

Indices de fonctionnement de la ventilation des éboulis froids

Morard Sébastien, Dorthe Jonathan, Delaloye Reynald
Unité de Géographie, Géosciences, Université de Fribourg (CH)

Résumé

La circulation d'air par "effet de cheminée" influence de manière prépondérante le régime thermique des formations sédimentaires poreuses. Des indices visuels et thermiques, dépendants de la période de l'année et de l'emplacement, sont utilisés pour la détection et la caractérisation du comportement dans le temps et l'espace des systèmes ventilés alpins et péréalpins situés au-dessous de la ceinture du pergélisol discontinu. Les conditions hivernales ainsi que des particularités locales (altitude, présence/absence de sol, réseaux souterrains,...) rendent cependant l'efficacité de ces méthodes de détection partiellement variable d'année en année et selon les sites. Le cas des éboulis de Vudèche (Préalpes fribourgeoises) est détaillé.

1. Introduction

« *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 Saussure, 1796). Ce courant d'air naturel a été exploité dans le passé pour la construction de caves à lait (*Milchkeller*) 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). De fréquentes descriptions d'éboulis de basse altitude (< 1500 m.s.m.) signalent la présence de végétation azonale, de glace et de conditions de sol froides dans des sites où la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) est nettement positive (par ex. Wakonigg 1996).

Dans la région alpine et ses environs, des études détaillées ont été réalisées à ce jour autant dans des éboulis de basse altitude (<1500 m.s.m.) (par ex. Gude et Molenda 2000, Delaloye 2004) que de haute altitude (> 2300 m.s.m.) (par ex. Delaloye et Lambiel

2005, Lambiel 2006), ces derniers étant situés dans la frange inférieure de la zone du pergélisol discontinu. Dorthe et Morard (2007) se sont quant à eux penchés sur l'analyse de sites localisés dans la tranche altitudinale intermédiaire. L'ensemble de ces recherches a montré que des phénomènes de ventilation interne par "effet de cheminée" (Lambert 1967, Delaloye et al. 2003) influencent le régime thermique de formations sédimentaires poreuses (éboulis, glaciers rocheux fossiles, zones d'éboulement), tant en surface qu'en profondeur. Dans certains cas, l'existence d'un pergélisol est possible (Sone 2005, Delaloye et Lambiel 2007).

Cet article illustre la manière par laquelle le fonctionnement d'un système de ventilation peut être identifié sur la base d'indices visuels et thermiques en mettant notamment en évidence l'influence des conditions atmosphériques hivernales ainsi que les spécificités locales du site. Le site de Vudèche (Préalpes fribourgeoises) est détaillé.

2. Mécanisme de circulation d'air : "l'effet de cheminée"

L'intensité et la direction du courant d'air circulant dans les formations sédimentaires poreuses varient selon la saison en fonction du contraste de température (et donc de densité) existant entre l'air situé à l'extérieur et à l'intérieur de la formation. En hiver, le moteur de la circulation d'air dans l'éboulis est l'évacuation de chaleur par le biais de l'ascension interne d'air "chaud" plus léger que l'air atmosphérique. En conséquence, de l'air extérieur froid est aspiré dans les parties basses de la formation poreuse, ce qui permet le développement d'un réservoir de frigories et le gel du terrain. L'intégralité de l'éboulis peut être soumise à ce type de circulation d'air ascendante et l'aspiration peut avoir lieu même en présence d'un épais manteau neigeux (Delaloye et Lambiel 2007). Inversement, lorsque la température de l'air extérieur est plus élevée qu'à l'intérieur, un écoulement gravitaire d'air froid se produit en direction des points bas du système, ce qui permet de maintenir des conditions fraîches malgré les grandes chaleurs de l'été.

3. Caractéristiques du site de Vudèche et de la période d'étude

Situés dans la région de la Dent-de-Lys, les tabliers d'éboulis de la combe de Vudèche sont disposés au pied d'une paroi calcaire d'une centaine de mètres de hauteur (fig.1). Ils se développent entre 1600 et 1780 m.s.m. dans une orientation ENE. Deux éboulis (n°2 et 3) ont été étudiés. Leur épaisseur a été estimée par prospection géoélectrique à 15-20 mètres au maximum. La surface des éboulis est partiellement végétalisée dans ses parties sommitale et basale, alors que les secteurs médians sont nus. Il n'y a pas de végétation arbustive développée. Les premières observations ont été réalisées sur ce site entre 2001 et 2003 et ont révélé la présence de phénomènes de ventilation (Delaloye 2004). Une étude approfondie y a été menée en 2004-2005 (Dorthe et Morard 2007).

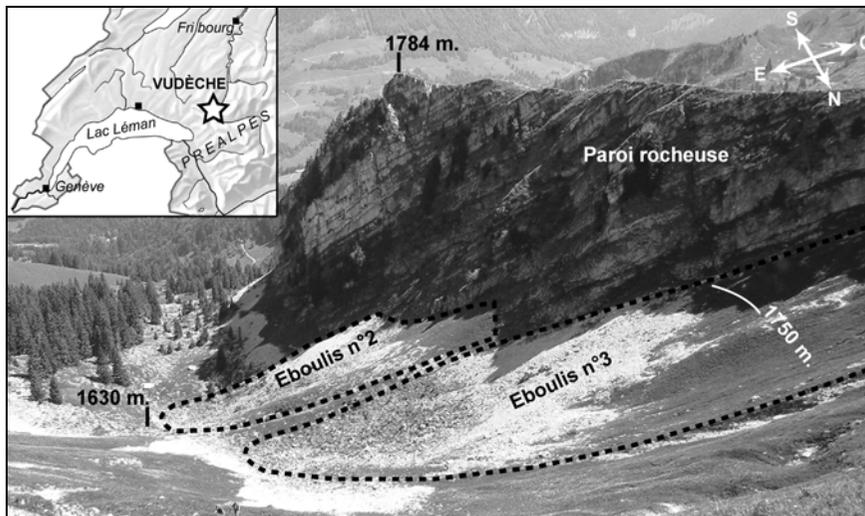


Figure 1 – Situation géographique et aperçu des éboulis de la combe de Vudèche (Préalpes fribourgeoises).

Les données présentées dans cet article proviennent de deux hivers aux conditions météorologiques contrastées. L'hiver 2001-2002 fut relativement doux, principalement dès janvier, entraînant un réchauffement et une humidification relativement précoces du

manteau neigeux. L'hiver 2004-2005 fut en revanche beaucoup plus froid, notamment durant une longue période allant de mi-janvier à mi-mars. L'enneigement fut également plus tardif.

4. Méthodes

La détection d'un système de ventilation peut se fonder sur le recoupement de trois méthodes.

4.1 Indices visuels

Ce sont des indices visuels qui fournissent les premières indications sur l'existence de phénomènes de ventilation (fig.2).

Dans la partie supérieure d'une formation ventilée, la phase hivernale ascendante provoque de nombreuses manifestations caractéristiques : fenêtres de fonte dans le manteau neigeux, souffles d'air chaud, phénomènes de condensation et formation de cristaux de givre à proximité des bouches d'aération, fonte puis regel (lors d'un affaiblissement de la ventilation) de la base du manteau neigeux. Lorsque ce dernier devient relativement épais, des formes d'affaissement sont visibles à la surface de la neige à l'emplacement des sorties d'air chaud, formes pouvant évoluer en cheminées ouvertes. Lambiel (2006) propose une typologie de ces formes. Ces secteurs sont rapidement déneigés au printemps.

Dans les parties basses, des trous d'aspiration peuvent être visibles lorsque l'épaisseur de neige est encore faible. Ils se distinguent des trous souffleurs d'air chaud par l'absence de cristaux de givre, ainsi qu'un sol sec et froid. Lorsque la ventilation devient descendante, des courants d'air froid, un sol gelé, des encroûtements de glace, des plaques de neige résiduelle et parfois du brouillard de condensation rampant sur le sol sont perceptibles. Une végétation azonale (plantes alpines) et souvent des arbres nains se retrouvent dans ces secteurs affectés par la décharge gravitaire estivale d'air froid.

4.2 Mesures de la température à la surface du sol

Des mesures de la température à la surface du sol, continues ou instantanées, permettent de déterminer plus précisément le régime

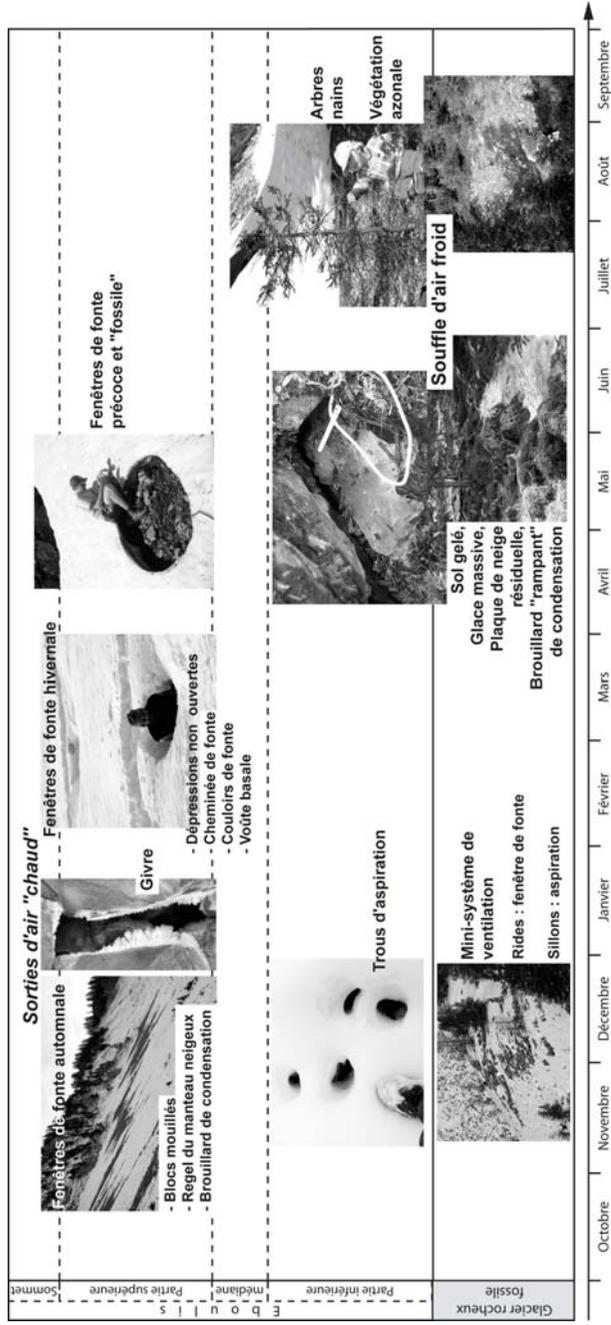


Figure 2 – Synthèse des différents indices visuels caractérisant un complexe éboulis – glacier rocheux fossile ventilé de basse et moyenne altitude, selon leur emplacement et la période de l'année (Dorthe et Morard 2007).

thermique du système ventilé. Celui-ci se caractérise par de forts contrastes longitudinaux, ainsi que des relations marquées et saisonnièrement variables avec le comportement de la température de l'air (Delaloye 2004, Morard et al. 2008). Une relation thermique semblable entre l'éboulis et l'atmosphère indique un régime de courant d'air aspirant, alors qu'une relation inverse correspond à un régime soufflant (fig.3). L'effet de la ventilation interne sur le régime thermique annuel de la surface du sol peut être quantifié par différents indicateurs (tabl.2) : l'anomalie thermique annuelle (ATA) par rapport à MAAT, l'indice de gel du sol (GFI) ou le nombre total de jours gelés (NFD).

A Vudèche, les séries enregistrées par trois capteurs de température (UTL-1) placés en 2004-2005 à 10-20 cm de profondeur dans l'éboulis n°3 illustrent l'hétérogénéité du régime thermique annuel. Le capteur Vu-05 est situé dans la partie haute de l'éboulis, Vu-06 dans la partie médiane et Vu-07 dans la partie inférieure (localisation sur fig.4). La température de l'air a été enregistrée par un capteur placé sur un arbre à environ 2 m de hauteur.

4.3 Cartographie de la température du sol en hiver ("BTS")

L'état de la température du sol en hiver peut être cartographié en utilisant des sondes "BTS". L'objectif est de mettre en évidence l'étendue spatiale et l'efficacité d'un système de ventilation. La répétition de mesures sur plusieurs sites a montré qu'un système ventilé est caractérisé, lorsqu'il fonctionne efficacement, par l'existence d'une zone froide à l'aval (pouvant remonter jusque dans les parties médianes du versant), passant rapidement à l'amont à une zone chaude, où la température de surface est souvent positive (Dorthe et Morard 2007).

A Vudèche, plusieurs campagnes ont eu lieu, notamment en 2002 et 2005. Les relevés du 12 février 2002 ont été effectués après plusieurs semaines de temps doux, alors que la campagne du 8 février 2005 fut précédée d'une période durable de temps froid (fig.4).

5. Résultats

5.1 Indices visuels

Certains indices visuels sont perceptibles à Vudèche, principalement ceux répondant à une ventilation ascendante (fenêtres de fonte, puits à air chaud, phénomènes de condensation). Par exemple, le 8 février 2005, à proximité de Vu-05, la base humide du manteau neigeux formait une voûte d'environ 50 cm de hauteur avec un sol détrempe et chaud (+4.6°C !). En revanche, la détection d'indices visuels de ventilation descendante (glace, courant d'air froid) n'y est pas évidente. La végétation des éboulis ne présente apparemment pas de contraste marqué avec celle des environs immédiats.

5.2 Evolution thermique saisonnière

Les caractéristiques du régime thermique de l'éboulis n°3 en 2004-2005 sont reportées sur la figure 3 et dans les tableaux 1 et 2.

Dans la partie haute de l'éboulis (Vu-05), la température du sol reste, sauf brèves exceptions, supérieure à 0°C durant l'hiver entier (+3.6°C en février) et présente un comportement inverse vis-à-vis de la température de l'air extérieur, principalement lorsque le couvert neigeux est peu important (flèches "a" sur la fig.3). Entre le 13 et le 16 novembre cependant, la température baisse brutalement (de +9°C à -2°C), suivant curieusement pour l'occasion la baisse de la température de l'air (flèche "b" sur la fig.3). Un lent refroidissement se produit entre octobre (+8°C en moyenne) et avril (+1°C en moyenne), avec une phase relativement stable (~+3.6°C) entre fin janvier et début mars. Durant l'été, le comportement thermique est calé sur celui de l'air extérieur. Une anomalie thermique annuelle positive de +2.3°C a été enregistrée (tabl.2).

Dans la partie médiane de l'éboulis (Vu-06), la température est restée négative durant tout l'hiver. Le comportement thermique est contrôlé par celui de la température atmosphérique, avec des refroidissements similaires et synchrones à ceux de la température de l'air en première partie d'hiver. Un décalage temporel se produit en février et mars lorsque la couverture neigeuse est importante (env. 1.5 m). Dès la fin de la période de zero curtain (tabl.2) (phase

durant laquelle la température du sol est bloquée à 0°C en raison de la fonte de la neige), la température du sol redevient largement positive et reflète assez bien les variations de température extérieure. Une anomalie thermique annuelle négative de -2.3°C a été enregistrée (tabl.2).

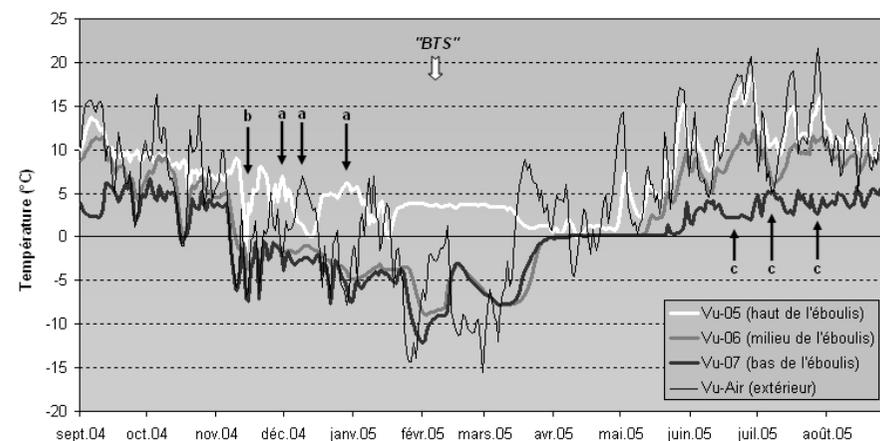


Figure 3 – Evolution de la température moyenne journalière du sol et de l'air dans l'éboulis n°3 de Vudèche du 1^{er} septembre 2004 au 30 août 2005. Localisation sur fig.4.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy.
Vu-air	10.0	7.8	0.3	-0.2	-2.8	-7.0	-0.3	2.5	7.6	12.6	12.5	10.5	4.5
Vu-05	10.6	8.0	6.0	3.6	3.2	3.6	2.2	1.0	6.8	12.6	12.5	10.8	6.7
Vu-06	8.3	5.9	-0.1	-2.3	-4.3	-6.1	-5.3	0.2	2.9	8.7	9.2	9.0	2.2
Vu-07	4.0	3.7	-1.8	-3.7	-5.8	-6.9	-4.7	0.1	0.5	2.8	3.9	4.4	-0.3

Tableau 1 – Températures mensuelles (en °C) et annuelles (Moy.) de l'air (MAAT) et du sol sur l'éboulis n°3 de Vudèche du 1^{er} septembre 2004 au 30 août 2005.

	ATA	Min	Max	Ampl.	NFD	GFI	Période de Zero curtain		
							Début	Fin	Durée
Vu-air	-	-15.5	21.5	37.1	102	-551.8	-	-	0
Vu-05	+2.3	-1.6	18.5	20.1	3	-1.7	-	-	0
Vu-06	-2.3	-9.0	12.2	21.2	144	-576.8	29.03.05	11.05.05	43
Vu-07	-4.7	-12.1	6.8	18.9	153	-707.7	30.03.05	27.05.05	58

Tableau 2 – Indices thermiques de l'air et du sol sur l'éboulis n°3 de Vudèche du 1^{er} septembre 2004 au 30 août 2005. ATA = anomalie thermique annuelle par rapport à MAAT ; Ampl. = amplitude (°C) = Max – Min (valeurs moyennes journalières maximales et minimales) ; NFD = nombre de jours de gel ; GFI = ground freezing index (°C x jours).

Dans la partie basse de l'éboulis, le régime thermique du sol à Vu-07 est similaire à celui de Vu-06 durant l'hiver. Le dégel – intervenu à la fin mai – est relativement tardif. La température du sol demeure

cependant fraîche ($< 5^{\circ}\text{C}$) durant tout l'été et présente un comportement thermique inverse à celui de l'air extérieur (flèches "c" sur la fig.3). Un lent réchauffement semble se produire entre juin ($+2.8^{\circ}\text{C}$ en moyenne) et août ($+4.4^{\circ}\text{C}$ en moyenne). Un seuil thermique d'inversion du courant d'air est perceptible en automne à environ $+5^{\circ}\text{C}$. Une anomalie thermique annuelle négative de -4.7°C a été enregistrée (tabl.2).

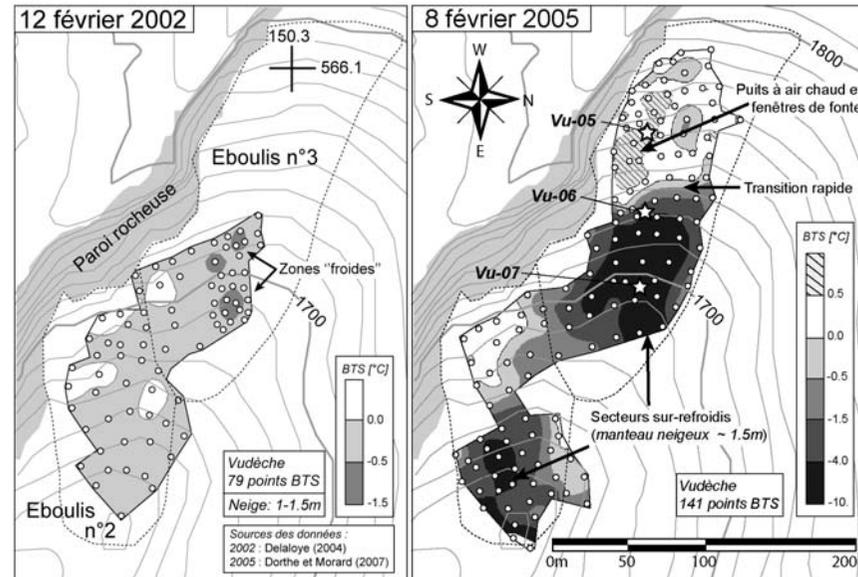


Figure 4 – Carte des températures du sol sur l'éboulis de Vudèche le 12.02.2002 (gauche) et le 08.02.2005 (droite). Interpolation spatiale par krigeage. Les étoiles indiquent la position des capteurs de température UTL-1.

5.3 Cartographie des températures du sol en hiver ("BTS")

En 2002, l'hiver doux n'a permis de localiser que quelques zones froides restreintes où la température avoisinait -1°C dans la moitié inférieure de l'éboulis n°3 (fig.4, gauche). La différenciation spatiale des températures du sol fut en revanche beaucoup plus nette en février 2005 (fig.4, droite). Sur les deux éboulis, une transition rapide (sur quelques mètres) sépare les deux zones de températures de surface chaudes à l'amont et froides à l'aval. Dans le haut de la pente, des valeurs positives ($>0.5^{\circ}\text{C}$) sont mesurées,

alors que dans le bas, deux semaines de temps froid ont permis d'abaisser la température du sol au-dessous de -4°C (jusqu'à -10°C) malgré un manteau neigeux épais d'environ 1.5 m.

6. Discussion

La circulation d'air par "effet de cheminée" à l'intérieur des éboulis influence de manière marquée le régime thermique de la surface du sol. Il en ressort d'importantes différences de comportement entre des secteurs distants de quelques (dizaines de) mètres seulement, la partie haute du système étant toutefois en permanence plus chaude que la partie basse. Un écart thermique annuel moyen de 7°C a ainsi été relevé en 2004-2005 entre Vu-07 (amont) et Vu-05 (aval) (tabl.2). Les caractéristiques du comportement thermique annuel de l'éboulis n°3 de Vudèche correspondent par ailleurs étroitement à celles décrites pour l'éboulis du Creux du Van (Delaloye 2004).

La répétition des mesures "BTS" à Vudèche a montré que des hivers froids ou des phases hivernales froides sont propices à l'utilisation de cette technique pour cartographier la disposition des secteurs ventilés. En effet, une période durable de temps hivernal froid, comme en 2004-2005, maintient un fort gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis et facilite le fonctionnement de la phase ascendante du système de ventilation. A l'intérieur, le réservoir froid se reconstitue sans doute significativement. Un hiver plus doux limite en revanche la circulation d'air et homogénéise les conditions thermiques à la surface du sol. La recharge de réservoir froid interne est moindre. Même si dans ces conditions, la détection de secteurs ventilés reste possible, les indications obtenues sur la disposition et l'ampleur du système de ventilation sont moins bonnes.

L'automne permet souvent d'observer un seuil thermique d'inversion du courant d'air : $+5^{\circ}\text{C}$ à Vudèche (1700 m.s.m.) et au Bois-des-Arlettes (1725 m.s.m.) (Dorthe et Morard 2007), $+5.5^{\circ}\text{C}$ à La Pierreuse (1600 m.s.m.) (Dorthe et Morard 2007) et $+7^{\circ}\text{C}$ au Creux-du-Van (1250 m.s.m.) (Delaloye et al. 2003). Le niveau de ce seuil paraît baisser avec l'augmentation de l'altitude. Il dépendrait

ainsi en premier lieu de la température générale du système ventilé, même si les caractéristiques du milieu soumis à circulation d'air (volume, organisation des conduits, etc.) jouent certainement un rôle non négligeable.

Dans la région de Vudèche, il existe d'importants réseaux karstiques (GSL 2008), en partie sous-jacents aux éboulis, qui pourraient partiellement influencer la circulation d'air. C'est du moins l'hypothèse avancée pour tenter d'expliquer d'une part l'aspiration observée entre le 13 et le 16 novembre à Vu-05 (celle-ci s'est produite par un fort épisode de bise, un vent du nord-est, alors que le gradient thermique était propice à l'expulsion d'air chaud) et d'autre part la constance de la température de Vu-05 entre fin janvier et début mars (contrastant avec le comportement typique d'un éboulis ventilé, où la décroissance est relativement régulière durant l'hiver). Dans la première situation, la bise a pu imprimer une forte circulation d'air dynamique dans le réseau karstique entre des orifices situés sur des flancs opposés du massif calcaire. Dans le second cas, la constance de la température laisse transparaître la présence d'un réservoir de chaleur important, ce qui pourrait indiquer l'alimentation partielle du courant d'air de l'éboulis par de l'air en provenance du réseau karstique.

7. Conclusion

La combinaison d'indices visuels et thermiques s'est révélé être une clé de lecture pertinente permettant la détection du fonctionnement d'une ventilation interne dans une accumulation sédimentaire à porosité grossière. L'efficacité de ces méthodes est cependant variable dans le temps et dans l'espace :

- La plupart des indices ne s'expriment pas avec la même intensité d'une année à l'autre. Les conditions hivernales déterminent en effet fortement leur développement. Un hiver froid est optimal pour la détection d'un système ventilé.
- Selon les conditions locales (altitude, présence/absence de sol, type de végétation), certains indices visuels de fonctionnement peuvent ne pas être clairement identifiés (absence de végétation arbustive naine, de courants d'air perceptibles).

- La disposition de capteurs de température le long d'un profil longitudinal est fondamentale pour la détection des régimes thermiques hétérogènes d'un système ventilé.
- Dans des situations particulières, l'influence de courants d'air dans des réseaux souterrains sous-jacents pourrait partiellement et temporairement se superposer au comportement typique du simple éboulis ventilé.

Quoi qu'il en soit, les observations réalisées dans les Préalpes ont montré que le phénomène de ventilation interne est très fréquent dans des éboulis et qu'il concernait même parfois des glaciers rocheux fossiles (Dorthe et Morard 2007).

8. Bibliographie

Delaloye, R., Reynard, E., Lambiel, C., Marescot, L. & Monnet, R. (2003). Thermal anomaly in a cold scree slope (Creux du Van, Switzerland). *Proceed. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich*, 175-180.

Delaloye, R. (2004). Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. *Thèse de doctorat, Fribourg Geofocus*, 10.

Delaloye, R., Lambiel, C. 2005. Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 59, 194-203.

Delaloye, R., Lambiel, C. (2007). Drilling in a low elevation cold talus slope (Dreveneuse, Swiss Prealps). *Geophysical Research Abstract* 9, 10907.

De Saussure, H-B. (1796). Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève. *Tome troisième, Neuchâtel, S. Fauche*, <http://gallica.bnf.fr/>.

Dorthe, J., Morard, S. (2007). Ventilation des éboulis et des glaciers rocheux fossiles des Préalpes suisses romandes. *Travail de diplôme, Inst. Géographie., Uni. Fribourg (CH)*, <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/morard/>.

GSL (2008). Exploration de la zone de Vudèche. *Groupe de Spéléologie de Lausanne*, <http://www.speleo-lausanne.ch/>.

Gude, M., Molenda, R. (2000). Zeitliche Dynamik im Temperaturregime von Blockhalden in Mitteleuropa. *Acta. Uni. Purkyn., Usti n.L., stud. Biol.*, 4, 31-35.

Lambert, A. (1967). La formation de glace dans les conduits karstiques, les roches fissurées et les pierriers. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* (2), 9/4, 321-324.

Lambiel, C. (2006). Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités. *Thèse de doctorat, Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et Recherches n°33*.

Morard, S., Delaloye, R., Dorthe, J. (2008). Seasonal thermal regime of a mid-latitude ventilated debris accumulation. *Proceed. 9th Int. Conf. on Permafrost, Fairbanks, Alaska*, 1233-1238.

Sone, T. (2005). Extrazonal permafrost and ground air circulation at a slope along Kanoko-dam, Oketo Town, Hokkaido, Japan. *Terra Nostra, 2nd Europ. Conf. on Permafrost, Potsdam, Germany*, 80.

Wakonigg, H. (1996). Unterkühlte Schutthalden. Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich. *Arbeiten aus dem Inst. f. Geogr. Karl-Franzens-Universität Graz*, 33, 209-223.