 3](#)).

Les chiffres fournis par le nouvel inventaire montrent une importante accélération de la fonte des glaciers. Entre 1850 et 2010, les Alpes Suisses ont perdu 48 % de leur surface englacée. L'analyse des images aériennes montre que les petits glaciers ont beaucoup souffert du réchauffement du climat des dernières décennies ([fig. 5](#)). En 2000, leur fonte

représentait 44 % de la perte totale de surface englacée, alors qu'ils ne constituent que 18 % de l'ensemble de la surface des glaciers suisses. Depuis 2001, le bilan de masse moyen dans les Alpes suisses est consentement négatif ([fig. 5](#)). L'année 2003 se distingue par un bilan annuel fortement négatif, conséquence d'une canicule estivale particulièrement marquée. La canicule enregistrée en 2018 a eu un effet moindre sur le bilan de masse annuel, grâce à d'importantes précipitations neigeuses durant la saison hivernale ([fig. 5](#)).

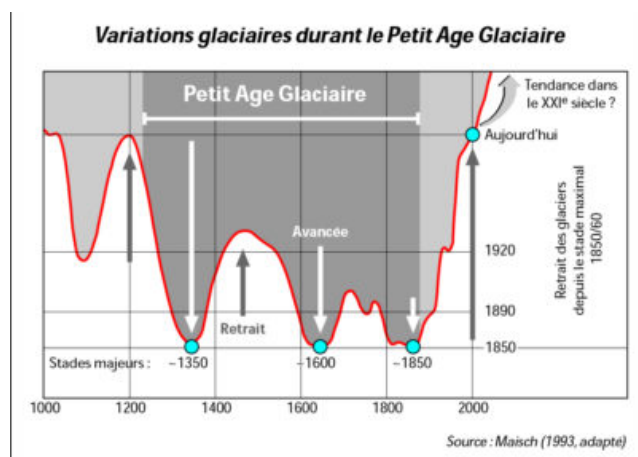


Fig. 1 – Fluctuations glaciaires pendant le Petit Age Glaciaire

Avancée et retrait des glaciers dans les Alpes suisses pendant le Petit Age Glaciaire .

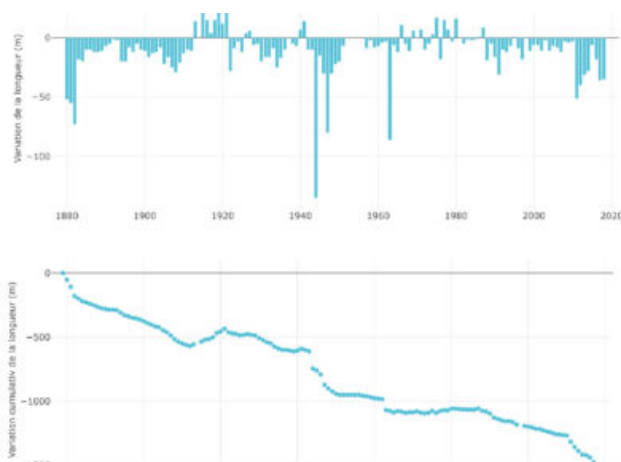


Fig. 2 – Longueur du glacier du Rhône (VS)

Graphiques montrant les variations de longueur du glacier du Rhône (Col de la Furka, VS). Elles traduisent bien l'allure générale des glaciers suisses depuis la fin du Petit Age Glaciaire.



Fig. 3 – Complexe morainique dans le Val d’Arolla (VS)

Moraine latérale post-Petit Âge Glaciaire du Bas Glacier d’Arolla (Val d’Arolla, VS) à l’intérieur du complexe des moraines holocènes préhistoriques et holocènes historiques.



Fig. 4 – Glacier de Plan Nèvé (VD)

Les petits glaciers, comme le glacier de Plan Nèvé (Alpes Vaudoises), ont beaucoup souffert du réchauffement climatique des dernières années.



Fig. 5 – Bilan de masse hivernal, estival et annuel

Graphique de l’évolution du bilan de masse hivernal, estival et annuel entre 1965 et 2018. Les données, sont calculées sur la moyenne des glaciers pour lesquels le réseau GLAMOS dispose des plus longues séries de mesures (Allalin, Giétro, Gries, Silvretta; équivalent en eau en cm). L’année 2003, marquée par une importante canicule estivale est exceptionnelle du point de vue de la perte de volume glaciaire. Pour la période 2017/2018, également marquée par une canicule estivale, la perte est en partie compensée par l’importance des précipitations neigeuses hivernales.

4.7 Glaciers et réchauffement climatique : projections futures

geomorphologie-montagne.ch/glaciers-et-rechauffement-climatique-projections-futures

Pour ce qui concerne le futur proche, on prévoit que les glaciers suisses continueront de diminuer à cause de l'augmentation des températures globales. En effet, selon les données du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat, IPCC en anglais), on estime que d'ici 2100, les températures annuelles moyennes globale - selon les scénarios envisagés - pourraient augmenter jusqu'à 4,8°C ([cf. fiche glaciers 4.6](#)). Dans les Alpes suisses cette augmentation pourrait être doublée par rapport à l'évolution des températures annuelles moyennes globales. Une élévation des températures de près de 5°C influencerait la remontée de la ligne d'équilibre des glaciers d'environ 800 mètres, ce qui entraînerait une disparition graduelle des glaciers alpins ([fig. 1](#)).

Le **temps de réponse** des glaciers face au réchauffement climatique est très variable selon leur taille et leur situation topographique et géographique. Les grands glaciers, comme le glacier d'Aletsch, mettent plusieurs décennies à réajuster leur volume et longueur aux conditions climatiques changeantes alors que les petits glaciers de cirque, comme le glacier de Plan Névé, s'adaptent en l'espace de quelques années seulement. Ces différences s'expriment également dans les variations de volume. Les grands glaciers (longueur supérieure à 10 km), en raison de leur taille, n'ont perdu en moyenne que 15 à 20 % de leur longueur dans la période 1850-2000. Les petits glaciers de cirque (longueur inférieure à 1 km), ont au contraire, pendant la même période, perdu en moyenne 40 à 70 % de leur longueur ([fig. 2](#)). La tendance est donc à une disparition des glaciers plus petits et à une évolution des glaciers les plus grands vers des tailles plus réduites, ce qui finira par diminuer leur inertie face aux changements climatiques et augmentera la vitesse de leur fonte ([fig. 3 & 4](#)).

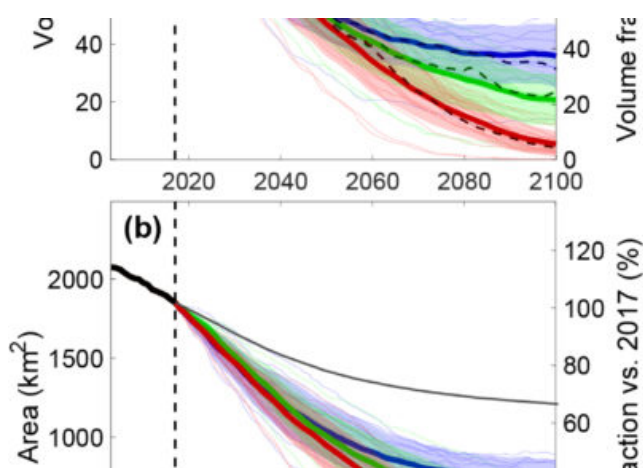


Fig. 1 – Evolution du volume et de la surface des glaciers des Alpes européennes

Évolution (a) du volume et (b) de la surface des glaciers des Alpes européennes pour diverses simulations obtenues grâce au modèle de haute résolution régional (RCM : high-resolution regional climate model) EURO-CORDEX (COordinated Regional climate Down-scaling EXperiment applied over Europe) sur la base des conditions moyennes 1988-2017. Les lignes minces correspondent à des simulations RCM individuelles (51 au total). La ligne épaisse représente la moyenne du RCM. Les bandes colorées transparentes correspondent à un écart-type. En (a), les lignes pointillées colorées correspondent aux simulations du modèle qui sont les plus proches de la moyenne multi-modèle. La ligne verticale en pointillés représente l'année 2017. (a) Axe x gauche : volume en km³, Axe x droit: fraction du volume par rapport à 2017 en %. (b) Axe x gauche : surface en km². Axe x droit: fraction de la surface par rapport à 2017 en %. Axe y années calendaires.

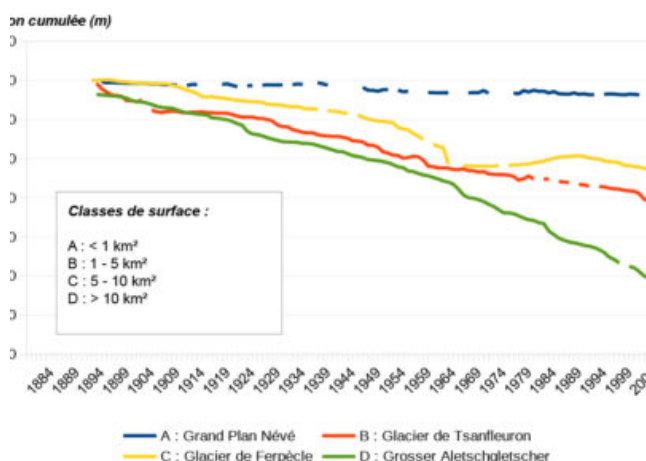


Fig. 2 – Retrait des glaciers alpins

Graphique comparant le retrait de quatre glaciers alpins de taille différente depuis la fin du XIX^e siècle.

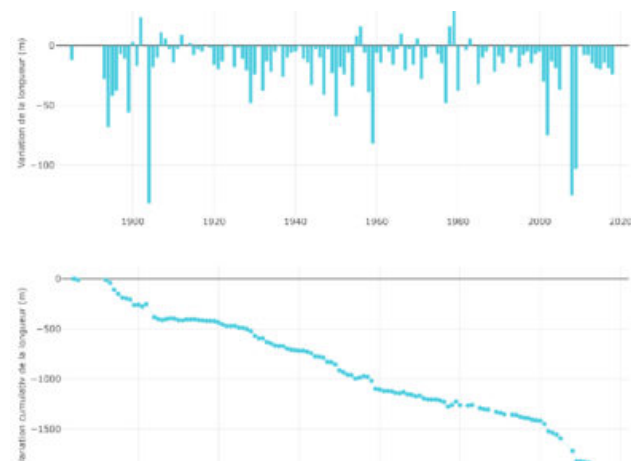


Fig. 3 – Longueur du glacier de Tsanfleuron (VS)

Graphiques montrant la variations de longueur du [glacier de Tsanfleuron](#) (Col du Sanetsch, VS) depuis la fin du XIX^e siècle.



Fig. 4 – Scénario de retrait glaciaire

Fig. 4 – Photo annotée illustrant un scénario de retrait pour une élévation de la ligne d'équilibre de 100 m pour le [glacier de Tsanfleuron](#) (Col du Sanetsch, VS). La photo a été prise en octobre 1994. Le scénario de retrait a été établi sur la base des données de Maisch et al. (2000).

4.8 Conséquences du changement climatique sur l'environnement alpin

 geomorphologie-montagne.ch/4-8-consequences-du-rechauffement-climatique-sur-lenvironnement-alpin

Sous l'effet réchauffement climatique l'environnement alpin change. Ces changements augmentent les risques environnementaux, mais entraînent aussi des effets positifs.

La planète se réchauffe ([fig. 1](#)). Selon les estimations du Groupe d'Expert intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ([GIEC](#)) dans son rapport spécial de 2018: « les activités humaines ont provoqué un réchauffement planétaire d'environ 1 °C au-dessus des niveaux préindustriels, avec une fourchette probable allant de 0,8 °C à 1,2 °C. Il est probable que le réchauffement planétaire atteindra 1,5 °C entre 2030 et 2052 s'il continue d'augmenter au rythme actuel ». En Suisse, la température annuelle moyenne a augmenté de 1,8 °C depuis la seconde moitié du XIX^e siècle. Ce réchauffement a comme conséquence l'accroissement de la fonte des glaciers et de la dégradation du pergélisol ([fiche glaciers 4.7](#) et [chapitre périglaciaire](#)), qui à leur tour entraînent une série de conséquences, notamment en terme de dangers naturels liés aux processus glaciaires et périglaciaires.

En particulier, selon les études effectuées en Suisse par l'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC), on s'attend qu'une partie importante des terrains de haute montagne situés entre 2400 et 2800 m d'altitude, suite à la disparition des glaciers et à la dégradation du pergélisol, dégagent de grandes masses de matériaux meubles qui pourraient se mettre en mouvement sous l'action de l'eau ([fig. 2](#)). Selon ce scénario, il faudra s'attendre un déplacement spatial du risque de chutes de glace et de coulées de boue en haute montagne, suivi parallèlement par une augmentation de l'extension saisonnière du risque de crue.

Il est prévisible qu'à l'instar du [glacier du Pizol](#) – qui est désormais devenu trop petit pour faire parti du réseau des relevés glaciologiques suisse ([GLAMOS](#)) et pour lequel une cérémonie commémorative a été célébrée – la majeure partie de l'univers des glaciers alpins disparaîtra encore pendant ce siècle. Les glaces présumées éternelles font place à grande vitesse à un nouveau paysage, fait de rochers, éboulis, maigre végétation et nombreux lacs, la plupart de petite taille. Le lent dégel du pergélisol diminue à la longue la stabilité des flancs de montagne, en maints endroits très raides. Il en résulte des éboulements plus fréquents, en partie de grande ampleur. Des déséquilibres prononcés laisseront pour des siècles leur empreinte dans ce paysage.

Les **risques environnementaux** ne comprennent pas seulement les risques et dangers naturels, mais également les risques économiques et écologiques. Selon [ProClim](#) la fonte des glaciers et la réduction de l'enneigement auront de lourdes conséquences sur le bilan hydrique et sur les paysages, sur le tourisme d'hiver et l'agriculture. En particulier, selon l'OcCC, le débit annuel moyen des eaux augmentera en moyenne d'environ 10 % au

Nord des Alpes, tandis qu'il diminuera en moyenne de quelque 10 % au Sud des Alpes. Ceci aura des effets importants sur la production d'énergie hydroélectrique, très dépendante de l'extension de la surface glaciaire ([fiche glaciers 5.3](#)). Un autre risque qu'on pourrait qualifier d'économique, est lié aux changements des paysages de haute montagne suite à un retrait généralisé des glaciers ([fig. 3](#)). Pour le moment les effets du retrait des glaciers sur le tourisme sont toutefois difficiles à évaluer ([fiche glaciers 5.4](#)). L'augmentation des températures et de la sécheresse, la réduction de l'enneigement et le changement des périodes végétatives ne sont que quelques facteurs qui se répercutent sur les écosystèmes avec comme conséquences la modification spatiale et/ou temporelle des ressources écologiques et la migration des plantes et des espèces animales.

Mais il faut également considérer les **effets positifs** du réchauffement climatique sur la cryosphère. Par rapport aux risques, ils sont souvent plus circonscrits et concernent des domaines plus restreints. Dans le cas des poches d'eau en relation avec les glaciers le risque de vidanges catastrophiques et les conséquences pour les populations et infrastructures à l'aval ont diminué pour certains glaciers. C'est le cas pour le glacier d'Aletsch, où le lac de Märjelen n'a plus créé de problèmes à partir de 1931 ([fiche glaciers 6.3](#)). Ailleurs, de nouveaux lacs glaciaires se sont formés sont provoquer des dangers, diversifiant le paysage. Le retrait des glaciers permettra également d'effectuer d'importantes découvertes archéologiques relatives à la colonisation des vallées alpines ([fiche glaciers 5.2](#)) et d'avoir davantage de bois et de tourbe pour la reconstitution du climat des derniers 10'000 ans ([fig. 4](#)) ([fiche glaciers 4.5](#)). Enfin, les chercheurs de minéraux et les spéléologues vont se réjouir de voir se dégager des terrains vierges et de nouvelles entrées à explorer.



Fig. 1 – Evolution de la température annuelle moyenne

Evolution de la température annuelle moyenne pour l'ensemble de la Suisse.



Fig. 2 – Dépôts de lave torrentielle

Dépôts de lave torrentielle en aval du glacier de Plampincieux (Val Ferret, Italie).



Fig. 3 – Les Alpes sans glaciers ? La disparition de certains glaciers a modifié radicalement le paysage de haute montagne. La ligne verte marque l'extension du [glacier du Valdraus](#) à la fin du Petit Age Glaciaire (Val Camadra, TI).



Fig. 4 – Tronc d'arbre dans des sédiments fluviaux

Photo d'un tronc d'arbre dans des sédiments fluviaux en aval du [glacier de Bocheresse](#) (Val de Bagnes, VS).