

04/06/2022

Guide des paysages glaciaires du Val d'Hérens

Walter Wildi, Pauline Gurny-Masset,
Mario Sartori

Section des sciences de la Terre et de l'environnement
Université de Genève
Rue des Maraîchers 13, CH-1205 Genève

© 2015

Document Internet
<http://www.unige.ch/forel/fr/services/guide/valdherens/>



Guide des paysages glaciaires du Val d'Hérens

Walter Wildi, Pauline Gurny-Masset, Mario Sartori

Dans le cadre de l'exposition de glaciologie du Musée des Haudères

Table des matières

Préface: La vallée des pyramides	2
1. Introduction à la glaciologie	4
1.1 Du flocon de neige à la glace	4
1.2 Bilan de glace d'un glacier de montagne	5
1.3 Le système glaciaire	6
1.4 Au fil de l'eau de fonte	9
1.5 La glacier qui bouge	11
1.6 Erosion glaciaire	12
1.7 Les sédiments du paysage glaciaire	13
2. Histoire glaciaire	14
2.1 Les grands changements climatiques à l'origine des vallées alpines	14
2.2 Optimum climatique médiéval et Petit âge glaciaire	16
3. Les Glaciers du Val d'Hérens	18
4. De la dernière glaciation à nos jours et de Genève à Ferpècle: le retour des glaciers dans les Alpes	20
5. De Ferpècle au Glacier du Mont Miné: voyage dans le Petit âge glaciaire	28
6. Visite de terrain: Le Glacier du Mont Miné à la fin du Petit âge glaciaire	31
Bibliographie et links	35

Préface: La vallée des pyramides

Nous ne pouvons nous imaginer les Alpes sans leurs sommets et crêtes d'un blanc immaculé devant un ciel bleu. Et les langues des glaciers qui descendent dans les vallées dans un flux incessant, mais invisible à l'œil nu. Ce sont ces montagnes qui ont attiré les premiers touristes et grimpeurs au cours du XIX^e siècle, et ce sont les glaciers en train d'avancer dans les vallées et sur sur les alpages qui ont alerté à la même époque les chercheurs sur l'intérêt à mieux étudier les énigmes des glaciers.

Au début du XIX^e siècle, J. P. Perraudin, chasseur et chercheur de minéraux dans le Val de Bagnes observe l'avancement du Glacier de Giétroz, l'invasion des pâturages par la glace et l'édification de nouvelles moraines (fig. 2). Alerté par Perraudin, Ignace Venetz, ingénieur à l'Etat du Valais, constate la formation d'un lac de barrage qui se vide en 1818, en inondant la haute



Figure 1: Les pyramides d'Euseigne sont l'emblème même du Val d'Hérens et de son histoire glaciaire. Ces «demoiselles», coiffées d'un chapeau correspondent aux résidus de l'érosion des moraines basales du dernier âge glaciaire au point de rencontre des glaciers du Val d'Hérence et du Val d'Héremence.

Vallée de Bagne. Dans sa communication à Lucerne, à l'occasion de la séance annuelle de la Société Helvétique des sciences naturelles (SHSN), Ignace Venetz émet l'idée révolutionnaire que les glaciers ont eu dans le passé une extension bien plus importante que celle observée à l'époque. Louis Agassiz reprend à son compte l'idée d'une extension des glaciers à l'extérieur des Alpes. Dans son discours à la SHSN en 1837, publié en 1840, il dépeint les changements climatiques responsables de l'extension d'une calotte glaciaire qui aurait recouvert presque toute l'hémisphère Nord. Dès 1840-45 la théorie glaciaire est mondialement reconnue.

C'est ainsi que commencent à naître, notamment sur la base d'observations effectuées en Valais, à la fois la sciences des glaciers ou « glaciologie » et la théorie glaciaire.

En attendant, les choses ont bien changé. Les glaciers qui s'étaient avancés dans les vallées au cours du XVI^e siècle, au début de la période connue comme le «Petit âge glaciaire», ont atteint leur dernière extension maximale autour de 1850. Dès ce moment, les langues ont commencé à diminuer. Et même si elles n'ont pas encore atteint leur position reculé du Moyen-âge, le changement climatique en cours nous fait sentir le retour d'une période plus clémente. Or, tout changement interpelle et inquiète ce qui explique le nouvel intérêt rencontré dans le public pour les glaciers et leur évolution.

Le Val d'Hérens, ne compte ni les glaciers les plus longs, ni les sommets les plus hauts du Valais. Mais il offre de par ses paysages, glaciers et rivières, et aussi par sa flore et sa faune d'extraordinaires conditions d'observer l'organisation, le fonctionnement et le changement des paysages. Il déroule devant nous les faits de façon didactique et permet d'étudier les phénomènes et l'histoire glaciaire récente dans des conditions idéales.

Ce guide propose d'abord une brève introduction aux éléments essentiels de la glaciologie, de la formation de la glace aux mécanismes d'érosion du substrat rocheux par la glace et l'eau. Un chapitre est consacré aux anciennes glaciations et un autre chapitre aux traces laissées par la période chaude du Moyen-âge et à l'histoire du Petit âge glaciaire.

Le guide propose enfin des visites de terrain sur le thème du retour des glaciers dans les Alpes. Quatre sites localisés le long de la route de Sion à Evolène illustrent la fin du dernier âge glaciaire. Enfin, une marche de moyenne montagne permet d'observer les traces du Petit âge glaciaire dans l'avant-pays des glaciers du Mont Miné et de Ferpècle.

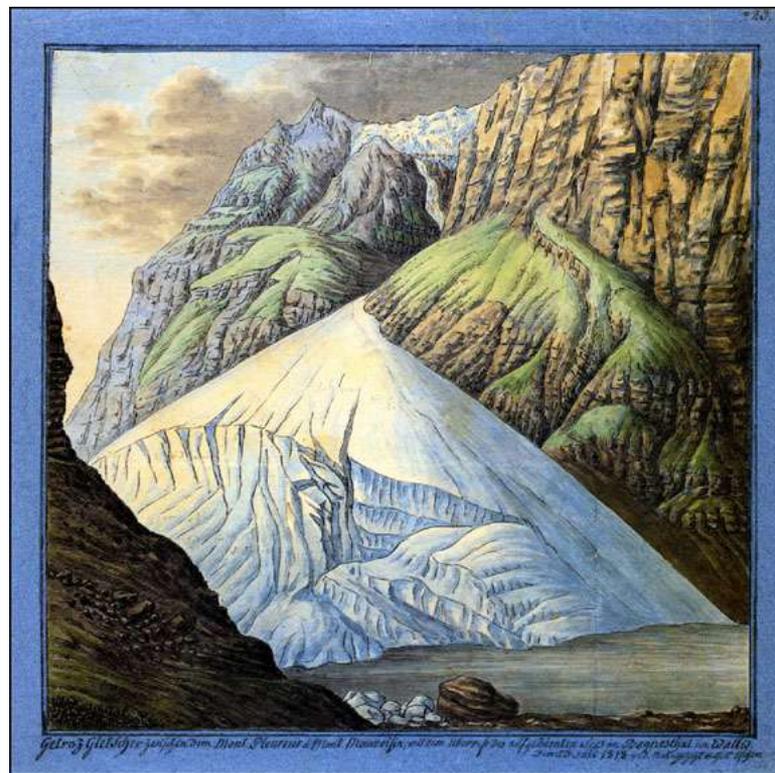


Figure 2: Le glacier du Gietro entre le Mont Pleureur et le Mont Mauvoisin, avec les restes du lac glaciaire (Val de Bagnes, VS), dessiné d'après nature par H. C. Escher le 23 juillet 1818. Dessin à plume, aquarelle, 26 x 26,5 cm , Graphische Sammlung, ETH Zurich (n° 223 = Inv. C XII 13b).

1. Introduction à la Glaciologie

1.1 Du flocon de neige à la glace

Chimie et physique de l'eau

- **Formule chimique:** H₂O, monoxyde de dihydrogène, hydrogénéol, hydroxyde d'hydrogène, oxyde dihydrogéné.
- Au niveau de la mer, l'eau se trouve dans ses **3 états** aux conditions de température suivantes:
 - gazeux > 100°C < liquide > 0 °C solid
 - vapeur eau glace
- **Densité:** elle varie selon la température et l'état (niveau d.l. mer):
 - 99 °C: 958.4 kg/m³ (liquide, dès 100 °C: évaporation)
 - 4 °C: 999.973 kg/m³ (liquide, plus haute densité)
 - 0 °C: 999.841 kg/m³ (liquide)
 - 0 °C: 917 kg/m³ (solide: dilatation env. 10% au gel de l'eau)
- La chaleur latente de fusion de la glace est de 333 kJ·kg⁻¹

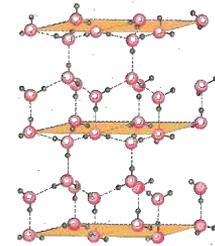
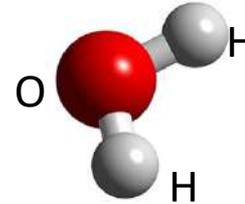


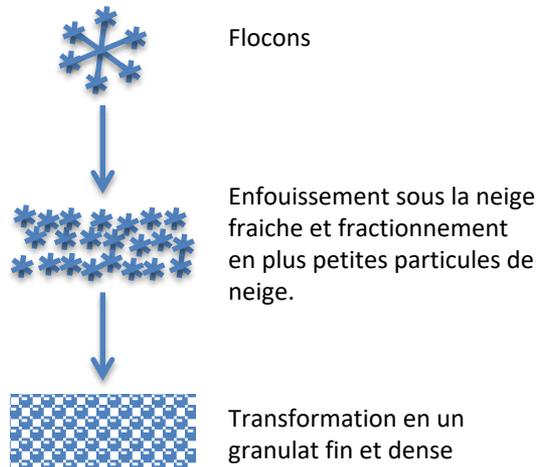
Figure 3: Structure de l'eau et de la glace.

<http://www.ressources.cfadf.com/pensee/chimie6.htm>

La glace naturelle qui se forme en dessous de 0 °C assemble des molécules d'eau dans un réseau cristallin (fig. 3): chaque atome d'oxygène (en rouge sur la figure) est entouré de 4 autres atomes de la même espèce, par l'entremise d'un atome d'hydrogène. Mais, comme le montre la fig. 3 (à droite), des groupes d'oxygène et d'hydrogène forment des couches, à l'intérieur desquelles les distances entre atomes sont plus petites que les distances entre les couches. Ces réseaux cristallins par couches sont également connus en minéralogie dans les argiles et les micas (phyllosilicates).

Figure 4: processus principaux pour former la glace d'un glacier de montagne, soit:

Enfouissement et compaction de la neige (glaciers froids)



Fusion - recristallisation de la neige (glaciers tempérés)

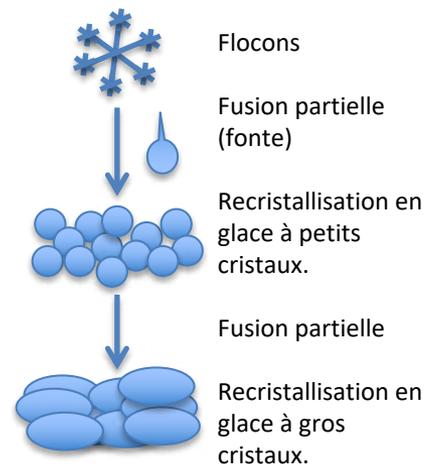


Figure 5: Caverne de glace, Mer de Glace, Chamoni: Glace laminée à bulles d'air (bandes blanches) et débris de roche.

1.2 Bilan de glace d'un glacier de montagne

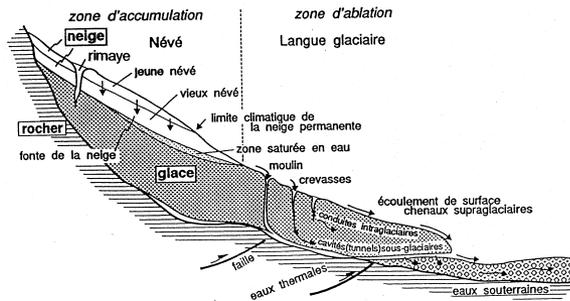


Figure 6: Section d'un glacier alpin: La neige fraîche de l'année s'accumule sur le glacier pendant la saison froide (automne – printemps) et re-disparaît à basse altitude en été. En haute altitude, elle forme le névé, se consolide du jeune au vieux névé et se transforme en glace par fusion et re-gel.

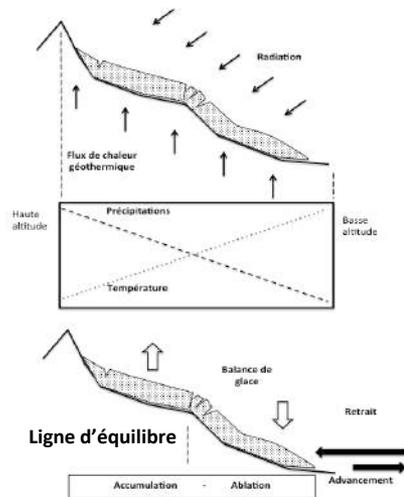


Figure 7: Paramètres principaux du bilan de glace et de la position du front glaciaire: température, précipitations et flux géothermique.

Sur un glacier d'altitude on désigne par «zone d'accumulation» la partie du glacier dont le bilan de glace est positif pour une année hydrologique (du 1^{er} octobre au 30 septembre de l'année suivante). Cette zone est séparée de la «zone d'ablation», avec perte de glace, par la «ligne d'équilibre». Le bilan de masse d'un glacier est la différence entre l'accumulation et les pertes par ablation (fonte), exprimée en volume équivalent en eau (volume d'eau formé par la fonte de glace), sur une année hydrologique. La conséquence d'un bilan de masse négatif pour l'ensemble du glacier est le retrait de la langue (voir les figs. ci-contre). Ces notions tiennent par ailleurs compte du mouvement du glacier: la glace glisse et flue de la zone d'accumulation vers la zone d'ablation.

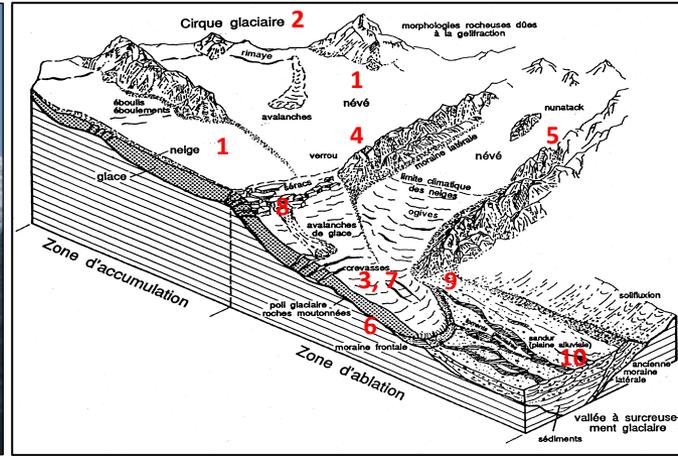


Figure 8: Portail du Glacier du Mont Miné, octobre 2012, un jour de froid.

L'apport d'eau sur un glacier se fait par les précipitations et, éventuellement, par des avalanches. L'exportation d'eau peut se faire par sublimation (évaporation depuis la neige et la glace) et par fonte de glace et écoulement sur le glacier, à l'intérieur et à la base de celui-ci.

Figure 10: Le système glaciaire: aperçu des différents éléments

a) Névés et séracs du glacier de Ferpècle



c) Langue du glacier de Ferpècle



d) Portail du torrent sous-glaciaire du glacier du Mont Miné et moraine basale



e) Crevasses et moulin sur la langue du glacier de Ferpècle



f) Chutes de séracs (avalanches de glace) au glacier du Mont Miné



Les **névés 1** sont installés dans les **cirques glaciaires 2** recouverts de neige jusqu'à la **limite climatique des neiges**. Les **langues glaciaires 3** drainent la glace formée sur les névés. Les **verrous glaciaires 4** correspondent à des resserrements des langues par des seuils et avancements rocheux. Les **nunataks 5** peuvent émerger de la glace dans des endroits où le rocher a résisté à l'érosion. Le rocher sous le glacier est souvent modelé en **rochers moutonnés 6**, constituées de rochers arrondis par abrasion, se terminant par un abrupt d'arrachement et une dépression. Les **crevasses 7** sont des fissures dues aux contraintes internes (tensions) aux glaciers en mouvement, la **rimaye** est à la crevasse de départ des névés; les plissements internes de la glace sont connus comme **ogives**, les conduites d'eau verticales sont nommées **moulins**. Les **Séracs 8** correspondent à des lames de glace dues à la cassure du glacier sur un seuil rocheux. Le matériel rocheux érodé par gélifraction, l'eau, les avalanches et le vent à la base et dans les pentes surplombant le glacier, se trouve accumulé en bordure et au front du glacier sous forme de **moraines basales, latérales et frontales 9**. En cas de remaniement et de transport fluviatile, gravier et sable constituent le **sandur 10** (plaine d'épandages proglaciaire) et les **deltas des lacs proglaciaires**.

1.4 Au fil de l'eau de fonte

Les torrents glaciaires ont des débits selon un schéma saisonniers (régime glaciaire ou nivo-glaciaire):

- Peu d'eau coule en hiver quand le paysages est gelé. La neige s'accumule alors à la surface du glacier.
- La fonte du manteau neigeux commence au printemps, souvent réellement dès le mois d'avril et peut durer jusqu'au début de l'été. Les torrents gonflent alors et montrent leur débit maximal.
- En été, souvent dès le mois de juillet, la neige de l'hiver a disparu sur les langues glaciaires de basse altitude. Commence alors la fonte de la glace, essentiellement pendant la journée. Les torrents sous-glaciaires et pro-glaciaires gonflent au cours de la journée et diminuent la nuit. Le moment de l'écoulement maximale au cours de l'après-midi dépend surtout de la rétention de l'eau par le glacier.
- En automne, avec la diminution de la radiation solaire, les débits baissent et deviennent plus réguliers au cours de la journée.

La contribution des orages au débit des cours d'eau est limité. En effet les premiers millimètres des précipitations restent piégés dans le système glaciaires et n'apparaissent que progressivement dans le bilan d'eau du torrent.

A la sortie du glacier, l'eau du torrent est proche d'une température de 0°C. Le Rhône est un important collecteur d'eau de fonte venant des vallées latérales. En janvier la température varie autour de 4 à 5°C. En été, le fleuve s'écoule à une température de 10 à 11 °C dans le Léman, dont les eaux de surface peuvent atteindre 20 ou 22 °C.

Les torrents glaciaires exportent une partie importante des sédiments produits par abrasion du substrat rocheux à la base de la glace. Cette eau chargée et turbide, de couleur blanchâtre et appelée « lait glaciaire », transporte essentiellement du sable et du silt.

La plupart de l'eau des torrents glaciaires est captée de nos jours par les centrales hydroélectriques et s'écoule ou est pompée dans les lacs de barrage. Le sable peut alors abimer les pales des pompes et des turbines par cavitation.

Les torrents sont donc conduits par des « désableurs ». Ce sont des bassins artificiels qui ralentissent l'écoulement et qui permettent le dépôt du gravier entraînée à la base de l'écoulement torrentiel et du sable grossier à moyen.

Une partie des sédiments arrive quand-même dans les barrages et s'accumule dans leur bassin. L'accumulation de ces sédiments peut poser problème à terme dans les bassins dans lesquels l'évacuation par vidange n'est pas possible, n'est pas efficace ou n'est pas autorisée, surtout pour des raisons écologiques.

En aval des barrages, le régime des écoulements est fortement modifié: Les pointes sont coupées de façon générale, mais surtout pendant la journée et en été. Par contre, l'étiage (écoulement minimal) est moins prononcé en hiver, du fait du turbinage de l'eau des barrages pour la production d'électricité.



Figure 12: Mesure du débit de la rivière pro-glaciaire par salage.



Figure 13: Mesure classique du débit de la rivière pro-glaciaire: largeur du cours d'eau, profondeur et vitesse d'écoulement.

Figure 14: Au fil de l'eau de fonte



1.5. Le glacier qui bouge

Tout glacier de montagne flue et glisse; il se comporte donc à la fois comme un corps visqueux (plastique) et un corps rigide (élastique); il «coule» lentement pour s'avancer et glisse à sa base sur son substrat.

L'écoulement «visqueux» (fluage) se fait essentiellement par la déformation interne des cristaux et par leur fusion/recristallisation. Par ailleurs, des cisaillements internes à la glace peuvent soutenir le mouvement. Les paramètres qui déterminent cette déformation sont notamment les suivantes:

- La température de la glace
- L'épaisseur du glacier
- La pente d'écoulement

Le glissement du glacier sur son substrat dépend notamment de l'épaisseur de la glace, de la pente d'écoulement, de la température à la base du glacier et de la présence d'eau entre glacier et rocher.

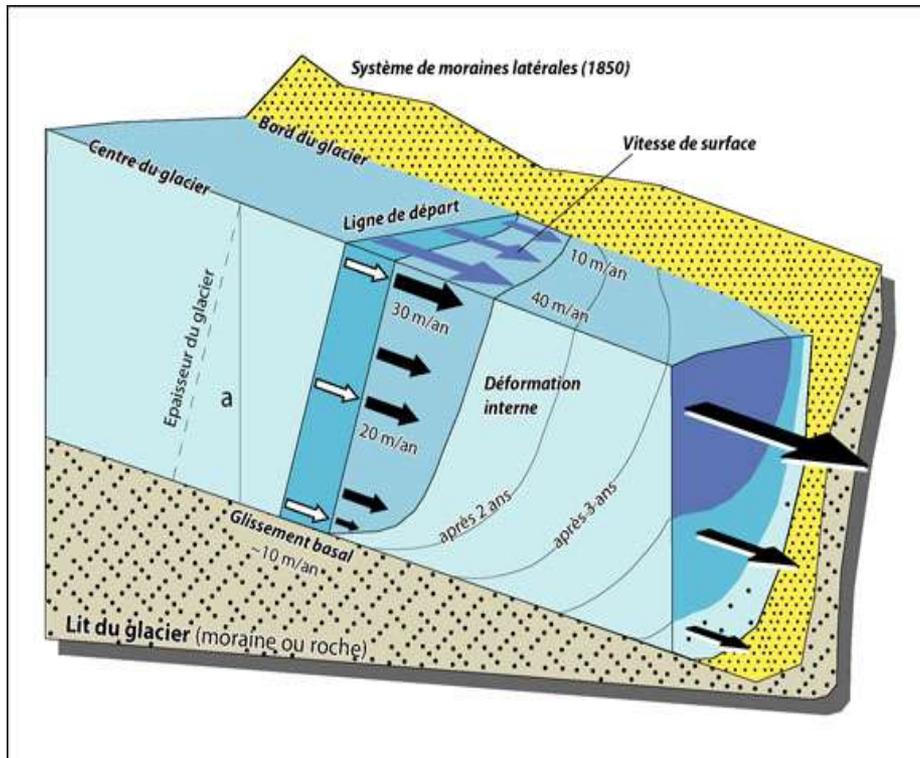
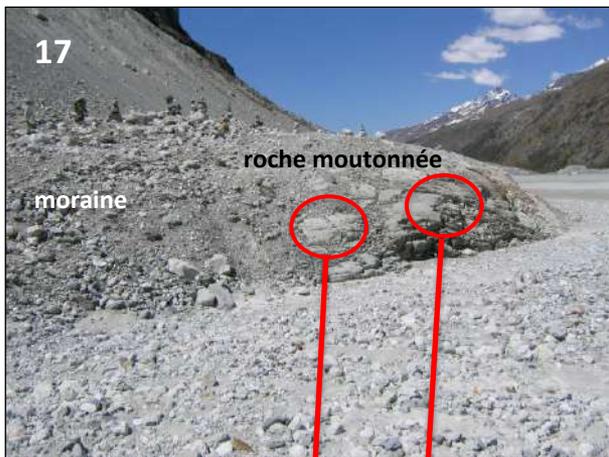


Figure 15: La figure schématise le mouvement du glacier: les flèches blanches représentent l'avancement du glacier par glissement sur le substrat; les flèches noires représentent la déformation interne de la glace. A la manière de l'écoulement d'eau dans un chenal, la vitesse de déplacement la plus élevée se trouve au centre et à la surface du fleuve de glace, où l'effet de résistance contre le substrat basale et les flancs de montagne est minimal. Les vitesses minimales se trouvent le long des points de friction (Fiche d'enseignement 2.1.2 de la Société Suisse de Géomorphologie, dessin de C. Scapozza, adapté de Maisch 1993).



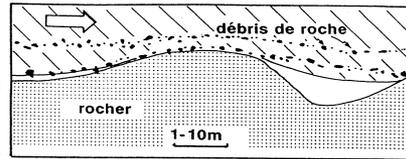
Figure 16: Lames de glace chevauchantes au Glacier d'Arolla: lorsque le front du glacier est bloqué par la friction ou par gel, un plan de cassure s'installe et la langue de glace chevauche son propre front.



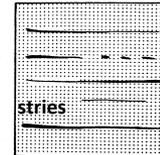
1.6 Erosion glaciaire

20

ABRASION SOUS-GLACIAIRE

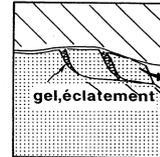
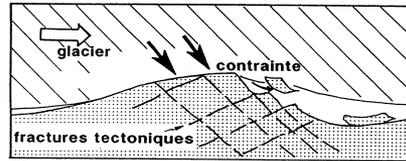


vue en coupe



vue en plan

ARRACHEMENT SOUS-GLACIAIRE



EROSION PAR L'EAU

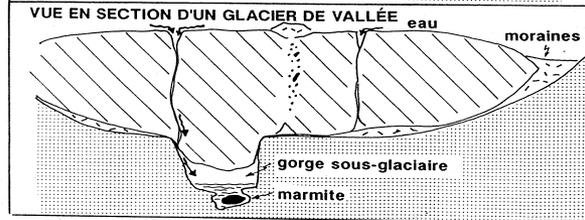
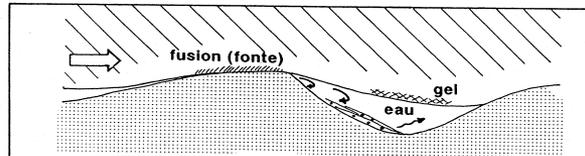


Figure 17: Roche moutonnée, Glacier du Mont Miné

Figure 18: Stries glaciaires sur la droite du mouton rocheux de la fig. 17.

Figure 19: Arrachements le long des fractures du rocher.

Figure 20: Schéma des mécanismes d'érosion glaciaire.

Figure 21: Roche moutonnée du Glacier de Ferpècle avec premier lichen de couleur fluo (*Rhizocarpon geographicum*).

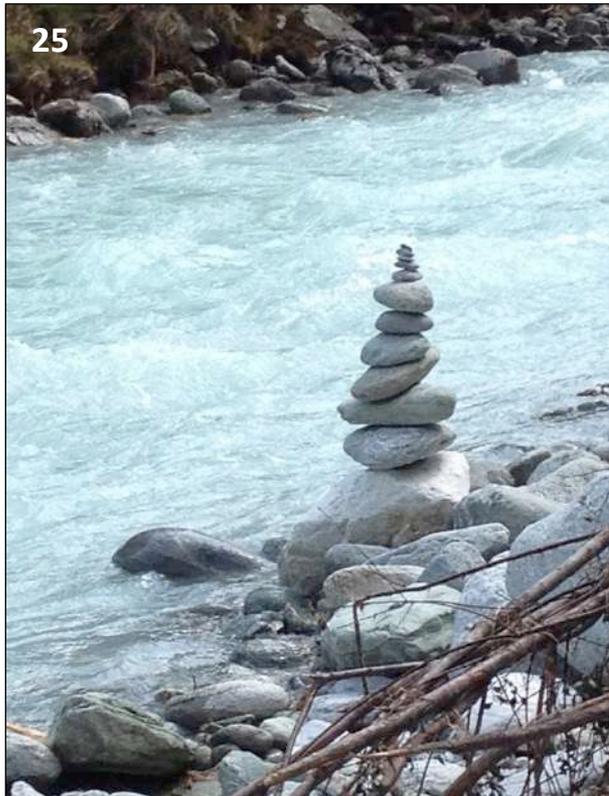
Figures 22 et 23: Cavitations et marmites dans l'avant-pays du Glacier de Ferpècle créées par l'écoulement de l'eau.



1.7 Les sédiments du paysage glaciaire

Figure 24: Lait glacière produit par **abrasion** du substrat rocheux; sortie du Glacier du Mont Miné; gros galets et blocs formés par arrachement, puis arrondis au cours du transport par la rivière.

Figure 25: Lait glacière dans la Navisence de Zinal (photo Lucie Wildi).



Figures 26 et 27: Le rocher écrasé et fracturé par la pression de la glace apparaît sous le glacier du Mont Miné en retrait. Ces images illustrent la formation de blocs par **arrachement** qui sont ensuite soit transportés dans le torrent sous-glaciaire, soit pris dans la moraine.

Figure 28: La **moraine** (ici: moraine latérale sur la gauche du Glacier du Mont Miné) est formée de matériel d'abrasion (sable et limon) et de blocs provenant de l'arrachement sous le glacier ou de dépôts de pente (éboulis, éboulements) sur les versants au-dessus du glacier. Actuellement, l'érosion par les eaux de ruissellement crée des ravins verticaux et des crêtes très accentuées. Des éboulis avec du matériel provenant de cette érosion s'accumulent en bas de pente.



2. Histoire glaciaire

2.1. Les grands changements climatiques à l'origine des vallées alpines

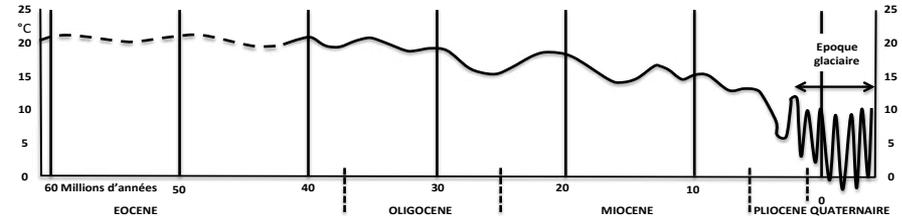
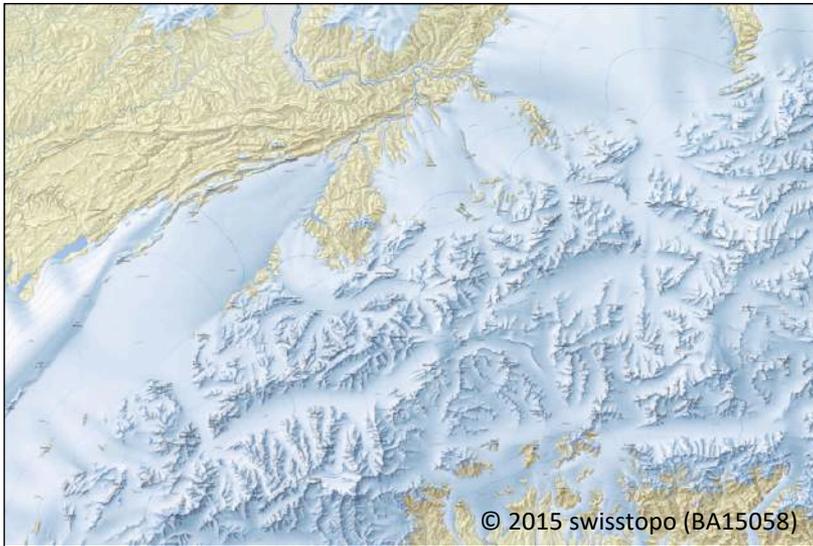
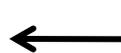
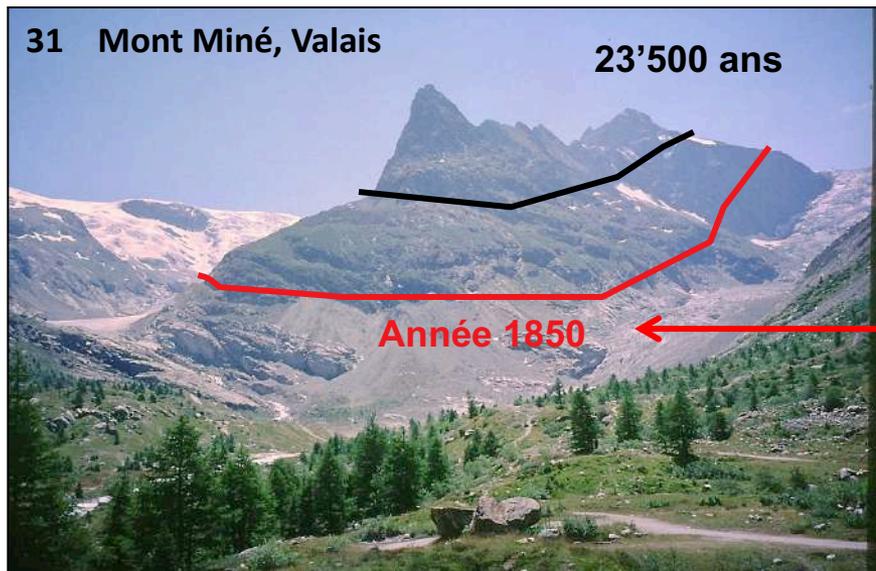


Figure 29: La carte ci-dessus représente la Suisse pendant le dernier âge glaciaire (Bini et al., 2009). **Figure 30 (haut:** évolution des températures terrestres depuis 60 mio d'années; **milieu:** Lucerne il y a 20 millions d'années et **bas:** Lucerne à l'époque glaciaire (tableau à huile de Ernst Hodel, d'après les croquis du géologue Albert Heim). Ces tableaux illustrent les changements de paysage en fonction des changements climatiques majeurs.

Le creusement des vallées alpines et de l'avant-pays alpin est essentiellement l'œuvre des glaciers au cours des glaciations qui affectent le climat terrestre depuis 2 mio d'années. Dans le bassin versant du Rhône, les premières indications de glaciations ont été découvertes, sur les hauteurs du Léman à 800 m d'altitude; elles datent d'il y a environ 800'000 ans. Ce passage glaciaire a été suivi d'autres périodes froides, séparées par des périodes interglaciaires chaudes, parfois avec un climat comparable au climat actuel et parfois même avec un climat plus chaud. La dernière extension maximale du Glacier du Rhône date d'il y a env. 23'500 ans.

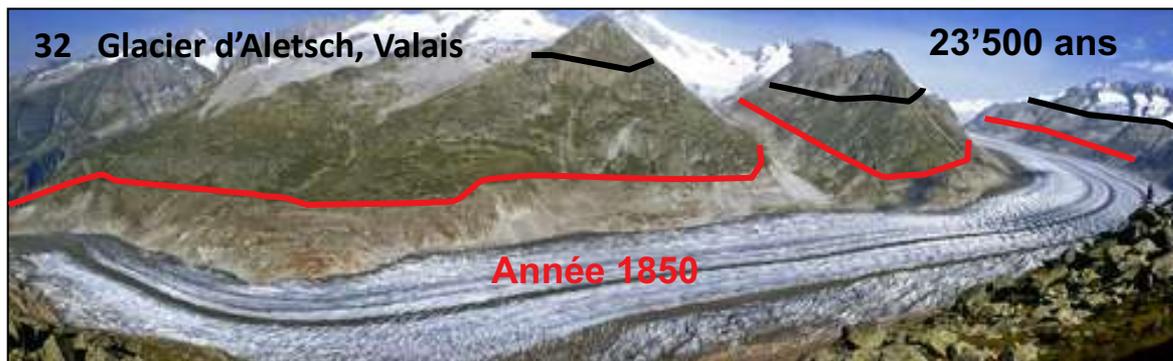




Dernier maximum glaciaire



Petit-Age glaciaire



Figures 31 et 32: La morphologie des rochers permet de déterminer l'extension des glaciers pendant les dernières périodes froides: La limite supérieure des glaciers alpins au dernier âge glaciaire (env. 23'500 ans) coïncide avec la limite des rochers polis par ces mêmes glaces. Au-dessus de cette limite, les rochers sont altérés et éclatés par le gel (gélifraction). L'extension maximale au cours du Petit âge glaciaire, soit celle de l'année 1850, apparaît comme la limite des rochers touchés par l'érosion récente, où la végétation de lichens et de mousses n'a pas encore entièrement recouverte les surfaces rocheuses.

2.2 Optimum climatique médiéval et Petit âge glaciaire

Les légendes de Blüemlisalp ou des Manzettes

Le premier à décrire en détail les légendes de Blüemlisalp dans le Val d'Hérens est F. Röthlisberger (1976). La Blüemlisalp est un magnifique massif de montagnes d'une altitude atteignant 3664 m, situé à l'est du village de Kandersteg (Oberland Bernois). La littérature et la tradition orale rassemblent sous le terme de «légendes de Blüemlisalp» (*Blüemlisalpsagen*) des récits et comptes populaires rappelant des périodes d'un climat plus clément que celui de nos jours.

Dans le Val d'Hérens, la légende est liée à celle des chemins de passage reliant la vallée par des cols élevés à la région de Zermatt, en particulier le Col d'Hérens. Au Moyen-âge, ce cheminement était effectivement couramment utilisé par les habitants du Val d'Hérens, qui allaient au service religieux du dimanche à Zermatt, ou qui enterraient leurs défunts dans cette même localité.

Notons par ailleurs que le chemin menant d'Evolène par le village de La Sage et l'Alpage de Bricola était probablement déjà utilisé par les Romains, comme en témoignent des pièces d'argent trouvées le long du tracé et une inscription aux Manzettes, en amont de Bricola. On y suppose d'ailleurs la présence d'un ancien gîte d'étape, utilisé à la même époque.

On peut recommander à tout lecteur intéressé par l'histoire et les légendes concernant le Val d'Hérens, mais également par l'histoire glaciaire et climatique, le récit donné par A. Fauchère (2014, p. 27 et suivantes). Cette journaliste, ethnobotaniste et «rebelle de la montagne» (<http://www.a-fauchere.ch>) a repris et exploité les récits des archives. Son histoire commence comme suit: « Il était une fois un roi riche et très gai, qui se prénomait Re Borah. Son royaume se situait au pied du Mont-Miné, au centre d'un grandiose univers alpestre. . . ». Le récit continue avec le drame de l'avancée des glaciers et de la disparition du royaume du Mont Miné, auparavant au climat si doux. L'auteur continue l'analyse historique des

fluctuations glaciaires dans la vallée et les compare aux autres glaciers et vallées de la région. Elle étend également l'étude des passages par d'autres cols, et les liaisons anciennes avec la vallée d'Aoste et la Savoie. L'interprétation qu'il convient à donner à ces récits est évidente: A l'époque romaine et au Moyen-âge, les glaciers étaient en fort recul par rapport à leur position actuelle. Les vallées alpines comptaient une population importante, nourrie par l'exploitation d'alpages riches et fertiles, jusqu'à une altitude de plus de 2'600 m. Cet « optimum climatique médiéval » durait jusqu'au XIIIe siècle.

Optimum climatique et Petit âge glaciaire

Du Xe au XIIIe siècle, l'hémisphère nord de la Terre profite d'un climat exceptionnellement doux, appelé «optimum climatique médiéval». C'est une période pendant laquelle on cultive du vin en Angleterre, et où une population nombreuse est installée au Groenland, le pays vert. Et c'est certainement de cette période que parlent les légendes de Blüemlisalp ou des Manzettes. La dégradation climatique en étapes qui a alors affecté les régions vulnérables, soit les vallées alpines, la Scandinavie et le Groenland, a conduit à des famines et à des migrations importantes. A Chamonix, à moins de 100 km du Val d'Hérens, l'avancé, puis la fluctuation du glacier le plus important, la Mer de Glace, a été reconstituée dès le XVIe siècle par Nussbaumer et al. (2007). Les auteurs postulent d'abord une avancée de la langue de glace de plus d'un kilomètre en une 50aine d'années, puis des variations vives jusqu'au dernier maximum en 1852. Le recul se fait alors par paliers: la langue du glacier s'effondre d'abord sur une longueur d'environ 1'200 m en 30 ans (40 m/an). Une langue glaciaire assez stable avec des fluctuations mineures est rapportée d'environ 1880 à 1930. La phase de fusion rapide suivante, entre 1930 et 1970, correspond à un

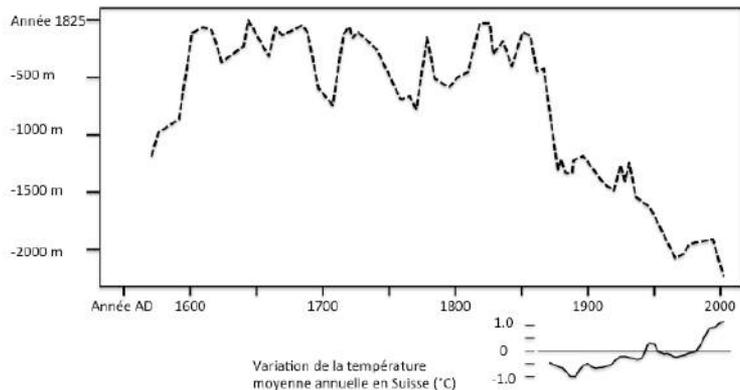


Figure 33: Fluctuations de la langue de la Mer de Glace à Chamonix – Mont Blanc 1550-2001 AD (Nussbaumer et al. 2007); courbe interpolée. Le point de référence de 1825 correspond à un bloc erratique. En dessous: Variations de la température moyenne (mesures instrumentales; moyenne glissante sur 20 ans) pour la Suisse 1864 – 2012; période de référence: 1961-1990.

recul de 800 m (20 m/an). Le plateau suivant dure d'environ 1970 à 1995. Dans la phase actuelle de fonte rapide, la langue de la Mer de Glace est en train de perdre en moyenne env. 35 m de longueur par an (voir fig. 33).

Au Val d'Hérens, les variations climatiques depuis la fin du dernier âge glaciaire, il y a env. 10'800 ans sont bien documentées. Un travail de recherche récent décrit en particulier le déroulement du Petit-âge glaciaire (Nicolussi K., Le Roy, M., Schlüchter, Ch. et al. 2022, traduction WW): « Le terme "petit âge glaciaire" (LIA) est classiquement utilisé pour définir une période d'avancées répétées et étendues des glaciers au cours du dernier millénaire. Le terme est également utilisé pour désigner la période de températures relativement basses entre l'anomalie climatique médiévale (ACM), ou période de réchauffement médiéval, et le réchauffement actuel. La fin de l'AIL est généralement fixée au milieu ou à la fin des années 1800 de notre ère. »

Tableau ci-contre: Périodes de glaciers alpins réduits, déduites de l'âge des arbres et de la tourbe qui apparaissent sous les langues glaciaires en fonte (adapté de Schlüchter & Jorin 2004). Ce tableau illustre les variations climatiques, exprimées par l'étendue des langues glaciaires dans les Alpes depuis la fin du dernier âge glaciaire il y a 10'800 ans.



Figure 34: Troncs d'arbres de plus de 8200 ans, pris sous la moraine basale du Glacier du Mint Miné à près de 2000 m d'altitude. Photo en 2010.

Périodes de longueur réduite des langues glaciaires (arbres et tourbe)	Années calendaires (avant 1950)	Durée (années)
10	9900-9550	350
9	9000-8050	950
8	7700-7500	200
7	7350-6500	850
6	6150-6000	150
5	5700-5500	200
4	5200-3400	1'800
3	Ca. 2700	100
2	2300-1800	500
1	1450-1150	300
	Total	5'400

« Cependant, les dates publiées du début de l'AIL sont plus variables, allant du milieu des années 1200 à la fin des années 1500. Sur les glaciers du Mont Miné et de Morteratsch, dans les Alpes suisses, nous avons échantillonné et ensuite analysé des restes détritiques ainsi que des restes d'arbres in situ provenant des glaciers du Mont Miné. Sur les deux glaciers, des arbres d'une durée de vie allant jusqu'à environ 400 ans ont été enfouis sur différents sites de moraines latérales. L'avancée correspondante des deux glaciers peut être retracée des années 1280 aux années 1310. Sur le glacier de Morteratsch, cette phase d'avancée du début du LIA a culminé probablement vers 1375. Les preuves recueillies sur les deux glaciers indiquent que les surfaces de glace se trouvaient à au moins 12-15 m des crêtes de moraines latérales déposées au cours de l'extension maximale. Ceci suggère une extension similaire (bien que très légèrement plus faible) que les avancées ultérieures du LIA sur nos sites.

Les avancées des glaciers du Mont Miné et de Morteratsch coïncident avec des températures estivales relativement fraîches de la fin des années 1200 à la fin des années 1300. Dans l'ensemble, on peut considérer que le début du Petit Âge Glaciaire dans les Alpes se situe vers 1260 CE.

Le Petit Âge Glaciaire n'était pas une période uniforme, mais avait plusieurs phases, comme le montrent les enregistrements des glaciers alpins et les températures estivales (estimées par lichenométrie). Nous proposons une subdivision du LIA dans les Alpes européennes en deux phases : une phase précoce (1260-1380 CE), une phase intermédiaire (1380-1575 CE) et une phase principale (1575-1860 CE). »

3. Les glaciers du Val d'Hérens

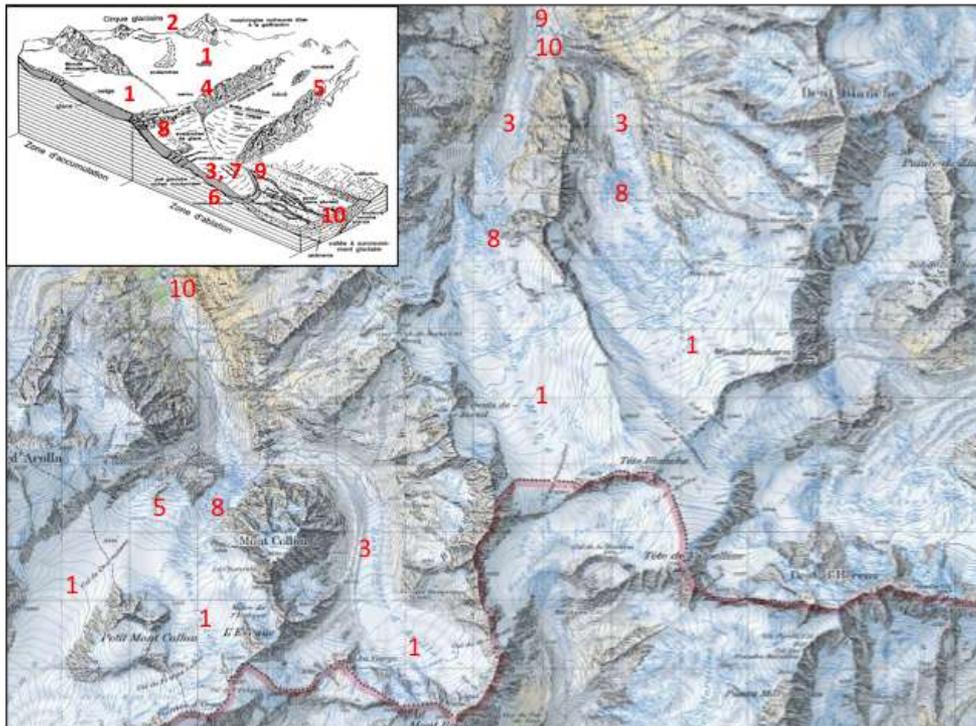


Figure 35: Carte topographique des glaciers du Val d'Hérens, © 2015, avec l'autorisation de swisstopo (BA15058)

Figures 36 – 40: Les glaciers les plus importants du Val d'Hérens, surveillés par le Réseau suisse d'observation des glaciers, situation en 2015
 (<http://glaciology.ethz.ch/messnetz/?locale=fr>)



Glacier du Mont Miné

Glacier de Ferpècle

Glacier du Mont Collon

Bas-glacier d'Arolla

Glacier	Longueur (km)	Surface (km ²)
Mont Collon	4.8	13.2
Mont Miné	8.4	11
Ferpècle	6.6	9.8

4. De la dernière glaciation à nos jours et de Genève à Ferpècle: le retour des glaciers dans les Alpes

La Terre vit depuis 2 Millions d'années dans une ère glaciaire. Suite à un changement climatique radical, lié notamment aux paramètres de l'orbite terrestre autour du soleil, les glaciations marquées par une croissance importante des calottes de glace et des glaciers des massifs montagneux, en alternance avec des périodes interglaciaires, avec un recul temporaire des volumes de glace, se succèdent. Cette histoire, connue avec précision grâce aux variations de la composition en isotopes des sédiments marins et de la glace des calottes de l'Antarctique et du Groenlande, est également documentée dans les régions alpines par les morphologies de terrain et les sédiments glaciaires, mais seulement pour les derniers environs 800'000 ans. Au cours de cette période, quatre glaciations majeures ont laissé leurs traces

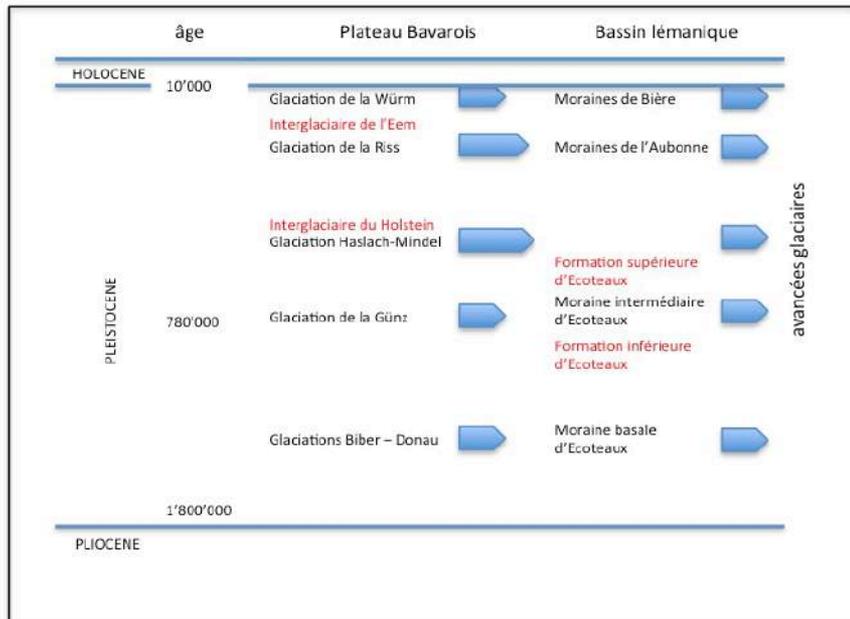


Figure 41: Glaciations dans le bassin lémanique: comparaison avec le Plateau Bavaïois de l'avant-pays des Alpes orientales (simplifié d'après Lih et al. 2002, bassin lémanique: Pugin et al. 1993)

dans l'avant-pays alpin (fig. 41). En revanche, à l'intérieur des Alpes, les phénomènes d'érosion étaient tellement intenses au cours des glaciations successives que seules les morphologies du dernier âge de glace sont encore clairement reconnaissables. Au cours de la dernière glaciation, appelée «Würm» (126'000 à 11'700 ans avant le présent), les glaciers des Alpes ont connu deux périodes d'extension maximale: la première autour de 60'000 ans et la seconde autour de 23'500 ans. Il existe cependant des différences importantes entre les deux périodes, selon les régions: Alors que les glaciers des Alpes Orientales et Centrales ont eu à peu près la même extension pendant les deux maxima, ceux des Alpes Occidentales, y compris le Glacier du Rhône, étaient beaucoup plus limités pendant le second maximum.

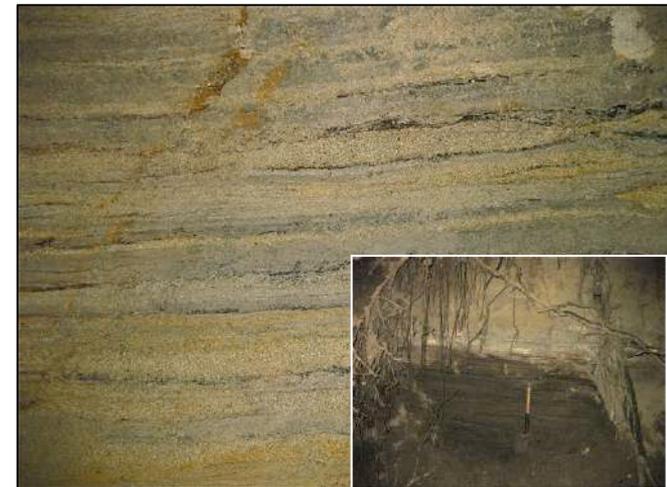


Figure 42: Dans la région du Léman, les sédiments lacustres de la Formation supérieure d'Ecoteaux, comportant des restes de plantes (pollens, feuilles, branches, paves) indiquent la présence d'un lac dans des conditions climatiques chaudes il y a un peu moins de 780'000 ans. Ces sédiments sont postérieurs à la Moraine basale d'Ecoteaux, aux sédiments lacustres de la Formation inférieure d'Ecoteaux et la Moraine intermédiaires (Pugin et al. 1993).

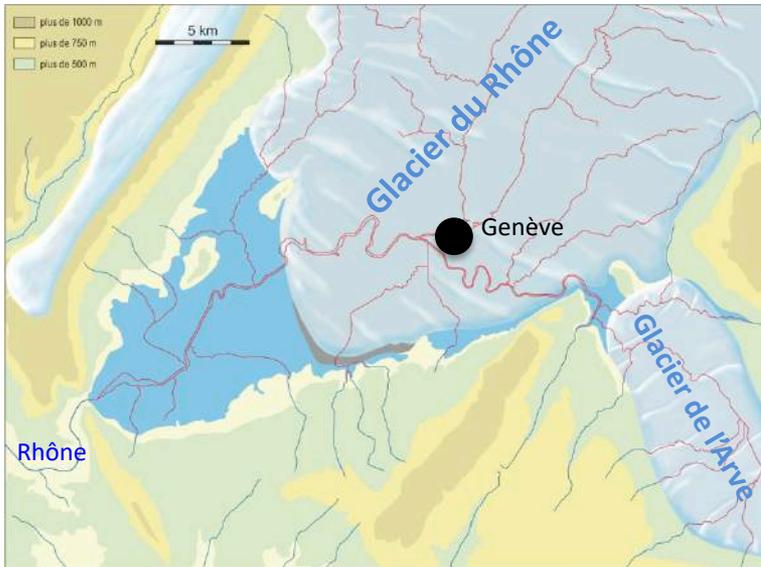
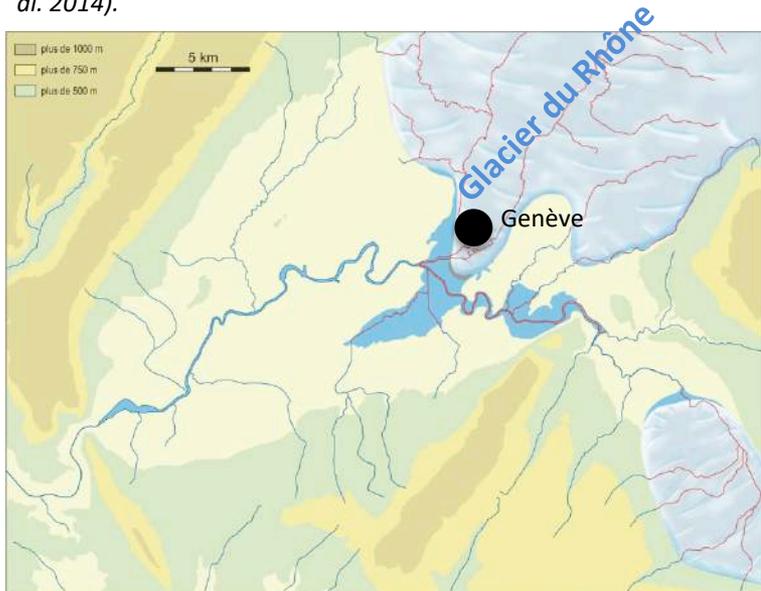


Figure 44: 23'500 ans, dernier maximum, position du Glacier du Rhône dans la région de Laconnex, à env. 8 km à l'ouest de la ville de Genève et un niveau du Léman naissant à env. 450 m (Wildi et al. 2014).



Pendant la première partie de la glaciation de la Würm le Glacier du Rhône était au contact avec le glacier de la Durance, en amont de Lyon. Tel n'était manifestement plus le cas pendant le dernier maximum glaciaire, à partir d'il y a environ 23'500 ans, où les moraines frontales de la région de Laconnex, à env. 8 km à l'ouest de Genève, marquent la position la plus avancée (fig. 44). Ce front glaciaire s'avanceit alors dans un lac, dont le niveau se situait à une altitude d'environ 450 m (actuellement 372 m) au dessus du niveau actuel de la mer. (A l'époque, le niveau de la mer était env. 130 m plus bas, du fait que beaucoup d'eau était bloqué dans les calottes de glace polaire).

Il y a environ 22'500 ans, le front du Glacier du Rhône avait fondu jusqu'à hauteur de l'actuelle Rade de Genève (fig 45). L'altitude du niveau du lac se situait alors à 400 m. Des icebergs flottaient sur l'eau et déchargeaient des blocs amenés sur le dos du glacier (fig. 46). On explique ainsi la présence des Pierres du Niton dans la Rade de Genève (fig. 47).

Depuis Genève on peut suivre la fonte de la glace à Coppet et à Nyon, où des moraines importantes se déposaient dans le Léman. Ensuite, seule la moraine de Chexbres et Puidoux, sur les hauteurs du Léman, témoigne d'un arrêt temporaire du Glacier du Rhône dans le bassin lémanique. Et ce n'est qu'en Valais, dans le Val d'Hérens à la Luette, que l'on retrouve de nouveau un repère sûr de l'histoire de la déglaciation.



Figure 46: Iceberg transportant des blocs ératiques (<http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/sedimentary/images/dropstones.html>)



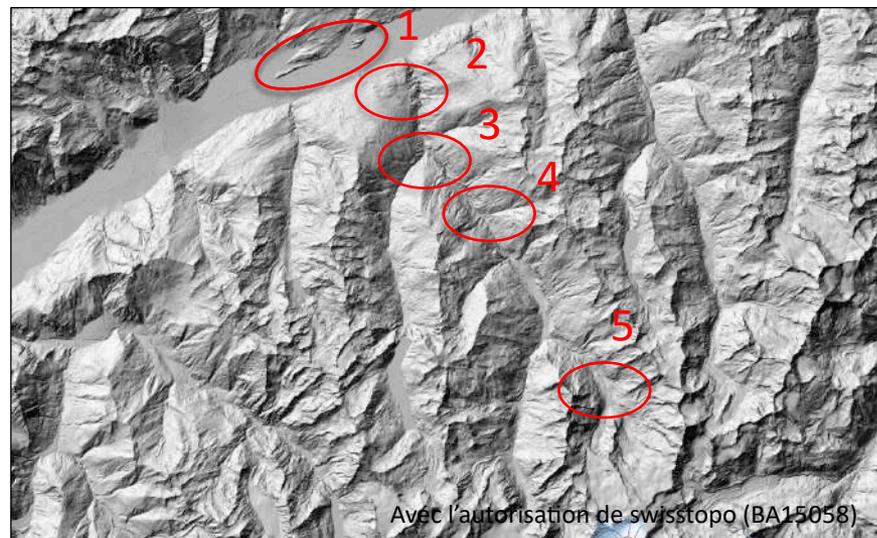
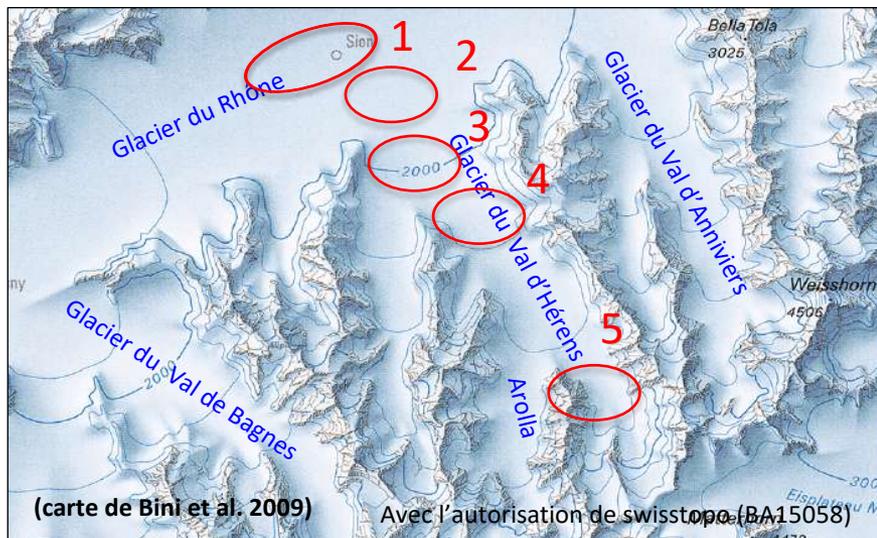
Figure 47: Pierres du Niton, Genève; blocs tombés du Glacier du Rhône qui flottait sur un lac au niveau plus élevé que de nos jours, « dropstones ».

Figure 45: 22'500 ans, le Glacier du Rhône dans la Rade de Genève et le niveau du Léman naissant à env. 400 m d'altitude.

Figure 48a - d: Stations glaciaires présentées

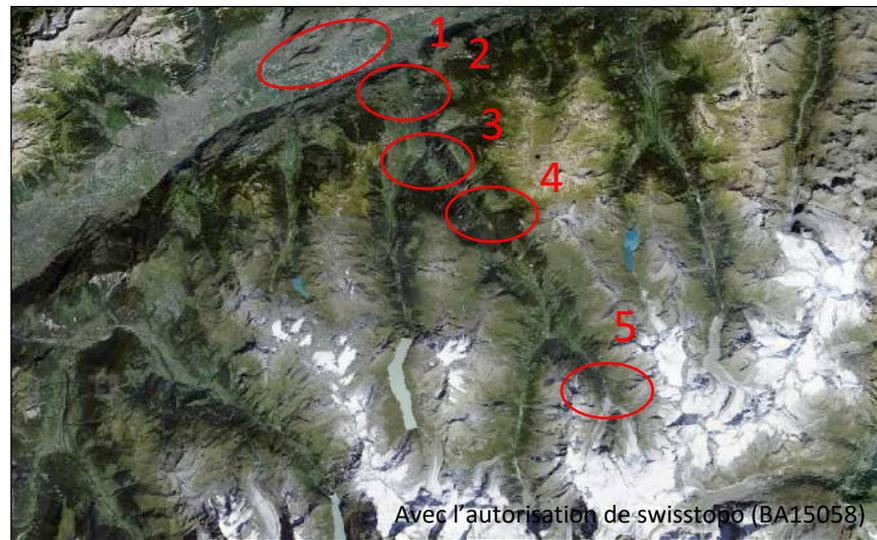
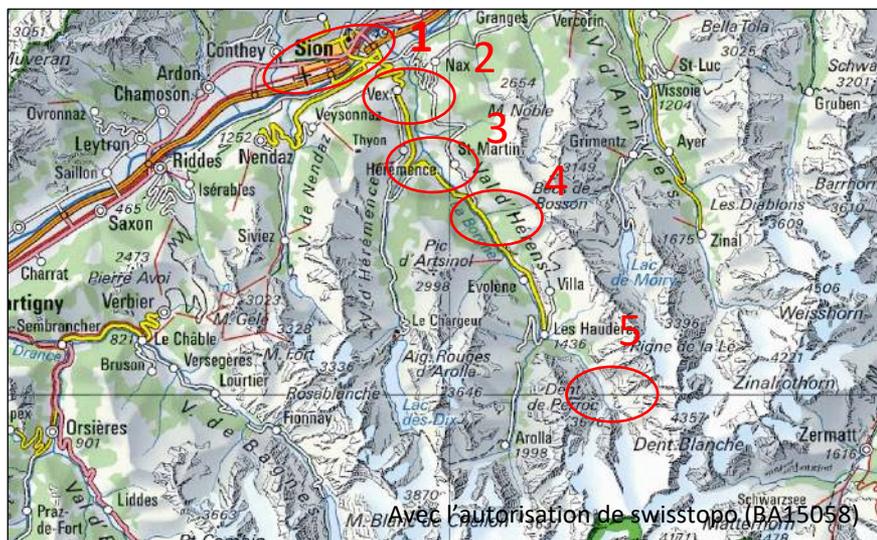
a: Extension maximale des glaciers au sud de Sion, il y a env. 23'500 ans

b: Relief actuel



c: Topographie

d: Orthophoto



1 Les drumlins de Sion

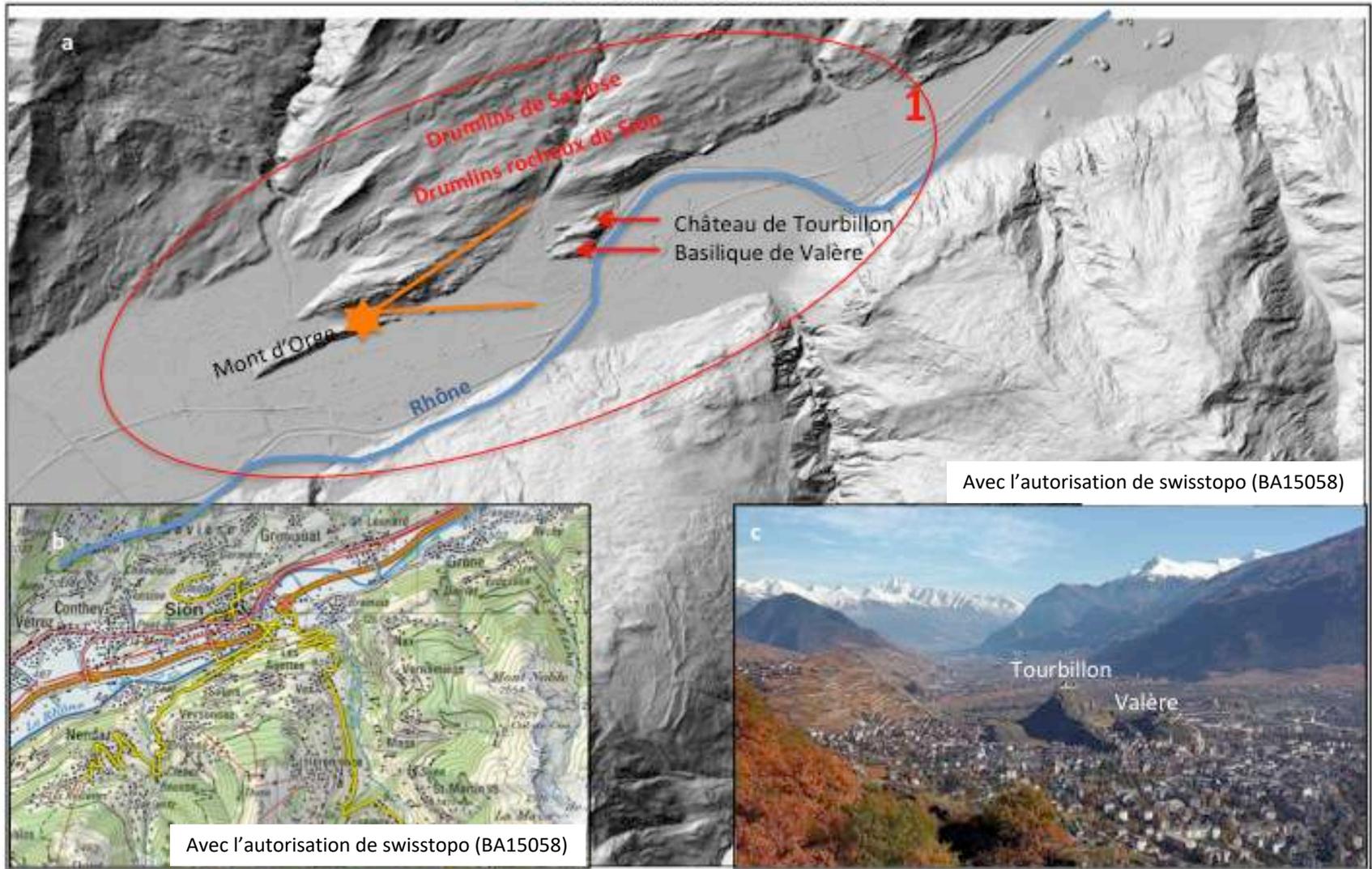


Figure 49a - c: Mont d'Orge, Tourbillon et Valère sont des drumlins rocheux (ou: «roches moutonnées» de grande dimension) qui ont résisté à l'érosion glaciaire. Ils émergent de la plaine alluviale du Rhône qui cache une vallée creusée de plus de 100 m de profondeur par le glacier et l'eau qui circulait sous la glace. Le remplissage de cette vallée est constitué de sédiments glaciaires (moraines), lacustres (limons et sables) et fluviaux (graviers et sables du Rhône et des affluents latéraux). Le versant au nord de la Vallée du Rhône (cercle rouge ci-dessus) est occupé par une série de drumlins («dos d'éléphants») qui marquent l'ancienne surface de glisse du Glacier du Rhône. La rive gauche (sud) de la Vallée du Rhône est plus abrupte, souvent avec des marques d'instabilité de versant, et les morphologies glaciaires sont de ce fait moins bien conservées que sur la rive droite.

2 Le lac de Vex

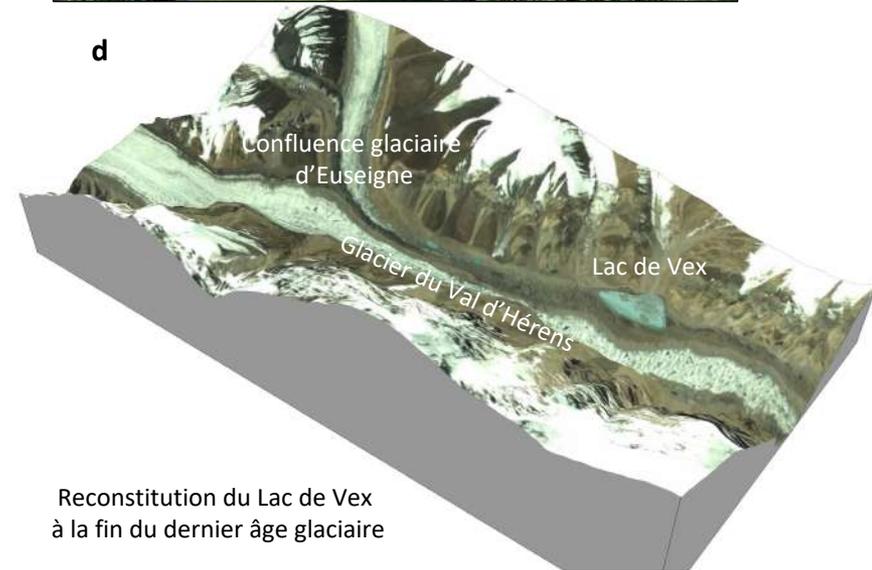
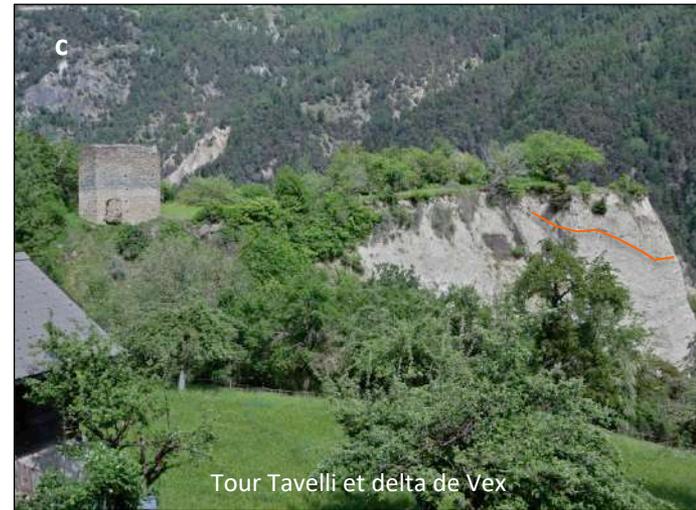
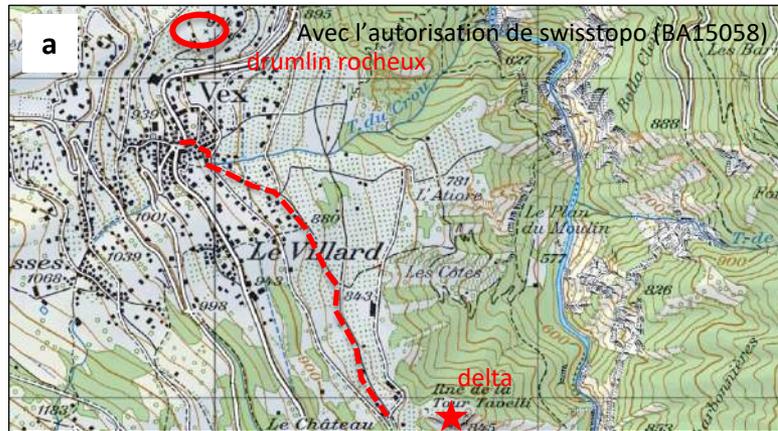


Figure 50a - d: Le village de Vex est posé sur une morphologie douce, essentiellement liée à la présence de moraines du dernier âge glaciaire. Au nord, un drumlin rocheux surplombe la localité. Le delta de Vex se situe en aval du village, sous la ruine de la Tour Tavelli, une petite forteresse du XIIIe siècle: suivre le chemin pédestre et les panneaux d'indication depuis le centre du village; compter 20 minutes à pied. Ce delta (fig. b, c) date du dernier retrait du glacier (env. 14'500 avant J.C.). Celui-ci a laissé un petit bassin lacustre sur sa gauche (à l'ouest), où une rivière locale a amené graviers et sables qui se sont déposés avec des pendages du versant de la pente vers le glacier.

3 Les pyramides d'Euseigne

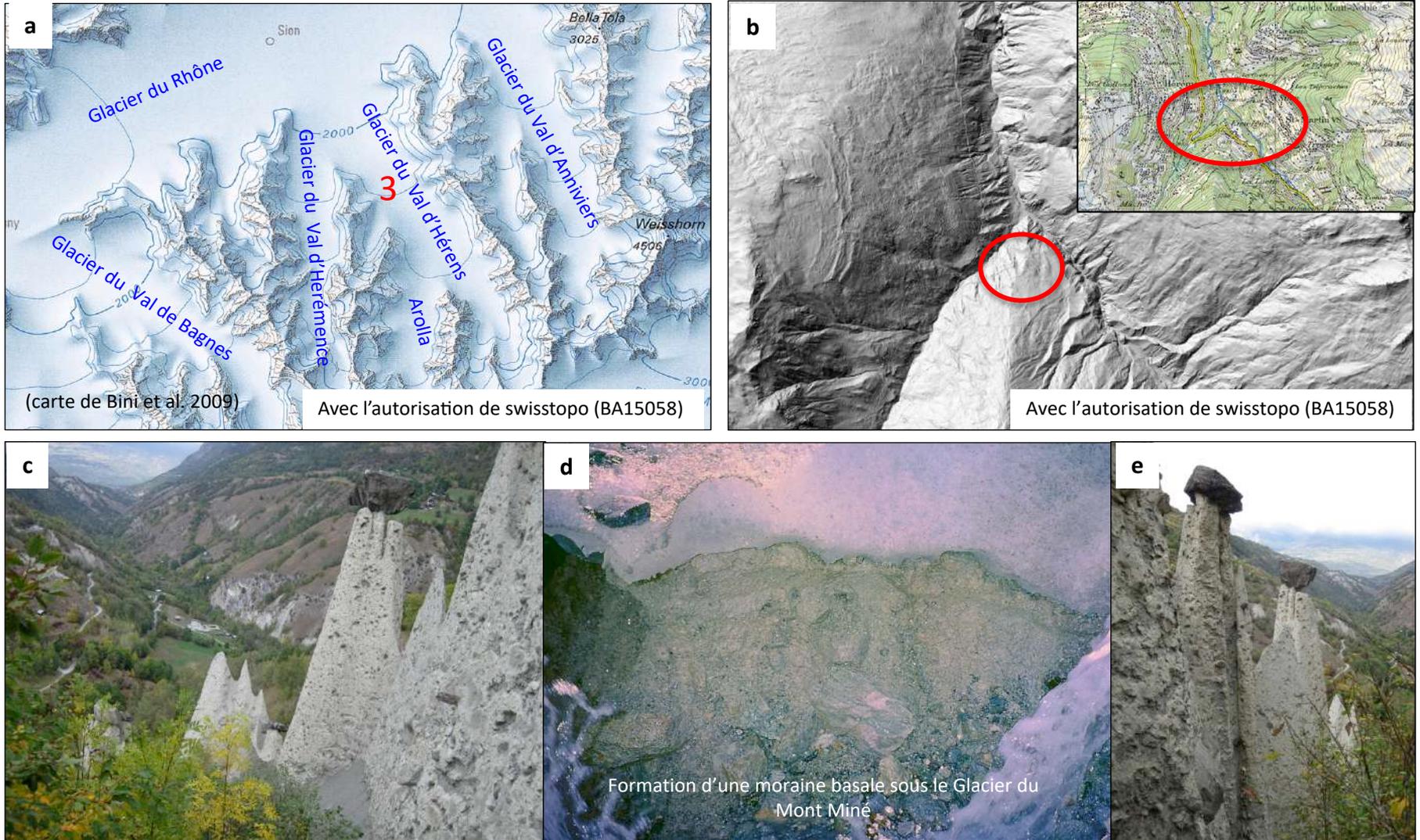
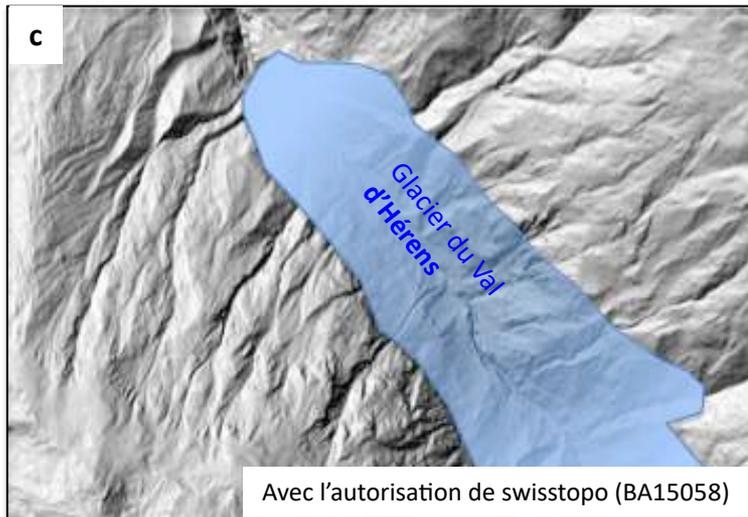
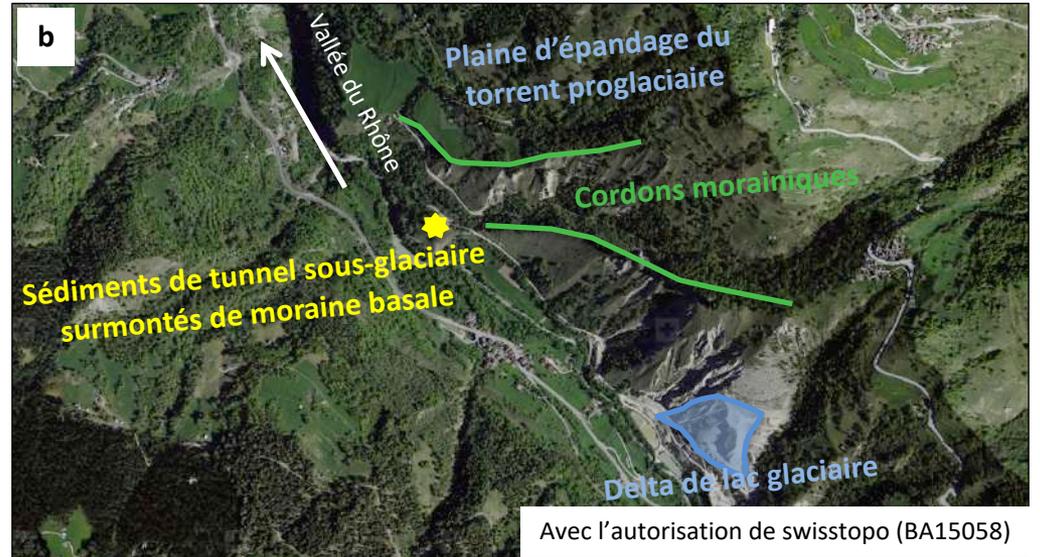


Figure 51 a - e: Pendant le dernier âge glaciaire, les glaciers du Val d'Herémence et du Val d'Hérens se rejoignaient à hauteur d'Euseigne (a, b) pour former un seul glacier de vallée (confluence d'Euseigne). Une moraine basale composée de limons, sables et blocs des deux glaciers se déposait alors sur la crête entre les deux vallées. Cette moraine s'est compactée sous le poids des glaces et cimentée par les eaux interstitielles circulant dans les pores fins de ce dépôt. L'érosion après le retrait des glaciers a fait le reste, en ne préservant que les pyramides (ou les «demoiselles») actuellement visibles, avec leur chapeau.

4 Le stade glaciaire de la Luette



La fin du dernier âge glaciaire qui voit la fonte des glaciers alpins, est également marquée par de brèves périodes de retour du froid, d'une durée de quelques dizaines à quelques centaines d'années. Les glaciers alpins ré-avancent alors, certes modestement, et marquent le paysage par d'impressionnants cordons morainiques. Ces retours de froid sont dus aux «événements de Heinrich» (d'après leur découvreur): En Amérique du Nord, d'énormes lacs glaciaires dans la région des Grands Lacs se vident d'un coup dans l'Atlantique Nord, ce qui fait chuter les températures à l'échelle globale. Les périodes correspondantes sont appelées «Dryas», en référence à la petite fleur glaciaire *Dryas octopetala*.

Figure 52 a – c: Les cordons morainiques de la Luette et autres sédiments glaciaires, de torrents sous-glaciaires et de lacs glaciaires sont les témoins d'un des événements de chute des températures, intervenu au cours du retrait du glacier. Le Glacier du Val d'Hérens a alors ré-avancé, occupé la vallée pendant quelques siècles (env. 14'200 – 13'000 avant J.C. ?) et a laissé un lac à son retrait. Ce dernier s'est rapidement rempli par les sables et graviers qui sont actuellement exploités dans la gravière de ce site. La visite du site se fait d'abord par une vue panoramique depuis la route principale et une promenade sur la petite route qui passe à côté de la gravière.

4 Le stade glaciaire de la Lulette

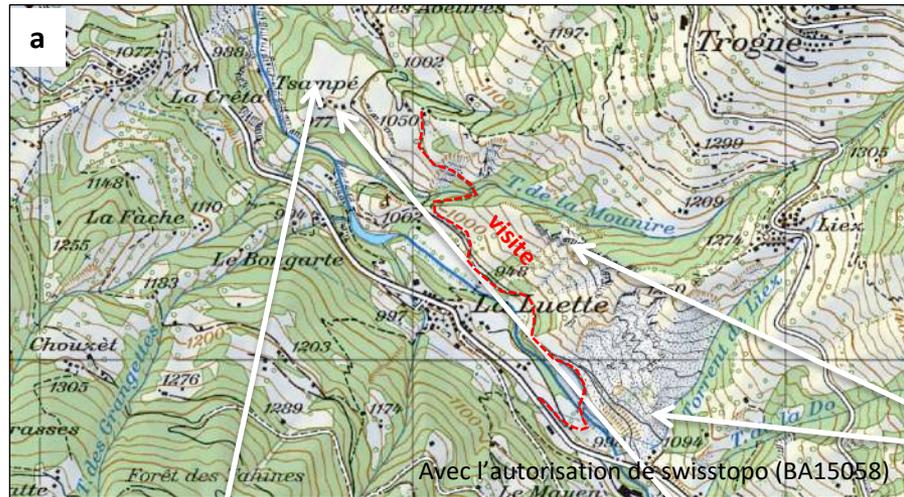


Figure 53 a - i : On commence la visite sur la route principale, à env. 250 m en amont du hameau de la Lulette (a, b), d'abord avec une vue d'ensemble vers la pente sur l'autre face de la vallée: Delta lacustre (f) et moraine à gros blocs (e). En descendant le sentier on traverse la rivière (la Borgne) et atteint le chemin qui longe le versant. A droite (sud) on aperçoit l'ancien delta de la Borgne dans le lac glaciaire (f), puis on passe par des dépôts de versant récents (éboulis) et atteint la « pyramide » émergeant au centre de la vallée (figs. g - i). A cet endroit, le torrent sous-glaciaire a déposé des sables et graviers de toutes les classes granulométriques (i), en fonction des variations de courant. La moraine basale surmonte ces dépôts fluviaux. En continuant on traverse le dernier cordon de moraine à gros blocs (d, e) et arrive devant la plaine d'épandage du glacier (c).

5. De Ferpèche au Glacier du Mont Miné: voyage dans le Petit âge glaciaire 5

Compilation: P. Masset (2012)

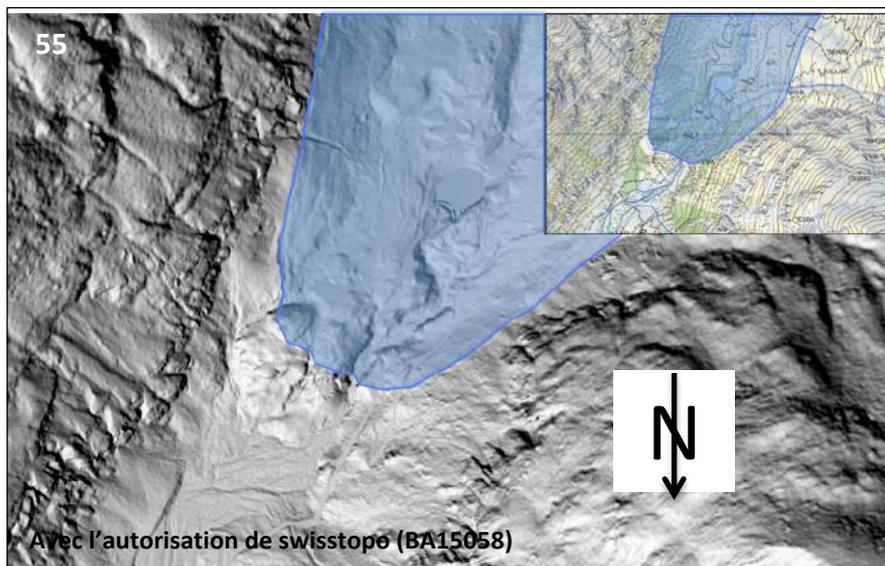
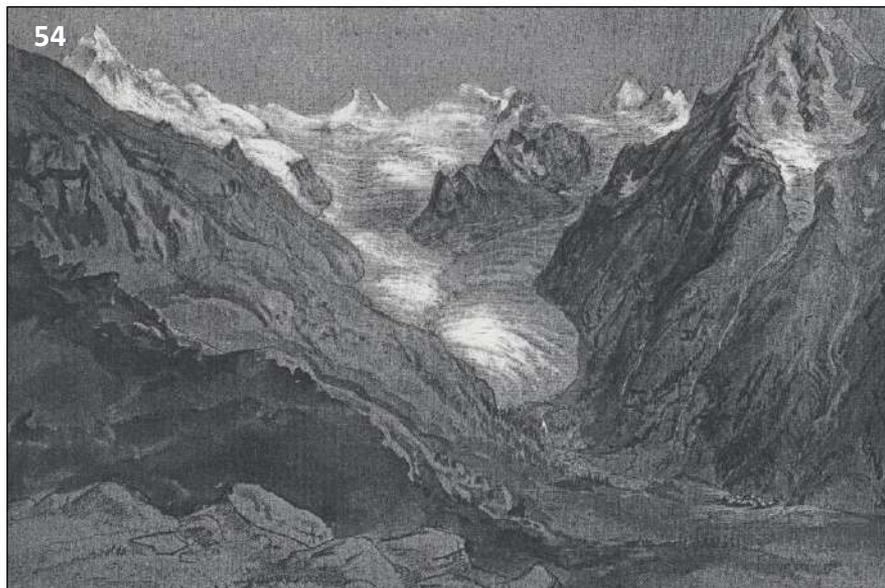
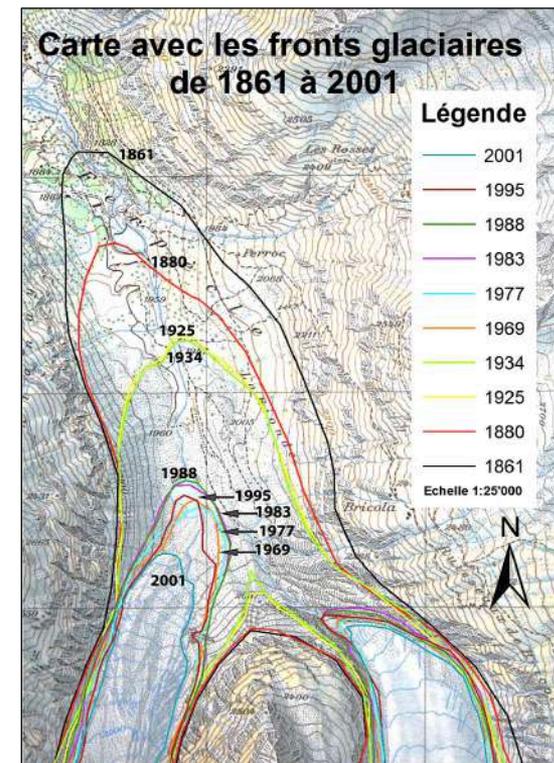


Figure 56 (->): reconstitution du recul des Glaciers de Ferpèche et du Mont Miné depuis le dernier maximum du Petit âge glaciaire. Cette carte a été compilée par P. Masset (2012) en utilisant d'anciennes cartes topographiques, des peintures et d'anciennes photos. Après la séparation des deux langues glaciaires autour de 1960, la langue du Glacier de Ferpèche recule, alors que celle du Glacier du Mont Miné reste sur place jusque dans les années 1990.



Avec l'autorisation de swisstopo (BA15058)

Figure 54: dernière extension maximale des Glaciers de Ferpèche et du Mont Miné pendant le Petit âge glaciaire. Gravure de Bühlmann (1835, Graphische Sammlung ETHZ). A remarquer: le Glacier du Mont Miné est nettement plus développé que le Glacier de Ferpèche.

Figure 55: zone frontale des glaciers selon la fig. 54, modèle numérique de terrain et carte topographique..

Figure 57: Gravure: Bühlmann 1835, Graphische Sammlung ETHZ (à remarquer: le Glacier du Mont Miné est nettement plus développé que le Glacier de Ferpècle).



Figure 58: Glacier du Mont Miné en 1900, Dumoulin et al. (2010).



Figure 59: Glacier de Ferpècle et Dent Blanche en 1910, Dumoulin et al. (2010)

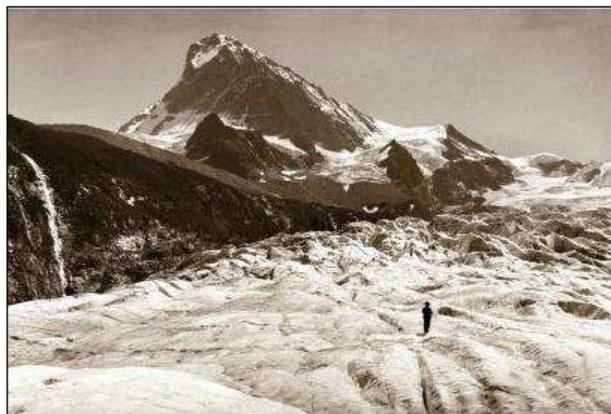


Figure 60: Glacier de Ferpècle, changements de longueur 1891 – 2013*

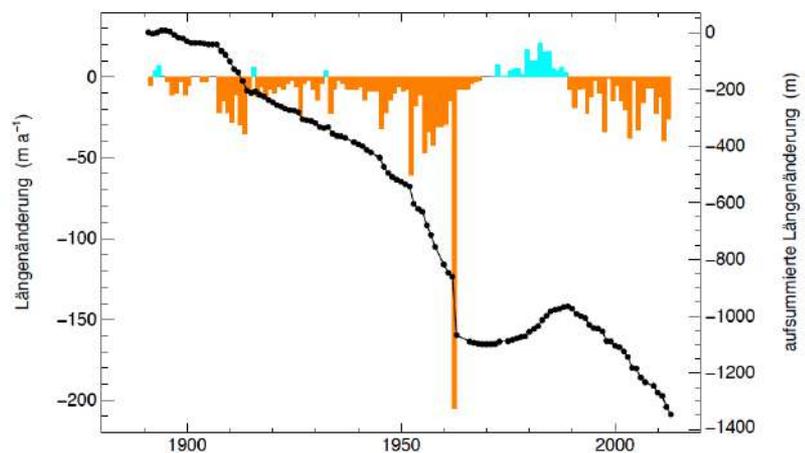
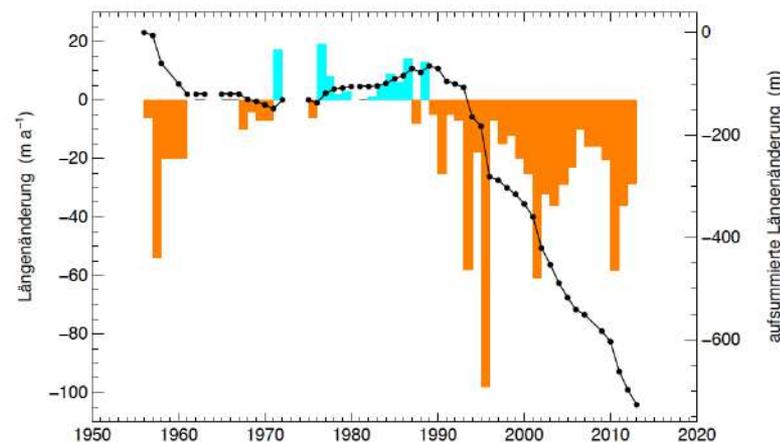


Figure 61: Glacier du Mont Miné, changements de longueur 1956 – 2013*



* Sur ces figures, le Réseau de mesure suisse des glaciers (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>) confond jusqu'en 1956 les deux langues de glaciers de Ferpècle et du Mont Miné. La langue dominante est en effet celle du Glacier du Mont Miné, et non pas celle du Glacier de Ferpècle.



Figure 62: Glacier du Mont Miné 1931, © Sammlung Gesellschaft für ökologische Forschung, München



Figure 63: Glacier du Mont Miné 2003, © Sammlung Gesellschaft für ökologische Forschung, München

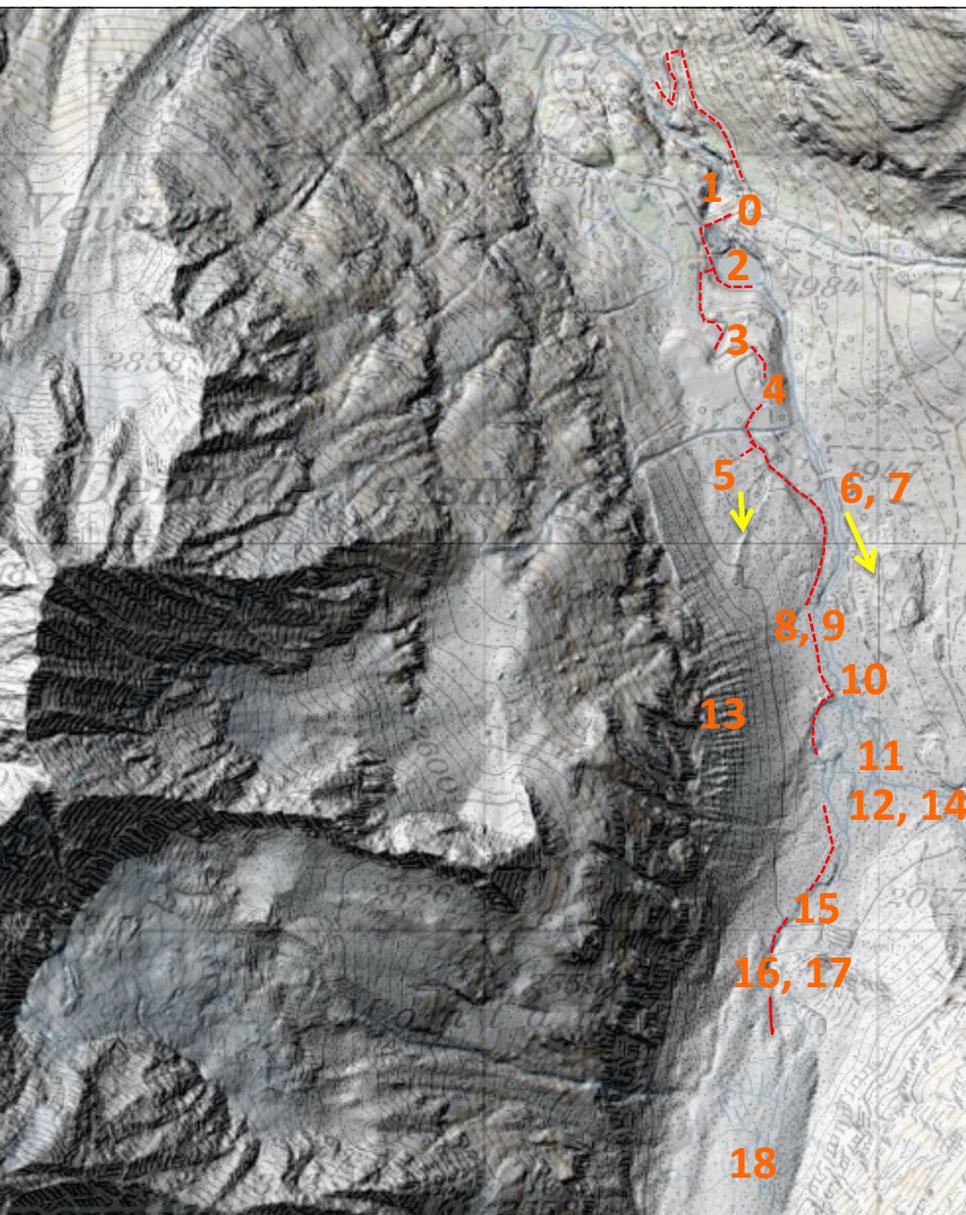


Figure 64: Glacier du Mont Miné 1990, photo E. Reynard



Figure 65: Glacier du Mont-Miné 2015, Photo J.L. Loizeau

6. Visite de terrain: Le Glacier du Mont Miné à la fin du Petit âge glaciaire



- 0 Torrent avec traces de laves torrentielles (coulées de boue et de blocs).
- 1 Ancienne gorge sous-glaciaire
- 2 Retenue de pompage de Ferpècle (partie de Grande Dixence).
- 3 Place pique-nique sur le versant de la moraine frontale du Petit âge glaciaire.
- 4 Dépression due à fonte de glace morte, « kettle hole ».
- 5 Zone de retrait du glacier dès 1890, végétation pionnière; flèche: cordon morainique des années 1930.
- 6 Drumlin rocheux, roches moutonnées, recouvert de moraine.
- 7 Torrent proglaciaire à faible débit.
- 8,9 Déversoir à la terminaison de la plaine alluviale devant les Glaciers de Ferpècle et Mont Miné. Ancien lac proglaciaire, rempli de sables et de graviers.
- 10 Cordon de moraine du Glacier du Mont Miné des années 1960 à env. 1995 (buttes allongées au milieu de la plaine).
- 11 Sandur (en été: lac proglaciaire) en amont du cordon morainique.
- 12 Torrent pro-glaciaire sur son lit de gravier proche du rocher érodé par le glacier. Vue vers la plaine alluviale depuis la moraine basale du Glacier du Mont Miné.
- 13 Moraine latérale du maximum du Petit âge glaciaire, rive gauche.
- 14 Plaine alluviale pro-glaciaire, transformée en lac par hautes eaux.
- 15 Troncs d'arbres d'un âge de 8'000 ans, intercalés dans la moraine basale du Glacier du Mont Miné (situation en 2010; le tronc a été érodé depuis).
- 16 Bloc dans la moraine, repère des mesures de position du front glaciaire.
- 17 Portail du Glacier du Mont Miné.
- 18 Vue de la zone de séracs du Glacier du Mont Miné.
- 19 Dent Blanche, moraines du Petit âge glaciaire.
- 20 Première neige.

Pour cette visite on suivra de préférence la petite route, puis le sentier qui montent depuis l'alpage de Ferpècle (**point GPS, coordonnées suisses:** 608 460/101 140). **0:** vue depuis 608 670 /100 880; **1:** vue depuis 608 580/100 820; **2:** vue depuis 608 595/100 270; **3:** abris pique nique 608 600/100 580*; **4:** étang à têtards 608 700/100 355*; **5:** moraine des années 1930: 608 755/100 150; **6:** vue du drumlin rocheux en rive droite (sommet: 609 09/99 830) depuis le petit pont 608 860/100 163 ; **7:** torrent proglaciaire à faible débit 608 900/100 000 depuis le petit pont; **8:** barrage du déversoir 608 850/99 840; **9:** lacs proglaciaires en été 2006, 608 800/99 850, vue vers le Sud; **10:** moraine frontale 1960 à 1990, zone figurée 608 950/99 600 – 608 860/99600; **11:** sandur (en été: lac proglaciaire) en amont du cordon morainique (10); **12:** torrent proglaciaire et sandur vu depuis le front du Glacier du Mont Miné; **13:** moraine latérale gauche dans la zone 608 600/99 700; **14:** lac proglaciaire, même zone que fig. 12 par hautes-eaux; **15:** troncs d'arbres de > 8'200 ans (actuellement érodés) 608 810/99 090; **16:** repère de mesure du recul glaciaire 2008; **17:** portail du Glacier du Mont Miné en 2011; **18:** séracs du Glacier du Mont Miné en 2009; **19:** sommet de la Dent Blanche; **20:** première neige d'automne. * Photos Anh Dao Le Thi

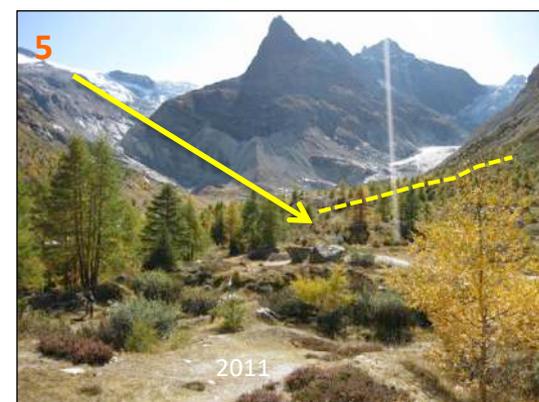
Prudence: L'accès au Glacier du Mont Miné à l'air facile. On a presque envie d'y aller en petites sandalettes. Mais attention: On se trouve en milieu alpin, à près de 2000 m d'altitude et les risques d'accidents sont réels. Voici quelques conseils:

- **Des habits adéquats et des chaussures robustes sont conseillés. En effet, les orages voyagent vite dans cette zone, et les chemins entre le déversoir au point 7 (voir carte) et le front du glacier sont caillouteux et souvent glissants.**
- **Il est déconseillé de traverser les torrents glaciaires ailleurs que par les petits ponts. L'eau est très froide; elle peut charrier des blocs de glace, et le fond est instable.**
- **Ne pas s'arrêter à proximité de la pente longeant la moraine latérale sur le versant gauche (ouest)! Les éboulements de blocs sont surtout fréquent par temps de pluie et fort ensoleillement (dégel en altitude)!**
- **Prudence à l'approche du front du glacier: des blocs de roches de toutes les tailles sont posés sur le glacier et peuvent glisser.**
- **Ne pas séjourner dans le portail du glacier; danger d'écroulement.**

En cas d'accident: Rester avec les personnes accidentées et appeler (toute la zone est couverte par le réseau SWISSCOM et une partie par d'autres réseaux de téléphonie mobile).

Mais: bonne visite quand-même!







Bibliographie

- Bini A., Buoncristiani J.-F., Coutterand S., Ellwanger D., Felber M., Florineth D., Graf H.R., Keller O., Kelly M., Schlüchter C. & Schoeneich P. 2009: La Suisse durant le dernier maximum glaciaire. Swisstopo, Wabern.
- Carte géologique de la Suisse 1:500'000. Swisstopo, Wabern.
- Dumoulin, H., Zryd, A. & Crispini, N. 2010: Glaciers: passé-présent du Rhône au Mont Blanc. Slatkine, Genève, 295 p.
- Fauchère, A. 2014: Evolène, de la légende à la réalité. Slatkine, Genève, 141 p.
- « La Suisse et ses Glaciers » 1980; ouvrage collectif, 24-Heures, Lausanne.
- Lih, T. et al. 2002: Das Quartär in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. In: Newsletters in Stratigraphie. 41, Nr. 1-3, Berlin, Stuttgart, S. 385-399.
- Marthaler, M. Sartori, M. & Escher, A. 2008: Atlas géologique de la Suisse 1:25'000, feuille 122, Vissoie. Swisstopo, Wabern.
- Marthaler, M. 2005: Le Cervain est-il Affricain? LEP Loisirs et pédagogie, Lausanne, 96 p.
- Masset, P. 2012: Lichenométrie et reconstitution de la dynamique des glaciers de Ferpècle et de Mont Miné, Valais, Suisse occidentale. Mém. master Dept. Géol. Pal. Univ. Genève.
- Nicolussi K., Le Roy, M., Schlüchter, Ch. et al. 2022: The glacier advance at the onset of the Little Ice Age in the Alps. The Holocene 32(7) 624–638.
- Nussbaumer, S.U., Zumbühl, H.J. & Steiner, D. 2007: Fluctuations of the Mer de Glace (Mont-Blanc area, France) AD 1500–2050: an interdisciplinary approach using new historical data and neural network simulations, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 40(2005/2006): 1-183.
- Pugin, A., Bezat, E., Weidmann, M. & Wildi, W. 1993: Le bassin d'Ecoteaux (Vaud, Suisse): Témoin de trois cycles glaciaires quaternaires. Eclogae geol. Helv. 86/2, 343-354.
- Röthlisberger, F. 1976: Gletscher- und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla. Verlag SAC Bern.
- Wildi, W. 2020 : Sur les traces de l'histoire de la Terre en Suisse. <https://erlebnis-geologie.ch/fr/geothemen/auf-den-spuren-der-erdgeschichte-in-der-schweiz/>
- Zryd, A. 2002: Les glaciers; la nature dans les Alpes. Payot, Lausanne, 325 p.
- Zryd, A. 2008: Les glaciers en mouvement; la population des Alpes face au changements climatique. Presses polytech. Univers. Romandes, Lausanne, 142 p.

Links

Informations touristiques:

<http://www.evolene-region.ch/>

Photos historiques de glaciers alpins:

www.gletscherarchiv.de

Surveillance des glaciers:

<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>

Introduction à la géologie du Val d'Hérens: <http://www.evolene-geologie.ch/>



Cartes topographiques

- Carte nationale de la Suisse 1:25'000, 1307 Vissoie
- Carte nationale de la Suisse 1:25'000, 1327 Evolène

Remerciements

Nous remercions cordialement tous ceux qui ont mis à disposition de ce guide des photos et autres illustrations: Stéphanie Girardclos, Genève (figure 14), le Gletschergarten Lucerne (figure 30), Pierre Kunz, Genève (figures 37, 38), La Sammlung Gesellschaft für ökologische Forschung, München (figures 62, 63), Hilaire Dumoulin, Collonges (figures 62, 63), Anh Dao Le Thi, Saigon (p. 33,34), E. Reynard, Université de Lausanne (figure 64) et Swisstopo pour les nombreuses cartes, orthophotos et reliefs.