5.1 Eboulis froids (et autres formations poreuses) de basse altitude

geomorphologie-montagne.ch/5-1-eboulis-froids-et-autres-formations-poreuses-de-basse-altitude/

Situés à basse et moyenne altitude, en dessous de 2000 m, les éboulis froids se caractérisent par la présence de mystérieux courants d'air frais et un refroidissement anormal du sol. Ces conditions particulières ont notamment été utilisées pour construire des « frigos naturels » avant le 20ème siècle.

Plusieurs centaines de mètres en dessous de la limite inférieure du pergélisol discontinu située vers 2'500 mètres d'altitude (cf. fiche pergélisol 1.6), des sols gelés et de la glace pérenne ou saisonnière se retrouvent dans de nombreuses formations sédimentaires poreuses (**éboulis froids**, glacier rocheux fossile, dépôts d'éboulement) (fig. 1 et 2) ainsi que dans des cavités souterraines (glacières ou grottes glacées, cf. fiche pergélisol 5.5).

L'existence de conditions fraîches au pied des éboulis de basse altitude est connue depuis plusieurs siècles. Horace Bénédicte De Saussure relevait en 1796 lors de son voyage autour des Alpes qu'un « *berger observa que pendant les grandes chaleurs, ses brebis allaient toutes mettre le nez contre terre de préférence sur certaines places, (…) au pied d'une montagne tout couvert de débris anguleux, d'où sortait un vent frais* ». De nombreux documents historiques datant des voyages scientifiques d'Horace Bénédicte De Saussure (1796), de Ferdinand Keller (1839) ou d'Edwin Swift Balch (1900) aux 18ème et 19ème siècles, rapportent ainsi déjà la présence d'éboulis sur-refroidis à basse altitude, même si les auteurs ne les présentent pas en ces termes. A cette époque, ils étaient essentiellement connus sous le terme de **''trous à vent''**.

Il est intéressant de noter que **les anciens attribuaient déjà ces conditions froides à l'existence d'un courant d'air** et avaient déjà compris certaines caractéristiques fondamentales du processus de refroidissement des éboulis (cf. fiche pergélisol 5.2). Ce courant d'air frais naturel a été exploité dans le passé pour la construction de **caves à lait** (Milchkeller, Milchhüttchen) dans lesquelles « *le lait s'y conservait pendant trois semaines sans se gâter, la viande un mois, et les cerises d'une année à l'autre* » (De Saussure 1796). Ces cabanons, dont certains étaient aussi dédiés à la conservation de la neige, étaient très répandus en Suisse centrale et orientale ainsi qu'au Tessin (fig. 3). De nos jours, une cave construite au pied d'un éboulis froid au Rif Bruyant (Alpes françaises) est toujours utilisée pour l'affinage des fromages (fig. 4).

Le sur-refroidissement des parties inférieures d'éboulis de basse et moyenne altitude **est un phénomène très répandu** (fig. 5). En Europe, plus de 140 éboulis froids ont pu être recensés dans la littérature scientifique en se basant sur l'occurrence des indices classiques de sur-refroidissement (cf. fiche pergélisol 5.3) à savoir : toponymie du lieu rappelant la présence de glace à basse altitude, description de glace et de courant d'air frais en été, existence de forêts d'arbres nains ou d'écosystèmes abyssaux, ou encore, pour des textes plus anciens, présence de caves à lait. Les sites concernés sont

pour la plupart localisés dans la partie basse de pentes d'éboulis (parfois d'éboulement ou de glaciers rocheux fossiles) et leurs dimensions varient de quelques centaines de mètres carrés à quelques hectares.

Fig. 1 – La combe de Dreveneuse (Chablais valaisan) et ses imposants voiles d'éboulis.

Fig. 1 – La combe de Dreveneuse (Chablais valaisan) et ses imposants voiles d'éboulis.

Fig. 2 – Le glacier rocheux fossile du Gros Chadoua (Préalpes fribourgeoises) s'est développé en contrebas d'un large voile d'éboulis. Des moraines tardiglaciaires se rencontrent également sur le site. Une zone d'arbres nains, des cristaux de glace et de forts courants d'air froids ont été découverts sur le complexe éboulis – glacier rocheux fossile.

Fig. 2 – Le glacier rocheux fossile du Gros Chadoua (Préalpes fribourgeoises) s'est développé en contrebas d'un large voile d'éboulis. Des moraines tardiglaciaires se rencontrent également sur le site. Une zone d'arbres nains, des cristaux de glace et de

forts courants d'air froids ont été découverts sur le complexe éboulis – glacier rocheux fossile.

Fig. 3 – Caves à lait de Seelisberg (Lucerne) décrite par Ferdinand Keller (1839). Aujourd'hui les maisons en bois ont disparu, mais des murets de pierre formant un carré de 2 mètres de côté sont toujours visibles dans les parties basses de la pente d'éboulis. Il est possible que les caves à lait aient été construites à cet endroit.

Fig. 3 – Caves à lait de Seelisberg (Lucerne) décrite par Ferdinand Keller (1839). Aujourd'hui les maisons en bois ont disparu, mais des murets de pierre formant un carré de 2 mètres de côté sont toujours visibles dans les parties basses de la pente d'éboulis. Il est possible que les caves à lait aient été construites à cet endroit.

Fig. 4 – Construite à la base d'un éboulis, la cave à fromage du Rif Bruyant est toujours utilisée pour l'affinage des fromages en raison des températures froides qui s'y maintiennent durant toute la saison estivale.

Fig. 4 – Construite à la base d'un éboulis, la cave à fromage du Rif Bruyant est toujours utilisée pour l'affinage des fromages en raison des températures froides qui s'y maintiennent durant toute la saison estivale.

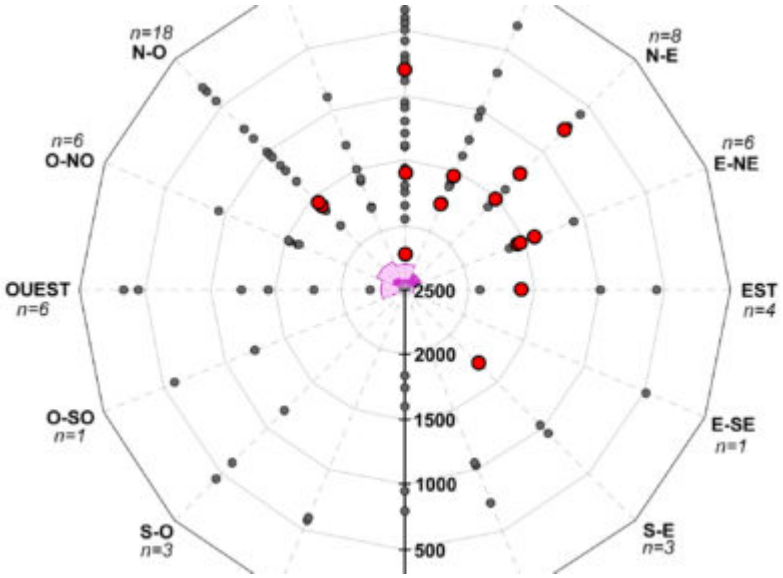


Fig. 5 – Répartition des éboulis froids décrits dans la littérature en fonction de l'altitude et de l'orientation. Les cercles rouges indiquent la position des sites d'étude de Suisse occidentale présentés dans la thèse de Morard (2011) et dans les travaux de Delaloye (2004), Lambiel (2006) et Dorthe & Morard (2007). La zone rose claire au centre du quadrant indique l'extension du pergélisol discontinue selon le modèle Haute-Alpes calcaires (Imhof 1996), la zone violette les limites définies par le modèle Entremont (Delaloye & Morand 1997). Tous les sites sont (largement) localisés en dessous de la limite régionale du pergélisol discontinu.

Fig. 5 – Répartition des éboulis froids décrits dans la littérature en fonction de l'altitude et de l'orientation. Les cercles rouges indiquent la position des sites d'étude de Suisse occidentale présentés dans la thèse de Morard (2011) et dans les travaux de Delaloye (2004), Lambiel (2006) et Dorthe & Morard (2007). La zone rose claire au centre du quadrant indique l'extension du pergélisol discontinue selon le modèle Haute-Alpes calcaires (Imhof 1996), la zone violette les limites définies par le modèle Entremont (Delaloye & Morand 1997). Tous les sites sont (largement) localisés en dessous de la limite régionale du pergélisol discontinu.

5.2 Circulation d’air par effet de cheminée

geomorphologie-montagne.ch/circulation-dair-par-effet-de-cheminee/

Le sur-refroidissement des éboulis de basse et moyenne altitude est causé par un mécanisme de circulation d’air appelé effet de cheminée. Le courant d’air à l’intérieur de l’éboulis est ascendant en hiver et descendant en été.

Les terrains sédimentaires composés de blocs et d’interstices poreux comme les éboulis et les glaciers rocheux fossiles peuvent être traversés par un courant d’air selon un mécanisme appelé **effet de cheminée**. Ce processus de **ventilation bidirectionnelle** a été initialement décrit dans les réseaux souterrains à plusieurs entrées dénivelées (cf. fiche pergélisol 5.5). Ces « *vents des ténèbres* » sont essentiellement d’origine thermique, leur direction et leur vitesse étant en effet fonction **du gradient de température existant entre l’intérieur et l’extérieur du système ventilé**. L’évolution des températures peut y être séparée en deux phases distinctes : **le régime hivernal (ascendant) et le régime estival (descendant)** (fig. 1).

- En régime hivernal, l’air à l’intérieur de la formation ventilée est plus chaud (et donc plus léger) que l’air extérieur et le courant d’air devient ascendant (fig. 2). En conséquence, **de l’air froid est aspiré** avec une zone de refroidissement maximal située une dizaine de mètres en amont du pied de l’éboulis (fig. 3). Des trous d’aspiration favorisent la pénétration de l’air extérieur froid dans le terrain qui se produit cependant aussi à travers un épais manteau neigeux ! Les blocs composant l’éboulis ainsi que les terrains non-poreux sous-jacents et adjacents (roche en place, moraine) emmagasinent par conduction le froid apporté par le courant d’air. L’éboulis profite donc de toutes les périodes froides de l’hiver pour se refroidir sous le point de congélation et **former un “réservoir de froid”** (fig. 4). L’aspiration d’air froid et sec en hiver entraîne également un assèchement des parties basses du terrain. La glace présente dans les éboulis ne se forme donc pas en hiver mais lors de la fonte des neiges au printemps.
- En régime estival, **le froid emmagasiné durant l’hiver s’écoule par gravité de préférence aux points les plus bas** de l’éboulis ou du glacier rocheux fossile. Un décalage spatial existe donc entre la zone où le refroidissement hivernal est le plus marqué et celle où le réchauffement estival est minimal (fig. 1). Durant l’été, la tendance générale de l’évolution des températures dans un trou à vent est à la stabilité, même s’il existe des variations de faibles ampleurs inversement proportionnelles à l’évolution de la température de l’air extérieur. Autrement dit, **plus il fait chaud à l’extérieur, plus le courant d’air sortant de l’éboulis est frais** (fig. 5). Ce dernier se maintient à saturation (100% d’humidité relative) durant l’été, s’humidifiant en traversant l’éboulis froid rendu humide par la percolation des eaux de la fonte des neiges.

- L’automne et le printemps sont des périodes durant lesquelles le système de ventilation va passer par étapes du régime estival au régime hivernal (et inversement). **Le seuil thermique de réversibilité** du courant d’air est fonction de la température générale du système ventilé (fig. 6) et se situe à une température de l’air extérieur plus élevée en automne qu’au printemps (l’éboulis s’étant réchauffé en été et refroidi en hiver). Au Creux-du-Van (Jura neuchâtelois) par exemple, le seuil d’inversion est situé vers +6°C en automne et vers +1/+2°C au printemps.

Si la ventilation par effet de cheminée est le processus dominant pour expliquer le sur-refroidissement des éboulis de basse et moyenne altitude, d’autres facteurs interviennent de façon secondaire pour renforcer ou limiter cet effet : déficit d’ensoleillement, refroidissement lié à un processus d’évaporation estival par absorption de chaleur latente, limitation de l’effet de la radiation solaire au sol par la présence de végétation ou de tapis de mousse, granulométrie de l’éboulis, etc.

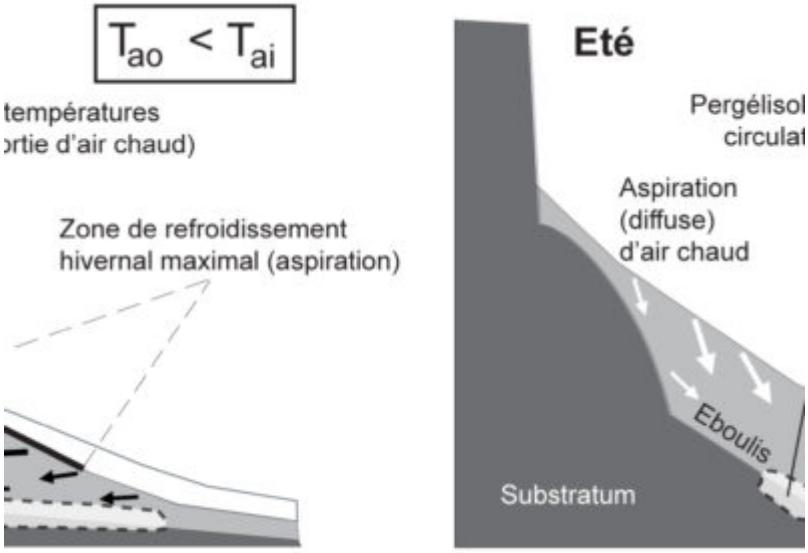


Fig. 1 – Représentation schématique du processus de circulation d’air par effet de cheminée dans un éboulis de basse altitude en mode hivernal (ventilation ascendante) et estival (décharge gravitationnelle d’air froid). Noter l’asymétrie du processus et la position différenciée des secteurs froids hivernaux et estivaux. Tao = température de l’air extérieur ; Tai = température moyenne de l’éboulis (source : Delaloye 2004).

Fig. 1 – Représentation schématique du processus de circulation d’air par effet de cheminée dans un éboulis de basse altitude en mode hivernal (ventilation ascendante) et estival (décharge gravitationnelle d’air froid). Noter l’asymétrie du processus et la position différenciée des secteurs froids hivernaux et estivaux. Tao = température de l’air extérieur ; Tai = température moyenne de l’éboulis (source : Delaloye 2004).

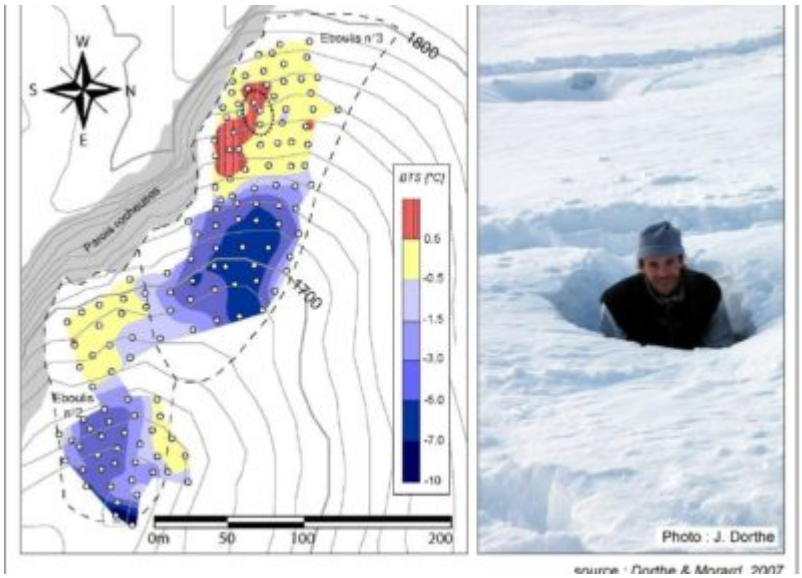


Fig. 2 – Interpolation par krigeage simple de mesures BTS effectuées le 8 février 2005 dans les éboulis de la combe de Vudèche (Préalpes fribourgeoises). Dans les parties basses des éboulis, une zone sur-refroidie (entre -5 et -10°C) est présente malgré un manteau neigeux épais de 1.5 à 2 mètres. Dans les parties supérieures, les températures sont plus chaudes (voire positives), avec la présence de puits à air chaud (cercle noir et photo). Cette distribution thermique à la surface du sol est caractéristique d'un système de ventilation en régime hivernal (source : Dorthe & Morard, 2007).

Fig. 2 – Interpolation par krigeage simple de mesures BTS effectuées le 8 février 2005 dans les éboulis de la combe de Vudèche (Préalpes fribourgeoises). Dans les parties basses des éboulis, une zone sur-refroidie (entre -5 et -10°C) est présente malgré un manteau neigeux épais de 1.5 à 2 mètres. Dans les parties supérieures, les températures sont plus chaudes (voire positives), avec la présence de puits à air chaud (cercle noir et photo). Cette distribution thermique à la surface du sol est caractéristique d'un système de ventilation en régime hivernal.

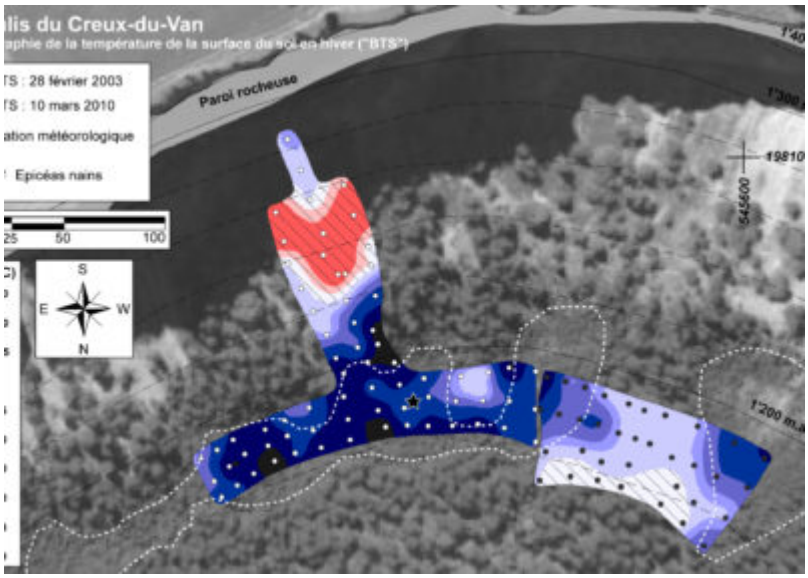


Fig. 3 – Carte des températures de la surface du sol en hiver (BTS) sur l'éboulis du Creux-du-Van le 28 février 2003 (points gris) et le 10 mars 2010 (points blancs). La zone maximale de refroidissement hivernal s'étend jusqu'au milieu de la pente d'éboulis à l'amont des secteurs à épicéas nains (source : Morard, 2011).

Fig. 3 – Carte des températures de la surface du sol en hiver (BTS) sur l'éboulis du Creux-du-Van le 28 février 2003 (points gris) et le 10 mars 2010 (points blancs). La zone maximale de refroidissement hivernal s'étend jusqu'au milieu de la pente d'éboulis à l'amont des secteurs à épicéas nains (source : Morard, 2011).

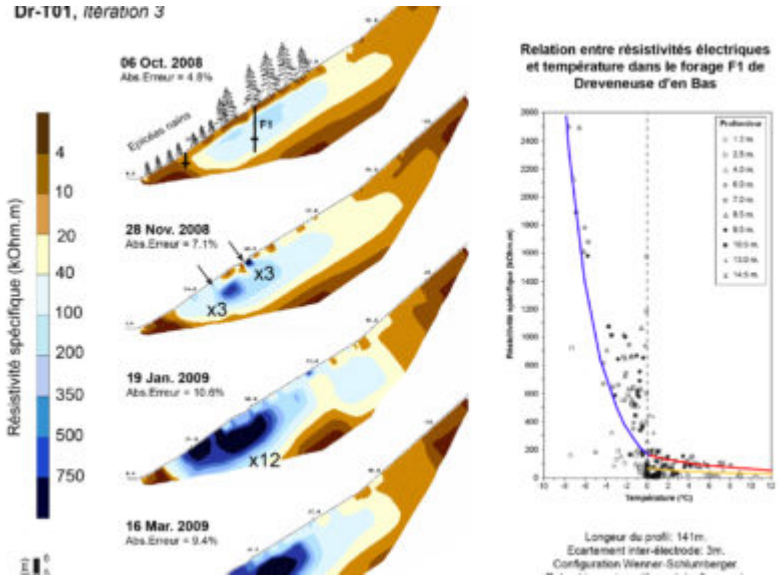


Fig. 4 – Monitoring des résistivités électriques dans l'éboulis froid de Dreveneuse d'en Bas. L'augmentation des résistivités du sous-sol durant l'hiver s'expliquent en grande partie par le refroidissement et l'assèchement de l'éboulis consécutif à l'aspiration d'air extérieur froid. Le gel du terrain est profond et la zone de refroidissement ne se limite pas uniquement à la partie inférieure de la pente d'éboulis (source : Morard 2011).

Fig. 4 – Monitoring des résistivités électriques dans l'éboulis froid de Dreveneuse d'en Bas. L'augmentation des résistivités du sous-sol durant l'hiver s'expliquent en grande partie par le refroidissement et l'assèchement de l'éboulis consécutif à l'aspiration d'air extérieur froid. Le gel du terrain est profond et la zone de refroidissement ne se limite pas uniquement à la partie inférieure de la pente d'éboulis (source : Morard 2011).

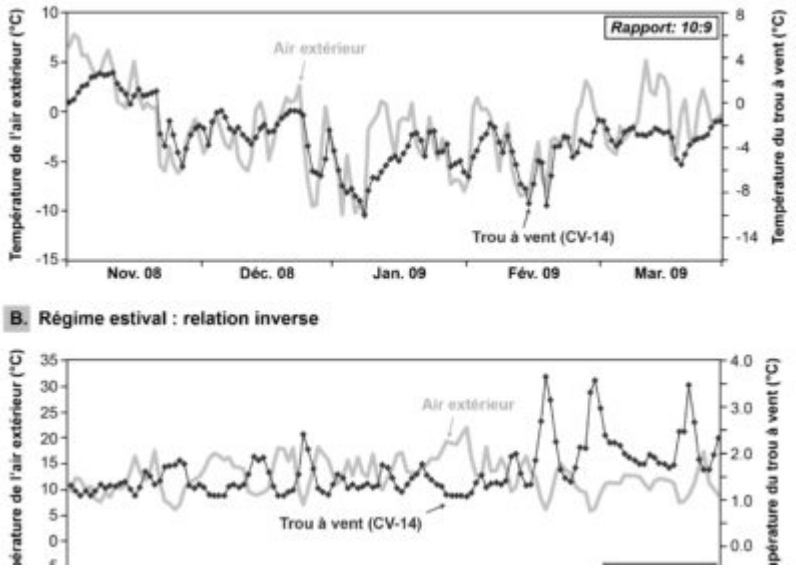


Fig. 5 – Evolution de la température de l'air extérieur (courbe grise) et du trou à vent du Creux-du-Van (courbe noire) durant l'hiver (A) et l'été (B). A) en hiver, l'évolution des températures est synchrone : une baisse des températures extérieures se traduit par une baisse de la température du courant d'air aspiré dans l'éboulis. B) en été, l'évolution des températures est inverse : une augmentation des températures extérieures se traduit par une baisse de la température du courant d'air expulsé dans l'éboulis. En effet, comme le contraste thermique augmente entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis, le courant devient plus fort et expulse plus de « froid » de l'éboulis (source : Morard, 2011).

Fig. 5 – Evolution de la température de l'air extérieur (courbe grise) et du trou à vent du Creux-du-Van (courbe noire) durant l'hiver (A) et l'été (B). A) en hiver, l'évolution des températures est synchrone : une baisse des températures extérieures se traduit par une baisse de la température du courant d'air aspiré dans l'éboulis. B) en été, l'évolution des températures est inverse : une augmentation des températures extérieures se traduit par une baisse de la température du courant d'air expulsé dans l'éboulis. En effet, comme le contraste thermique augmente entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis, le courant devient plus fort et expulse plus de « froid » de l'éboulis (source : Morard, 2011).

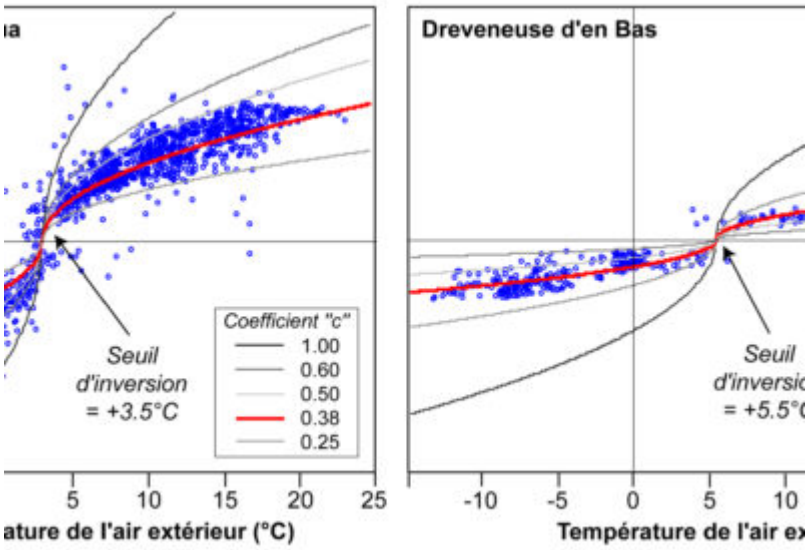


Fig. 6 – Relation entre la température de l’air extérieur (axe X) et la vitesse et direction du courant d’air (axe Y) dans le trou à vent du Gros Chadoua (à gauche) et dans la partie basse de l’éboulis de Dreveneuse d’en Bas (à droite). La direction du courant d’air se renverse lorsque la température de l’air extérieur franchit un seuil thermique propre au site d’étude (source : Morard, 2011).

Fig. 6 – Relation entre la température de l’air extérieur (axe X) et la vitesse et direction du courant d’air (axe Y) dans le trou à vent du Gros Chadoua (à gauche) et dans la partie basse de l’éboulis de Dreveneuse d’en Bas(à droite). La direction du courant d’air se renverse lorsque la température de l’air extérieur franchit un seuil thermique propre au site d’étude (source : Morard, 2011).

5.3 Indices de refroidissement des éboulis froids

geomorphologie-montagne.ch/5-3-indices-de-refroidissement-des-eboulis-froids/

Une évolution saisonnière des températures du sol très contrastée entre la partie haute et la partie basse d'un éboulis constitue le signal thermique typique d'un éboulis froid.

Pour identifier la présence d'un éboulis froid, les chercheurs/euses se basent sur trois types d'indices : un régime thermique de la surface du sol (à 50 cm de profondeur) très contrasté entre la partie haute et basse de l'éboulis, la présence de manifestations visuelles particulières et l'existence d'écosystèmes caractéristiques des régions froides qui ne devraient donc pas se trouver à cet endroit.

Le régime thermique d'un éboulis froid présente un **grand contraste saisonnier entre sa partie supérieure et inférieure** (fig. 1).

- *Partie basse de l'éboulis* : les températures du sol sont froides durant l'hiver suivant relativement bien l'évolution des températures de l'air extérieur. **En été en revanche, les températures restent fraîches et relativement stables**. Une anomalie thermique négative (refroidissement) qui peut atteindre 3 à 7°C par rapport à y est mesurée.
- *Partie supérieure de l'éboulis* : En été, les températures du sol y sont élevées suivant relativement bien l'évolution des températures de l'air extérieur. **En hiver au contraire, les températures du sol restent généralement positives** (fig. 2) avec une tendance décroissante durant l'hiver. Dans l'éboulis du Bois de Finges par exemple (fig. 1), la température du sol dans la partie supérieure de l'éboulis reste exceptionnellement chaude durant la période hivernale (+10°C en novembre et +5°C en mars).

De nombreuses manifestations visuelles se développent au fil des saisons en lien avec le régime thermique contrasté existant entre la partie haute et basse d'un éboulis froid. Durant l'été, un **courant d'air frais** (moins de 5°C) est perceptible entre les blocs de la partie inférieure de l'éboulis (fig. 2). Il est aussi fréquent d'y trouver de la **glace de congélation** ou des restes de neige (fig. 3 & 4). De la glace a également été couramment signalée en profondeur lors de l'excavation d'un éboulis pour la construction d'une route. Dès le début de l'hiver, les indices visuels les plus facilement observables se concentrent dans la partie haute de l'éboulis. L'air chaud sortant de la partie haute de l'éboulis va en effet faire fondre la neige, développant **des fenêtres de fonte** depuis les premiers froids automnaux jusqu'à la fin de l'hiver (fig. 5).

Dans le Jura et les Préalpes suisses, il est aussi fréquent d'observer la présence de **forêts d'arbres nains** dont certains individus sont d'âge centenaire malgré leur petite taille (souvent moins de 1 mètre de haut) (fig. 4 & 6). Des belles forêts d'arbres rabougris existent par exemple à Dreveneuse d'en Bas (Chablais valaisan), au Creux-du-Van (Jura neuchâtelois) ou au Brüeltobel dans l'Alpstein appenzellois. Ce dernier site est également connu pour sa légende de la « Forêt des Sorcières » (Hexenwäldi) (fig. 7).

De nombreuses études botaniques et écologiques réalisées en Suisse, en Allemagne et en République tchèque ont également montré qu'un **riche cortège floristique et faunistique typique des milieux froids des hautes altitudes et des hautes latitudes** occupent les parties inférieures d'éboulis de basse altitude. Certains auteurs considèrent que les éboulis froids font office d'exceptionnelles niches écologiques abyssales qui auraient pu conserver un micro-climat périglaciaire stable depuis la fin de la dernière grande glaciation, voire même durant tout le Pléistocène.

Les figures 8 et 9 résument les caractéristiques thermiques et les différents indices visuels se retrouvant dans un complexe éboulis – glaciers rocheux fossile soumis à une ventilation par effet de cheminée.

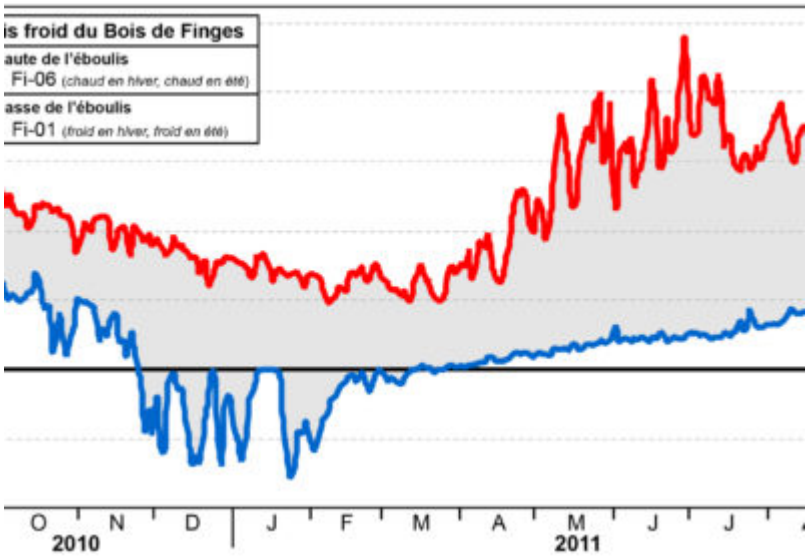


Fig. 1 – Régime thermique contrasté entre la partie haute et basse d'un éboulis froid ventilé (éboulis de Finges, 800 mètres d'altitude). La température moyenne annuelle de l'air à cet endroit est d'environ +9°C, alors que la température moyenne annuelle du sol dans la partie basse de l'éboulis est de +1°C (anomalie thermique négative de 8°C) (source : Morard 2011).

Fig. 1 – Régime thermique contrasté entre la partie haute et basse d'un éboulis froid ventilé (éboulis de Finges, 800 mètres d'altitude). La température moyenne annuelle de l'air à cet endroit est d'environ +9°C, alors que la température moyenne annuelle du sol dans la partie basse de l'éboulis est de +1°C (anomalie thermique négative de 8°C) (source : Morard 2011).

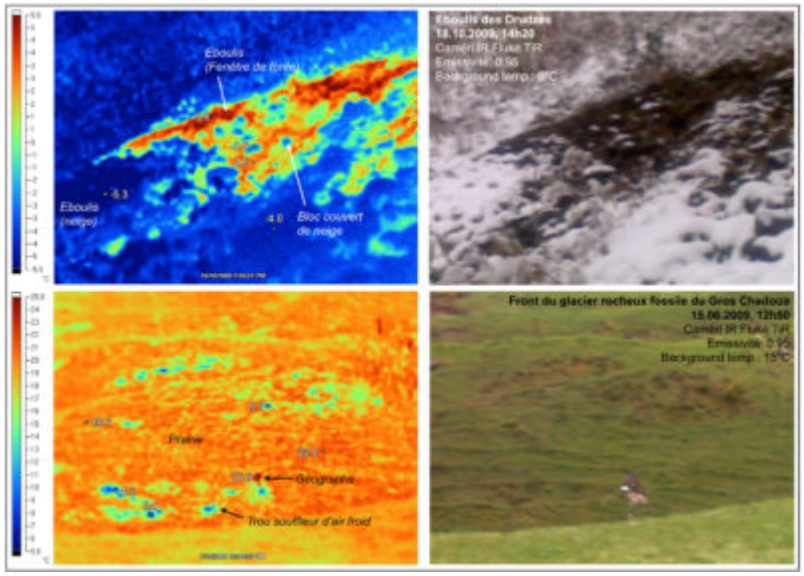


Fig. 2 – Détermination de zones chaudes en début d'hiver (éboulis des Drudzes) et froides en été (front du glacier rocheux fossile du Gros Chadoua) par imagerie thermique IR (source : Morard 2011).

Fig. 2 – Détermination de zones chaudes en début d'hiver (éboulis des Drudzes) et froides en été (front du glacier rocheux fossile du Gros Chadoua) par imagerie thermique IR (source : Morard 2011).

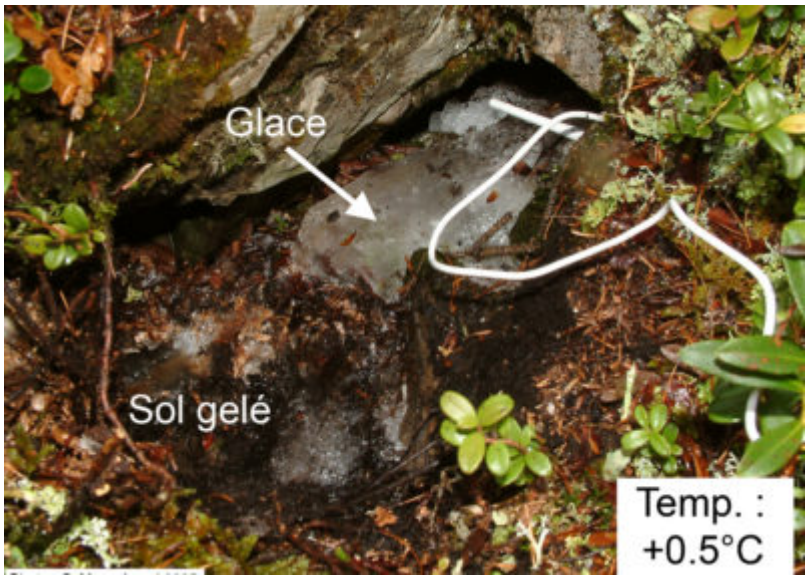


Fig. 3 – Sol gelé et glace massive à la sortie d'un trou souffleur d'air froid dans le glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes (1750 m., région du Col des Mosses, VD).

Fig. 3 – Sol gelé et glace massive à la sortie d'un trou souffleur d'air froid dans le glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes (1750 m., région du Col des Mosses, VD).

Fig. 4 – A gauche : éboulis froid du Chänel Gantrisch (Préalpes fribourgeoises) dont la partie inférieure sur-refroidie est occupée par un groupement d'arbres nains. La forêt climacique est facilement visible en dehors du cône. A droite : épicéa nain avec indication de l'occurrence d'un courant d'air froid et de glace dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas (Valais) (photos : S. Morard et R. Delaloye).

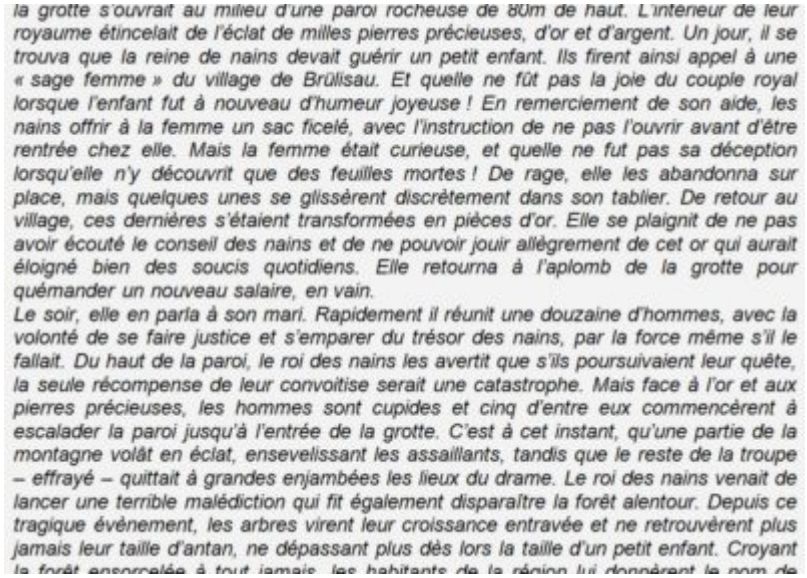
Fig. 4 – A gauche : éboulis froid du Chänel Gantrisch (Préalpes fribourgeoises) dont la partie inférieure sur-refroidie est occupée par un groupement d'arbres nains. La forêt climacique est facilement visible en dehors du cône. A droite : épicéa nain avec indication de l'occurrence d'un courant d'air froid et de glace dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas (Valais) (photos : S. Morard et R. Delaloye).

Fig. 5 – Fenêtres de fonte de la neige (indices d'expulsion d'air chaud) dans la partie haute des éboulis de la combe de Dreveneuse (Chablais valaisan). A : Dreveneuse d'en Haut, B : Dreveneuse du Milieu, C : Dreveneuse d'en Bas (photos : R. Delaloye, novembre 2004).

Fig. 5 – Fenêtres de fonte de la neige (indices d'expulsion d'air chaud) dans la partie haute des éboulis de la combe de Dreveneuse (Chablais valaisan). A : Dreveneuse d'en Haut, B : Dreveneuse du Milieu, C : Dreveneuse d'en Bas.

Fig. 6 – Secteur à épicéas nains dans les éboulis du Creux-du-Van (Jura neuchâtelois).

Fig. 6 – Secteur à épicéas nains dans les éboulis du Creux-du-Van (Jura neuchâtelois).



la grotte s'ouvrait au milieu d'une paroi rocheuse de 80m de haut. L'intérieur de leur royaume étincelait de l'éclat de milles pierres précieuses, d'or et d'argent. Un jour, il se trouva que la reine de nains devait guérir un petit enfant. Ils firent ainsi appel à une « sage femme » du village de Brülisau. Et quelle ne fût pas la joie du couple royal lorsque l'enfant fut à nouveau d'humeur joyeuse ! En remerciement de son aide, les nains offrir à la femme un sac ficelé, avec l'instruction de ne pas l'ouvrir avant d'être rentrée chez elle. Mais la femme était curieuse, et quelle ne fut pas sa déception lorsqu'elle n'y découvrit que des feuilles mortes ! De rage, elle les abandonna sur place, mais quelques unes se glissèrent discrètement dans son tablier. De retour au village, ces dernières s'étaient transformées en pièces d'or. Elle se plaignit de ne pas avoir écouté le conseil des nains et de ne pouvoir jouir allègrement de cet or qui aurait éloigné bien des soucis quotidiens. Elle retourna à l'aplomb de la grotte pour quémander un nouveau salaire, en vain.

Le soir, elle en parla à son mari. Rapidement il réunit une douzaine d'hommes, avec la volonté de se faire justice et s'emparer du trésor des nains, par la force même s'il le fallait. Du haut de la paroi, le roi des nains les avertit que s'ils poursuivaient leur quête, la seule récompense de leur convoitise serait une catastrophe. Mais face à l'or et aux pierres précieuses, les hommes sont cupides et cinq d'entre eux commencèrent à escalader la paroi jusqu'à l'entrée de la grotte. C'est à cet instant, qu'une partie de la montagne volât en éclat, ensevelissant les assaillants, tandis que le reste de la troupe – effrayé – quittait à grandes enjambées les lieux du drame. Le roi des nains venait de lancer une terrible malédiction qui fit également disparaître la forêt alentour. Depuis ce tragique évènement, les arbres virent leur croissance entravée et ne retrouvèrent plus jamais leur taille d'antan, ne dépassant plus dès lors la taille d'un petit enfant. Croyant la forêt ensorcelée à tout jamais, les habitants de la région lui donnèrent le nom de

Fig. 7 – Le légende de la ''Forêt des Sorcières'' du Brüeltobel (traduction libre d'après Baechler 1946).

Fig. 7 – Le légende de la ''Forêt des Sorcières'' du Brüeltobel (traduction libre d'après Baechler 1946).

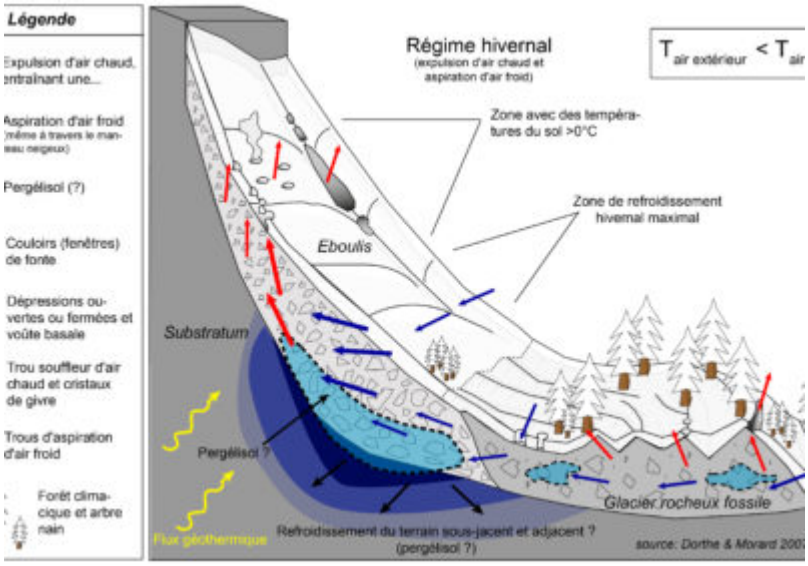


Fig. 8 – Modèle de circulation d'air par effet de cheminée dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime hivernal, avec description des indices visuels (source : Dorthe & Morard, 2007).

Fig. 8 – Modèle de circulation d'air par effet de cheminée dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime hivernal, avec description des indices visuels.

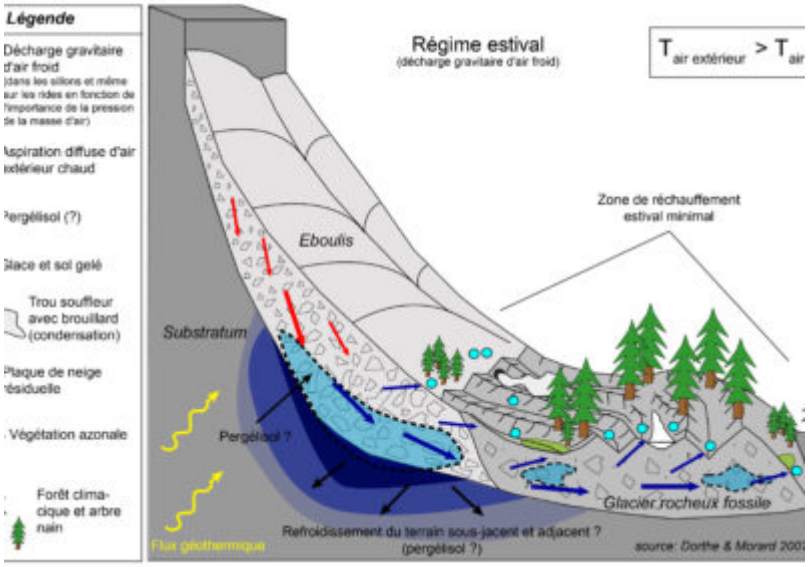


Fig. 9 – Modèle de circulation d'air par effet de cheminée dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime estival, avec description des indices visuels (source : Dorthe & Morard, 2007).

Fig. 9 – Modèle de circulation d'air par effet de cheminée dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime estival, avec description des indices visuels.

5.4 Evolution du régime thermique et occurrence de pergélisol sporadique

geomorphologie-montagne.ch/5-4-evolution-du-regime-thermique-et-occurrence-de-pergelisol-sporadique/

L'évolution à long terme du régime thermique des éboulis froids ventilés est essentiellement dictée par la température de l'air extérieur durant la période hivernale. Sous certaines conditions, un pergélisol tempéré peut sporadiquement se former à l'intérieur de l'éboulis.

Le suivi thermique mené proche de la surface du sol sur plusieurs éboulis froids – depuis 1997 pour la plus longue série de mesures au Creux-du-Van – a permis de montrer d'une part que le régime thermique est très similaire entre les différents sites investigués, et d'autre part que **le facteur clé d'évolution est la température de l'air extérieur durant la période hivernale**. Des périodes de temps froid prolongées et très intenses en hiver favorisent le gel profond à l'intérieur de l'éboulis, comme l'a démontré la répétition de tomographie de résistivité électrique sur le site de Dreveneuse d'en Bas (cf. fiche 3.5.2). A contrario, les températures de l'air extérieur en été ainsi que l'importance de l'enneigement ne contribuent que très modérément à l'évolution du régime thermique des éboulis froids ventilés contrairement aux formations sédimentaires composées de blocs de haute altitude (cf. fiche pergélisol 1.3). Aucun réchauffement significatif du terrain n'a par exemple été observé dans les parties basses des éboulis froids de Suisse romande après l'été caniculaire de 2003 (fig. 1). En revanche, les températures moyennes annuelles du sol dans les parties inférieures des éboulis froids se sont réchauffées de plus de 1°C suite à l'hiver doux de 2006/2007 (fig. 1).

A la base de l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas (fig. 2), l'occurrence d'un **pergélisol tempéré** (0°C) de faible épaisseur a pu être reportée par des mesures en forage en 2004-2006, puis sa fonte dès 2007, et enfin sa réapparition dès 2010 suite à l'hiver très froid 2009-2010 (fig. 3). Depuis 2013, seul un gel saisonnier a pu être constaté dans les forages de cet éboulis. La dynamique du sol gelé dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas diffère ainsi fortement des pergélisols de haute montagne. Il peut être considéré comme un « pergélisol azonal à court terme » (aussi appelé « pereletok » en russe) dont la géométrie semble changer fortement d'une année à l'autre en fonction des températures de l'air extérieur en hiver.

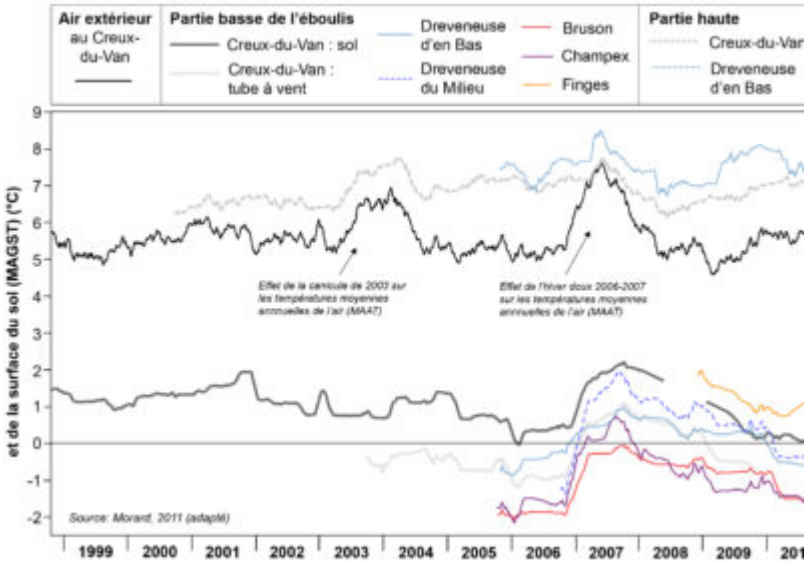


Fig. 1 – Evolution de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) et de la surface du sol (MAGST) dans différents éboulis de Suisse romande. Noter la baisse relative des températures dans la partie basse de l'éboulis froid du Creux-du-Van durant l'été 2003, ainsi que la hausse généralisée des températures du sol dans les parties basses des éboulis durant l'hiver doux 2006-2007. La température du 1er janvier 2003 correspond à la moyenne entre le 1er janvier 2002 et le 1er janvier 2003 (source : Morard, 2011).

Fig. 1 – Evolution de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) et de la surface du sol (MAGST) dans différents éboulis de Suisse romande. Noter la baisse relative des températures dans la partie basse de l'éboulis froid du Creux-du-Van durant l'été 2003, ainsi que la hausse généralisée des températures du sol dans les parties basses des éboulis durant l'hiver doux 2006-2007. La température du 1er janvier 2003 correspond à la moyenne entre le 1er janvier 2002 et le 1er janvier 2003.

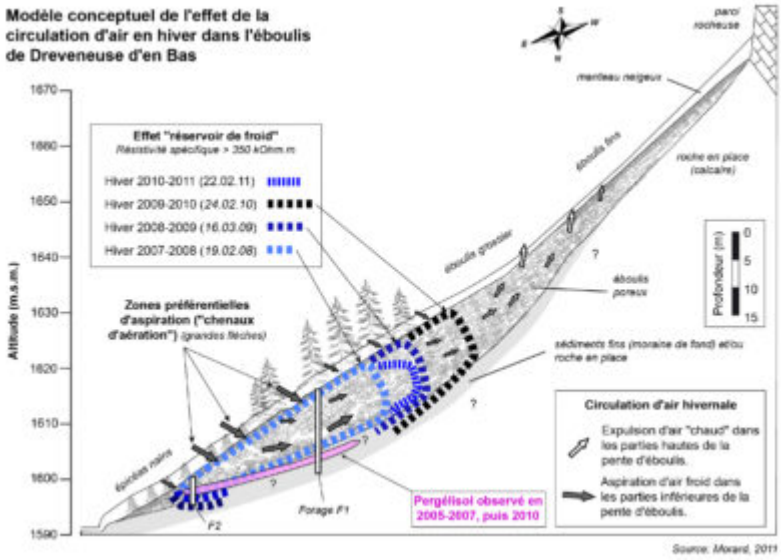


Fig. 2 – Modèle de circulation d'air en hiver et de formation d'un réservoir de froid pour l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas, basé sur les données thermiques de surface et de forages, et sur la répétition de mesures de

tomographie électrique. Durant l'hiver, la zone de forte résistivité électrique grandit en direction de l'amont de l'éboulis, de façon d'autant plus marquée que les températures atmosphériques hivernales sont basses. Cet effet peut s'interpréter comme la taille du réservoir de froid se développant dans l'éboulis (source : Morard 2011).

Fig. 2 – Modèle de circulation d'air en hiver et de formation d'un réservoir de froid pour l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas, basé sur les données thermiques de surface et de forages, et sur la répétition de mesures de tomographie électrique. Durant l'hiver, la zone de forte résistivité électrique grandit en direction de l'amont de l'éboulis, de façon d'autant plus marquée que les températures atmosphériques hivernales sont basses. Cet effet peut s'interpréter comme la taille du réservoir de froid se développant dans l'éboulis.

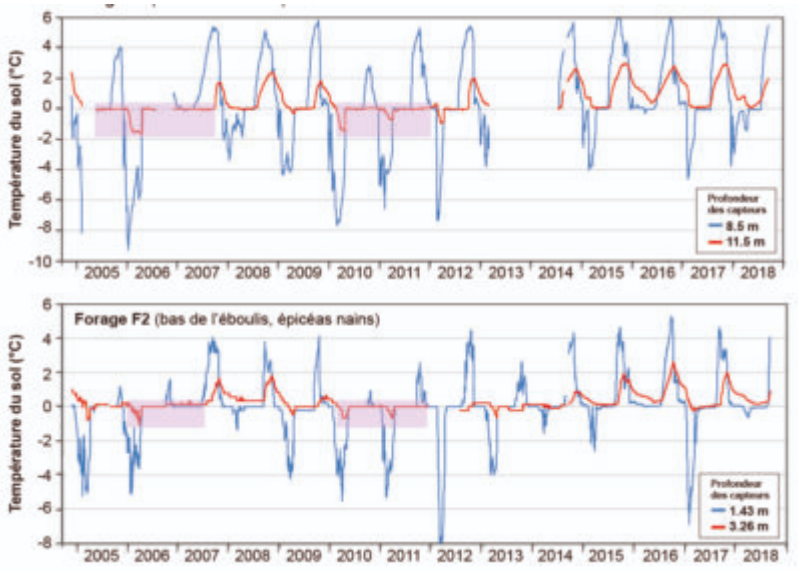


Fig. 3 – Evolution des températures moyennes journalières du sol mesurées à différentes profondeurs dans les forages F1 et F2 de l'éboulis froid de Dreveneuse d'en Bas. Des conditions de pergélisol tempéré (encadrés roses sur la figure) ont été observées épisodiquement entre 9 et 12 mètres de profondeur au milieu de l'éboulis (forage F1) et entre 2 et 3 mètres de profondeur au bas de l'éboulis (forage F2). Localisation des forages sur la figure précédente. Données actualisées consultables sur le site du groupe de recherche Géomorphologie alpine de l'UNIFr.

Fig. 3 – Evolution des températures moyennes journalières du sol mesurées à différentes profondeurs dans les forages F1 et F2 de l'éboulis froid de Dreveneuse d'en Bas. Des conditions de pergélisol tempéré (encadrés roses sur la figure) ont été observées épisodiquement entre 9 et 12 mètres de profondeur au milieu de l'éboulis (forage F1) et entre 2 et 3 mètres de profondeur au bas de l'éboulis (forage F2). Localisation des forages sur la figure précédente. Données actualisées consultables sur le site du groupe de recherche Géomorphologie alpine de l'UNIFr.

5.5 Les glacières (ou grottes glacées)

geomorphologie-montagne.ch/5-5-les-glacieres-ou-grottes-glacees/

Les glacières ou les grottes glacées sont des grottes renfermant de la glace durant toute l'année. L'anomalie thermique négative de ces milieux souterrains peut être causée par un piégeage d'air froid ou par une circulation d'air de type « effet de cheminée ». Le volume de glace des glacières a fortement diminué durant les dernières décennies.

Situées à l'interface des domaines glaciaire et périglaciaire, les **glacières ou grottes glacées** sont des cavités renfermant de la glace et/ou de la neige durant toute l'année. Elles correspondent à un système souterrain caractérisé par une anomalie thermique négative. En Suisse, elles sont relativement fréquentes dans les régions calcaires. Les glacières situées vers 2'500 mètres d'altitude se trouvent à l'intérieur de la ceinture alpine du pergélisol discontinu (fig. 1). Les grottes glacées du massif du Jura et des Préalpes se trouvent en revanche à des altitudes inférieures où la température moyenne annuelle de l'air extérieur (MAAT) est largement supérieure à 0°C.

Classiquement, on distingue deux grandes catégories de glacières en fonction de la dynamique des circulations d'air : les glacières statiques et les glacières dynamiques. Le type de glace présent dans la grotte peut provenir soit du regel d'eau de percolation, soit de la transformation de neige en glace. Dans la réalité, on trouve souvent des régimes mixtes plus complexes que les deux cas présentés ci-dessous.

- **Glacière statique en piège à air froid et/ou en piège à neige** : les cavités comprenant une ou plusieurs entrées ouvertes vers le ciel constituent des pièges thermiques et/ou des pièges à neige (fig. 2). Ce type de glacière se caractérise par un comportement double (fig. 3). Durant l'hiver, le système est ouvert avec un échange d'air par convection et une pénétration d'air froid dans la grotte. Selon la géométrie des orifices d'entrées, de la neige peut également s'accumuler dans la cavité (fig. 4). Pendant la période printanière, les eaux de fonte peuvent percoler jusque dans la cavité et regeler (fig. 5). En parallèle, la neige accumulée durant l'hiver au fond de la grotte va se transformer petit à petit en glace. Durant l'été, le système est fermé : l'air froid emmagasiné durant l'hiver est plus dense que l'air extérieur. Une stratification thermique et la formation d'une poche d'air froid s'observent alors dans la grotte ce qui limite la fonte du volume de glace (fig. 2). De plus, des températures froides se maintiennent durant l'été grâce à la chaleur latente de fusion (cf. fiche pergélisol 2.1) provenant de la fonte d'une partie de la neige tombée en hiver. Dans le massif du Jura, les glacières statiques comme celles de St-Livres (Jura vaudois) et de Monlési (Jura neuchâtelois) sont également protégées du rayonnement solaire par la forêt qui recouvre presque toujours les alentours de la cavité (fig. 6).

- **Glacière dynamique ventilée par un effet de cheminée** : ce type de glacière possède plusieurs entrées dénivelées permettant la mise en place d'une circulation d'air par effet de cheminée (fig. 7). Durant l'hiver, en raison de l'ascendance de l'air plus chaud de la cavité, de l'air froid est aspiré à l'entrée inférieure de la grotte refroidissant les parois de la cavité et créant un réservoir de froid. En été, le processus est inversé et de l'air chaud est aspiré par les entrées supérieures, en réponse au drainage gravitationnel de l'air froid à l'intérieur de la cavité. En conséquence, deux anomalies thermiques (froide en bas, chaude en haut) sont observées par rapport à la température moyenne annuelle de l'air (MAAT). L'eau qui s'infiltre à travers les fissures de la roche peut regeler lorsqu'elle débouche dans la partie inférieure sur-refroidie de la grotte. En Suisse, la zone proche de l'entrée inférieure du Gouffre des Diablotins (Préalpes fribourgeoises) est une glacière de type dynamique (fig. 8).

Même si chaque glacière à un comportement thermique et hydrologique qui lui est propre, l'étude de plusieurs grottes glacées en Suisse et en Europe montre une tendance très nette à une diminution générale plus ou moins continue des volumes de glace durant les dernières décennies (fig. 9). Cette évolution est en grande partie liée aux **modifications observées durant la saison hivernale**. Les hivers plus doux et moins enneigés affectent ainsi particulièrement les glacières situées à basse et moyenne altitude. L'exploitation industrielle de la glace de certaines glacières a aussi contribué à la diminution des volumes de glace.

Fig. 1 – Secteur englacé à l'intérieur du système de grottes karstiques du Lapi du Bou (région du Sanetsch). Située vers 2'500 mètres d'altitude, cette glacière se trouve à l'intérieur de la ceinture alpine du pergélisol discontinu.

Fig. 1 – Secteur englacé à l'intérieur du système de grottes karstiques du Lapi du Bou (région du Sanetsch). Située vers 2'500 mètres d'altitude, cette glacière se trouve à l'intérieur de la ceinture alpine du pergélisol discontinu.

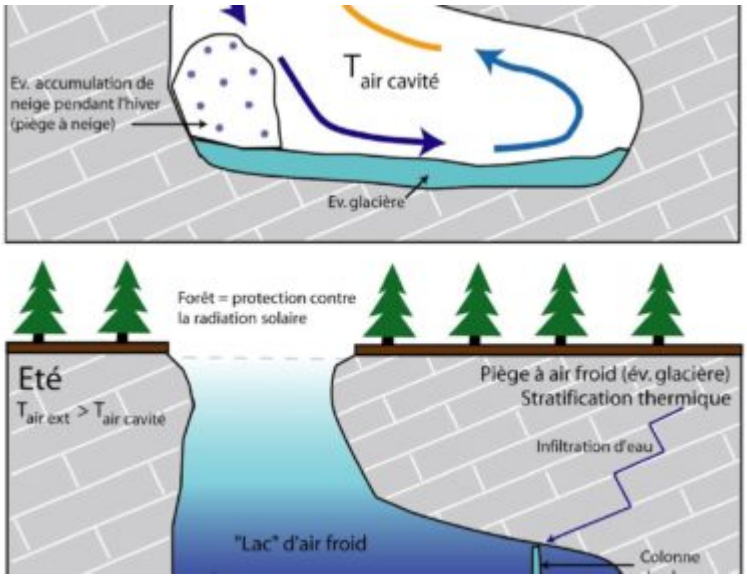


Fig. 2 – Glacière statique : modèle simplifiée d'un piège à neige et/ou à air froid dans des puits karstiques (adapté de Lismonde, 2002 & Luetscher, 2005).

Fig. 2 – Glacière statique : modèle simplifiée d'un piège à neige et/ou à air froid dans des puits karstiques (adapté de Lismonde, 2002 & Luetscher, 2005).

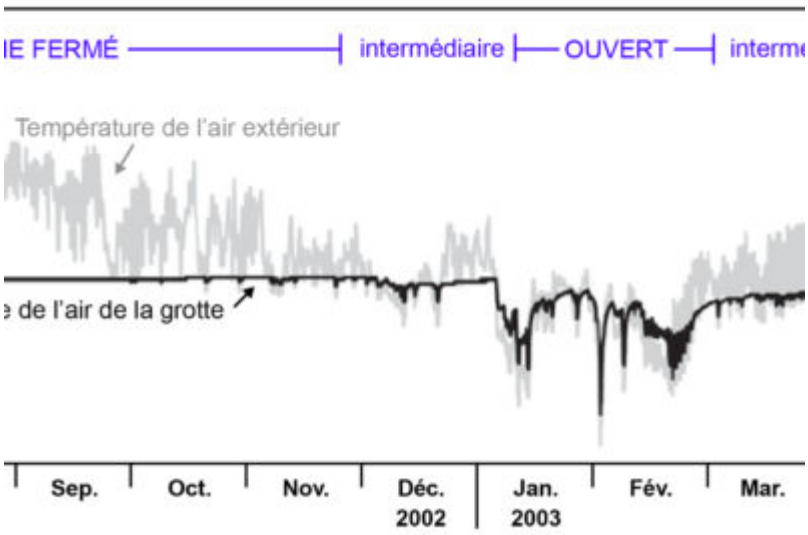


Fig. 3 – Evolution annuelle des températures de l'air à la Glacière de Monlési. Durant la saison hivernale, une bonne corrélation est observée entre la température de l'air dans la grotte et la température de l'air extérieur. Durant l'été, les températures très stables et proches de 0 °C sont attribuables au changement de phase de la glace (en l'occurrence de la fonte) (source : Luetscher & Jeannin, 2004).

Fig. 3 – Evolution annuelle des températures de l'air à la Glacière de Monlési. Durant la saison hivernale, une bonne corrélation est observée entre la température de l'air dans la grotte et la température de l'air extérieur. Durant l'été, les températures très stables et proches de 0 °C sont attribuables au changement de phase de la glace (en l'occurrence de la fonte) (source : Luetscher & Jeannin, 2004).

Fig. 4 – Puits d’entrée de la glacière de St-Livres (Jura vaudois).

Fig. 4 – Puits d’entrée de la glacière de St-Livres (Jura vaudois).

Fig. 5 – Stalagmites de glace en forme de bambou dans la glacière de Monlési (Jura neuchâtelois). Cette grotte glacée contient le volume de glace le plus important de tout le Jura : environ 6’000 m3.

Fig. 5 – Stalagmites de glace en forme de bambou dans la glacière de Monlési (Jura neuchâtelois). Cette grotte glacée contient le volume de glace le plus important de tout le Jura : environ 6’000 m3.

Fig. 6 – La glacière de St-Livres (Jura vaudois) est une doline effondrée dans laquelle s'est accumulé un volume de glace de 1200 m3 pendant les siècles passés. Les premiers analyses des cernes et des datations 14C du bois fossile incrusté dans la masse de glace indiquent un âge des couches compris entre 50 et plus que 1200 ans BP (before present = avant 1950).

Fig. 6 – La glacière de St-Livres (Jura vaudois) est une doline effondrée dans laquelle s'est accumulé un volume de glace de 1200 m3 pendant les siècles passés. Les premiers analyses des cernes et des datations 14C du bois fossile incrusté dans la masse de glace indiquent un âge des couches compris entre 50 et plus que 1200 ans BP (before present = avant 1950).

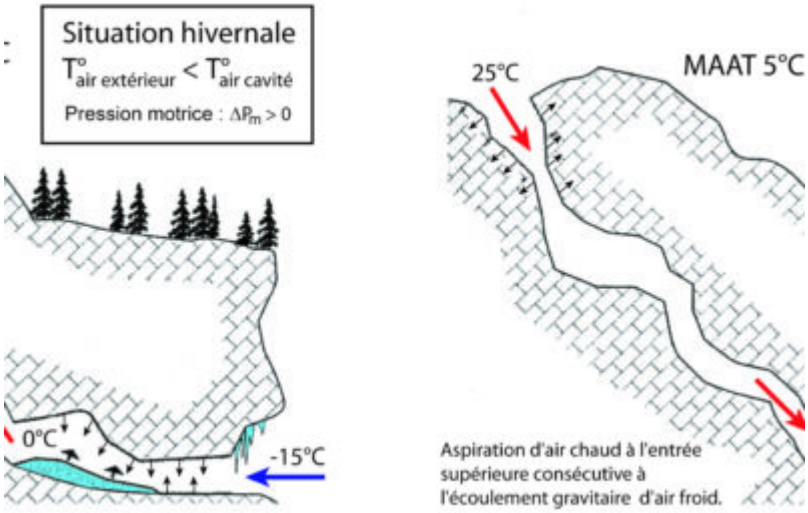


Fig. 7 – Glacière de type dynamique. Le refroidissement est dû à une circulation d'air dans des conduits karstiques à deux entrées (tube à vent, effet de cheminée) (adapté de Luetscher, 2005).

Fig. 7 – Glacière de type dynamique. Le refroidissement est dû à une circulation d'air dans des conduits karstiques à deux entrées (tube à vent, effet de cheminée) (adapté de Luetscher, 2005).

Figure 8 – La salle de la cheminée dans la glacière dynamique des Diablotins en octobre 2009. Ce secteur se caractérise notamment par un plafond de glace et de nombreuses stalactites de glace.

Figure 8 – La salle de la cheminée dans la glacière dynamique des Diablotins en octobre 2009. Ce secteur se caractérise notamment par un plafond de glace et de nombreuses stalactites de glace.

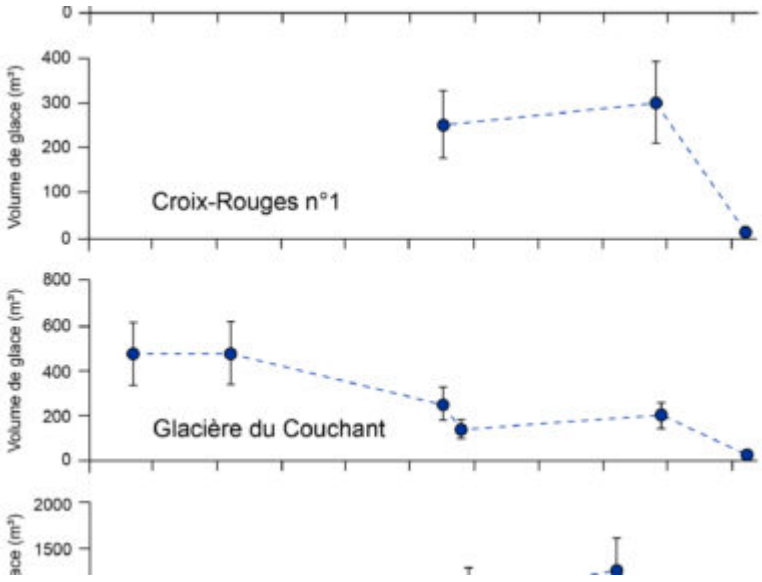


Fig. 9 – Reconstruction des fluctuations des volumes de glace dans différentes glacières de la chaîne du Jura. Toutes les glacières ont enregistrées une forte diminution de leur volume de glace depuis les années 1990. Les barres d'erreur reflètent l'incertitude (env. 30%) attribuée aux mesures et aux variations saisonnières du volume de glace (source : Luetscher et al. 2005).

Fig. 9 – Reconstruction des fluctuations des volumes de glace dans différentes glacières de la chaîne du Jura. Toutes les glacières ont enregistrées une forte diminution de leur volume de glace depuis les années 1990. Les barres d'erreur reflètent l'incertitude (env. 30%) attribuée aux mesures et aux variations saisonnières du volume de glace (source : Luetscher et al. 2005).