



# Sur les traces de l'histoire de la Terre en Suisse

Un voyage géologique à travers le temps et la Suisse, depuis les forêts tropicales, par les déserts de sel et la mer alpine au plissement alpin, au froid arctique et au changement climatique moderne

2<sup>ème</sup> édition

Walter Wildi

Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Genève

Rue des Maraîchers 13, CH-1205 Genève

<https://www.erlebnis-geologie.ch/>



*Corail, calcaire récifal de l'Oxfordien, anciennes carrières de l'usine de chaux à St. Ursanne (JU)*

Couverture:

- Plaine fluviatile pro-glaciaire, Mont Miné (Valais, photo: S. Girardclos)
- Erosion alpine: « Schüpfer Nagelfluh », Kleine Emme, Entlebuch (LU), Burdigalien
- Hauptrogenstein («Grande oolithe »), Küttigen (AG), Bajocien-Bathonien

# Sur les traces de l'histoire de la Terre en Suisse

Un voyage géologique à travers le temps et la Suisse,  
depuis les forêts tropicales, par les déserts de sel et la  
mer alpine au plissement alpin, au froid arctique et au  
changement climatique moderne

2<sup>ème</sup> édition

Walter Wildi

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

Copyright juin 2023

Contact: Walter Wildi, 23, chemin des Marais, 1218 Le Grand-Saconnex, 079 310 0039,  
[walter.wildi@unige.ch](mailto:walter.wildi@unige.ch)

<https://www.erlebnis-geologie.ch/>

# Table des matières

En guise d'introduction: une histoire en quatre temps	6
A. Le film de l'histoire de la Terre en Suisse	10
1. Carbonifère, 359 – 290 millions d'années	10
2. Permien, 299 – 252 millions d'années	12
3. Trias, 252 – 201 millions d'années	14
4. Jurassique, 201 – 145 millions d'années	15
5. Crétacé, 145 – 66 millions d'années	23
6. Paléogène, 66 – 23 millions d'années	28
7. Néogène, 23 – 2.6 millions d'années	28
8. Pleistocène – Âge de glace, 2.6 millions à 11'700 ans	35
9. «Tardi-glaciaire»: changement climatique et fusion des glaces du Pléistocène à l'Holocène	45
10. Holocène, la période post-glaciaire, depuis 11'700 ans	46
11. Colonisation humaine	49
12. «Bergsturz und Menschenleben» (éboulements et vies humaines)	49
B. Le «système Terre» et son histoire	51
1. L'échelle des temps géologiques	51
2. Tectonique des plaques	54
3. De l'architecture des nappes alpines à la paléogéographie	57
4. Les variations du niveau marin	59
5. Le climat et son histoire	61
6. Evolution et biodiversité	66
C. Promenades géologiques à travers l'histoire de la Terre en Suisse: propositions d'excursions et de visites	74
1. Les forêts tropicales du Carbonifères	75
2. Les déserts rouges du Permien	75
3. Volcanites du Permien de Melide	76
4. Lagunes de sel et sebkhas du Trias	77
5. Jardins de crinoïdes dans la mer du Muschelkalk	77
6. Irruption de la Tethys dans les domaine du Sud- et de l'Austroalpin	78
7. Les ichthyosaures du Monte San Giorgio	78
8. Les platéosaures de Frick	72
9. Les traces de dinosaures du Vieux-Emosson	79
10. L'océan liguro-piémontais sur les bords du Lac de Marmorera	79
11. La mer Sudalpine profonde dans la Gorge de la Breggia	81
12. La mine de fer et nécropole d'ammonites de Herznach (Argovie)	81
13. Récifs de coraux dans le Jura	81
14. Traces de dinosaures dans le Jura	84
15. Turbidites et flyschs du premier plissement alpin	84
16. Première érosion des chaînes alpines les cônes alluviaux du Rigi et du Mont Pèlerin (Molasse subalpine)	85
17. La dernière mer de l'avant-pays alpin: la Molasse marine supérieure	86
18. Témoins du plissement et des nappes alpines	86
19. Le Jura plissé: front du plissement alpin	87

20. Graviers des plateaux: témoins des plaines alluviales des anciennes glaciations	87
21. Ecoteaux: le premier bassin lacustre du Léman il y a 800'000 ans	87
22. Morphologies glaciaires sur le Plateau suisse	88
23. Changements climatiques, glaciers et paysages	88
24. «Eboulements et vies humaines»	89
25. Géologie et archéologie	89
26. Grottes à stalactites et karst	90
Postscriptum: marcher dans le temps	91
Glossaire	92
Bibliographie	95

## A lire également

### Géologie des Alpes:

Pfiffner, O.A. 2015:

- Géologie des Alpes. Haupt Bern, 400 p. 3<sup>ème</sup> édition
- Geology of the Alps, Wiley

Marthaler, M. 2019: Moiry: de l'Europe à l'Afrique. Editions LEP, Le Mont sur Lausanne.

### Histoire géologique:

Weissert, H. & Stössel, I. 2015: Der Ozean im Gebirge. Vdf Zürich, 198 S. 3<sup>ème</sup> édition.

Wildi, W. & Lambert, A. 2019: Erdgeschichte und Landschaften im Kanton Aargau. Aarg. Natf. Ges. Aarau, 183 p.

## Remerciements

Cette petite histoire de la Terre en Suisse a profité de suggestions, corrections et/ou de documents fournis par Eric Davaud (Bardonnex), Philippe Favre (La Forclaz), Christian Schlüchter (Lützelflüh-Goldbach), Heinz Furrer (Rümlang), Geri Hirt, Linn, André Lambert (Baden), Mario Sartori (Ayen), Stéphanie Girardclos (Genève), Michel Wildi (El Salvador), Christophe Wildi (La Rippe), Sandrine Vallin (Berne), Walter H. Müller (Oetwil), Michel Marthaler (Univ. De Lausanne), Marcos Buser (Zürich), Jean-Claude Lalou (Vaumarcus), Pierre-Yves Jeannin (ISSKA, La Chaux-de-Fonds) et ANG (Aargauische Naturforschende Gesellschaft). Qu'ils soient remerciés ici pour leur contribution! L'auteur est cependant seul responsable du contenu.

# Résumé en guise d'introduction: une histoire en quatre temps

La Suisse est un petit pays sur cette planète Terre. Son histoire géologique est certainement plus ancienne, mais seules les derniers quelque 300 millions d'années sont suffisamment documentées pour raconter l'histoire que la Suisse partage avec la Terre entière.

En résumé, on peut présenter l'histoire géologique de la Suisse en quatre temps: à l'époque de la Pangée, de la mer alpine, de l'orogénèse (du plissement alpin) et des glaciations.

**Epoque de la Pangée:** au Carbonifère, il y a un peu plus de 300 millions d'années, la Suisse, couverte de forêts tropicales, fait partie du supercontinent de la Pangée et se situe juste au sud de l'équateur. Des roches détritiques riches en matière organique, parfois même avec des filons de charbon, en sont les témoins. Puis, entraîné par la dérive des continents, le futur périmètre du pays glisse en direction du nord, vers les déserts de sable et les sebkhas de sel des régions subtropicales. Les conglomérats, grès et limons rouges du Permien marquent le début de cette évolution, suivis – au Trias - des grès du Buntsandstein, des roches carbonatées et évaporites (sel, gypse, anhydrite) du Muschelkalk et du Keuper.

**Epoque de la mer alpine:** il y a 200 millions d'années, au début de la période du Jurassique, le niveau marin monte. Une mer chaude, peu profonde, inonde le pays et une grande partie du continent. L'Europe se sépare et s'écarte de plus en plus du continent africain; l'ancienne mer Téthys pénètre depuis l'est entre les deux continents. Au centre de cette nouvelle mer alpine, dans le Bassin liguro-piémontais, des effusions de laves basaltiques (des «ophiolites») et des sédiments océaniques (notamment des radiolarites) du Dogger et du Malm témoignent de la grande profondeur de la mer (fig. a). Au Crétacé le niveau marin atteint son maximum, environ 250 m au-dessus de son niveau actuel. A cette période, le futur domaine alpin a dérivé jusqu'à hauteur des Caraïbes actuelles.

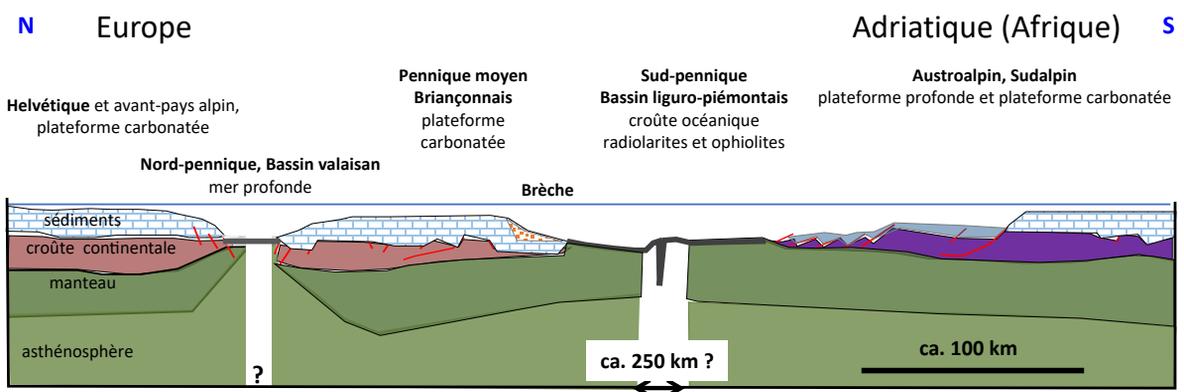
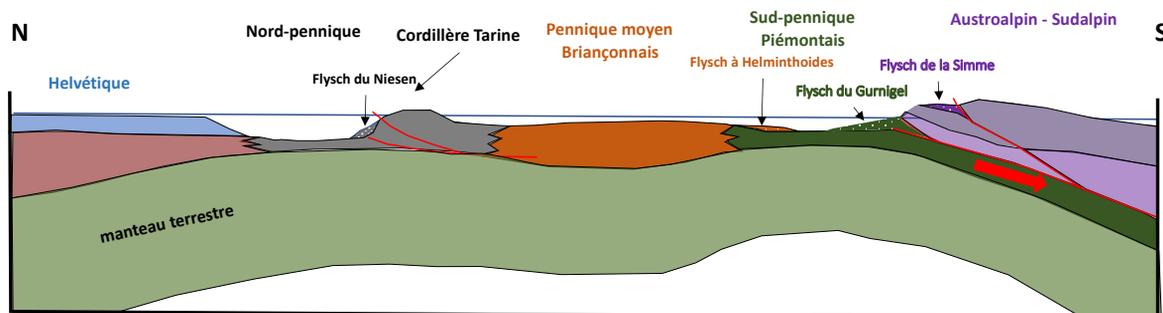


Figure a : coupe schématique à travers la mer alpine à la fin du Jurassique.

**Orogenèse (plissement alpin):** La phase d'ouverture et d'élargissement de la mer alpine ne dure finalement qu'une centaine de millions d'années. Vers la fin du Crétacé inférieur, des sédiments détritiques, conglomérats, sables et limons, déposés dans les bassins profonds, indiquent le début d'un grand changement. Au Cénomanién, il y a 100 millions d'années, puis tout au long du Crétacé supérieure, ces sédiments de **Flysch**, formés de matériel érodé sur des archipels émergents, puis déposés en mer profonde, témoignent du rapprochement entre Afrique et Europe et des subductions qui l'accompagnent (fig. b). En cause, l'ouverture de l'Atlantique Sud, qui provoque une rotation dans le sens antihoraire de l'Afrique. La mer alpine est ainsi prise en tenaille entre Afrique et Europe.

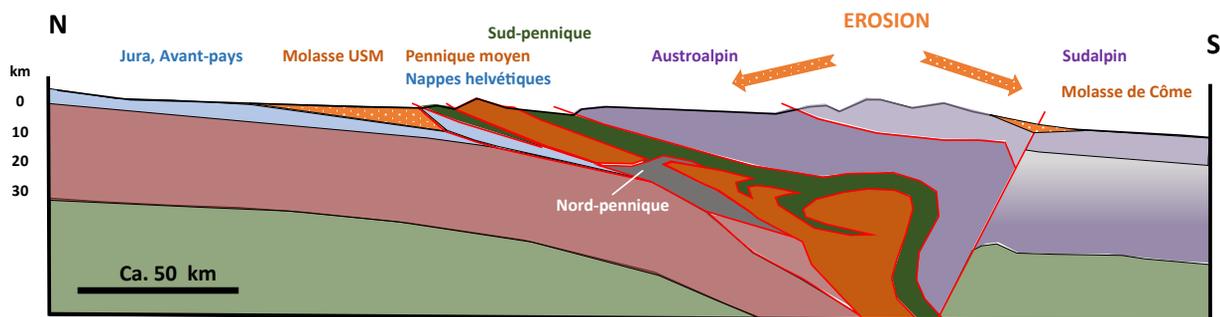


**Figure b:** coupe géologique schématique de la mer alpine de Suisse occidentale à la fin du Crétacé (Maastrichtien, 72 - 64 millions d'années).

A la fin de l'Eocène, y a 40 millions d'années, la sédimentation de Flysch migre sur la marge méridionale du continent européen. Le bâti des nappes alpines en formation entre en collision avec la croûte continentale européenne, et l'émersion de la chaîne de montagne se met en place.

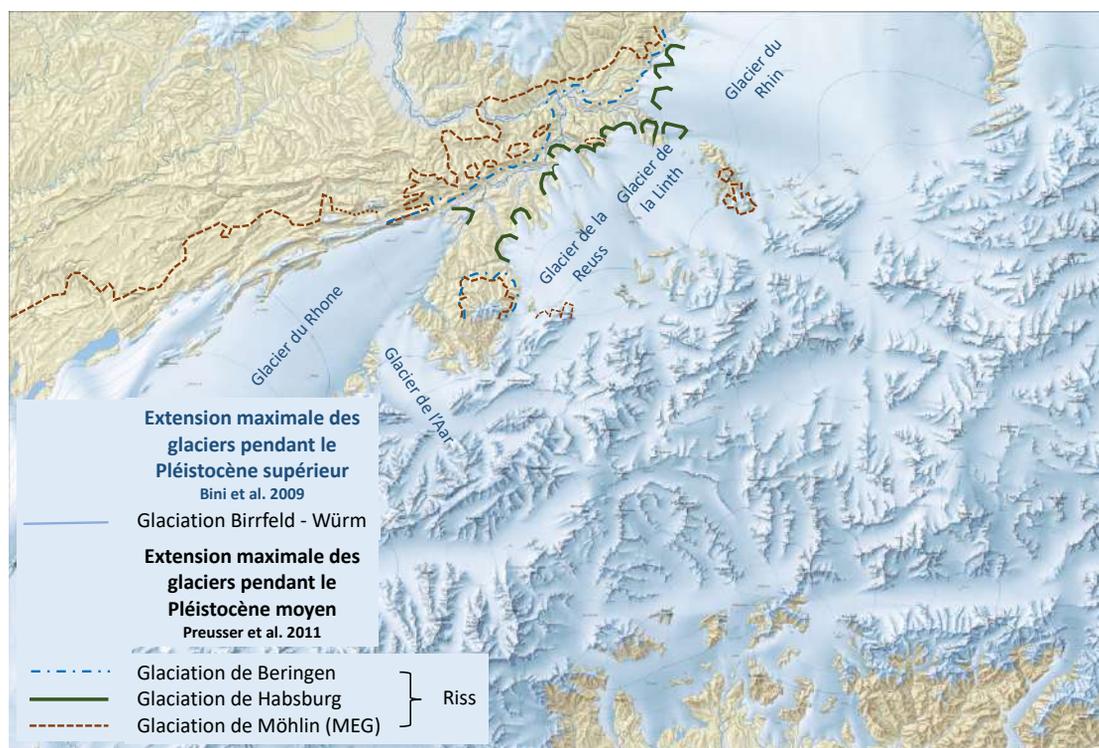
A l'Eocène, la plaque continentale européenne et la Suisse atteignent leur latitude actuelle.

Le soulèvement des massifs alpin est rapide dès le début de l'Oligocène (34 millions d'années). Simultanément, l'érosion des nouveaux reliefs progresse. Les torrents sortant des massifs montagneux déposent le matériel d'érosion dans le bassin du Pô au sud et dans un bras de mer qui suit le front alpin au nord; ce sont les sédiments de la **Molasse marine inférieure**, puis, après une régression temporaire, les conglomérats (poudingues, *Nagelfluh*) de la **Molasse d'eau douce inférieure** (fig. c). Une nouvelle montée du niveau marin fait naître un bras de mer allongé, du bord de la Méditerranée, suivant le front alpin, en passant par le futur Plateau suisse jusqu'au Bassin viennois. La **Molasse marine supérieure** s'y dépose alors dans un régime de fortes marées. Son équivalent au sud des Alpes est la Molasse de Come, avec ses conglomérats à galets d'un diamètre qui peut atteindre le mètre. Le dernier cycle de cette sédimentation est la **Molasse d'eau douce supérieure**, déposée à la fin du Miocène moyen. Elle est préservée de nos jours seulement dans la partie est de la Suisse. Les derniers sédiment marins sont les Argiles de Balerne du Pliocène (env. 5 à 2.6 millions d'années), dans le sud extrême du Canton du Tessin.



**Figure c :** érosion des nappes alpines, formation de la Molasse d'eau douce inférieure et de la Molasse de Côte (Oligocène - Miocène inférieure).

**Glaciations:** Il y a 2.6 millions d'années, au début du Pléistocène, le climat se refroidit nettement et bascule dans des conditions arctiques. En même temps que les calottes glaciaires des continents de l'hémisphère nord (Scandinavie, Ecosse, calotte Laurentide), les glaciers alpins se développent et envoient leurs langues dans les vallées alpines, sur le Plateau suisse et et parfois jusque dans le Jura, ainsi que dans les vallées au sud des Alpes (fig. d). Les périodes glaciaires et interglaciaires se relaient au rythme des fluctuations de l'orbite terrestre autour du soleil et de l'inclinaison de l'axe de la Terre. Il y a 20'000 ans, les glaciers se trouvent pour la dernière fois avec leur extension maximale. Puis, les langues de glace fondent et atteignent leur extension actuelle, il y a 11'700 ans, marquant ainsi le début de l'Holocène, la période postglaciaire.



**Figure d:** extension maximale des glaciers alpins pendant le Pléistocène moyen et supérieur. Pléistocène moyen (fronts glaciaires): Preusser et al. 2011, Penck & Brückner 1901/1909) ; Pléistocène supérieur (carte du relief): Bini et al. 2009 (copyright swisstopo). La carte ne fait pas de distinction entre les différentes phases froides de la dernière période glaciaire (Birrfeld-Würm).

Depuis la fin de la dernière période glaciaire, au cours de l'**Holocène**, le climat fluctue avec des amplitudes de la température globale de quelques degrés Celsius. Après un Moyen-Âge chaud, avec des sommets alpins presque libres de glace, la dernière avancée glaciaire, durant le «Petit-âge glaciaire», a commencé dans les Alpes au 14<sup>ème</sup> siècle, s'est renforcée au 16<sup>ème</sup> et s'est terminée en 1850. Depuis cette date, l'atmosphère terrestre se réchauffe et, pour la première fois dans l'histoire de la Terre, le réchauffement n'est pas exclusivement d'origine naturelle, mais également influencé par les rejets de gaz à effet de serre, la déforestation, le dessèchement des paysages agricoles, la rétention des nutriments provenant de l'érosion des continents dans des lacs de barrages, et bien d'autres activités humaines.

-----

Voici un bref résumé de l'histoire récente de la Terre en Suisse, telle que nous la déduisons des témoins géologiques, des roches et fossiles et des signaux géochimiques. Ils témoignent d'écosystèmes dynamiques et d'une interaction de processus géologiques et biologiques qui, pendant des millions d'années, ont réagi à la fois à des changements continus et à des événements extrêmes, catastrophiques, fournissant ainsi l'environnement physique et la nourriture pour une vie de plus en plus diversifiée.

Ce guide propose un voyage à travers les témoignages de l'histoire de la Terre en Suisse. Il indique les sites et les paysages géologiques, les musées, les mines et autres témoins de l'histoire de la Terre, où l'histoire géologique est illustrée, de la forêt tropicale humide vers les déserts de sel, de la mer alpine, du plissement des Alpes et de l'érosion des chaînes de montagnes, aux périodes glaciaires et au récent recul des glaciers!

# A. Le film de l'histoire de la Terre en Suisse

L'univers s'est formé il y a 13.81 milliards d'années, le système planétaire et la Terre il y a 4.54 milliards d'années. L'histoire géologique de la Suisse, ce petit pays, a également une longue histoire, mais seules les quelque 300 derniers millions d'années sont suffisamment documentées pour en tourner le film. La Suisse est un pays alpin, géographiquement et géologiquement. Nous allons raconter ici son histoire comme si nous l'avions vécue nous-mêmes; cependant, sous une forme condensée, comme dans un court métrage.

## 1. Carbonifère, 359 – 290 millions d'années

Il y a 320 millions d'années, vers la fin du **Carbonifère**, le périmètre de croûte continentale qui donnera naissance, bien plus tard, à la Suisse, se trouve sur le supercontinent de la Pangée, juste au sud de l'équateur. Au cours de l'année, les températures se situent entre 25 et 30°C, et les saisons se ressemblent. Jour et nuit sont de même durée.

Ici, nous nous asseyons sur une crête de la chaîne des montagnes hercyniennes, située un peu au sud du le l'actuel Jura plissé, et regardons autour de nous. Nous sommes au milieu de la forêt tropicale humide, sous les fougères, dans les fourrés de prêles (fig. A 1, 2). De grandes libellules pullulent dans l'air humide.



**Figure A 1:** *La Suisse au Carbonifère; reconstitution par Oswald Heer (1865).*

### **Promenades géologiques (Chapitre C):** 1. *Les forêts tropicales du Carbonifères*

En direction du nord, nous découvrons une dépression de 10 à 15 km de large, orientée est-ouest, avec un sous-sol marécageux. Ici, les sédiments sablo-argileux érodés sur les collines et les restes de plantes apportés par les rivières s'accumulent. Ils se

Ere	Période	Epoque	Etage	Mio années	
Cénozoïque	Quaternaire	Holocène		0.01	
		Pléistocène			
	Néogène	Miocène	Pliocène		2.6
			Messinien		5
			Tortonien		
			Serravallien		
			Laghien		
			Aquitaniien		
	Paléogène	Oligocène	Chattien		
			Rupélien		
Eocène		Priabonien		34	
		Bartonien Lutétien Ypresien			
Paléocène			56		
			65		
Mésozoïque	Crétacé	Crétacé sup.	Maastrichtien	100	
			Campanien Santonien Coniacien Turonien Cénomaniien		
		Crétacé inférieur	145		
	Jurassique	Malm	200		
		Dogger			
Lias					
Trias	Trias supérieur	252			
	Trias moyen				
	Trias inférieur				
Permien	Permien supérieur	299			
	Permien inférieur				
Paléozoïque	Carbonifère	Carbonifère supérieur	359		
		Carbonifère inférieur			

Figure A 2: échelle du temps utilisée dans ce voyage à travers l'histoire géologique de la Suisse.

décomposent à peine en raison de l'activité microbienne et fongique encore peu développée et sont transformés au cours du temps en filons de charbon sous la surcharge des sédiments. La dépression dans le paysage est causée par un «graben» tectonique qui s'enfoncé constamment, le «Bassin permo-carbonifère du nord-est de la Suisse», comme nous l'appelons aujourd'hui. Pendant ce temps, l'hémisphère sud de la Terre est recouvert par l'épaisse calotte glaciaire de la glaciation «gondwanienne». Elle ne laisse cependant aucune trace dans la Suisse tropicale.

Les Alpes abritent plusieurs autres anciennes dépressions des périodes du Carbonifère et du Permien, dont les remplissages sédimentaires ont souvent été fortement déformés par le plissement alpin et sont parfois difficiles à reconnaître. De magnifiques fossiles végétaux sont connus dans les Alpes glaronnaises, bernoises et valaisannes, où des filons de charbon ont été exploités localement dans le passé.

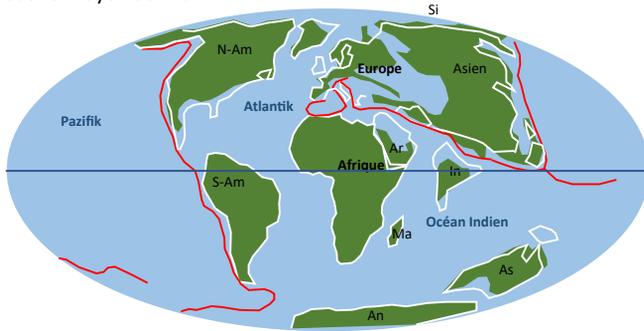
## 2. Permien, 299 – 252 millions d'années

Des millions d'années passent et le climat s'assèche. Nous sommes arrivés dans le Permien (il y a 299 millions d'années). Grâce à la dérive des plaques, la Suisse a glissé de l'équateur jusqu'à la hauteur du Sahara actuel (fig. A3, A4). Le climat est chaud et sec. Si des précipitations tombent, c'est sous la forme de pluies de mousson. La végétation est rare et limitée aux vallées fluviales. Le sol rouge est constitué de sédiments alluviaux de sable et de gravier argileux. Un paysage de désolation! L'observateur sur sa colline hercynienne remarque que l'érosion progresse et que sables et graviers qui en résultent sont transportés dans le Bassin permo-carbonifère, où ils forment un delta dans un lac. Le lac peu profond abrite des poissons primitifs aux écailles épaisses. Ce sont les plus anciens fossiles de vertébrés de Suisse, qui ont été découverts en 1983 dans le forage de la Nagra à Weiach, à une profondeur de 1312 m. La Suisse se trouve loin de la zone d'élévation du niveau de la mer dans le nord de l'Allemagne où on trouve les puissants gisements de sel du Zechstein.

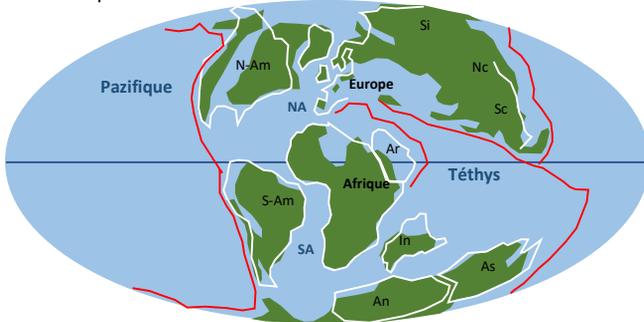


**Figure A 3:** «désert rouge» au sud du Maroc, comparable aux paysages du Permien.

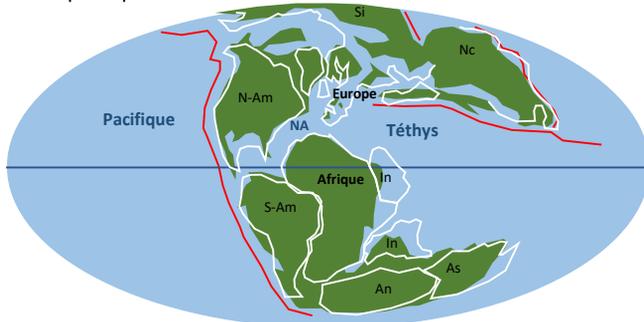
Eocène moyen 50 Ma



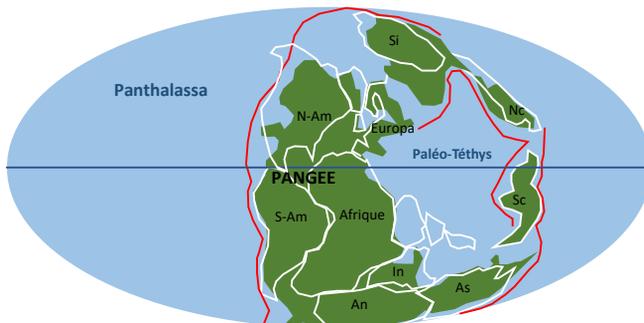
Crétacé supérieur 94 Ma



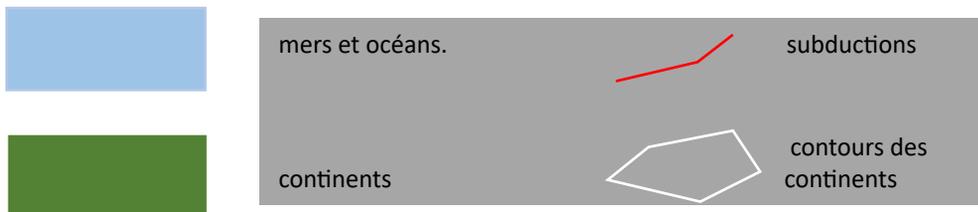
Jurassique supérieur 152 Ma



Permien supérieur 255 Ma



An: Antarctique  
 Ar: Péninsule arabique  
 As: Australie  
 In: Inde  
 Ma: Madagascar  
 Nc: Chine du Nord  
 N-Am: Amérique du Nord  
 Sc: Chine du Sud  
 S-Am: Amérique du Sud  
 Si: Sibérie



**Figure A 4:** reconstruction de la position des plaques de la fin du Permien (255 millions d'années) à l'Éocène (50 millions d'années). Simplifié selon [www.scotese.com](http://www.scotese.com).

Dans le monde entier, le Permien est caractérisé par un volcanisme intense. Celui-ci est également documenté en Suisse, par exemple par des galets d'origine volcanique dans les sédiments du Verrucano alpin. Au sud du Tessin, on trouve des traces de volcans sous forme de roches et de sédiments solidifiés, en particulier des "ignimbrites", c'est-à-dire des scories volcaniques.

#### **Promenades géologiques (Chapitre C):**

2. Les déserts rouges du Permien

3. Le volcan permien de Melide

### **3. Trias, 252 – 201 millions d'années**

Le passage du Permien au Trias (il y a 252 millions d'années) correspond à une crise majeure de la biodiversité. De nombreuses espèces animales, surtout marines, disparaissent à la suite des éruptions volcaniques. Cependant, en Suisse, la transition est à peine visible dans les sédiments des milieux arides, par manque de fossiles. Seuls de faibles reliefs émergent encore de la plaine désertique subtropicale. Les rivières emportent le sable rouge et blanc vers de vastes plaines alluviales et forment les Grès rouges (le «Buntsandstein»).

Au début du Trias moyen, le paysage change: l'élévation planétaire du niveau marin entraîne l'inondation d'une grande partie de l'Europe centrale. L'observateur au nord de la Suisse doit se sauver sur l'Arche de Noé et dérive maintenant sur une mer de quelques mètres de profondeur dans laquelle se dépose une boue calcaire aux nombreuses coquilles de mollusques (le Muschelkalk inférieur). Cependant, cette transgression marine est de courte durée: lorsque le niveau de la mer baisse de nouveau, elle laisse derrière elle



**Figure A 5:** *Sebkha El Melah, Tunisie (photo: E. Davaud, Bardonnex).*

### Promenades géologiques (Chapitre C):

4. Lagunes de sel et Sebkhas du Trias
5. Jardins à crinoïdes de la mer du Muschelkalk
6. Irruption de la Tethys dans le Sud- et l'Austroalpin
7. Les ichtyosaures du Monte San Giorgio
8. Les platéosaures de Frick
9. Les traces de dinosaures du Vieux-Emosson

des lagunes et des lacs salés, dans lesquels du gypse et parfois du sel gemme se déposent. Lors d'une nouvelle montée de la mer, qui ne durera que quelques millions d'années, le Muschelkalk supérieur («Hauptmuschelkalk») se dépose dans une mer peu profonde, avec un fond couvert de prairies de crinoïdes. Puis la mer se retire à nouveau, laissant derrière elle, une fois de plus, un paysage désertique avec des sebkhas avec du sel et du gypse (fig. A 5, 6 a).

À la fin du Trias, des dinosaures parcourent de vastes plaines alluviales et de boue argileuse fine; aujourd'hui, ils peuplent le musée des dinosaures de Frick (Canton d'Argovie, fig. A 6 b). Des sables rouges avec des débris de prêles sont déposés sur les berges des cours d'eau sinueux.



**Figure A 6 a:** dépôts de gypse de la sebkha dans le Jura tabulaire argovien à la fin du Trias (Keuper). **b:** Plateosaurus engelhardti au musée des dinosaures à Frick ([www.sauriermuseum-frick.ch](http://www.sauriermuseum-frick.ch)).

Au Trias, la mer de la Téthys pénètre depuis l'est dans la zone paléogéographique des Alpes orientales et méridionales (fig. A 17). Cet événement marque le début de l'ouverture de la mer alpine entre l'Afrique et l'Europe. Les ichthyosaures (dinosaures poissons) découverts au Monte San Giorgio témoignent de cette ouverture marine. Dans le domaine paléogéographique de l'Austroalpin le Trias supérieur est caractérisé par ses dépôts de dolomie, jusqu'à 2 km d'épaisseur (Dolomie principale, «Hauptdolomit»), formés par des tapis de cyanobactéries (stromatolithes).

## 4. Jurassique, 201 – 145 millions d'années

Il y a 201 millions d'années, au début de la période du Jurassique, une élévation du niveau des océans se produit. Elle dictera les événements pendant 135 millions d'années. Cette

hausse du niveau marin est due à une intense activité volcanique le long des dorsales médio-océaniques, témoignage d'intenses mouvements de plaques. Europe et Afrique se séparent et la mer alpine pénètre entre les deux continents depuis la Téthys, située à l'est. Cette ouverture est accompagnée d'un glissement ouest-est de l'Europe par rapport à l'Afrique (fig. B 5, 7). L'Atlantique Nord s'ouvre simultanément, suivi (au Crétacé, il y a environ 145 millions d'années) de l'Atlantique Sud.

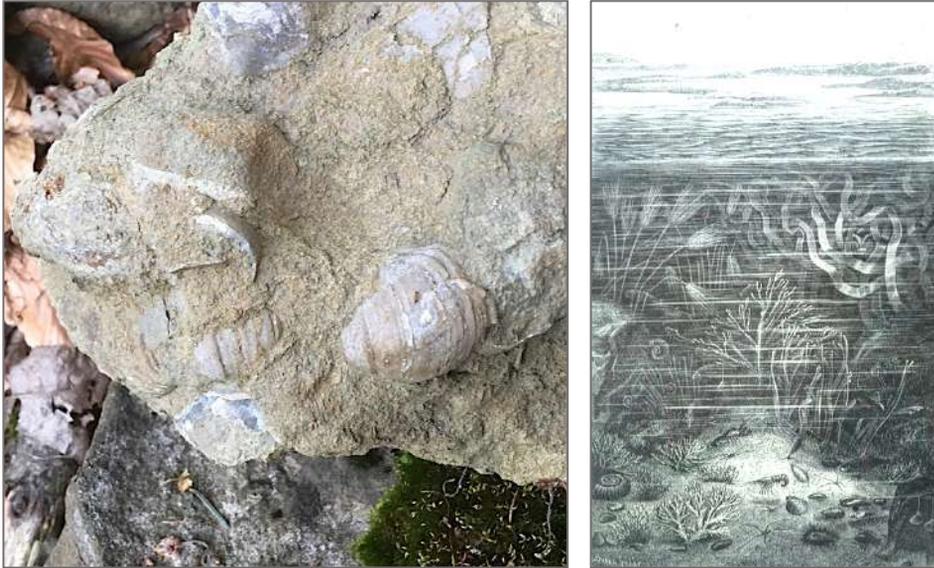
L'élévation du niveau marin au début du Jurassique a pour conséquence qu'une grande partie de l'Europe, mais aussi d'autres continents, se trouvent inondés. Seuls les anciens massifs des chaînes de montagne hercyniennes, formées à la fin du Paléozoïque,



**Figure A 7:** mangroves sur la côte Pazifique d'El Salvador. Au début du Lias, des conditions similaires ont été constatées dans la mer montante du nord de la Suisse (notons toutefois que les plantes angiospermes n'existaient pas encore au Lias; photo Michel Wildi).

comme le Massif central ou le Massif Bohémien, émergent encore de cette mer. Des sédiments variés, déposés dans cette mer, permettent de reconstituer un environnement marin très structuré et riche.

Au **Lias** (Jurassique inférieur, à partir de 201 millions d'années), la mer reste de faible profondeur. Les sédiments et les fossiles («Marnes à insectes») rappellent par endroits une côte à mangroves (fig. A 7). La montée rapide du niveau marin est marquée par la présence d'ammonites du genre *Psiloceras* dans les couches sédimentaires succédant aux Marnes à Insectes, puis d'*Arietetes*, accompagnées d'huîtres du genre *Gryphea* (fig. A 8).



**Figure A 8 a:** calcaires à *Gryphea* dans le Jura, les premiers sédiments franchement marins déposés dans la mer jurassienne (Wildi & Lambert 2019). **b:** reconstitution du Lias inférieur par Oswald Heer (1865). Des ammonites sont dessinées (par erreur) dans les Marnes à insectes.

En Suisse, seule la région située dans le périmètre du futur massif de l'Aar reste à sec ("Terre alémanique").

Vers la fin du Lias, la mer en Europe Centrale et en Angleterre souffre d'un manque d'oxygène. Les vases à posidonies (plantes aquatiques) déposées à cette époque sont finement stratifiées (feuilletées), riches en fossiles bien conservés tels que des moules, des ammonites, des poissons osseux et des ichtyosaures.

Au **Dogger** (Jurassique moyen, à partir de 174 millions d'années) des argiles noires, parfois à petites intercalations gréseuses, marquent le début de la sédimentation. Ces «Argiles à Opalinus» (ammonites de l'espèce *Leioceras opalinum*) sont déposées dans une mer de plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Puis, le paysage change radicalement: un bassin profond s'ouvre entre l'Europe et l'Afrique (Océan liguro-piémontais, fig. A 17). La marge continentale de la partie méridionale de la mer alpine (Domaines austroalpin et sudalpin), s'effondre et des basaltes volcaniques (des «ophiolites») se répandent sur les fonds océaniques liguro-piémontais, à environ 4'000 m de profondeur. Dans cette mer profonde, les coquilles calcaires de la faune marine se dissolvent, de sorte qu'il ne reste que des fossiles avec un squelette siliceux, tels les radiolaires, mélangés à de la boue siliceuse fine, qui forment des radiolarites (fig. A 9).

A la limite nord du bassin océanique, des pentes raides descendent de la plateforme du Briançonnais dans les profondeurs océaniques. Sur ces pentes abruptes se déposent des brèches, constituées par les débris d'érosion de la plateforme (fig. A 10 a, b).



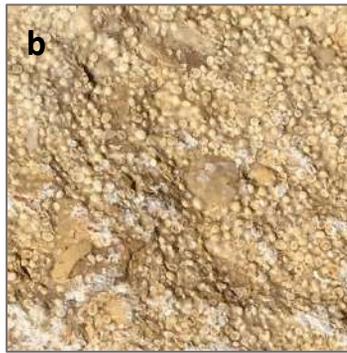
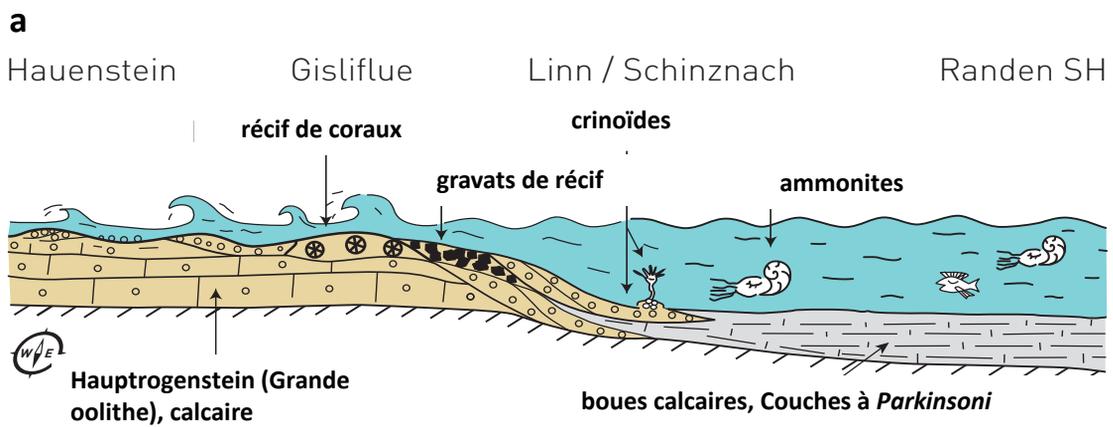
**Figure A 9:** radiolarites: sédiments siliceux de mer profonde, formés de boues siliceuses à radiolaires, Nappe du Tsate (Valais, photo: M. Sartori).



**Figure A 10:** brèche formée sur les pentes abruptes entre la plateforme du Briançonnais et le Bassin liguro-piémontais profond (fig. A 17); **a:** brèche fine avec des débris de schistes métamorphiques, dolomies jaunes et calcaires gris; **b:** faciès à gros débris de calcaire gris (Brèche du Chablais, Praz de Lys, France).

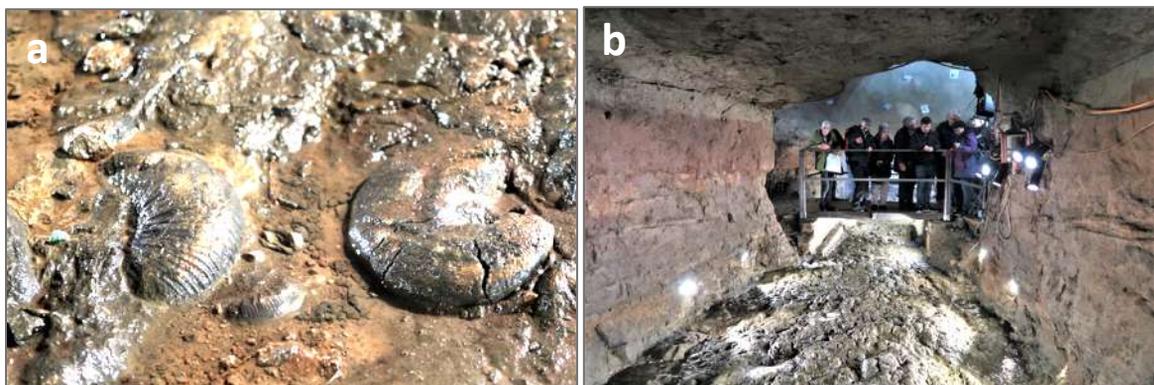
Aujourd'hui, ces dépôts se trouvent dans la "Nappe de la Brèche" des Préalpes et dans la Nappe du Falknis, dans les Grisons.

Dans le domaine du Jura, une plateforme carbonatée se construit d'ouest en est. Dans la partie orientale du Canton d'Argovie, on peut suivre la bordure de cette plateforme sur le terrain qui correspond à la terminaison orientale de la plateforme de la «Grande oolithe» (Hauptrogenstein) et au passage aux Couches à *Parkinsonia* (fig. A 11 a).



**Figure A 11 a:** Jurassique moyen: la plateforme carbonatée du «Hauptrogenstein» (Grande Oolithe) avance de l'ouest vers l'est dans le Jura argovien; **b:** «Hauptrogenstein» constitué d'oolides (billes formées de couches calcaires concentriques), diamètre: 1-1.5 mm), précipités dans la zone des vagues; **c:** corail du récif de la Gisliflue (diamètre ca. 2 cm, Wildi & Lambert 2019, fig. 47, 48). **d:** photo aérienne de dunes de sables oolithiques dans la mer peu profonde des Bahamas (<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Eleuthera.jpg>).

À la fin du Dogger, le niveau marin monte fortement; la précipitation de carbonates diminue. Dans de vastes régions d'Europe, des matériaux fins provenant de l'altération chimique de roches cristallines sont apportés par les courants depuis une zone continentale éloignée (probablement depuis l'Est). Ce matériau argileux contient des oxydes de fer en abondance précipités sous la forme de sphères oolithiques qui constituent les gisements de minerai historiquement importants de la Lorraine (France). En Suisse, le plus grand gisement se trouve à Herznach, dans le Jura tabulaire, où le minerai a été exploité de 1937 à 1967. La roche est riche en ammonites bien conservées (fig. A 12 a, b).



**Figure A 12 a et b:** niveau à Ammonites dans la mine de Herznach (photos: Geri Hirt, Linn; Wildi & Lambert 2019).

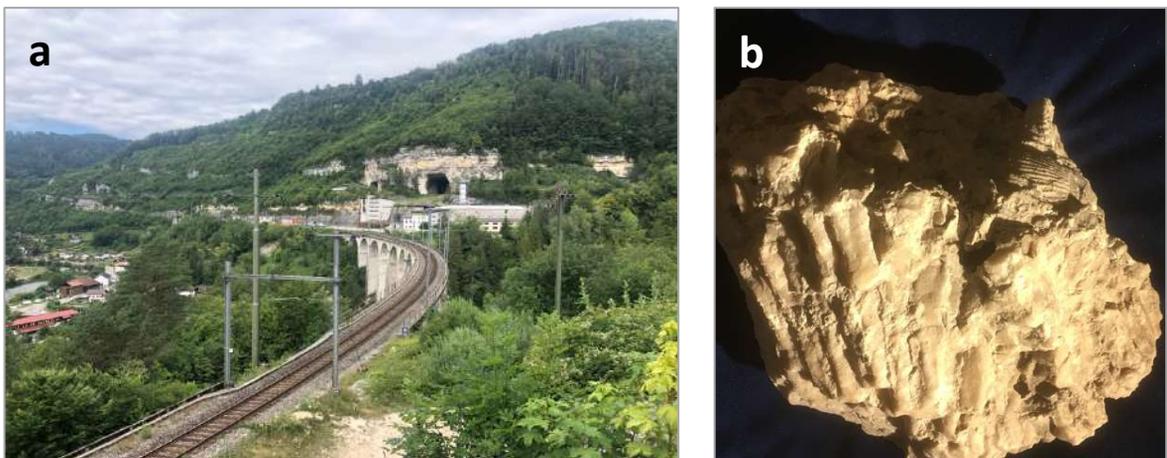


**Figure A 13:** marnes et calcaires dans le Jura oriental: Couches d'Effingen dans la carrière du Schümel (Holderbank, Photo: A. Lambert, Wildi & Lambert 2019); *Perisphinctes*, une ammonite commune dans ces niveaux (<https://en.wikipedia.org/wiki/Perisphinctes>).

Dans les mers épicontinentales du monde entier, le **Malm** (Jurassique supérieur, 164 - 145 millions d'années) est une période de grandes plateformes carbonatées, de dépôt de calcaire et de marne. Sur la plateforme arabique, d'énormes gisements d'hydrocarbures (pétrole et gaz) se forment. Des réserves de pétrole et de gaz de la Mer du Nord datent de cette même période.

En Suisse, et particulièrement dans les Alpes, la qualité de l'information contenue dans ces roches varie considérablement selon l'intensité de leur transformation par la formation du bâti alpin: dans le Jura, les sédiments et leurs fossiles sont très bien conservés. Dans les Alpes, en revanche, leur contenu en informations diminue des plus hautes aux plus basses nappes alpines.

A côté des dépôts marno-calcaires dans des profondeurs d'eau de plusieurs dizaines de

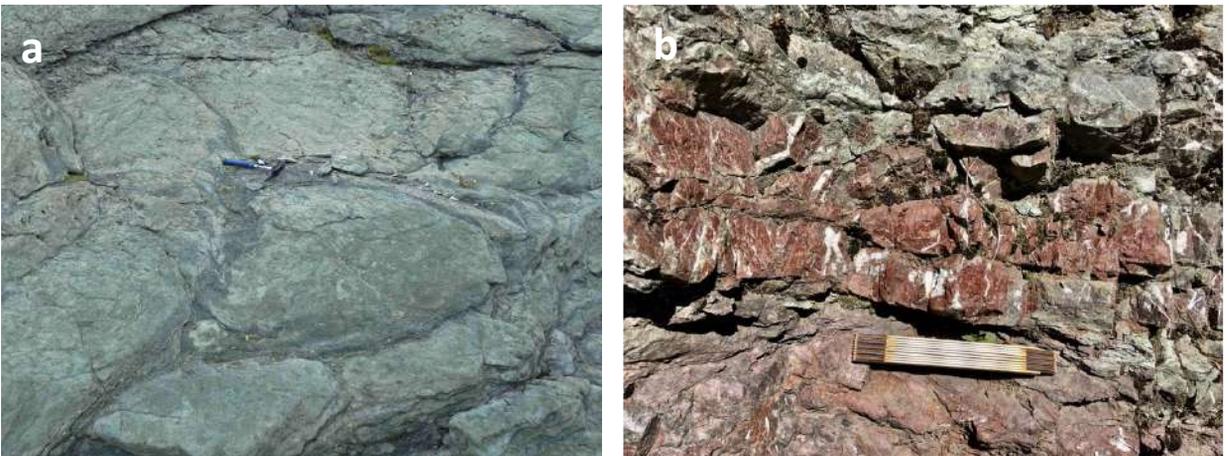


**Abbildung A 14 a:** calcaires à coraux, anciennes carrières de l'usine de chaux à St. Ursanne (photo: Marcos Buser, Zürich); **b:** corail provenant de la zone du portail d'entrée de la carrière.

mètres (par exemple les Marnes d'Effingen, fig. A 13), on connaît, dans le Jura occidental, des récifs coralliens sur la Plateforme rauracienne. Un de ces récifs forme les parois rocheuses au-dessus de la gare de St-Ursanne (Jura, fig. A 14 a, b). Cette formation était exploitée par l'Usine de Chaux comme matière première.

Les roches des Nappes helvétiques sont souvent fortement déformées, et leur environnement de dépôt est parfois difficile à préciser. On y reconnaît cependant également des calcaires récifaux recristallisés.

Dans les profondeurs de l'Océan ligure de la mer alpine, de même que dans les domaines austroalpin et sudalpin (fig. A 17), des boues siliceuses se déposent et forment des radiolarites. Le volcanisme basaltique forme des laves en coussins (fig. A 15 a, b).

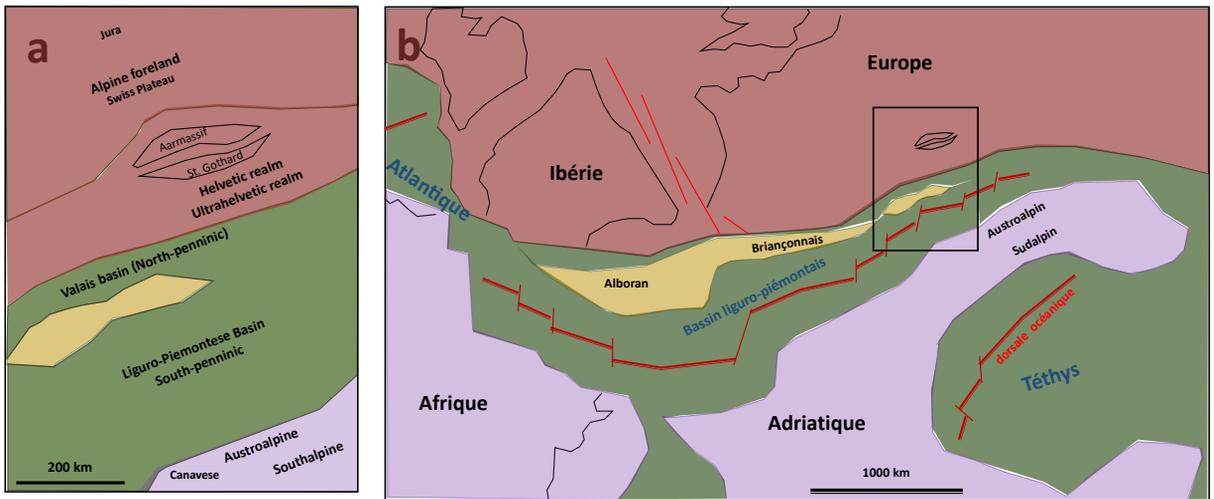


**Figure A 15 a:** laves en coussins océaniques, Mont des Ritses (Nappe du Tsaté, Evolène, photo M. Marthaler). **b:** radiolarites dans les Préalpes romandes (base de la Nappe supérieure, au sud du Jaunpass).

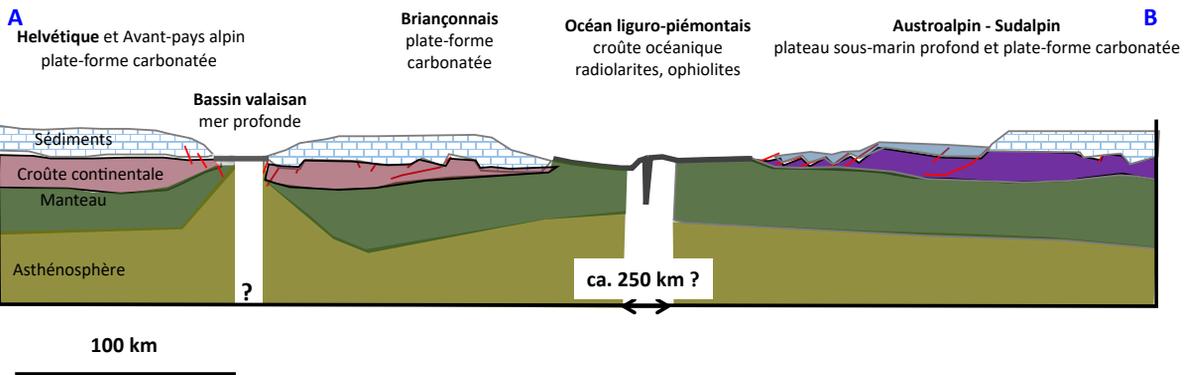


**Figure A 16:** traces de dinosaures à la surface de calcaires à fissures de dessiccation à Courtedoux (Jura), top du Malm.

A la fin du Jurassique, la Plateforme rauracienne émerge partiellement de l'eau; elle est exposée à l'altération et voit même se former par endroits des sols (pédogenèse).



**C**



**Figure A 17 a:** carte paléogéographique, en passant du Jura par la mer alpine jusqu'au Sudalpin. La carte représente la situation au Jurassique supérieur, il y a 150 millions d'années. Les nappes alpines sont replacées dans leur position géographique d'origine.

**b:** paléogéographie de l'Europe, de la péninsule ibérique, de l'Afrique et de la mer Adriatique à la même époque que la figure a. Le cadre noir correspond à la section représentée dans la figure a.

**c:** coupe paléogéographique de la plate-forme helvétique au Sudalpin (trace A-B voir fig. a).

Ces dépôts étaient autrefois appelés «Purbeckien» (aujourd'hui: Formation de Goldberg). Cet horizon contenait en partie du gypse, aujourd'hui dissous, puis de nombreuses traces d'émergence, galets noirs, traces de racines, conglomérats et des os de vertébrés.

Les traces de dinosaures de Courtedoux (Jura, fig. A 16) se trouvent dans une position stratigraphique légèrement inférieure. Ils sont les témoins de l'envasement temporaire du paysage.

#### Promenades géologiques (chapitre C):

10. L'océan liguro-piémontais au bord du Lac de Marmorea
11. La mer Sudalpine profonde dans la Gorge de la Breggia
12. La mine de fer et nécropole d'ammonites de Herznach (Argovie)
13. Récifs de coraux dans le Jura
14. Traces de dinosaures dans le Jura

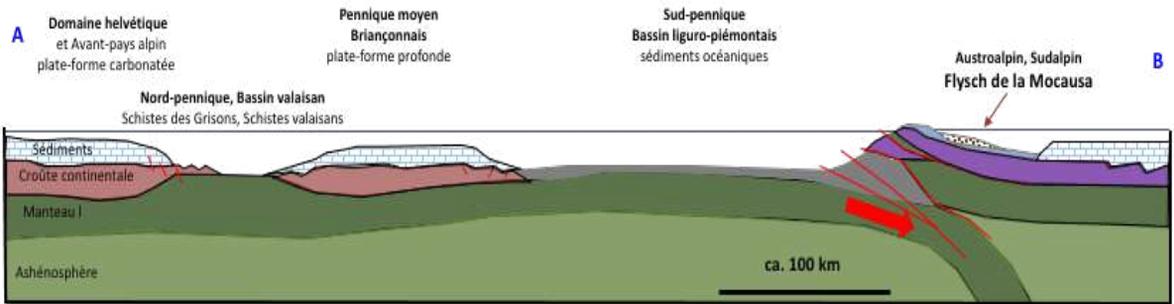
## 5. Crétacé, 145 – 66 millions d’années

Le **Crétacé** est la période pendant laquelle le niveau global de la mer est le plus élevé, soit jusqu'à 250 m au-dessus du niveau actuel (fig. B 8). Au cours de cette période, l'Atlantique Sud s'ouvre (fig. A 4); entre l'Afrique et l'Amérique du sud un nouveau fond marin avec de la lave basaltique se forme. La chaleur de ce volcanisme gonfle les dorsales médio-océaniques (fig. B 3). L'expansion thermique des dorsales explique l'élévation du niveau de la mer: le volume des bassins océaniques s'est tellement réduit que la mer "déborde" et inonde les continents.

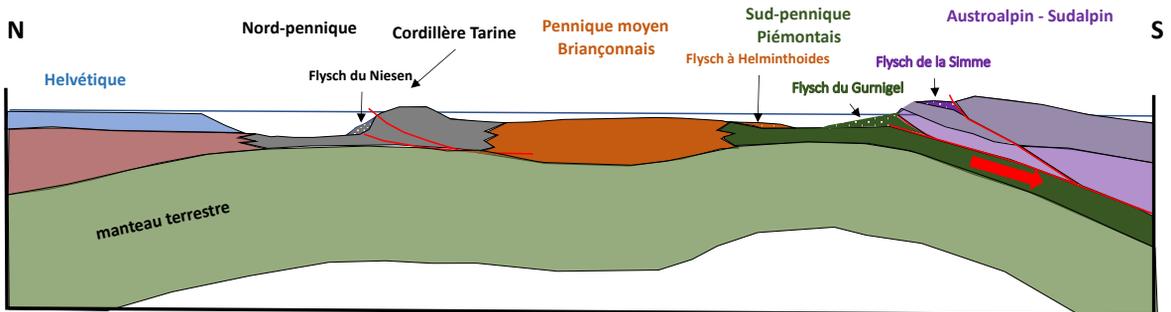
Cependant, l'ouverture de l'Atlantique Sud a une autre conséquence qui touche directement la mer alpine et la Suisse: le continent africain fait une rotation dans le sens antihoraire et rétrécit la mer alpine. Il y a environ 120 millions d'années, une zone de subduction (fig. A 4, B 7) se forme au sud du Bassin liguro-piémontais, premier signe de la formation des Alpes, où la croûte océanique encore jeune du Bassin ligure est subductée sous le continent africain. Cette subduction marque le début du plissement alpin (de l'orogénèse alpine). Le rétrécissement du Bassin liguro-piémontais de la mer alpine conduit à la formation d'un arc insulaire (fig. A 19; Wildi 2022). Cet arc atteint le sud des Préalpes Romandes il y a 100 millions d'années. Une riche végétation se développe sur l'arc insulaire ainsi créée. Les débris d'érosion sont transportés par les rivières jusqu'au bord de la mer. Les galets, le sable, les argiles et les débris de plantes sont ensuite entraînés dans des canyons sous-marins et sont transportés par des courants de turbidité (des avalanches de sédiments) vers les cônes d'épandage au pied des talus en eau profonde. Ainsi se forment les premiers sédiments de l'orogénèse alpine, appelés «**flyschs**». On les rencontre sous l'ancien nom de «Flysch de la Simme» au Jaunpass et au Hunsrück entre Zweisimmen et le village de Jaun (fig. A 18, 19). Le dépôt de flyschs se poursuivra tout au long du Crétacé dans les fosses profondes des zones de subduction dans les bassins Sud- et Nord-penniques en suivant la progression de la formation des Alpes du sud au nord, jusqu'à la limite Eocène/Oligocène il y a 34 millions d'années (fig. A 20, 21, 22, voir également Wildi 2022), tout au sud de la Plateforme helvétique.



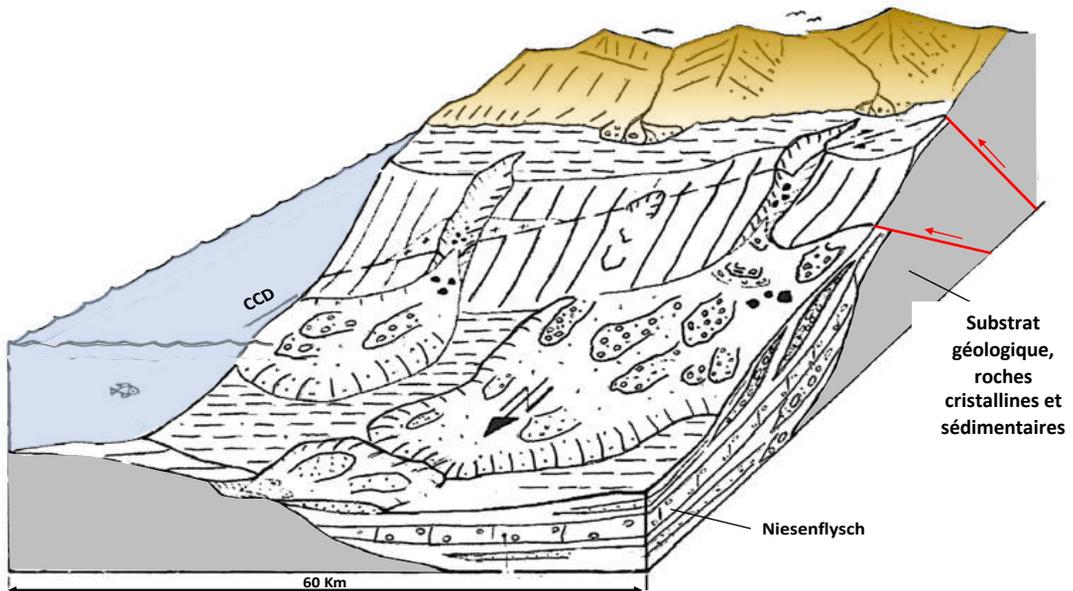
**Figure A 18:** Flysch de la Simme, Turonien, 94 millions d’années; **a:** surface altérée d’un Conglomérat de Mocausa avec des composants sédimentaires parfaitement arrondis. **b:** bancs de 1.5 m de conglomérats de Mocausa sur le talus de la route en rive gauche du Lac de Hongrin (Coo. 46.412948 / 7.042757).



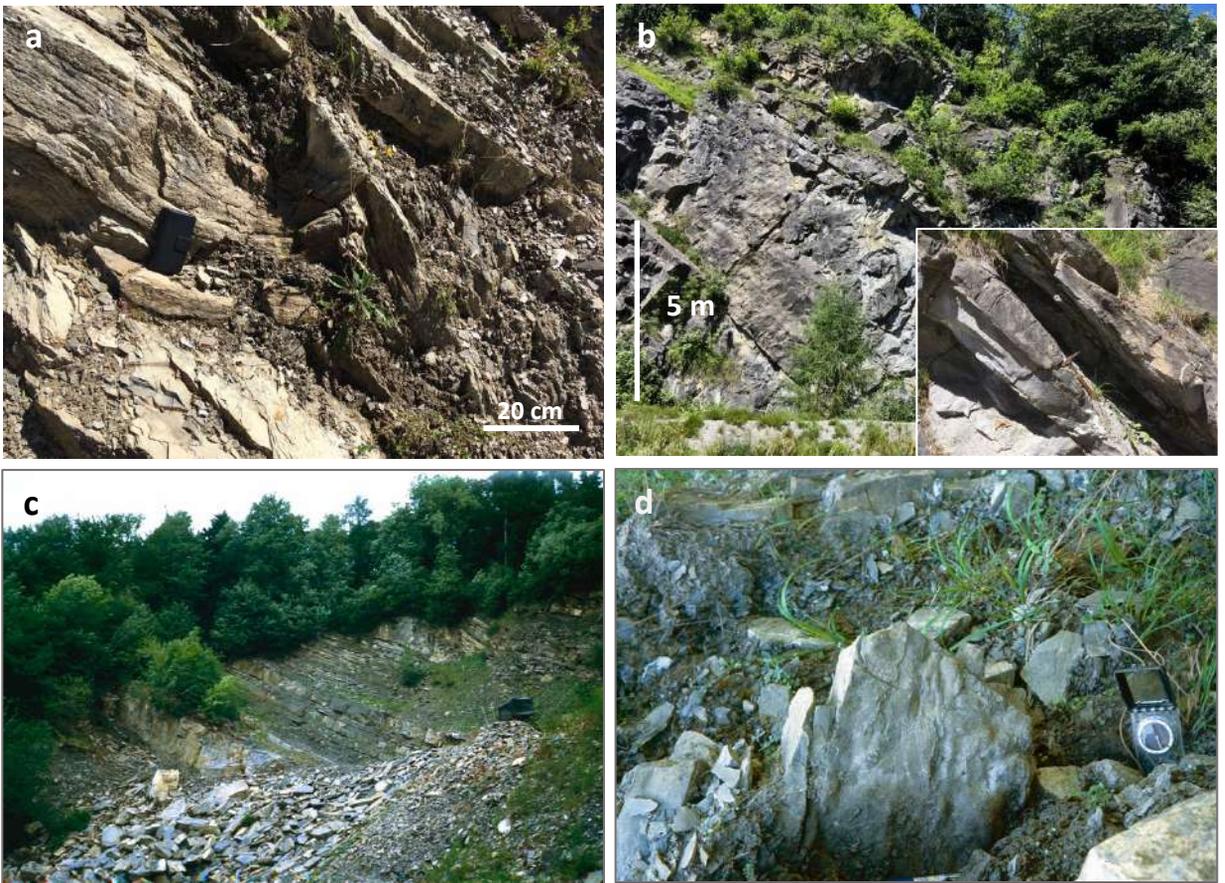
**Figure A 19:** coupe géologique schématique à travers la mer alpine au début du Crétacé supérieur (Turonien 94, millions d'années); modèle de formation du Flysch de Mocausa.



**Figure A 20:** coupe géologique schématique à travers la mer alpine de Suisse occidentale à la fin du Crétacé (Maastrichtien, 72 - 64 millions d'années); formation du Flysch du Niesen, du Flysch à Helminthoides et du Flysch du Gurnigel.



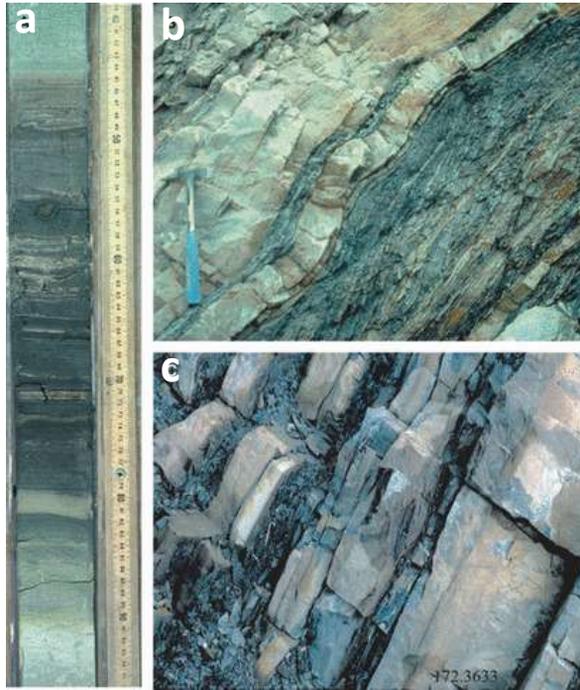
**Figure A 21 :** modèle paléogéographique de la sédimentation du flysch, exemple : Flysch du Niesen (Caron et al. 1989, modifié), au Maastrichtien (env. 70 mio d'années). Le matériel déposé dans le bassin du Niesenflysch est le résultat de l'érosion d'un relief qui a été soulevé par la subduction alpine. CCD : profondeur de la mer à laquelle la calcite devient instable.



**Figure A 22 a:** Flysch à Helminthoides à bancs fins, Hunsrück (Préalpes Romandes, Jaunpass, Crétacé supérieur) ; **b)** Flysch du Niesen à bancs grossiers, inversé tectoniquement (Préalpes Romandes, Sepey, Crétacé supérieur) ; **c), d)** Flysch de la Nappe du Gurnigel (Crétacé supérieur, Carrières des Fayaux) et marques d'écoulement sur une surface inférieure de couche.

À la fin du Jurassique et surtout au début du Crétacé, on trouve dans les bassins profonds de la mer alpine, notamment dans le Sudalpin, des sédiments avec des couches de schistes noirs, riches en matière organique, alternant avec des calcaires fins (fig. A 23). Les schistes indiquent un manque d'oxygène dans les eaux profondes. Ce manque s'explique par la forte production d'algues et d'autres organismes dans les eaux chaudes de surface. Ce réchauffement pourrait être dû à l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère causée par un fort volcanisme. On trouve ainsi des schistes noirs dans les bassins océaniques du monde entier; ce sont également des roches-mères pour d'importants gisements de pétrole.

Au cours du Crétacé inférieur (au Barrémien), une grande plateforme maritime de faible profondeur d'eau s'installe sur la marge continentale européenne, sur laquelle des calcaires avec une riche faune d'huîtres et autres coquillages, de gastéropodes, de coraux, etc. se déposent. En Suisse centrale et orientale, cette formation est dénommée «Schrattenkalk»; en Suisse Romande, on parle traditionnellement d'«Urgonien» (aujourd'hui: Formation de Vallorbe). Morphologiquement, la formation se distingue par ses parois rocheuses blanches et par son altération en morphologies karstiques (fig. A 24).



**Figure A 23:** exemples de schistes noirs dans la littérature (black shales): **a:** carotte du forage ODP 1049C dans l'Atlantique du Nord. **b:** affleurement de bancs de quartzites alternant avec des schistes noirs dans le Val Ferret (Wallis). **c:** schistes noirs alternant avec des calcaires micritiques dans les Alpes du Sud (Kay 2009).

Au milieu du Crétacé (Aptien - Cénomanién), la sédimentation sur la Plateforme helvétique est fortement réduite. Une séquence sédimentaire condensée est déposée, la Formation de Garschella, constituée de glauconite et d'apatite contenant des grès, des marnes, des calcaires et des horizons de nodules de phosphorite (fig. A 25). En raison de la faible vitesse de sédimentation, on trouve également de nombreux fossiles, notamment des ammonites. Des courants océaniques sont mentionnés dans la littérature comme cause principale de la formation de cette séquence sédimentaire condensée.

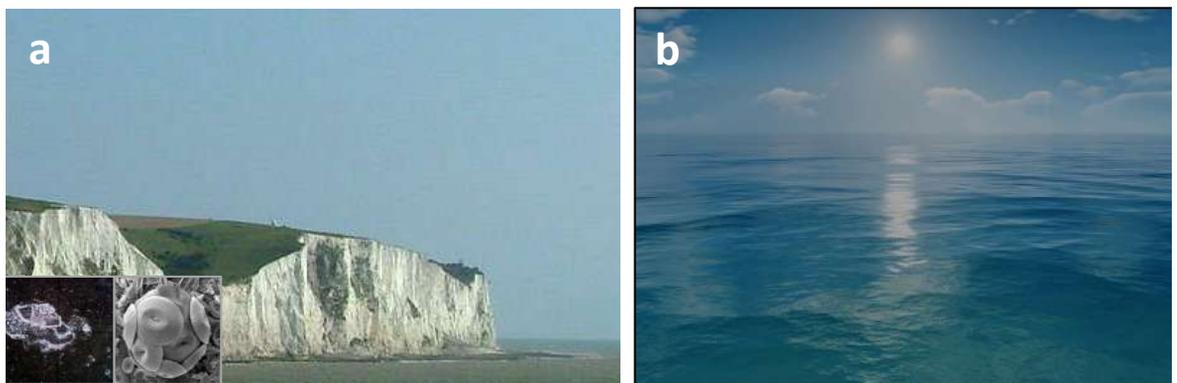


**Figure A 24:** «Schrattenkalk» (calcaires de l'«Urgonien» ou Formation de Vallorbe) avec de nombreux débris de fossils, karstification de surface.



**Figure A 25:** Formation de Garschella avec des galets calcaires et des nodules de phosphorite, Alpage de Garschella (Churfirsten).

Le niveau marin le plus élevé est atteint au cours du Crétacé supérieur (fig. B 8). Comme témoins, on peut mentionner sur la Plateforme helvétique des roches calcaires micritiques (fines) contenant des foraminifères planctoniques du groupe des *Globotruncana*. Plus impressionnantes encore sont les falaises blanches de craie des deux côtés de la Manche, dans le sud de l'Angleterre et le nord de la France (fig. A 26 a).



**Figure A 26 a:** ambiance de Crétacé supérieur: falaises de craie de Douvre ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:White\\_cliffs\\_of\\_dover\\_09\\_2004.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:White_cliffs_of_dover_09_2004.jpg)), microfossiles Nannoplankton et *Globotruncana*; **b)** une vaste mer épicontinentale comme illustration.

Les sédiments du Crétacé manquent dans le Jura central et oriental, sous de grandes parties du Plateau suisse et jusque sur la partie nord-est de la Plateforme helvétique. La question se pose: ces régions sont-elles sorties de l'eau au cours du Crétacé ? Ou bien, les sédiments crayeux déposés autrefois ont-ils été érodés avant la formation de la Molasse ?

La période du Crétacé se termine par une catastrophe écologique majeure: les dinosaures, les ammonites, les Globotruncana et de nombreux autres organismes disparaissent de la surface de la Terre en très peu de temps. Les raisons invoquées dans la littérature sont d'une part un énorme impact de météorite sur la péninsule du Yucatan (Mexique), un volcanisme monumental localisé au sud de Mumbai (Deccan, Inde) ou encore une crise biologique massive.

### Promenade géologique (Chapitre C)

#### 15. Turbidites et flyschs du premier plissement alpin

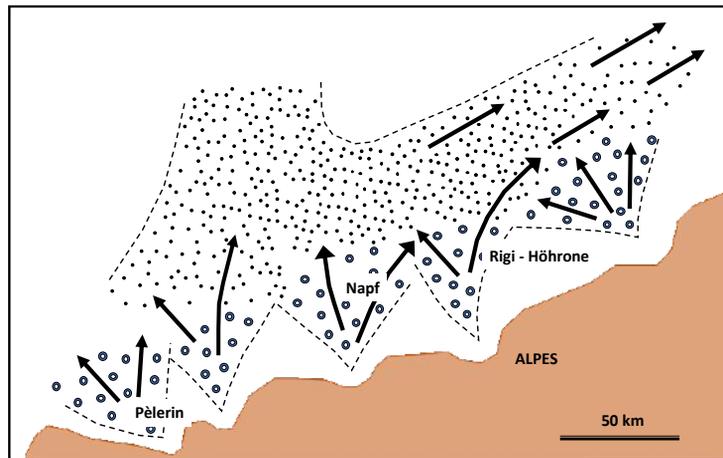
## 6. Paléogène, 66 – 23 millions d'années

La transition du Crétacé au **Paléogène** (anciennement : Tertiaire inférieur) il y a 66 millions d'années s'accompagne du début d'une première baisse marquée des températures et du niveau marin (fig. B 8, B 13). Le Jura et le Plateau suisse sont maintenant émergés et couverts d'une végétation tropicale. La température annuelle moyenne est d'environ 15°C. L'altération des roches laisse des horizons contenant une forte concentration de fer et de manganèse, appelés «bolus» (fig. A 27). Dans les eaux peu profondes de la Plateforme helvétique, on trouve de petits récifs, formés d'algues calcaires (*Lithotamnium*), de nummulites, de discocyclines et d'astérocyclus (tous de grands foraminifères au squelette calcaire). Comme conséquence de l'avancement du plissement alpin, l'étroite zone de sédimentation du flysch migre de l'ancienne mer alpine vers le nord et atteint la Plateforme helvétique à la fin du Paléogène. Ces derniers flyschs contiennent des matériaux provenant de l'érosion de volcans localisés plus au sud, dans la Zone penninique. Les grès tachetés de cette formation sont connus sous le nom de «Grès de Tavayannaz». De magnifiques poissons, tortues et oiseaux fossiles proviennent des ardoises de l'ancienne mine près d'Engi (Canton de Glaris).



**Figure A 27:** minerais de fer noduleux dans les argiles («bolus») d'âge éocène dans le Jura plissé près de Thalheim (Argovie, Coo 47.43253/8.10074).

Dès le début de l'**Oligocène** (34 millions d'années), la sédimentation s'installe dans l'avant-pays alpin, dans la région s'étendant du nord du massif de l'Aar au sud du Plateau suisse, où la **Molasse marine inférieure** se dépose dans un étroit bras de mer orienté est-ouest. Cependant, cet estuaire se comble rapidement; le niveau marin global baisse simultanément (y aurait-il les premières calottes de glace sur les pôles?), et les puissants cônes alluviaux de la **Molasse d'eau douce inférieure**, du Mont Pélerin au Napf, au Rigi et au Speer, s'établissent sur la bordure alpine (fig. A 28 - 31).

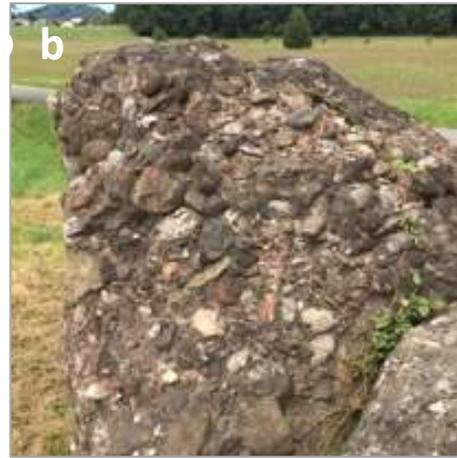


**Figure A 28:** paléogéographie l'avant-pays au nord des Alpes pendant le Miocène inférieur et la formation de la Molasse d'eau douce inférieure (d'après Trümpy 1980, Abb.7).

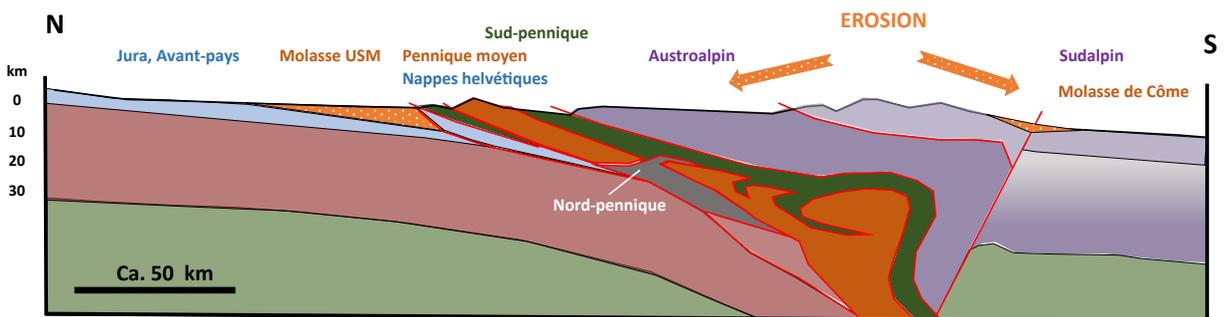


**Figure A 29 a:** Molasse d'eau douce inférieure, Poudingues du Pèlerin à intervalles de grès sur la route du lac longeant le Léman à la sortie ouest du village de Rivaz. Des galets généralement < 10 cm sont insérés dans une matrice conglomératique et sableuse fine. Les galets des roches sédimentaires sont bien arrondies. (Coo. 46.47439/6.78091). Echelle: couteau 9 cm.

**b:** bloc de Rigi-Nagelfluh multicolore avec de nombreux galets de radiolarite rouge, Parcours Vita à Goldau (Coo. 47.047053 / 8.0559487).



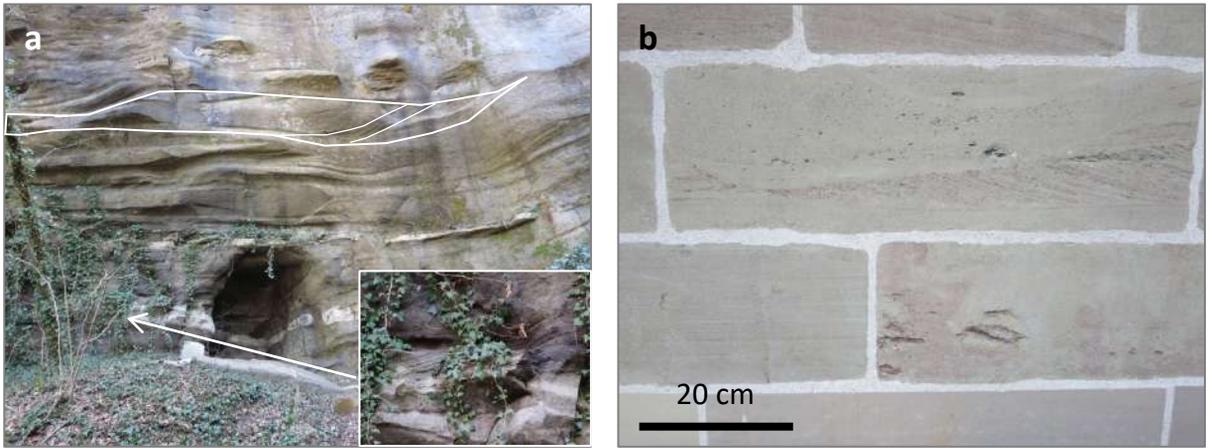
**Figure A 30 a:** la Rigi, une écaille tectonique formée par les dépôts grossiers (conglomérats ou «Nagelfluh») du cône alluvial de la Molasse d'eau douce inférieure; **b:** les blocs de Nagelfluh se trouvent comme blocs erratiques sur les moraines glaciaires, ici sur les moraines frontales du Glacier de la Reuss entre Mellingen et Mägenwil.



**Figure A 31:** Oligocène supérieur – Miocène inférieur, érosion des Nappes austroalpines, formation de la Molasse d'eau douce inférieure au nord et de la Molasse de Côte (Chattien – Burdigalien) au sud des Alpes.

Dans les zones plus éloignées du front alpin, le long des contreforts actuels du Jura et dans le Bassin genevois, on se trouve sur la plaine alluviale distale, avec des dépôts fins, argileux et sableux. Dans le Bassin genevois, il s'agit de la «**Molasse grise**», en partie avec du gypse, et de la «**Molasse rouge**» avec ses beaux grès tachetés de rouge, qui ont servi à la construction de la plupart des bâtiments de la vieille ville de Genève (fig. A 32).

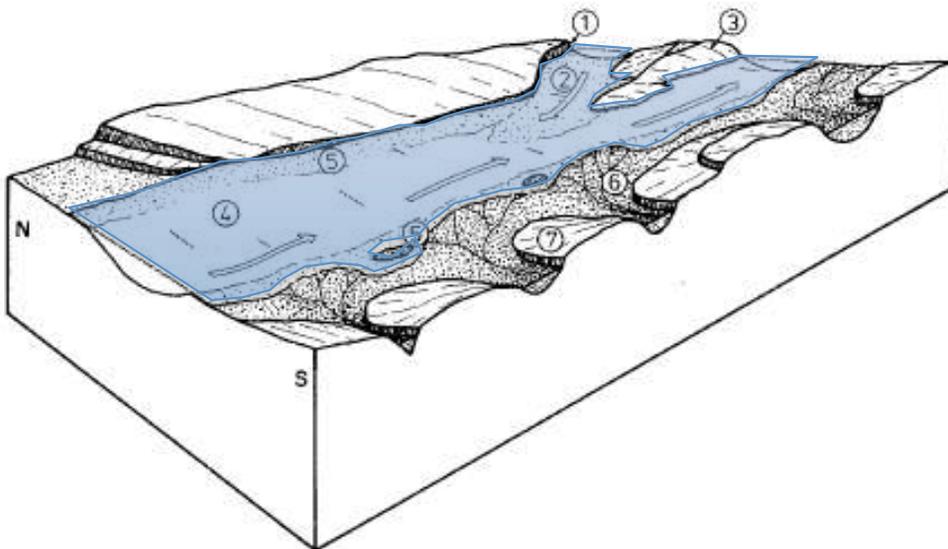
L'Oligocène est caractérisé dans l'avant-pays alpin par un climat méditerranéen humide, semblable à celui du Canton du Tessin actuel.



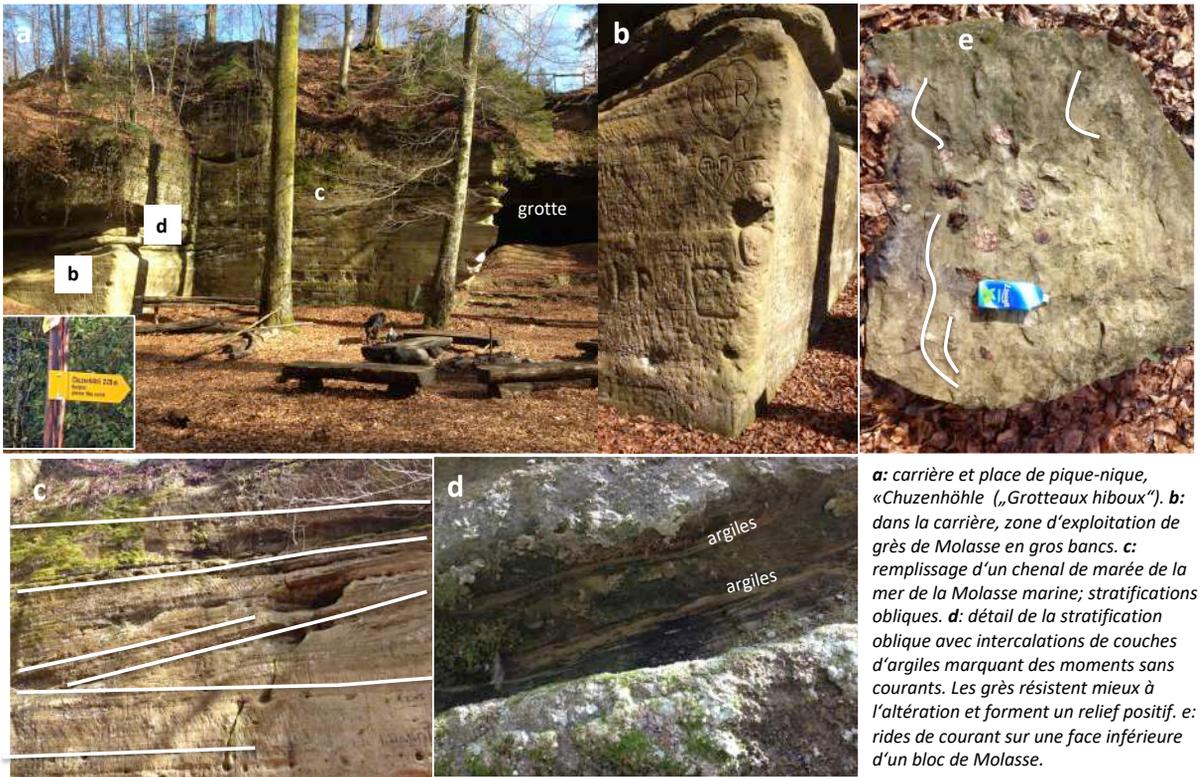
**Figure A 32 a:** grès de la Molasse d'eau douce inférieure dans la vallée de la Roulave à l'ouest de la ville de Genève; structures sédimentaires d'anciens chenaux. Les stratifications obliques donnent une idée des dimensions des chenaux fluviaux. **b:** Molasse rouge comme pierre de construction de la Cathédrale St-Pierre de Genève.

## 7. Néogène, 23 – 2.6 millions d'années

Au **Miocène**, à partir du Burdigalien (20.5 millions d'années), le plissement alpin progresse nettement vers le nord. Les cônes alluviaux de la Molasse d'eau douce inférieure sont poussés vers le nord et chevauchent leur avant-pays. Le niveau marin monte à nouveau à la suite d'un réchauffement climatique et inonde les régions comprenant le Plateau suisse et le Jura. La **Molasse marine supérieure**, connue pour ses épaisses formations de grès fins, est déposée dans ce bras de mer qui s'étend du Bassin de Vienne jusqu'à la Méditerranée en passant par le Plateau suisse (fig. A 33, 34).

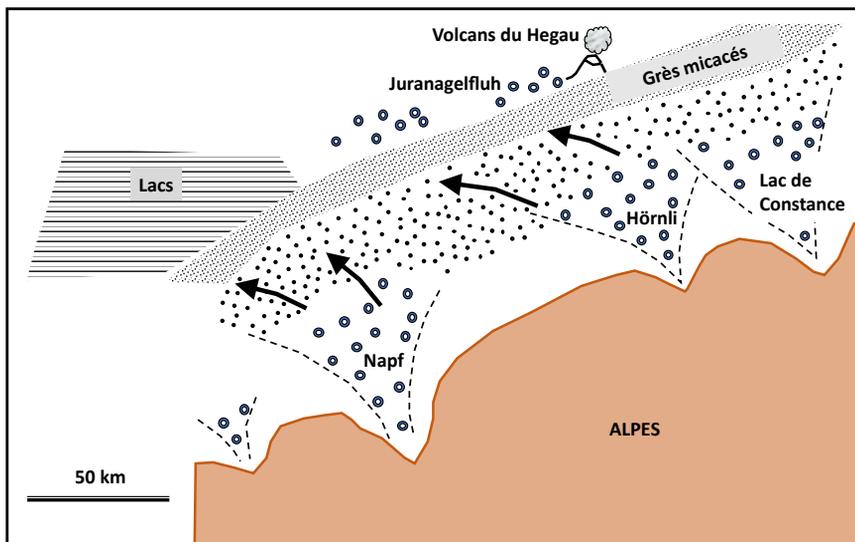


**Figure A 33:** bras de mer de la Molasse marine supérieure à l'époque des Grès coquilliers; Plateau suisse à l'Est du Fossé rhénan 1) côte abrupte 2) grès grossiers provenant de l'est, 3) seuil de l'Albstein, 4) localisation de la ville de Zofingen, 5) plages, 6) cône alluviaux, 7) bordure alpine (W.H. Müller et al. 1984, fig. 60, légèrement modifiée).

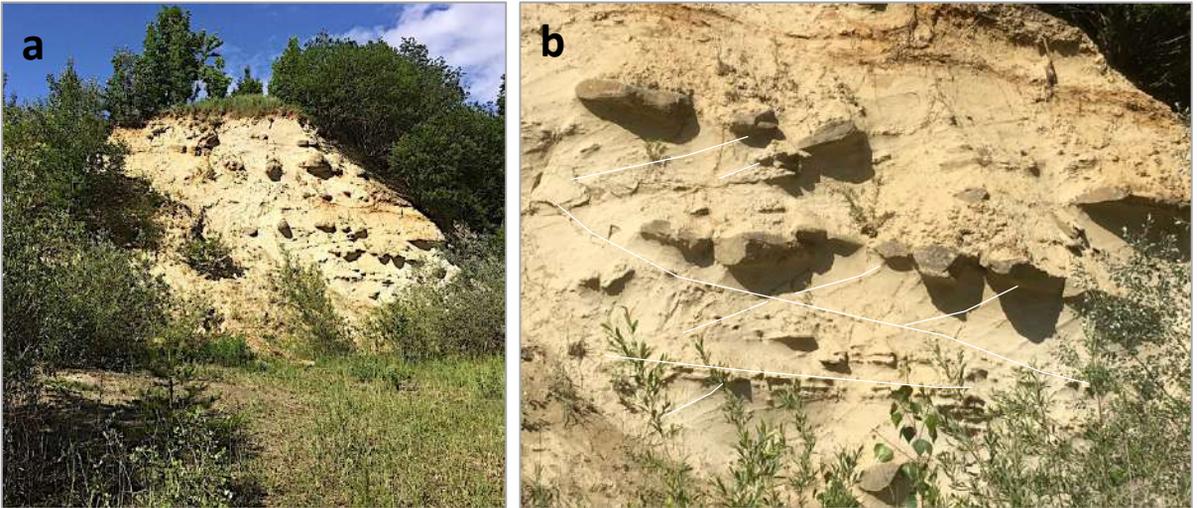


**Figure A 34:** Molasse marine supérieure, carrière de grès de la «Chuzenhöhle» dans la commune de Zofingen (Coo 47.29260/7.96488).

Après le retrait de la mer, de nouveaux cônes de dépôt se forment le long des Alpes et s'étendent du front alpin jusqu'au Plateau pour former la **Molasse d'eau douce supérieure**. Un réseau fluvial provenant des Alpes orientales fournit du sable micacé qui se dépose jusque dans la région du Jura tabulaire (fig. A 35, 36).



**Figure A 35:** paléogéographie du bassin molassique au nord des Alpes pendant le Miocène moyen et la formation de la Molasse d'eau douce supérieure (d'après Trümpy 1984, Abb.7).



**Figure A 36 a:** Molasse d'eau douce supérieure, grès micé sur la face nord de la carrière de Schüracher, Iberg (Jura tabulaire, Miocène supérieur, Coo 47.46834/8.11514). Les sables fins étaient utilisés comme ajout par la tuilerie de Frick.

**b :** détail avec des couches inclinées provenant des méandres des chenaux de la rivière au moment du dépôt des sables. Les parties dures et saillantes (appelées Knauer) sont cimentées par de la calcite. Des lignes blanches soulignent les structures sédimentaires (Wildi & Lambert 2019).

Peu avant la fin du Miocène, il y a environ 7 millions d'années, la sédimentation prend fin dans l'avant-pays alpin. Ce fait indique que le relief est déjà si prononcé que les rivières transportent les matériaux érodés depuis les Alpes directement vers la Méditerranée.

Au début du Miocène, les conditions subtropicales sont de retour. Le voyage se poursuit ensuite vers un climat chaud. Le gisement de plantes fossiles d'Oehningen (à l'Est du lac de Constance) caractérise cette période (fig. A 37). Pendant le Pliocène, la température diminue progressivement jusqu'au froid du Pléistocène.



**Figure A 37:** paysages d'Oehningen à l'Est du Lac de Constance, à l'époque de la formation de la Molasse d'eau douce supérieure (Oswald Heer, 1883).

Le **Paléogène et le Néogène des Alpes du Sud** peuvent difficilement être comparés au versant nord des Alpes: alors que les débris de l'érosion se sont déposés dans l'avant-pays alpin au nord, il en va autrement au sud des Alpes où les rivières ont emporté le matériel d'érosion dans le Bassin du Pô en Italie du Nord. Les argiles des formations de Chiasso de l'Oligocène sont recouvertes de conglomérats grossiers, de marnes et des grès des "gonfolites" du Miocène.

Vers la fin du Néogène, soit il y a environ 10 millions d'années, à la fin du Miocène, un événement presque inimaginable se produit: le Déroit de Gibraltar se ferme et la Méditerranée est isolée des océans du monde. Les rivières qui se jettent dans la Méditerranée ne suffisent pas à compenser l'évaporation de l'eau de mer. Ainsi, la Grande Bleue s'assèche et du sel se dépose dans le bassin profond («crise de salinité du Messinien»). Pendant cette période, les rivières qui se jettent dans la mer creusent de profonds canyons. Les vallées fluviales les plus profondes atteignent le sud du Tessin depuis le Bassin du Pô par «rétro-érosion». Les dépôts fluviaux grossiers (Conglomérat de Pontegana) sont corrélés à cet événement. Lorsque le Déroit de Gibraltar rouvre au Pliocène et que le niveau de la Méditerranée monte à nouveau, des argiles comportant une faune marine diversifiée sont déposées près de Balerna. Ce sont les sédiments marins les plus récents de Suisse.

### Promenades géologiques (Chapitre C):

16. Première érosion des chaînes alpines les cônes alluviaux du Rigi et du Mont Pèlerin (Molasse subalpine)
17. La dernière mer de l'avant-pays alpin: la Molasse marine supérieure
18. Témoins du plissement et des nappes alpines
19. Le Jura plissé: front du plissement alpin



**Figure 38 a:** Conglomérat de Côme avec des galets de granit parfaitement arrondis, à peine triés, dans une matrice de sable grossier (route Chiasso– Pedrinatte, Coo. 45.82944 / 9.000708).

**b:** Galets de granite du conglomérat de Côme, diamètre max. 90 cm.

## 8. Pleistocène – Âge de glace, 2.6 millions à 11'700 ans

### Préface

De grandes périodes de froid se sont produites au Précambrien, il y a environ 750 millions d'années, au Paléozoïque entre 460 et 440 (Ordovicien), puis de 345 à 280 millions d'années (au Carbonifère supérieur et au début du Permien) et au Pléistocène (Quaternaire), à partir de 2.6 millions d'années. Surtout pendant la seconde moitié du Pléistocène, il y a eu plusieurs périodes de froid extrême, appelées périodes glaciaires ou glaciations, avec de grands volumes de glace sur les pôles, dans les Alpes et d'autres chaînes de montagnes. Ces périodes glaciaires ont été interrompues par des périodes chaudes plus courtes, les périodes interglaciaires. Nous vivons aujourd'hui, respectivement depuis 11'700 ans, dans une telle période interglaciaire, l'Holocène. La découverte des périodes glaciaires dans la seconde moitié du 19e siècle était basée sur l'observation des dépôts glaciaires, surtout de blocs erratiques, loin des glaciers d'aujourd'hui, que ce soit dans l'avant-pays alpin, en Europe du Nord ou en Amérique du Nord. Sur les continents, cependant, la reconstruction d'une chronologie exacte de ces glaciations s'est avérée difficile. Dans les années 1950 et 1960, deux chercheurs, C. Emiliani et N.J. Shackleton, ont trouvé une solution pour déchiffrer l'histoire du climat mondial dans les océans. Depuis lors, il a été possible de reconstituer les fluctuations des volumes de glace dans le monde entier; les variations isotopiques de l'oxygène dans les sédiments océaniques sont désormais considérées comme la référence de l'histoire du climat mondial des derniers 2.6 millions d'années de l'histoire de la Terre. Cependant, la corrélation des résultats provenant des océans avec les niveaux de moraine de l'avant-pays alpin reste difficile.

-----

### Glaciations

Au sortir du paroxysme du plissement des Alpes et du Jura au Pliocène, la Suisse se caractérise par un relief relativement équilibré des deux côtés des Alpes; l'approfondissement des vallées a seulement lieu au cours du Pléistocène, sous l'action des glaciers. Le paysage d'aujourd'hui est en grande partie le résultat de ces glaciers.

Cependant, notre compréhension de l'histoire des périodes glaciaires dans les Alpes et dans l'avant-pays alpin est encore très incomplète. Dans leur travail de pionnier, Penck et Brückner (1901/1909) ont reconnu quatre grandes périodes glaciaires dans l'est et le nord de la Suisse, sur la base des localités types du Plateau bavarois, qu'ils ont appelées périodes glaciaire du **Günz**, du **Mindel**, du **Riss** et du **Würm**:

- Ils ont attribué la formation des anciennes terrasses fluio-glaciaires les plus élevées du Plateau bavarois, les **Graviers de couverture supérieurs**, à la période du **Günz**. Dans le nord-est de la Suisse, ces graviers se trouvent aujourd'hui dans les zones sommitales du Plateau et du Jura (Albis, Üetliberg, Irchel).

- Ils ont assimilé au **Mindel** la formation des **Graviers de couverture inférieurs**. Ces graviers auraient été déposés dans des vallées déjà légèrement creusées.
- Selon Penck et Brückner, la période du **Riss** correspondrait à la plus grande étendue des glaciers de l'avant-pays alpin. Ils lui attribuent la formation des graviers de la **Haute terrasse** de l'avant-pays du glacier. Au cours de cette période froide, les glaciers réunis du Rhône, de l'Aar, de la Reuss, de la Limmat et du Rhin auraient progressé jusqu'à Möhlin, en amont de Bâle, creusant les profondes vallées des Alpes et de l'avant-pays alpin.
- Le **Würm** des auteurs conclut cette histoire.

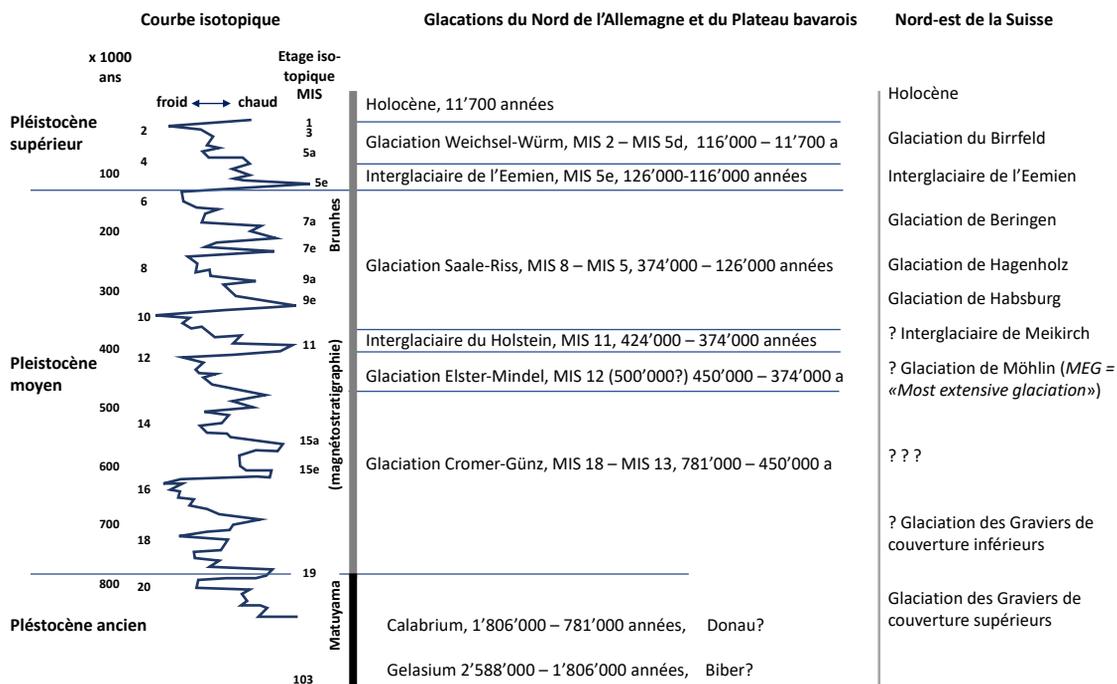
L'**Holocène**, correspond à la période chaude actuelle; il s'agit de la dernière période interglaciaire à ce jour.

Deux périodes glaciaires plus anciennes ont été plus récemment identifiées, à savoir la période glaciaire du **Danube** (Eberl 1930) et la période glaciaire du **Biber** (Schaefer 1957).

L'histoire des périodes glaciaires du Pléistocène des Alpes et de l'avant-pays alpin proposée par Penck et Brückner est essentiellement basée sur des critères morphologiques, tels que la relation entre les cordons morainiques comme témoins des positions des glaciers et les terrasses de graviers comme témoins des plaines alluviales dans l'avant-pays des glaciers. Cette approche a été confirmée sur de nombreux points. Toutefois, nos connaissances dans d'autres domaines de la glaciologie se sont enrichies et multipliées depuis le début du XXe siècle. Des milliers de forages ont été réalisés et fournissent des informations sur la structure tridimensionnelle des corps sédimentaires glaciaires dans les anciennes vallées glaciaires. La paléontologie et la palynologie (en particulier les pollen dans les sédiments fins) permettent de reconstituer l'histoire du climat local. Grâce à la méthode C-14, basée sur la désintégration de l'isotope radioactif C-14 formé dans l'ionosphère, les sédiments et les restes organiques qu'ils contiennent peuvent être datés pour les 50'000 dernières années. La thermoluminescence et la mesure de la durée d'exposition solaire des roches de surface permettent une datation sur plusieurs 100'000 ans. L'histoire climatique de l'Holocène bénéficie de la dendrochronologie, c'est-à-dire de l'étude des cernes de croissance annuelle des arbres. Enfin, l'histoire des variations du champ magnétique terrestre conservé dans les sédiments fournit de précieux marqueurs temporels.

En combinant toutes ces informations, on obtient une image plus précise du déroulement des périodes glaciaires et interglaciaires. Cependant, en raison du nombre insuffisant de datations réalisées et de la précision toute relative de ces méthodes de datation, l'image obtenue reste imparfaite. En outre, les résultats obtenus dans un lieu donné ne sont souvent pas facilement transférables à une autre région.

La figure A 39 propose un schéma des glaciations et des périodes interglaciaires dans le nord de la Suisse et une corrélation avec les conditions dans l'avant-pays alpin bavarois, le nord de l'Allemagne (bordure des masses glaciaires scandinaves pendant les glaciations du

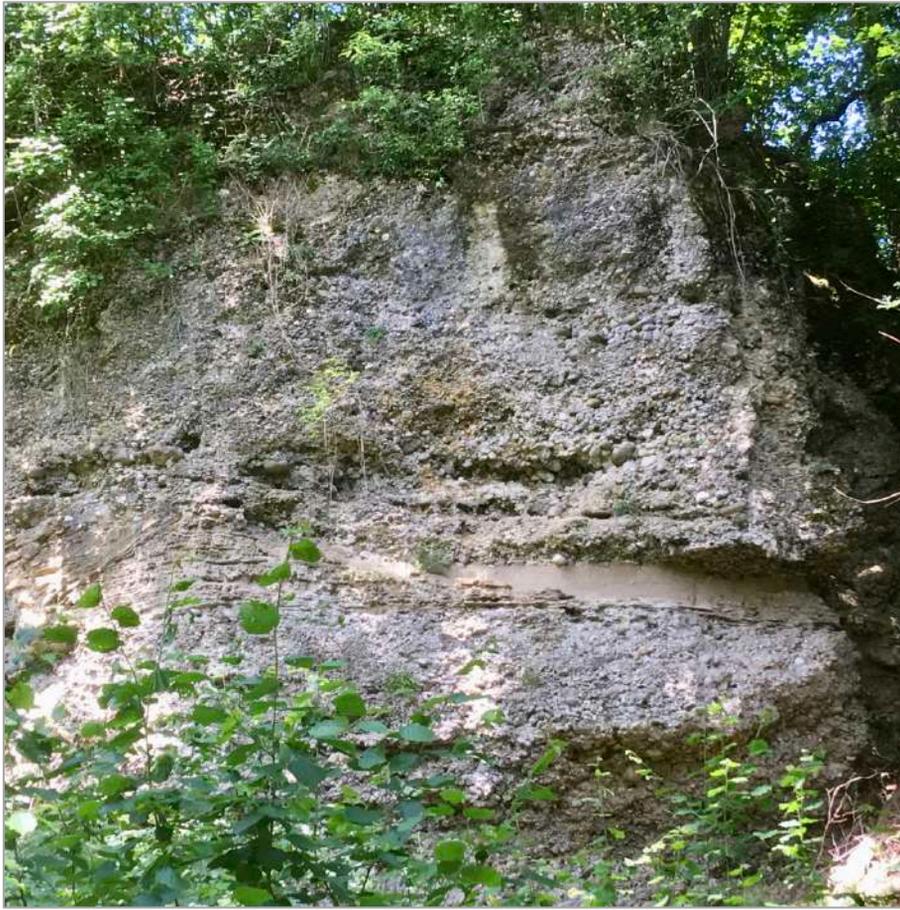


**Figure A 39:** chronologie du Quaternaire: essais de corrélation entre la courbe isotopique marine de référence, le nord de l'Allemagne (calotte scandinave), l'avant-pays alpin bavarois et le Nord-Est de la Suisse. (<http://www.dandebate.dk/eng-klima5.htm>, Stratigraphische Tabelle Deutschlands 2016, Preusser et al. 2011, fig. 19, Schmincke et al. 2008, fig.20.20).

Pléistocène) et avec la courbe de référence océanique, basée sur les fluctuations des changements des masses glaciaires globales exprimées par les isotopes de l'oxygène O-18. Toutefois, même cette corrélation est encore incertaine à bien des égards et sera certainement affinée et corrigée dans les années à venir.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les **Gravier de couverture supérieurs** occupent les plus hauts sommets du Nord-Est de la Suisse, de l'Albis à l'Üetliberg sur le Plateau suisse, en passant par les hauteurs de Mandach et le Studenland dans le Jura tabulaire (fig. A 40) et l'Irchel entre les vallées de la Töss et du Rhin. Les travaux de recherche des trois dernières décennies ont permis de mieux connaître cette formation géologique complexe. Bollinger et al. (1996) et Graf (2019) donnent un aperçu des connaissances actuelles. La formation se compose principalement de till glaciaire (moraine), de graviers fluvioglaciaires et d'argiles lacustres ou palustres d'une période plus chaude. Sur les hauteurs de l'Irchel, la découverte de petits mammifères indique un âge de 1.8 à 2.5 millions d'années. Cet âge est confirmé par des données paléomagnétiques. La formation est donc datée du Pléistocène ancien.

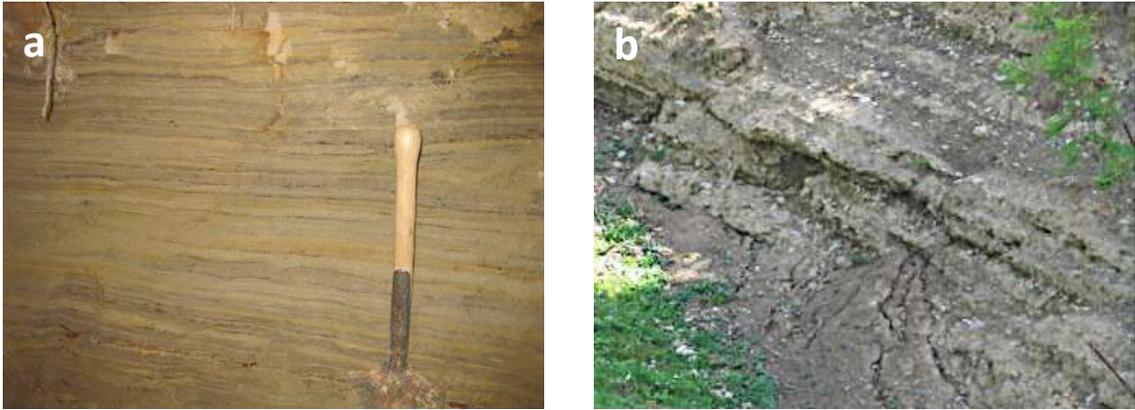
Les **Graviers de couverture inférieurs** de la basse vallée de l'Aar, de la vallée de la Reuss et de la vallée de la Limmat montrent la progression de l'érosion glaciaire (fig. A 41 a, b). Ces graviers ne sont pas datés, mais sont attribués au Pléistocène ancien tardif ou à la base du Pléistocène moyen.



**Figure A 40:** Graviers de couverture supérieurs (conglomérats), dépôts fluviaux cimentés; hauteurs de Schneisingen (Argovie, «Studenland», Coo 47.52313/8.35153).



**Figure A 41 a:** plis dans les Graviers de couverture inférieurs du Bruggerberg (slump ou cryoturbation, Coo 47.49733/8.22138). **b:** tours de conglomérats des Graviers de couverture inférieurs du Tüfels-Chäller («cave du diable», Baden, Coo 47.46318/8.30142), photos: A. Lambert, Baden (Wildi & Lambert 2019).



**Figure A 42 a:** sédiment lacustres sablo-argileux riche en débris de plantes, Formation supérieure d'Ecoteaux. **b:** delta lacustre sur les hauteurs d'Ecoteaux (Pugin et al. 1993).

En Suisse occidentale, deux formations (**Formations inférieure et supérieure d'Ecoteaux**, fig. A 42 a, b) de sédiments lacustres se trouvent à Ecoteau (Palézieux), à 800 m d'altitude, séparées par un niveau de till glaciaire. La Formation inférieure d'Ecoteaux repose également sur un dépôt morainique glaciaire. Les pollens dans les sédiments lacustres indiquent un climat frais (boréal, "scandinave"). Les sédiments présentent une magnétisation inverse et sont donc âgés de plus de 781 000 ans ; ils appartiennent au Pléistocène ancien. Il s'agit peut-être du premier bassin de ce qui deviendra plus tard le Léman. La Formation supérieure d'Ecoteaux est riche en restes organiques et s'est formée dans un climat chaud, méditerranéen. Dans le spectre pollinique, les *Pterocarya*, le frêne, l'orme, l'aulne, la noisette, le charme, le tilleul, le chêne et l'if se distinguent. Il pourrait s'agir de sédiments interglaciaires du Holstein («interglaciaire à *Pterocarya*»), il y a 424'000 - 374'000 ans (voir fig. 38).

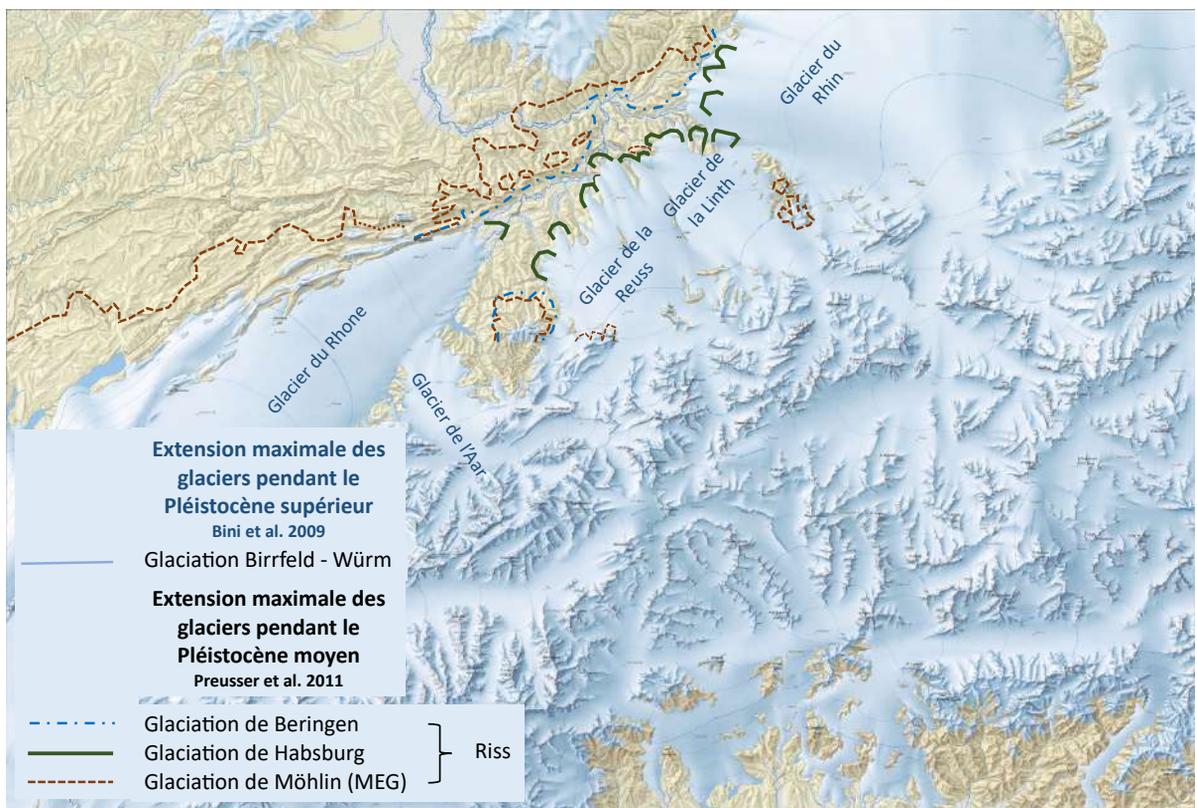
Au cours de la glaciation de Möhlin du Pléistocène moyen (glaciation du Riss selon Penck & Brückner), les glaciers du Rhône, de l'Aar, de la Reuss, de la Limmat et du Rhin fusionnent (Preusser et al. 2009). Ce flux de glace unifié s'avance jusqu'à Möhlin dans la vallée du Rhin (fig. A 43, 44). Il s'agit du vallum morainique le plus externe de toutes les périodes glaciaires. Au moment de cette avancée maximale, la glace atteint une hauteur de plus de 800 m au-dessus du niveau de la mer dans les chaînes du Jura plissé argovien. Le glacier traverse alors les cols de Salhöchi, Bänkerjoch et Staffelegg. Sur le Plateau suisse, même le Lindenberg avec ses 878 m d'altitude se trouve sous la glace.

Les différentes périodes glaciaires du Pléistocène moyen (fig. A 39, 44) sont difficiles à distinguer dans le paysage. Les terrasses de gravier en bordure des vallées sont appelées «Haute terrasse»; on y rencontre également de petits deltas (*kames*) formés en bordure des glaciers. Les cordons de moraine, qui indiquent des périodes de stagnation des glaciers, sont altérées et arrondies par l'érosion. Dans les vallées du Rhin et de l'Aar, on trouve de telles stations d'arrêt près de Laufenburg, Koblenz, Wislikofen, Ruckfeld, Siggenthal et Schinznach.



**Figure A 43:** paysage de moraines et de terrasses fluvio-glaciaires de Möhlin. Vue depuis Schöneegg en direction du nord, par le village de Wallbach et la vallée du Rhin. Le relief à gauche correspond au vallum morainique laissé par les glaciers à l'occasion de leur extension maximale (Wildi & Lambert 2019, Abb. 82).

Sur les hauteurs du Plateau suisse et du Jura, les glaciations du Pléistocène moyen laissent une couche de moraine de fond (*till*) sur le substrat rocheux, avec des blocs erratiques (fig. A 45). Les témoins les plus caractéristiques de ces glaciations sont les terrasses fluviales des rivières pro-glaciaires ainsi que les drumlins rocheux (par exemple le Stauffberg et le Schlossberg de Lenzburg), sculptés par le flux des langues glaciaires.



**Figure A 44:** extension maximale des glaciers alpins pendant le Pleistocène moyen et supérieur. Pléistocène moyen: Preusser et al. 2009, Penck & Brückner 1901/1909, Pléistocène supérieur: Bini et al. 2009 (copyright swisstopo). Cette carte ne distingue pas les différentes phases de froid de la dernière glaciation.



**Figure A 45:** bloc erratique du Glacier du Rhône (Honigstein) du Pléistocène moyen sur les hauteurs d'une butte de Molasse près de Roggliswil (Ct. De Lucerne, Coo 47.20606, 7.88272).

La période entre le Pléistocène moyen et le Pléistocène supérieur correspond à la période interglaciaire de l'**Eemien**. Elle est documentée sur plusieurs sites par des sédiments d'une période chaude, riches en matière organique. Cette période était plus chaude que l'Holocène.

La dernière période glaciaire à ce jour, la **Glaciation du Würm ou du Birrfeld** (Preusser et al. 2011), est mieux connue que ses prédécesseurs. Sur l'hémisphère nord, la séquence d'événements peut être décrite comme suit:

- A partir de 122'000 ans BP\*, les glaciers aux pôles et dans les chaînes de montagnes connaissent une forte croissance.
- Après une longue période de fluctuations glaciaires, la première expansion maximale des glaciers est atteinte vers 70'000 ans BP. Elle dure jusqu'à 60'000 ou 55'000 ans BP.
- L'histoire continue avec les fluctuations des glaciers, mais avec des volumes de glace plus faibles que lors du premier maximum glaciaire.
- A 35'000-30'000 ans BP, la deuxième période d'extension maximale de la glace commence. Elle dure jusqu'à 23'000 ou 22'000 ans BP et une dernière avancée est datée de 20'000 ans. Cet événement qu'on appelle le LGM («*lata glacial maximum*», dernier maximum glaciaire) ne porte cependant pas la même date partout, mais se situerait entre 27'000 et 21'000 ans avant nos jours (Seguinot et al. 2018).
- Puis, les glaciers fondent, interrompus par de courtes périodes de froid. Les deux pauses les plus importantes dans le retrait glaciaire se passent autour de 16'800 et 12'700 ans. Elles correspondent à ce qu'on appelle des "événements de Heinrich"; lors de ces événements, les températures mondiales chutent fortement. La cause de ce choc thermique a été associée à l'écoulement d'énormes masses d'eau provenant des lacs glaciaires dans la région des Grands-Lacs en Amérique du Nord vers l'Atlantique Nord.

\* BP : «before present», «avant aujourd'hui», désigne l'âge déterminé par le carbone-14 radioactif ("radiocarbone"). L'année de référence est 1950, après quoi la concentration de carbone-14 a été falsifiée par des essais d'armes nucléaires et des centrales nucléaires.

- La fin de la dernière glaciation dans la région alpine remonte officiellement à 11'700 ans. Cette date est considérée comme le début de la période post-glaciaire, **l'Holocène**. Mais si l'on regarde au-delà de l'Europe centrale, on constate que les glaciers scandinaves et nord-américains continuent à résister pendant des milliers d'années.

En Suisse, pendant l'ère glaciaire du Würm (ou du Birrfeld), les glaciers avancent en plusieurs phases jusqu'au nord du Plateau. Le glacier du Rhin atteint Neuhausen et Eglisau, le glacier de Linth-Limmat atteint Bülach dans le Glattal et Killwangen dans la vallée de la Limmat. Les différentes langues du Glacier de la Reuss s'étendent dans les vallées du Mittelland jusqu'à Mellingen, Othmarsingen, Seon, Gontenschwil et Staffelbach. Le glacier du Rhône atteint Soleure dans la vallée de l'Aar (fig. A 44) et les portes de Lyon dans la vallée du Rhône. La fonte des langues de glace après le dernier maximum glaciaire (LGM) se fait en plusieurs étapes, laissant un cordon de moraines à chaque arrêt. Dans la vallée de la Reuss, ces cordons de moraines de retrait sont particulièrement bien formés (fig. A 46, 47): en amont de la moraine terminale de Mellingen, on trouve deux stades de retrait à Stetten et deux autres à Bremgarten. Contrairement aux moraines du Pléistocène moyen, celles de la dernière période glaciaire du Pléistocène supérieur sont particulièrement bien conservées. Cela vaut également pour les cordons de moraine formés sur les flancs des glaciers.



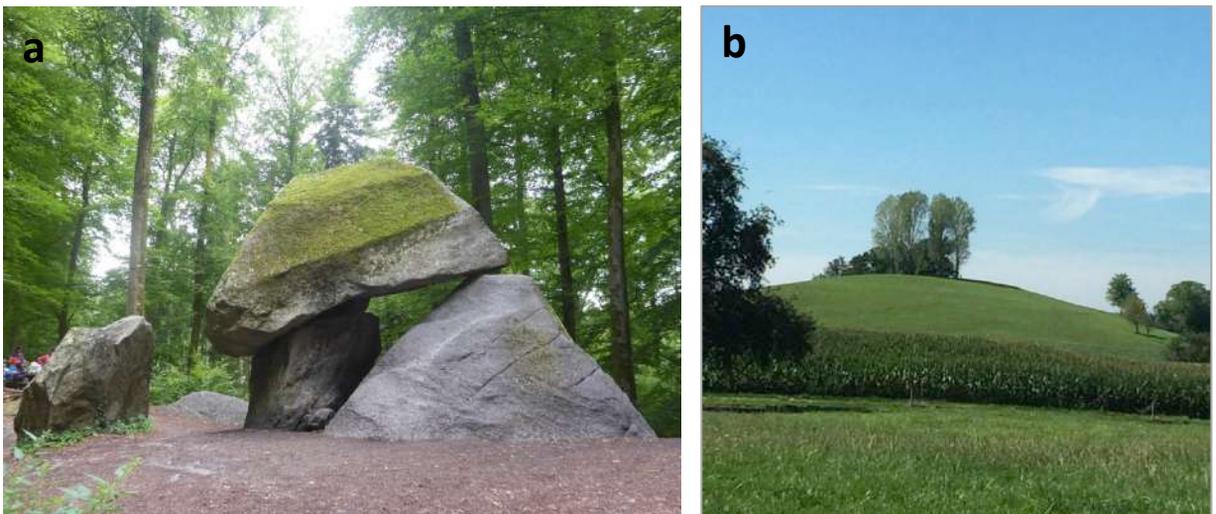
**Figure A 46:** Schwand (Menzingen, Canton de Zug): paysage de drumlins à la limite entre les glaciers de la Reuss et de la Limmat au cours de la dernière glaciation.

Dans sa dernière phase d'expansion maximale, le glacier du Rhône reste dans le Bassin genevois. Selon Seguinot et al. (2018), l'extension maximale y est datée de 27'000 ans BP (fig. A 48). Puis, les glaciers du Rhône et de l'Arve fondent et laissent derrière eux un vaste lac glaciaire, le Léman.

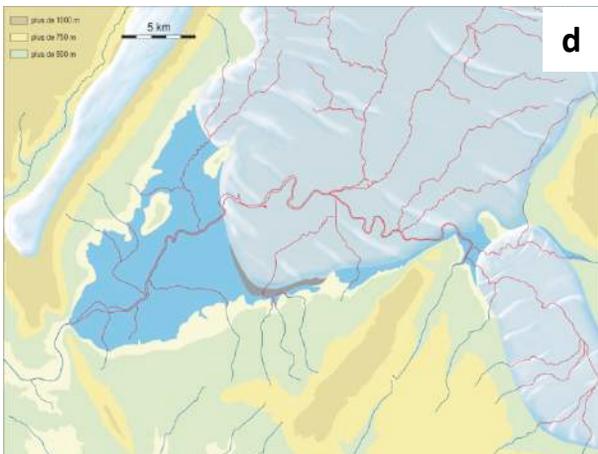
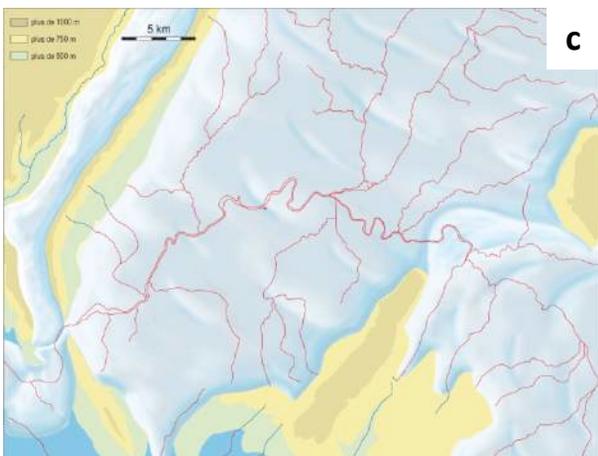
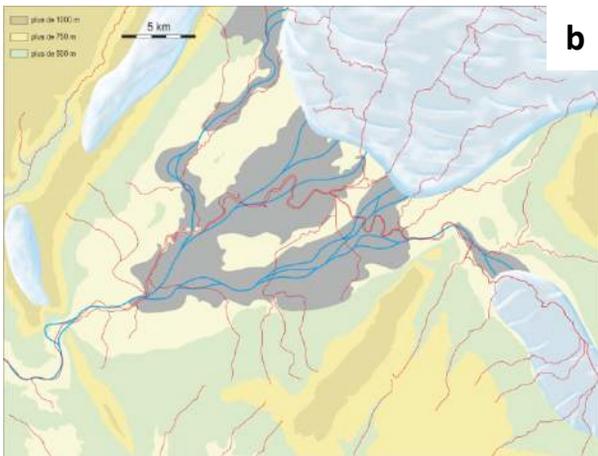
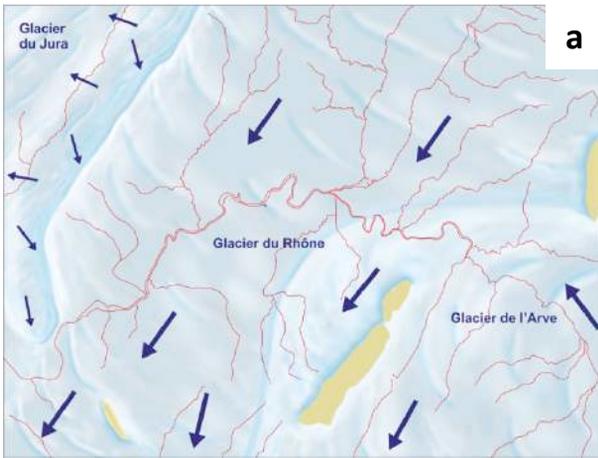
Les paysages de la Suisse sont fortement marqués par la période glaciaire du Würm (ou Birrfeld, fig. A 39, 44). Les témoins morphologiques les plus importants sont les cordons de moraines, les drumlins, les blocs erratiques, les étangs dans les anciennes dépressions de glace morte et, dans les vallées principales, un système de terrasses fluviales, formant la Basse terrasse. Même en dehors des glaciers, sur les sommets du Plateau suisse et dans le Jura, le paysage porte les marques de l'ère glaciaire: sous l'influence du permafrost, en de nombreux endroits, les pentes, qui étaient restées calmes depuis le Pléistocène moyen, recommencent à bouger, à glisser et à s'affaisser. Les vallées occupées par les glaciers sont profondément creusées et approfondies par ceux-ci. Lorsque les glaciers se retirent, un lac glaciaire reste dans chacune de ces vallées. Ce lac est souvent partiellement ou entièrement rempli d'abord de moraines, puis de sédiments lacustres fins. Tous les lacs situés au bord des Alpes, que ce soit au sud ou au nord des Alpes, sont d'anciens lacs glaciaires. A cette époque, de nombreux glissement de terrain et des éboulements se produisent dans les vallées alpines.

### Promenades géologiques (Chapitre C):

19. Gravier des plateaux: témoins des plaines alluviales des anciennes glaciations
20. Ecoteaux: le premier bassin lacustre du Léman il y a 800'000 ans
21. Morphologies glaciaires sur le Plateau suisse
22. Climat, glaciers et paysages



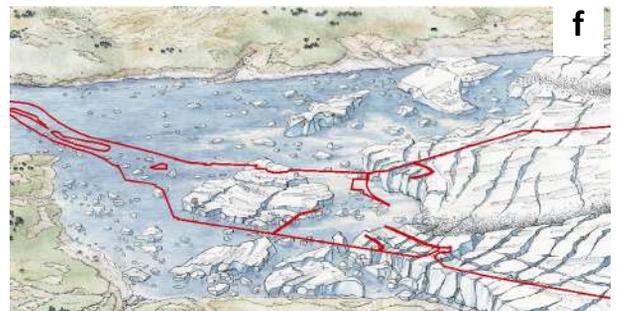
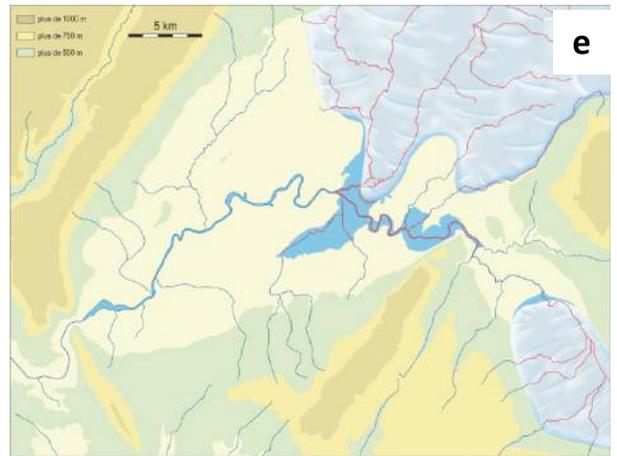
**Figure A 47 a:** blocs erratiques sur les moraines frontales du dernier maximum du glacier de la Reuss : Erdmannlistein (blocs de granit) dans la forêt de Wohlen (Wildi & Lambert 2019). **b:** drumlin de la glaciation du Würm (ou du Birrfeld); cordon morainique de Mellingen (Boll, Fislisbach, Coo 47.43211/8.28243).



**Figure A 48:** phases principales de la dernière glaciation concernant le Glacier du Rhône et le Glacier de l'Arve dans le Bassin genevois.

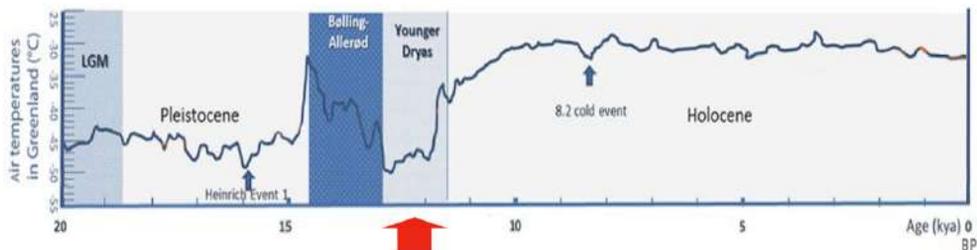
- a) Première extension maximale des glaciers il y a 70'000 à 60'000 ans BP. Cette situation correspond à celle présentée dans la fig. A 35.
- b) Situation il y a 38'000-35'000 ans: retrait du Glacier du Rhône dans le Bassin genevois. Dépôts des sédiments fluvio-glaciaires de l'«Alluvion Ancienne» (en gris, datation par 14C).
- c) Situation il y a env. 27'000 ans? Dernière extension maximale des glaciers
- d) Env. 25'000 ans: stade de Laconnex; le lac glaciaire s'étend jusqu'au Fort de l'Ecluse (niveau lacustre à 470 m)
- e) & f) 22'500 ans: stade de Genève (datation C14), niveau lacustre à 405 m.

Les lignes rouges marquent le réseau hydrographique actuel.  
(Wildi et al. 2017, modifié).



## 9. «Tardi-glaciaire»: changement climatique et fusion des glaces du Pléistocène à l'Holocène

Le passage du dernier maximum de la glaciation du Würm ou Birrfeld à l'Holocène prend environ 8'000 ans, de 20'000 à 11'700 ans BP. Pendant ce temps, l'atmosphère en Suisse se réchauffe d'environ 10°C, les glaciers fondent et le niveau des océans augmente de 135 m. Ce sont des chiffres remarquables. Cependant, ces changements, interrompus par des contre-mouvements massifs, ont eu lieu de manière irrégulière. La figure A 49 montre à titre d'exemple l'évolution de la température au Groenland: la température n'augmente que légèrement au début, interrompue par de courtes baisses. A partir d'environ 14'500 ans BP, un véritable saut de température se produit, qui conduit aux périodes chaudes appelées Bölling et Alleröd. Pendant un bref épisode, les températures actuelles sont atteintes. De 12'700 à 11'600 ans BP, on assiste à une régression abrupte vers une période froide qui n'est que légèrement moins sévère que la dernière période glaciaire: le «Dryas récent», du nom d'une petite fleur (*Dryas octopetala*) que l'on trouve aujourd'hui dans l'avant-pays des glaciers.



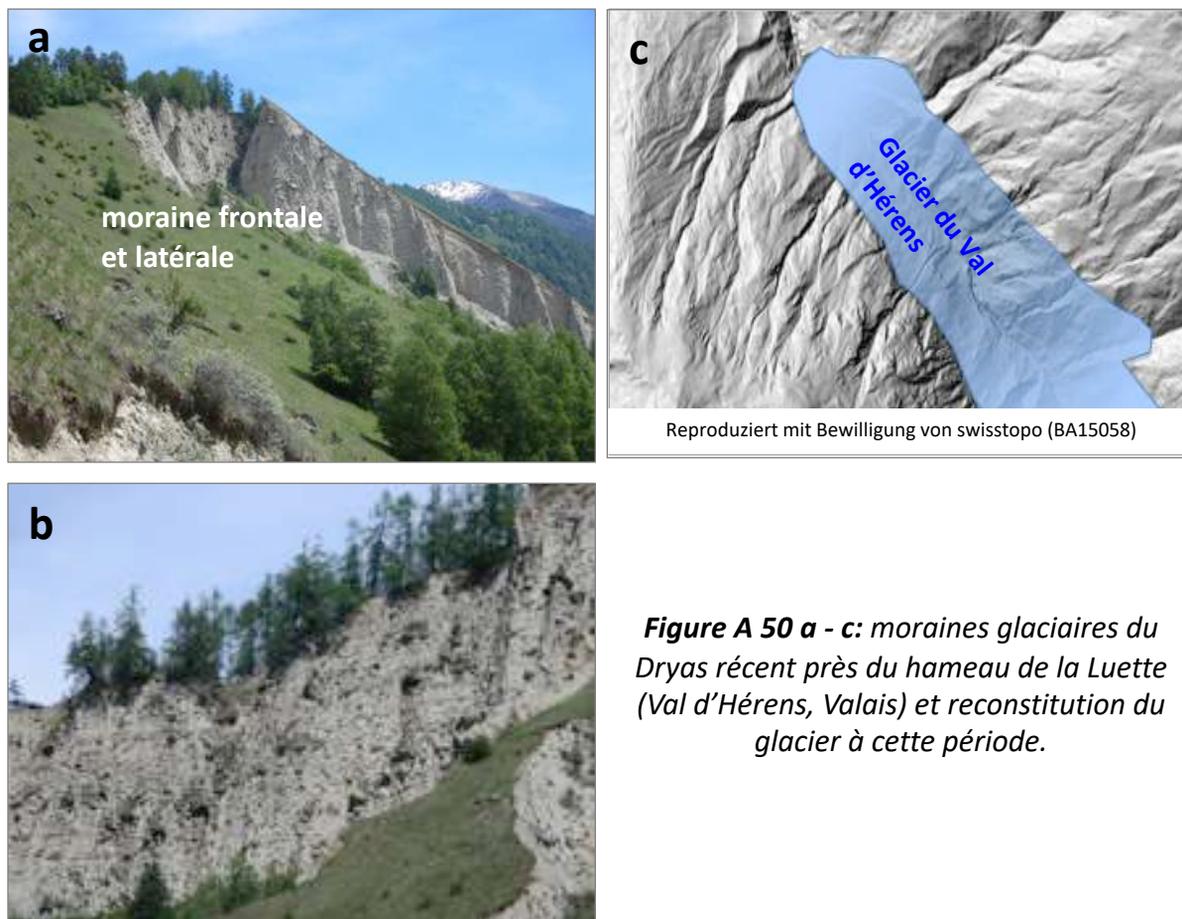
**Figure A 49:** évolution des températures dans le sud du Groenland depuis le dernier maximum (LGM) de la période glaciaire du Würm ou Birrfeld jusqu'à aujourd'hui ([https://en.wikipedia.org/wiki/Younger\\_Dryas#/media/File:Evolution\\_of\\_temperature\\_in\\_the\\_Post-Glacial\\_period\\_according\\_to\\_Greenland\\_ice\\_cores\\_\(Younger\\_Dryas\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Younger_Dryas#/media/File:Evolution_of_temperature_in_the_Post-Glacial_period_according_to_Greenland_ice_cores_(Younger_Dryas).jpg)).

La baisse de température qui est à l'origine du Dryas se produit dans l'hémisphère nord en moins de dix ans. Le recul des glaciers alpins s'arrête, les langues de glace s'avancent même légèrement, puis stagnent. La végétation s'adapte rapidement à la situation : Là où les forêts de pins poussaient autrefois, comme en Scandinavie, la steppe froide revient avec l'herbe de la steppe. Du sable de loess couvre de grandes surfaces et le permafrost s'étend.

Les hypothèses qui tentent d'expliquer cette période froide vont du volcanisme à l'impact d'une grosse météorite. L'hypothèse la plus crédible est que le Gulf Stream dans l'Atlantique Nord fut freiné par l'écoulement d'énormes masses d'eau froide depuis le lac Agassiz et ne contribue plus au réchauffement climatique. Le lac Agassiz était un vaste lac périglaciaire, localisé dans la région actuelle des Grands-Lacs, au front de l'inlandsis laurentien en cours de fonte. Il y a 12700 ans BP, le dernier barrage de glace de la baie d'Hudson s'est effondré, et les eaux du lac se sont brusquement déversées dans l'Atlantique Nord, diminuant massivement la salinité des eaux.

Dans l'hémisphère sud, la période du Dryas se caractérise par des changements des températures plus lents et de moindre amplitude. C'est un autre argument en faveur d'un

événement catastrophique localisé strictement dans l'hémisphère nord. En Suisse, la période froide du Dryas récent a laissé des moraines impressionnantes dans plusieurs vallées alpines, comme celle que nous avons décrite au hameau de Luette dans le Val d'Hérens (Valais, fig. A 50, Wildi et al. 2016)

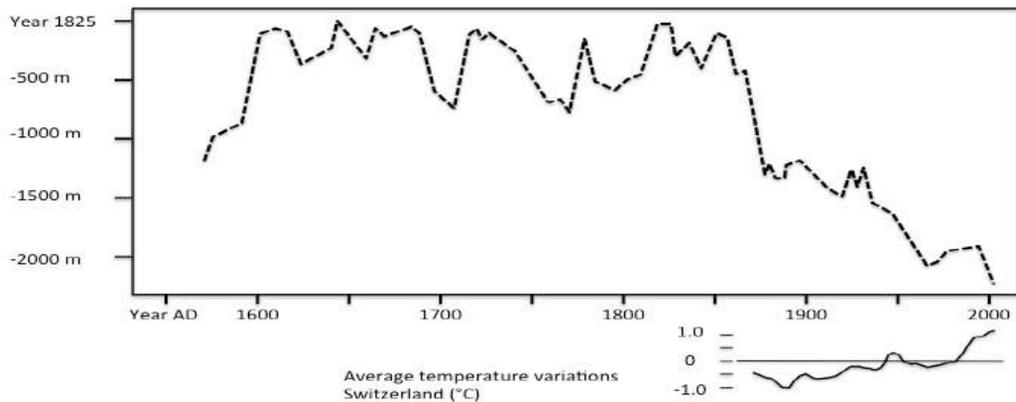


*Figure A 50 a - c: moraines glaciaires du Dryas récent près du hameau de la Luette (Val d'Hérens, Valais) et reconstitution du glacier à cette période.*

## 10. Holocène, la période post-glaciaire, depuis 11'700 ans

La période post-glaciaire (Holocène) commence il y a 11'700 ans BP. Le profil de l'évolution des températures de cette période semble assez régulier en comparaison avec la période tardi-glaciaire décrite ci-dessus; toutefois, à l'échelle du ressenti humain, le climat change quand-même en permanence. La période la plus chaude de l'Holocène, qui peut être reconstituée grâce aux pollens des sédiments lacustres, se situe entre 8'000 et 5'000 ans BP; c'est ce qu'on appelle "l'optimum climatique de l'Holocène". Depuis cette période, les températures montrent une tendance à la baisse, mais selon une ligne ondulée de périodes légèrement plus chaudes ou légèrement plus froides. Après une dernière période chaude au cours du Haut Moyen-Âge, le climat se refroidit progressivement à partir du 14<sup>ème</sup> siècle de notre ère. À partir du début du 16<sup>ème</sup> siècle, on observe une croissance rapide des glaciers. C'est le début de la période postglaciaire la plus froide à ce jour, le «Petit-âge glaciaire». Vers 1660, les glaciers alpins atteignent leur premier maximum, les langues glaciaires ayant souvent progressé d'environ 1.5 à 2 km. De tels niveaux d'avancement des glaciers sont bien documentés, de l'Engadine (par exemple au glacier de Morteratsch) à l'Oberland bernois (glacier de Grindelwald) et au Valais (glacier du Rhône), puis la "Mer de Glace" dans le massif du Mont Blanc (fig. A 51).

Les causes possibles du Petit-âge glaciaire citées dans la littérature mentionnent un fort volcanisme, le reboisement en Europe, la réduction de l'activité solaire, les changements de l'orbite de la Terre autour du soleil, et bien d'autres. Parmi ces hypothèses, celle de la plus faible activité solaire est la mieux documentée.



**Figure A 51:** variations de la langue de la «Mer de Glace» (Chamonix, Mont Blanc) entre 1550 et 2001 (Nussbaumer et al. 2007, interpolation). Le point de référence pour l'année 1825 correspond à un bloc erratique. Courbe inférieure: évolution de la température moyenne en Suisse (meteoswiss.admin) référence: années 1961-1990.

Depuis la fin du Petit-âge glaciaire en 1852, les langues des glaciers fondent par palliers: des périodes de recul rapide de la glace alternent avec des périodes de stagnation. Après une période de stagnation d'environ 1960 à 1990, les glaciers fondent rapidement depuis lors (fig. A 51, 52). Cependant, ils n'ont pas encore atteint leur position de recul du Haut Moyen-Âge. Au Haut Moyen-Âge, la limite des arbres dans les Alpes était d'environ 200 m plus haute qu'aujourd'hui.



Gravure: Bühlmann 1835, Graphische Sammlung ETHZ



Mont Mine-Gletscher en 1900, Dumoulin et al. (2010).



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



Glacier du Mont Miné 1931, © Collection Gesellschaft für ökologische Forschung, München



Glacier du Mont Miné 1990, photo E. Reynard



Glacier du Mont Miné 2003, © Collection Gesellschaft für ökologische Forschung, München



Glaciers de Ferpècle et du Mont Miné, 2012, photo P. Masset

**Figure A 52:** histoire des glaciers du Mont Miné et de Ferpècle (Val d'Hérens, Wallis) du Petit-âge glaciaire à 2012 (Wildi et al. 2016).

## 11. Colonisation humaine

En Suisse, les traces de la première présence humaine non détruites par les glaciers remontent au Paléolithique moyen, dit "Moustérien", il y a 50'000 à 35'000 ans. Les sites se trouvent principalement dans des grottes karstiques alpines, que ce soit à l'Est (par exemple au Wildkirchli dans le Canton d'Appenzell) ou à l'Ouest de la Suisse (grottes de Tanay, Vouvry en Valais, il y a 35 000 ans).

La colonisation proprement dite a commencé à la fin de la période glaciaire (Paléolithique d'Oneres, Madeleine). Les découvertes au lac de Monruz (Neuchâtel) datent aux alentours de 13'000 av. J.-C. et celles de Veyrier (Etrembière, Genève) vers 13'000 - 11'000 (Abb. 53).



**Abbildung A 53:** «*abris sous bloc*» et «*abris sous roche*» au pied du Salève (Etrembière, Genf); époque du Magdalénien (<http://www.la-memoire-de-veyrier.ch/420281743>).

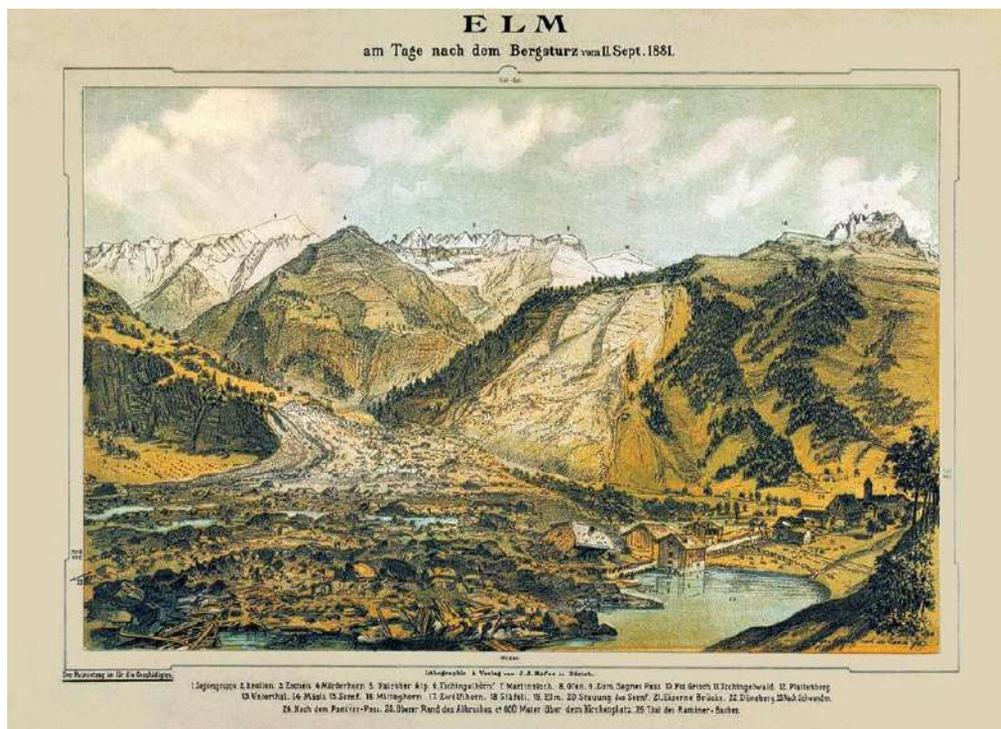
## 12. «*Bergsturz und Menschenleben*» (éboulements et vies humaines)

Le titre «*Bergsturz und Menschenleben*» correspond à celui d'un livre du géologue Albert Heim. Au moins 6 % de la surface de la Suisse sont situés dans des zones au sol instable. Des éboulements importants se sont produits à la fin de la dernière période glaciaire, mais aussi pendant l'Holocène.

### **Eboulements préhistoriques en Suisse**

(<https://de.wikipedia.org/wiki/Bergsturz>, modifié)

- Eboulement de Sierre (Valais): 50 mio de m<sup>3</sup>, il y a env. 13'000 ans.
- Eboulement de Tamins (Grisons): 1.2 km<sup>3</sup>, il y a env. 9420 ±880 ans (Pfiffner et al. 2022). Les masses rocheuses endiguent un lac qui s'étendait sur plus de 10 km dans la vallée.
- Eboulement de Flims (Grisons): 11 km<sup>3</sup>, il y a env. 9'410 ans. Les masses rocheuses endiguent un lac qui s'étend sur plus de 10 km. La rupture du barrage naturel provoque une inondation majeure de la vallée du Rhin jusqu'au Lac de Constance (Pfiffner 2022).



**Figure A 54:** *éboulement d’Elm 1881. Cette lithographie a été vendue en faveur des sinistrés (J.J. Hofer, (Musée National Suisse, LM-44697).*

- Eboulement de Davos (Grisons): plus de 0,3 km<sup>3</sup> s’écroulent de la Totalp dans la région de Parsenn, formant le col du Wolfgang et le lac de Davos. Datation: moins de 8’000 ans.
- Eboulement de Kandersteg (Berne): ca. 800 Mio m<sup>3</sup> de roches éboulées autour de 3’210 ± 200 ans sur une distance de 13 km entre Kandersteg et Frutigen (Singeisen et al. 2020).

### **Eboulements historiques en Suisse**

- 30 septembre 1512 : éboulement de Buzza di Biasca dans la Valle di Blenio au nord de Biasca (Tessin). Les masses rocheuses endiguent un lac; le barrage est rompu en 1515 et dévaste la vallée du Tessin jusqu’au lac Majeur.
- 1714 et 1749 : éboulements de Derborence (Valais), formant le barrage du lac de Derborence.
- 2 septembre 1806 : éboulement de Goldau (Schwyz): 40 millions de m<sup>3</sup> de roche ensevelissent un village entier, 457 victimes.
- 11 septembre 1881: éboulement d’Elm (Glaris) : 10 millions de mètres cubes. Cet éboulement est causé par des années d’exploitation imprudente de l’ardoise, 115 victimes (fig. A 54).
- Avril et mai 1991: éboulement de Randa (Valais) : 30 millions de m<sup>3</sup>. L’éboulement de Randa ne s’est en fait pas produit à la manière d’un grand éboulement, mais plutôt comme un écroulement de falaise, produisant un énorme cône au pied de la falaise.

### **Randonnées géologiques (Chapitre C) :**

24. "Eboulement et vie humaine"

25. Géologie et archéologie

## B. Le système Terre et son histoire

### 1. L'échelle des temps géologiques

La mesure du temps géologique n'est pas basée sur un pendule ou sur l'agitation d'un mouvement d'horloge, mais plutôt sur des successions d'événements qui, au cours de l'histoire de la Terre, ont enregistré le passage du temps et ont laissé leur empreinte. Les méthodes de base ont été développées au cours du XIXe et du début du XXe siècle et font partie de la science nommée «**stratigraphie**» (Decrouez et al. 1997). A la base de la stratigraphie se trouve l'observation de la superposition des couches sédimentaires et de leur contenu. Chaque couche sédimentaire représente un intervalle temporel; une séquence de couches représente une période géologique.

Les méthodes stratigraphiques basées sur l'étude de la séquence des couches sont appelées **lithostratigraphie**. L'unité de base de la lithostratigraphie est la formation rocheuse.

Dans son célèbre ouvrage en trois volumes intitulé *Principles of Geology*, Sir Charles Lyell (1797-1875) a établi le lien entre la séquence chronologique des couches sédimentaires et l'évolution de la faune et de la flore. Il a montré comment des groupes d'organismes ont évolué au cours de l'histoire géologique, c'est-à-dire comment les espèces changent par mutation au fil du temps et finissent par disparaître à nouveau. L'unité de base de cette **biostratigraphie** est la biozone, basée sur l'apparition, la présence et l'extinction d'espèces.

Grâce à la biostratigraphie, l'histoire de la Terre depuis l'apparition des organismes et leur préservation dans les roches a été subdivisée en grandes périodes de temps, nommées d'après des sites typiques, des «stratotypes». Dans cette **chronostratigraphie**, nous distinguons les grandes ères (Paléozoïque, Mésozoïque, Cénozoïque), qui sont subdivisées en périodes (par exemple Trias, Jurassique, Crétacé), et celles-ci à leur tour en époques (par exemple Lias, Dogger Malm) puis en étages (Malm : Oxfordien, Kimméridgien). La chronostratigraphie (Fig. B 1) est utilisée en géologie comme échelle de référence de l'histoire géologique.

La **géochronologie** s'est développée au cours du XXe siècle. Son but est de dater les objets géologiques (minéraux, couches rocheuses, etc.) en années calendaires. La méthode la plus couramment utilisée est basée sur la mesure de la concentration d'isotopes radioactifs qui se trouvent piégés dans un minéral, un résidu de plante, etc., et qui ont subi depuis leur enfermement une désintégration radioactive en fonction de la période de désintégration (demi-vie) de l'isotope (détermination de l'âge radiométrique). Les isotopes les plus utilisés sont les suivants :

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ; demi-vie =  $4,25 \times 10^9$  ans (à partir du zircon, du sphène, etc.)

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  demi-vie =  $1,3 \times 10^9$  ans (à partir de mica, hornblende)

$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$  demi-vie =  $6,1 \times 10^{10}$  ans (à partir du mica, de la glauconite, de la roche totale)

$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$  demi-vie = 5630 ans (résidus organiques : bois, plantes, cuir, tissus)

La datation radiométrique a l'avantage de nous fournir des estimations chiffrées des âges que nous croyons comprendre. Cependant, les âges radiométriques sont toujours entachés d'erreurs, qu'elles soient dues à la plus ou moins bonne conservation des objets datés, à la précision des instruments de mesure ou au soin apporté aux analyses en laboratoire.

Dans le cas de la méthode au **radiocarbonate** ( $^{14}\text{C}$ ), une autre difficulté résulte du fait que cet isotope se forme en quantités variables dans l'ionosphère. Le radiocarbonate permet de dater des objets jusqu'à un âge d'environ 50'000 ans.

L'utilisation de la **thermoluminescence** comme méthode de datation est basée sur le fait que les réseaux cristallins des grains minéraux dans les sédiments sont perturbés par la radioactivité des radio-isotopes piégés au sein des minéraux. Plus longtemps un grain minéral reste à l'abri de la lumière et du soleil, plus il compte de perturbations du réseau. Si un minéral stocké sous terre (enfoui) pendant une longue période est ensuite extrait et chauffé à 300-500 °C, les électrons de son réseau perturbé reviennent à leur position initiale. Au cours de ce processus, ils émettent de la lumière qui est proportionnelle au temps que le minéral a passé sous terre.

La datation de l'**âge d'exposition** est basée sur la formation et l'accumulation de nucléides cosmogènes à la surface de la Terre. Les rayons cosmiques incidents produisent par exemple du  $^3\text{He}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Al}$  et  $^{36}\text{Cl}$ . Plus une surface est exposée longtemps (temps d'exposition), plus ces isotopes s'accumulent. L'âge maximal de datation est d'environ 5'000 000 d'années.

Un autre groupe de méthodes de datation est basé sur des séquences d'événements (**stratigraphie événementielle**). Il s'agit notamment des couches sédimentaires fines (**warves**) dans les lacs glaciaires, ou des cernes annuels (cernes de croissance) sur les troncs d'arbres (**dendrochronologie**).

Ere	Période	Epoque	Etage	Mio années	
Cénozoïque	Quaternaire	Holocène		0.01	
		Pléistocène			
	Néogène	Pliocène		2.6	
		Miocène	Messinien		5
			Tortonien		
			Serravallien		
			Laghien		
			Burdigalien		
	Aquitaniien				
	Paléogène	Oligocène	Chattien		23
Rupélien					
Eocène		Priabonien		34	
		Bartonien			
Lutétien		56			
Ypresien					
Paléocène			65		
Mésozoïque	Crétacé	Crétacé sup.	Maastrichtien	100	
			Campanien		
	Santonien				
	Coniacien				
	Turonien				
Cénomaniien					
Jurassique		Crétacé inférieur		145	
		Malm			
		Dogger			
Trias		Lias		200	
		Trias supérieur			
		Trias moyen			
Paléozoïque		Trias inférieur		252	
		Permien supérieur		299	
		Permien inférieur			
Carbonifère		Carbonifère supérieur		359	
		Carbonifère inférieur			

Figure B 1: tableau de l'échelle du temps géologique pour les derniers 300 mio d'années de l'histoire de la Terre de la Suisse.

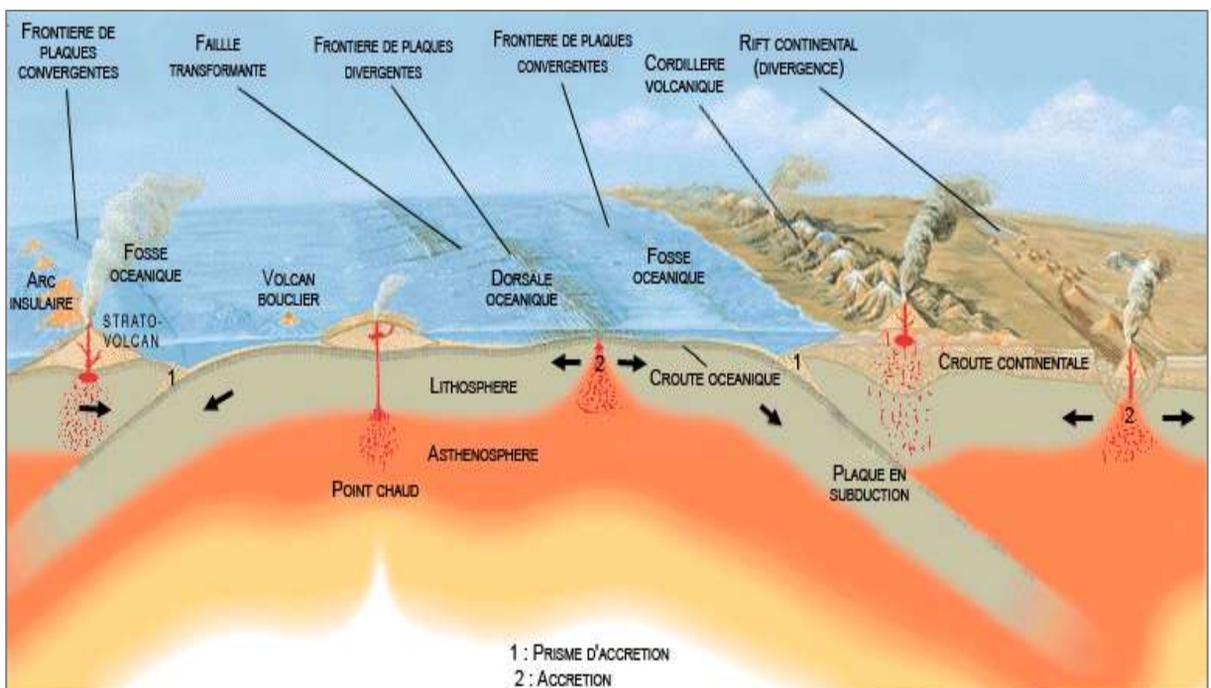
## 2. Tectonique des plaques

La théorie de la tectonique des plaques remonte au début du XXe siècle. Il est probablement raisonnable d'assimiler sa naissance à la formulation de la théorie de la dérive des continents d'Alfred Wegener à partir de 1911 et à sa justification détaillée en 1915 dans "L'origine des continents et des océans" (Vieweg, Braunschweig). Wegener avait remarqué la complémentarité des contours des côtes d'Afrique et d'Amérique du Sud des deux côtés de l'Atlantique. Lorsqu'il a pris par ailleurs conscience de la similitude de la faune et de la flore du Paléozoïque des deux continents, il a formulé l'idée d'un grand continent primordial dont les différents continents se seraient séparés après le Paléozoïque.



**Figure B 2:** plaque commémorative en hommage à Alfred Wegener sur son lieu de travail à Marburg (Wikipedia).

Les bases géologiques et géophysiques de la tectonique des plaques ont finalement été compilées entre 1960 et 1970 (voir l'excellent résumé dans la référence de la Fig. B 3).



**Figure B 3:** schéma de la tectonique des plaques (voir l'excellente compilation: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Tectonique\\_des\\_plaques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tectonique_des_plaques)).

Les éléments de base de la tectonique des plaques sont les suivants (Fig. B 3) :

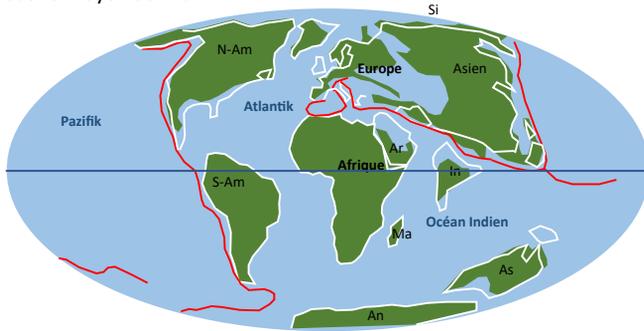
- Les plaques terrestres s'éloignent les unes des autres, des deux côtés des dorsales médio-océaniques. Les crêtes de ces dorsales sont des centres volcaniques où le magma basaltique liquide monte et se refroidit pour former une croûte océanique au fond de l'océan.
- La nouvelle croûte créée sur une dorsale océanique par la dérive des plaques est compensée ailleurs par la subduction d'ancienne croûte océanique qui s'enfonce en profondeur sous une autre plaque terrestre, dans une zone de subduction. Ces subductions peuvent se produire sous les continents (la croûte Pacifique est avalée sous les Andes), ou sous une croûte océanique (subduction dans le sillon des Mariannes, subduction de Java). Ils sont également des épïcêtres de tremblement de terre.
- Les zones de subduction sont souvent marquées par des volcans, où la croûte terrestre a fondu en profondeur, et où de l'eau et des gaz sont éjectés à la surface.
- Lorsque deux continents se rencontrent, on parle de collision plutôt que de subduction. La formation des Alpes a commencé avec la subduction de la croûte océanique de la mer alpine et s'est terminée avec la collision entre l'Afrique et l'Europe.

La tectonique des plaques existe probablement depuis l'époque de la formation de la Terre solide, c'est-à-dire de la lithosphère, il y a plus de quatre milliards d'années. De nombreux auteurs ont contribué au cours des dernières décennies à la reconstruction de la position des continents et des océans pour la période allant d'il y a 541 millions d'années à aujourd'hui, c'est-à-dire pour le Phanérozoïque, pour lequel la vie sur terre est documentée (Fig. B 5).

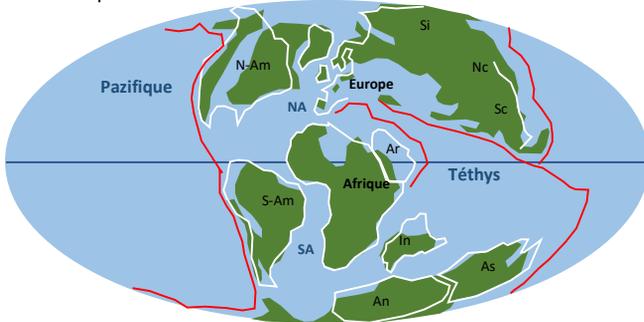


**Figure B 4:** *les Alpes ont été créées par la collision de l'Afrique et de l'Europe. Le soulèvement jusqu'à 4808 m (Mont Blanc) est la conséquence de l'isostasie, c'est-à-dire la réaction à l'accumulation de plusieurs nappes superposées de roches de densité plus faible que le manteau supérieur visqueux sur lequel elles "flottent".*

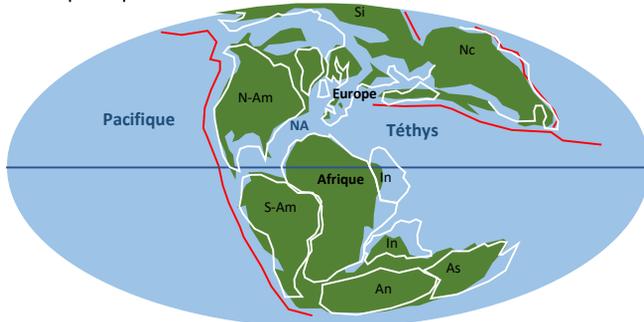
Eocène moyen 50 Ma



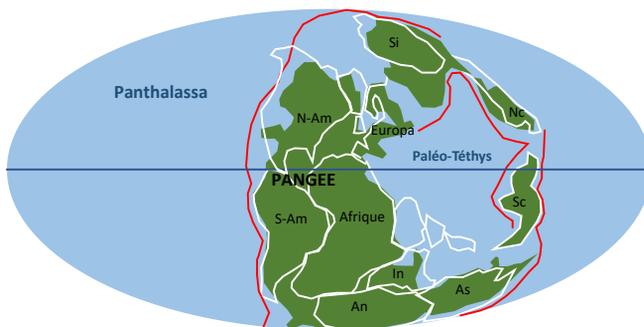
Crétacé supérieur 94 Ma



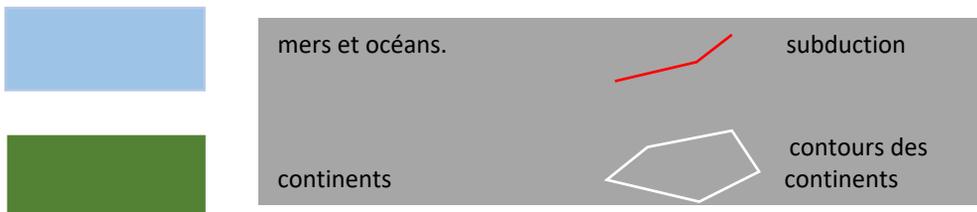
Jurassique supérieur 152 Ma



Permien supérieur 255 Ma



An: Antarctique  
 Ar: Péninsule arabique  
 As: Australie  
 In: Inde  
 Ma: Madagascar  
 Nc: Chine du Nord  
 N-Am: Amérique du Nord  
 Sc: Chine du Sud  
 S-Am: Amérique du Sud  
 Si: Sibérie

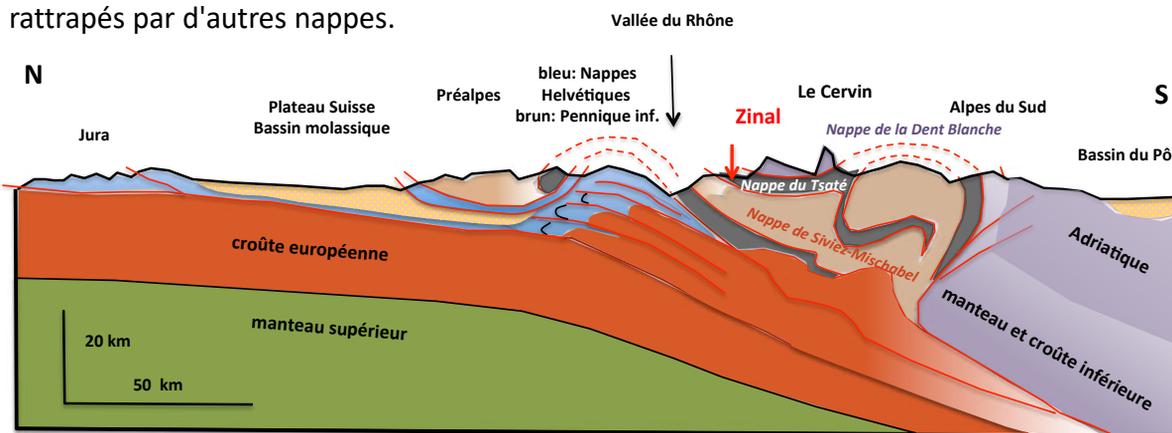


**Figure B 5:** reconstruction de la position des plaques du Permien (255 millions d'années) à l'Éocène (50 millions d'années). Simplifié selon [www.scotese.com](http://www.scotese.com).

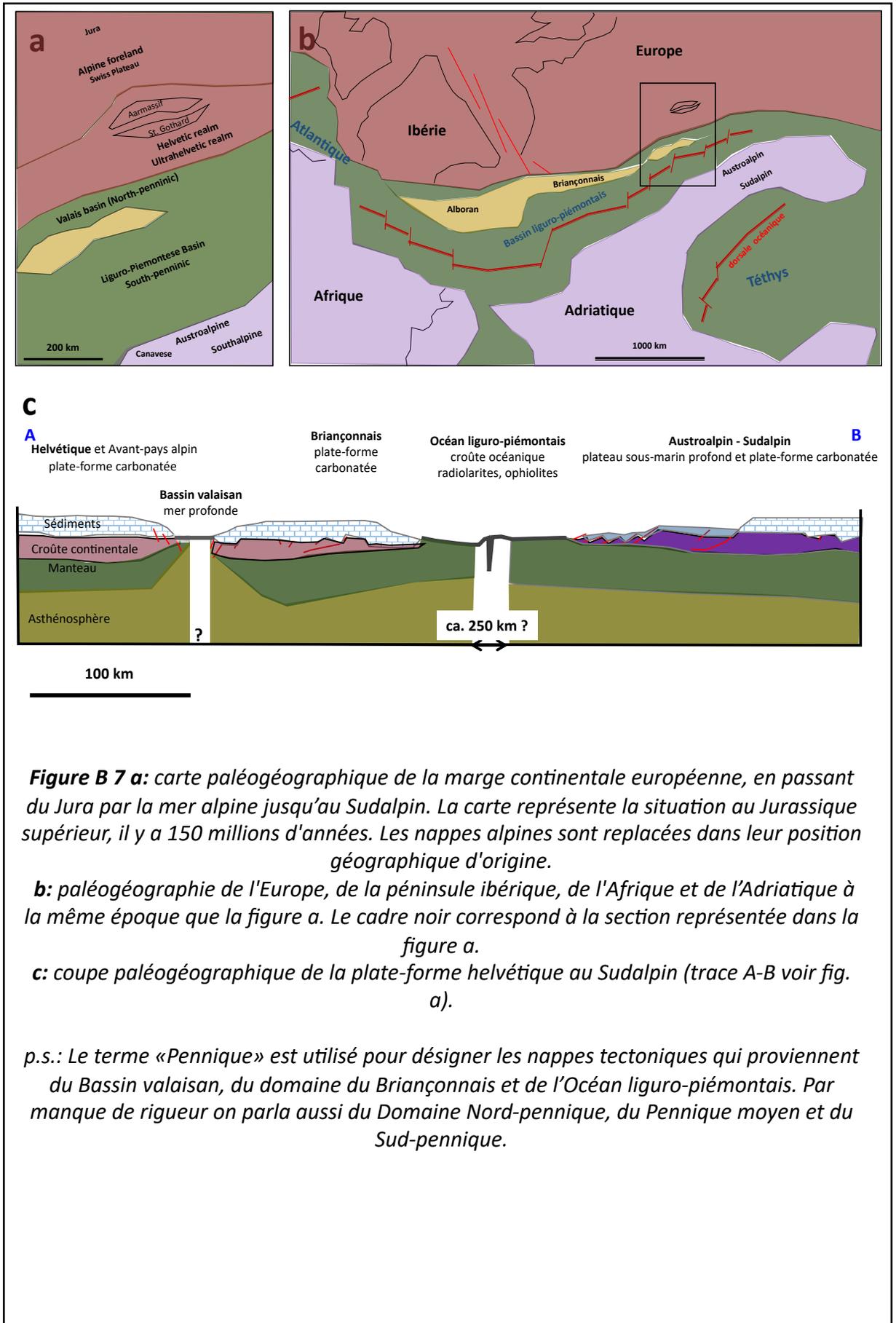
### 3. De l'architecture des nappes alpines à la paléogéographie

La "théorie des nappes" est née au tournant du XIXe au XXe siècle. Les géologues avaient observé que dans les Alpes – et dans d'autres chaînes de montagnes – des couches de roches anciennes surmontaient souvent avec un contact net des couches plus jeunes. Ils ne pouvaient expliquer ce phénomène que par le fait que les couches plus anciennes avaient été poussées tectoniquement dans cette position lors de la formation des montagnes. La cartographie géologique a montré que ces déplacements affectaient des ensembles rocheux de plusieurs kilomètres d'extension latérale et de centaines de mètres d'épaisseur, c'est-à-dire de véritables «nappes». L'image géologique des Alpes qui a été développée depuis, prouve que toute la chaîne alpine est caractérisée par cette architecture: lors de la collision entre l'Europe et l'Afrique, les couches sédimentaires et d'épaisses unités de roches cristallines (gneiss, granit, etc.) de la croûte terrestre supérieure ont été détachées de leur substrat par la contrainte de la tectonique des plaques et poussées soit vers le Nord sur l'avant-pays européen, soit vers le Sud sur l'avant-pays adriatique (c'est-à-dire africain).

Le profil géologique de la figure B 6 montre cette structure de nappes dans une coupe transversale des Alpes valaisannes. Si l'on veut ramener les sédiments et les roches cristallines de la croûte terrestre de ce profil à leur position géographique d'origine, avant le plissement des Alpes, il suffit de déplacer les nappes vers leur patrie plus au Sud. On obtient ainsi une «carte paléogéographique», comme la montre la figure B 7. Toutefois, le fait que dans cette carte la séquence des espaces paléogéographiques du Nord au Sud ne corresponde pas exactement à la séquence des nappes qui se chevauchent (par exemple les nappes du Penninique moyen dans les Préalpes) est dû au fait que ces nappes ont été partiellement séparées de leurs racines au début de la collision entre l'Afrique et l'Europe et ont glissé loin au Nord sous l'effet de la gravité. Par la suite, elles furent à nouveau rattrapés par d'autres nappes.



**Figure B 6:** profil géologique général à travers les Alpes valaisannes et la Suisse occidentale montrant les unités géologiques les plus importantes (source : Wildi 2017 b et <http://cirquedebarroza.free.fr/formpyr1.htm>). Lignes rouges: chevauchements.



**Figure B 7 a:** carte paléogéographique de la marge continentale européenne, en passant du Jura par la mer alpine jusqu'au Sudalpin. La carte représente la situation au Jurassique supérieur, il y a 150 millions d'années. Les nappes alpines sont replacées dans leur position géographique d'origine.

**b:** paléogéographie de l'Europe, de la péninsule ibérique, de l'Afrique et de l'Adriatique à la même époque que la figure a. Le cadre noir correspond à la section représentée dans la figure a.

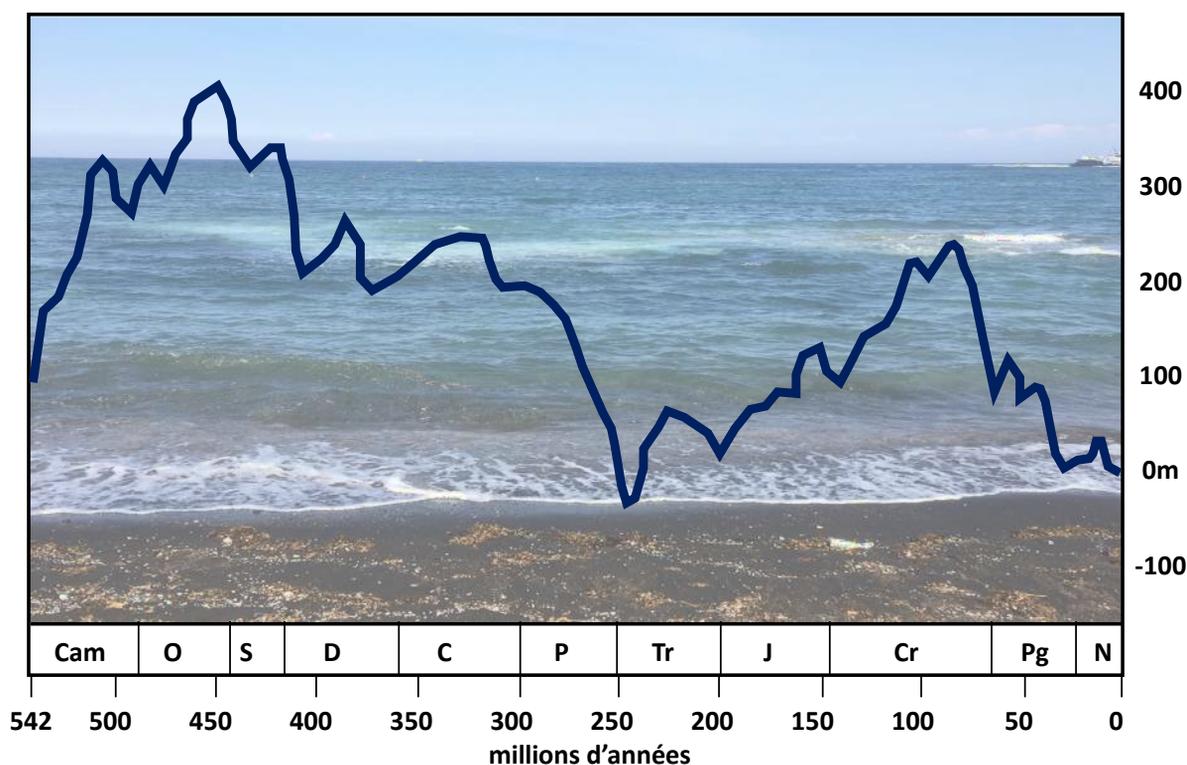
**c:** coupe paléogéographique de la plate-forme helvétique au Sudalpin (trace A-B voir fig. a).

*p.s.:* Le terme «Pennique» est utilisé pour désigner les nappes tectoniques qui proviennent du Bassin valaisan, du domaine du Briançonnais et de l'Océan liguro-piémontais. Par manque de rigueur on parla aussi du Domaine Nord-pennique, du Pennique moyen et du Sud-pennique.

## 4. Les variations du niveau marin

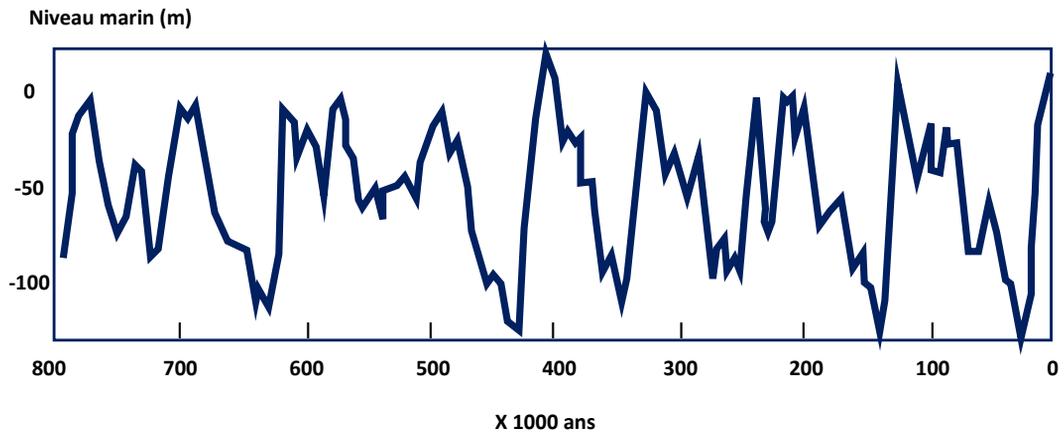
Depuis l'espace, un observateur aurait remarqué au cours des temps géologiques non seulement le mouvement des plaques, mais aussi les grandes fluctuations du niveau de la mer et l'inondation plus ou moins importante des marges continentales qui y est associée. Les niveaux d'eau les plus élevés se trouvent au Paléozoïque (fig. B 8), de l'Ordovicien au Dévonien. Pendant la période de 300 millions d'années considérée ici, le niveau de la mer était le plus bas à la fin du Permien. Pendant le Trias, il a connu une brève hausse puis une forte baisse. Au cours de la période du Lias, c'est-à-dire au début du Jurassique (à partir de 200 millions d'années), le niveau de la mer a commencé à s'élever et finalement, au cours de la période du Crétacé (de 100 millions d'années), il a atteint le maximum d'environ 250 m au-dessus du niveau actuel. Il a ensuite lentement baissé à nouveau.

Le niveau élevé des mers indique une forte activité volcanique le long des dorsales océaniques, c'est-à-dire une dérive rapide des continents (fig. B 3). Dans ce cas, le volume des dorsales augmente en raison du réchauffement, de sorte que l'eau de mer "gonfle" dans les bassins océaniques et inonde les continents.



**Figure B 8 :** fluctuations globales du niveau de la mer depuis le début du Cambrien (542 millions d'années, Hallam, A., *Phil. Trans. Royal Soc. B* 325, 437-455, 1989; voir aussi [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic\\_Sea\\_Level.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic_Sea_Level.png). N: Néogène, Pg: Paléogène, Cr: Crétacé, J: Jurassique, Tr: Trias, P: Permien, C: Carbonifère, D: Dévonien, S: Silurien, O: Ordovicien, Cam: Cambrien.

La fig. B 9 montre les fluctuations du niveau de la mer pendant les périodes glaciaires du Pléistocène. Au Pléistocène, les fluctuations sont dues à la variation des volumes de glace aux pôles et dans les chaînes de montagnes.

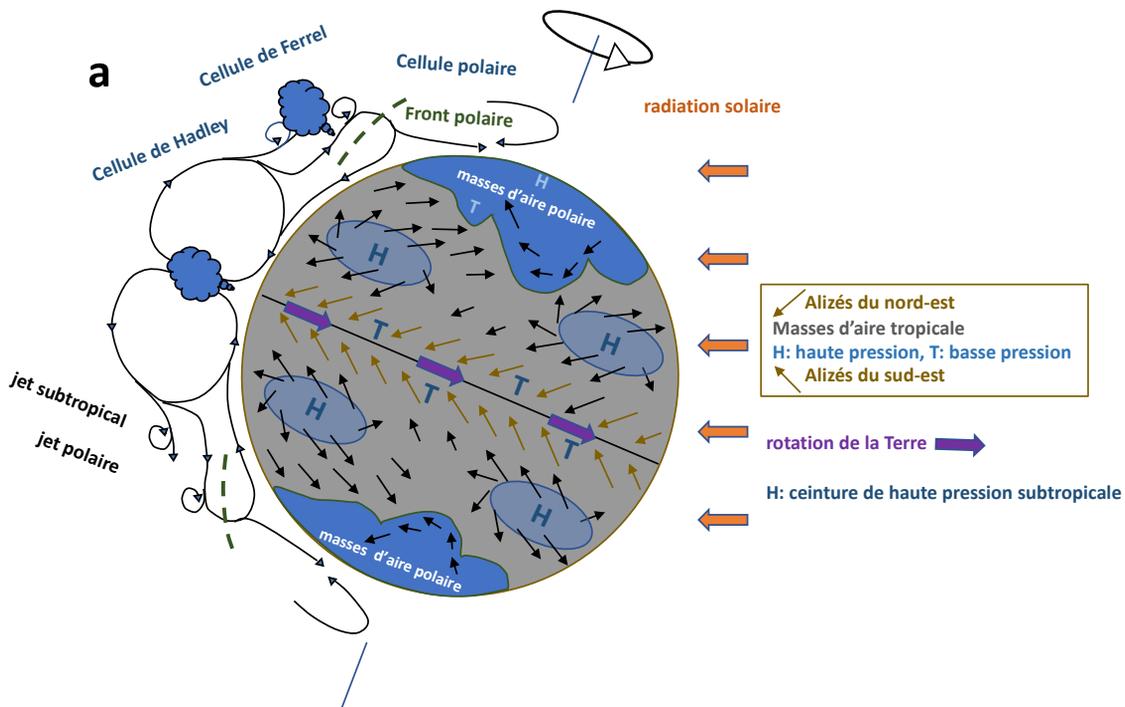


**Figure B 9:** fluctuations du niveau de la mer au cours des 800'000 dernières années de l'histoire de la Terre, avec les périodes glaciaires (bas niveaux de la mer) et les périodes interglaciaires (hauts niveaux); Spratt & Lisiecki, 2016, fig. 4).

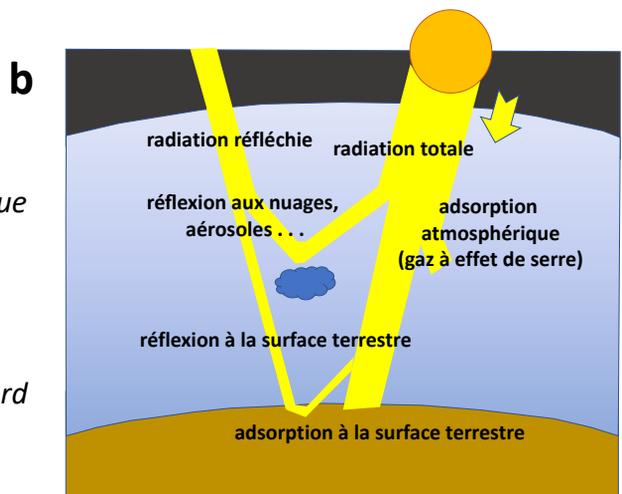
# 5. Le climat et son histoire

## Climat

Le mot "climat" décrit la somme de plusieurs paramètres qui décrivent l'état de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère en général. La fig. B 10 a illustre l'interaction entre le rayonnement solaire et la rotation de la Terre, qui sont responsables de la circulation atmosphérique et des précipitations. La fig. B 10 b illustre le bilan radiatif du soleil.



**Figure B 10 a :** représentation schématique de l'interaction entre le rayonnement solaire et la rotation de la Terre, qui ensemble déterminent la circulation atmosphérique et les précipitations. Situation en été, lorsque l'hémisphère nord est tourné vers le soleil.  
**b :** bilan radiatif du soleil.



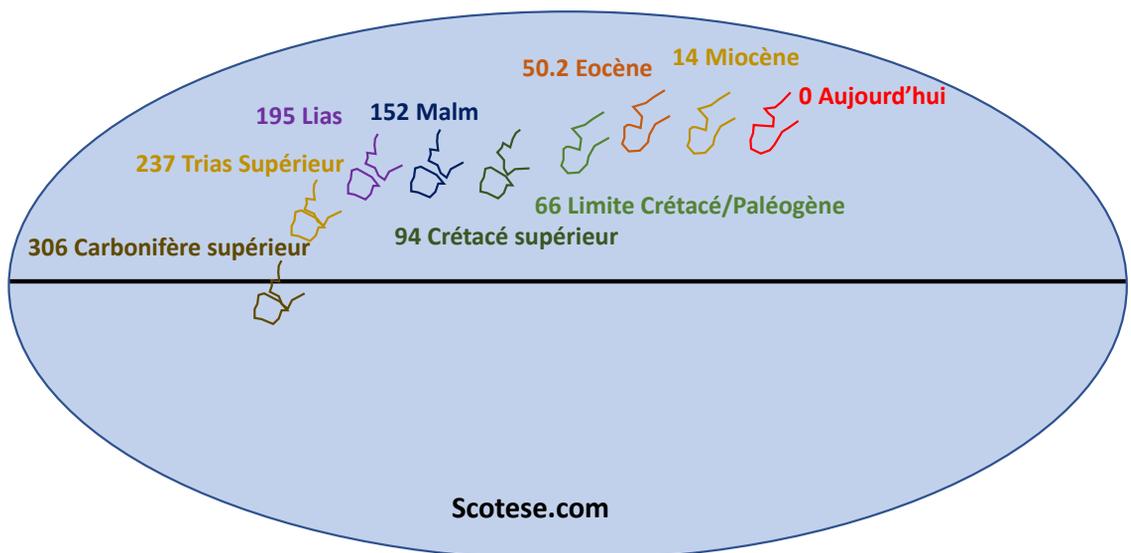
# Histoire climatique

L'histoire du climat présente un intérêt particulier aujourd'hui, à une époque où le changement climatique est manifeste.

Depuis la création de la Terre, son histoire est caractérisée par un climat changeant. Le régime le plus fréquent dans cette histoire est celui d'un climat chaud, avec des températures mondiales moyennes de plusieurs degrés Celsius au dessus des températures actuelles (fig. B 13). L'autre régime climatique, plus rare, est celui des périodes froides, des glaciations. De grandes périodes froides se sont produites au Précambrien, il y a environ 750 millions d'années, au Paléozoïque entre 460 et 440 millions d'années (Ordovicien) et 345 - 280 (Carbonifère tardif et Permien précoce), puis au Pléistocène, au début du Quaternaire, à partir d'environ 2,6 millions d'années. Surtout pendant la deuxième moitié du Pléistocène, plusieurs périodes de froid extrême (glaciations) avec de grandes extensions de glace se sont produites aux pôles, dans les Alpes et d'autres chaînes de montagnes. Ces périodes froides ont été interrompues par des périodes chaudes plus courtes, appelées périodes interglaciaires. Aujourd'hui, ou plutôt depuis 11'700 ans, nous vivons dans une période interglaciaire, l'Holocène. Entre les périodes chaudes et froides, les différences de température dans les régions polaires ont toujours été plus importantes que dans les tropiques.

La découverte des périodes glaciaires au cours de la seconde moitié du XIXe siècle s'est appuyée sur l'observation de dépôts glaciaires, notamment de blocs erratiques, loin des glaciers actuels, que ce soit dans l'avant-pays alpin, en Europe du Nord ou en Amérique du Nord.

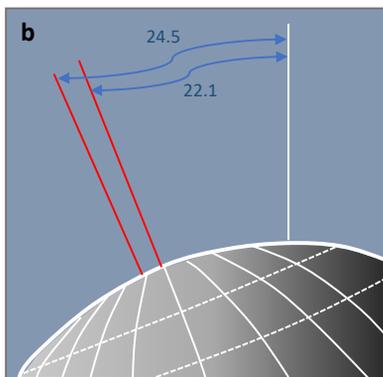
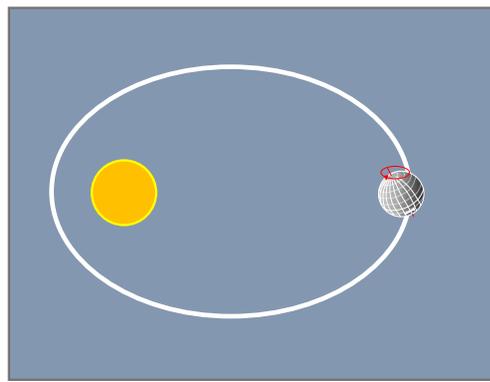
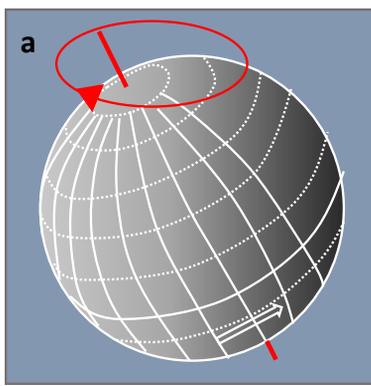
Sur les continents, cependant, la datation des glaciers associés à ces traces et leurs fluctuations s'est avérée difficile. Une solution a été trouvée dans les années 1950 à 1960



**Figure B 11:** dérive des continents et latitude géographique de l'Europe occidentale (contours actuels de l'Espagne et de la France) au cours des derniers 306 millions d'années (Carbonifère supérieur à ce jour) ; extrait des reconstitutions paléogéographiques de [www.scotese.com](http://www.scotese.com).

grâce aux travaux de deux chercheurs, C. Emiliani et N.J. Shackleton, qui ont étudié la composition des isotopes de l'oxygène dans les coquilles foraminifères (protozoaires marins) et ont corrélé leurs fluctuations avec celles des masses de glace continentales.

Dans les années 1920, le mathématicien et astronome serbe Milutin Milankovic a étudié les cycles des périodes glaciaires et interglaciaires et les a comparés aux changements cycliques de l'orbite terrestre autour du Soleil, ainsi qu'aux variations de l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'orbite terrestre. Il a constaté que la superposition des effets de l'évolution de l'orbite terrestre et des cycles climatiques pendant le Pléistocène (les 2.6 derniers millions d'années de l'histoire de la Terre) était largement identique. Depuis cette découverte, ces cycles sont donc considérés comme l'explication des périodes glaciaires.

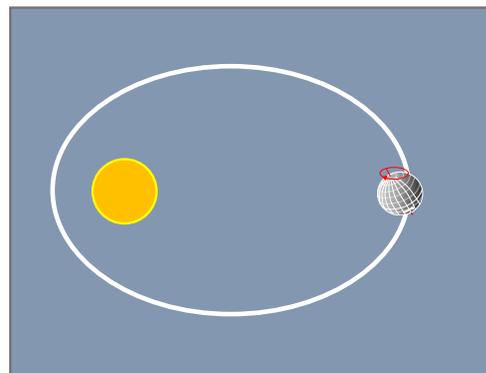
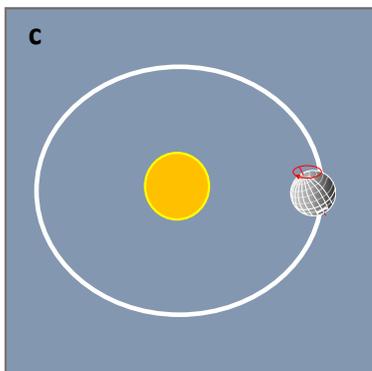


*paramètres des cycles de Milankovic (voir texte)*

*a) Précession (cycle de 19'000-24'000 ans)*

*b) Inclinaison de l'axe terrestre (41'000 ans)*

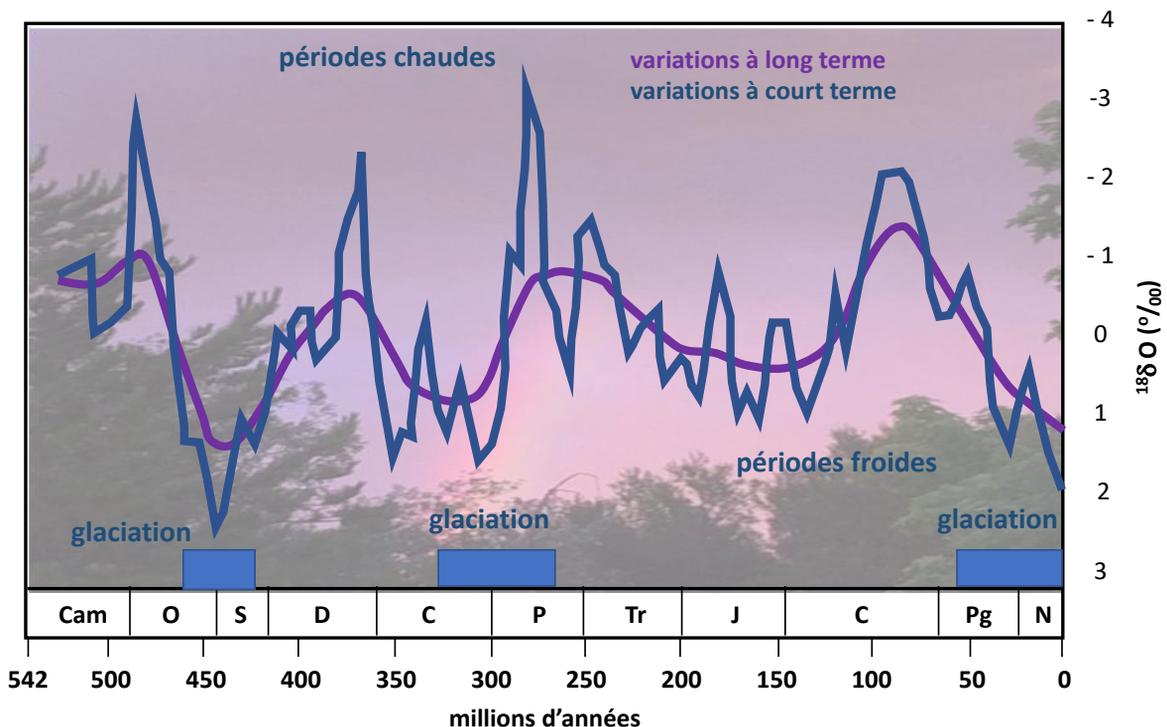
*c) Excentricité (100'000 ans).*



Les trois facteurs des cycles de Milankovic sont les suivants (fig. B 12):

- La précession, qui décrit l'orientation de l'axe de la Terre par rapport au soleil au cours de l'année sur l'orbite elliptique. Il convient de noter que la question de l'orientation par rapport au soleil des hémisphères sud et nord en été et en hiver, respectivement, entraîne des effets climatiques très différents en raison de l'inégalité des surfaces des continents et des océans. La précession a un cycle de 19'000 à 24'000 ans.
- L'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'orbite avec une périodicité de 41'000 ans
- L'excentricité de l'orbite elliptique de la Terre autour du soleil avec une périodicité d'environ 100'000 ans

Une période glaciaire peut se produire lorsque les trois cycles affectent les continents dans le sens d'un rayonnement solaire minimal.



**Figure B 13:** fluctuations des températures moyennes annuelles au cours de l'histoire de la Terre depuis le Cambrien (542 millions d'années), exprimées par les fluctuations de l'isotope O-18 de l'oxygène dans les sédiments marins.

([https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire\\_du\\_climat\\_avant\\_1850#/media/Fichier:Phanerozoic\\_Climate\\_Change.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_du_climat_avant_1850#/media/Fichier:Phanerozoic_Climate_Change.png)).

Avant le Pléistocène, les "cycles de Milankovic" existaient aussi, mais le niveau général de température de l'atmosphère terrestre était trop élevé pour permettre des périodes glaciaires.

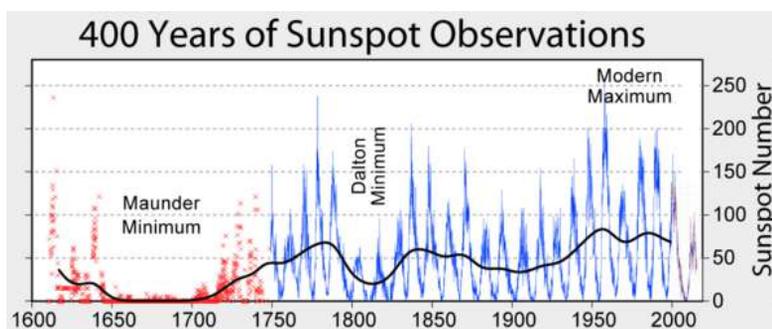
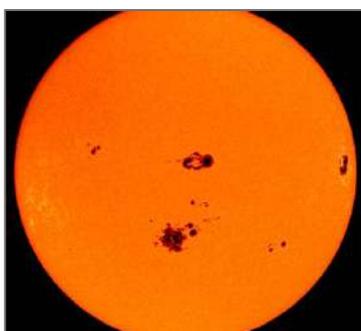
Aujourd'hui, l'histoire climatique de la Terre est reconstituée principalement au moyen des fluctuations des isotopes de l'oxygène O-18 dans les sédiments marins et dans les coquilles fossiles de ces sédiments (fig. B 13). Des valeurs positives indiquent

des périodes glaciaires, des valeurs négatives témoignent de périodes chaudes. Grâce à cette méthode, il est possible de corréliser les fluctuations majeures et mineures des glaciers dans le monde entier; cette histoire du climat océanique sert de référence aujourd'hui. Cependant, la corrélation exacte des résultats obtenus dans les océans avec les niveaux de moraine sur les continents, y compris dans l'avant-pays alpin, reste difficile.

L'oxygène O-18 est moins abondant dans l'atmosphère que l'isotope O-16, plus léger, et du fait de sa masse plus importante, il est plus abondant dans l'eau de mer que dans l'eau de pluie, la neige et surtout la glace de glacier. Pendant une période froide, une grande partie de l'eau "légère" est liée à la glace des glaciers, ce qui augmente les valeurs de O-18 dans l'eau de mer (adapté de [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_periods\\_and\\_events\\_in\\_climate\\_history#/media/File:Phanerozoic\\_Climate\\_Change.png](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_periods_and_events_in_climate_history#/media/File:Phanerozoic_Climate_Change.png)).

Certains changements dans les périodes glaciaires ne s'expliquent pas de manière satisfaisante par les cycles de Milankovic. Même les fluctuations climatiques de l'ère post-glaciaire, l'Holocène, qui dure maintenant depuis 11'700 ans, ne peuvent s'expliquer par les variations cycliques de l'orbite terrestre et les fluctuations de l'axe de la Terre.

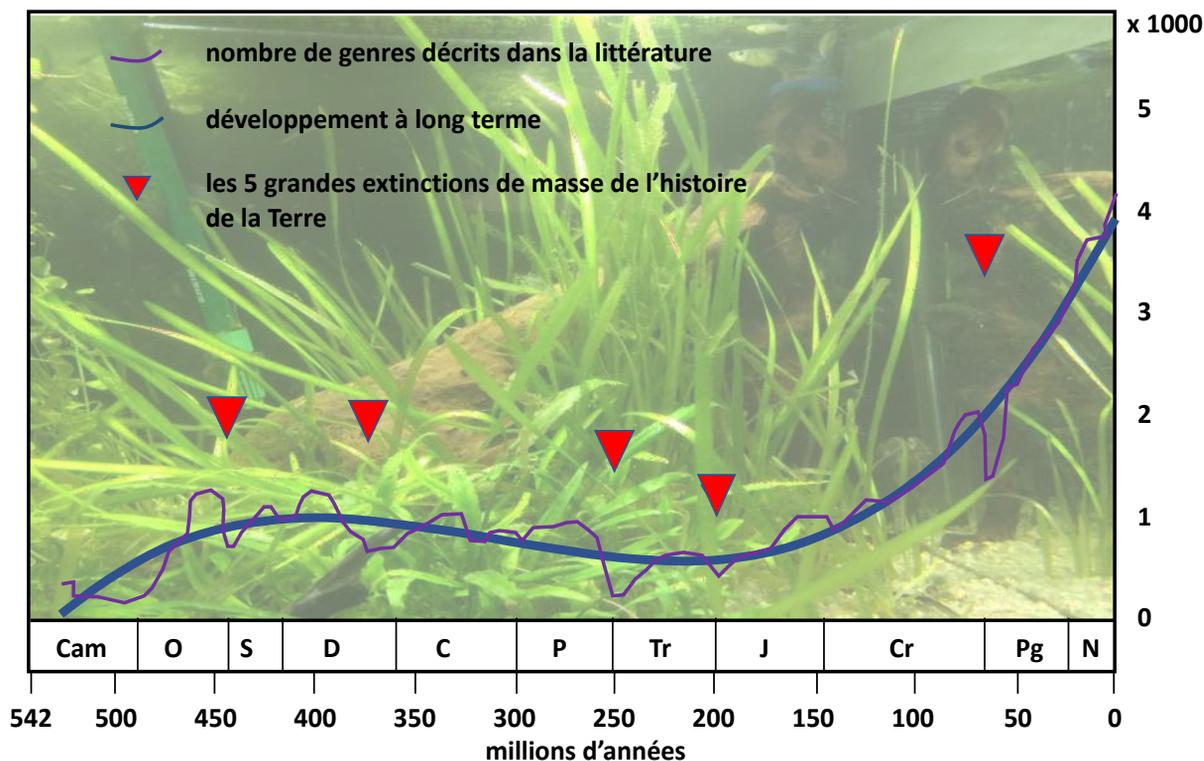
Après la fin de la dernière période glaciaire, les températures ont augmenté dans le monde entier et ont atteint un maximum il y a 8'000 à 5'000 ans (appelé "optimum climatique de l'Holocène"). Depuis lors, les températures ont de nouveau baissé dans le monde entier, entrecoupées de fluctuations de courte durée. Elles sont principalement corrélées aux fluctuations de l'intensité du Soleil, exprimées par les taches solaires, c'est-à-dire les éruptions observées à la surface du Soleil. L'exemple classique est la corrélation entre le "minimum de Maunder" (fig. B 14) et le Petit-âge glaciaire, qui a commencé au 16e siècle et a duré jusqu'en 1850 environ. Depuis la fin de ce Petit-âge glaciaire, le climat de la Terre se réchauffe.



**Figure B 14 a:** les taches solaires sont des indicateurs de l'intensité du rayonnement solaire (<https://www.weather.gov/fsd/sunspots>). **b:** nombre de taches solaires depuis l'an 1600. La dépression du 17ème siècle est appelée le "minimum de Maunder". Il est corrélé avec le premier maximum du Petit-âge glaciaire ([https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle)).

## 6. Evolution et biodiversité

Une méthode classique, mais pas nécessairement précise, pour décrire l'évolution de la biodiversité au cours de l'histoire de la Terre consiste à dénombrer les genres d'organismes fossiles mentionnés dans la littérature paléontologique. La fig. B 15 montre le résultat d'une telle reconstruction du développement de la biodiversité.



**Figure B 15 :** évolution de la biodiversité (nombre de genres x 1000) depuis le début du Cambrien il y a 542 millions d'années (simplifiée selon [https://en.wikipedia.org/wiki/Phanerozoic#/media/File:Phanerozoic Biodiversity.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Phanerozoic#/media/File:Phanerozoic_Biodiversity.svg)).

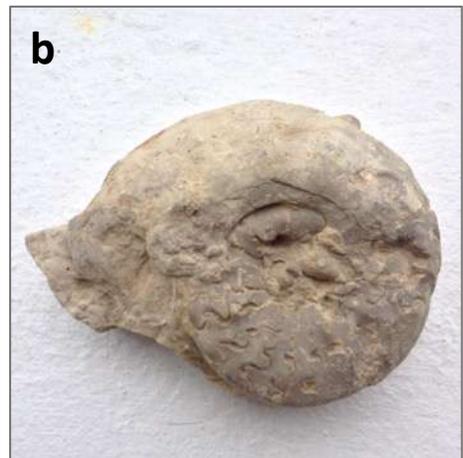
Bien que les premiers organismes unicellulaires soient apparus dès le Précambrien, il y a environ 4.1 milliards d'années, le développement d'organismes complexes n'est documenté qu'à partir du Cambrien, il y a 542 millions d'années. La fig. B 15 montre que la biodiversité s'accroît progressivement à travers le temps, interrompue par cinq crises majeures (extinctions massives). Les plus grandes de ces catastrophes se produisent à la fin du Permien et à la fin du Crétacé. Les impacts de météorites et/ou le volcanisme sont considérés comme les causes de ces extinctions de masse.

Les plus anciens sédiments fossilifères de Suisse datent du Carbonifère. Cependant, pour les périodes du Carbonifère et du Permien, seuls des organismes terrestres sont connus en Suisse. Peu avant la période du Carbonifère, les plantes commencent à conquérir les continents. Au cours de la période du Carbonifère, à partir d'environ 360 millions d'années, ils forment de véritables forêts avec des arbres à écailles, des prêles, des *Lycopodiophyta*, des fougères, etc. (fig. B 16).



**Figure B 16** : plantes du groupe des fougères de la fin du Paléozoïque à nos jours  
(Conservatoire et Jardins botaniques de Genève).

Ces forêts constituent alors un écosystème idéal pour les libellules et les amphibiens. Les plus grands gisements de charbon d'Europe se forment au Carbonifère, grâce à la préservation (fossilisation) de la végétation morte. Cette évolution de la végétation peut être suivie en Suisse jusqu'au Trias, avec ses sites de plantes fossiles, notamment les prêles (*Equisetes*). À de rares exceptions près, ce n'est qu'au Trias moyen, (Muschelkalk), que l'on connaît des faunes marines, comme les crinoïdes, les cératites ("ammonites du Trias", Fig. B 17 b), des bivalves et les gastéropodes.



**Figure B 17 a**: surface de cassure typique à taches rouges d'un bloc de Grès à roseaux. Les restes de plantes bien conservés sont principalement des *Equisetes* (prêle); (Röt, Gansingen, Coo 651 600/266 750).

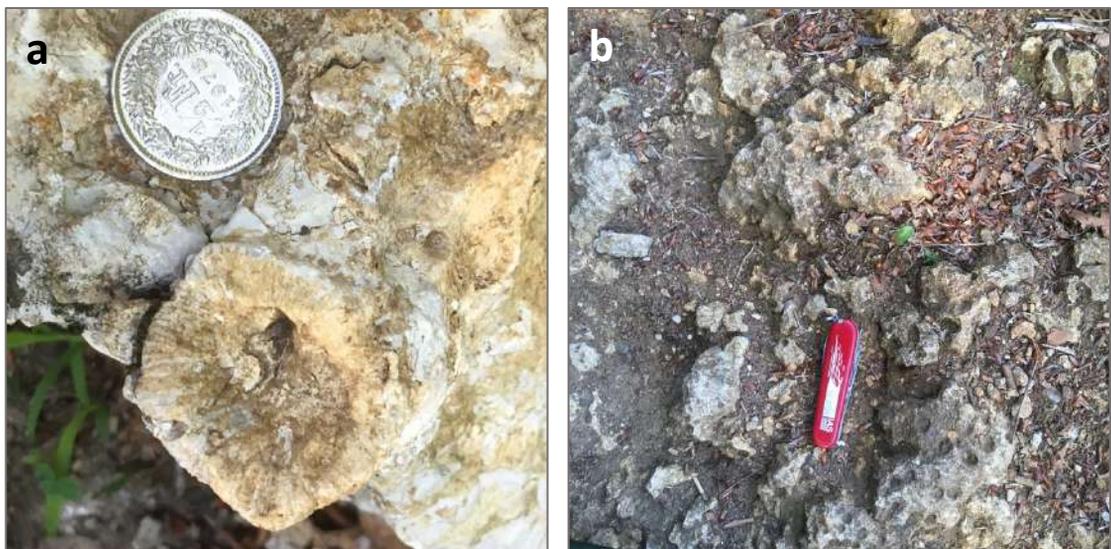
**b**: Cératite de la couche marneuse à la limite entre le Plattenkalk et le Trochitenkalk (Calcaire à entroques) près de Mettau (Argovie). Le diamètre du fossile est d'environ 10 cm.

Au cours de la période du **Jurassique**, la composition de la faune présente dans les roches sédimentaires dépend fortement de la profondeur de la mer. Une attention particulière doit être accordée aux ammonites qui se développent en pleine mer, dont l'évolution rapide de la morphologies permet une datation fine des roches. Au **Jurassique moyen (Dogger)**, le Bassin liguro-piémontais de la mer alpine s'approfondit de sorte que seuls des organismes unicellulaires avec des squelettes siliceux ( $\text{SiO}_2$ ), en particulier des radiolaires, sont fossilisés. Aujourd'hui, ils peuvent former de véritables "radiolarites" (fig. B 18). En revanche, les squelettes en calcite et en aragonites sont dissouts.



**Figure B 18** : radiolarites : ces sédiments ont été déposés dans le Bassin liguro-piémontais en de la mer alpine à une profondeur d'environ 2,5 - 4 km. (Nappe du Tsaté, Tracuit, Coo 616'295, 107'850 et 618'460, 108'120).  
Photo: M. Sartori.

Les faunes fossiles des plateformes marines sont extrêmement riches. En plus des ammonites et des bélemnites qui nagent en pleine mer, on trouve de nombreux bivalves, gastéropodes et brachiopodes. Dans la région de la chaîne du Jura et sur la Plateforme helvétique, des récifs coralliens se développent au Jurassique moyen et supérieur (Dogger et Malm, (fig. B 19).



**Figure B 19** : **a**: corail et **b**: colonie de coraux dans le calcaire récifal au sommet de la Gisliflue (Argovie). Âge : Dogger moyen (Wildi & Lambert 2019).

Des faunes planctoniques de taille microscopique, les calpionelles, se trouvent dans des roches calcaires fines qui sont déposées dans les zones les plus profondes du domaine Sudalpin. Elles constituent d'excellents marqueurs stratigraphiques. D'autres microfossiles, d'origine végétale, appelés nannoplancton, gagnent également en importance à partir du Jurassique moyen. Leur squelette interne se présente sous la forme de rosettes de calcite, que l'on trouve principalement dans des calcaires et marnes.

Au cours de la période du Crétacé, les ammonites continuent à évoluer et "dégénèrent" en partie, par exemple en enroulant leur chambre seulement au début et en restant étirées vers la fin de la vie des fossiles.

Sur la plateforme carbonatée helvétique et dans le Jura, on trouve des huîtres à coquille épaisse et des bivalves sessiles en forme de coupe, massives et asymétriques, les inocérames. Après la mort de ces organismes, les coquilles peuvent se décomposer en prismes calcaires qui sont facilement emportés vers les eaux profondes. Sur les anciennes plates-formes marines on trouve également des foraminifères unicellulaires de la taille d'une pièce de monnaie avec un squelette calcaire, les orbitolines.

Au **Crétacé supérieur**, des foraminifères planctoniques morphologiquement différenciés, les *Globotruncana*, se développent. Elles permettent une subdivision temporelle (stratigraphique) et une datation très fine dans les sédiments issus de la haute mer, semblable à celle des ammonites pendant la période du Jurassique.

Il est impossible de parler des fossiles et de la biodiversité au cours du Mésozoïque sans mentionner la "curiosité" de cette époque, les dinosaures. Le groupe le mieux représenté en Suisse est celui des ichtyosaures, des «dinosaures poissons», étudié en



**Figure B 20** : empreinte d'un pied de dinosaure dans du calcaire finement lité à Courtedoux (Jura) ; diamètre : environ 50 cm.

détail au Monte San Giorgio (Tessin). Au Trias moyen, les ichtyosaures peuplent le bras de mer de la Téthys qui envahit les domaines de Sudalpin et de l'Austroalpin depuis l'Est. Ce site illustre également la grande biodiversité dans les mers de cette période de l'histoire de la Terre, notamment avec de nombreuses cératites ("ammonites du Trias") bien conservées. Des squelettes et des parties de squelettes de dinosaures terrestres ont été découverts dans les gisements d'argile du Trias supérieur dans le Jura tabulaire du Canton d'Argovie, dans la carrière de l'usine des tuileries de Frick. Les dinosaures terrestres aimaient évidemment les endroits peu profonds de la mer et des lagunes. Des traces de dinosaures sont donc connues dans les dolomies du Trias dans les Alpes ainsi que dans les calcaires du Jurassique supérieur (Malm), par exemple à Courtedoux (Jura, fig. B 20), Lommiswil (Soleure) et dans d'autres sites du Jura et des Alpes.

Le changement faunistique à la **limite Crétacé/Tertiaire** (66 millions d'années) est radical: les ammonites disparaissent ainsi que les dinosaures; les *Globotruncana* planctoniques sont remplacées par de petits *Globorotalia*. On suppose généralement qu'environ 75% des espèces végétales et animales ont été touchées par l'extinction massive de la fin du Crétacé.

Au **Paléogène** on trouve dans les zones profondes de la mer alpine de petites *Globorotalia* planctoniques. Par contraste, dans la mer peu profonde du Domaine helvétique, de petits récifs formés par des *Lithothamnium* (algues rouges), de grands foraminifères des groupes des discocyclines, des astérocyclus et des nummulites s'installent pendant l'**Éocène**. Peu après la transition entre l'Éocène et l'**Oligocène**, les dernières zones d'eau profonde de la mer alpine sont fermées et un bras de mer peu profond, caractérisé par de fortes marées s'étend de la Méditerranée le long du front alpin jusqu'au Bassin de viennois. Ce bras de la Molasse marine inférieure reçoit le matériel d'érosion des Alpes montantes. Bientôt, l'estuaire s'envase cependant, et la Molasse d'eau douce inférieure recouvre la Molasse marine avec ses énormes cônes d'épandage.

Au **Miocène moyen** (Burdigalien, 20 millions d'années), l'histoire se répète: une nouvelle transgression conduit à l'invasion du Plateau et du Jura. La Molasse marine supérieure se dépose dans une mer fortement influencée par les marées. Au Miocène supérieur, le dépôt de Molasse se termine dans l'avant-pays alpin avec la formation de la Molasse d'eau douce supérieure.

La faune et la flore reflètent l'évolution de l'environnement du dépôt de la Molasse dans des conditions climatiques principalement chaudes : Des mers peu profondes, des plaines alluviales avec des rivières et des lacs et des cônes alluviaux le long du front alpin décrivent un paysage changeant. La Molasse marine supérieure est particulièrement riche en bivalves de toutes sortes, gastéropodes, oursins et autres fossiles (fig. B 21). Dans la Molasse d'eau douce, on trouve souvent des restes de plantes et des filons de charbon, puis des escargots terrestres, des dents de mammifères, etc. Les plantes fossiles de la Molasse d'eau douce comprennent en partie des espèces tropicales, telles que les dattiers, les lauriers, les magnolias, les camphriers et les tulipiers. Avec les espèces d'un climat tempéré, les plantes à feuilles persistantes reflètent une végétation d'une extraordinaire richesse en espèces, comparable à la végétation actuelle du sud-est des États-Unis ou de certaines régions du sud de la Chine.



**Figure B 21:** fossiles de la Molasse marine supérieure de Würenlos (exposition Centre Emma Kunz, détermination et photos : H. Furrer) : a : fragment vertébral d'une sirène, b : dent parfaitement conservée d'un grand requin, c : os de mammifère, d: *Cardium*, e: *Phalium* (gastéropode), f: *Chlamys*.

### Faune et flore de la Molasse d'eau douce supérieure d'Oeningen

Oeningen est situé au nord de l'extrémité ouest du Lac de Constance (Land de Bade-Wurtemberg), près de la petite ville de Stein am Rhein. Ici, au 18ème et 19ème siècle, de la Molasse d'eau douce du Miocène supérieur (il y a 13 millions d'années) a fourni une faune et une flore extrêmement riches dans deux carrières.

Dans un site localisé plus bas, on a trouvé des calcaires d'eau douce, qui se sont probablement formés dans un lac de cratère (maar) des volcans du Hegau. Le site le plus élevé est constitué de marnes avec des traces d'une ancienne forêt de plaine inondable (Ungricht & Biolzi, sans date).

Le site a été étudié au XVIIIe siècle par Johann Jakob Scheuchzer (1672-1733), au XIXe siècle par Oswald Heer (1809-1883) et au XXe siècle par René Hantke.

Les sites ont fourni de nombreux fossiles de la région du lac et de ses rives, mais aussi des plantes et des animaux des terrains alluviaux du voisinage. Ungricht et Pika-Biolzi citent notamment les plantes à suivantes : «*Une plante viticole (Porana oeningensis), le roseau (Phragmites oeningensis), d'autres plantes de marais et de rivage telles que la prêle (Equisetum sp.), la quenouille (Typhasp.), Potamogeton sp. et Isoètes sp., ainsi que les riches feuilles et cônes du genre Glyptostrobus, ressemblant à un cyprès, et surtout des genres d'arbres angiospermes Acer (érable), Cinnamomum (cannelle), Diospyros (ébène), Fagus (hêtre), Ficus (figuier), Juglans (noyer), Liquidambar (ambre), Quercus (chêne), Persea (avocat), Platanus (platane), Salix (saule), Sapindus, Ulmus (orme), Zelkova (Zelkove) et le genre de légumineuses aujourd'hui disparu Podogonium.* »

La liste est suivie par les insectes et autres petits animaux, ainsi que de nombreux vertébrés : «*Poissons : anguille (Anguilla sp.), brochet (Esox lepidotus), carpe (Cyprinus sp.), tanche (Tinca leptosoma), aspic (Aspius sp.), corégone (Leuciscus oeningensis), perche (Perca sp.), Prolebiasperpusillus, goujon (Gobius sp.), barbotte (Cottus sp.), Cobitis sp. Amphibiens : crapaud (Palaephrynos sp.), grenouille géante (Latonia seyfriedi), salamandre géante (Andrias scheuchzeri). Reptiles : tortue des marais (Emys sp.), tortue alligator (Chelydropsismurchisoni), vipère (Coluber sp.), lézard sans pieds (Ophisaurus sp.). Mammifères : renard (Ganecynus palustris), lièvre siffleur (Prolagus sp.)*». La salamandre géante *Andrias Scheuchzeri* est devenue particulièrement célèbre.

De ces faunes et de cette flore, les auteurs ont conclu sur un «*climat subtropical pluvieux avec influence atlantique (hivers doux et étés pas trop chauds)*» pour la période de la molasse d'eau douce supérieure.



**Figure B 22:** le paysage d'Oeningen à l'époque de la Molasse d'eau douce supérieure (Heer 1883).

On ne connaît aucun gisement de la dernière partie du Miocène et du **Pliocène** dans le nord des Alpes. Au sud des Alpes, dans le sud du Tessin, une histoire intéressante s'est cependant déroulée. À la fin du Miocène, au **Messinien** (il y a 7.2 à 5.3 millions d'années), le niveau de la Méditerranée a baissé de façon spectaculaire et du sel s'est déposé dans l'ancien bassin maritime profond. Cette "crise de la salinité" a été provoquée par la fermeture du Déroit de Gibraltar, qui relie la Méditerranée à l'Atlantique nord. La baisse du niveau de la mer a même touché le sud du Tessin: depuis la mer Adriatique, le Pô a creusé une vallée profonde vers la Plaine du Pô. Il en va de même pour les affluents latéraux qui se jettent dans le Pô depuis les vallées alpines. Puis, au début du Pliocène, lorsque l'océan Atlantique est revenu dans le bassin méditerranéen, le niveau de la mer est rapidement remonté pour atteindre la région de Chiasso. C'est là que se sont déposées les argiles de Balerna, avec une riche faune marine de macro- et microfossiles.

La faune et la flore du Néogène sont très proches des communautés modernes.

Les **périodes glaciaires du Pléistocène** ont apporté un nouveau type de flore et de faune à partir de 2.6 millions d'années. La flore proche du glacier était particulièrement adaptée aux conditions sèches et froides de la toundra, avec une croissance d'herbe fine, de petites plantes à feuilles telles que la saxifrage, la racine argentée, etc. Les arbres et les buissons sont restés de faible croissance et se sont limités aux espèces pionnières, comme le bouleau, le pin sylvestre suisse, l'aulne et la bruyère. Parmi les grands mammifères, on trouve le mammouth laineux, le rhinocéros laineux, l'ours des cavernes, le loup, l'hyène des cavernes, le bison, etc. Dans le sable de loess, on trouve les petits escargots de tour caractéristiques du genre Pupilla.

Pendant les périodes interglaciaires, la végétation froide s'est retirée vers le nord et des altitudes plus élevées. Les restes de plantes dans les sédiments, et surtout les pollens, prouvent la colonisation du paysage à basse altitude par les conifères, puis par les arbres à feuilles caduques qui se sont transformés en forêts comme on les trouve aujourd'hui. Pendant la période interglaciaire du Holstein (autour de 400'000 ans), on trouve des restes de plantes qui indiquent une végétation encore plus chaude, ce qui peut être rapproché d'un climat méditerranéen : Noix de vigne (*Pterocarya*), frêne, orme, aulne, noisetier, charme, tilleul, chêne, if. Au cours de la dernière période interglaciaire, dite «Eemien», une forêt mixte de chênes avec une forte proportion de charme s'est développée sur le Plateau.

# C. Promenades géologiques à travers l'histoire de la Terre en Suisse: propositions d'excursions et de visites

## Introduction

Dans ce chapitre, le lecteur trouvera des suggestions de visites de terrain et de musées qui illustrent l'histoire de la Terre en Suisse. La plupart des suggestions se trouvent sur des sites internet; elles conduisent le randonneur vers des objets géologiques intéressants et l'invitent à les visiter «de sa propre initiative». Des excursions géologiques guidées sont par ailleurs proposées aujourd'hui dans toute la Suisse. Vous trouverez également de nombreuses suggestions intéressantes sur le site [www.erlebnis-geologie.ch](http://www.erlebnis-geologie.ch).

Les sites internet sont hélas instables; ils apparaissent un jour et peuvent à nouveau disparaître. C'est pourquoi les informations dans cette brochure ne sont d'actualité que le jour de la dernière visite. Nous essayerons de mettre à jour les adresses en conséquence. Nous sommes également heureux de recevoir de nouvelles suggestions de la part de nos lecteurs.

Les visites de terrain et de musées proposées ici peuvent être effectuées individuellement et sous votre propre responsabilité (!). Ils nécessitent une certaine préparation et des précautions, par exemple en ce qui concerne les vêtements, l'équipement de terrain, la nourriture, etc. Grâce à la 3G et à la 4G, les documents peuvent être consultés presque partout sur le terrain. Mais seulement presque! L'impression papier des documents (et surtout des documents cartographiques) est donc recommandée! Les conditions des visites sur le terrain peuvent également évoluer dans le temps: état des routes, conditions d'accès, etc. Le visiteur est seul responsable à cet égard pour et pendant sa visite!

Les documents cartographiques (cartes géologiques et topographiques, photographies aériennes, etc.) peuvent être consultés et partiellement téléchargés et/ou imprimés sur [www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch). Les données géologiques peuvent être trouvées sur le site <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/cartes-donnees-en-ligne/cartes-geodonnees-en-ligne/donnees-geologiques-en-ligne.html>. Swisstopo vend également des cartes géologiques classiques et leurs notes explicatives. Tous ces documents permettent de mieux comprendre la géologie et le paysage.

Les observations sur le terrain contiennent beaucoup d'informations et facilitent la compréhension de l'histoire de la Terre. Cependant, de nombreux résultats proviennent également de la recherche instrumentale en laboratoire. Les fossiles constituent également un chapitre particulier: les gisements fossilifères sont rares; les fossiles de valeur appartiennent aux cantons et sont stockés, traités scientifiquement et exposés dans les musées. Ils peuvent également y être appréciés par les visiteurs. **Nous invitons donc les visiteurs à s'abstenir de "récolter" des fossiles sur le terrain.**

# Propositions d'excursions et de visites

(Dernière vérification des sites internet: 05/04/2023)

## 1. Les forêts tropicales du Carbonifères

En Suisse, les roches carbonifères ne se trouvent que dans les Alpes, dans d'anciennes fosses permo-carbonifères aujourd'hui exposées en surface. Un de ces gisements de charbon a été exploité près de Dorénaz en Valais. Excursion au synclinal de Dorénaz :

**F:** <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/connaissances-faits/geologie/geologie-quotidien/geologie-pour-tous/via-geoalpina.html#ui-collapse-821>

**D:** <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geologie/geologie-alltag/geologie-fuer-alle/via-geoalpina.html>

Pour se faire une idée de la faune et de la flore du Carbonifère, il est également intéressant de faire une visite (virtuelle) de la collection de l'ETH Zurich.

## 2. Les déserts rouges du Permien

Dans le chapitre A, nous avons décrit les déserts rouges du Permien et du Trias inférieur en Europe. D'une part, les roches permiennes qui témoignent de cette période se trouvent dans des affleurements rares, petits et peu spectaculaires de la vallée du Rhin en amont de Bâle (appelés "Rotliegenden»; fig. C 1). D'autre part, on les trouve sous la forme de "verrucano" dans les Alpes, dans d'anciennes dépressions tectoniques dans le substrat rocheux cristallin et à la base des nappes, en particulier des Nappes helvétiques, par exemple dans le pays de Glaris et les montagnes de Flums (*Flumserberge*).



**Figure C 1:** Rotliegenden sur le talus du ruisseau Fischigerbach (Mumpf, Argovie) : alternance de couches de grès rouge foncé et verdâtre à blanc et de grès argileux. Coo : 47.54195/7.92262, rive droite et lit du Fischigerbach près du pont routier (Wildi & Lambert 2019, fig. 17).

La deuxième étape du voyage à travers le «Cirque tectonique Sardona» (inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO), conduit de la cabane Murgsee à la cabane Spitzmeilen CAS à travers les paysages du Verrucano à la base de la Nappe de Mürtschen :

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/sardona-welterbe-weg-etappe-2-murgseehu%cc%88tte-spitzmeilenu%cc%88tte-sac/>

Et la brochure d'information:

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2019/10/Sardona-Welterbe-Weg-Wandern-in-der-Sardona-Region-1.pdf>

Si ce tour de montagne vous semble trop difficile, nous vous recommandons une excursion dans le paysage du Verrucano du lac Murgsee, et en guise de préparation, une visite du chemin de pierre (*Steinpfad*) Knobel à Schwanden:

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/steinpfad-knobel/>



**Figure C 2** : des blocs erratiques de Verrucano se trouvent sur tous les cordons morainiques des vallées du Plateau suisse. Figure : bloc de Verrucano géant provenant de la région de Glaris sur la moraine latérale du glacier de la Limmat à Würenlos («moraine de Bick», photo: A. Lambert, Coo 47.43719/8.37166, Wildi & Lambert 2019).

### 3. Volcanites du Permien de Melide

Le "volcan de Melide" n'est pas reconnaissable sur le terrain aujourd'hui en tant que tel avec son cône et son cratère volcanique. Cependant, la randonnée proposée ici permet d'observer ses roches volcaniques dans un paysage merveilleux:

I: <https://www.luganoregion.com/it/cosa-fare/lago-e-natura/natura-outdoor/sentieri-tematici/detail/id/12802/un-sentiero-del-passato-melide-carona>

#### 4. Lagunes de sel et sebkhas du Trias

Du sel du Trias est encore exploité aujourd'hui à Riburg (Möhlin) dans la vallée du Rhin (Argovie) et dans les salines de Bex (Vaud). Jusqu'à récemment, des mines et carrières de gypse existaient également en Suisse. Voici deux suggestions de visites dans des mines, la première de sel, la seconde de gypse :

F: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/mines-de-sel-des-alpes/>

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/gipsmuseum-schleitheim/>

#### 5. Jardins de crinoïdes dans la mer du Muschelkalk

Dans cette excursion, le géo-randonneur rencontrera toutes les formations géologiques de la mer du Muschelkalk qui affleurent dans le Jura plissé. A l'arrêt n° 3, il est intéressant de visiter l'ancienne carrière "Üselmatt". Elle est située derrière (à l'Est) de l'arrêt de bus, caché dans la forêt. Ici, le calcaire spathique se trouve sur une paroi rocheuse (attention : danger de chutes de pierres !). Dans les éboulis, on trouve des blocs de ces mêmes calcaires à débris de crinoïdes (fig. C 3).



**Figure C 3** : éboulis de la carrière d'Üselmatt. **a** : calcaire massif avec des segments de tiges de crinoïdes (entroques); diamètre de la pièce : 2 cm.

**b** : calcaire spathique finement laminé fait de sable calcaire dans la mer du Muschelkalk (Wildi & Lambert 2019).

F: [https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2020/03/StaffeleggFranc%CC%A7ais3\\_compressed.pdf](https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2020/03/StaffeleggFranc%CC%A7ais3_compressed.pdf)

D: [https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2020/03/StaffeleggDeutsch3\\_compressed.pdf](https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2020/03/StaffeleggDeutsch3_compressed.pdf)

## 6. Irruption de la Tethys dans les domaine du Sud- et de l'Austroalpin

Le Parc national des Grisons offre de très belles excursions dans les paysages dolomitiques des formations du Trias des Nappes austroalpines. De part et d'autre de l'Ova dal Fuorn, les plus hautes crêtes montagneuses sont formées par des formations de roches carbonatées, appartenant notamment à la *Hauptdolomit* («Dolomie principale»). Ce sont principalement des dolomies grises, le plus souvent laminées. Ces structures proviennent de tapis de cyanobactéries, qui recouvraient les fonds marins peu profonds à la fin du Trias (fig. C 4). Pour observer les stratifications, nous recommandons les blocs des éboulis. A suivre en particulier, l'excursion N° 15, au départ d'Il Fuorn.

F: <https://www.nationalpark.ch/fr/visite/les-itineraires/>

D: [https://www.nationalpark.ch/tasks/sites/de/assets/File/Geologie\\_Focus.pdf](https://www.nationalpark.ch/tasks/sites/de/assets/File/Geologie_Focus.pdf)



**Figure C 4 :** *stromatolithes en dômes (croissance en forme de doigt) de la Dolomie principale (Norien) des Dolomites de l'Engadine (Munt da la Bescha, au nord du col de l'Ofen; Musée paléontologique de l'Université de Zurich, photo : H. Furrer).*

*a : échantillon altérée (largeur 15 cm)*

*b : échantillon poli (largeur 10 cm).*

## 7. Les ichthyosaures du Monte San Giorgio

Sur le Monte San Giorgio, les ardoises bitumineuses étaient autrefois extraites dans une carrière. Une usine située au fond de la vallée produisait du bitume. En 1919, le paléontologue zurichois Bernhard Peyer a découvert les premiers restes d'ichthyosaures ("dinosaures poissons"). Cela a marqué le début d'une longue histoire de fouilles, de préparations de fossiles, de déterminations, etc. Aujourd'hui, les fossiles sont exposés

dans trois musées, à savoir le *Museo dei fossili del Monte San Giorgio* à Melide, au *Museo dei Fossili di Besano* et dans le Musée de paléontologie de l'Université de Zürich:

I: <http://www.montesangiorgio.org/Musei/Museo-dei-Fossili-di-Meride.html>

I: <http://www.montesangiorgio.org/Musei/Museo-dei-Fossili-di-Besano.html>

D: <https://www.uzh.ch/de/outreach/museums/palaeontologisches-museum.html>

## **8. Les Platéosaures de Frick**

Les premiers os de vertébrés ont été découverts dans les marnes bariolées de l'usine *Tonwerke Keller AG* à Frick en 1961. À partir de 1976, des fouilles systématiques ont été effectuées et en 1985, le premier squelette complet a été découvert. Aujourd'hui, les plus belles trouvailles peuvent être admirées dans le petit musée des dinosaures à Frick. Le musée est particulièrement fier d'un squelette complet de platéosaure. L'emplacement et les heures d'ouverture du musée sont indiqués sur le site internet suivant :

D: <https://sauriermuseum-frick.ch/>

## **9. Les traces de dinosaures du Vieux-Emosson**

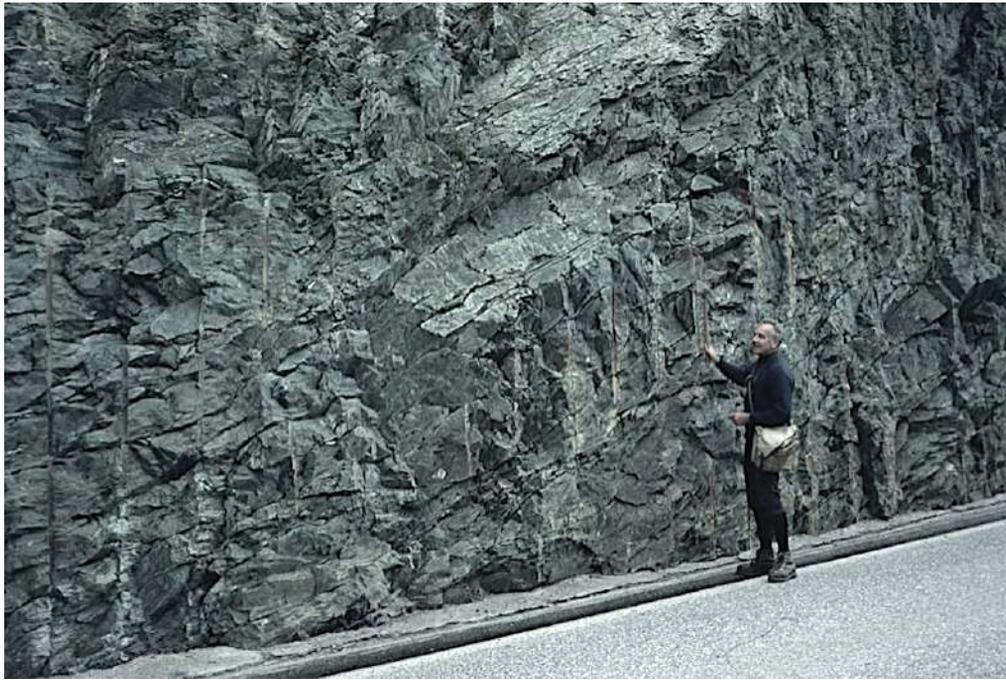
Les traces de dinosaures à Vieux-Emosson sont certainement un peu plus anciennes que les dinosaures de Frick, probablement du Trias moyen. La brochure explique en détail le cadre géologique:

F: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/sentier-geologique-du-vieux-emosson/>

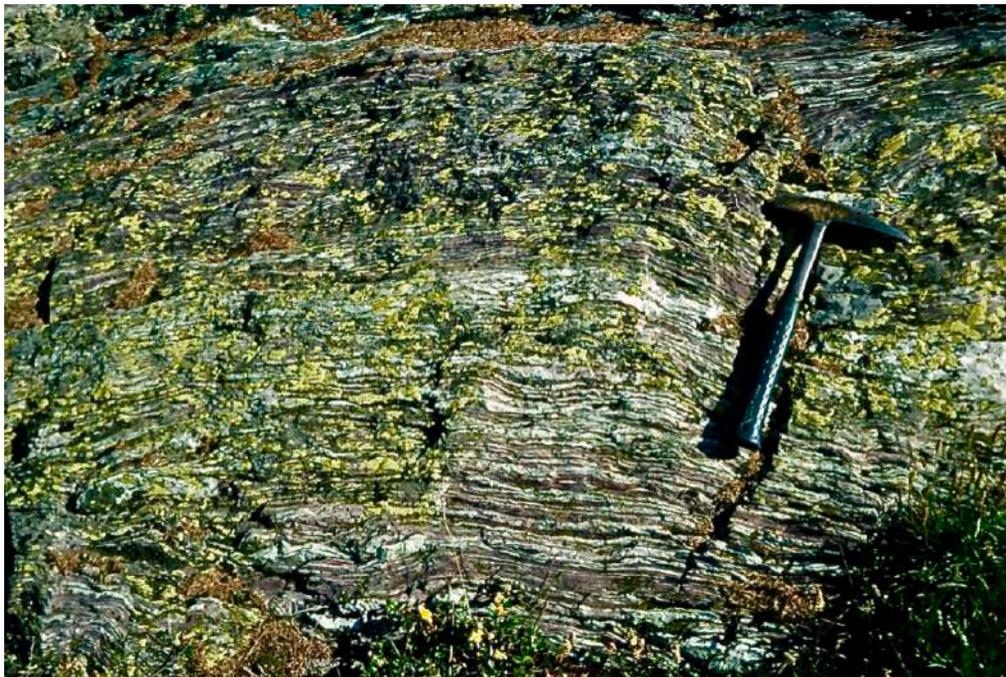
## **10. L'Océan liguro-piémontais sur les bords du Lac de Marmorera**

Sur la rive droite (à l'est) du Lac de Marmorera, le long de la route du Col du Julier, on trouve diverses roches de l'océan liguro-piémont. A hauteur et des deux côtés du barrage, des basaltes avec des laves en coussin (aujourd'hui aplatis tectoniquement) ont été entaillées lors de la construction de la route (fig. C 5). Sur les prairies et dans d'autres affleurements près du village au-dessus (à l'Est) de Marmorera, on trouve également des radiolarites finement stratifiées (Dogger, Malm fig. C 6) et des calcaires fins à calpionelles (Malm supérieur - Crétacé inférieur ?).

p.s. Pour localiser les affleurements, il est utile de consulter la carte géologique.



**Figure C 5:** laves en coussins dans les basaltes le long de la route du Col du Julier à hauteur de la digue du Lac de Marmorera.



**Figure C 6:** radiolarites finement litées en amont du village de Marmorera. Les lichen de l'espèce *Rhizocarpon geographicum* se développent sur des substrats siliceux.

## 11. La mer Sudalpine profonde dans la Gorge de la Breggia

Les Gorges de Breggia offrent un profil unique à travers les sédiments de la mer profonde du Sudalpin. Littérature: Rudolf Stockar 2003: Guida geologica al Parco delle Gole della Breggia, Parco delle Gole della Breggia. La guida è ottenibile al prezzo di Fr. 30.-presso il Parco delle Gole della Breggia, e-mail: [info@parcobreggia.ch](mailto:info@parcobreggia.ch).

I: <https://www.parcobreggia.ch/>

D: <https://rinifoto.ch/breggia-park>

Une introduction sur youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=wIYQ9yWq6dg>

## 12. La mine de fer et nécropole d'ammonites de Herznach (Argovie)

La mine de fer de Herznach a été exploitée de 1937 à 1967. Pendant cette période, elle a fourni du minerai avec une teneur en fer de 20 à 32 %. Après la fermeture de la mine, le calme est revenu autour de l'installation industrielle. Grâce à l'association *Verein Eisen und Bergwerke (VEB)*, fondée en 2004, la mine est à nouveau accessible. Le gisement de minerai s'est formé à la fin du Dogger, dans une période de faible sédimentation. En conséquence, les coquilles de fossiles se sont accumulées. Une visite en vaut la peine:

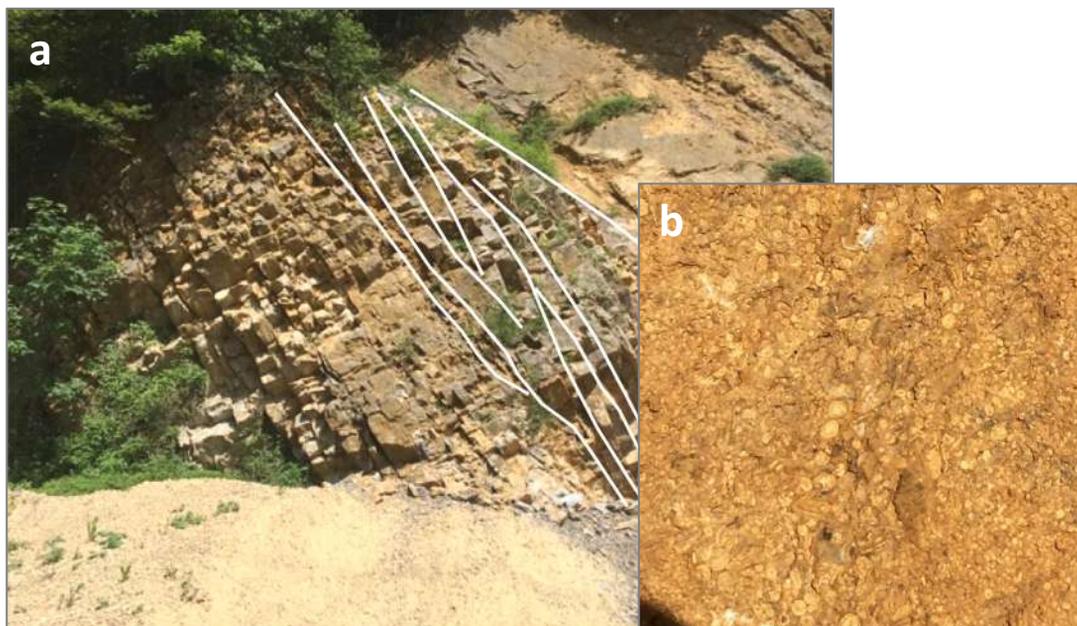
D: <https://www.bergwerkherznach.ch/>

## 13. Récifs de coraux dans le Jura

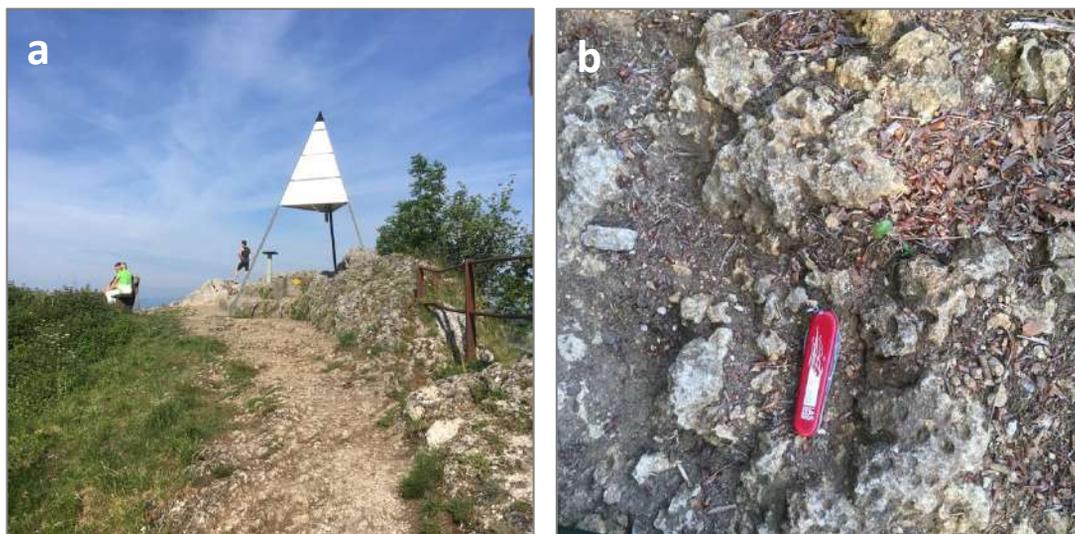
Dans la mer peu profonde, à la surface et sur les bords de la plateforme rauracienne, de petits récifs coralliens se sont formés en de nombreux endroits au Jurassique pendant le Dogger et le Malm, avec pour la plupart une extension latérale de quelques dizaines de mètres. Ces récifs de plateforme (en anglais : *patch reefs*) sont pour la plupart entourés et recouverts de débris de récifs.

Le récif corallien de la Gisliflue (Jura plissé, Argovie) s'est développé pendant le Dogger moyen à l'extrémité est de la plateforme de la Grande oolithe *Hauptrogenstein*). Sur cette plateforme, dans des eaux chaudes peu profondes, on trouve des dunes de sable calcaire d'environ un mètre de haut (fig. C 7). Les coraux individuels et les colonies de corail des calcaires récifaux de la Gisliflue sont souvent difficiles à reconnaître en raison de leur cimentation interne et de leur recristallisation (fig. C 8).

Le récif corallien de St Ursanne (fig. A 14) ne se détache pas de la paroi rocheuse calcaire blanche. Ce n'est qu'en y regardant de plus près que l'on peut reconnaître les colonies de corail.



**Figure C 7 a:** ancienne dune sous-marine du Dogger moyen dans la Grande Oolithe (Hauptrogenstein) à la Schellenbrücke près de Küttigen (Argovie, Coo. 47.42544/08.05403). **b :** Le sable était constitué de petites billes calcaires (diamètre 1 à 2 mm), appelées oïdes, qui se sont formées dans l'eau chaude, mouvementée et peu profonde de la plateforme maritime (Wildi & Lambert 2019).



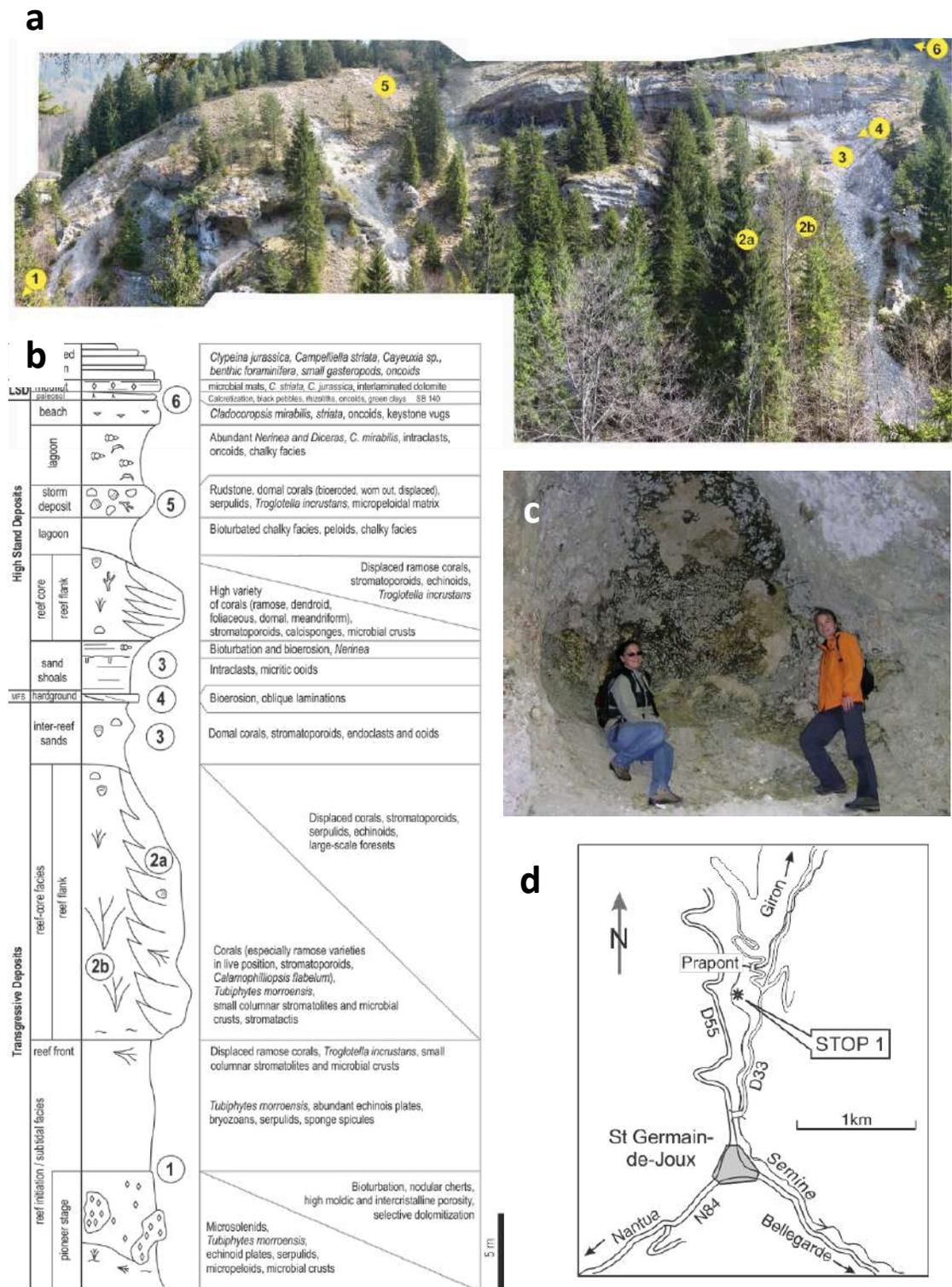
**Figure C 8 a:** calcaire récifal au sommet de la Gisliflue (Argovie, Coo. 47.42544 / 8.10844), **b:** colonie de coraux.

Parmi les gisements jurassiques, le complexe récifal de St Germain de Joux, à l'Ouest de la ville française de Bellegarde, non loin de la frontière suisse, mérite une mention particulière. Ce site est sous protection.

**F:** <https://www.saintgermaindejoux.fr/patrimoine/site-classe/>

Le complexe récifal se trouve sur la rive droite de la rivière Semine, juste en aval d'une station de pisciculture (Coo 46° 11' 42.2 " N, 45° 59' 38.8 E, fig. C 9).

Les coraux forment de petits massifs de quelques mètres, entourés de débris récifaux et d'autres calcaires poreux. La visite du complexe récifal exige de bonnes compétences en matière de tout-terrain et de la prudence. **Nous demandons aux visiteurs de ne pas utiliser leur marteau géologique !**



**Figure C 9 a:** complexe récifal de St Germain de Joux; numéros des figs. **a** et **b**: localisation et position stratigraphique des points d'observation **b**: profil stratigraphique synthétique, Davaud et al. (2014). **c**: colonie de coraux (point 2 b). **d**: carte de localisation (op. cit.).

## 14. Traces de dinosaures dans le Jura

Les traces de dinosaures de Courtedoux (aujourd'hui plus de 14'000 empreintes) ont été découvertes lors de la construction de l'autoroute A 16. Le Musée Jurassica de Porrentruy gère désormais le site et le sentier de découverte de la nature :

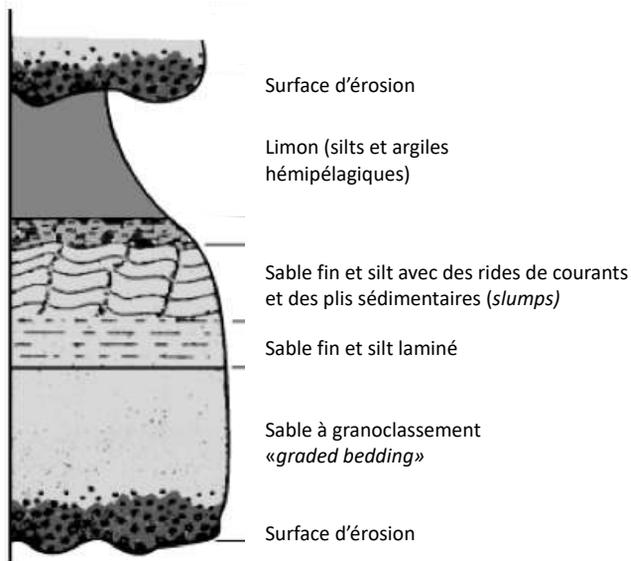
F: <https://www.jurassica.ch/fr/Satellites/Sentier-didactique/Sentier-didactique.html>

Voir également:

F: <https://courtedoux.ch/tourisme-economie/a-voir-dans-la-region/traces-de-dinosaures/>

## 15. Turbidites et flyschs du premier plissement alpin

Comme le montre la figure A 17, les sédiments de flysch se forment lors du dépôt de coulées de turbidité ("avalanches sédimentaires") de matériaux d'érosion fins et grossiers (galets, sable, limon et argile) sur des cônes de débris en eau profonde. La figure C 10 (voir également les fig. 18 et 22) montre la structure typique résultant d'un tel événement sédimentaire, en commençant par l'érosion, suivie par le dépôt de sable gradué, puis le sable fin et le limon. Entre les dépôts de sable se trouve une argile fine, dite "hémipélagique". Les paysages de flysch forment généralement un des terrains d'une morphologie douce, avec des glissements de terrain et un sol humide à mouillé.



**Figure C 10:**  
*structures sédimentaires issues du dépôt d'un courant de turbidité (épaisseur : le plus souvent du décimètre à un mètres).*

De nombreuses promenades autour du Niesen offrent une belle illustration du Flysch du Niesen. Dans la description d'excursion suivante, le Schlierenflysch dans le synclinal de Habkern, est expliqué dans son environnement géomorphologique:

D: [https://www.habkern-archiv.ch/dmxDaten/rubriken/NA/NA\\_0003\\_Geomorphologischer%20Exkursionsf%C3%BChrer%20Daniela%20L%C3%BCthi%202009\\_1.pdf](https://www.habkern-archiv.ch/dmxDaten/rubriken/NA/NA_0003_Geomorphologischer%20Exkursionsf%C3%BChrer%20Daniela%20L%C3%BCthi%202009_1.pdf)

Le "Sentier géologique Gastlosen" mène à travers les différents flysches des »Nappes supérieures" des Préalpes Romandes :

**D:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/sentier-geologique-des-gastlosen-geologischer-pfad-gastlosen/>

**F:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/fr/geoweg/sentier-geologique-des-gastlosen-geologischer-pfad-gastlosen/>

Le musée suivant est consacré à l'exploitation minière de l'ardoise à toiture (anciennement "ardoise à toiture d'Engi"), vieille de plus d'un siècle :

**D, F, E:** <https://landesplattenberg.ch/schiefertafelfabrik-elm/>

Ces schistes se trouvent juste au-dessus des derniers dépôts de flysch des Alpes. Le musée propose également des visites guidées pour le public.

## **16. Première érosion des chaînes alpines les cônes alluviaux du Rigi et du Mont Pèlerin (Molasse subalpine)**

La première des adresses Internet suivantes décrit une excursion en bateau sur le Lac des Quatre-Cantons avec un magnifique panorama géologique du front alpin. Le vieux cône alluvial de la Molasse subalpine de la Rigi y tient une position importante:

**D, F, E:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geologische-schiffahrt-auf-dem-vierwaldstaettersee-d-e-f/>

Dans l'article suivant, les auteurs décrivent la géomorphologie de la Molasse du Mont Pèlerin:

**F:**

[https://www.unil.ch/files/live/sites/igd/files/shared/Travaux\\_et\\_recherches/Pralong\\_Reynard\\_2004.pdf](https://www.unil.ch/files/live/sites/igd/files/shared/Travaux_et_recherches/Pralong_Reynard_2004.pdf)



**Figure C 11:** la roche la plus caractéristique de la Molasse subalpine est constituée de conglomérats ("Nagelfluh") qui ont été formés par la cimentation de dépôts fluviaux grossiers (graviers) sur les cônes alluviaux le long du front alpin. Les blocs de Nagelfluh se trouvent souvent sous forme de blocs erratiques sur les moraines des vallées du Plateau suisse (ici sur la moraine terminale du glacier de la Reuss entre Mellingen et Mägenwil, en Argovie).

## 17. La dernière mer de l'avant-pays alpin: la Molasse marine supérieure

L'excursion suivante décrit la Molasse marine supérieure près de Zofingen et fait le lien entre la construction de l'église gothique de la ville et les matériaux de construction utilisés pour sa construction :

**D, F:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-stadtkirche-von-zofingen-zu-den-molassesteinbruechen-chuzenhoehle/>

La crête morainique du glacier de la Reuss de la dernière période glaciaire près de Mellingen s'appuie sur le côté gauche de la vallée contre la Molasse marine supérieure. On y trouve des carrières où l'on extrait, entre autres, du grès coquillier depuis l'époque romaine:

**D, F:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-um-das-zungenbecken-des-reussgletschers-von-mellingen-d-f/>

## 18. Témoins du plissement et des nappes alpines

Le centre d'accueil des visiteurs du site du patrimoine naturel mondial de l'UNESCO «*Tektonikarena Sardona*» (*Arène tectonique Sardona*) offre une entrée idéale à l'une des localités types de la théorie des nappes dans les Alpes:

**D:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/unesco-besucherzentrum-glaruselm-der-tektonikarena-sardona/>

(Voir également: **D, E:** <https://unesco-sardona.ch/>)

Les géopromenades à travers l'arène tectonique sont présentées dans la brochure suivante:

**D:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2019/10/Sardona-Welterbe-Weg-Wandern-in-der-Sardona-Region-1.pdf>

Les excursions suivantes sont proposées dans le cadre de «Via GeoAlpina» de Swisstopo:

**D:** <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geologie/geologie-alltag/geologie-fuer-alle/via-geoalpina.html#dokumente>

**F:** <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/connaissances-faits/geologie/geologie-quotidien/geologie-pour-tous/via-geoalpina.html>

**I:** <https://www.swisstopo.admin.ch/it/conoscenze-fatti/geologia/geologia-quotidiana/geologia-per-tutti/via-geoalpina.html>

«Lochseite» près de Schwanden (Glarus): localité type du chevauchement de Glaris «l’affleurement le plus célèbre» de la géologie de la Suisse:

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/lochsiten-weg/>

Le Val d'Hérens propose plusieurs excursions dans les nappes alpines du sud de la vallée du Rhône:

F: <http://www.evolene-geologie.ch/data/documents/LeshautslieusgologiquesduvaldHrens.pdf>

Le guide du Val Piora offre une approche pluridisciplinaire, liant géologie, minéralogie, sols, flore, faune et l’économie d’alpage:

<https://archive-ouverte.unige.ch/unige:96563>

### 19. Le Jura plissé: front du plissement alpin

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/geowanderweg-kuettigen-staffelegg/>

D, F: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-von-der-staffelegg-nach-densbueren/>

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/geologische-wanderung-baerschwil/>

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/geologischer-wanderweg-weissenstein/>

### 20. Gravieres des plateaux: témoins des plaines alluviales des anciennes glaciations

Wildi & Lambert (2019) décrivent, aux pages 95-100, les magnifiques affleurements de Gravieres de couverture supérieures sur la Egg Schneisingen (Studenland, canton d'Argovie; voir aussi la figure A 39 ci-dessus) et de Gravieres de couverture inférieures sur le Bruggerberg (Figure A 40 a ci-dessus) et dans le Tüfels-Chäller près de Baden (Figure A 40 b) . Le «Geo-Pfad Baden» conduit le géo-promeneur vers ces tours de conglomérats:

D: [https://wald.baden.ch/public/upload/assets/20999/Broschuere\\_Geo\\_Pfad.pdf](https://wald.baden.ch/public/upload/assets/20999/Broschuere_Geo_Pfad.pdf)

### 21. Ecoteaux: le premier bassin lacustre du Léman il y a 800'000 ans

Perché loin au-dessus du Léman, Ecoteaux (Palézieux) abrite des sédiments lacustres du Pléistocène ancien et moyen. Ce sont les plus anciennes traces d'un grand lac dans le bassin lémanique:

F: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/ecoteaux-sur-les-traces-du-premier-lac-du-bassin-lemanique-il-y-a-800000-ans/>

## 22. Morphologies glaciaires sur le Plateau suisse

**D, F:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-um-das-zungenbecken-des-reussgletschers-von-mellingen-d-f/>

**D, F:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-im-drumlinzirkus-von-schwand-menzingen/>

**D:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/der-bischofsberg/>

## 23. Changements climatiques, glaciers et paysages

Cette excursion vers le glacier de la Mer de Glace à Chamonix illustre les fluctuations des glaciers et du climat pendant et surtout après le Petit-Âge glaciaire, à partir de 1850:

**F, E:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/mer-de-glace-chamonix-mont-blanc-du-petit-age-glaciaire-1850-a-nos-jours/>

Les glaciers sont des indicateurs très sensibles du changement climatique. L'excursion sur les glaciers du Mont Miné et de Ferpècle (Val d'Hérens) donne un aperçu du fonctionnement des glaciers et de l'histoire des glaciers et du climat depuis la fin de la petite période glaciaire:

**F:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2020/03/F-Evole%CC%80ne-Paysagesglaciaires.pdf>

**D:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2017/01/D-Evolene-Gletscherlandschaften.pdf>

**E:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2020/03/E-Evole%CC%80ne-Glaciallandscapespdf.pdf>

Le village de montagne de Zinal (Valais) se trouve dans un magnifique paysage alpin, façonné par l'histoire glaciaire récente. Ce n'est qu'en 1960 que Zinal est devenu une station de sports d'hiver. Constamment menacé par les avalanches et les laves torrentielles, le village ne s'est développé que grâce à d'importantes mesures de protection. Le changement climatique contribue à cette précarité :

**F, E:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/zinal-histoire-naturelle-et-presence-humaine/>

Dans le Parc national suisse (Engadine, Grisons), les glaciers rocheux, les laves torrentielles et les éboulis illustrent le lien entre le climat et les processus géologiques :

**D:** <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoweg/der-geologische-kreislauf/>

Information générale:

D: [https://www.nationalpark.ch/tasks/sites/de/assets/File/Geologie\\_Focus.pdf](https://www.nationalpark.ch/tasks/sites/de/assets/File/Geologie_Focus.pdf)

Enfin, il faut mentionner ici le musée des mammoths de Niederweningen, qui est consacré à la faune de la période glaciaire qui s'achève et aux premiers établissements humains :

D: <https://www.mammutmuseum.ch/>

## 24. «Eboulements et vies humaines»

Sur le tour du Firstboden (page 18 de la brochure), le géo-randonneur fait l'expérience de l'éboulement historique d'Elm (1881) :

D: <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2019/10/Sardona-Welterbe-Weg-Wandern-in-der-Sardona-Region-1.pdf>

Une excellente description des éboulements historiques de Derborence (1714 et 1749) et une suggestion pour une randonnée d'environ 2 heures ½:

F: [http://www.derborence.ch/wp-content/pdf/brochure\\_Eboulement\\_ecran.pdf](http://www.derborence.ch/wp-content/pdf/brochure_Eboulement_ecran.pdf)

Explication géologique de l'éboulement de Goldau (1806), visite du musée de l'éboulement et suggestion d'une randonnée en montagne de près de 6 heures :

D: [http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat\\_pdf/alle\\_2012/2006-2010/Thuro\\_Rick\\_et\\_al\\_2006\\_-\\_Die\\_Bergstuerze\\_am\\_Rossberg.pdf](http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2006-2010/Thuro_Rick_et_al_2006_-_Die_Bergstuerze_am_Rossberg.pdf)

## 25. Géologie et archéologie

Un guide sur l'histoire géologique et l'archéologie de la ville de Genève, avec trois suggestions d'excursions:

F, E: <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geologie-et-archeologie-de-geneve/>

## 26. Grottes à stalactites et karst

Les grottes karstiques sont l'une des attractions géologiques les plus célèbres de Suisse et attirent de nombreux visiteurs. Le karst souterrain est formé par la dissolution chimique de la roche par l'eau. Soit l'eau pénètre de la surface par des fissures et des fractures tectoniques dans le sous-sol et suit les chemins d'écoulement souterrains sous l'influence de la gravité, jusqu'à une sortie située plus bas, généralement une source karstique (karst dit «épigénique»). Soit l'eau (souvent des eaux thermales agressives) suit un cheminement ascendant et ressort en surface. En Suisse on connaît et on a essentiellement étudié des grottes épigéniques.

Les grottes karstiques les plus longues et les plus stables se trouvent dans des roches carbonatées (calcaires et dolomies), dans des zones à fort relief, comme la chaîne frontale des Nappes helvétiques, le long de la bordure nord des Alpes (Höllgrotten à Zoug, St.-Beatus Höhlen à Thoune, etc.), dans la "zone des racines des Nappes helvétiques" (Lac souterrain de Saint-Léonard, Valais) ou dans le Jura plissé (Grottes de Réclère Jura, Grottes d'Orbe Vallorbe, etc.).

Des grottes épigéniques ont pu se former au cours de l'histoire de la Terre dès que les roches correspondantes s'élevaient au-dessus du niveau de la mer. Des conduites formées à pendant une phase précoce (notamment des conduites horizontales ou à faible inclinaison) ont souvent été redressées par la suite par des mouvements tectoniques. Les puits verticaux sont souvent plus jeunes et n'ont plus (peu) bougés depuis leur origine.

Dans le Jura, les conditions de formation de grottes ont été remplies dès le Miocène supérieur (âge de la Molasse d'eau douce supérieure); dans la chaîne frontale des Nappes helvétiques les conditions pour la karstification profonde étaient éventuellement remplies un peu plus tôt, mais aucune datation n'est disponible à ce jour.

Les dépôts sédimentaires dans les grottes jouent un rôle important dans la reconstruction du climat du passé (périodes glaciaires/interglaciaires), la mémoire de la faune glaciaire et l'histoire de l'établissement humain (Audra et al. 2007).

Plusieurs sites internet énumèrent et décrivent les gouffres connues en Suisse. Des suggestions de visites pour tout-un chacun se trouvent notamment sur les sites suivants:

**D:** <https://www.freizeit.ch/dossier/20385/die-schonsten-hohlen-und-grotten-der-schweiz>

**D, F, E, I, . . . :** <https://www.myswitzerland.com/en-ch/destinations/nature/caves-and-grottos/>

## Postscriptum: marcher dans le temps

Dès que nous posons nos pieds sur Terre, nous «piétinons» les témoins d'un épisode de l'histoire de la Terre. Le bitume de la route n'en représente que la dernière phase, celle de la colonisation humaine. Mais juste à côté, par exemple dans un champ labouré, nous pouvons nous salir les chaussures dans une belle terre brune, un sol. Dans une large partie de la Suisse, ce sol est le résultat de l'altération du substrat géologique et de l'activité biologique sous le climat de l'Holocène, de la période chaude depuis la fin du dernier âge glaciaire. Souvent, nous marchons donc sur un sol végétal, agricole ou forestier qui représente environnements des derniers 10'000 ans, ou à peine plus. Et juste en dessous de ce sol, ou encore juste sur le bord de la route, où aucun sol n'a pu se fixer, ou alors où l'érosion l'a emporté, c'est une formation géologique plus ancienne qui apparaît et nous rappelle les profondeurs de l'histoire de la Terre avec ses changements environnementaux étonnants, changements climatiques, variations du niveau de la mer, évolution de la faune et de la flore, plissements alpins, évolutions lentes et catastrophes.

Dans les Alpes et leur avant-pays, ce sont souvent des témoins d'une glaciation, donc d'une des périodes froides qui caractérisaient les derniers deux millions d'années de l'histoire qui apparaissent à la surface. Il s'agit de roches meubles, moraines laissées par les glaciers ou encore graviers et sables des rivières glaciaires qui se présentent en premier. Puis, des roches consolidées d'un âge géologique plus anciens. Selon la région, une période spécifique peut dominer la scène, telles les roches calcaire originaires de la mer tropicale du Jurassique, ou la Molasse formée par le matériel érodé de la chaîne alpine. Et en nous promenant sur ces terrains, nous passons inconsciemment d'un monde à un autre, d'un océan profond à une plate-forme marine ou à un cône sédimentaire dans une forêt subtropicale, puis à un dépôt dû à la présence d'un glacier. La géologie déroule ainsi l'histoire contrastée qu'a vécu notre parcelle de Terre au cours des derniers millions, dizaines ou même centaines de millions d'années sous nos pieds.

Mais comment reconnaître, en tant que promeneur intéressé par les profondeurs de la Terre cette histoire qui se cache sous nos pieds? Le moyen le plus approprié pour consiste à étudier la carte géologique qui répertorie les terrains géologiques. Ces cartes géologiques font abstraction des sols agricoles ou autres. Elles identifient par des couleurs et des indices en lettres la répartition des formations géologiques qui apparaissent en surface ou se trouvent cachées sous le sol brun. Ces couleurs et indices cartographiques sont ensuite expliqués dans les légendes des cartes et les notes explicatives. La lecture d'une carte géologiques n'est cependant pas une opération facile et demande un peu de patience et d'entraînement.

Et enfin, pour commencer l'exercice, on se rendra sur le site internet de swisstopo en tapant le lieu recherché dans la fenêtre de recherche:

[https://map.geo.admin.ch/?topic=geol&lang=fr&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.geologie-geocover&layers\\_opacity=0.75](https://map.geo.admin.ch/?topic=geol&lang=fr&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.geologie-geocover&layers_opacity=0.75)

On agrandit l'image qui apparaît, puis on clique avec le curseur sur la surface qui nous intéresse, et le tour est joué!

# Glossaire

Noms de lieux : Tous les noms de lieux utilisés ici peuvent être trouvés sur les cartes de Swisstopo en utilisant la fonction de recherche : <https://www.swisstopo.admin.ch/>

Les noms des fossiles sont écrits en caractères obliques dans le texte.

Pour les âges géologiques, voir les figures A 2 et B 1.

**Anhydrite:** nom minéral et roche sédimentaire formée de sulfate de calcium anhydre ( $\text{CaSO}_4$  ; voir aussi : gypse), formée dans les lagunes salées et les sebkhas.

**Ardoise:** roches sédimentaires ou métamorphiques (recristallisées) en fines couches millimétriques.

**Argile à Opalinus:** Formation rocheuse d'argile noire d'environ 100 m d'épaisseur. Cette argile a été déposée au début du Dogger (Jurassique moyen) dans une mer de plusieurs dizaines à plus d'une centaine de mètres de profondeur. Le matériau argileux provenait probablement principalement de l'érosion du Massif bohémien.

**Bloc erratique:** Bloc de roche transporté par le glacier et déposé sur la marge du glacier, principalement d'origine alpine.

**Bolus:** Concrétion de fer ou de limonite (oxyde de fer) en forme de pois, souvent à coquilles concentriques. Jusqu'au milieu du XXe siècle, le bolus a été exploité, notamment dans les mines du Jura.

**Brèche:** roche sédimentaire consolidée constituée d'éléments anguleux (non arrondis) de l'ordre du cm au dm.

**Calcaire, roches calcaires:** roches sédimentaires marines constituées de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Les roches calcaires peuvent être formées principalement à partir de fines boues d'algues (nanoplancton) et de divers coquillages fossiles.

**Carbonates, roches carbonatées:** roches calcaires et dolomitiques.

**Collision :** si deux plaques terrestres se rapprochent l'une de l'autre (tectonique des plaques, dérive des continents), une plaque avec des roches denses (roches océaniques) plonge sous une plaque avec des roches moins denses (roches continentales) et s'enfonce en profondeur. La subduction est opposée à la collision des plaques constituées de roches continentales moins denses. Les Alpes, avec leurs nappes superposées, sont le résultat d'une collision entre l'Europe et l'Afrique. Celle-ci a suivi la subduction du fond océanique de l'Océan Liguro-Piémontais.

**Couches d'Effingen:** formation géologique calcaire et marneuse du début du Malm (Jurassique supérieur) dans la région du Jura. Cette lithologie est utilisée pour la production de ciment.

**Croûte terrestre:** couche rocheuse supérieure de la terre solide. La croûte terrestre continentale est principalement constituée de granit, de gneiss et de roches sédimentaires. La croûte terrestre océanique est principalement constituée de basalte.

**Dolomite:** roche formée à partir de minéraux de dolomie  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Origine : roche sédimentaire formée dans l'eau de mer fortement minéralisée, dans les lagunes et les déserts salés (sebkhas).

**Calcaire, roches calcaires:** roches sédimentaires marines constituées de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Les roches calcaires peuvent être formées principalement à partir de fines boues d'algues (nanoplancton) et de divers coquillages fossiles.

**Carbonates, roches carbonatées:** roches calcaires et dolomitiques.

**Collision :** si deux plaques terrestres se rapprochent l'une de l'autre (tectonique des plaques, dérive des continents), une plaque avec des roches denses (roches océaniques) plonge sous une plaque avec des roches moins denses (roches continentales) et s'enfonce en profondeur. La subduction est opposée à la collision des plaques constituées de roches continentales moins denses. Les Alpes, avec leurs nappes superposées, sont le résultat d'une collision entre l'Europe et l'Afrique. Celle-ci a suivi la subduction du fond océanique de l'Océan Liguro-Piémontais.

**Conglomérat:** dépôt clastique avec des éléments arrondis, consolidés par un ciment.

**Couches d'Effingen:** formation géologique calcaire et marneuse du début du Malm (Jurassique supérieur) dans la région du Jura. Cette lithologie est utilisée pour la production de ciment.

**Croûte terrestre:** couche rocheuse supérieure de la terre solide. La croûte terrestre continentale est principalement constituée de granit, de gneiss et de roches sédimentaires. La croûte terrestre océanique est principalement constituée de basalte.

**Dolomite:** roche formée à partir de minéraux de dolomie  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Origine : roche sédimentaire formée dans l'eau de mer fortement minéralisée, dans les lagunes et les déserts salés (sebkhas).

**Érosion:** enlèvement, abrasion des roches par l'action des glaciers, de l'eau et du vent.

**Faille:** zone où deux compartiments rocheux se sont déplacés l'un contre l'autre.

**Fossiles:** restes de plantes et d'animaux du passé ; principalement des fossiles.

**Gypse:** nom minéral et rocheux du sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ). Le gypse est une roche sédimentaire (roche d'évaporite) des lagunes sursalées et des sebkhas.

**Gneiss:** Roche métamorphique formée par recristallisation. Stratifié en couches du cm à plusieurs dm d'épaisseur.

**Granit:** roche magmatique massive, formée par l'intrusion de magma dans la croûte terrestre et la cristallisation par refroidissement. Composition : feldspath, quartz, mica et minéraux subordonnés.

**Günz, Mindel, Riss, Würm:** les quatre glaciations classiques des 800 000 dernières années du Pléistocène.

**Hauptrogenstein, («Grande Oolithe»):** formation rocheuse calcaire grossièrement stratifiée provenant du Dogger moyen. Les "Rogen" sont des globules calcaires de dimension mm (des «ooides»). Ils se sont formés dans la zone des vagues d'une mer peu profonde et agitée.

**Interglaciaire:** période d'un climat chaud entre deux glaciations. Nous vivons actuellement dans un interglaciaire appelé Holocène.

**Jura plissé:** partie sud du Jura avec des couches de roches plissées et parfois superposées.

**Jura tabulaire :** partie nord du Jura. Les roches du Jura tabulaire ne sont généralement pas plissées, mais peuvent être décalées les unes par rapport aux autres par des fractures et des failles (par exemple le rift de la vallée du Rhin et ses contreforts).

**Karst :** cavités souterraines (grottes) et reliefs de surface (dolines, «lapiaz») sur des roches carbonatées (dolomie, roches calcaires) et des roches évaporitiques (sulfate, roches salines). Le karst est principalement formé par la dissolution de carbonates et d'évaporites par la circulation des eaux de surface et souterraines.

**Mica** : "phyllosilicate" (en feuillets) et aluminosilicate, composé principalement d'aluminium, de silicium, calcium et autres. Les phyllosilicates forment de fines feuilles ou écailles qui scintillent au soleil. Couleurs : Transparent (muscovite, séricite), noir à vert foncé (biotite), vert (chlorite) Origine : Formé lors de la cristallisation des granits et lors de la métamorphose.

**Nappe**: ce terme désigne les grandes unités géologiques (ou tectoniques), s'étendant souvent sur plusieurs kilomètres) qui ont été poussées les unes sur les autres lors du plissement des Alpes (chevauchements).

**Période glaciaire (glaciation)**: période de l'histoire de la terre avec un climat froid et une avancée importante des glaciers alpins.

**Plis, plier** : couches de roches pliées par pression latérale. Le terme "plissement alpin" désigne les processus tectoniques qui ont conduit à la formation des Alpes.

**Roche consolidée**: roche sédimentaire compacte souvent cimentée par un ciment carbonaté ou siliceux; mais aussi roches cristallines métamorphiques et intrusives.

**Roche meuble**: roche sans cohésion ferme, ni cimentée, ni cimentés ("boue", argile, limon, **sable, gravier**).

**Marne**: roche solide et tendre constituée d'un mélange d'argile et de carbonate.

**Métamorphose** : processus de transformation des minéraux et des roches, à des températures et pressions élevées (> 200 °C). Dans les Alpes, la métamorphose (ou le métamorphisme) est liée au plissement alpin (orogénèse).

**Molasse** : roche constituée des produits de l'érosion des Alpes: conglomérats, grès, marnes et roches argileuses. On distingue la molasse marine déposée en mer et la molasse d'eau douce formée par les rivières et les lacs.

**Nagelfluh** : terme populaire désignant les conglomérats de molasse d'eau douce et de graviers cimentés de l'ère glaciaire.

**Plate-forme, plate-forme carbonatée, plate-forme maritime**: mer peu profonde («shelf»), généralement avec une profondeur d'eau inférieure à environ 250 m, dans laquelle des carbonates se déposent.

**Quartz**: minéral transparent ou blanchâtre composé de silicium et d'oxygène (SiO<sub>2</sub>). Un des minéraux les plus courants dans la composition de la croûte terrestre.

**Quartzite**: roche constituée de quartz, soit d'origine sédimentaire (sable), soit provenant de la cristallisation dans des fissures.

**Sebkha** : lac salé ou plaine salée dans un climat aride (désert).

**Roches sédimentaires, sédiments** : roches sédimentaires continentales et marines. Les roches sédimentaires "détritiques" telles que les roches argileuses, les marnes, les grès, les brèches et les conglomérats se distinguent des roches d'origine biologique ou chimique telles que les roches carbonatées, le gypse et le sel gemme.

**Silicates, roches silicatées**: minéraux (roches) avec une proportion importante de silicium.

**Subduction, zone de subduction**: lorsque deux plaques terrestres se rapprochent l'une de l'autre (tectonique des plaques, dérive des continents), une plaque avec des roches denses (roches océaniques) plonge sous une plaque avec des roches moins denses (roches continentales) et s'enfonce en profondeur. La collision est à l'opposé de la subduction.

**Synclinal**: grand pli dont le «dos» (l'axe) du plis est localisé plus bas que les flancs.

# Bibliographie

La plupart des descriptions des visites sur le terrain comprennent également une bibliographie. La bibliographie ci-dessous est donc limitée aux références des titres cités dans le texte des chapitres A, B et C.

Audra, P., Bini, A., Gabrovsek, F. & al. 2007: Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography. *Acta Carsologica* 36/1, 53-68.

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*.

Bolliger T., Feijar O., Graf H., Kälin D. 1996: Vorläufige Mitteilung über Funde von pliozänen Kleinsäugetern aus den höheren Deckenschottern des Irchels (Kt. Zürich). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 89, 1043-1048.

Caron, C., Homewood, P., & Wildi, W. 1989: The original Swiss flysch: a reappraisal of the type deposits in the Swiss prealps. In: *Earth-Science Reviews* 26, n° 1-3, p. 1-45.

Cuenca-Bescos, G. 2015: The Pleistocene small mammals from Irchel, Switzerland; a taxonomic and biostratigraphic Revision. *ENSI*, 48 p.

Davaud, E., Gorin, G. & Rusillon, E. 2014: Reef and lagoonal bituminous carbonates from the Kimmeridgian of the western Jura mountains. *International sedimentological congress, IAS, Geneva*, 17 p.

Decrouez, D., Furrer, H., Weissert, H. & Wildi, W. 1997: *Geologie und Zeit*. Vfd, Zürich, 62 S.

Eberl, B. 1930: *Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland*. – Benno Filser Verlag, Augsburg.

Graf H.R. 1993: *Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz*, Dissertation Diss. ETH Nr: 10205, ETH Zürich, Zürich.

Heer, O. 1883: *Die Urwelt der Schweiz*. Schulthess-Verlag Zürich.

Heim, A. 1932: *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz & Wasmuth, 218 S.

Kay, C.E. 2009: Tethyan–Mediterranean organic carbon-rich sediments from Mesozoic black shales to sapropels. *Sedimentology* 56, 247-266.

Marthaler, M. 2005: *Le Cervain est-il Affricain?* LEP Loisirs et pédagogie, Lausanne, 96 p.

Marthaler, M. 2019: *Moiry: de l'Europe à l'Afrique*. Editions LEP, Le Mont sur Lausanne.

Müller, W.H., Huber, M., Isler, A. & Klebot, P.h 1984: *Erläuterungen zur Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000*. Nagra, NTB 84-25, Baden.

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.

Penck, A. & Brückner, E. 1901/1909: *Die Alpen im Eiszeitalter*. C. H. Tauchnitz, Leipzig, 1199 S. in drei Bänden.

Pfiffner, O.A. 2015: *Geologie des Alpen*. Haupt Bern, 400 S. dritte Aufl.

Pfiffner, O.A. 2022: The Flims Rock Avalanche: Structure and consequences. Swiss J. Geosciences, <https://doi.org/10.1186/s00015-022-00424-x>.

Pfiffner, O.A., Ivy-Ochs, S., Mussina, Z., Aaron, J., Steinemann, O., Vockenhuber, Ch., Akçar, N. 2022: The Tamins rock avalanche (eastern Switzerland): timing and emplacement processes. Landslides..

Preusser, F., Graf, H.R., Keller, O., Krayss, E. & Schlüchter Ch. 2011: Quaternary glaciation history of northern Switzerland. , E&G Quaternary Science Journal 60/2-3, 282-305

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.

Schaefer, I. 1957 : Erläuterungen zur Geologischen Karte von Augsburg und Umgebung 1 : 50 000. – Bayrisches Geologisches Landesamt, München.

Schlüchter, Ch. 1976: Geologische Untersuchungen im Quartär des Aaretals südlich von Bern (Stratigraphie, Sedimentologie, Paläontologie). Beitr. geol. Karte Schweiz (N.F.) 148.

Schminke, Th., Frechen, H.-U., & Schlüchter, C. 2008: Quaternary. - In: McCann, T. (Ed.): The Geology of Central Europe, vol. 2, Mesozoic and Cenozoic, Chapter 20: 1287-1347.- The Geological Society (London).

Seguino, J., Ivy-Ochs, S., Juvet, G., Huss, M., Funk, M. & Preusser, F. 2018: Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps. The Cryosphere, 12, 3265–3285.

Shackleton, N. J. 1967: Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures reassessed; Nature 215, 15-17.

Singeisen, C., Ivy-Ochs, S., Wolter, A. et al. 2020: The Kandersteg rock avalanche (Switzerland): integrated analysis of a late Holocene catastrophic event. Landslides 17, 1297–1317 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01365-y>.

Spratt, M. & Lorraine E. Lisiecki, L.E. 2016: A Late Pleistocene sea level stack Rachel. Clim. Past, 12, 1079–1092.

Trümpy, R. 1980: 1980: Geology of Switzerland, a guide-book; Wepf Verlag, Basel.

Ungricht, S. & Pika-Biolzi, M. (ohne Datum): Öhningen am Bodensee. Die Klassische Fossilagerstätte erlaubt eine Rekonstruktion der Lebensbedingungen im Alpenvorland vor 13 Millionen Jahren. ETH Zürich, Earth science collections. [https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/erdw/erdwissenschaftliche-sammlungen/documents/Ohningen\\_DE.pdf](https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/erdw/erdwissenschaftliche-sammlungen/documents/Ohningen_DE.pdf)

Weissert, H. & Stössel, I. 2015: Der Ozean im Gebirge. Vdf Zürich, 198 S. dritte Aufl.

Wildi, W. 2017a: Geo-Wanderung im Drumlinzirkus von Schwand (Menzingen), Univ. de Genève, 8 S., <https://www.erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-im-drumlinzirkus-von-schwand-menzingen/>

Wildi, W. 2017b: Zinal: histoire naturelle et présence humaine / Zinal: Natural history and human presence. <https://www.erlebnis-geologie.ch/wp-content/uploads/2018/02/Zinal-guide-1.pdf>

Wildi, W., Corboud, P., Gorin, G. & Girardclos, S. 2017: Guide : géologie et archéologie de Genève / Guidebook: geology and archaeology of Geneva, 2e éd., 93 p. Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Univ. Genève. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:92676>

Wildi, W., Gurny-Masset, P. & Sartori, M. 2016: Führer durch die Gletscherlandschaften des Val d'Hérens. Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Genève, 35 p. <http://www.unige.ch/forel/fr/services/guide/valdherens/>

Wildi, W. & Lambert, A. 2019: Erdgeschichte und Landschaften im Kanton Aargau. Aarg. Natf. Ges, Aarau, 2. Aufl.



Fascination de l'histoire de la Terre: Le Cervin, une montagne africaine en Valais? (Michel Marthaler, photo: Christophe Wildi)