

Université de Fribourg - Faculté des Sciences - Département des Géosciences - Unité de Géographie

Fribourg, le 18. juin 2007

Travail de Diplôme en géomorphologie périglaciaire

Effets de la ventilation des éboulis froids et des glaciers rocheux fossiles dans les Préalpes suisses romandes



Sous la direction de Dr. Reynald Delaloye

Jonathan Dorthe Rue Pierre-Aeby 1700 Fribourg 079 443 91 49 jonathan.dorthe@unifr.ch Sébastien Morard Cloux-Roussier 1 3960 Sierre 079 358 51 78 sebastien.morard@unifr.ch

Table des matières

Résumé	V
Remerciements	VI
Abréviations	VII
TABLE DES MATIERES	I
RESUME	V
REMERCIEMENTS	VI
ABRE VIA HONS	····· VII
1^{ERE} PARTIE : INTRODUCTION ET CADRE DE L'ETUDE	
1. INTRODUCTION	
2. CONTEXTE DE L'ETUDE	4
2.1 Problématique	1
2.1 Problemauque	
2.1.1.1 Comportement thermique d'un éboulis ventilé	
2.1.1.2 La question des ouvertures supérieures	
2.1.1.3 Circulation à travers le manteau neigeux	
2.1.1.4 Vitesse et temps de residence du courant à air dans l'edouits 2.1.2 Hypothèses et objectifs de l'étude	δ Ω
2.1.2 hypotheses et objectifs de l'ende	9
2.3 Le nergélisol	10
2.3.1 Propriétés thermiques	
2.4 Formes géomorphologiques étudiées	
2.4.1 Eboulis	
2.4.2 Glaciers rocheux fossiles	
2.4.3 Autres formations sedimentaires porcuses	
2.5 Contexte chinalique des années nyurologiques 2005-2004 à 2005-2006	
2.5.2 Aperçu météorologique général d'octobre 2003 à octobre 2006	
2.5.3 Développement du manteau neigeux	
3. METHODES	
3.1 Observations et cartographie	
3.2 Cartographie des températures du sol en hiver (« BTS »)	
3.2.1 Contexte d'utilisation	
3.2.2 Description	
3.2.4 La sonde BTS	
3.2.5 Corrections des résultats	
3.2.5.1 Corrections selon la sonde	
3.2.5.2 Corrections selon le multimètre	
3.3 Contexte d'utilisation	
3.3.2 Description	
3.3.3 Mise en œuvre	
3.3.4 UTL-1	

3.3.5 Lecture des résultats	
3.3.6 Analyse du comportement thermique	
3.3.6.1 Comportement thermique selon DELALOYE (2004)	
3.3.6.2 Comportement thermique selon ISHIKAWA (2003)	
3.4 Résistivité électrique	
3.4.1 Principe	
3.4.2 Matériel utilisé	
3.4.3 Résistivité des matériaux	32
3.4.4 Le sondage vertical	
3.4.5 Le traîné	
3.4.6 Répétition de mesures	
3.5 Analyse de la végétation	
3.6 Synthèse	

2^{EME} PARTIE : ETUDES DE CAS

4. ETUDES DE CAS	
4.1 Combe de Vudèche (FR)	41
4 1 1 Cadre géologique et géomorphologique	41
4.1.2 Fonte précoce et froid estival	42
4.1.3 Automne et début de l'hiver	
4.1.4. Cartographie thermique et surrefroidissement hivernal	
4.1.5. Enregistrement de la température du sol et anomalies thermiques	
4.1.5.1 Température du sol dans la partie basse des éboulis	49
4.1.5.2 Températures du sol dans la partie médiane et supérieure des éboulis	50
4.1.5.3 Températures du sol entre le bas et le haut de l'éboulis n°3	
4.1.5.4. Variations thermiques du système de ventilation en novembre dans l'éboulis n°3	
4.1.6 Géoélectricité	
4.1.6.1 Sondages verticaux	
4.1.6.2 Trainés	55
4.2 Dreveneuse (VS)	
4.2.1 Cadre géologique et géomorphologique	
4.2.2 Fonte précoce, neige et glace résiduelles	
4.2.3 Automne et début de l'hiver	59
4.2.4 Cartographie thermique et surrefroidissement hivernal	
4.2.5 Anomalies thermiques de l'éboulis et du glacier rocheux fossile	
4.2.5.1 Variations thermiques en automne (octobre 2004)	66
4.2.5.2 Novembre et les particularités du système de ventilation	66
4.2.5.3 Automne 2005 (octobre – novembre)	68
4.2.6 Géoélectricité	69
4.2.6.1 Sondages verticaux	
4.2.6.2 Ligne de trainé	
4.2.7 Interprétation	
4.3 Le Bois des Arlettes (VD)	
4.3.1 Cadre géologique et géomorphologique	
4.3.2 Conditions estivales froides	73
4.3.3 Automne et début de l'hiver : une réversibilité quotidienne de la circulation d'air et de mini-systèm	les de
ventilation ?	74
4.3.4 Sur-refroidissement hivernal	
4.3.5 Des fenêtres de fonte précoces	
4.3.6 Anomalies thermiques de l'éboulis et du glacier rocheux fossile	
4.3.6.1 Variations thermiques en automne (septembre)	
4.3.6.2 Variations thermiques du début de l'hiver	
4.3.7 Propriétés électriques	
4.3.7.1 Sondages verticaux	
4.3.7.2 Lignes de trainés.	
4.3.8 Des groupements vegetaux particuliers.	
4.3.9 Interpretation.	
4.4 Gourd de la Plane (Reserve naturelle de la Pierreuse, VD)	
4.4.1 Cadre géologique et géomorphologique	
4.4.2 Indices thermiques	
4.4.2.1 Variations thermiques en automne (octobre-novembre)	

4.4.3 Sur-refroidissement hivernal	
4.4.4 Des fenêtres de fonte précoces	
4.4.5 Propriétés électriques	
4.4.5.1 Sondages verticaux	
4.4.5.2 Lignes de traînés	
4.4.5 Interprétation	
4.5 Combe de Lavaux-Châtillon (VD)	
4.5.1 Cadre géologique et géomorphologique	
4.5.2 Fenêtres de fonte	101
4.5.3 Indices thermiques	
4.5.4 Propriétés électriques	
4.5.5 Interprétation	
4.6 Autres sites	107
4.6.1 Gros Chadoua (FR)	
4.6.2 Le Larzey (VD)	
4.6.3 Crêt-de-la-neige (France)	
4.7 Synthèse	

3^{EME} PARTIE : SYNTHESE ET DISCUSSION

5.1 Indices thermiques	115
5.1 1 Régime thermique d'un éhoulis ventilé	115
5.1.2 Carte BTS typique d'un complexe éboulis – glacier rocheux fossile ventilé	117
5.2 Indices visuels	117
5.2 Highest Visuels	
5.2.1 Vegetation et ecosystemes « insulaires »	
5.2.2 Comportement annuel de la circulation d'an	
5.2.2.1 Automne et debut de l'hiver	
5.2.2.2 Hiver	
5.2.2.5 « 1 milemps » (periode de jone)	
5 2 3 Granulométrie	125
5.2.5 Orandometric	125
5.2.3.2 Les gravières : des éboulis triés	126
5 3 Indices géophysiques	127
5.3 1 Eboulis	
5.3.2 Closier rochaux fossile	
5.4 Symthese	120
6. MECANISMES DE CIRCULATION D'AIR	
6.1 Paramètres physique et thermodynamique	
6.2 Courants d'air dans les cavités souterraines	130
6.2 Courants a un dans les cavites soucerraines	130
6.2.1 Originos des chedidations à an	
6.2.1.1 vitesse du courant d'air	131
6 2 2 Grottes à une seule entrée	
6.2.2 Grottes à une seule entrée	
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 	
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières	
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3 L Conditions hivernales 	131 132 132 133 133 134 135
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1 L Refroidissement 	131 132 132 133 133 134 135 135 135
 6.2.2 Grottes à une seule entrée	131 132 132 133 133 134 135 135 135 135
 6.2.2 Grottes à une seule entrée	131 132 132 133 133 134 135 135 135 135 136 136
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1.1 Refroidissement 6.3.1.2 Assèchement des parois 6.3.1.3 Evaporation et sublimation 6.3.2 Formation de la glace 	131 132 132 133 134 135 135 136 136 136
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1.1 Refroidissement 6.3.1.2 Assèchement des parois 6.3.1.3 Evaporation et sublimation 6.3.2 Formation de la glace 6.3.3 Fonte de la glace 	131 132 132 133 134 135 135 135 136 136 137
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1.1 Refroidissement 6.3.1.2 Assèchement des parois 6.3.1.3 Evaporation et sublimation 6.3.2 Formation de la glace 6.3.3 Fonte de la glace 6.4 Causes du refroidissement des éboulis froids 	131 132 132 133 134 135 135 135 136 136 137
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1.1 Refroidissement 6.3.1.2 Assèchement des parois 6.3.1.3 Evaporation et sublimation 6.3.2 Formation de la glace 6.3 Fonte de la glace 6.4 Causes du refroidissement 	131 132 132 133 134 135 135 135 135 136 136 137 138
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1.1 Refroidissement 6.3.1.2 Assèchement des parois 6.3.1.3 Evaporation et sublimation 6.3.2 Formation de la glace 6.3 Fonte de la glace 6.4 Causes du refroidissement des éboulis froids 6.4.1 Déficit d'ensoleillement 6.4.2 Balch Effect 	131 132 132 133 134 135 135 135 135 135 136 136 136 137 138 138 138
 6.2.2 Grottes à une seule entrée 6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent) 6.2.4 Glacières ou grottes glacées 6.3 Evolution saisonnière des glacières 6.3.1 Conditions hivernales 6.3.1.1 Refroidissement 6.3.1.2 Assèchement des parois 6.3.1.3 Evaporation et sublimation 6.3.2 Formation de la glace 6.3 Fonte de la glace 6.4 Causes du refroidissement des éboulis froids 6.4.1 Déficit d'ensoleillement 6.4.2 Balch Effect 6.4 Evaporation estivale 	131 132 132 133 134 135 135 135 136 136 137 137 138 138 138 138 138 138 138

6.4.5 Echange d'air continu avec l'atmosphère	
6.4.6 Rôle de la neige	
6.4.7 Rôle du vent	143
6.4.8 Rôle de la végétation	143
6.4.9 Conclusion	143
6.5 Utilisation de la ventilation dans la construction	144
6.5.1 La ventilation artificielle des mines	
6.5.2 Une climatisation naturelle	
6.5.3 Les thermosiphons	
6.5.4 Ventilation des remblais	
6.6 Synthèse	
7. SYNTHESE ET PERSPECTIVES	147
7.1 Synthèse	
7.2 Modèle de circulation d'air pour un complexe éboulis – glacier rocheux fossile	149
7.3 Perspectives	152
8. CONCLUSION	153
9. BIBLIOGRAPHIE	154
10.ANNEXES	161
Annexe 1	161
Annexe 2	
Annexe 3	163
Annexe 4	164
Anneye 5 : Relevés de végétation du Rois des Arlettes (0 juillet 2005)	165
America 5. Releves de vegetation du Dois des Anetics (5 junier 2005)	103

Résumé

L'objectif principal de cette étude concerne la compréhension des effets de mécanismes de circulation d'air sur le refroidissement du terrain dans des formations sédimentaires poreuses de moyenne altitude (1'500 - 2'300 m.s.m.). De nombreux éboulis et glaciers rocheux fossiles des Préalpes suisses romandes ont ainsi été investigués durant les années 2004 - 2006 par le biais d'observations saisonnières et de mesures thermiques et géophysiques.

Des systèmes de ventilation existent dans presque toutes les formations visitées entraînant un refroidissement important du sol, mais de nombreuses particularités locales (topographie, climat...) en modifient l'ampleur et l'efficacité. De plus, du pergélisol (en fonction de résultats des mesures géoélectriques) pourrait également être présent malgré une température annuelle de l'air atmosphérique (MAAT) comprise entre +1 et +4.5°C en fonction de l'altitude.

La circulation d'air au travers d'une formation sédimentaire poreuse est principalement contrôlée par le gradient thermique existant entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur du sol. Une porosité efficace suffisante est nécessaire pour que de l'air puisse circuler. Cependant, il semble qu'une ventilation puisse se dérouler même à travers de petits éléments, mais de façon atténuée. Une comparaison avec la ventilation des réseaux souterrains et des glacières a permis de mieux appréhender les causes et conséquences des mécanismes de circulation d'air.

Le flux s'inverse en fonction de la saison : une ascension d'air relativement chaud et léger en hiver provoque en conséquence l'aspiration d'air extérieur froid dans les parties basses de l'accumulation ; durant l'été, l'écoulement est descendant en raison de la décharge gravitaire d'air froid et dense. L'emplacement des secteurs d'aspiration d'air hivernal et d'expulsion d'air froid en été n'est cependant pas symétrique. Ce processus provoque une forte anomalie thermique négative du sol dans la partie basse de la formation ventilée, et pourrait refroidir également le terrain adjacent et sous-jacent en profondeur. La circulation d'air est en revanche plus complexe durant les périodes où le contraste des températures est faible. La réversibilité du courant d'air semble rapide et se manifeste à partir d'un seuil dépendant de la température générale du système ventilé.

De fréquentes visites de terrain et l'enregistrement des températures du sol en continu nous ont permis de dresser une liste des indices thermiques et visuels saisonniers associés à l'intensité et à la direction du courant d'air (ex. : fenêtres de fonte, givre, regel du manteau neigeux, brouillard, gel du sol, trous d'aspiration...). La cartographie des températures du sol hivernales sous le manteau neigeux et après une longue période de temps froid (« BTS ») a permis de mettre en évidence l'étendue spatiale et l'efficacité d'un système de ventilation. Une distribution similaire des « BTS » pour l'ensemble des sites étudiés a ainsi été relevée : un secteur sur-refroidi (-6 à -10°C) se situe dans la partie basse et médiane de l'éboulis, avec une transition rapide vers des valeurs « chaudes » dans la partie haute.

L'étude a également montré l'existence d'une inter-connection du système de ventilation dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile. Les résultats des mesures géoélectriques montrent systématiquement la présence de couches avec une forte résistivité (20 à 100 k Ω m) dans le secteur sur-refroidi de la formation ventilée. Ces valeurs peuvent être dues à une forte porosité avec la présence possible de sédiments gelés.

Mots-clé : ventilation, éboulis froids, glacier rocheux fossile, pergélisol, Préalpes suisses romandes.

Remerciements

Ce travail de diplôme a bénéficié de nombreux appuis depuis sa mise en route durant l'été 2004. Nous souhaitons ainsi adresser nos remerciements et notre reconnaissance aux personnes suivantes :

- au Dr. REYNALD DELALOYE, superviseur du travail, pour les nombreux conseils, la motivation, l'encouragement pour la participation à des conférences (EUCOP II et Swiss Geosciences Meeting 2005), ainsi que pour la grande confiance accordée durant ces longs mois, sans oublier les rentrées nocturnes à peau de phoque sans lampe frontale.
- au Professeurs MICHEL MONBARON et EMMANUEL REYNARD pour l'apprentissage et la découverte de la géomorphologie.
- au Dr. PHILIPPE SCHOENEICH pour la proposition d'étude du cirque de la Pierreuse.
- au Dr. CLAUDE BÉGUIN pour une journée pluvieuse de relevés végétaux au Bois des Arlettes.
- à ROGER HENCHOZ et sa famille pour l'accueil et l'hébergement au chalet d'alpage de Lavaux.
- à la Commission de la réserve naturelle de la Pierreuse, en particulier PHILIPPE MORIER-GENOUD, ainsi que la commune de Château-d'Oex pour les démarches d'autorisation de circulation.
- aux Prof. CLAUDE COLLET, Dr. STÉPHANE GOYETTE, KHALID AL-GAHMDI et MARTIN BOCHUD pour les divers « conseils » informatiques apportés notamment dans la réalisation de la base de données.
- aux nombreuses et nombreux « tires-bobines » qui malgré de lourdes charges, des départs à l'aurore et des rentrées au crépuscule, parfois sous des conditions météorologiques difficiles, nous ont permis de réaliser de nombreuses mesures sur nos terrains : ALINE SAVIO-GOLLIARD, ANNE-AYMONE RICHARD, ASTRID LEUTWILLER, BRUNO RAEMY, CHRISTIAN BEYSARD, CHRISTOPHE LAMBIEL, CYRIL SANSONNENS, DAMIEN ABBET, DANIELA WIDMER, DOMINIQUE TORCHE, FRÉDÉRIC DORSAZ, FRÉDÉRIC WIDMER, GILLES FASEL, GRÉGORY AMOS, JEANNE-CHARLOTTE BONNARD, JEAN-LUC LUYET, KATHRINA STEFFEN, LUCIEN DORTHE, MICHAEL GRAUPNER, OLIVER HITZ, PATRICK AEBY, SABINE KOLLBRUNNER, SANDRINE PORTMANN, SARAH GOTTET, SIMONE-VALÉRIE IMSENG, SUSANNE WIDMER, THIERRY SEMBACH, THIERRY WASER, THOMAS WATTS, VINCENT PERRUCHOUD, VINCENT PITTELOUD, YANN HUGUELET.
- un remerciement tout particulier à ERIC PERRUCHOUD, notre camarade du team permafrost pour ses nombreux coups de mains appréciés durant ces dernières années.
- à nos parents MONIK et JEAN-DOMINIQUE MORARD (qui ont pu expérimenter la géoélectrique !), et MARIE-THÉRÈSE et EMMANUEL DORTHE, pour leurs encouragements et leur aide durant ces études universitaires.
- à toutes celles et ceux que par mégarde, nous aurions oublié de mentionner.

Abréviations

Signification des principales abréviations utilisées dans ce travail :

a	Intervalle inter-électrodes (en m) pour traînés de résistivité électrique.
Arl	Code pour le Bois des Arlettes.
BTS	Bottom Temperature of the winter Snow cover.
Chât	Code pour la combe de Lavaux-Châtillon.
Drev	Code pour la combe de Dreveneuse.
GFI	Ground Freezing Index, indice de gel du sol.
GST	Ground Surface Temperature, mesurée par un UTL.
MAAT	Mean Annual Air Temperature.
MAGST	Mean Annuel Ground Surface Temperature.
ра	Résistivité électrique apparente du sol.
Pier	Code pour la Pierreuse.
UTL	Universal Temperature Logger (type UTL-1).
Vud	Code pour la combe de Vudèche.
WEqT	Winter Equilibrium Temperature, température d'équilibre hivernal (du sol).

INTRODUCTION ET CADRE DE L'ETUDE



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 » (DESAUSSURE, 1796). Ce courant d'air froid sortant durant l'été des parties basses des éboulis a déjà été utilisé depuis longtemps 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 » (DESAUSSURE, 1796).

De nombreuses descriptions d'éboulis de basses altitudes (< 1'500 m.s.m) ont également rapporté l'existence de végétation azonale, la présence de glace et de conditions de sol froides, sur des sites où la température moyenne annuelle de l'air est largement positive (eg. BÄCHLER 1946, DESCROIX 1993, WAKONIGG 199). La toponymie d'un certain nombre d'éboulis de basses altitudes fait également référence à la présence de glace : Le « Glacier » dans la Combe Obscure (Baronnies, Drôme, France ; 1'040 m.s.m.) (DESCROIX 1993), la « Eislöcher » d'Eppan (Süd Tyrol, 570 m.s.m.), la « cave à glace » (*Eiskeller*) dans les Matzen (Autriche, 1'100 m.s.m.), le « *Toteisboden* » dans l'Untertal (Autriche, 1'000 m.s.m.), le « trou à glace » (*Eisloch*) dans le Seebachtal (Autriche, 1'300 m.s.m.) (WAKONIGG 1996), la « Glacière » de Ban-sur-Meurthe et Clécy dans les Vosges (France, 680 m.s.m), la « Ice Valley » en Corée du Sud (TANAKA ET AL. 2000).

L'existence de systèmes de ventilation interne aux formations sédimentaires poreuses semble être à l'origine du refroidissement observé. Cependant ce mécanisme de circulation d'air, connu depuis plusieurs centaines d'années, n'est devenu l'objet d'études détaillées que depuis peu (eg. SAWADA 2003, DELALOYE 2004, LAMBIEL 2006), principalement dans des éboulis de basse altitude (< 1'500 m.s.m) et de haute altitude (>2'300 m.s.m). Aucune recherche approfondie n'a en revanche été menée sur des sites de moyenne altitude (entre 1'500 et 2'300 m.s.m) ; lacune que nous avons cherché à combler par notre recherche.

Notre étude se consacre donc à l'observation d'indices de ventilation de moyenne altitude (1'500 – 2'300 m.s.m.), à l'identification des processus expliquant son fonctionnement, et à l'implication des mécanismes de circulation d'air sur le refroidissement du terrain et la présence possible de pergélisol. Nos recherches se sont concentrées sur des éboulis et des glaciers rocheux fossiles des Préalpes suisses romandes. Une vingtaine de sites ont ainsi été visités. Ces terrains se situent environ 0 à 800 mètres plus bas que la limite régionale du pergélisol discontinue (vers 2'300 m.s.m.). De nombreuses observations et mesures – toutes originales – ont ainsi été réalisées entre avril 2004 et mars 2006.

Notre travail se divise en trois parties principales. Dans un premier temps, le cadre de l'étude (chapitre 2) sera abordé, avec notamment une présentation détaillée de la problématique, des sites d'études, des objets étudiés et des conditions climatiques de la période 2004-2004. Une brève description des méthodes utilisées (chapitre 3) – observation, cartographie, méthodes thermiques et géoélectriques, analyse de la végétation – terminera cette première partie. Dans un deuxième temps, nous présenterons les divers résultats des analyses de terrain (chapitre 4). Dans la troisième partie, les indices de fonctionnement (chapitre 5) et les mécanismes de ventilation à moyenne altitude seront synthétisés et discutés. Une comparaison avec la ventilation des réseaux souterrains, dont de nombreuses données existent, précédera un historique et une discussion des processus affectant les éboulis froids (chapitre 6). Ce travail se terminera par une synthèse des indices récoltés et par la présentation de résultats originaux et novateurs (chapitre 7). Dans le cadre de ce projet, nous essaierons le plus souvent possible de mettre en relation les principes théoriques avec les observations et les mesures de terrain acquises.

2. Contexte de l'étude

Ce chapitre a pour objectif de situer le cadre général du travail. Dans un premier temps, les différentes problématiques (2.1) seront énoncées. Une présentation des différents terrains investigués (2.2), de la notion de pergélisol (2.3) et des formes géomorphologiques présentes (2.4) permettra de définir clairement les objets d'intérêt. Pour conclure, un bref aperçu météorologique des années 2004-2006 situera le cadre climatique (2.5).

2.1 Problématique

De nombreux auteurs (DESAUSSURE en 1783 déjà, puis e.g. WAKONNIG 1996, MOLENDA 1996, DELALOYE ET AL. 2003) ont signalé la présence de pergélisol sporadique et d'anomalies thermiques négatives du sol consécutives à une circulation d'air à l'intérieur d'éboulis de basse altitude (< 1'500 m.s.m). Ces derniers sont situés plus de 800 mètres en dessous de la limite régionale du pergélisol discontinu (correspondant à l'isotherme -1°C) où MAAT est supérieure à +5°C. Les anomalies thermiques négatives de la partie basse d'un éboulis peuvent atteindre 3 à 7°C par rapport à MAAT (GUDE & MOLENDA 2002, GUDE ET AL. 2003). L'éboulis du Creux-du-Van (Jura neuchâtelois) situé entre 1'150 et 1'300 m.s.m. et étudié en détail par DELALOYE (2004) nous servira de site de référence.

Ces systèmes de ventilation ont également été décrits à plus haute altitude (>2'300 m.s.m) à la limite inférieure du pergélisol alpin discontinu (DELALOYE & LAMBIEL 2005, LAMBIEL 2006) dans des talus d'éboulis et des glaciers rocheux inactifs. DELALOYE & LAMBIEL (2005) situent cette limite vers environ 2'200-2'300 m.s.m. dans les versants nord des Alpes sur la base de l'altitude actuelle des fronts de glaciers rocheux actifs. S'appuyant sur les mesures de stations climatiques des Préalpes vaudoises pour la période 1901-1940, SCHOENEICH (1998) la fixe en revanche à 2'535 m.s.m. dans les versants nord.

Aucune étude approfondie n'a en revanche été menée sur des sites de moyenne altitude (entre 1'500 et 2'300 m.s.m) (figure 2.1) ; lacune que nous avons cherché à combler par notre recherche. Ces terrains se situent entre environ 0 et 800 mètres plus bas que la limite régionale du pergélisol discontinue.



Figure 2.1 – Présentation de sites – sur lesquels un système de ventilation a été décrit – selon l'altitude et l'orientation. En grisé : terrains investigués dans cette étude. 1 : DELALOYE 2004 ; 2 : LAMBIEL 2006 ; 3 : WAKONIGG 1996 ; 4 : GUDE ET AL. 2003.

2.1.1 Mécanisme de circulation d'air dans des éboulis de basse altitude

Lorsqu'une formation poreuse possède plusieurs entrées dénivelées, une convection forcée dont l'intensité et la direction varient selon la saison peut être établie en raison d'une différence de température (et donc de densité) existant entre l'air extérieur et intérieur. C'est le principe du tube à vent (ou effet de cheminée). Couramment signalé dans les cavités souterraines (cf. chapitre 6.2), ce mécanisme s'applique également aux éboulis. Le comportement du système peut être séparé en deux phases principales : **le régime hivernal** (ascendant) **et estival** (descendant) (figure 2.2).

- En hiver, le moteur de la circulation d'air dans l'éboulis est l'ascension d'air interne « chaud », plus léger que l'air atmosphérique. Cette montée d'air chaud produit une dépression dans la partie basse de l'éboulis et la création d'une haute pression dans sa partie haute (Architecture HKU 2007). En conséquence, de l'air extérieur froid est aspiré dans les parties basses de l'éboulis permettant la formation d'un réservoir de frigories et le gel du terrain sous-jacent. Cette aspiration peut avoir lieu même en présence d'un épais manteau neigeux (DELALOYE 2004).
- Lorsque la température de l'air extérieur est plus élevée qu'à l'intérieur, un écoulement gravitaire d'air froid se produit dans les parties basses de l'éboulis, y préservant des conditions fraîches malgré les grandes chaleurs de l'été. En été, plus la température de l'air est élevée, plus la température dans les parties soumises à l'écoulement gravitaire est basse et se rapproche de 0°C (DELALOYE 2004). Une relation inverse existe alors entre la température du sol dans les parties basses de l'éboulis et la température de l'air. Ce rapport vaut -1 :7 au Creux-du-Van. L'accélération du courant d'air consécutive à l'augmentation du gradient thermique provoquerait également une augmentation des processus de fonte/sublimation au sein de l'éboulis, abaissant la température par absorption de chaleur latente (WAKONNIG 1996, SONE 2005).
- La réversibilité du système se produit à partir d'un certain seuil thermique, variable selon la période de l'année. Il peut être défini en comparant les variations synchrones (ou non) entre la température de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de l'éboulis. Ainsi au Creux-du-Van, DELALOYE (2004) a défini un seuil thermique entre 0° et +2°C durant l'hiver, en dessous duquel de l'air extérieur froid est aspiré dans la partie basse de l'éboulis. Le seuil d'inversion est en revanche situé à +6°C environ en automne. Les périodes de réversibilité du système sont cependant complexes et nécessitent des recherches plus approfondies (DELALOYE & LAMBIEL 2005).
- Des indices visuels permettent de détecter la présence d'une formation poreuse ventilée. Durant l'hiver l'expulsion d'air « chaud » dans les parties hautes de l'éboulis entraîne la fonte basale du manteau neigeux. Lorsque ce dernier est peu épais, des fenêtres de fonte peuvent se former. Durant l'été, des souffles d'air froid et de la glace peuvent être observés dans les parties basses de l'éboulis. Ces zones sont souvent associées avec de la végétation azonale (arbres nains) qui ont depuis longtemps déjà interpellé les botanistes (eg. BÄCHLER 1946, RICHARD 1961, FURRER 1970-71). Sur la base de nos observations, un listing complet et détaillé de nombreux indices visuels en fonction de l'emplacement sur l'éboulis et de la saison sera présenté au chapitre 5.

2.1.1.1 Comportement thermique d'un éboulis ventilé

Un **décalage spatial** existe entre la zone où le refroidissement hivernal est le plus marqué et celle où le réchauffement est minimal durant l'été (figure 2.2). L'écoulement gravitaire d'air froid en été s'évacue de préférence au point le plus bas de l'éboulis. En revanche, l'aspiration ascendante d'air froid hivernal s'accroît dans les zones plus élevées du versant (DELALOYE, 2004).



Figure 2.2 – Modèle de circulation d'air à l'intérieur d'un éboulis en régime hivernal et estival, illustrant l'asymétrie des zones de refroidissement hivernal et estival ainsi que la présence possible d'un pergélisol. Tao = température de l'air extérieur ; Tai = température de l'air à l'intérieur de l'éboulis. (d'après DELALOYE 2004)

Sur la base de mesures réalisées au Creux-du-Van, DELALOYE (2004) a défini 5 types principaux de comportement thermique annuel du sol caractéristiques d'un éboulis froid. Nous les présentons ici brièvement :

- **Type I**: *chaud en hiver, « normal » en été.* Ce comportement correspond aux parties supérieures de l'éboulis, où la température hivernale reste généralement supérieure à 0°C, sauf localement en cas de redoux (affaiblissement de l'expulsion d'air) ou de grand froid en l'absence de neige. Le mouvement ascendant d'air chaud n'affecte cependant pas (avec la même intensité) l'intégralité de la partie supérieure de l'éboulis. La configuration de la roche en place, la géométrie de l'éboulis ou des variations granulométriques peuvent expliquer cette particularité.
- **Type II** : *froid en hiver, « normal » en été.* Il correspond à l'amont du secteur le plus froid, non concerné par l'écoulement gravitaire estival.
- Type III : *froid en hiver, froid en été.* Ce type est associé à la partie la plus froide de l'éboulis. Le sol reste généralement gelé en hiver en raison de l'aspiration d'air. Un réchauffement audelà du point de congélation peut cependant se produire lorsque l'air extérieur aspiré est supérieur à 0°C (période de redoux). Durant l'été, la température ne dépasse que très rarement les +5°C.
- **Type IV** : « normal » en hiver, frais en été. Ce secteur se situe à l'aval de la zone la plus froide et est soumis à l'écoulement gravitaire estival. Un refroidissement hivernal peut cependant y avoir lieu si le temps est très froid et que la neige est absente ou peu épaisse
- **Type 0** : normal en hiver, normal en été. La température ne s'abaisse pas en dessous du 0°C en présence de neige (> 20-30 cm) et est proche de celle de l'air extérieur durant l'été.

2.1.1.2 La question des ouvertures supérieures

Les premières études concernant les éboulis froids ont surtout fait état des sorties d'air froid et de la présence de glace dans les parties basses des éboulis. Cependant, un système de circulation d'air exige également des sorties supérieures, à l'image de celles présentes dans une glacière dynamique pour compenser l'air expulsé de l'éboulis. Des telles ouvertures ont été supposées par PFAFF (1993) (cité par WAKONNIG 1996) dans l'éboulis froid d'Eppan (Autriche). SCHAEFTLEIN en 1962 (cité par WAKONNIG 1996) mentionnait des entrées d'air estival dans partie supérieure de l'éboulis la du « Toteisboden » (Autriche). En ce même lieu, lors de mesures effectuées le 10 novembre 1995 par des conditions extérieures très favorables (10-15 cm de neige et des températures comprises entre -1.5 et -2°C), cinq zones ont été découvertes libres de neige avec des sorties d'air saturé (dû probablement à l'évaporation ayant lieu dans l'éboulis) présentant des températures de 9 à 10.7°C (WAKONNIG 1996) ! Le mélange de cet air relativement plus chaud avec un air extérieur plus froid provoque également simultanément un phénomène de condensation à



Figure 2.3 – Spectaculaires sorties d'air chaud avec fonte de la neige dans la partie supérieure d'un éboulis par une température extérieure de -7° C (Präg, Sud de la Forët Noire) (*source* : GUDE & MOLENDA 2003)

ces sorties supérieures. WAKONIGG (1996) précise encore que lors de conditions externes vraiment froides (moins de -10° C), la circulation d'air devrait être sensiblement renforcée. Ce cas de figure a notamment été mesuré dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas (DELALOYE, comm. pers.). Selon GUDE et al. (2003), l'air serait confiné dans les ouvertures (conduits) dans les parties basses, mais serait en revanche beaucoup plus dissipé dans les parties supérieures (figure 2.3). DELALOYE (2004) précise que l'évacuation d'air chaud d'un éboulis semble se faire par des « canaux » préférentiels en l'absence d'une couverture neigeuse, alors que lorsque les canaux d'évacuation sont obturés (par exemple par de la neige), l'air chaud est dispersé sur une plus large surface.

TANAKA ET AL. (2000) ont utilisé des thermographes (infrarouge thermique) pour détecter les zones sur-refroidies estivales dans la Ice Valley (Corée du Sud). Un tel système pourrait s'avérer très utile pour détecter les sorties d'air chaud durant l'hiver. Les différentes particularités ayant trait aux ouvertures supérieures seront présentées au chapitre 5.

2.1.1.3 Circulation à travers le manteau neigeux

La neige est une interface critique entre le sol et l'atmosphère. La plupart des auteurs (eg. WAKONIGG 1996, HARRIS & PEDERSEN 1998) attribuent un effet bloquant au manteau neigeux en raison de sa faible capacité de transfert d'énergie. Ainsi, WAKONIGG (1996) précise que les sorties d'air chaud doivent rester libres de neige en hiver (ce qui se produit par l'ascendance d'air relativement plus chaud dans l'éboulis), comme les ouvertures inférieures afin que la circulation puisse avoir lieu. HARRIS & PEDERSEN (1998) utilise la présence/absence d'un couvert neigeux pour déterminer les processus majeurs du refroidissement d'un éboulis. SAWADA ET AL. (2003) considèrent que l'air froid peut pénétrer dans l'éboulis aux endroits où le manteau neigeux est absent ou peu épais.

Cependant, il apparaît que l'aspiration d'air froid puisse se poursuivre même en la présence d'une épaisse couverture neigeuse, **la neige étant en effet un matériel poreux à travers duquel l'air peut circuler** (DELALOYE 2004). Les flux de chaleur au travers du manteau neigeux se produisent **par conduction** (contact moléculaire entre les cristaux de glace), mais également **par convection** (ventilation). Différents paramètres influencent l'échange d'énergie entre le sommet du manteau neigeux et le sol : (micro-)structure de la neige, densité, perméabilité, vieillissement, état d'humidification (fonte) (HOELZLE ET AL. 1999, GRUBER & HOELZLE 2001, ALBERT & SHULTZ 2002, DELALOYE 2004). Une neige compacte augmente ainsi sa conductivité thermique, mais diminue son pouvoir convectif en raison de la diminution du nombre de pores.

Durant l'hiver, l'ascension de l'air « chaud » à l'intérieur de l'éboulis va créer une dépression dans ses parties basses, d'autant plus importante que le gradient thermique entre l'air extérieur et intérieur est important. Des capteurs de pression placés sur le sol et au dessus du manteau neigeux dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas ont enregistré la création d'un gradient de pression entre la surface et la base du manteau neigeux dans la partie basse de l'éboulis (DELALOYE, comm. pers.). Afin de compenser cette dépression, l'air extérieur subit alors une aspiration forcée à travers la neige.

L'étude du comportement thermique du manteau neigeux reste néanmoins complexe et certaines interrogations liées notamment à l'état de la neige peuvent être posées. En effet, comment une strate gelée ou dure (avalanche) et donc moins poreuse va modifier la répartition spatiale et temporelle de la circulation d'air ? Quelle est l'importance de la conduction et de la convection ? Des recherches plus approfondies seraient nécessaires.

2.1.1.4 Vitesse et temps de résidence du courant d'air dans l'éboulis

Un courant d'air froid est facilement perceptible dans les parties basses des éboulis durant l'été. Quels sont alors le temps de résidence et la vitesse du courant d'air à l'intérieur de la formation poreuse ? Dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas (1'550 – 1'630 m.s.m., Préalpes valaisannes), des mesures enregistrées par un anémomètre placé dans un trou souffleur d'air froid (partie basse) permettent de donner une fourchette des ordres de grandeur de ces deux paramètres (DELALOYE, comm. pers.). L'éboulis fait environ 100 mètres de longueur. En supposant un cheminement complexe entre les blocs, la distance entre l'entrée et la sortie du courant d'air peut être estimée à 1'000 mètres. Durant la phase d'expulsion d'air froid estivale, la vitesse maximale atteignait les 0.3-0.4 m/s, soit 1.1-1.4 km/h. En hiver avant la mise en place d'un manteau neigeux, de l'air froid est aspiré à une vitesse d'environ 0.8 m/s avec une forte relation vis-à-vis de la température extérieure (plus l'air extérieur est froid, plus la vitesse est importante). Le courant ascendant est environ deux fois plus important que le courant descendant à l'emplacement des mesures. Ces résultats pourraient éventuellement expliquer pourquoi l'expulsion d'air froid est difficilement perceptible à haute altitude (DELALOYE & LAMBIEL 2005). Il est également possible que ces valeurs traduisent l'asymétrie des zones d'aspiration hivernale et de décharge gravitaire estivale.

Quoi qu'il en soit, dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas, **le temps de résidence d'une particule d'air semble très court**, avec environ 1 heure durant l'été et moins de 30 minutes durant la phase d'aspiration hivernale ! Sur la base de ces résultats, nous pouvons alors supposer que le réservoir de froid ne doit pas être emmagasiné sous forme d'air, mais bien sous forme solide dans les blocs et le terrain sous-jacent ou encore sous la forme de glace si l'humidité est suffisante. Une investigation approfondie et suivie doit cependant encore être entreprise pour décrire plus précisément ce processus d'accumulation de frigories.

Le mécanisme de ventilation décrit précédemment semble donc être le principal responsable des anomalies thermiques négatives dans les parties basses et positives dans les parties hautes des éboulis (WAKONNIG 1996, DELALOYE 2004). D'autres facteurs, comme l'ensoleillement, l'évaporation, la végétation, la neige ou le vent, influenceraient également de façon secondaire le refroidissement observé dans un éboulis. Leur rôle et leur importance seront discutés au chapitre 6.4.

2.1.2 Hypothèses et objectifs de l'étude

Cette étude fait suite à la thèse de DELALOYE (2004) et se concentre sur l'étude de systèmes de circulation d'air interne dans des éboulis et des glaciers rocheux fossiles de moyenne altitude des Préalpes suisses romandes. Deux hypothèses sont formulées :

- Une ventilation de type « effet de cheminée » ou « tube à vent » peut avoir lieu dans toute formation sédimentaire dont la porosité efficace est suffisante. Par porosité efficace, nous entendons le volume d'air se trouvant entre les blocs et pouvant circuler librement à l'intérieur ainsi qu'entre l'extérieur et l'intérieur de la formation poreuse.
- Pour qu'une convection d'air puisse avoir lieu, un contraste thermique entre l'intérieur et l'extérieur de la formation est nécessaire. L'intensité et la direction du courant d'air dépendent de la valeur (positive ou négative) du gradient de température. Un tel cas de figure est possible dans un climat à alternance de saisons.

L'objectif principal est de déterminer **l'occurrence et la fréquence des systèmes de ventilation dans des éboulis de moyenne altitude**. Assez tôt, les recherches se sont élargies à d'autres formations sédimentaires poreuses (glaciers rocheux fossiles, éboulement).

Lors de notre étude, nous avons également cherché à répondre à de nombreuses autres interrogations, à savoir :

- Définir de manière précise les indices visuels et thermiques pour détecter la présence d'un système de ventilation, notamment dans la partie basse où les manifestations demeurent encore inconnues à haute altitude (DELALOYE 2004, DELALOYE & LAMBIEL 2005).
- Mettre en évidence les comportements thermiques saisonniers d'un système de ventilation, notamment par l'analyse de la relation de la température de l'air du système éboulis glacier rocheux fossile avec l'évolution de la température de l'air extérieur.
- Déterminer l'amplitude des anomalies thermiques négatives et positives caractérisant une formation ventilée de moyenne altitude, ainsi que l'intensité du refroidissement en surface et en profondeur provoqué par la circulation d'air.
- Décrire la connexion existante entre diverses formations sédimentaires adjacentes, principalement par l'étude des systèmes de ventilation dans des complexes éboulis glacier rocheux fossile.
- Etudier l'importance de la granulométrie et de la pétrographie sur l'efficience de la circulation d'air.
- Attester la présence/absence de pergélisol dans des éboulis froids de moyenne altitude.

Afin de répondre à ces diverses interrogations, un inventaire de nombreux éboulis et glaciers rocheux fossiles des Préalpes suisses romandes a été réalisé (voir aussi DORTHE 2006). Des observations répétées (cf. 3.1), une cartographie thermique du sol en hiver (cf. 3.2), ainsi qu'un enregistrement continu des températures du sol (cf. 3.3) ont permis de déterminer de nombreux indices visuels et thermiques de surface caractéristiques d'un système de ventilation. Des mesures géoélectriques (cf. 3.4) ont été utilisées pour définir la structure du sous-sol. Le regroupement et la comparaison des divers résultats acquis sur l'ensemble de nos sites durant les années 2004 à 2006 doivent enfin permettre d'expliquer la récurrence et les particularités des processus de ventilation à moyenne altitude.

2.2 Sites d'étude

Une vingtaine de sites, principalement situés dans les Préalpes suisses romandes, ont été visités entre avril 2004 et mars 2006 (figure 2.4 et tableau 2.1). Cinq terrains ont fait l'objet d'une recherche approfondie avec de fréquentes visites et la réalisation de mesures thermiques (BTS et GSTM) et géoélectriques (cf. chapitre 4). Les éboulis de Vudèche (FR) et la combe de Dreveneuse (VS) ont été

investigués par JONATHAN DORTHE, alors que le Bois des Arlettes, le cirque de la Pierreuse et la combe de Lavaux – Châtillon l'ont été par SÉBASTIEN MORARD. Une forte pente, des chutes de pierre, des avalanches et une dense végétation ont parfois rendu difficile voire impossible la prise de certaines données.



Figure 2.5 – Localisation des différents sites d'étude. Les points rouges correspondent aux 5 principaux sites d'investigation, les points blancs aux sites secondaires. Les caractéristiques sont données dans le tableau 2.1. (*fond topographique* : swisstopo).

No	Site Canton Coordonnées		Carte topo	Altitude Orientatio			
110	Site	Canton	Ν	Ε	Carte topo	Annual	Orientation
1	Vudèche	FR	566.413	150.130	1244	>1560	ENE
2	Dreveneuse du Milieu	VS	557.670	124.570	1284	>1600	Е
3	Bois des Arlettes	VD	570.450	137.950	1265	>1600	NW
4	La Pierreuse	VD	579.600	143.350	1265	>1600	Ν
5	Combe Lavaux-Châtillon	VD	577.300	137.500	1265	>2100	W-N
6	Le Larzey	VD	571.500	137.500	1265	>1700	SE
7	Lac Lioson	VD	576.000	137.000	1265	>1850	N
8	Gros Chadoua	FR	574.340	150.180	1245	>1560	NW
9	Drudzes	FR	572.960	148.890	1245	>1565	N-NE
10	Vanil de l'Aille	FR	574.880	152.120	1245	>1260	WSW
11	Revers de l'Aille	FR	575.250	152.500	1245	>1380	N-NE
12	Vanil de l'Ecri	FR	576.700	152.900	1245	>1820	N-NW
13	Bounavaux	FR	576.800	153.300	1245	>1580	N-NW
14	Wandflue N	FR	585.500	156.900	1246	>1600	N-NW
15	Wandflue S	FR	586.580	156.780	1246	>1840	S
16	Sattelspitzen	FR	587.550	159.300	1226	>1600	W-NW
17	Breccaschlund	FR	587.300	165.400	1226	>1540	W-NW
18	Flottuwald	VS	610.900	131.500	1287	>1600	S
19	Crêt de la Neige	France	483.000	124.250	1280	>1600	NW
20	Gravières Châtillon-Tuffière	FR	573.500	177.700	1205	600	-

Tableau 2.1 – Caractéristiques des sites visités. En grisé : sites principaux.

2.3 Le pergélisol

De nombreux auteurs (eg. WAKONNIG 1996, MOLENDA 1996, DELALOYE ET AL. 2003) utilisent le terme « pergélisol » pour caractériser les éboulis froids. Nous allons donc le présenter brièvement. Le pergélisol est un **phénomène thermique** qui peut se définir ainsi : « *il s'agit d'un matériel de subsurface dont la température est inférieure ou égale à 0°C durant l'année entière* » (DELALOYE

2004). Pour ce travail, cette définition, qui est communément acceptée, sera prise en compte. Cependant, il est judicieux d'avoir à l'esprit le cas particulier où la température du sol est, au cours de l'année, au niveau de l'isotherme (0°C) de l'équilibre de phase entre la glace et l'eau (DELALOYE 2004). Ce contexte peut se rencontrer à la base d'un pergélisol ou dans les zones limites du domaine du pergélisol. La chaleur latente nécessaire lors de la fusion ou libérée lors de la solidification de la glace explique la très grande stabilité thermique de ce type de situation, « *d'autant plus remarquable que la teneur du matériel en glace, respectivement en eau, est importante* » (DELALOYE 2004). Contrairement aux phénomènes se déroulant dans les hautes latitudes avec comme cadre un relief relativement peu accidenté, le pergélisol de montagne évolue dans un contexte climatique et topographique beaucoup plus variable. HOELZLE ET AL. (2001) insistent aussi sur les flux conséquents de matière et d'énergie causés par les circulations d'eau et d'air au sein d'accumulation de blocs (cf. chapitre 6). Il en découle des échanges relativement importants entre la surface du sol et le niveau du toit du pergélisol qui peuvent résulter sur un décalage de quelques degrés centigrades entre la température du sol et le toit du pergélisol (DELALOYE 2004).

Suite à de nombreuses études de terrain, DELALOYE (2004) a affiné la définition du pergélisol : « Le pergélisol est un matériel de subsurface dont la température n'est jamais supérieure à la température du point de fusion de la glace (~0°C) durant l'année entière ». Il utilise aussi les trois qualificatifs suivants pour le pergélisol :

- *froid* lorsque la température moyenne du pergélisol est clairement inférieure au 0°C (< -0.5°C) et qu'aucune mesure de température instantanée n'est égale au 0°C.
- *tempéré* lorsque la température moyenne du pergélisol est constamment égale à 0°C.
- semi tempéré dans des situations où la température moyenne du pergélisol est proche de 0°C (> -0.5°C) ou encore lorsque des valeurs de 0°C sont occasionnellement mesurées.

Ces définitions classiques se rattachent essentiellement au pergélisol « typique ». Dans le contexte de formations poreuses ventilés comme les éboulis froids, une question peut se poser : du pergélisol, comme suggéré par différents auteurs (eg. WAKONNIG 1996, MOLENDA 1996, DELALOYE ET AL. 2003), existe-t-il vraiment ? Et s'il est présent, de quel type de pergélisol s'agit-il ? Un nouveau qualificatif est-il nécessaire ?

Maintenant que la définition du pergélisol est précisée, il est utile d'aborder plus en détail ses propriétés thermiques. En effet selon sa conductivité thermique (influencée par le type de terrain), la quantité de glace ou encore l'épaisseur du sol gelé, le pergélisol réagit relativement lentement aux forçages climatiques (réchauffement climatique par exemple). De ce fait, ses états actuels peuvent être influencés par les conditions climatiques passées allant de la dizaine d'années à quelques siècles (HOELZLE ET AL. 2001).

2.3.1 Propriétés thermiques

Dans un contexte typique, la présence et l'évolution d'un pergélisol sont dictées par les échanges d'énergie existant entre l'air libre (atmosphère proche de la surface) et le sommet du pergélisol via la couche de neige (s'il y en a), la surface du sol et la couche active (HOELZLE ET AL. 2001, STOCKER-MITTAZ ET AL. 2002, DELALOYE 2004). Dans l'absolu, il suffit donc de comprendre les différences énergétiques entre l'atmosphère et le pergélisol pour connaître les influences du climat sur celui-ci. Or, il y a différentes « couches » (**neige, surface du sol et couche active**) qui induisent des décalages thermiques relativement importants (*thermal offsets*) entre la température de l'atmosphère et le toit du pergélisol (figure 2.5) (DELALOYE 2004). Plusieurs auteurs ont fourni des explications concernant ces décalages thermiques, soit dans une optique de compréhension globale (DELALOYE 2004), soit dans l'élaboration de modèles sur le pergélisol et ses échanges thermiques (HOELZLE AL.2001, RISEBOROUGH 2002, STOCKER-MITTAZ ET AL.2002, LUETSCHG ET AL.2003).



Figure 2.5 - Relation entre l'atmosphère et le toit du pergélisol et décalages thermiques. (source : Delaloye 2004).

Dans de la roche compacte ou dans un mélange de blocs et de matériaux plus fins (sables, graviers), le transfert de chaleur se fait essentiellement par conduction (DELALOYE 2004). Dans des blocs sans matrice fine intercalée, caractéristique fréquente des terrains sédimentaires tels qu'éboulis ou glaciers rocheux, les échanges de chaleur se font également par des convection et advection. La compréhension des processus thermiques qui se déroule dans ce type de sédiments meuble est d'un intérêt non négligeable. Certains auteurs (HANSON & HOELZLE 2003, HERZ ET *AL*.2003) ont apporté des éléments de réponses.

Cependant dans le contexte des éboulis ventilés, cette approche du bilan thermique par des échanges d'énergie uniquement dans le plan vertical ne peut être pleinement envisageable. En effet, dans des terrains sédimentaires poreux (éboulis, glacier rocheux), une circulation relativement importante de fluides tels que l'air (convection) ou l'eau (écoulement) peut avoir lieu dans le plan horizontal et vertical, transférant ainsi de la chaleur entre l'atmosphère et le pergélisol (s'il y en a) (DELALOYE 2004).

Les notions des thermal offsets classiques méritent également quelques adaptations :

- Le rôle de la neige est fondamental pour l'étude des éboulis froids. Il a déjà été discuté au chapitre 2.1.1.3.
- La couche active est par définition la portion de terrain située au-dessus du toit du pergélisol et qui dégèle saisonnièrement. Elle est généralement déterminée sur la base des flux énergétiques verticaux et conductifs. Les éboulis ventilés étant principalement contrôlés par des flux énergétiques convectifs et advectifs, nous n'utiliserons pas la notion de « couche active » dans notre travail.

2.4 Formes géomorphologiques étudiées

Nos recherches ont pour objets principaux différentes formations sédimentaires poreuses (éboulis, glaciers rocheux fossiles, éboulements, moraines, gravières). Il semble donc judicieux de présenter brièvement ces formes géomorphologiques particulières.

2.4.1 Eboulis

Un éboulis peut être défini comme une « formation détritique mise en place progressivement sur un versant par suite du détachement successif de fragments rocheux d'une paroi rocheuse ou de toute

pente inclinée à plus de 40-45° » (FRANCOU & HÉTU 1989, FRANCOU 1991). Les éboulis, versants d'origine gravitaire, présentent une morphologie originale : au pied d'une paroi, des débris grossiers forment une accumulation dont la pente est concave et qui présente un granoclassement de l'amont vers l'aval. La surface de l'éboulis présente une pente moyenne de 35° et peut avoir été remodelée par des processus de solifluxion, de gélifluxion, des coulées torrentielles, des coulées sèches... (FRANCOU & HÉTU 1989). Les formations étudiées durant ce travail se sont formées depuis le tardiglaciaire, une fois les glaciers locaux disparus (notamment décrits par SCHOENEICH 1998).

Des conditions de sol froides et de la glace, associées avec une végétation azonale, ont été couramment signalées dans des éboulis de basse altitude (eg. BERTINELLI ET AL. 1993, WAKONIGG 1996, GUDE & MOLENDA 2000, DESCROIX 2001, GUDE ET AL. 2003, DELALOYE 2004). Ces manifestations sont connues sous le nom « d'éboulis froids », de « unterkühlten Schutthalden » ou de « cold scree (talus) slope ». Nous proposons la définition suivante pour un éboulis froid : formation sédimentaire poreuse se rencontrant à toute altitude et caractérisée par la présence d'une anomalie thermique négative (refroidissement) dans sa partie basse et d'une anomalie thermique positive dans sa partie haute (réchauffement) par rapport à la température moyenne annuelle de l'air. L'anomalie est causée par un mécanisme de circulation d'air interne (tube à vent, effet de cheminée).

L'existence d'un micro-climat périglaciaire dans les éboulis (GUDE & MOLENDA 2000) conséquent à un système de circulation d'air requiert un certain nombre de conditions préalables. Les constatations suivantes ont été élaborées sur la base d'observations et de mesures réalisées dans une trentaine d'éboulis d'Europe (WAKONIGG 1996, RUZICKA (1999), GUDE & MOLENDA 2000, GUDE et al. 2003, RIST ET AL. 2003, DELALOYE 2004) :

- Tous les sites affectés par une circulation d'air interne se trouvaient dans une pente raide d'au moins 20 à 25°.
- Dans la partie basse, une épaisse couche (plusieurs mètres) de blocs d'au moins 10 cm de diamètre avec de nombreux vides est nécessaire pour le bon fonctionnement de la ventilation.
- En conséquence, les matériaux fins lessivés sont presque totalement absents de la surface.
- La plupart des sites se trouvent au pied d'une paroi abrupte (>40°) d'au moins 75 mètres de haut.
- Si un sol est présent, il est peut épais, réduisant ainsi l'isolation thermique du terrain.
- La présence d'éboulis froid est indépendante de l'orientation.

D'autres facteurs dynamiques comme par exemple la couverture neigeuse, le rayonnement solaire ou l'origine de la circulation d'air seront discutés au chapitre 6.

2.4.2 Glaciers rocheux fossiles

Un glacier rocheux se définit selon BARSCH (1988, cité par SCHOENEICH 1992) comme « un corps de sédiments gelés en permanence, contenant de la glace interstitielle et/ou des lentilles de glace, soumis à des mouvements de reptation causés par la déformation lente et continue de la glace qu'ils contiennent ». Selon leur activité, les glaciers rocheux sont classés en (i) actifs (en mouvement), (ii) inactifs (présence de glace mais pas de mouvement) et (iii) fossiles (absence de glace). Cette distinction en trois classes semble cependant trop arbitraire, des cas « hybrides » pouvant exister (eg. DELALOYE & MORAND 1997). L'origine du matériel alimentant le glacier rocheux peut provenir directement d'éboulis situés en amont (*talus rockglacier*) ou à partir de sédiments morainiques (*debris rockglacier*).

SCHOENEICH (1992), sur la base d'observations menées dans les Préalpes vaudoises a proposé différents critères d'identification de glaciers rocheux fossiles que nous reprenons ici (figure 2.6) :

- Situation à l'aval d'une zone d'alimentation en débris rocheux (éboulis ou accumulation morainique).

- Micro-relief de crêtes et de sillons longitudinaux dans la partie radicale, résultant de mouvements de cisaillement longitudinaux.
- Micro-relief de crêtes arquées concentriques discontinues dans les zones de compression, essentiellement dans la partie frontale, ne pouvant se former qu'en conditions de pergélisol.
- Crête externe souvent continue et plus haute du fait d'un pourcentage de glace plus faible en périphérie du glacier rocheux. La perte de volume y est donc moins importante lors de la fusion de la glace.
- Front raide et bien délimité.
- Pente extérieure souvent couverte de végétation, du fait de l'affleurement au front des couches plus fines du noyau du glacier rocheux.
- Surface intérieure couverte d'un chaos de gros blocs, avec pédogenèse souvent très maigre voire absente.
- Présence de dolines thermokarstiques, rarement occupées par des lacs. Le fond des dolines et des sillons est tapissé d'un « openwork » de gros blocs sans matrice.
- Absence totale de drainage superficiel.



Figure 2.6 – Caractéristiques des glaciers rocheux fossiles. (*source* : SCHOENEICH 1998)

Les glaciers rocheux actifs donnent une bonne approximation de la limite inférieure du pergélisol discontinu et peuvent donc être utilisé pour la construction d'un modèle de distribution du pergélisol. DELALOYE & MORAND (1997) précisent que régionalement la zone de pergélisol improbable se rencontre au-dessous de l'altitude inférieure du front des glaciers rocheux actifs. Dans les Préalpes vaudoises, de nombreux glaciers rocheux fossiles témoigneraient ainsi de l'existence passée d'un pergélisol au moins discontinu (SCHOENEICH 1992, 1998). En raison de leur emplacement à l'intérieur d'anciennes moraines latérales tardiglaciaires, **leur formation s'étalerait entre 16'000 et 12'600 BP**. Trois générations de ces formes, correspondant à un même état climatique, ont ainsi pu être identifiées : la première génération (9 individus) correspondrait à un abaissement de la limite du

pergélisol d'environ 1'100-1'150 m par rapport à 1850 (stade HE8 de SCHOENEICH (1998), équivalent possible du stade glaciaire Weissbad). La deuxième génération est la plus importante avec 14 individus (notamment les glaciers rocheux fossiles du Bois des Arlettes, du Larzey et de la Pierreuse) et correspondrait à un abaissement de 850-950 m (Dryas I, stades HE6-HE4, équivalent possible du stade Steinach ou Gschnitz). Seuls deux individus composent la troisième génération dont le glacier rocheux du Lac Lioson (abaissement de 600-650 m ; stades HE3-HE2, équivalent possible du stade Clavadel). Ces datations doivent cependant rester indicatives. Il n'est en effet par certain que les stades « périglaciaires » puissent être directement liés aux stades « glaciaires ».



Figure 2.7 - Répartition altitudinale des fronts des glaciers rocheux fossiles selon l'orientation dans les Préalpes vaudoises (d'après les observations de SCHOENEICH 1992, 1998).

La répartition altitudinale en fonction de l'orientation des fronts des glaciers rocheux montre pour la deuxième génération une différence d'environ 400m entre les versants N – NE et les versants Sud (figure 2.7). Cette configuration correspond aux différentes études menées sur la distribution des glaciers rocheux (eg. DELALOYE & MORAND 1997). Les glaciers rocheux investigués lors de notre recherche se rattachent à la deuxième génération décrite par SCHOENEICH (1992, 1998) formées durant le dernier tardiglaciaire lorsque MAAT était inférieure d'environ 5°C par rapport à aujourd'hui (tableau 2.2).

Génération de glaciers	Abaissement du front par	Différence de température par
GR I	1'100 - 1'150	-5.6 à -5.9°C
GR II	850 - 950	-4.3 à -4.6°C
GR III	600 - 650	-3.1 à -3.3°C

Tableau 2.2 – Différence minimale de température nécessaire à la formation des glaciers rocheux, par rapport à 1'850, avec un gradient de 0.51°C/100m. (*source* : SCHOENEICH 1998)

2.4.3 Autres formations sédimentaires poreuses

Deux autres types de formations sédimentaires poreuses ont été l'objet d'une attention particulière : des zones de blocs éboulés et des moraines.

- Sur certains sites, des zones de blocs éboulés ont été également étudiées (cf. chapitre 6.4). En raison de leur formation brutale, leur datation n'a pas été possible. Cependant certaines zones de blocs fortement végétalisés et sur lesquels de la forêt s'est développée pourraient être rattachées à un âge tardiglaciaire ou postglaciaire ancien.
- La plupart des glaciers rocheux fossiles étudiés se situent à l'intérieur d'arcs morainiques tardiglaciaires. Une excellente reconstitution de la dernière phase de déglaciation a été proposée par SCHOENEICH (1998).

2.5 Contexte climatique des années hydrologiques 2003-2004 à 2005-2006

Pour conclure ce chapitre consacré au contexte de l'étude, il nous a semblé important de rappeler brièvement les conditions climatiques de la période 2003 – 2006. En effet, l'interprétation des mesures thermiques (BTS et UTLs, cf. chapitre 3) nécessite la connaissance de l'évolution des conditions atmosphériques. Comme nous l'avons déjà énoncée au chapitre 2.1, une interaction très forte existe entre l'air à l'intérieur des formations sédimentaires poreuses et l'air à l'extérieur. Des capteurs de température ont également été placés sur des arbres afin de disposer de données propres à nos sites d'études pour l'année hydrologique 2004-2005. La température de l'air des périodes 2003-2004 et 2005-2006 a été reconstruite par régression linéaire en fonction des données climatologiques de la station de montagne du Säntis (2'502 m.s.m., non-affectée par l'inversion thermique rencontrée dans les vallées en hiver).

2.5.1 Les années 2003 – 2006 par rapport à la moyenne 1864 – 2006

Les figures 2.8 et 2.9 permettent de replacer la période de recherche dans un contexte climatique séculaire. Les données mensuelles du Säntis permettent de reconstituer le climat d'une station de montagne depuis l'année 1864. La variabilité naturelle du climat est comprise à l'intérieur de l'écart-type (+/- 0.92°C pour « l'été » ; +/- 1.05°C pour « l'hiver ») de part et d'autre de la moyenne (2.75°C pour « l'été » ; -6.68°C pour « l'hiver »). L'« été » correspond à la moyenne mensuelle des mois de mai à octobre, l' « hiver » à la moyenne mensuelle des mois de novembre à avril.



Figure 2.8 – Evolution de la température mensuelle de l'air au Säntis pour les mois de mai à octobre (« été ») par rapport à la norme climatologique 1864-2006. (*données Säntis* : Météosuisse).



Figure 2.9 – Evolution de la température mensuelle de l'air au Säntis pour les mois de novembre à avril (« hiver ») par rapport à la norme climatologique 1864-2006. L'année 1940 correspond à l'hiver 1940-1941 (par exemple). (*données Säntis* : Météosuisse).

Jusque dans les années 1940, les températures estivales étaient inférieures à la norme. L' « été » le plus froid a eu lieu en 1974 (-2.2°C). Il est intéressant de remarquer que la plupart des « étés» chauds en montagne depuis 1864 ont eu lien entre 1943 et 1953, puis entre 1985 et 2006. L' « été » 1947 a été le plus chaud du siècle avec des températures environ 2.7°C supérieures à la norme. Les « étés » 2003, 2004 et 2006 sont au-delà de la variabilité naturelle, alors que la température moyenne de l'« été » 2004 n'est que 0.5°C supérieure à la moyenne séculaire.

Entre les années 1987 et 2004, 11 « hivers » (dont celui de 2003-2004) ont connu des températures supérieures d'au moins 1°C à la norme 1864 – 2006. En revanche, les hivers 2004-2005 (~ +0.05°C) et 2005-2006 (- 0.2° C) s'inscrivent dans les valeurs de la norme climatologique. Ces deux hivers peuvent donc être considérés comme « frais » par rapport aux températures hivernales de la dernière décennie. Les températures hivernales ne suivent pas forcément la même tendance que les températures estivales. Par exemple, l'hiver glacial de 1969 (-2.2°C) succède à un été chaud (+0.8°C) ; l'été pourri de 1974 (-2.2°C) s'inscrit quant à lui entre deux hivers plus chauds que la norme (~ +0.5°C).

2.5.2 Aperçu météorologique général d'octobre 2003 à octobre 2006

Une vue plus détaillée des conditions météorologiques couvrant la période d'octobre 2003 à octobre 2006 est présentée ci-dessous ; dans un premier temps pour l'ensemble de la Suisse (tableau 2.3), puis pour notre secteur d'étude en particulier.

2003	Températures et insolation extrêmes, peu de pluie, canicule exceptionnelle
Octobre	Arrivée massive d'air froid. Neige jusqu'en plaine au nord des Alpes.
Novembre	Foehn et temps doux, pluie au sud.
Décembre	Foehn, soleil sur le Plateau, neige abondante au sud, Noël ensoleillé et froid.
2004	Changeant et plus doux que la normale, orages de grêle sur le Plateau
Janvier	Précipitations abondantes, tempêtes, neige en fin de mois, sécheresse au sud.
Février	Début de mois printanier et ensoleillé, temps hivernal dès la mi-février.
Mars	D'abord hivernal, puis chaud au milieu du mois, puis neige le long des Préalpes.
Avril	Pluies abondantes au sud ; au nord sécheresse, foehn et Pâques sous la pluie.
Mai	Changeant, retour de l'hiver en montagne au début, temps estival à l'Ascension.
Juin	Changeant, pluies abondantes en Suisse centrale, sécheresse extrême au sud.
Juillet	Le 8 juillet, exceptionnels orages de grêle au nord des Alpes.
Août	Temps lourd et très chaud, orages violents à l'ouest, puis changeant.
Septembre	Eté indien au début et donc mois plutôt doux, temps sec à l'ouest et au sud.
Octobre	Foehn et temps doux dans les Alpes. Sinon pluvieux, et très peu de soleil au sud.
Novembre	Précipitations rares au nord, début de mois doux et fortes pluies de barrage au sud.
Décembre	Soleil et douceur en altitude, stratus au nord ; changeant dès la mi-décembre.
2005	Chaud en plaine, très sec au sud, fortes précipitations en août
Janvier	Ensoleillé et printanier, hivernal à la fin du mois, très peu de pluie au sud.
Février	Hiver rigoureux en seconde partie de mois au nord, grande sécheresse au sud.
Mars	Très froid au début, très doux dès la mi-mars, peu de précipitations.
Avril	Un peu trop doux ; chutes de neige exceptionnelles sur l'ouest du Plateau.
Mai	Changeant, beaucoup de soleil, surtout au sud ; fin du mois estivale.
Juin	Très chaud et ensoleillé, souvent très sec ; estival depuis la mi-juin.
Juillet	Très chaud et sec au sud, changeant au nord ; localement orages violents.
Août	Instable, et dans les Alpes, humide et peu de soleil. Catastrophe naturelle.
Septembre	Chaud et dans de nombreux endroits très secs.
	Eté indien au nord des Alpes. Ensoleillé et sec.
Novembre	Ensoleillé et très sec. Dès la mi-novembre, temps hivernal.
Décembre	Plus froid que la norme 1961-1990, notamment en montagne et plutôt sec.

2006	Cinquième année la plus chaude en Suisse depuis le début des mesures en 1864.
Innuiar	Plus froid que la norme 1961-1990 en plaine. En altitude, les températures furent conformes ou parfois
Janvier	légèrement excédentaires à la norme. Faibles précipitations.
Février	Plus froid que la norme et peu ensoleillé au nord des Alpes. Précipitations variables selon les régions.
Mars	Plus froid que la norme. Au nord des Alpes, le mois fut arrosé et peu ensoleillé.
Avril	Plus doux que la norme. Au nord des Alpes, le mois fut humide, au sud il fut sec.
Mai	Plus doux que la norme. Au nord des Alpes, le mois fut humide, au sud il fut trop sec.
Juin	Nettement plus chaud que la norme, trop sec et très ensoleillé.
Juillet	Le plus chaud depuis le début des mesures en 1864. 5.2°C plus chaud que la norme au Säntis.
Août	Extrêmement maussade, un des plus froid de ces 100 dernières années. Très humide.
Septembre	Un des plus chauds depuis ces 140 dernières années au Nord et dans les Alpes.
Octobre	Historiquement doux.

Tableau 2.3 – Aperçu météorologique général entre octobre 2003 et octobre 2006 pour l'ensemble de la Suisse. (*source* : MÉTÉOSUISSE 2006, BAUDER ET AL. 2006).

Sur les sites de Vudèche (~1'600 m.s.m.) et du Bois des Arlettes (~1'750 m.s.m), un capteur de température (UTL) a été placé sur un arbre à environ 2 mètres de hauteur afin de mesurer la température de l'air extérieur. Les données enregistrées s'étalent d'octobre 2004 à septembre 2005. Afin de compléter la séquence pour l'ensemble de la période 2004 – 2006, les données journalières et mensuelles ont été reconstruites par régression linéaire à partir de la station du Säntis (2'502 m.s.m.) (figure 2.10 et tableau 2.4). Le coefficient de corrélation r² est élevé avec r² = 0.9383 pour les données journalières et r² = 0.9775 pour les données mensuelles. La formule de régression entre le Bois des Arlettes (y) et le Säntis (x) pour les données journalières (1) (figure 2.10) et pour les données mensuelles (tableau 2.4) (2) valent :

$$y = 1.0274 x + 5.3811 \tag{1}$$

$$y = 1.1016 x + 5.4873$$
 (2)



Figure 2.10 – Evolution de la température de l'air journalière au Bois des Arlettes (1'750 m.s.m.) pour les années hydrologiques 2003-2004, 2004-2005 et 2005-2006. Les valeurs ont été dérivées avec les données du Säntis. La régression linéaire est basée sur les valeurs mesurées au Bois des Arlettes entre le 1^{er} octobre 2004 et le 30 septembre 2005 par un capteur (UTL) placé à 2.5 mètres de hauteur sur la face nord d'un mélèze. La formule de régression est y = 1.0274 x + 5.3811. Le coefficient de corrélation vaut $r^2 = 0.9383$. La norme climatique pour les températures journalières est basée sur les données du Säntis entre le 1^{er} janvier 1884 et le 31 décembre 2005. (*données Säntis* : Météosuisse).

1864-2006	Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aôut.	Sept.
Moyenne	4.88	0.28	-2.53	-3.63	-3.69	-2.23	0.54	5.19	8.39	10.73	10.66	8.55
Ecart-type	2.55	2.15	2.40	2.51	2.70	2.42	1.93	2.11	1.82	1.93	1.78	2.23
2003-2004	3.39	4.39	-0.24	-4.54	-2.66	-1.67	1.41	3.95	9.01	11.33	12.65	10.11
Différence	-1.49	4.10	2.28	-0.91	1.02	0.56	0.87	-1.25	0.62	0.59	1.99	1.56
2004-2005	7.91	0.53	0.20	-3.99	-8.06	-1.56	1.85	6.59	11.00	11.55	10.00	10.55
Différence	3.03	0.25	2.73	-0.36	-4.38	0.67	1.31	1.40	2.61	0.81	-0.65	2.00
2005-2006	10.44	0.09	-4.76	-2.55	-4.10	-2.88	1.41	5.82	11.00	16.39	7.69	13.64
Différence	5.56	-0.19	-2.23	1.08	-0.41	-0.65	0.87	0.62	2.61	5.66	-2.97	5.09

Tableau 2.4 – Moyenne mensuelle et écart-type des températures pour le Bois des Arlettes (dérivées des données du Säntis) pour la période 1864 - 2006, et pour les années 2004, 2005 et 2006. La norme climatique pour les températures mensuelles est basée sur les données du Säntis entre le 1^{er} janvier 1864 et le 31 décembre 2006. Les chiffres en bleu foncé indiquent des valeurs situées au-dessous de l'écart-type à la moyenne, en bleu clair au-dessous du demi écart-type, en rouge au-dessus de l'écart-type et en orange au-dessus du demi écart-type. (*données* : Météosuisse)

Différentes particularités sont à relever pour les trois années hydrologiques :

- L'hiver 2003-2004 est relativement chaud. Deux pics de froids ont eu lieu à la fin janvier et au début mars alternant avec des périodes de redoux importantes au début février et à la mi-mars. Entre avril et octobre 2004, les fluctuations météorologiques restent à l'intérieur de l'intervalle de la variabilité séculaire du climat.
- Durant l'année hydrologique 2004-2005, un premier refroidissement intervient vers le 10 novembre, suivi d'une remontée des températures en début décembre et d'une rechute à la mi-décembre. Le début de mois de janvier est doux, puis est suivi par une baisse brutale des températures (de +5° à -15°C !) dès la moitié du mois. Le mois de février est glacial (-4.38°C par rapport à la norme), à l'exception d'une brève période de redoux vers le 12 février. À la mi-mars, un brusque redoux fait passer les températures de -7°C (8 mars) et +6°C (16 mars). Une forte humidification du manteau neigeux a dû se produire durant cette période. Les températures demeurent ensuite légèrement supérieures à la norme, à l'exception d'un mois d'août pourri. Le mois de juin 2005 est caniculaire.
- L'année hydrologique 2005-2006 commence avec un magnifique été indien. Un fort refroidissement intervient à la mi-novembre (de +7°C à -7°C en quelques jours) jusqu'à la fin du mois de décembre. Le mois de janvier (+1.08 par rapport à la norme) est relativement doux, alors que les températures des mois de février (-0.41°C) et de mars 2006 (-0.65°C) sont en dessous de la norme. A la suite d'un début de mois de juin relativement froid, des conditions caniculaires durent jusqu'à la fin juillet. Comme en 2005, le mois d'août est pourri.

2.5.3 Développement du manteau neigeux

L'interprétation des mesures de températures du sol – acquises par des sondes BTS (cf. 3.2) et des UTLs (cf. 3.3) depuis octobre 2004 – nécessite la connaissance des caractéristiques du manteau neigeux. Afin de déterminer le timing et l'ampleur des précipitations neigeuses des hivers 2004-2005 et 2005-2006, nous avons utilisé les données enregistrées par un mât à neige provenant du Creux-du-Van (fournies par R. DELALOYE) (figure 2.11). Le mât à neige permet de reconstruire le développement du manteau neigeux hivernal grâce à des « *enregistrements continus de la température effectués à différentes hauteurs au-dessus de la surface du sol* » (DELALOYE 2004). Même si les données proviennent d'un site de plus basse altitude (environ 1'200 m.s.m.) et d'une autre région géographique (Jura neuchâtelois), elles nous permettent quand même de déterminer la tendance générale du développement du manteau neigeux. Les hauteurs de neige et les températures du sol ne sont donc qu'indicatives et ne doivent pas être considérées dans leur valeur propre.



Figure 2.11 – Enneigement au Creux-du-Van pour les hivers 2004-2005 et 2005-2006, mesuré par un mât à neige de 2 mètres de haut. La température du sol (ou ça) sous le manteau neigeux est également indiquée. (*données* : R. DELALOYE).

L'hiver 2004-2005 se caractérise par un enneigement relativement tardif. Les premières chutes de neige se produise vers le 10 novembre, mais les quantités restent faibles jusqu'à la mi-janvier (<50 cm). L'épaisseur va ensuite augmenter pour atteindre environ 1.5 m à la fin février. La fonte commence à la mi-mars et la neige disparaît du site le 4 mai.

L'hiver 2005-2006 connaît en revanche un enneigement conséquent, approchant les valeurs maximales enregistrées pour le Creux-du-Van sur la période 1999-2006. Les premières neiges amènent environ 80 cm à la fin novembre. Entre la fin décembre 2005 et la mi-avril 2006, l'épaisseur du manteau atteint au moins 2 mètres (le mât à neige est alors complètement enfoui). La fonte commence à la mi-avril et se termine le 16 mai.

Ce chapitre nous a permis d'introduire le contexte large de notre étude. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes méthodes utilisées pour étudier les mécanismes de circulation d'air. Le chapitre 4 exposera les résultats des mesures de terrain. Pour une bonne compréhension de ce travail, il s'agit de garder à l'esprit les différentes notions présentées ci-dessus.

3. Méthodes

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de la cartographie géomorphologique, de l'observation et la prise de mesures instantanées à l'aide d'un thermomètre de poche (3.1), ainsi que de l'analyse de la végétation (3.5) ont permis d'avoir une première approche des phénomènes de circulation d'air. Par la suite, l'application de mesures thermiques – BTS (3.2) et enregistrement continu de la température du sol (3.3) – et de prospection géoélectrique (3.4) s'est avérée très utile pour une meilleure compréhension des processus de ventilation.

3.1 Observations et cartographie

Des fréquentes visites de terrain ont été effectuées entre avril 2004 et novembre 2005 afin d'une part d'observer les diverses manifestations liées à un système de ventilation et d'autre part pour cartographier la géomorphologie. Cette première approche est extrêmement importante. En effet, le travail d'observation permet de déterminer les secteurs intéressants sur lesquels des méthodes « plus lourdes » en temps, en matériel, en personnel et en argent seront appliquées.

La température du sol et de courants d'air froid ou chaud a été fréquemment mesurée à l'aide d'un thermomètre digital de poche (précision \pm - 0.5°C). De nombreuses photographies ont été réalisées. Elles ont notamment permis de situer les secteurs de fonte ainsi que leur évolution.

La cartographie géomorphologique a pour but de délivrer des informations sur la géométrie des formes du relief, la nature et la structure des formations superficielles, l'activité des processus et l'âge des formes du relief. Dans le cadre de ce travail, la légende de Lausanne (SCHOENEICH & REYNARD 1993) a été utilisée avec parfois quelques modifications. Le fond topographique est une carte soit au 1 :10'000, soit au 1 :25'000.

3.2 Cartographie des températures du sol en hiver (« BTS »)

3.2.1 Contexte d'utilisation

L'objectif de la cartographie thermique de la surface du sol à un moment donné de l'hiver est de **mettre en évidence l'étendue spatiale et l'efficacité d'un système de ventilation**. Les jours succédant une période de temps froid sont particulièrement propices pour le détecter, en raison de l'existence d'un fort gradient thermique entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur de l'éboulis. L'avantage de cette méthode est de fournir une information momentanée de l'état thermique du sol avec une résolution spatiale élevée (DELALOYE 2004). 980 points de mesures ont ainsi été acquis durant les hivers 2004-2005 et 2005-2006 (tableau 3.1).

Sites	Date	Nombre de mesures
Vudèche	08.02.2005	141
Bois des Arlettes	09.02.2005	185
Dreveneuse	10.02.2005	131
La Pierreuse	11.02.2005	77
Le Larzey	11.03.2005	99
Gros Chadoua	16-17.01.2006	347

Tableau 3.1 - Mesures « BTS » effectuées durant les hivers 2004-2005 et 2005-2006.

La méthode BTS classique a été développée par HAEBERLI (in DELALOYE 2004) et veut que lorsque la neige atteint une certaine épaisseur requise (80 cm.), la mesure enregistrée à l'interface substrat – base du manteau neigeux reflète l'état thermique des premiers mètres du sol (DELALOYE 2004). Les mesures sont donc en principe réalisées en fin d'hiver (mi-février à mi-avril) lorsque la température du sol est relativement stable.

Les résultats de mesures BTS servent à la base comme informateurs indirects sur la présence du pergélisol selon les classes définies par HAEBERLI (in DELALOYE 2004) (tableau 3.2). Ces résultats peuvent être influencés par différents facteurs, notamment un transfert de chaleur entre le sol (surface) et le terrain situé en dessous de celui-ci. Le flux d'énergie est marqué par les conditions thermiques du sous-sol et par la présence de pergélisol. Il est judicieux de remarquer que cet échange de chaleur semble être influencé par la configuration du terrain (granulométrie, agencement des éléments) sur lequel les mesures sont effectuées. Lorsque la taille des éléments composant le sol est grande (décimétrique à métrique), une circulation d'air (convection) au sein de la formation peut se créer (SAWADA ET AL. 2003, DELALOYE 2004, GORBUNOV ET AL. 2004). Ainsi, des valeurs BTS basses sont obtenues. Elles sont plus froides que dans des matériaux fins, même en l'absence de pergélisol (ISHIKAWA 2003).

> -2°C	pergélisol improbable
-2°C à -3°C	pergélisol possible
< -3°C	pergélisol probable

Tableau 3.2 – Classes d'interprétation des BTS d'après Haeberli (in Gruber & Hoelzle 2001, Lugon & Delaloye 2001, Ілма & Fukui 2003, Kneisel 2003).

Cependant dans cette étude, les mesures « BTS » effectuées n'avaient pas comme objectif la prospection d'un éventuel pergélisol, mais bien la réalisation d'une cartographie thermique de la surface du sol. La méthode d'interprétation selon HAEBERLI (in DELALOYE 2004) n'a donc point été prise en compte. C'est la **recherche d'anomalies thermiques** qui a été prise en compte comme grille de lecture pour les résultats. Une **distribution de zones « chaudes » (> 0°C) et « froides » (< 0°C)** réparties spatialement sur les terrains étudiés est mise en évidence.

3.2.3 Mise en œuvre

Lorsqu'une campagne de mesures BTS veut être entreprise, la première chose à faire est de se renseigner sur l'état du manteau neigeux afin d'éviter tout risque d'avalanche. Il est aussi fortement recommandé d'avoir un équipement adéquat et de savoir s'en servir le cas échéant (pelle, sonde avalanche et DVA) ! Une équipe composée de 3 à 4 personnes est idéale pour la réalisation des sondages : une personne s'occupant de noter les résultats des points mesurés et enregistrant leurs coordonnées à l'aide du GPS de précision, les autres maniant les sondes à disposition.

La variabilité spatiale des valeurs BTS est importante dans les formations sédimentaires grossières (éboulis, glacier rocheux). Il est donc nécessaire de bien connaître le terrain pour **définir un intervalle de mesure adéquat**. Différents facteurs affectent les mesures comme la microtopographie (rides, sillons) (ISHIKAWA 2003), la circulation d'air (DELALOYE 2004), ainsi que la qualité du contact entre la surface et la sonde. Afin de simplifier le traitement des données, il est judicieux d'organiser le relevé des mesures de la manière suivante (figure 3.1) :

- Tracer des lignes parallèles (suivant plus ou moins les courbes de niveau) avec des points espacés de 10 à 25 mètres selon la morphologie du terrain et/ou la précision souhaitée.
- Essayer d'aligner les points entre les lignes.

- Marquer l'emplacement du point dans la neige (utile lors de la prise différée des coordonnées).
- Utiliser des repères géomorphologiques pour se guider (arbres, rochers affleurant,...).
- Effectuer des photographies du site (où l'on peut voir les lignes tracées).
- Chercher les endroits susceptibles d'être intéressants au niveau du résultat. Un repérage préalable en été est conseillé.



Figure 3.1 - Lignes « BTS » sur le terrain avec mise en évidence de l'emplacement des points de mesure (Dreveneuse, 10.02.05).

3.2.4 La sonde BTS

La sonde BTS est un tube (en trois éléments séparables) en fibre de verre et polyester, gradué, de trois mètres de long (Markasub AG, Bâle). Elle se termine par un thermistor situé à son extrémité dont la précision est de +/- 0.25°C.

Le capteur a besoin de quelques minutes pour fournir une mesure relativement stable qui peut être lue au moyen d'un multimètre (figure 3.2). Il s'agit de prendre garde à ne pas endommager le thermistor en plantant trop brusquement la sonde. Le multimètre mesure en fait **la résistance électrique du thermistor. Cette résistance est convertie en température** selon une formule établie et fournie par le fabriquant (3) :

$$1/T(K) = A + B * \ln R + C * \ln R^{2} + D * \ln R^{3}$$
(3)

Avec : T = BTS [K], R = Résistance électrique mesurée $[k\Omega]$, A-B-C-D = coefficients propres au thermistor, définis par le fabricant (Markasub AG).



Figure 3.2 - Appareillage utilisé pour la réalisation de mesures BTS : sondes BTS, multimètre (cercle) et GPS (flèche).

3.2.5 Corrections des résultats

Suite à la campagne de mesures BTS de février et mars 2005 (incluant les sites à R. DELALOYE de Bruson, des Lapires, de Mille et de Réchy), des différences notables ont pu être relevées entre les cinq sondes et les six multimètres employés. Un problème de calibrage des sondes récentes est apparus lors des tests : le 0°C correspondait à une résistance de 29.0 sur les récentes, et de 29.4 (valeur exacte) sur les anciennes. Afin de pouvoir y remédier, des tests de l'ensemble du matériel sur une même zone ont été effectués sur chaque site de mesures (tableau 3.3). Le but de la manœuvre consiste à combiner toutes les possibilités de mesures entre les multimètres et les sondes à disposition. L'objectif est de déterminer le multimètre et la sonde « étalon » servant de référence pour corriger les valeurs mesurées.

10.02.05					
Multimètre	Sonde 1	Sonde 3	Sonde 4	Sonde IGUL	Moyenne
App. 1	35.5	35.9	36.2	37.2	36.20
App. 2	36.8	37.2	37.2	37.7	37.23
App. Jaune	36.5	36.9	36.9	37.3	36.90
App. IGUL	36.8	37.0	37.2	37.7	37.18
Moyenne	36.40	36.75	36.88	37.48	

Tableau 3.3 – Tests de calibrage effectués avec les différents appareils et sondes placés au même endroit et en même temps sur le site de Dreveneuse (*source* : DELALOYE et al. 2005).

3.2.5.1 Corrections selon la sonde

Cette première correction est basée sur les valeurs mesurées avec la sonde 4 (une sonde ancienne) dont la stabilité et la valeur du 0°C est la plus exacte (résistance de 29.4). Afin d'affiner la précision, nous avons aussi effectué des mesures simultanées avec les sondes 3 et 4 (en utilisant le même multimètre) aux mêmes points.



Figure 3.3 – Ecart des valeurs (résistance) mesurées pour les sondes 3 et 4, sur l'ensemble du site de Dreveneuse (10.02.05). La moyenne de la différence des sondes 3 - 4 vaut -0.14 Ω , l'écart-type +/- 0.54. (*source* : DELALOYE et al.2005).

La variabilité entre les deux sondes n'est pas toujours la même. En général, la sonde 4 indique des valeurs de résistance plus élevées entre 0.13 et 0.4 Ω (donc plus froides) que la sonde 3 (tableau 3.4). Mais il arrive, que parfois, les résistances de la sonde 3 soient supérieures (figure 3.3). Les conditions météorologiques (humidité et température) ainsi que la nature du sol (cailloux, herbe...) et du manteau neigeux pourraient peut-être expliquer cette « dérive » des appareils de mesures. La question reste ouverte. De plus, les variations ne semblent pas être influencées par les classes de résistance, puisque la différence est de même ordre avec des résistances de 30 que de 45 (figure 3.3).

Sur la base de l'ensemble des comparaisons des sondes 3 et 4, ainsi que des résultats des tests (en utilisant la moyenne de chaque sonde avec les différents multimètres), nous pouvons proposer les corrections suivantes, synthétisées dans le tableau 3.4. Pour les valeurs de Mille et Réchy, la différence a été réalisée avec la sonde 1 à laquelle il faut ensuite rajouter la différence trouvée avec la sonde 4.

BTS 2	2005		Valeurs tests mesurées					Différences avec la sonde 4				
Sites	Dates	Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3	Sonde 4	IGUL		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3	Sonde 4	IGUL
UniFR	07.02.05	29.00	29.03	29.10	29.30			0.30	0.27	0.20	0.00	
Arlettes	09.02.05	32.90	32.80	33.20	33.50	32.80		0.60	0.70	0.30	0.00	0.7
Dreveneuse	10.02.05	36.40		36.75	36.88	37.48		0.48		0.13	0.00	-0.6
Pierreuse	11.02.05			27.57	27.87					0.30	0.00	
Bruson	27.02.05	29.10	28.77	29.07	29.47			0.37	0.70	0.40	0.00	
Mille	08.03.05	37.65	37.45					0.0 (0.4)	0.20 (0.7)			
Réchy	09.03.05	33.65	33.35	33.55				0.0 (0.4)	0.30 (0.8)	0.1 (0.4)		
Réchy/2	09.03.05	32.95	32.90	32.95				0.0 (0.4)	0.05 (0.6)	0.0 (0.3)		
Réchy/3	10.03.05	34.45	34.38	34.75				0.0 (0.4)	0.07 (0.6)	-0.3 (0.0)		
Lapires/1	15.03.05	46.63		46.43	47.50			0.87		1.07	0.00	
Lapires/2	15.03.05	40.90		41.30	41.73			0.83		0.43	0.00	
Lapires/3	15.03.05	31.94		32.70	33.15			1.21		0.45	0.00	
Lapires/4	15.03.05	30.17		30.48	31.14			0.97		0.66	0.00	
		Décision	Décisions Valeurs jusqu'à Ré		echy (10.03.0	chy (10.03.05)		0.44	0.50	0.30	fixe	0.5 ?
		Decisions		Valeurs des Lapires (15.03.05)				1.00		0.60	fixe	

Tableau 3.4 - Corrections selon la sonde pour l'hiver 2005 (source : DELALOYE et al. 2005).

3.2.5.2 Corrections selon le multimètre

Les différences dues aux multimètres sont apparues relativement faible. L'appareil n°2 a été utilisé comme référence puisque avec la sonde 4, il donne un résultat de 29.4 Ω pour 0°C. Les modifications à faire sont minimes par rapport aux sondes. Seuls les appareils « jaune » (rajouter 0.2 Ω aux valeurs obtenues) et « Brico » (enlever 0.1 Ω) ont nécessité une correction (tableau 3.5).

BTS 2005	Valeurs tests mesurées							
Sites	App.1	App.2	Jaune	Brico	Rouge	IGUL		
UniFR	29.10	29.18	29.05					
Dreveneuse	36.20	37.23	36.90			37.18		
Bruson	29.25	29.13	28.93					
Mille		37.50		37.60				
Réchy/1		33.47		35.57				
Réchy/2		32.97		32.90				
Réchy/3	34.50	34.50		34.58				
Lapires/1		46.77		46.87	46.93			
Lapires/2		41.40		41.37	41.17			
Lapires/3		32.57		32.67	32.56			
Lapires/4		30.53		30.70	30.55			
Corrections à apporter aux multimètres								

Différences									
App.1	App.2	Jaune	Brico	Rouge	IGUL				
0.1	0.0	0.1							
1.0	0.0	0.3			0.1				
-0.1	0.0	0.2							
	0.0		-0.1						
	0.0		-0.1						
	0.0		0.1						
	0.0		-0.1						
	0.0		-0.1	-0.2					
	0.0		0.0	0.2					
	0.0		-0.1	0.0					
	0.0		-0.2	0.0					
0.0	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.0				

Tableau 3.5 - Corrections selon le multimètre (source : DELALOYE et al. 2005).

Cependant, ces corrections apportées aux résultats bruts ne sont valides que pour l'année 2005. Les changements possibles de matériel et des conditions « environnementales » ne permettent pas de généraliser ce système de corrections des données brutes pour d'autres années.

3.3 GSTM (Ground Surface Temperature Monitoring)

3.3.1 Contexte d'utilisation

Des capteurs de température ont été employés afin de connaître l'évolution des processus d'échange de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Par rapport aux BTS (mesure momentanée), l'information est enregistrée avec une haute fréquence temporelle (toutes les deux heures) ; ce qui fournit quasiment une information continue sur une longue période (DELALOYE 2004). La résolution spatiale est cependant plus faible que les BTS, dans la mesure où le nombre de capteurs placés dans le terrain est limité.

3.3.2 Description

L'enregistrement en continu de la température de la surface du terrain (GSTM) est réalisé à l'aide de petits capteurs autonomes (figure 3.4) de type UTL-1 (Universal Temperature Logger, Geotest AG, www.utl.ch) (KRUMMENACHER ET AL. 1998, HOELZLE ET AL. 1999, DELALOYE 2004).



Figure 3.4 – Capteur de température de type UTL-1 posé sur le sol (avant enfouissement) et attaché à objet (branche, arbre, racine, bloc,...) pour faciliter sa récupération.

Les capteurs de température fournissent une information nécessaire à la compréhension de l'évolution hivernale des températures du sol. Ces capteurs procurent des renseignements sur de nombreux processus comme les échanges de chaleur à la surface, sur la durée de la présence de la couverture neigeuse. Cette méthode a aussi été employée pour mettre en évidence les anomalies thermiques créées par un système de circulation d'air dans des éboulis (SAWADA ET AL. 2003, SAWADA 2003, DELALOYE 2004).

La phase zéro (*zero curtain*) est une période durant laquelle la température est exactement égale au 0°C. Cette phase est décelable au printemps lors de la fonte du manteau neigeux et parfois en automne lorsque le sol commence à geler (DELALOYE 2004). Cette période peut également servir à la calibration des capteurs, bien que cela soit relativement difficile avec des capteurs employés dans le contexte d'éboulis ventilés.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs UTL-1 ont été employés simultanément selon une répartition géographique spécifique (en haut et en bas de la formation de sédiments meubles) dans le souci de mettre en évidence les anomalies thermiques des sites investigués. Le traitement informatique des données s'est fait à l'aide des feuilles Excel mises au point par R. DELALOYE.
3.3.3 Mise en œuvre

La pose de capteurs de température ne nécessite pas beaucoup de matériel et une personne suffit pour leur mise en place et la prise de note concernant leur emplacement. A ce propos, il s'agit d'être attentif à quelques détails pouvant faciliter le travail avec les capteurs :

- Utiliser des repères (arbres, gros blocs,...) lors de la pose afin de pouvoir retrouver l'endroit rapidement.
- L'emploi d'un GPS de poche (type Garmin) peut être utile, mais n'est que moyennement conseillé. Sa précision laisse en effet à désirer par rapport à la taille des capteurs et la grande surface sur laquelle ils se trouvent.
- Il est conseillé d'attacher le capteur par un cordon ou même un petit câble afin qu'il ne disparaisse pas dans les tréfonds de l'éboulis (dynamique de l'éboulis) ou ne soit déplacé par un animal quelconque.
- Réaliser des photos des emplacements peut aussi servir lors de la recherche des appareils.
- Un petit coup de peinture peut être utile.
- Cependant, l'emplacement du capteur ne doit pas être trop visible non plus afin de ne pas attirer certains promeneurs trop curieux...

La profondeur d'enfouissement varie (SAWADA 2003, HOELZLE ET AL.2003, DELALOYE 2004) selon les caractéristiques du terrain. Cet enfouissement a pour objectif de préserver le capteur de la radiation solaire directe qui biaiserait les résultats (RAYMOND in HOELZLE ET AL.2003).

3.3.4 UTL-1

De construction robuste avec sa coque plastique (figure 3.5), le capteur de type UTL-1 supporte les conditions extrêmes auxquelles il peut être soumis dans les éboulis (stress mécanique, variations de température et d'humidité,...). Le thermistor dont il est équipé peut mesurer des températures s'échelonnant entre -30 et $+40^{\circ}$ C avec une précision de $+/-0,25^{\circ}$ C. Il est alimenté par une batterie au lithium de 3,6 V. Sa capacité de stockage permet d'enregistrer jusqu'à 7944 mesures selon le pas de temps (entre 1 seconde et 4,8 heures) programmé. Le capteur peut stocker des données pendant 22 mois avec un intervalle de mesure de 2 heures. Son système de fermeture vissée avec joint étanche le préserve de l'eau. (HOELZLE ET AL. 1999). La programmation du capteur et la lecture des données enregistrées se fait à l'aide du logiciel *BoxCarPro*.



Figure 3.5 – Plan de construction du capteur de type UTL-1 (source : www.utl.ch).

3.3.5 Lecture des résultats

Dans un premier temps, les données brutes sont extraites du capteur de température et sont lisibles sous la forme d'un fichier Text Documents (.txt). Ce fichier est ensuite ouvert avec Excel (Microsoft) en utilisant les tabulateurs (delimited – tab) pour séparer les différentes colonnes. Le traitement des données peut alors commencer. Celui-ci commence par le réglage de l'heure (heure d'hiver / d'été). A l'aide d'un graphique, les données aberrantes sont effacées (par exemple lorsqu'un capteur a été

retrouvé hors de son emplacement de mesure). Les données sont ensuite, dans la mesure du possible, calibrées selon les valeurs enregistrées lors des périodes de *zero curtain* identifiées. On obtient alors les températures corrigées et le graphique correspondant.

3.3.6 Analyse du comportement thermique

Le comportement thermique du sol a été décrit de façon détaillée par ISHIKAWA (2003) pour un comportement annuel et DELALOYE (2004) pour un comportement saisonnier. Nous allons donc passer en revue leurs observations respectives qui pourront éventuellement nous servir dans l'analyse de nos résultats.

3.3.6.1 Comportement thermique selon DELALOYE (2004)

DELALOYE (2004) propose cinq phases du comportement thermique du sol (figure 3.6). Mais il faut préciser qu'il a établi cette analyse sur des sites dont l'altitude est assez haute pour empêcher une humidification du couvert neigeux par la pluie pendant l'hiver (fin novembre à début mars). Cette altitude correspond plus ou moins à la limite supérieure de la forêt (2000 - 2200 m.s.m.). Or dans notre étude, la plupart des terrains se trouvent en dessous de cette limite. Néanmoins, il nous a semblé judicieux de résumer ces phases afin de pouvoir, peut-être, y comparer les résultats obtenus et trouver dans une certaine mesure des comportements identiques.

Phase 1 : Conditions estivales

Durant la saison chaude, le sol emmagasine un apport de chaleur conséquent. Cette phase s'initie dès la fonte du manteau neigeux. La température du sol reste donc positive, sauf si les conditions météorologiques se dégradent brusquement sur une courte période (incursion d'un temps froid, conditions de gel ou de neige).

Phase 2 : Gel automnal

Un refroidissement important du sol peut avoir lieu avant les premières chutes de neige. Il est dû en partie à la baisse d'ensoleillement saisonnier (apport moindre d'énergie solaire) et à une plus grande déperdition de chaleur durant la nuit (rayonnement infrarouge). En raison d'un manteau neigeux pas encore installé ou très peu présent, le terrain peut geler profondément.

Phase 3 : Gel hivernal précoce intense

Même si son épaisseur n'est pas encore très importante, la présence de la neige différencie cette phase de la précédente. Le refroidissement du sol est facilité par le très fort gradient thermique entre celui-ci et la neige. Si la neige est soufflée par le vent (compaction), ce refroidissement est augmenté même en présence d'une couche de neige épaisse. Cette phase peut se reconnaître à l'abaissement irrégulier de la température du sol.

Phase 4 : Equilibrage thermique hivernal

Lorsque que la neige atteint une épaisseur suffisante, elle joue un rôle de très bon isolant thermique pour le sol. Cette phase comprend deux périodes souvent bien différenciée (figure 4.6). La première (4a) est un ajustement du gradient thermique entre les niveaux supérieurs du pergélisol et la neige, soit un réchauffement, soit un refroidissement, selon les conditions initiales en début de phase 4. Après un laps de temps de quelques semaines ou de plusieurs mois, la température tend à se stabiliser (4b). C'est la phase de température d'équilibre hivernal (WEqT, pour Winter Equilibrium Temperature) qui correspond au concept de la méthode BTS. Pour autant qu'un manteau neigeux important n'apparaisse pas trop vite dans l'année, cette phase correspond à une période de lente perte de chaleur du pergélisol. En cas de chutes de neige importantes et précoces en automne, il est possible que la période 4a démarre juste après la phase 1.

Phase 5 : Fonte des neiges

Il s'agit de la dernière phase. Le manteau neigeux fond. Quand il est entièrement humidifié, la percolation d'eau de fonte produit une brusque élévation de la température du sol jusqu'au 0°C. La température est stable tant que la neige n'a pas complètement fondu ; c'est le *zero curtain*.

DELALOYE (2004) met aussi l'accent sur la variation possible dans le temps et l'espace de ces 5 phases selon la constitution et l'évolution du couvert neigeux. Toutes les phases ne sont pas présentes chaque année, ni à chaque emplacement de mesure.



Figure 3.6 – Principales phases du comportement thermique du sol durant l'année en présence de pergélisol (*source* : DELALOYE 2004).

Une dernière remarque de DELALOYE (2004) a son importance : « La présence de pergélisol est probable lorsque se présente une phase 4b et que celle-ci se situe à un niveau inférieur à $-3^{\circ}C$. L'absence de pergélisol est certaine lorsque la température demeure parfaitement stable à $0^{\circ}C$ au cœur de l'hiver. Dans les autres cas, une analyse approfondie et la confrontation avec d'autres méthodes sont nécessaires ».

3.3.6.2 Comportement thermique selon ISHIKAWA (2003)

ISHIKAWA (2003) propose aussi une analyse du comportement thermique du sol grâce à l'emploi de GSTM. Les terrains investigués sont localisés dans le Nord du Japon à des altitudes comprises entre 1'635 et 2'135 m.s.m. La plupart des sites sont des pentes composées de graviers sableux, de gros blocs et de dépressions aux pieds de celles-ci. L'acquisition des mesures s'est déroulée par étapes non continues d'octobre 1997 à mai 2001 au moyen de capteurs de température dont les performances sont similaires aux UTL-1. Quatre types d'évolution thermique (figure 3.7) ont ainsi été mis en évidence :

Catégorie 1 : Pas de refroidissement sous le 0°C tout au long de l'année

Une épaisse couche de neige est présente au début de l'hiver et protège le sol des changements à court terme des températures de l'atmosphère. Il n'y a pas de pergélisol sur les sites ayant ce comportement thermique.

Catégorie 2 : Pénétration d'air froid atmosphérique tout au long de l'hiver

Des variations à court terme de températures se produisent tout au long de l'hiver. L'épaisseur de neige varie aussi sur de courte distance (micro-relief dû aux blocs). Ainsi, ce manque de neige permet une pénétration de l'air froid extérieur qui a donc une influence directe sur le sol. Du pergélisol peut se développer à ces endroits.

Catégorie 3 : Refroidissement avant la mise en place du manteau neigeux

Cette catégorie correspond au concept classique des BTS. Le sol est surtout refroidi entre octobre et novembre en raison des températures négatives de l'atmosphère. De décembre à mars, des résultats constants dans les températures indiquent un effet minimal de l'atmosphère. Une augmentation de la température du sol durant cette période suggèrerait un équilibre thermique tard dans l'hiver.

Catégorie 4 : Circulation d'air froid avec concentration dans les matériaux rocheux grossiers

Les valeurs des GST diminuent continuellement de novembre à mars ou avril sans fluctuations à court terme. Le refroidissement minimal a lieu durant l'automne et le début de l'hiver. Celuici se déroule surtout dans des dépressions composées de blocs grossiers avec une couverture neigeuse importante où l'air froid sous-jacent à la neige pouvait se concentrer latéralement. Le moteur de cet écoulement d'air est la différence de densité entre l'air froid de l'atmosphère et l'air chaud qui se trouve entre les blocs. Selon ISHIKAWA (2003), l'air chaud entre les interstices des blocs tend à être remplacé par de l'air froid qui descend par les espaces (entre les blocs) exposés à l'air libre. Ce mécanisme requiert des trous dans le manteau neigeux desquels l'air chaud peut s'échapper. Malgré un refroidissement insuffisant du sol avant la mise en place du manteau neigeux, les dépressions sur une surface composée de blocs sont propices à la croissance de pergélisol grâce à la concentration d'air froid sous un épais couvert neigeux.



Figure 3.7 – Illustration des 4 types de comportement thermique, avec en (a) l'évolution de la température et en (b) les régimes thermiques à l'interface sol – neige. Le pergélisol peut potentiellement se développer sur les sites avec un régime thermique des types 2, 3 et 4 (*source* : ISHIKAWA 2003).

Suite à ses travaux, ISHIKAWA (2003) fait ressortir 3 facteurs qui contrôlent les régimes thermiques à l'interface sol – neige : la durée et l'épaisseur du manteau neigeux, la composition des matériaux de surface, le micro-relief topographique. Ces trois facteurs liés à la pénétration directe du froid au cours de l'hiver, au refroidissement avant l'accumulation de neige ou une circulation d'air froid se concentrant entre les blocs permettent au pergélisol de se développer à des altitudes inférieures à la limite du pergélisol de montagne.

3.4 Résistivité électrique

L'étude de la résistivité électrique du sous-sol permet d'estimer ses propriétés physiques ainsi que la répartition verticale et latérale des différentes couches qui le composent. Cette résistivité est notamment fonction de la nature du matériel, du contenu en eau, de la chimie de l'eau, de la porosité, de la pression du matériel mais également de la teneur en glace, du type de glace et de la température. La glace étant un matériau très résistant au courant électrique, les méthodes géoélectriques se révèlent donc très utiles pour la prospection du pergélisol (eg. HAUCK 2001). 30 sondages et 470 points de traînés ont été acquis sur nos différents sites entre 2004 et 2005.

3.4.1 Principe

Lorsqu'un courant électrique d'intensité I [mA] est injecté entre deux électrodes de courant (de A positive vers B négative) placés sur le sol, deux champs électriques d'allure demi-sphérique sont générés dans le sol et dans l'air (infiniment résistant) (figure 3.8). Les filets de courant sont affectés par la résistivité (inverse de la conductibilité) des différentes couches du sous-sol, d'autant plus profondément que la distance entre les deux électrodes de courant augmente. La profondeur d'investigation est approximativement de **AB/4**, « valeur qui décroît sensiblement dans les terrains très résistants, une situation fréquente pour les terrains à pergélisol » (DELALOYE, 2004).



Figure 3.8 – Champ électrique créé dans le sol, dans le cas d'un sous-sol à trois couches avec une forte résistivité de la strate intermédiaire (ρ_2), cas fréquent dans les terrains à pergélisol.

Deux électrodes de potentiel (M et N) mesurent la différence de potentiel (ΔV) due à l'émission par les électrodes de courant. La résistance électrique R [Ohm] obtenue (R = ΔV /I) est multipliée par un facteur géométrique k dépendant du dispositif utilisé et de la position de A, M, N et B pour obtenir la **résistivité apparente** du sol (ρ_a), dépendant de toute l'épaisseur de terrain traversé par le courant électrique (4) :

$$\rho_{a} = (k * \Delta V) / I \tag{4}$$

Chacune des couches du sous-sol possède une résistivité spécifique (ou vraie). Dans un terrain électriquement homogène, les valeurs de résistivité apparente mesurées sont très proches des résistivités vraies (MEYER DE STADELHOFEN, 1991). En revanche, lorsque le courant électrique

traverse des couches de résistivités différentes (ρ_1 et ρ_2 par exemple), les valeurs de résistivité apparente mesurées sont comprises entre ρ_1 et ρ_2 et doivent être « inversées ».

Le modèle d'inversion permet d'estimer la disposition, l'épaisseur (ou la géométrie) et la résistivité spécifique des différentes couches qui correspondent le mieux aux données mesurées (DELALOYE, 2004).

3.4.2 Matériel utilisé

Le résistimètre utilisé est un OYO McOhm (modèle 2115). La tension d'opération est de 12 V, alors que l'intervalle de mesure de potentiel est de 0.6 à ~6'000 mV. L'appareil est muni d'un correcteur automatique qui annule le potentiel dû à la polarisation spontanée des électrodes M et N. L'opérateur reporte systématiquement les valeurs ρ_a sur une feuille de protocole et un papier bilogarithmique. Il relève également les informations communiquées par les aides de terrain (type d'électrode utilisé, géomorphologie, végétation, situation...).

Les électrodes utilisées sont habituellement des tiges métalliques (sardines de tente). Dans les terrains caillouteux, où le contact entre le sol et l'électrode est insuffisant, des éponges arrosées d'eau salée ont été utilisées.

Afin de conserver un ΔV suffisamment grand pour être mesuré, il est également possible d'arroser copieusement d'eau salée les électrodes, d'augmenter l'intensité du courant I ou d'augmenter la distance MN. Cependant un courant trop puissant ne peut être utilisé dans nos terrains en raison de la résistance élevée entre les électrodes et le terrain rocailleux (DELALOYE, 2004).

Deux principaux messages d'erreur nous sont apparus lors de la réalisation de mesures géoélectriques :

- *Current error 09* : cette erreur se produit lorsque le courant ne passe pas. Il s'agit tout d'abord de vérifier si les câbles sont bien branchés au résistimètre et aux électrodes, puis de vérifier le contact des électrodes avec le sol.
- *Overinput data 11* : la différence de potentiel est trop grande. Il s'agit alors soit de diminuer l'espacement MN, soit d'augmenter la distance entre AB.

3.4.3 Résistivité des matériaux

Dans le sous-sol, la présence d'eau (quantité et qualité, ie. sa minéralisation) conditionne presque toujours la conductibilité électrique. Une absence totale d'eau entraîne en effet des résistivités infinies (MEYER DE STADELHOFEN, 1991). La résistivité d'un pergélisol est fonction principalement de la teneur en glace du matériel, mais aussi de la température et de la portion d'eau liquide contenue dans le sol.

La glace sédimentaire comprend des résistivités généralement supérieures à 1'000, voire 10'000 k Ω m, mais DELALOYE (comm. pers.) a mesuré des valeurs bien inférieures (100-500 k Ω m) sur un reste isolé du glacier couvert des Ignes (région d'Arolla). La glace de congélation (ségrégation, regel) massive possède en revanche des résistivités plus faibles de l'ordre de 1'000 – 2'000 k Ω m. La résistivité des sédiments gelés (mélange de roche, d'air, d'eau et de glace) varie dans une large fourchette de valeurs (<10 à >500 k Ω m) en fonction de la température, du contenu en glace et en eau liquide (tableau 3.6). Les résistivités des matériaux rocheux sont souvent inférieures à 10 k Ω m (figure 3.9).

La température influence la résistivité d'un terrain, particulièrement au-dessous du point de congélation. Au-dessus du point de gel, la résistivité ρ d'un matériel augmente proportionnellement à l'abaissement de sa température, en raison de l'accroissement de la résistivité de l'eau qu'il contient. Au-dessous du point de gel, lorsque la température baisse, le manque croissant d'eau liquide provoque une élévation de ρ selon une relation exponentielle (HAUCK 2001, DELALOYE 2004). Les valeurs de

résistivité sont donc fortement modifiées dans le cas d'un pergélisol tempéré et/ou humide (KING ET AL., 1992). La répétition de mesures peut permettre de détecter des changements de températures (eg. HAUCK 2001, DELALOYE 2004, 2005).

Les éboulis et les glaciers rocheux se caractérisent souvent par une surface de blocs aérée sans matrice. L'air étant infiniment résistant au courant électrique, une proportion importante de vides implique une augmentation notable de la résistivité du sédiment. LAMBIEL (2006) ajoute que « dans un éboulis calcaire, on peut s'attendre à ce que la dissolution karstique réduise considérablement la proportion de fines, augmentant de ce fait la porosité du sédiment ».



Figure 3.9 – Echelle de résistivité pour différents matériaux (d'après MEYER DE STADELHOFEN 1991, VONDER MÜHLL 1993 & HAUCK 2001).

Qualification de la résistivité spécifique	Ordre de grandeur de la résistivité spécifique (kΩm)	Typicité du mélange glace/sédiments (<i>ice/rock mixture</i>)				
Extrême	> 10'000	Glace de zone d'accumulation glaciaire tempérée				
Très élevée Elevée	3'000 – 5'000 1'000 – 2'000	Corps de glace massive : lambeaux de petits glaciers (glacierets), cônes d'avalanches ou plaques de glace enfouis, glace de ségrégation (?), glace de zone d'accumulation glaciaire froide				
Peu élevée Faible Très faible	100-500 20-50 < 10	Sédiments gelées Température et/ou glace et/ou eau non gelée + - +				

Tableau 3.6 – Qualification de la résistivité spécifique d'un mélange de glace (0-100 %) et de sédiments et typicité (*source* : DELALOYE, 2004).

L'interprétation d'une résistivité faible (ie. < 100 k Ω m) dépend étroitement du terrain dans lequel elle a été obtenue. Ainsi DELALOYE (2004) estime qu'un rapport entre la résistivité du corps sédimentaire (ρ) et du substratum rocheux (ρ_r) égal à 2 :1 indique la présence de glace possible. Un rapport 4 :1 est le signe de glace probable. VONDER MÜHLL ET AL. (2001) signale à ce sujet qu'un pergélisol « chaud » et un fort contenu en argile se caractérise par des résistivité très faible.

3.4.4 Le sondage vertical

Le sondage vertical apporte des informations quantitatives (épaisseur et résistivité spécifique) et qualitatives (aspect de la courbe) à la verticale du point de mesure. Lors d'un sondage de type Schlumberger, les électrodes A et B sont écartés progressivement de part et d'autre des électrodes de potentiel M et N et du centre du sondage O (figure 3.10). Un sondage doit dans la mesure du possible être réalisé dans un terrain homogène. Les sondages dans les éboulis ont été préférentiellement réalisés en suivant les courbes de niveaux plutôt que longitudinalement (amont-aval), en raison du granoclassement de l'éboulis et de la présence préférentielle de sédiments gelés au bas de la pente (LAMBIEL 2006).

Lorsque de fortes variations latérales du terrain sont soupçonnées, il est utile d'exécuter un sondage électrique en T ou de Hummel. Une électrode C est placée « à l'infini » (en pratique à 200 m environ du centre de sondage) perpendiculairement au dispositif de sondage AMONB. OC doit être grand par rapport à OA et OB. L'électrode C ne contribuant en rien à la différence de potentiel mesurée (MEYER DE STADELHOFEN, 1991), les ΔV mesurées doivent être multipliées par deux pour obtenir les valeurs de résistivités apparentes. Si les deux sondages (CA et CB) obtenus sont sensiblement différents, il faut conclure à la présence d'hétérogénéités latérales importantes.



Figure 3.10 – Mise en place d'un sondage vertical (Bois des Arlettes, 02.10.05).

Lorsque la différence de potentiel mesurée est faible (< 4 mV) ou que le rapport MN/AB est trop petit (env. < 1/8), il est nécessaire d'écarter également M et N et de refaire une mesure avec l'écartement AB précédent. Plusieurs segments de courbe sont ainsi obtenus et ajustés par une translation sur le deuxième segment. En théorie, chaque point d'inflexion de la courbe indique une nouvelle couche.

Toutes les interprétations de sondage (ou inversion) ont été réalisées à l'aide du programme $SCHLUMY^1$ sous Excel. Plusieurs difficultés interviennent dans l'interprétation des sondages électriques :

- Le **principe de suppression** intervient lorsqu'une couche mince dont la résistivité est peu différente de celle des couches voisines est présente. Cette couche n'affecte donc que très faiblement voire pas du tout la courbe de sondage.
- Le **principe d'équivalence** considère que des variations inversement proportionnelles de l'épaisseur et de la résistivité d'une couche intermédiaire s'annulent.

Les indéterminations liées au principe d'équivalence peuvent être résolues par l'utilisation d'informations externes (connaissance de la géologie, sondage effectué sur un affleurement, forage, bon sens...). Un sondage paramétrique sur la roche en place (si possible) est nécessaire afin de connaître sa résistivité locale.

¹ SCHLUMY, Aquaphys, Genève.



Figure 3.11 – 4 cas possibles de sondages à trois couches (d'après MEYER DE STADELHOFEN, 1991).

Quatre cas de figure sont possibles pour un sondage mené sur un terrain à 3 couches (figure 3.11). En présence d'un pergélisol, DELALOYE (2004) et LAMBIEL (2006) proposent un modèle de 3 à 5 couches contenant une couche active (blocs grossiers aérés en surface et matrice plus fine en dessous), un niveau gelé (résistivité élevée comprise entre 10 et 500 k Ω), Un terrain sédimentaire non gelé situé en dessous. Cette succession a cependant été définie pour un pergélisol « typique » et ne peut pas être utilisée ainsi pour des éboulis ventilés de moyenne altitude, où il faut s'attendre à tout (DELALOYE, comm. pers.) ! Un pergélisol de faible résistivité (s'il existe), une forte variation spatiale de la porosité, la présence possible de fines rendent en effet l'analyse des sondages plus délicate.

Les résultats sont d'autant plus précis que le sous-sol est formé de couches régulières homogènes et parallèles à la surface, et de propriétés électriques contrastées (ASSIER ET AL., 1996). Cependant ces conditions idéales ne sont jamais remplies. L'analyse qualitative de la forme de la courbe de sondage permet d'améliorer l'interprétation (d'après DELALOYE 2004) :

- La **forme classique en cloche** est caractéristique d'une tricouche comportant : une première couche en général dépourvue de glace (couche active) ; une deuxième couche englacée ; une troisième couche de résistivité moindre qui peut être la roche en place, des sédiments sans glace, ou à teneur en glace moindre.
- Un profil comprenant un effet de sur-pente initiale semble indiquer un niveau de glace massive (souvent de forme lenticulaire) à faible profondeur, reposant sous une fine couche (< 1m) de débris non gelés (DELALOYE 2004).
- Un niveau résistant au courant électrique peut **masquer** la présence d'épais niveaux plus conducteurs situés directement au-dessous (DELALOYE 2004). La comparaison des branches amont (AC) et aval (BC) d'un sondage peuvent permettre de détecter ce niveau intermédiaire (de résistivité moindre) :
 - La partie profonde d'un pergélisol peut être partiellement masquée par un niveau gelé sus-jacent de plus forte résistivité. L'épaisseur totale d'un pergélisol peut être ainsi largement sous-estimée par un modèle à 3 couches.
 - Une couche de surface composée de blocs massifs à forte porosité (l'air est très résistant) possède une résistivité élevée (>100 kOhm m). Cette situation est fréquente dans les glaciers rocheux inactifs et fossiles et peut masquer partiellement une strate sous-jacente (LAMBIEL, 2006). Ce problème peut rendre notamment difficile la détection par la géoélectrique de corps gelés préservés dans certains glaciers rocheux inactifs ou apparemment fossiles.

3.4.5 Le traîné

Le traîné permet une investigation du sous-sol à une profondeur plus ou moins constante, en fonction de la distance des électrodes de courant AB. Le choix de l'écartement des électrodes de courant se fait en fonction des résultats des sondages verticaux réalisés au préalable. En déplaçant le dispositif de traînés, il est possible d'obtenir des profils de résistivités apparentes et, si le nombre de profil est suffisant, une cartographie du sous-sol. Le traîné, sensible surtout aux variations latérales des résistivités apparentes du sous-sol, fournit pour de grandes étendues de terrain, des **informations**

qualitatives. Pour des raisons pratiques, le traîné Wenner a été utilisé (disposition en ligne avec AM = MN = NB = a) (figure 3.12). Cette configuration permet en effet de ne déplacer qu'une seule électrode entre chaque mesure.

Pour comprendre les résultats d'un traîné, il est indispensable de disposer d'un ensemble de mesures et d'une bonne connaissance du contexte géologique. En effet, prise individuellement, « chacune des valeurs de résistivités apparentes est dépourvue de signification puisqu'elle ne correspond à aucune résistivité vraie caractéristique d'une formation » (MEYER DE STADELHOFEN, 1991). DELALOYE (2004) précise que « en présence de niveaux superficiels électriquement peu résistants, les valeurs de résistivité apparente mesurées pour des couches gelées en profondeur (pergélisol) sont généralement 2 à 10 fois plus basses que leurs résistivités spécifiques calculées à partir de sondages verticaux ».



Figure 3.12 – Mise en place d'un traîné Wenner (Bois des Arlettes, 28.05.05).

3.4.6 Répétition de mesures

La répétition des sondages verticaux et des lignes de traînés au même endroit à différentes périodes de l'année peut permettre de détecter les fluctuations de l'état de matériaux gelés et la variation de la température du sous-sol. L'enregistrement des variations saisonnières de la résistivité peut en effet « *contribuer à la compréhension approfondie du régimes thermiques de certains terrains* » (DELALOYE 2004). Cette approche doit également permettre de distinguer les variations dues à la géologie et celles dues à la température et au contenu en glace des différentes couches du sous-sol. Nous avons également répété certains sondages et certaines lignes de traînés lors de notre travail.

Cette méthode a notamment était utilisée par DELALOYE (2004) au Creux-du-Van pour étudier l'évolution saisonnière et la distribution spatiale (2D) des températures du sol. Les résultats montrent ainsi « le réchauffement prononcé de la couche active n'a lieu qu'en automne (octobre), le refroidissement du sol qui se produit par aspiration localisée d'air froid dans l'éboulis lors des périodes froides de l'hiver, l'arrêt du système de refroidissement et le rééquilibrage de la température dans le sol durant la période de redoux du début décembre 2001, et le dégel à partir de la surface en fin mai 2002 » (DELALOYE 2004).

La limite de cette technique réside par la présence d'un « bruit » dans les variations de résistivité. Celui-ci peut être introduit par des variations à petite échelle de la géologie, la température et le contenu en eau non gelé ou par des modifications de contact des électrodes (HAUCK 2001). Nos terrains étant composés essentiellement de matériaux grossiers, une différence importante dans la variation de résistivité pourrait être imputée à l'emplacement de l'électrode.

3.5 Analyse de la végétation

Les plantes ne sont pas distribuées au hasard dans la nature. En effet des facteurs abiotiques (température, humidité, lumière, type de sol, pH...) et biotiques (compétition, parasites...) conditionnent la survie des plantes et leur distribution dans le milieu. Ainsi dans deux milieux

identiques, il y a une bonne probabilité de rencontrer des espèces identiques qui forment une même communauté végétale ou association végétale. La **phytosociologie** est l'étude de ces groupements végétaux et de leur composition floristique. Cette méthode se divise en trois étapes successives, détaillée par THEURILLAT & MATTHEY (1987) :

- La phase analytique s'effectue sur le terrain avec le relevé de végétation, la détermination de la superficie, des taux de recouvrement et d'abondance-dominance des plantes des différentes strates, de la sociabilité et de la vitalité des espèces. L'utilisation d'un ouvrage de référence comme la *Flora Helvetica* est indispensable (LAUBER & WAGNER 1998).
- La phase synthétique sert à regrouper et structurer les relevés. L'objectif est alors d'établir des degrés de ressemblance ou de divergence floristique.
- La phase syntaxinomique finalise l'analyse en identifiant et caractérisant les groupements végétaux par rapport à des unités déjà reconnus dont l'unité fondamentale est l'association végétale. Elle se définit comme « un groupement végétal possédant une composition floristique propre, relativement constante et de structure homogène, se distinguant d'autres associations qui lui seraient proches par la présence d'espèces caractéristiques et différentielles ou encore par une combinaison caractéristique d'espèces différentielles » (THEURILLAT & MATTHEY 1987). Une espèce indicatrice ou caractéristique possède une faible valence écologique et est ainsi spécialement liée à une associations végétales proches sans pour autant être liée à celle dans laquelle cette espèce se rencontre.

Afin d'avoir un relevé de végétation comprenant l'ensemble des espèces de l'association, une aire minimale est requise. La surface choisie doit également être homogène (ie. éviter les zones de transition). Cette démarche analytique a été appliquée pour le site du Bois des Arlettes où quatre relevés végétaux ont été réalisés afin de déterminer l'importance du mécanisme de circulation d'air sur la distribution des espèces végétales. Sur les autres sites, l'observation s'est principalement concentrée sur la présence d'arbres nains ou de zones humides (mousses, sphaignes...). Dans le futur, une inspection et une analyse détaillée des groupements végétaux et des sols dans les éboulis froids sont souhaitées.

3.6 Synthèse

L'utilisation conjointe de ces différentes méthodes permet de mieux appréhender le mécanisme de ventilation interne à une formation poreuse. L'interprétation des résultats généraux peut alors se baser sur des mesures obtenues de diverses façons, en maximisant ainsi les forces de chacune de ces méthodes. Les chapitres 4 et 5 vont présenter les résultats d'analyse des données acquises sur le terrain.



ETUDES DE CAS



4. Etudes de cas

Des observations visuelles attentives, une cartographie géomorphologique, des mesures thermiques et géoélectriques ont été réalisées pour l'étude des systèmes de ventilation dans des éboulis et glaciers rocheux fossiles de moyenne altitude. A l'exception des éboulis de la Flottuwald (Valais central) et du Crêt de la Neige (Jura), les différents sites investigués se trouvent dans les Préalpes fribourgeoises, vaudoises et valaisannes (cf. chapitre 2.2). Certains d'entre eux ont fait l'objet d'une étude approfondie, d'autres n'ont été utilisés que pour déterminer la présence d'indices de fonctionnement d'une circulation d'air (cf. chapitre 5). Les sites de Vudèche, de Dreveneuse, des Drudzes, de la Breccaschlund, des Gastlosen, de Bounavaux, du Vanil de l'Ecri et du Revers de l'Aille ont été étudiés par JONATHAN DORTHE, ceux du Bois des Arlettes, de la Pierreuse, de Lavaux-Châtillon, du Larzey, du Lac Lioson, du Crêt de la Neige, de la Flottuwald par SÉBASTIEN MORARD. Les sites du Gros Chadoua et du Vanil de l'Aille ont été investigués en commun. Les données acquises pour chaque site – toutes originales – seront analysées et discutées.

Chacun des sites d'étude vont être présentés avec la structure suivante : dans un premier temps, les observations et mesures seront décrites ; dans un deuxième temps l'interprétation des résultats conclura le sous-chapitre consacré à un terrain d'étude.

4.1 Combe de Vudèche (FR)

La combe de Vudèche se trouve au sud-ouest de la Dent de Lys (2'014 m.s.m.), au cœur de la réserve naturelle de celle-ci et tire son nom du chalet d'alpage situé en contrebas de la combe.

DELALOYE (2004) a mis en évidence trois pentes d'éboulis successives n° 1 à 3 de bas en haut, orientées vers l'est entre 1580 et 1780 m.s.m. en rive droite de la combe. Les tabliers d'éboulis sont alimentés par une paroi rocheuse de l'ordre de la centaine de mètres de hauteur. Disposée au SW des éboulis, dans un axe NW – SE, elle diminue considérablement l'ensoleillement (faible à inexistant) durant la saison hivernale sur les éboulis. DELALOYE (2004) a réalisé différentes campagnes de mesures (BTS et UTL) entre 2001 et 2003 sur ce site qui ont mis en évidence l'existence d'un système de ventilation dans les éboulis de la Combe de Vudèche. C'est en se basant sur les premiers travaux et sur les conseils de R. DELALOYE qu'une investigation plus approfondie de la combe a été entreprise.

Plusieurs visites et campagnes de mesures ont été effectuées dans la Combe de Vudèche entre mai 2004 et août 2005 dans le but de d'échantillonner les indices de fonctionnement (visuels, thermiques et géoélectriques) d'un système de ventilation et ainsi de préciser les premiers travaux de DELALOYE (2004).

4.1.1 Cadre géologique et géomorphologique

Selon VON DER WEID (1960), la région de la Dent de Lys s'inscrit tectoniquement sur le flanc externe du synclinal de la Gruyères et fait partie de la chaîne de Verreaux (Grand Sex, Folliu Borna). Cette zone des Préalpes médianes plastiques est composée de différentes roches datant du Secondaire (du Trias au Crétacé inférieur). Les strates de la Dent de Lys et de la paroi rocheuse de la Combe de Vudèche sont essentiellement des calcaires du Malm (Oxfordien supérieur et Kimméridgien) ainsi que du Néocomien (Crétacé inférieur). Elles plongent vers le SE avec un pendage ~40°.

La morphologie de la Combe de Vudèche a été influencée par deux facteurs principaux, à savoir la nature de la roche (calcaire) et l'érosion glaciaire (glacier local du cirque de Vudèche). La combe est marquée par une succession d'ombilics et de verrous qui séparent l'éboulis supérieur de la partie avale de la combe. Deux moraines frontales (tardiglaciaires) jalonnent la combe, la première se trouve entre l'éboulis n°3 et n°2 ; la deuxième à l'amont du chalet d'alpage. Les jeux de la dissolution du calcaire par l'eau ont aussi participé à l'élaboration de la morphologie de la combe : on peut apercevoir quelques petits lapiés et autres témoins de la karstification (doline au pied de l'éboulis n°2).

L'étude s'est focalisée sur la partie supérieure de la combe à partir du point 1629 m.s.m. (figure 4.1) On peut y répertorier deux éboulis distincts (n°2 et n°3). Les deux éboulis ont une segmentation de ce type : une partie partiellement végétalisée à l'aval, une partie médiane « éboulis nu » et une partie sommitale végétalisée. Il est toutefois à noter que la végétation composant ces éboulis fait partie de la strate herbacée. Seul l'éboulis n° 2 est parsemé de quelques arbres (épicéas). Les éléments grossiers des éboulis sont de tailles diverses allant de quelques centimètres jusqu'à quelques décimètres, à l'exception de un ou deux blocs plus importants.



Figure 4.1 – Carte géomorphologique des éboulis n° 2 et 3 de la Combe de Vudèche. Les deux éboulis sont séparés par une zone herbeuse avec une moraine frontale tardiglaciaire et parsemée de blocs où il n'y a apparemment pas de circulation d'air (zone de transition). Lors du relevé pour la cartographie entre le 26 & 29 mai 2005, les températures mesurées aux pieds des éboulis (zones froides) ne dépassaient pas les 5°C. (*Source de la photo aérienne : BAFU/Swisstopo - http://prod.swisstopogeodata.ch/kogis_apps/erdbeben/*).

4.1.2 Fonte précoce et froid estival

L'investigation du site a commencé au début du mois de mai 2004 dans le but de constater le déneigement précoce de la partie haute des éboulis et de voir dans quelle mesure les parties déneigées correspondaient aux observations faites par DELALOYE (2004) à la fin du mois d'avril 2003 (figure 4.2). La première visite du site a eu lieu le 4 mai 2004, les zones de déneigement principales (figure 4.3) correspondent plus ou moins à celles de l'année 2003. Une semaine plus tard (11.05.04), après des chutes de neiges estimées entre 30 et 40cm, les zones de fonte ont été comblées (figure 4.4), mais des trous dus aux sorties d'air chaud sont tout de même visibles (figure 4.5). A la fin du mois de mai (25.05.04), les conditions de fonte généralisée de la neige sont définitivement installées et il est difficile de se rendre compte d'un état de fonte précoce par l'influence d'un système de circulation d'air. Par contre, l'année suivante à la même période, il a été possible d'apercevoir une sortie d'air chaud concentrée ou tout du moins son empreinte « fossile » dans la neige (figure 4.6).

Durant l'été, c'est dans la partie basse des éboulis que les observations se sont concentrées. De nombreuses sorties d'air froid, de la glace de regel et des paquets de neige résiduelle sont visibles (figure 4.7).



Figure 4.2 – Secteur de fonte précoce fin avril 2003 dans les éboulis de la Combe de Vudèche. Le cercle jaune pointillé marque l'emplacement de la zone de fonte que l'on peut voir sur la figure 4.1.3. (*Photo R. DELALOYE*).



Figure 4.3 – Zones de fonte correspondantes une année après (cercles jaunes) (04.05.04). La zone de fonte signalée par le cercle jaune pointillé était probablement aussi présente fin avril 2003, mais cachée par les arbres sur la photo.



Figure 4.4 - La Combe de Vudèche recouverte par de la neige fraîche. Les zones de fonte (à ne pas confondre avec les coulées de neige) ne sont plus visibles (11.05.04).



Figure 4.5 – Trous de fonte dans la partie supérieure de l'éboulis n°3, le bâton de ski fait l'échelle (11.05.04).



Figure 4.6 – Puits à air chaud « fossile » et son emplacement (flèche jaune) dans la partie supérieure droite de l'éboulis n°3 à la fin de la falaise (29.05.05).



Figure 4.7 – Photo de gauche : Glace préservée à la sortie d'un trou à air froid au bas de l'éboulis n°2. L'effet du « souffle » d'air froid se fait sentir sur une vingtaine de centimètres. Photo du milieu : Paquet de neige et glace de regel dans la partie basse de l'éboulis n° 3. La photo de droite indique l'emplacement du paquet de neige et de glace au pied l'éboulis n° 3 (flèche jaune) (29.05.05).

4.1.3 Automne et début de l'hiver

Trois visites ont eu lieu au mois de novembre 2004 sur le site, à savoir le 10, le 17 et le 26. Au cours de ces excursions plusieurs phénomènes notables ont été remarqués principalement dans la partie supérieure des éboulis. Le 10 novembre, une fine pellicule de givre et de neige recouvre les éboulis et la température extérieure avoisine les -6.5° C à 10h le matin. On observe alors (figure 4.8) :

- des fenêtres de fonte ou tout du moins une esquisse automnale de celles-ci, particulièrement bien visible dans l'éboulis n° 2,
- du givre sur les cailloux à proximité des sorties d'air chaud,
- de la condensation au-dessus des sorties d'air chaud,
- les températures du sol mesurées dans la zone d'une fenêtre de fonte avaient une moyenne de + 5°C, avec un maximum de + 8.2°C.

Le 17 novembre, il reste une très fine couche de neige aux revers et dans la partie basse des éboulis.

des cailloux humidifiés sont observables dans les zones de sortie d'air chaud.

Le 26 novembre, un manteau neigeux de quelques centimètres recouvre les éboulis, de ce fait, les fenêtres de fonte sont plus facilement distinguables (figure 4.9).



Figure 4.8 – Indices visuels d'une circulation d'air dans les éboulis n°2 et 3 de la Combe de Vudèche. A noter que les indices se retrouvent dans chacun des deux éboulis. Photos « givre » et « condensation » *T. SEMBACH*.



Figure 4.9 – Fenêtre de fonte (cercles jaunes) dans l'éboulis n° 2 (photo de gauche) et dans l'éboulis n° 3 (26.11.04).

4.1.4. Cartographie thermique et surrefroidissement hivernal

Le but de cette cartographie thermique des éboulis était de constater l'efficience d'un système de ventilation et sa répartition spatiale dans une formation de sédiments meubles. Le 8 février 2005, après deux semaines de basses températures (avec un minimum de -14° C de moyenne journalière les 26 et 27 janvier 2005), 141 points de mesures BTS ont été réalisés sur les éboulis n° 2 et 3 (figure 4.10). Au cours de la journée de mesure, la température de l'air a oscillé entre -2° C et $+2^{\circ}$ C. La couverture neigeuse avait en moyenne une épaisseur de 120 cm. Dans les parties supérieures des éboulis, son épaisseur était comprise entre 50 et 100 cm, alors qu'aux pieds de ceux-ci, elle mesurait entre 150 et 200 cm.

La particularité qui ressort de la cartographie BTS est la mise en évidence d'une zone surrefroidie (températures comprise entre - 4 et -10°C) dans la partie basse de chacun des éboulis. Au milieu des formations, la transition avec la partie supérieure des éboulis, où les températures sont nettement plus élevées, voir positives, est rapide.



Figure 4.10 – Résultat des mesures BTS interpolées par kriegeage. On remarque très bien la distribution des températures avec la zone sur-refroidie en bas des éboulis et la partie supérieure chaude. La zone supérieure de l'éboulis n°3 est plus chaude que celle de l'éboulis n°2. Mais apparemment, il n'y a pas de relation thermique directe entre les deux éboulis.

Le cercle noir montre la région où les puits à air chaud (figure 4.11) se trouvent.

Lors de la prise des mesures BTS dans l'éboulis n° 3, les observations visuelles faites dans la partie supérieure de la formation concernant les sorties d'air chaud ont montré un phénomène intéressant. En effet, il y avait des fenêtres de fonte dues à une sortie diffuse d'air chaud (figure 4.11), mais aussi trois puits d'air chaud concentré (cercle noir sur figure 4.10) dans lesquels, les températures mesurées à l'aide d'un thermomètre digital indiquaient respectivement + 3.8, + 4.4 et + 5.3°C de haut en bas. Puits à air chaud qui semblent perdurer toute la saison hivernale, puisqu'on retrouve leur trace au printemps comme la figure 4.6 en est un exemple, bien que le puits fossile de celle-ci ne corresponde pas à l'emplacement des puits de la figure 4.11.



Figure 4.11 – Partie supérieure de l'éboulis n°3, on reconnaît aisément les sorties diffuses d'air chaud à cause de l'aspect « moutonné » que prend le manteau neigeux (cercle noir) ; ainsi que les trois puits à air chaud sur la droite de l'image (flèches noires). Photo : *R. DELALOYE* (08.02.05).

4.1.5. Enregistrement de la température du sol et anomalies thermiques

Dans l'optique de pouvoir analyser des températures du sol en continu, 9 mini capteurs autonomes de température (de type UTL-1) ont été mis en place principalement dans l'éboulis n° 3. Tous les capteurs (Vu01 à Vu08) ont été placés le 27.07.04, excepté Vu09 qui a été rajouté le 17.11.04. Vu01 mesure la température de l'air ambiant et a été posé sur un arbre, à 2m du sol, protégé au maximum du rayonnement solaire direct. Vu02 a enregistré les températures de la partie basse de l'éboulis n° 2. Les capteurs Vu03, Vu04, Vu05 et Vu09 ont été placés dans la partie supérieure de l'éboulis n° 3, là où des fenêtres de fonte précoce avaient été observées au printemps (figure 4.1.3). A noter que Vu04 n'a pas été retrouvé. Vu05 a été enfouis dans l'éboulis à une profondeur de ~ 50cm sous Vu03. Quant à Vu06, son secteur d'enregistrement a été le milieu de l'éboulis. Vu07 et Vu08 ont été mis en place au bas de l'éboulis n° 3 (figure 4.12).

Les données obtenues (tableau 4.1 et 4.2) ainsi que les courbes de température fournies par le biais des capteurs ont permis de mettre en évidence certains aspects des effets d'un système de circulation d'air dans une formation de sédiments meubles (figures 4.13, 4.14 et 4.15).



Figure 4.12 – Emplacement des différents capteurs dans l'éboulis n°3. A noter que Vu04 n'a pas été retrouvé. *Photo : R. DELALOYE.*

	Air	Vu02	Vu03	Vu05	Vu06	Vu07	Vu08	Vu09
Moyenne annuelle	4.60	0.33	6.45	6.83	2.22	-0.30	-0.34	
août.04	12.27	3.94	12.18	11.98	9.57	3.99	2.91	
sept.04	10.02	4.36	10.45	10.58	8.29	4.02	3.68	
oct.04	7.78	3.66	7.61	8.03	5.93	3.69	3.52	
nov.04	0.29	-1.69	3.51	5.99	-0.15	-1.76	-1.89	
déc.04	-0.24	-2.84	2.36	3.60	-2.33	-3.70	-3.34	1.55
janv.05	-2.81	-3.16	2.24	3.24	-4.26	-5.84	-4.58	2.99
févr.05	-7.04	-2.86	2.43	3.63	-6.10	-6.88	-6.06	2.81
mars.05	-0.29	-2.23	1.71	2.25	-5.31	-4.66	-3.58	2.02
avr.05	2.45	-0.06	1.47	1.00	0.17	0.10	0.17	1.63
mai.05	7.55	-0.03	7.23	6.76	2.87	0.52	0.25	3.62
juin.05	12.60	1.43	13.37	12.59	8.65	2.81	1.65	9.39
juil.05	12.47	3.42	12.80	12.45	9.21	3.90	3.03	13.79

Tableau 4.1 – Températures moyennes de l'air et du sol enregistrés à Vudèche en 2004 / 2005.

	Anomalie				Nbr. de		Zéro curtain	Zéro curtain	Durée
UTLs	thermique	Min	Max	Amplitude	jours gelés	GFI	Début	Fin	(jours)
Vu01 Tair	-	-17.70	24.55	42.25		-551.84			
Vu02	-4.27	-8.41	8.45	16.86	213	-410.74	29.03.2005	05.06.2005	74
Vu03	1.85	-5.52	23.25	28.77	4	-6.22	-	-	-
Vu05	2.23	-2.87	21.43	24.3	3	-1.69	-	-	-
Vu06	-2.38	-9.02	12.92	21.94	144	-576.76	29.03.2005	11.05.2005	43
Vu07	-4.9	-12.24	9.72	21.96	153	-707.71	30.03.2005	27.05.2005	58
Vu08	-4.94	-7.75	6.35	14.1	139	-605.69	25.03.2005	27.05.2005	63
Vu09		-2.96	22.96	25.92	15	-12.26	-	-	-

Tableau 4.2 – Indices thermiques pour la Combe de Vudèche en 2004 / 2005. L'anomalie thermique se calcule en degré Celsius selon la différence entre MAAT (4.6° C) et la MAGST de chacun des capteurs (cf. tableau 4.1). Les températures minimales, maximales et l'amplitude, déterminées à l'aide des données horaires, sont en degré Celsius. Le GFI (indice de gel du sol) exprime la somme des °C. jours négatifs dans le sol.

L'analyse des données de températures du sol permet de mettre en évidence les caractéristiques d'une formation de sédiments meubles sous l'influence d'un système de circulation :

- Une anomalie thermique annuelle négative affecte la partie basse de l'éboulis n° 2 (Vu02).
 Celle-ci affecte aussi l'éboulis n°3 dans sa partie basse (Vu07 & Vu08). De plus, le milieu de la formation est aussi affecté par cette anomalie (Vu06).
- Tous les capteurs situés aux pieds des deux éboulis indiquent que le sol a été gelé (temp. du sol ≤ 0°C) entre 139 et 213 jours. Vu07 et Vu08 ont même une MAGST inférieure (certes légèrement) à 0°C et celle-ci est bien inférieure (~4.9°C) à MAAT (+ 4.6°C).
- Au contraire, les capteurs placés dans le haut de l'éboulis n°3 (Vu03 & Vu05) ne sont gelés que 4 et 3 jours durant l'année et présentent une anomalie thermique annuelle positive. De plus, la période du *zero curtain* est absente au printemps.

4.1.5.1 Température du sol dans la partie basse des éboulis

Durant la saison chaude (de juin à début septembre), il est intéressant d'observer deux phénomènes (figure 4.13) : d'une part, la température du sol ne dépasse que très rarement les 5°C et d'autre part, il y a une relation inverse entre la température de l'air et celle du bas des éboulis. En effet, lorsque la température de l'air baisse, la base des éboulis devient plus chaude (flèches rouges) et lorsque la température de l'air augmente, la base des éboulis se refroidit (cercles jaunes).

Vers la fin du mois de septembre (23.09.04) et la mi-octobre (13.10.04), le sol des éboulis se refroidit selon la température de l'air (flèches noires), mais il ne se réchauffe pas autant que l'air après ces deux pics de froid. Entre le 6 et 10 novembre (flèche bleue), la température du sol suit nettement le refroidissement de l'atmosphère et ne repassera plus le 0°C jusqu'à la fin de la période de fonte (zéro curtain).

Le manteau neigeux, une fois bien installé, induit un décalage (dans le temps) entre l'air et la température du sol. Aussi bien pour un « coup de froid » que pour un réchauffement de l'atmosphère (rectangle pointillé).

Au mois de mars, la température de l'air se réchauffe nettement (19.03.05) et à la fin du mois, les capteurs enregistrent le début de la période de fonte (cf. tableau 4.2). A la fin du zero curtain, on retrouve la relation inverse entre la température de l'air et celle du sol.

Au final, le comportement thermique des capteurs Vu02, Vu07 & Vu08 correspond au type III décrit par DELALOYE (2004), c'est-à-dire : froid en hiver, froid en été. Ce qui est le comportement thermique « classique » de la partie basse des éboulis ventilés.



Figure 4.13 – Evolution des températures de l'air et du bas des éboulis à Vudèche en 2004 / 05. Commentaires dans le texte.

4.1.5.2 Températures du sol dans la partie médiane et supérieure des éboulis

L'évolution thermique des capteurs de la partie supérieure de l'éboulis (Vu03 et Vu05) est particulièrement intéressante (figure 4.14). En effet, l'évolution des courbes de températures du sol suit celle de l'air entre le 27.07.04 et le 12.09.04, ainsi qu'entre le 29.04.05 et le 26.07.05 (rectangles), ce qui semble normale. Mais il est remarquable de constater la mise en place et la stabilité du système de ventilation dans sa phase ascensionnelle (régime hivernal) durant l'hiver, entre le 19.01.04 et le 14.03.05 (rectangle pointillé) et ce, malgré des changements importants dans la température de l'air.

Au printemps, il est aussi notable de constater une absence de *zero curtain* pour les capteurs Vu03 et Vu05 ce qui impliquerait un déneigement rapide.

Le comportement thermique de Vu03 et Vu05 est de type I (DELALOYE, 2004), c'est-à-dire chaud en hiver et « normal » en été.

Le comportement de Vu06 semble s'apparenter au type II de DELALOYE (2004). Son emplacement au milieu de l'éboulis se trouverait donc juste au-dessus de la zone surrefroidie de l'éboulis. Il est soumis au refroidissement hivernal, mais n'enregistre pas la décharge gravitaire d'air froid en été.



Figure 4.14 - Evolution thermique de la température de l'air, ainsi que de la partie médiane et supérieur de l'éboulis n°3 à Vudèche en 2004 / 05. Commentaires dans le texte.

4.1.5.3 Températures du sol entre le bas et le haut de l'éboulis n°3

La figure 4.15 met en relation les différentes courbes de températures entre l'air. Le bas et le haut de l'éboulis n° 3. La simultanéité inverse entre les températures du bas et du haut de la formation est facilement repérable aussi bien dans la phase descendante (rectangles pointillés) que la phase ascendante du système de ventilation (flèches noires).



Figure 4.15 - Comparaison thermique entre le bas et le haut de l'éboulis n°3.

4.1.5.4. Variations thermiques du système de ventilation en novembre dans l'éboulis n°3

Au cours de l'automne et du début de l'hiver, le système de ventilation a un comportement thermique particulier puisqu'il va transiter entre les régimes estivaux (décharge gravitaire d'air froid) et hivernaux (aspiration d'air froid externe et sortie d'air chaud). Lors du mois de novembre 2004, trois visites ont eu lieu dans la Combe de Vudèche. Si de nombreux indices ont été recensés comme témoins de sorties d'air chaud aux cours de ce mois, les indices du régime estival n'ont pas été recensés. L'observation et l'analyse des températures (entre l'air, le bas et le haut de l'éboulis) du mois novembre peuvent pallier à cet état de fait (figure 4.16 / A).

- Le début du mois (01.11 au 05.11 à 12h), la température du sol dans la partie basse de l'éboulis (Vu08) est relativement constante autour des + 3.5°C et ne réagit pas aux fluctuations de la température de l'air. Les températures enregistrées, dans le haut de l'éboulis par les capteurs Vu03 et Vu05, suivent l'évolution de la température de l'air, mais le réchauffement du 3 novembre est moins important.
- A partir du 5 novembre, la température de l'air chute brusquement. Le bas de l'éboulis se refroidit également, alors que Vu03 & Vu05 voient leur température augmenter. L'écart de température entre ces deux capteurs est important (jusqu'à 4°C) avec un pic entre le 10 et le 11 novembre.
- A parti de la mi-journée du 11 novembre, la température de l'air augmente, la partie basse de l'éboulis se réchauffe légèrement, alors que dans la partie supérieure, la température du sol baisse. La température de l'air rechute le 12 novembre.
- Hors dès ce moment là, toutes les températures du sol, aussi bien dans la partie supérieure que dans la partie basse de l'éboulis, baissent drastiquement.
- A partir du 15 novembre, les capteurs de la partie haute de l'éboulis enregistrent une augmentation de température.
- Entre le 15 et le 16 novembre, la température de l'air augmente. A noter la brusque chute de température enregistrée par Vu05 et dans une moindre mesure par Vu03.
- Entre le 17 et le 18 novembre, la température de l'air se radoucit jusque vers 14h l'aprèsmidi du 18. Dans le bas de l'éboulis, la température remonte aussi, mais de façon moins rapide jusqu'à la mi-journée du 18 où elle rebaisse légèrement.).
- La dernière visite sur place a eu lieue le 26 novembre. Entre le 19 et le 26 novembre, la neige est tombée avec une importance de quelques centimètres (0 10 cm). A partir du 19, le comportement thermique du sol semble standard pour un éboulis ventilé et ne subit que quelques faibles variations.

Le système de ventilation au cours du mois de novembre a un comportement relativement singulier :

Au début du mois (jusqu'au 5), le système de ventilation semble fonctionner selon le régime estival. Avec la brusque chute de la température de l'air, le système de ventilation s'inverse et passe clairement en régime hivernal jusqu'à la mi-journée du 11 novembre où la température de l'air augmente. Au cours de la journée du 12 novembre, la température de l'air rechute. C'est à partir de ce moment là que le comportement du système de ventilation est singulier. Car contrairement à un regain d'activité (en fonctionnant selon le régime hivernal), le système de ventilation ne semble plus fonctionner. Que se passe-t'il ? La couverture neigeuse faible (0 - 5 cm) ne peut expliquer un tel phénomène, d'autant plus que le 17 novembre, celle-ci avait totalement disparue. Une des raisons possible qui pourrait expliquer cette chute conjointe des températures est peut-être le fort épisode de bise qu'il y eut entre le 13 et le 14 novembre (figure 4.16 / B). Cette chute des températures est-elle due à une *surpression* dans la partie supérieure de l'éboulis causée par la vitesse de la bise ? Un réseau karstique sous-jacent à l'éboulis (s'il y en a un) jouerait-il un rôle dans ce phénomène ?

A partir du 15 novembre, le système de ventilation reprend son régime hivernal (ou peut-être son enregistrement par les capteurs est à nouveau perceptible). La veille du 16 novembre, le comportement thermique mesuré par les capteurs de la partie supérieure (Vu03 et Vu05) est aussi particulier, d'autant

plus que la température de l'air remonte nettement. Comment expliquer une chute des températures, alors que le système de ventilation semblait reprendre une activité selon le régime hivernal et que le pic de l'épisode de bise est terminé (figure 4.16 / B) ? Est-ce lié avec le rééquilibrage d'un système karstique ?

A la mi-journée du 18, l'augmentation de température de l'air marque un pic avant une rechute. La baisse de température dans la partie basse de l'éboulis (Vu08) traduit-elle une excursion estivale du régime ?



Figure 4.16 - A: Evolution thermique de l'éboulis n° 3 au mois de novembre. B : Mise en relation de la vitesse du vent, de son origine et des températures du sol et de l'air dans l'éboulis n° 3 au mois de novembre. Les données pour le vent proviennent de la station météo du Moléson (*Source Météosuisse*).

4.1.6 Géoélectricité

Trois sondages verticaux et 183 points de trainés (figure 4.17) ont été réalisés principalement sur l'éboulis n° 3, seul un trainé (9 points) a été effectué sur l'éboulis n° 2. Les sondages VuS01 et VuS02 ont été exécutés le 28.06.04. Il s'agit de sondages longitudinaux dont le centre est situé vers le haut de l'éboulis. Vus02 a été répété le 31.05.05. 6 trainés ont été réalisé dans l'éboulis n° 3. VuT01 et VuT02 ont été effectués le 27.06.04 et répétés le 09.11.04. VuT03 a été mesuré de quatre reprises, les 27.06.04, 09.11.04, 31.05.05 et 15.08.05. VuT04 a été réalisé le 27.06.04 et répété le 15.08.05. Finalement, VuT05 a terminé la série de trainés le 31.05.05, avec répétition le 15.08.05.



Figure 4.17 – Emplacements des sondages (en noir pointillé) et des trainé (en blanc) dans l'éboulis n° 3. Les étoiles symbolisent les centres de mesures. Les centres de VuT01 et VuS02 sont identiques, ainsi que VuT03 et VuT04.

4.1.6.1 Sondages verticaux

Les sondages VuS01 et VuS02, effectués le 28.06.04 dans le sens de la pente de l'éboulis, présentent des courbes en forme de cloche (figure 4.18).VuS02 a été répété le 31.05.05 et les valeurs obtenues ne changent quasiment pas par rapport aux résultats du 28.06.04 (les deux courbes se superposent). La branche E (avale) de VuS01 a une résistivité moindre que la branche W.

La résistivité apparente de ces sondages est relativement faible (max. de 3 k Ω m pour VuS01 en symétrique). Leurs centres de référence étant relativement haut par rapport à la base de l'éboulis qu'on peut supposer englacée (glace interstitielle entre les blocs), explique peut-être cette faible résistivité. Les valeurs obtenues par ces deux sondages donneraient des informations plus sur l'épaisseur de la formation qui est estimée à 20 m.



Figure 4.18 – Sondages effectués dans l'éboulis n°3 de la Combe de Vudèche.

4.1.6.2 Trainés

Les trainés entrepris à Vudèche avec la configuration de Wenner ont une profondeur d'investigation de 5 à 8 mètres (a = 10). La répétition des trainés aux mêmes endroits avait pour but de mettre en évidence une variation de la résistivité qui pourrait être influencée par un changement de la teneur en glace de l'éboulis. Dans cette optique, les trainés ont été réalisés en fin de période hivernale et à la fin de la saison estivale. Dans la partie supérieure de l'éboulis, les trainés VuT01 et VuT02 n'ont pas manifesté de variation. Dans la partie médiane, les résistivités montrées par VuT03 ont légèrement variées (entre 300 et 600 Ω) (figure 4.19). Dans la partie basse de l'éboulis (VuT05), le résultat de la répétition des trainés a aussi donné une variation de la résistivité sur le haut de l'éboulis avec des variations plus petites dans la partie médiane et basse de l'éboulis (figure 4.21).

Le trainé VuT03 ne donne pas une variation de résistivité élevée. Néanmoins, la figure 4.19 indique que la partie sud du trainé (rectangle pointillé) voit sa résistance baisser. Etant dans la partie de l'éboulis qui se trouve en amont du secteur sur-refroidi, cette baisse est-elle due à un dégel complet du sol ou est-ce l'influence de la pluie lors des mesures du 15.08.05 ? Comment expliquer alors le fait que la partie nord de l'éboulis ait une résistance plus élevée par temps de pluie ?

A la lecture du graphique de VuT05, deux secteurs du trainé sont distinguables. La partie sud du trainé (rectangle) ne varie pas beaucoup et se situe dans la partie basse de l'éboulis ventilé. Contrairement à la partie nord (rectangle pointillé) qui montre une variation de résistance relativement marquée.



Figure 4.19 – Profils de VuT03 latéralement à la partie médiane l'éboulis n° 3. Le nord est à droite sur le graphique. L'éboulis commence $\dot{a} - 25$ m et à 5 m, une zone de gros blocs commence. Commentaires dans le texte.



Figure 4.20 – Profils de VuT05 latéralement à la partie basse de l'éboulis n°3. Le nord est à droite sur le graphique. La largeur de l'éboulis s'étend de -30 m à 70 m. Commentaires dans le texte.

La fin du profil de VuT04 (partie est) est probablement faussée par des erreurs lors de la prise de mesure (mauvais emplacement de l'électrode par rapport à la mesure du 27.06.04). La partie médiane et supérieure de l'éboulis (rectangle pointillé) ne montre pas une grande variation. Seule la baisse de résistance, entre -5 m et 15 m, tendrait peut-être à indiquer une fonte de glace dans la zone située juste au-dessous du secteur surrefroidi de l'éboulis. Mais la résistivité apparente étant très faible (< 2 k Ω m), cela reste difficile à envisager.



Figure 4.21 – Profils de VuT04 longitudinalement à l'éboulis n°3. L'ouest est à droite. A partir de -30 m, l'éboulis commence. La différence entre les derniers points de mesures (rectangle) est probablement due à des erreurs de mesures. Commentaires dans le texte.

4.1.7. Interprétation

- Géoélectricité : mal négociée ?

Les résultats obtenus lors des différentes campagnes de mesures sont relativement décevants. Non pas parce que cette méthode n'est pas judicieuse dans ce type de terrain, mais plutôt par l'emplacement inapproprié des sondages et des trainés. Dans le but de continuer l'étude de la Combe de Vudèche, il faudrait privilégier la partie basse de l'éboulis en y concentrant des sondages effectués latéralement à la pente de l'éboulis. Des trainés supplémentaire seraient certainement aussi utiles, tout en changeant peut-être l'écartement des électrodes (a = 8, par exemple) afin de mieux percevoir les changements de résistance proche de la surface. Il serait aussi judicieux de marquer les emplacements des électrodes afin de minimiser les erreurs engendrées par un décalage de l'axe du trainé ou du sondage.

- Anomalies thermiques :

Le système de ventilation, suite à l'aspiration d'air froid au cours de l'hiver, a fait ses preuves quant au maintien de zones froides au bas des éboulis (anomalie thermique annuelle jusqu'à - 4.94°C) lorsqu'il est en régime estival. En bas de l'éboulis n°3, la température moyenne annuelle est en dessous du 0°C, ce qui pourrait indiquer l'existence d'un pergélisol, du moins de manière épisodique.

- Variations du système de ventilations :

Au cours de l'automne et du début de l'hiver, le système de ventilation ne passe pas d'un régime estival à un régime hivernal clairement. Cette transition se fait avec plusieurs allers et retours d'un régime à l'autre. Suite à l'épisode de bise, il semblerait qu'un éboulis ventilé puisse être influencé par un autre paramètre que le gradient thermique. La perturbation engendrée par la bise au mois de novembre soulève des interrogations : par quel mécanisme, le système de ventilation est-il perturbé ainsi ?

4.2 Dreveneuse (VS)

Dominée au sud par la Pointe de Bellevue (2041 m.s.m.), la Combe de Dreveneuse se situe dans le Chablais valaisan en rive gauche du Rhône au-dessus de Monthey entre 1500 et 1860 m.s.m. La combe est bordée par des parois calcaires avec à l'ouest l'arête de Pré Fleuri et à l'est la Pointe de Dreveneuse et le Sex de la Vire. De nombreux voiles d'éboulis s'étalent sur les flancs internes et externes de la combe.

C'est en avril 2003 que les premières observations ont été réalisées dans cette combe (DELALOYE, 2004). Au bas de la combe et dans sa partie médiane, les éboulis en présence affichaient clairement des indices visuels d'un système de circulation d'air. C'est en se basant sur ces premiers travaux qu'une partie de la Combe de Dreveneuse a été étudiée.

La zone étudiée se trouve en aval des *Chalets de Dreveneuse* et va jusque vers la « cabane de chasseur » au bas de celle-ci. L'éboulis de cette zone est composé d'éléments de taille variable allant de quelques centimètres dans sa partie haute à quelques décimètres à sa base. La végétation est légèrement présente vers le haut de l'éboulis avec principalement des plantes de la strate herbacée. Au pied de la formation, la végétation se diversifie avec l'apparition d'arbustes. Des arbres parsèment le glacier rocheux fossile qui s'étale à la base de l'éboulis. Des épicéas nains jalonnent aussi le glacier rocheux (figure 4.22). L'éboulis « Dreveneuse d'en Bas » (DELALOYE & LAMBIEL, 2007) qui n'est pas traité dans ce travail, a montré la présence de pergélisol.

La Combe de Dreveneuse a été visitée à maintes reprises entre les mois de mai 2004 et octobre 2006 dans le but de mettre en évidence la présence d'un système de ventilation dans la formation meuble

avec une possible connexion du glacier rocheux au système de ventilation, ceci par le biais d'observations visuelles et de méthodes thermiques et géoélectriques.

4.2.1 Cadre géologique et géomorphologique

Tectoniquement monoclinale, la Combe de Dreveneuse fait partie de la nappe des Préalpes Médianes Rigides. Les falaises alimentant en blocs les éboulis sont composées principalement de blocs calcaires du Malm du Jurassique qui peut atteindre une épaisseur de 100 à 300 mètres, ainsi que des Couches Rouges du Crétacé pour Pré Fleuri (BADOUX ET AL.1960). Pour ces auteurs, on trouve dans le fond de la combe du glaciaire local ainsi que du glaciaire rhodanien dans la partie supérieure de la combe. Le glacier rocheux fossile de la zone d'étude est répertorié dans le glaciaire local.

L'éboulis principal s'étale entre 1820 et 1680 m.s.m. A son pied le glacier rocheux fossile est allongé entre 1700 et 1600 m.s.m. Le glacier rocheux est jalonné d'une morphologie typique de crêtes et de sillons. Le lobe terminal du glacier se situe vers la fin de la forêt en amont de la « cabane de chasseur » ; il est cependant difficile à identifier clairement.



Figure 4.22 – Carte géomorphologique de la partie médiane de la Combe de Dreveneuse. (*Source de la photo aérienne : BAFU/Swisstopo - http://prod.swisstopogeodata.ch/kogis_apps/erdbeben/*).

4.2.2 Fonte précoce, neige et glace résiduelles

La première visite sur le site a eu lieu le 14 mai 2004. Elle a permis l'observation de plaques de glace et de neige résiduelles dans un secteur d'arbres nains à la base de l'éboulis en face de la « cabane de chasseur » (figure 4.23). De plus, les fenêtres de fonte précoces remarquées dans la partie supérieure de l'éboulis correspondaient à celles mises en évidence par R. DELALOYE en avril 2003 (figure 4.24).



Figure 4.23 – Zone d'épicéas nains (cercle jaune) avec neige et glace résiduelle le 14.05.2004 à Dreveneuse. La partie supérieure de l'éboulis est complètement déneigée. (Rond rouge = capteur Drev18). Photo de droite R. DELALOYE.



Figure 4.24 – Comparaison des fenêtres de fonte précoces dans l'éboulis de la zone étudiée. A gauche la photo est prise le 27.04.2003 et à droite le 14.05.2004. Photos : R. DELALOYE.

Ces fenêtres de fonte étaient les témoins d'un système de ventilation de l'éboulis ayant fonctionné selon un régime hivernal, l'ascension d'air « chaud » favorisant le déneigement précoce de l'éboulis. Le bas de l'éboulis, quant à lui, atteste de la décharge gravitaire d'air « froid » qui maintient des conditions printanières et estivales froides, permettant ainsi la préservation de glace et de neige malgré le réchauffement saisonnier et montrant aussi le surrefroidissement hivernal.

La seconde visite eut lieu au début du mois de juin (03-05.06.2004) ; là encore, le bas de l'éboulis montrait des restes de manteau neigeux ainsi que des plaques de glace. Cependant dans la partie supérieure de l'éboulis, la neige avait complètement fondu ne permettant plus de distinguer des zones de fonte précoces.

4.2.3 Automne et début de l'hiver

Trois visites successives ont été menées entre le 15 octobre, le 18 et le 24 novembre 2004. Aux deux premières dates, la neige n'était pas présente. Le 24 novembre une couche de neige entre 5 et 10cm recouvrait la Combe de Dreveneuse. Si le 15 octobre aucun indice visuel d'un système de ventilation

n'a été répertorié, les dernières dates ont permis l'observation de plusieurs témoins de la circulation d'air dans l'éboulis, principalement dans sa partie supérieure.

Ainsi, le 18 novembre, alors que la température de l'air à l'ombre avoisine les 5°C à 10h le matin :

- Des éléments de l'éboulis présentent un liseré de givre (figure 4.25) dans les zones de sorties d'air chaud.
- Dans ces mêmes zones, l'humidification des cailloux est importante (figure 4.26).
- Dans la partie supérieure de l'éboulis, dans un trou, une sortie d'air chaud concentré est mesurée à plus de 8°C.
- Dans les éboulis de la rive droite de la combe, encore au revers (Sex de la Vire), des esquisses de fenêtres de fonte sont visibles.



Figure 4.25 – Eléments de taille décimètrique avec bordure de givre (18.11.04).



Figure 4.26 – Humidification des cailloux dans une zone de sortie d'air chaud (18.11.04).

Le 24 novembre, la neige a fait son apparition (5 - 10 cm) et lors de la journée de terrain, la température de l'air oscille entre $-2 \text{ et} + 4^{\circ}\text{C}$.

- Avec la neige, les fenêtres de fonte automnale (figure 4.27) sont facilement observables.
- Aux abords de ces fenêtres de fonte, des signes évidents de fonte basale et regel de la couche de neige sont visibles (figure 4.28).
- Des blocs mouillés sont toujours observables.
- La sortie d'air chaud concentré répertorié le 18 a une température de 7.8°C.



Figure 4.27 – Fenêtres de fonte automnale (24.11.04).



Figure 4.28 – Fonte basale du manteau neigeux avec regel et bloc mouillé (24.11.04).

4.2.4 Cartographie thermique et surrefroidissement hivernal

Le 10 février 2005, après deux semaines de froid, 131 points de mesures BTS ont été réalisés sur l'éboulis et le glacier rocheux fossile. Lors de la prise de mesure, la température de l'air a oscillé entre -2 et $+5^{\circ}$ C. La couverture neigeuse avait en moyenne une épaisseur de 105cm. Dans la partie supérieure de l'éboulis, des fenêtres de fonte ainsi que des puits à air chaud sont visibles (figure 4.29). Aux alentours des fenêtres de fonte, le manteau neigeux s'amincit considérablement passant nettement sous le mètre d'épaisseur. Sur le glacier rocheux, l'épaisseur de neige varie autour du mètre.



Figure 4.29 – Fenêtres de fonte dues à de l'air chaud diffus (flèches) et zone (rectangle) criblée de puits dus à de l'air chaud concentré (10.02.05).

Grâce aux mesures BTS, une répartition spatiale des températures du couple formé par l'éboulis et le glacier rocheux est possible. L'éboulis présente la transition rapide caractéristique entre la partie basse surrefroidie (températures entre -10 et -4° C) et le haut de l'éboulis plus chaud (figure 4.30). Le point chaud (flèche) à l'extrême droite de la carte correspond à un des premiers puits de la zone des sorties d'air concentré. La zone la plus froide est situé au dessus du pied de l'éboulis et correspondrait au secteur d'aspiration hivernale maximal. Le glacier rocheux (symbolisé par le trait interrompu) est dans son ensemble relativement froid avec un secteur plus froid correspondant à une dépression (doline) sur le glacier rocheux. Ce secteur n'est probablement pas directement connecté avec la partie surrefroidie de l'éboulis visible sur la carte BTS, mais avec une partie basse adjacente de l'éboulis non cartographiée. La répartition des points de mesure sur le glacier rocheux n'est pas des plus optimale pour avoir une cartographie représentative.



Figure 4.30 - Résultats des mesures BTS interpolées par kriegeage simple. Commentaires dans le texte.

4.2.5 Anomalies thermiques de l'éboulis et du glacier rocheux fossile

Entre le mois d'octobre 2004 et le mois d'octobre 2006, 12 Miniature Data Loggers (de type UTL-1) ont été posés dans l'éboulis et le glacier rocheux fossile dans le but d'avoir un enregistrement continu de la température. La première année de mesures (04/05) a fourni des informations principalement sur les températures de l'éboulis. Avec l'année suivante (05/06), des données ont été obtenues pour le glacier rocheux fossile. Drev 18, Drev 21, Drev 22, Drev 24 à Drev 26 ont été laissés dans l'éboulis entre le 14.10.2004 et le 18.10.2005. Drev 27 a été rajouté à la série le 18 novembre 2004. Drev 21 et 22 se situaient dans le bas de la formation meuble, Drev 24 au milieu et Drev 25, 26 en haut de l'éboulis (figure 4.31). Il faut signaler deux incidents : le capteur Drev 18, situé dans la zone d'épicéas nains en face de la « cabane de chasseur » (figure 4.23), a malheureusement été retrouvé hors de son emplacement et le capteur Drev 21 n'a pas fonctionné la première année de mesure.

Le 18 octobre 2005, certains capteurs (Drev 21, 24 & 27) ont été remplacés et d'autres placés à de nouveaux emplacements afin d'obtenir des données sur le glacier rocheux fossile (GRF). Notamment Drev 19 a été posé sur le front du GRF, Drev 20 a été mis en place dans un sillon du GRF. Drev 23 a été placé dans le bas de l'éboulis (figure 4.31). Drev 28 et 29 ont été chacun enfouis dans un trou dans la zone de sorties d'air chaud concentré dans la partie supérieure droite de l'éboulis. Ces trous se trouvent le long du chemin pédestre qui traverse l'éboulis. La disparition de Drev 29 est à signaler...

Les données obtenues par ces deux ans de mesures sont synthétisées dans les tableaux 4.3 et 4.4 ciaprès. Les courbes de températures fournies par le biais des capteurs sont présentées dans un premier temps de façon annuelle (figure 4.32 et 4.33), puis elles seront détaillées.

La température de l'air utilisée dans les tableaux et les graphiques suivants, a été obtenue en dérivant (gradient de 0.56°C/100 m) les valeurs enregistrées au Moléson (*source : Météosuisse*).


Figure 4.31 – Emplacements des capteurs de température à Dreveneuse. Drev 20 est dans le premier sillon du GRF (caché par les arbres). Drev 19 n'est pas visible sur la photo, il se situe sur le front du GRF après la « cabane de chasseur ». Drev 29 se trouvait devant Drev 28. On notera aussi la présence de fenêtres de fonte en rive droite de la combe (flèche noire). Photo : R. DELALOYE (14.05.04).

UTLs	Air	Drev18	Drev19	Drev20	Drev21	Drev22	Drev23	Drev24	Drev25	Drev26	Drev27	Drev28
nov.04	0.39	-2.60	-	-	-	-1.99	-	2.31	6.40	6.99	-	-
déc.04	0.06	-4.59	-	-	-	-2.12	-	-1.95	3.94	4.02	4.72	-
janv.05	-2.78	-7.05	-	-	-	-3.20	-	-1.87	3.06	-0.67	1.10	-
févr.05	-7.19	-9.56	-	-	-	-7.03	-	-1.23	3.77	1.27	1.80	-
mars.05	-0.98	-8.17	-	-	-	-4.82	-	-1.13	1.42	1.30	1.56	-
avr.05	1.71	-0.32	-	-	-	-0.14	-	0.17	2.75	2.31	2.95	-
mai.05	6.55	0.16	-	-	-	0.04	-	8.60	9.71	10.20	9.05	-
juin.05	11.24	-	-	-	-	2.86	-	15.48	14.65	14.79	14.46	-
juil.05	11.28	-	-	-	-	4.47	-	15.48	15.59	15.43	14.93	-
août.05	9.68	-	-	-	-	5.14	-	12.23	13.22	12.38	12.40	-
sept.05	9.21	-	-	-	-	4.92	-	12.04	12.54	12.47	12.01	-
Moyenne (11.04 - 09.05)	3.56	-	-	-	-	0.06	-	5.61	7.99	7.45	-	-
oct.05	7.87	-	-	-	-	-	-	7.64	-	-	-	-
nov.05	1.74	-	-0.21	-2.16	-2.86	-	-3.02	4.03	-	-	6.47	5.66
déc.05	-3.93	-	-6.48	-3.54	-7.82	-	-6.90	-0.94	-	-	4.62	3.58
janv.06	-3.51	-	-6.11	-3.43	-6.07	-	-9.40	-1.82	-	-	3.12	3.24
févr.06	-2.56	-	-5.04	-2.25	-4.07	-	-8.63	-3.13	-	-	0.70	2.98
mars.06	-2.56	-	-4.51	-1.56	-1.94	-	-6.45	-1.90	-	-	0.61	2.47
avr.06	2.84	-	0.17	0.16	-0.10	-	-0.03	0.00	-	-	2.34	2.60
mai.06	6.78	-	0.20	0.20	0.00	-	0.12	5.42	-	-	7.70	8.30
juin.06	10.82	-	0.23	0.43	0.07	-	2.53	14.85	-	-	13.00	12.64
juil.06	16.46	-	5.23	2.35	1.49	-	3.53	18.29	-	-	16.37	16.10
août.06	9.46	-	6.39	3.98	3.34	-	4.32	11.36	-	-	12.35	12.06
sept.06	12.27	-	6.74	4.20	2.80	-	4.55	13.05	-	-	12.62	12.14
Moyenne (11.05 - 09.06)	4.64	-	-0.29	-0.14	-1.37	-	-1.73	5.43	-	-	7.31	7.46

Tableau 4.3 – Températures mensuelles pour les deux périodes de mesures dans la Combe de Dreveneuse. Les moyennes sont obtenues avec les données horaires, sauf pour la température de l'air basée sur des données journalières.

UTLs	Anomalie thermique	Min	Мах	Amplitude	Nbr. de jours gelés	GFI	Zéro curtain Début	Zéro curtain Fin	Durée (jours)
Air (04/05)	-	-15.02	20.18	35.2	-	-569.02	-	-	-
Air (05/06)	-	-16.45	19.54	35.99	-	-534.47	-	-	-
Drev18 (04/05)	-	-	-	-	195	-989.08	12.04.2005	18.05.2005	36
Drev19 (05/06)	-4.66	-14.61	7.40	22.01	129	-739.04	27.03.2006	29.06.2006	95
Drev20 (05/06)	-4.51	-12.52	5.08	17.6	136	-417.73	29.03.2006	21.06.2006	85
Drev21 (05/06)	-5.74	-17.34	4.51	21.85	144	-703.62	04.04.2006	24.06.2006	82
Drev22 (04/05)	-3.57	-10.62	10.05	20.67	205	-601.2	10.04.2005	27.05.2005	48
Drev23 (05/06)	-6.1	-13.97	7.77	21.74	193	-1093.7	03.04.2006	25.05.2006	53
Drev24 (04/05)	1.98	-7.75	31.14	38.89	114	-203.95	20.03.2005	30.04.2005	42
Drev24 (05/06)	1.14	-4.44	29.28	33.72	154	-254.23	27.03.2006	11.05.2006	46
Drev25 (04/05)	4.31	-2.38	29.65	32.03	8	-6.71	-	-	-
Drev26 (04/05)	3.76	-5.02	30.79	35.81	18	-34.94	-	-	-
Drev27 (04/05)	-	-3.25	27.52	30.77	16	-17.68	-	-	-
Drev27 (05/06)	2.94	-4.45	24.6	29.05	8	-13.73	-	-	-
Drev28 (05/06)	3.09	0.23	20.82	21.1	0	0	-	-	-

Tableaux 4.4 – Indices thermiques pour la Combe de Dreveneuse. L'anomalie thermique se calcule en degré Celsius selon la différence entre MAAT et la MAGST de chacun des capteurs. Les températures minimales, maximales et l'amplitude, déterminées à l'aide des données horaires, sont en degré Celsius. Le GFI (indice de gel du sol) exprime la somme des C°. jours négatifs dans le sol. Pour l'air, c'est la moyenne journalière qui a été utilisée. Commentaires ci-dessous.

Aux vues des deux tableaux, différentes caractéristiques d'une formation meuble poreuse peuvent être mises en évidence :

- Une anomalie thermique négative conséquente affecte la partie basse de l'éboulis (Drev 21 à 23) ainsi que le glacier rocheux fossile (Drev 19 & 20). Le sol reste gelé entre 129 et 205 jours au cours des périodes de mesures. La température moyenne du sol pour la période de mesure de Drev 19, 20, 21 et 23 a été de ~0°C, mais bien en dessous de la température moyenne de l'air. Bien que les données « valides » de Drev 18 s'arrêtent en mai, elles laissent présager des conditions relativement froides dans lesquelles doit pousser la végétation présente.
- A contrario, les capteurs de la partie supérieure de l'éboulis (Drev 25 à 28) n'ont pas d'anomalie thermique négative et ne sont gelés que très peu de temps (max. 18 jours). Au cours de la période de mesures, la température de Drev 28 ne descend même jamais en dessous de 0°C.
- Drev 24 présente, durant les deux hivers (de décembre à mars) où il a fonctionné, des moyennes inférieures au 0°C. Puis les températures enregistrées suivent la tendance de la température de l'air. Ce comportement semble s'apparenter au type II de DELALOYE (2004), typique des parties médianes des éboulis.

Le graphique suivant (figure 4.32) montre l'évolution des températures des éboulis de la Combe de Dreveneuse. L'automne et le début de l'hiver (rectangle pointillé) sont peu lisibles et seront décrits ultérieurement (cf. 4.2.5.1 et 4.2.5.2). Néanmoins, le régime hivernal est clairement distinguable (flèches noires) : avec la chute de la température extérieure, une aspiration d'air froid, décalée dans le temps en raison du manteau neigeux, se produit dans le bas de l'éboulis. Inversement, dans la partie supérieure de l'éboulis est nettement au dessus de 0°C. Seul Drev 25 redescend lorsque la température de l'air augmente (flèche jaune), Drev 27 et 26 sont stables. Les capteurs du haut de l'éboulis (Drev25, 26 et 27) enregistrent des températures chaudes en hiver et *normales* en été. C'est un comportement thermique de type I (DELALOYE, 2004). Drev 24 confirme son comportement de type II ; il est donc situé juste en dessus de la partie de refroidissement maximal. Dès la fonte de la neige (flèche bleue), le capteur du bas de l'éboulis (Drev 22) enregistre la décharge gravitaire d'air froid et ne dépasse que rarement les 5°C. Son comportement s'apparente au type III de DELALOYE (2004).



Figure 4.32 - Courbes de températures dans l'éboulis au cours de l'année 04 / 05. Commentaires dans le texte.



Figure 4.33 – Evolution des températures du glacier rocheux fossile et de l'éboulis au cours de l'année 05 / 06. Commentaire dans le texte.

La figure 4.33 montre les courbes de températures pour la deuxième période de mesure. En regardant les résultats lors du régime hivernal, trois constatations sont possibles :

- Tout au long de l'hiver, le capteur Drev28 est relativement stable (baisse lente, mais graduelle de la température) malgré les variations de la température de l'air. Est-ce dû à un apport d'air chaud externe (réseau karstique) ? Ou le flux d'air chaud est plus constant du au fait d'une granulométrie plus fine dans cette zone de l'éboulis ? Ou encore ce trou serait-il vraiment habité et la chaleur dégagée par l'animal fausse les résultats ?
- Drev 27 est plus chaud que Drev 28 en début d'hiver (refroidissement saisonnier plus marqué). Mais par la suite, Drev 28 est plus chaud, ce qui peut indiquer un réservoir de chaleur plus faible pour Drev 27.

Drev 24 reconfirme le même comportement (type II) que lors de la précédente série de mesures. La décharge gravitaire d'air froid (rectangle pointillé) au cours de la saison estivale est enregistrée par les différents capteurs du bas de l'éboulis (Drev 21 & 23) ainsi que ceux du glacier rocheux fossile (Drev 19 & 20), comportement thermique s'apparentant au type III de DELALOYE (2004). Les capteurs de la partie supérieure de l'éboulis, situés dans la zone de fenêtres de fonte, peuvent être classés dans le type I.

4.2.5.1 Variations thermiques en automne (octobre 2004)

A la fin de l'automne et au début de l'hiver, le système de ventilation oscille souvent entre le régime estival et le régime hivernal. Ceci est principalement dû aux variations autour du seuil d'inversion au cours de cette époque de l'année. Le graphique suivant (figure 4.34) met en évidence les inversions de régime depuis la mi-octobre jusqu'à la fin du mois. Si, au début de la période d'enregistrement (rectangle pointillé), le système de ventilation est nettement dans son régime hivernal (avec aspiration d'air froid à la base de l'éboulis et sorties d'air chaud dans sa partie supérieure) ; avec la remontée de la température de l'air, le système repasse en régime estival avec décharge gravitaire d'air froid jusqu'au 25 octobre. Ensuite une baisse importante de la température extérieure refait passer le système en régime hivernal (cercle pointillé). Du 27 octobre au 29, le régime est estival. Puis le 29 octobre, le système fonctionne selon le régime hivernal. Il semblerait que lorsque la température de l'air baisse et passe sous les $+4.5 - 5^{\circ}$ C (flèches noires), le système fonctionne selon le régime hivernal. Mais ce seuil d'inversion du régime reste une estimation relativement grossière.

4.2.5.2 Novembre et les particularités du système de ventilation

Le mois de novembre 2004 a subi trois vagues de froid successives (figure 4.35). La première vague de froid commence le 5 novembre. Le système est clairement en régime hivernal (rectangle pointillé) après un épisode estival (flèche noire). A noter que Drev 22 enregistre l'aspiration d'air froid à nouveau lorsque la température de l'air redescend autour de +4°C (cercle jaune). Entre le 11 et 12 novembre la remontée de la température extérieure (ainsi qu'une faible quantité de neige ?) provoque la chute conjointe des températures du haut de l'éboulis (Drev 25 & 26). Un autre fait marquant et la chute vertigineuse (jusqu'à -3°C) de Drev 26 entre le 13 et 15 novembre alors que le système est en régime hivernal. La cause serait, comme à Vudèche (cf. 4.1.5.4), liée à la tempête de bise du 14 novembre (traits jaunes). Cependant, pourquoi Drev 25 ne subit pas cette chute de températures ? Un apport d'air chaud externe (originaire d'un réseau karstique sous-jacent à l'éboulis) ? Néanmoins, après cet épisode de bise, Drev 26 est beaucoup plus stable que Drev 25 (rectangle) dont la température suit l'évolution de la température l'air extérieure le 20 novembre.

L'enregistrement de l'épisode de bise par la station météorologique d'Aigle est tendancieuse : c'est une station de plaine dans une vallée (le vent monte ou descend). Cependant, cet épisode de bise a aussi été enregistré à Leysin à une altitude de 1300 m.s.m. (*source : www.meteoleysin.com*). Ceci confirme l'influence de la bise sur cette région (Chablais valaisan et vaudois).

Néanmoins, le mécanisme, engendré par la bise ou non, qui provoque une chute de température dans la partie supérieure de l'éboulis (Drev 26) n'est pas connu. Est-il lié à un effet de *surpression* dans la partie haute de l'éboulis engendré par la bise ?

Les variations de Drev 25 et dans une moindre mesure de Drev 26 (rectangle) sont assez particulières. En effet, les températures des deux capteurs sont supérieures à 0°C (régime hivernal), mais suivent l'évolution de la température de l'air. Les capteurs sont-ils aux bords d'une zone de sortie d'air chaud diffus ? De ce fait, l'influence de l'ascension d'air chaud serait moins importante.



Figure 4.34 – Evolution des températures au mois d'octobre 2004 dans l'éboulis à la Combe de Dreveneuse.

Températures Dreveneuse (10-11.04)



Vitesse et Origine du Vent ą Aigle

Figure 4.35 – Assemblage de deux graphiques couplant les températures dans l'éboulis à Dreveneuse au cours de la période du 25.10 au 25.11.04, ainsi que l'origine et la vitesse du vent à Aigle (source : Météosuisse).

4.2.5.3 Automne 2005 (octobre – novembre)

Au cours de l'automne 2005, de nouveaux capteurs ont été posés dans le glacier rocheux fossile (Drev 19 & 20). Cela a permis de comparer les températures du bas de l'éboulis avec le front et un sillon du GRF (figure 4.36). Le système de ventilation fonctionne selon le régime estival jusque vers le 4 novembre, ce qui maintient le GRF et le bas de l'éboulis dans des conditions relativement froides. Ensuite la chute de la température (flèche noire) de l'air (passant sous le seuil de 4°C) provoque l'aspiration d'air froid et le début du régime hivernal. Aussi bien dans le bas de l'éboulis qu'aux différents endroits du glacier rocheux fossile. A partir du 15 novembre, le système semble fonctionner à plein régime selon le mode hivernal.



Figure 4.36 - Evolution des températures entre l'éboulis et le GRF au cours de l'automne 2005. Les températures du sol (enregistrées / 2h) ont été adaptées aux données horaires (moyenne), ce qui engendre un « lissage » des courbes de températures du sol.

4.2.6 Géoélectricité

5 sondages verticaux et 46 points de traînés ont été effectués entre le glacier rocheux fossile et l'éboulis. La première série de mesure comprenant les sondages DrevS1, DrevS2 et DrevS3, ainsi que le traîné DrevT1 date du 4 au 6 juin 2004. Les sondages DrevS1, DrevS3 et le traîné DrevT1 ont été répétés le 18 août 2005. DrevS1 se situe dans un sillon sur le glacier rocheux fossile, DrevS2 a été réalisé en dehors du GRF pour avoir une idée de la résistance du substratum et DrevS3 s'est déroulé au pied de l'éboulis. Le traîné (DrevT1) a été effectué à travers le GRF et s'est terminé en haut de l'éboulis (figure 4.37).



Figure 4.37 – Vue plongeante sur le bas de l'éboulis et sillon du GRF. En haut de la photo en jaune DrevS1, au milieu DrevS3 et en bleu DrevT1 (14.10.04)

4.2.6.1 Sondages verticaux



Le sondage DrevS2 a mis en évidence la résistivité apparente du substratum qui semble se trouver aux alentours de $3k\Omega m$ (figure 4.38).

Figure 4.38 – Sondages DrevS1 et DrevS2. DrevS2 met en évidence une couche superficielle peu épaisse (~100cm) qui est le sol (terre) en présence. La résistivité apparente monte ensuite régulièrement pour plafonner vers $3k\Omega m$.

DrevS1 a été effectué dans un sillon du GRF. Celui-ci étant bien recouvert par la végétation, il y a peu d'indication directe concernant les éléments qui constituent le GRF. La couche de sol (terre) est présente et lors de la première prise de mesure (04.06.04), de la neige recouvrait encore le sol en certains endroits du sillon. La deuxième couche pourrait être les sédiments gelés du GRF. La cause peut être la

La repetition du sondage (DrevS1) à donne une courbe sensiblement différente. La cause peut etre la fonte de glace dans le sol.

Le sondage DrevS3 réalisé au pied de l'éboulis a présenté lors des 2 séries de mesure des courbes en forme de cloche (figure 4.39) qui sont fréquentes pour des formations poreuses de sédiments meubles. La différence principale (augmentation) entre les deux séries de mesures affecte la « surface » de l'éboulis, à savoir les premiers mètres de profondeur (~2m).





4.2.6.2 Ligne de trainé

Les 46 points de traînés effectués dans l'éboulis de la Combe de Dreveneuse ont été configurés selon la méthode de Wenner. La profondeur d'investigation est estimée entre 7 et 11 mètres (a = 15). Le traîné répété deux fois (05.06.04 et 18.08.05) montre bien la transition entre le glacier rocheux fossile et l'éboulis (figure 4.40) avec une augmentation nette de la résistivité apparente. La résistivité varie aussi dans le glacier rocheux fossile (rectangle). Cet endroit est plus résistant lors du deuxième trainé. Dans la partie basse de l'éboulis (rectangle pointillé), un changement de résistivité est observable. La partie médiane et supérieure de l'éboulis semble plus stable au niveau des résistivités.

La variation dans le secteur du GRF est-elle due à un changement de la teneur en glace du sol ou les électrodes lors du deuxième trainé n'ont pas été posées aux mêmes endroits ?

La variation au pied de l'éboulis est peut-être due à une augmentation de la teneur en glace du sol grâce à un meilleur rendement du système de ventilation, ce qui peut plus surrefroidir et maintenir plus longtemps la partie basse de l'éboulis dans des conditions froides. Ceci pourrait expliquer une résistance plus élevée.



Figure 4.40 - Profil longitudinal entre le GRF et l'éboulis

4.2.7 Interprétation

Le recoupement et la comparaison entre les différentes méthodes employées lors de l'investigation de la Combe de Dreveneuse permettent d'amener des informations supplémentaires dans la compréhension d'un système de circulation d'air :

- La cartographie BTS (qui a mis en évidence le mécanisme de pénétration du froid au bas de l'éboulis et du GRF) ainsi que l'emploi des capteurs de température ont mis en évidence la connexion entre l'éboulis et le glacier rocheux fossile. Lors des deux régimes (estival et hivernal), le front du GRF est affecté soit par la décharge gravitaire, soit par l'aspiration d'air quasi en même temps que l'éboulis.
- La réversibilité « automnale » du système a été démontrée (cf. 4.2.5). Sa compréhension ne reste cependant pas évidente par manque d'informations (sur la direction et vitesse du courant d'air). Quant à une réversibilité « printanière », le *zero curtain* des capteurs du bas de l'éboulis semble masquer sa mise en évidence probable.
- Le système de ventilation semble pouvoir être troublé ou faussé par une influence externe au gradient de température, notamment par fort de temps de bise (cf. 4.2.5.2). Dans quelles mesures l'influence hypothétique d'un réseau karstique sous-jacent affecte le système de ventilation ?

4.3 Le Bois des Arlettes (VD)

Le Bois des Arlettes² se situe au nord-ouest du Mont d'Or (2'175 m.s.m.), à proximité du Col des Mosses (VD). Ce versant est constitué d'un vaste voile de cônes d'éboulis calcaires dominant plusieurs imposants glaciers rocheux fossiles recouverts de forêts. Plusieurs cordons morainiques sont reconnaissables en aval et sur les bordures de ces anciennes formations périglaciaires. L'ensemble du site a été visité (env. 1,5 km²). Des investigations plus détaillées ont été menées sur le cône d'éboulis et le glacier rocheux fossile situés le plus à l'ouest et s'étendant entre 1'560 et 1'940 m.s.m. (figure 4.41).

La surface de l'éboulis principal investigué est presque entièrement dénuée de végétation. La granulométrie superficielle est classée avec des gravats centimétriques dans la partie supérieure évoluant vers des blocs métriques en pied de pente. La taille des matériaux est également plus importante sur les bordures du cône qu'en son centre. Le glacier rocheux fossile est également constitué de blocs décimétriques à métriques recouverts d'une fine couche de sol et occupés par de la végétation herbacée, arbustive ou forestière.

Le Bois des Arlettes a fait l'objet de plusieurs visites entre juillet 2004 et octobre 2005, afin de déterminer les indices de fonctionnement (visuel, thermique et géoélectrique) d'un système de ventilation. De nombreux indices de ventilation (synthétisés au chapitre 5) y ont été détectés.

4.3.1 Cadre géologique et géomorphologique

La chaîne Mont d'Or – Gros Van est une écaille tectonique de la partie interne de la nappe des Préalpes médianes rigides. Le plongement axial des couches est d'environ 35° à 70° en direction du sud-est. Le massif est haché plus ou moins perpendiculairement par des nombreuses failles

² Facilement accessible en été depuis la route goudronnée du col de la Pierre du Moëllé (15 minutes de marche), ce site se trouve à l'intérieur des limites de la place d'armes de l'Hongrin, il est judicieux de consulter au préalable les dates de tirs militaires.

tectoniques. La pétrographie est composée de calcaires massifs du Trias. Des calcaires variés de l'Anisien moyen – supérieur composent l'arête et le versant sud-est. Ils recouvrent des calcaires rubannés du Ladinien inférieur (plus jeune). Quelques affleurements de dolomies claires du Ladinien supérieur sont visibles aux extrémités de la chaîne. Des niveaux de gypse ultrahelvétique du Trias supérieur tapissent le substrat du glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes (annexe 2).

Le glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes s'étale entre 1'750 et 1'560 m.s.m. et peut être divisé en deux parties : la partie sud-ouest présente une morphologie caractéristiques de crêtes et sillons arqués concentriques, alors que la partie nord-est – recouvrant sur une épaisseur de 10-20 mètres des couches de gypse – est totalement désorganisée en une juxtaposition de dolines et de buttes coniques typiques d'un micro-relief de karst à pyramides (SCHOENEICH 1992). Deux hypothèses peuvent être formulées pour l'origine de la partie nord-est : un développement rapide du karst gypseux postérieur à la mise en place du glacier rocheux ou un développement antérieur. Dans ce cas « *il faudrait admettre que les dolines étaient comblées par la neige ou la glace, permettant le passage du glacier rocheux. Lors de la fusion, le matériel se serait effondré dans les dolines libérées de leurs culots de glace »* (SCHOENEICH 1992).



Figure 4.41 – Carte géomorphologique du Bois des Arlettes (modifiée d'après SCHOENEICH 1992). Le glacier rocheux fossile situé au nord-est présente un relief très chaotique avec de nombreuses dépressions. Les températures mesurées le 3 septembre 2005 (entre 11h00 et 14h00) révèlent la présence de courants d'air froid ($< 5^{\circ}$ C) en différents endroits des glaciers rocheux fossiles. Fond topographique au 1 :10'000.

4.3.2 Conditions estivales froides

Dans la partie basse de l'éboulis et sur le glacier rocheux fossile (jusqu'à son front !), de nombreuses sorties d'air froid (figure 4.42) et de la glace de regel (figure 4.43) ont été détectées entre les mois

d'avril et d'octobre et mesurées à l'aide d'un thermomètre digital de poche (cf. figures 4.41, 4.54, 4.58).

Une expérience a été menée le 29.06.04 afin d'illustrer l'efficacité du courant d'air froid et les processus de mélange avec l'air extérieur (figure 4.42). La sonde du thermomètre était placée à la verticale (ie. 5 cm au-dessus du sol) à la sortie d'un trou souffleur ouvert artificiellement en déplaçant un mince tapis de mousse. Alors que l'air extérieur était de 27.2°C au soleil (15h35), la température de l'air intérieur à l'éboulis était d'environ 3°C. Le courant d'air « rampait » sur le sol se réchauffant lentement et se mélangeant de mieux en mieux avec l'air extérieur au fur et à mesure qu'il s'éloignait de la cavité.



Figure 4.42 – Profil de température à la sortie d'un courant d'air froid, traduisant le mélange de l'air interne à l'éboulis et l'air extérieur. Le trou a été ouvert en déplaçant un tapis de mousse (29.06.04).



Figure 4.43 – Glace massive en surface sous un mince tapis de mousse (29.06.04).

4.3.3 Automne et début de l'hiver : une réversibilité quotidienne de la circulation d'air et de mini-systèmes de ventilation ?

Deux visites successives ont été menées le 25 novembre et le samedi 4 décembre 2006, entre 12h30 et 16h00 (figure 4.44). De la neige était tombée le vendredi 16 novembre (environ 15-30 cm). Différentes observations ont été relevées :

- Dans la partie supérieure de l'éboulis, de nombreuses fenêtres de fonte automnales étaient présentes, les plus développées se trouvant en bordure de l'éboulis principal.
- Dans la partie supérieure, des signes évidents de fonte basale et de regel du manteau neigeux (cf. figure 5.8), des blocs mouillées, des cristaux de givre et des sorties d'air chaud ont été observées.
- Dans la partie basse de l'éboulis, la neige ne recouvrait pas entièrement les blocs (diamètre décimétrique à métrique) alors que dans le secteur le plus en aval situé entre les racines du glacier rocheux fossiles, plusieurs trous d'aspiration ont été détectés.
- Sur une crête de la partie radicale du glacier rocheux fossile située directement à l'est de la « doline souffleuse » (emplacement sur figure 4.41), un trou ouvert dans la neige laissait apparaître de la végétation mouillée et de petits cristaux de givre.

Lors de la visite du 25 novembre, aucun souffle d'air chaud n'était perceptible en haut de l'éboulis vers 13h00. La température de l'air entre 12h00 et 16h00 oscillait entre 5.5 et 7.5°C (mesurée par UTL Arl-Tair). En revanche, de l'air froid (environ -7°C) s'évacuait de façon fortement perceptible par un trou libre de neige à 13h30 dans le bas de la pente dans la « doline souffleuse » (à proximité de l'UTL Arl-T02 qui se trouvait sous la neige).

Le 4 décembre, la situation inverse a été observée entre 13h00 et 14h00 ! La température de l'air mesurée par l'UTL Arl-Tair oscillait entre -1.5 et +2.5°C, alors que dans la doline souffleuse elle atteignait -9.4°C (« lac » d'air froid, mesurée avec un thermomètre de poche à 1.5 m de hauteur). Aucune sortie d'air froid n'était perceptible dans les trous d'aspiration dont la température atteignait les -11.7°C. L'épaisseur de neige était de 20 à 30 cm (il avait neigé quelques centimètres depuis le 25 novembre). Dans la partie supérieure, des sorties d'air chaud (entre +1 et +5°C) étaient perceptibles dans des zones dégagées ou en enlevant des plaques de neige.



Figure 4.44 – Indices visuels et relevés de température dans l'éboulis et les racines du glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes. Les observations ont été réalisées le 25 novembre et le 4 décembre 2004.

4.3.4 Sur-refroidissement hivernal

185 mesures BTS ont été effectuées le 9 février 2005, après une longue période de temps froid (figure 4.45). Le manteau neigeux atteignait une épaisseur d'environ 1 - 1.5 mètre dans la partie basse de l'éboulis et dans le glacier rocheux fossile, et de moins de 80 centimètres dans certains secteurs du haut de l'éboulis. L'objectif de cette campagne était de mettre en évidence l'étendue spatiale et l'efficacité d'un système de ventilation. La cartographie BTS est caractéristique d'un éboulis ventilé, avec une zone sur-refroidie (entre -4 et -10°C) dans sa partie basse et une transition rapide vers des températures plus élevées dans sa partie supérieure. La zone la plus froide (-10°C) se situe une cinquantaine de mètres en amont du pied de l'éboulis et correspond au secteur d'aspiration hivernal maximal (*flèche noire*). Des conditions froides (-4 à -8°C) ont également été détectées dans les secteurs de végétation azonale du glacier rocheux fossile (*flèches vertes*). Une aspiration d'air froid de moindre intensité doit donc également s'y produire.

Une zone froide (entre -1.5 et -4°C) est également présente dans la partie supérieure de l'éboulis (*flèche rouge*). En raison d'une faible épaisseur de neige (< 50cm) et d'une granulométrie fine, l'échange d'air conductif entre l'atmosphère et l'éboulis (ie. refroidissement) doit l'emporter dans ce secteur sur l'échange d'air convectif (ie. réchauffement depuis l'intérieur de l'éboulis). En revanche, de nombreuses cheminées de fonte coalescentes ont pu être observées dans les bordures latérales du cône traduisant une expulsion d'air chaud (figures 4.46 et 4.47).



Figure 4.45 – Interpolation par krigeage simple de mesures BTS et de hauteurs de neige effectuées le 9 février 2005 au Bois des Arlettes. Le motif de répartition des températures est caractéristique d'un éboulis ventilé. Les étoiles sur la carte de droite indiquent l'emplacement des figures $4.46 (n^{\circ}1)$ et $4.47 (n^{\circ}2)$.



Figure 4.46 – Cheminées de fonte coalescentes évoluant en couloir de fonte (emplacement sur figure 4.5, étoile n°1; 09.02.05) (*photo* : CHRISTOPHE LAMBIEL).



Figure 4.47 – Succession de dépressions fermées traduisant des sorties d'air chaud (emplacement sur figure 4.5, étoile $n^{\circ}2$; 09.02.05) (*photo* : CHRISTOPHE LAMBIEL).



4.3.5 Des fenêtres de fonte précoces

Figure 4.48 – Evolution des fenêtres de fonte sur le voile d'éboulis du Bois des Arlettes : A) De nombreuses fenêtres de fonte précoces sont visibles à la fin de l'hiver (02.04.05); B) A la fin mai, les parties hautes du voile d'éboulis sont entièrement déneigées en raison du réchauffement de la température de l'air et d'une accumulation plus faible de neige durant l'hiver. De la neige se maintient au pied des parois et dans la partie basse des éboulis (22.05.05).

Diverses fenêtres de fonte printanières ont été détectées sur l'ensemble du voile d'éboulis du Bois des Arlettes le 2 avril 2005 (figure 4.48-A). Elles correspondent relativement bien aux secteurs observés durant l'automne, traduisant ainsi des sorties d'air chaud préférentielles. Des départs de petites avalanches pourraient également accentuer la surface de ces secteurs déneigés. La plus grande différence avec les fenêtres de fonte automnales concerne les couloirs à granulométrie plus grossière située en bordure du cône d'éboulis. Beaucoup de neige peut s'y accumuler (vent, avalanches (flèches noires sur figure 4.49)) et donc subsister plus longtemps au printemps.



Figure 4.49 – Fenêtres de fonte précoces et dépôts de coulées de neige sur le cône d'éboulis étudié du Bois des Arlettes (02.04.05).

Les fenêtres de fonte précoces sont ensuite agrandies par le rayonnement solaire. Le bas de l'éboulis reste enneigé plus longtemps en raison des dépôts de coulées d'avalanche protégeant le sol du rayonnement. Le sur-refroidissement du bas de l'éboulis durant l'hiver pourrait également contribuer à la conservation de la neige.

4.3.6 Anomalies thermiques de l'éboulis et du glacier rocheux fossile

Afin de disposer de mesures thermiques continues, sept Miniature Data Loggers (UTLs) ont été placées dans divers trous souffleurs (et/ou aspirateurs) en septembre 2004 au Bois des Arlettes (emplacement sur figures 4.41 et 4.54). L'UTL Arl-T01 placé le 4 décembre 2004 dans la partie médiane de l'éboulis a malheureusement arrêté de fonctionner le 24 décembre 2004 (cf. 4.3.6.2). Le capteur Arl-T02 se situe au fond d'un dépression à la limite entre l'éboulis et le glacier rocheux fossile (« doline souffleuse »), Arl-T03 sur une crête, Arl-T04 dans une zone de végétation azonale aux racines du glacier rocheux fossile, Arl-T05 dans la partie frontale du glacier rocheux fossile, Arl-T90 au bas d'un éboulis végétalisé. Le thermistor de l'UTL Arl-T02 n'est pas enfoui dans la terre, mais placé dans le canal d'aération afin de mesurer l'évolution du courant d'air. Le capteur Arl-Tair a été installé à 2 mètres de hauteur sur le côté nord d'un mélèze pour enregistrer la température de l'air.



Figure 4.50 – Evolution de la température du sol et de l'air au Bois des Arlettes du 1^{er} octobre 2004 au 30 septembre 2005. L'échelle des températures est différente pour la température de l'air atmosphérique et du sol. Les courbes ont été réalisées avec les moyennes journalières. Emplacement des UTLs sur les figures 4.41 et 4.54. Explications dans le texte.

UTLs	oct.04	nov.04	déc.04	janv.05	févr.05	mars.05	avr.05	mai.05	juin.05	juil.05	août.05	sept.05	Moyenne
air	6.98	-0.58	-1.53	-3.85	-7.85	-0.26	2.76	7.31	12.10	12.05	10.04	9.40	3.96
T02	1.82	-4.52	-6.46	-5.50	-6.21	-3.17	-0.06	-0.03	2.09	3.77	3.76	3.04	-0.92
Т03	5.56	0.35	-1.01	-1.24	-2.42	-1.80	0.00	0.36	5.15	8.47	8.62	8.11	2.54
T04	2.04	-4.03	-4.32	-4.73	-3.38	-2.70	-0.10	-0.04	0.23	1.66	2.78	2.23	-0.85
T05	3.53	-1.76	-1.64	-1.58	-2.83	-1.86	0.00	0.00	0.20	3.61	5.12	5.05	0.68
Т90	2.36	-3.18	-4.14	-6.01	-8.09	-2.12	0.00	0.00	0.20	1.52	1.72	1.62	-1.30

UTLO	Anomalie	Min ¹	Mov ¹	Amplitudo ¹	Nbr. de	CEI	Pér	WEOT			
UILS	thermique	IVIIII	wax	Amplitude	jours gelés	GFI	Début	Fin	Durée	"LQI	
544	-	-20.72	26.86	47.58	-	-613.33	-	-	-	-	
T02	-4.88	-10.92	5.96	16.88	211	-785.33	22.03.05	04.06.05	74	?	
Т03	-1.41	-4.44	12.65	17.09	195	-212.93	23.03.05	20.05.05	58	?	
T04	-4.80	-12.91	5.09	18.00	203	-593.78	28.03.05	10.06.05	74	?	
Т05	-3.28	-10.27	7.30	17.57	224	-310.96	21.03.05	16.06.05	87	?	
Т90	-5.26	-10.95	3.60	14.55	232	-717.76	29.03.05	22.06.05	85	-2.45 ?	

Tableau 4.5 – Températures mensuelles et indices thermiques pour les UTLs du Bois des Arlettes du 1^{er} octobre au 30 septembre 2005. ¹ Les températures minimales et maximales ont été déterminées à l'aide des valeurs horaires, les autres valeurs du tableau ont été déterminées sur la base des valeurs journalières moyennes.

L'analyse des enregistrements continus de la température permet de relever différentes particularités d'une formation poreuse ventilée à moyenne altitude (figure 4.50 et tableau 4.5) :

- Une anomalie thermique négative affecte les parties basses de l'éboulis et le glacier rocheux fossile. A tous les emplacements de mesure, le sol est resté gelé entre 195 et 232 jours entre le 1^{er} octobre 2004 et le 30 septembre 2005 (ie. 53-63 % de l'année). La MAGST de Arl-T02, Arl-T04 et Arl-T90 est inférieure à 0°C, et 4,8 à 5,3°C inférieure à MAAT. Le capteur Arl-T05, placé au front du glacier rocheux fossile, indique une MAGST de 0.68 inférieure de 3,3°C à MAAT.
- Octobre 2004 se caractérise par des variations synchrones de la température de l'air extérieur et des capteurs dans le sol. Le gel du terrain intervient dès le début du mois de novembre suite à la baisse de la température de l'air sous le point de congélation. L'intensité du refroidissement atteint les -10°C à l'exception d'Arl-T03 (-3.5°C).
- Dès le 23 novembre, la présence d'un manteau neigeux peu épais (env. 20 cm) va atténuer les variations des températures du sol. Un aperçu du comportement thermique complexe des capteurs entre le 4 et le 24 décembre est présenté plus loin.
- Durant l'hiver, la température du sol suit alors les variations de la température de l'air extérieur. Un refroidissement implique une augmentation de l'aspiration d'air froid (*flèches noires*), des périodes de redoux se traduisent par un faible réchauffement de la température du sol (*cercles noirs*). L'épaississement du manteau neigeux va atténuer les fluctuations thermiques à court terme.
- Il semble exister un certain **décalage temporel** entre un pic de froid de l'air extérieur et son effet sur les capteurs au sol. La vague de froid de fin janvier n'atteint en effet le sol qu'en début février. Arl-T90 connaît alors un refroidissement spectaculaire à -10.95°C ! Ce décalage pourrait s'expliquer par le temps de transfert de chaleur à travers un épais manteau neigeux.
- La période de **zéro curtain** consécutive à la fonte des neiges et de la glace commence après la mi-mars et se prolonge jusqu'à la mi-juin. Arl-T03 est en revanche déjà dégelé le 20 mai.
- Les conditions estivales se traduisent par la persistance de conditions fraîches aux emplacements de capteurs en raison de la décharge gravitaire d'air froid. Les mois de juillet et d'août se caractérisent donc par des variations inverses entre la température de l'air et les températures du sol (*flèches rouges et bleues*). L'augmentation de la vitesse du courant d'air consécutive à l'accroissement du gradient de température entraîne un refroidissement marqué de Arl-T02, Arl-T04, Arl-T05 et Arl-T90 (*flèches bleues*).
- Durant l'été, le capteur Arl-T03 se comporte en revanche de façon synchrone au regard des variations de la température de l'air. L'absence d'une décharge gravitaire ne le concerne pas durant la période estivale en raison de sa position élevée quelques mètres en aval d'une crête longitudinale du glacier rocheux fossile. L'emplacement de ce capteur peut être associé à une entrée intermédiaire du système soumise à une certaine aspiration hivernale d'air froid et peu concernée par l'écoulement gravitaire estivale, ce qui correspond au comportement thermique de type II de DELALOYE (2004).

4.3.6.1 Variations thermiques en automne (septembre)

La période automnale se caractérise par un comportement thermique complexe dans les parties basses de l'éboulis, puisqu'il s'agit d'une période de transition entre le régime estival (décharge gravitaire d'air froid) et le régime hivernal (aspiration d'air extérieur froid). Une analyse détaillée des données horaires enregistrées par l'UTL Arl-T02 pour la période s'étalant entre le 10 et le 25 septembre 2005 est illustrée par la figure 4.51.



Figure 4.51 – Evolution de la température de l'air dans la « doline souffleuse » (UTL Arl-T02) et de l'air atmosphérique au Bois des Arlettes du 10 au 26 septembre 2005. Les courbes ont été réalisées avec les données horaires.

Durant le mois de septembre, la température dans le canal d'aération oscille autour de 3°C, avec parfois des pics de refroidissement de quelques degrés. Lorsque la température de l'air extérieur descend sous un seuil de 6-7°C environ, Arl-T02 connaît d'abord un léger réchauffement suivi d'une baisse plus ou moins rapide de la température. Lorsque la température de l'air extérieur remonte au dessus de ce seuil, Arl-T02 retourne à un comportement thermique relativement plus régulier et inverse, traduisant la décharge gravitaire de l'air contenu à l'intérieur de l'éboulis. Cette valeur de 6-7°C correspond aux valeurs déterminées pour la période automnale par DELALOYE (2004) pour le Creux-du-Van.

Le passage d'un régime de soufflage à un régime d'aspiration semble ainsi se produire fréquemment durant l'automne et dans un laps de temps relativement court en fonction de l'évolution de la température de l'air extérieur. Par exemple le 11 septembre 2005, le courant d'air est descendant. Durant la nuit du 12 septembre, il devient ascendant, puis redevient descendant en milieu de journée avant de retourner à un régime d'aspiration en soirée. La détermination de ce seuil d'inversion n'est cependant pas aisée en l'absence de mesures de la direction et de la vitesse du courant d'air.

4.3.6.2 Variations thermiques du début de l'hiver

La période du début de l'hiver avant la présence d'un épais manteau neigeux se caractérise par un comportement thermique complexe de l'éboulis. Les capteurs Arl-T01 (placé en bordure du milieu de l'éboulis dans une fenêtre de fonte automnale (cf. figure 4.44)), Arl-T02 et Arl-T05 forment un profil amont-aval recoupant l'éboulis et le glacier rocheux fossile. Une analyse détaillée des données horaires pour la période s'étalant entre le 5 et le 24 décembre 2004 est illustrée par la figure 4.52.



Figure 4.52 – Evolution de la température du sol et l'air atmosphérique au Bois des Arlettes du 5 au 24 décembre 2004. L'échelle des températures est différente pour la température du sol et de l'air. Les courbes ont été réalisées avec les données horaires. Emplacement des UTLs sur la figure 4.14.

Le comportement du capteur Arl-T01 est extrêmement intéressant. En effet, du 4 au 16 décembre, un refroidissement du terrain a lieu. Les températures du sol oscillent fortement entre 0 et -5°C. Durant cette période, l'emplacement du capteur Arl-T01 ne se trouve pas sous la neige et le système de ventilation est probablement encore en régime estival, l'air extérieur étant plus chaud (entre 0 et 8°C) que l'air interne. La faible variabilité des courbes de température d'Arl-T02 et Arl-T05 traduit en revanche la présence d'une couche de neige (cf. figure 4.44).

Dès le 17 décembre, suite à des précipitations neigeuses et une chute des températures extérieures sous le 0°C, la température d'Arl-T01 devient immédiatement positive et beaucoup plus stable (env. +1.4°C) reflétant les conditions internes de l'éboulis. De l'air chaud est expulsé et le système de ventilation fonctionne alors en mode hivernal. La relation entre la température d'Arl-T01 et la température de l'air extérieur devient inverse.

Une baisse de la température de l'air (-12°C le 22 décembre) entraîne un léger réchauffement d'arl-903 et un refroidissement d'Arl-T02 et Arl-T05 (*flèche noire*). La faible réaction thermique positive d'Arl-T01 pourrait indiquer la présence d'un souffle diffus (l'UTL est placé dans une zone avec une faible granulométrie).

4.3.7 Propriétés électriques

4 sondages verticaux et 143 points de traînés ont été effectués. Les données des sondages Arl-01 (bas de l'éboulis) et Arl-02 (racine du glacier rocheux fossile) ont été acquises le 28 mai 2005. Le sondage situé en bas de l'éboulis (arl-01) a été répété le 2 octobre 2005. Les autres mesures ont été réalisées entre le 11 et le 13 juillet 2005. Arl-03 se situe au milieu de l'éboulis, Arl-04 sur une crête dans la partie frontale du glacier rocheux fossile (situation sur figure 4.55). La valeur du substratum oscille entre 1 et 3 k Ω m.

4.3.7.1 Sondages verticaux

Les sondages Arl-01 et Arl-03 réalisés perpendiculairement à l'éboulis présentent des courbes en forme de cloche. La première mesure (OA = 1) n'a pu être effectuée le 28 mai 2005 en raison d'une



résistance trop élevée. De la glace visible occupait les interstices entre les blocs de surface. D'importantes plaques de neige, gelées à leur base, recouvraient encore certaines parties de l'éboulis.

Figure 4.53 – Sondages effectués dans l'éboulis du Bois des Arlettes. Situation sur figure 4.15.

Le sondage Arl-01 (figure 4.53) se situe une dizaine de mètres en aval de la zone de refroidissement hivernal maximal détectée par les BTS. La porosité de surface est importante avec des blocs de taille décimétrique à métrique. Les branches NE et SW d'Arl-01 indiquent la présence d'une couche de blocs grossiers en surface sur environ 2 mètres, suivie d'une mince couche moins résistante, puis d'un niveau très résistant (entre 100 k Ω m pour la branche SW et 200 k Ω m pour la branche NE) vers 3 mètres de profondeur d'une épaisseur de 5 (SW) à voire plus de 10 (NE) mètres. Le rapport avec la résistivité de la roche est très élevé, 50 :1 (environ 150 :3). Le sondage ayant été effectué le 28 mai, il est possible que d'importantes quantités de glace se trouvent dans le sous-sol. Les mesures ont été répétées le 2 octobre 2005 afin de détecter d'éventuelles modifications causées par l'évolution d'une masse de glace. Les résistivités apparentes mesurées sont beaucoup plus faibles dans les premiers mètres (environ 15 k Ω m pour la première mesure en octobre... et trop élevées pour être mesurées en mai). Une baisse notoire des résistivités apparentes (d'environ 20 k Ω m) et spécifiques s'observe également pour la deuxième et la troisième couche du sous-sol.

Le sondage Arl-03 (figure 4.53) est localisé dans la partie médiane du cône d'éboulis dans la zone de transition des BTS froides vers des BTS « chaudes ». La porosité de surface (~ 5-10 cm) est nettement inférieure à celle d'Arl-01. L'épaisseur de sédiments est probablement maximale à cet endroit (environ 20 mètres). Un niveau un peu plus résistant (30-40 k Ω m) se situe à environ 12 mètres de profondeur et pourrait correspondre à une augmentation de la porosité avec la présence possible de glace interstitielle. Le rapport avec la roche est de 12 :1 (environ 36 :3).



Figure 4.54 – Sondages effectués dans le glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes. Situation sur figure 4.15.

Le glacier rocheux fossile est recouvert d'un sol très peu épais (~50 cm) expliquant les faibles résistivités de surface. En dessous, un niveau très résistant (environ 110 k Ω m pour Arl-02) pourrait indiquer la présence d'une couche de blocs grossiers poreux (figure 4.54). Une troisième couche dont l'épaisseur décroît entre Arl-02 (10-15 mètres) et Arl-04 (8-12 mètres) présente des résistivités spécifiques de 10 à 25 k Ω m. La forme en cloche de la courbe traduit probablement la structure poreuse du glacier rocheux fossile. La présence de sédiments gelés ne peut cependant être exclue.

4.3.7.2 Lignes de traînés

143 points de traînés ont été mesurés au Bois des Arlettes avec la configuration de Wenner. La profondeur d'investigation estimée est de 7 à 11 mètres (a = 15m). Deux lignes de traînés recoupent longitudinalement le complexe éboulis – glacier rocheux fossile. Neuf lignes de mesures perpendiculaires complémentaires permettent d'illustrer les variations latérales des résistivités apparentes du sous-sol (figure 4.55).

La cartographie du sous-sol du Bois des Arlettes amène plusieurs conclusions :

- La structure granoclassée de l'éboulis apparaît assez clairement avec des faibles résistivités apparentes à l'amont (> $3.5 \text{ k}\Omega\text{m}$), augmentant lorsque l'on se déplace vers l'aval (jusqu'à 100 k Ωm). Environ 40 mètres en amont du sondage Arl-03, deux valeurs inférieures 2 k Ωm sont probablement dues à une erreur de mesure (figure 4.56).
- Les résistivités apparentes du secteur de refroidissement hivernal maximal sont comprises entre 25 et 40 k Ω m. Une zone avec de plus grande résistivité (40 – 100 k Ω m) est située une vingtaine de mètres en aval et se prolonge dans le petit vallon en direction de l'UTL Arl-T02. La courbe des résistivités apparentes forme un « dôme » dans la partie basse de l'éboulis.
- La transition entre le bas de l'éboulis et le glacier rocheux fossile se voit de façon relativement nette. Les résistivités apparentes décroissent en effet rapidement pour atteindre des valeurs inférieures à 25 kΩm.
- La structure électrique du glacier rocheux fossile se caractérise par une décroissance des valeurs de résistivités apparentes des racines (~15 k Ω m) vers le front (~3 k Ω m).



Figure 4.55 - Lignes de traînés et mesures de températures des sorties d'air froid [°C] au Bois des Arlettes. La profondeur d'investigation est de 7-11 mètres (a = 15m). Les températures aux sorties d'air froid ont été mesurées (à l'aide d'un thermomètre de poche) entre 11h00 et 12h15.



Figure 4.56 – Variations des résistivités apparentes du sous-sol pour le profil longitudinal passant par l'UTL Arl-T02 et par le sondage Arl-04. Les deux valeurs inférieures 2 k Ω m à l'amont du profil sont probablement dues à une erreur de mesure. La courbe forme un « dôme » dans la partie basse de l'éboulis, correspondant vraisemblablement à un secteur de blocs grossiers avec la présence de sédiments gelés. La profondeur d'investigation est de 7-11 mètres (a = 15m).

4.3.8 Des groupements végétaux particuliers

L'absence de larges zones d'arbres nains nous a incité à réaliser quatre relevés végétaux en compagnie du Dr. CLAUDE BÉGUIN le 9 juillet 2005. Les résultats détaillés se trouvent en annexe (annexe 5). L'analyse détaillée de la végétation a montré une présence d'association rencontrée également à plus haute altitude.

- Relevé n°1 : L'association à Salicetum Retuso-Reticulatae est caractéristique des combes à neige sur gros blocs calcaires. De nombreuses plantes présentes sont courantes dans le milieu alpin. La présence dans la strate herbacée du cresson des chamois (*Pritzelago alpina*) et de la dryade à 8 pétales (*Dryas octopetalia*) indique un milieu froid, celle de la grassette des Alpes (*Pinguicula alpina*) indique un milieu plus humide que la normale. Ce relevé se situe à l'emplacement de l'UTL Arl-T02 (figure 4.57).
- Relevé n°2 : L'association « Rhodoendro-Vaccinetum »³ indique un milieu moins froid que l'emplacement du premier relevé. Les meilleures espèces de la station précédente ont disparu ou se sont raréfiées (*Salix reticulata, Pinguicula alpina, Pritzelago alpina, Dryas octopetalia, Ranunculus alpestris*). Ce secteur se caractérise par l'apparition d'espèces pionnières de la pessière⁴ et une dominance des plantes de landes à éricacées⁵. Ce relevé se situe à l'emplacement de l'UTL Arl-T04 (figure 4.58).
- Relevé n°3 : L'association à Rhododendro-Vaccinetum Juniperetosum se trouve au-dessus du relevé n°1 à la limite de la forêt. La strate arbustive est composée à 50% de genévriers nains (*Juniperus nana*). Ce association est caractéristique d'un milieu plus chaud que l'emplacement des deux premiers relevés, avec une tendance vers la pessière. Ce relevé se situe à l'emplacement de l'UTL Arl-T03.
- *Relevé* n°4 : La forêt ouverte est composée d'un mélange de deux associations. La première est située directement en aval des éboulis et comprend des mélèzes (héliophiles) et des rhododendrons (ass. Rhododendro-Laricetum). Le deuxième ensemble (alliance Vaccinio-Piceion) est une pessière à myrtilles. Des peuplements de bouleaux (héliophiles) indiquent que cette forêt est encore à un stade pionner.



Figure 4.57 – Rupture nette entre l'association arbustive à genévriers nains (relevé n°3) et l'association à Salicetum Retuso-Reticulatae, représentative d'un milieu plus froid et humide (relevé n°1) (29.06.04).



Figure 4.58 – Lande à éricacées (relevé n°2) ceinturée par la forêt de mélèzes et d'épicéas (relevé n°4). De nombreuses sorties d'air froid ont été détectées dans ce secteur (09.07.05).

³ Mise entre guillemets car cette association n'est pas un bon Rhodo-Vaccinetum.

⁴ Pessière : peuplement d'épicéas (*Picea abies*).

⁵ Ericacée : plante gamopétale arbustive, telle la bruyère, l'arbousier, la myrtille, le rhododendron.

Des arbres nains (mélèzes) clairsemés ont uniquement été découverts au pied de l'éboulis végétalisé localisé au nord-est de la zone principale d'investigation (emplacement sur la figure 4.1). L'UTL Arl-T90 y a enregistré la MAGST la plus basse du Bois des Arlettes (- 1.30° C). Différents trous souffleurs d'air froid parsèment ce secteur (figure 4.59). Malgré une nuit pluvieuse et d'un ciel couvert (température extérieure : 11.3° C) le jour des observations (30.08.04), la température du souffle d'air reste relativement froide (< 5.3° C).

Figure 4.59 – Mélèzes nains en pied de pente de l'éboulis végétalisé de l'UTL Arl-T90. De nombreuses sorties d'air froid y ont été découvertes (Bois des Arlettes, 30.08.04, température extérieure à $10h25 : 11.3^{\circ}C$).



4.3.9 Interprétation

Le regroupement et la comparaison des informations acquises par les diverses méthodes sur le site du Bois des Arlettes nous permettent d'amener de nombreux éléments à la compréhension des systèmes de ventilation :

- Inter-connection entre l'éboulis et le glacier rocheux fossile :

Le regroupement de diverses mesures réalisées montre une **inter-connection du système de ventilation entre l'éboulis et le glacier rocheux fossile**. Le froid emmagasiné durant l'hiver principalement dans la partie basse de l'éboulis (carte « BTS ») est transmis au courant d'air qui s'écoule durant la période estivale jusqu'au front du glacier rocheux fossile (UTL Arl-T05).

- Anomalies thermiques et présence de glace de regel en surface :

L'anomalie thermique négative annuelle de -3.2 à -5.3°C mesurée dans des conduits est consécutive à l'aspiration d'air extérieur froid hivernal, même au travers d'un épais manteau neigeux. Le refroidissement du terrain semble concerner non seulement la partie basse de l'éboulis (carte BTS), mais également l'ensemble du glacier rocheux fossile, comme le montrent les nombreuses sorties d'air froid et la glace de regel découvertes durant la saison estivale.

- Gel et dégel en profondeur ? :

Les valeurs élevées de résistivité apparente ((la résistivité spécifique pouvant être 2 à 10 plus grande) et spécifique (sondage Arl-01) présentes dans la partie basse du cône d'éboulis (« dôme » sur figure 4.56) par rapport aux faibles valeurs mesurées dans la partie haute de l'éboulis pourraient vraisemblablement indiquer un secteur de blocs grossiers dans lequel de grandes quantités d'air peuvent transiter et refroidir le terrain (blocs et substrat). Des sédiments gelés sont également possibles entre 4-12 mètres de profondeur. La présence de matériaux poreux et de sédiments gelés peut également être supposer pour le glacier rocheux fossile (sondages Arl-02 et Arl-04).

La baisse notoire des résistivités apparentes et spécifiques (de 15 k Ω m pour la 3^{ème} couche) dans le sondage Arl-01 entre le mois de mai et le mois d'octobre peut être causée par une **diminution de la glace interstitielle souterraine ou par une augmentation de la température hypogée** (l'UTL Arl-T02 indique 0°C en mai et ~ +2°C début octobre). Le dégel semble particulièrement important proche de la surface où la diminution de la résistance est la plus importante. Le terrain était en effet encore gelé le 28 mai 2005 (présence de glace interstitielle et de températures du sol de 0°C).

- Végétation azonale :

L'étude détaillée de la végétation montre clairement la présence de groupements végétaux particuliers avec des caractéristiques de milieux froids à l'intérieur de la forêt ouverte recouvrant le glacier rocheux fossile. Les relevés végétaux semblent indiquer que le secteur du relevé n°1 est soumis à un plus fort refroidissement que la lande à éricacées du relevé n°2, ce que confirme l'analyse de l'enregistrement continu de la température du sol. La présence d'anomalies thermiques froides dans les racines du glacier rocheux fossiles consécutives au système de ventilation influencent donc d'une façon certaine le développement de la végétation. Cependant d'autres facteurs (épaisseur du sol, présence de blocs en surface...) pourraient également avoir une certaine influence.

- *Réversibilité du courant d'air* :

Des observations visuelles (figure 4.44) et thermiques (UTL Arl-T01 et T02 notamment) ont apportées de nombreuses preuves d'une réversibilité rapide (mais encore mal comprise) du système de ventilation durant l'automne et le début de l'hiver. Le système de ventilation semble ainsi passer par plusieurs soubresauts en fonction de l'évolution de la température extérieure du régime estival au régime hivernal.

Aucun indice évident du renversement du système de ventilation au printemps n'a en revanche été découvert. En raison du refroidissement du terrain durant l'hiver, le seuil de réversibilité printanière doit également être inférieur à celui de l'automne. La répétition du sondage Arl-01 et les mesures thermiques de surface semblent en effet montrer que l'intérieur de l'éboulis se réchauffe entre le printemps et l'automne.

- Mini-systèmes de ventilation sur les rides du glacier rocheux fossile ? :

L'observation d'un trou ouvert dans la neige laissant apparaître de la végétation mouillée et de petits cristaux de givre au début de l'hiver (figure 4.44) nous fait penser à l'occurrence possible d'un mini-système de ventilation sur certaines rides du glacier rocheux fossile. Cependant, aucune autre observation ou mesure thermique ne peuvent venir attester cette hypothèse. Une étude complémentaire serait donc nécessaire.

4.4 Gourd de la Plâne (Réserve naturelle de la Pierreuse, VD)

Située au sud de la station de Château-d'Oex, la réserve naturelle ProNatura de la Pierreuse représente le plus grand espace protégé de Suisse occidentale⁶. Ce paysage d'intérêt national abrite de nombreux biotopes caractéristiques du milieu préalpin. Dominé au sud par les parois abruptes de la Gummfluh (2'458 m), du Biolet (2'293 m) et des Salaires (2'171 m), le cirque rocheux de la Pierreuse couvre une surface d'environ 3-4 km². Plusieurs importants éboulis calcaires se sont développés au pied de ces reliefs (figure 4.60). Les recherches se sont concentrées sur le complexe éboulis – glacier rocheux fossile du « Gourd de la Plâne » (1'500 et 1'800 m.s.m.) entre septembre 2004 et octobre 2005. De nombreux indices de fonctionnement d'une circulation d'air y ont été observés.

⁶ Une autorisation est nécessaire pour circuler dans la Réserve. Elle est délivrée par le Service de l'Environnement du Canton de Vaud. Elle ne nous est cependant jamais parvenue...



Figure 4.60 – Localisation de la Réserve de la Pierreuse (VD). Cercle noir continu : secteur « Gourd de la Plâne », cercles noirs discontinus : secteur « Coumatta » et « la Pierreuse ». Carte n°1265 – Les Mosses. (*source* : swisstopo).

4.4.1 Cadre géologique et géomorphologique

La chaîne de la Gummfluh est une écaille tectonique de la partie interne rigide de la nappe des Préalpes médianes. Le plongement axial des couches est d'environ 30° à 70° en direction du nordouest. Le massif est principalement composé de calcaires jurassiques massifs du Malm (Séquanien – Portlandien) recouvrant les calcaires rubannés et variés du Trias. Une couche à Mytilus du Malm inférieur est pincée entre ces deux ensembles géologiques. A proximité de la gouille du Gourd de la Plâne, de la Cornieule du Trias, des brèches dolomitiques et des calcaires variés du Trias apparaissent à l'affleurement (annexe 3) et pourraient donc composer le soubassement du complexe éboulis – glacier rocheux fossile.

Au Gourd de la Plâne, une importante accumulation quaternaire recouverte d'une forêt assez dense s'étale au pied d'un imposant cône d'éboulis. Entourée de deux moraines latérales, cette formation a été désignée par SCHOENEICH (1992) comme un glacier rocheux fossile, dont la formation à partir d'un glacier couvert n'est pas à exclure. Le centre présente en effet « *un microrelief peu marqué, mais néanmoins visible, de crêtes et sillons longitudinaux, puis obliques par rapport aux moraines, enfin des bosses et des dépressions vers le front* » dont la pente extérieure est très raide.

Des zones de blocs éboulés (de plusieurs mètres de diamètre et probablement d'âge tardiglaciaire) se trouvent en bordure extérieure de cette formation relique (figure 4.61). Une partie de la paroi nord des Salaires s'est effondrée le 26 mai 2005 recouvrant la partie ouest du cône d'éboulis (figures 4.62 et 4.63). Les investigations thermiques et géophysiques se sont surtout concentrées dans la zone est du site (cercle discontinu sur la figure 4.63) et ont révélé une imbrication complexe de systèmes de ventilation. La zone d'éboulement à l'est du site semble ancienne (tardiglaciaire ?), puisque du sol, de la mousse et des arbres recouvrent les blocs.

A l'emplacement actuel du petit éboulis (figure 4.63), un petit glacier ou un névé permanent pourrait avoir occupé le secteur en amont du petit vallon lors de la dernière glaciation. La dépression laissée lors de la fonte de la glace aurait ainsi été en partie remplie par le petit éboulis à la fin du tardiglaciaire et durant l'Holocène.

SCHOENEICH (1992) a également identifié un petit lobe au pied de l'éboulis de « la Pierreuse », ainsi qu'une forme de transition entre le protalus rempart et le glacier rocheux lobé au nord-est des éboulis de la Coumatta (figure 4.60). Ces deux secteurs n'ont pas fait l'objet d'une recherche approfondie dans le cadre de ce travail.



Figure 4.61 – Bloc éboulé de 3 mètres de haut. Le sac à dos $(\sim 50 \text{ cm})$ donne l'échelle.



Figure 4.62 – Le cône du Gourd de la Plâne. La zone d'arrachement et de dépôt de l'éboulement du 27 mai 2005 est indiquée en rouge.

Au Gourd de la Plâne, un petit lac permanent se situe au front du glacier rocheux (1'504 m.s.m.). Des mesures de températures à l'aide d'un thermomètre de poche indiquent des valeurs inférieures à 3°C en été. Le glacier rocheux fossile pourrait certainement faire office de réservoir des eaux de fonte et de pluie. Une tentative de vidange total de ce petit étang a d'ailleurs échoué (EXPLOITANT DU GOURD DE LA PLÂNE, COMM. PERS.).



Figure 4.63 – Carte géomorphologique du secteur du Gourd de la Plâne (modifiée d'après SCHOENEICH 1992). Le glacier rocheux fossile en spatule est entouré de deux moraines latérales sur lesquelles viennent buter des blocs éboulés. L'ellipse discontinue localise la zone d'investigation principale. Fond topographique au 1 :10'000.

4.4.2 Indices thermiques

Plusieurs indices de fonctionnement d'un système de ventilation ont été relevés. Durant l'été, de la glace été présente dans la partie basse du grand et du petit éboulis, au front du glacier rocheux fossile ainsi que dans la zone de blocs éboulés située à l'est (figure 4.64). De nombreux trous souffleurs d'air froid ont été détectés dans la zone d'arbres nains de l'éboulement (cf. figure 4.71), ainsi qu'au front du glacier rocheux fossile juste en amont du petit lac.



Figure 4.64 – Glace estivale et souffle d'air froid dans la zone d'éboulement avec des arbres nains (photos à gauche et au centre) et au front du glacier rocheux fossile (photo à droite) (27.05.05).

3 UTLs ont enregistré la température du sol entre septembre 2004 et octobre 2005 au Gourd de la Plâne (emplacement sur figure 4.71). L'UTL Pier-T10 se trouve au front du glacier rocheux fossile environ 5 mètres plus haut que le petit lac, l'UTL Pier-T20 dans un trou proche du sommet de la moraine et l'UTL Pier-T30 dans la zone a priori froide de l'éboulement (arbres nains, glace, souffle d'air froid). La température de l'air a été dérivée des valeurs du Bois des Arlettes (1'750 m.s.m.) en utilisant le gradient de 0.58°C/100m (altitude moyenne de la Pierreuse : 1'550 m.s.m.). Des mesures BTS ont été effectuées le 11 février 2005.



Figure 4.65 – Evolution de la température du sol et de l'air au Gourd de la Plâne du 1^{er} octobre 2004 au 30 septembre 2005. Les différentes phases de comportement thermique sont indiquées au sommet de la figure. L'échelle des températures est différente pour la température de l'air atmosphérique et du sol. Les courbes ont été réalisées avec les moyennes journalières. Emplacement des UTLs sur la figure 4.71. Explications dans le texte.

UTLs	oct.04	nov.0	4 déc.	04 jan	v.05 févr.05	mars.05	avr.05	mai.05	juin.05	juil.05	août.05	sept.05	Moyenne	
Tair	8.14	0.58	-0.3	7 -2.	69 -6.69	0.90	3.92	8.47	13.26	13.21	11.20	10.56	5.12	
T10	5.77	1.13	-0.0	3 -0.	-0.21	-0.26	-0.05	0.62	6.12	8.57	8.70	8.18	3.23	
T20	7.97	3.57	2.0	8 1.	96 1.65	1.33	1.07	6.02	10.38	11.83	11.20	10.83	5.85	
T30	1.68	-1.37	-1.2	2 -1	22 -2.70	-2.63	0.00	0.00	0.21	0.64	1.01	1.22	-0.35	
	Anomalie		Anomalie		1	Nbr. de	Nbr. de			Période zéro curtain				
UTLs	therm	thermique Min ² N		Max	Amplitude	jours gelé	jours gelés GF1		Début	Début Fin Durée (jour)		e (jour)	WEQT	
Tair	-		-19.56	28.02	47.58	-	-50	02.87	-	-		-	-	
T10	-1.8	39	-1.22	10.04	11.26	131	-2	4.33	-	-		0	?	
T20	+0.	74	0.89	14.19	13.30	0	(0.00	23.04.05	24.05.0	5	31	?	
T30	-5.4	47	-7.77	3.83	11.60	211	-23	88.01	22.03.05	03.06.0	5	73	?	

Tableau 4.6 – Températures mensuelles et indices thermiques pour les UTLs du Gourd de la Plâne du 1^{er} octobre 2004 au 30 septembre 2005. ¹ Les températures minimales et maximales ont été déterminées à l'aide des valeurs horaires, les autres valeurs du tableau ont été déterminées sur la base des valeurs journalières moyennes.

L'analyse des enregistrements continus de la température permet de relever différentes particularités d'une formation poreuse ventilée à moyenne altitude (figure 4.65 et tableau 4.6) :

- La zone d'arbres nains de l'éboulement connaît un refroidissement important du sol (UTL Pier-T30). Sa température moyenne pour la période de mesure est de -0.35°C, environ 5.5°C inférieure à MAAT. Une ventilation a donc lieu à l'intérieur de cette formation de blocs éboulés poreux. Durant l'hiver, une aspiration d'air froid est illustrée par un comportement identique de la température du sol en fonction de la température de l'air extérieur avec un décalage de quelques jours (*flèches noires*). De juin à septembre, la décharge gravitaire d'air froid prend place, avec un comportement thermique inverse vis-à-vis de l'air extérieur (*flèches bleues et oranges*). Les températures mensuelles augmentent entre juin (+0.21°C) et septembre 2005 (+1.22°C).
- Le front du glacier rocheux fossile (UTL Pier-T10) présente un comportement hivernal identique à celui de l'UTL Pier-T30 avec une aspiration d'air froid lorsque la température extérieure baisse. Cependant, le phénomène reste très atténué : les deux pics de froids de fin janvier et fin février se traduise en effet par une baisse de 0.5°C (*flèches noires*). Le dégel se termine à fin mai et dès lors le comportement thermique ne semble pas indiquer de décharge gravitaire d'air froid (comportement synchrone avec la température de l'air extérieur). La position élevée du capteur (environ 5 mètres au-dessus du petit lac), la faible pente entre les racines et le front du glacier rocheux fossile, ainsi que le grand éloignement de l'éboulis peuvent expliquer cette absence.
- L'UTL Pier-T20 présente une température moyenne annuelle de 5.85°C, soit plus élevée de 0.74°C que MAAT (5.12°C). De mi-novembre à fin avril, la température décroît tranquillement de 2.5°C à 0.5°C sans jamais atteindre le point de congélation. Cette période doit probablement correspondre à la présence d'un manteau neigeux. Des fluctuations synchrones avec la température de l'air se retrouvent le reste de l'année.

4.4.2.1 Variations thermiques en automne (octobre-novembre)

La période automnale se caractérise par un comportement thermique complexe dans les parties basses de l'éboulis, puisqu'il s'agit d'une période de transition entre le régime estival (décharge gravitaire d'air froid) et le régime hivernal (aspiration d'air extérieur froid). Une analyse détaillée des données horaires enregistrées par l'UTL Arl-T30 pour la période s'étalant entre le 10 octobre et le 10 novembre 2004 est illustrée par la figure 4.66.



Figure 4.66 – Evolution de la température de l'air dans l'éboulement (UTL Pier-T30) et de l'air atmosphérique au Bois des Arlettes du 10 au 26 septembre 2005. Les courbes ont été réalisées avec les données horaires.

Lorsque la température de l'air extérieur descend sous un seuil d'environ 5-6°C environ, Pier-T30 connaît d'abord un léger réchauffement suivi d'une baisse plus ou moins rapide de la température. Lorsque la température de l'air extérieur remonte au dessus de ce seuil, Pier-T30 retourne à un comportement thermique relativement plus régulier et inverse, traduisant la décharge gravitaire de l'air contenu à l'intérieur de l'éboulis. Le passage d'un régime de soufflage à un régime d'aspiration semble ainsi se produire fréquemment durant l'automne en fonction de l'évolution de la température de l'air extérieur. Le 5 novembre Pier-T30 connaît un réchauffement d'environ 1°C suivi d'une baisse rapide de la température suivant l'évolution des conditions atmosphériques extérieures.

Cette valeur de 5-6°C est légèrement inférieure au seuil d'inversion du Bois des Arlettes (déterminé pour septembre-octobre). Cependant il faut se rappeler que d'une part le seuil déterminé à la Pierreuse concerne le mois d'octobre et novembre (1 mois plus tard qu'au Bois des Arlettes) et que d'autre part la température de l'air n'a pas été mesurée directement sur le site. Une erreur de +/- 1°C pourrait donc être envisagée.

4.4.3 Sur-refroidissement hivernal

Aucun UTL n'a été placé dans le grand éboulis du Gourd de la Plâne. Cependant, l'acquisition de 85 points de mesure BTS le 11 février 2005 nous permet d'illustrer l'occurrence d'un système de ventilation complexe. Le motif de répartition des températures est caractéristique d'un éboulis ventilé avec une zone sur-refroidie à l'aval (jusqu'à -10°C) et une zone d'expulsion d'air « chaud » à l'amont. Une fenêtre de fonte a d'ailleurs été observée (figure 4.67).

Cependant, le système semble bien plus complexe. En effet, une zone froide (-2 à -4°C) a également été détectée dans l'éboulement (UTL-894). Les valeurs BTS sur la moraine sont en revanche supérieures à 0°C avec un point de mesure supérieur à 2°C (flèche rouge sur figure 4.66) ! Ces valeurs se rapprochent de celles enregistrées par les UTLs Pier-T20 et Pier-T30 le 11 février 2005.





Figure 4.67 – Interpolation par krigeage simple de mesures BTS effectuées le 11 février 2005 dans la partie est du cône d'éboulis. Le motif de répartition des températures est caractéristique d'un éboulis ventilé (flèche noire). La présence de zones « chaudes » dans l'éboulement situé en aval indique la présence de plusieurs systèmes de ventilation (cercle vert) ou d'un grand système complexe interconnecté. Une unique zone de fenêtres de fonte ouvertes apparaît en bordure extérieure du cône (cercle rouge).

4.4.4 Des fenêtres de fonte précoces



Figure 4.68 – Fenêtres de fonte printanières précoces. A : éboulis de la Pierreuse. B : éboulis du Gourd de la Plâne. Explications dans le texte (02.04.05).

Diverses fenêtres de fonte printanières ont été détectées sur le cône d'éboulis du Gourd de la Plâne et sur l'éboulis de la Pierreuse le 2 avril 2005 (figure 4.68). Les secteurs de fonte précoce sont très allongés dans le sens de la pente et se situent principalement en bordure du cône, comme sur le site du Bois des Arlettes. La zone centrale de l'éboulis du Gourd de la Plâne est également dénudée, mais en raison probablement de petites coulées de neige (*flèche noire*). Des petites tâches sombres sur le bord ouest de l'éboulis (?) se situent sur la partie végétalisée à granulométrie fine de l'éboulis. Elles peuvent correspondre à de petits buissons ou peut-être à des sorties d'air « chaud » préférentielles.

4.4.5 Propriétés électriques

4 sondages verticaux et 94 points de traînés ont été effectués. Les données des sondages Pier-01 (bas de l'éboulis), Pier-02 (milieu de l'éboulis) et Pier-03 (glacier rocheux fossile) ont été acquises le 27 mai 2005, le sondage Pier-04 et le traîné dans l'éboulement le 28 mai 2005. Le sondage situé en bas de l'éboulis (Pier-01) a été répété le 6 octobre 2005 (situation sur figure 4.70). Les autres mesures ont été réalisées le 8 et le 23 juillet 2005. Le sondage Pier-05 a été effectué sur la moraine. La résistivité du substratum semble osciller entre 0.5 et 5 k Ω m.





Figure 4.69 - Sondages effectués dans l'éboulis du Gourd de la Plâne. Situation sur figure 4.71.

Le sondage Pier-01 (figure 4.69) se situe une dizaine de mètres en aval de la zone de refroidissement hivernal maximal détectée par les BTS. La porosité de surface est importante avec des blocs de taille décimétrique. Les branches E et W de Pier-01 indiquent la présence d'une couche de blocs grossiers en surface sur environ 2 mètres, puis d'un niveau résistant (environ 90 k Ω m pour la branche E et 35 k Ω m pour la branche W) vers 3 mètres de profondeur. L'épaisseur de la formation est d'environ 18 mètres. Les mesures ont été répétées le 2 octobre 2005 afin de détecter d'éventuelles modifications causées par l'évolution d'une masse de glace. Les résistivités apparentes dans la première couche ont augmenté entre mai et octobre, tandis qu'une baisse notoire des résistivités apparentes et spécifiques a été mesurée pour la deuxième et la troisième couche (de 30 k Ω m pour la 3^{ème} couche de la branche E).

Pier-02 (figure 4.69) est localisé dans la partie médiane supérieure du cône d'éboulis dans la zone de BTS « chaudes » (-0.5 à +0.5°C). La porosité de surface (~ 5-10 cm) est inférieure à celle de pier-01. L'épaisseur de sédiments atteint 22 mètres à cet endroit. A l'exception d'une mince strate à 1 mètre de profondeur, les résistivités spécifiques oscillent autour de 25 k Ω m. L'éboulis est poreux, mais ne semble pas contenir de glace interstitielle.



Figure 4.70 – Sondages effectués dans le glacier rocheux fossile (pier-03), l'éboulement (pier-04) et la moraine (pier-05) du Gourd de la Plâne. Situation sur figure 4.71.

Les trois sondages (Pier-03, Pier-04 et Pier-05) se caractérisent par une forme en cloche, caractéristique d'une formation sédimentaire à trois couches (figure 4.70). Le glacier rocheux fossile (Pier-03) est recouvert d'un sol très peu épais (~50 cm) expliquant les faibles résistivités de surface. En dessous, un niveau assez résistant (environ 25 k Ω m) de 5 à 10 mètres d'épaisseur est présent. Vers 9 mètres de profondeur, la décroissance des résistivités apparentes est brutale. Les sondages effectués dans la zone d'éboulement et sur le bord de la moraine indiquent sous une mince couche de sol (1 mètre) une couche sédimentaire épaisse d'environ 10 mètres avec une résistivité spécifique de 35-50 k Ω m.

4.4.5.2 Lignes de traînés

94 points de traînés ont été mesurés au Gourd de la Plâne avec la configuration de Wenner. La profondeur d'investigation estimée est de 7 à 11 mètres (a = 15m). Au total, 5 lignes de traînés recoupent l'éboulis, la moraine, l'éboulement et le glacier rocheux fossile (figure 4.71).

La cartographie du sous-sol du Gourd de la Plâne amène plusieurs conclusions :

- La structure granoclassée de l'éboulis apparaît assez clairement avec des faibles résistivités apparentes à l'amont (3.5 8 kΩm), augmentant lorsque l'on se déplace vers l'aval (jusqu'à 40 kΩm). Les résistivités apparentes augmentent également en direction du centre du cône d'éboulis.
- Les résistivités apparentes du secteur de refroidissement hivernal maximal sont comprises entre 15 et 40 kΩm. Elles correspondent aux zones de plus grande résistivité apparentes mesurées sur le site.
- Le petit éboulis situé en amont de la grande zone d'éboulement présente des résistivités apparentes comprises entre 8 et 15 k Ω m. Ces valeurs indiquent une granulométrie plus fine que sur le grand cône, confirmée par l'observation des blocs de surface.
- La masse éboulée connaît une décroissance des résistivités apparentes de l'amont (15 k Ω m) en direction de l'aval (< 3.5 k Ω m), traduisant une diminution de l'épaisseur de la formation. Cependant, jusqu'à 1'600 m.s.m, la structure semble suffisamment poreuse pour que de l'air puisse y circuler.
- La structure électrique de la partie frontale du glacier rocheux fossile à 7-11 mètres de profondeur se caractérise par des valeurs de résistivités apparentes comprises entre 3.5 et 15 k Ω m. Des valeurs plus faibles (< 3.5 k Ω m) sont mesurées à la limite et à l'extérieur du glacier rocheux fossile.



Figure 4.71 – Lignes de traînés à la Pierreuse. La profondeur d'investigation est de 7-11 mètres (a = 15m). Lors de la réalisation du traîné passant par le sondage Pier-04 (28.05.05), un profil de température du sol a également été réalisé avec un thermomètre de poche.

4.4.5 Interprétation

Le regroupement et la comparaison des informations acquises par les diverses méthodes sur le site du Gourd de la Plâne nous permettent d'amener de nombreux éléments à la compréhension des systèmes de ventilation :

- Inter-connection entre les différentes formations poreuses ? :

La partie basse du grand éboulis (carte BTS), le front du glacier rocheux fossile (Pier-T10) ainsi que la zone d'éboulement (Pier-T30 et carte BTS) sont affectés par le refroidissement hivernal. De la glace y était présente au début de l'été. Ainsi **le système de ventilation fonctionne dans toute formation poreuse** et une inter-connection entre les diverses formes géomorphologiques est possible. Trois hypothèses peuvent être proposées :

 Plusieurs systèmes de ventilation distincts se trouvent côte à côte : un système grand éboulis – glacier rocheux fossile, un système petit éboulis, un système moraine avec expulsion d'air chaud et un système éboulement. Dans ce cas, il faudrait cependant qu'une formation imperméable isole les systèmes. La granulométrie plus fine de la moraine est-elle cependant suffisante pour séparer le grand éboulis et l'éboulement ? Il est permis d'en douter puisque d'une part de l'expulsion d'air chaud s'y produit et d'autre part l'analyse granulométrique des gravières nous a montré que la circulation d'air peut avoir lieu à travers de petits éléments, mais de façon atténuée.

En revanche, le haut de l'éboulement et le petit éboulis semblent bien non-connectés au niveau de la circulation d'air (par de la roche en place ? du matériel fin ?). En effet le 28 mai 2005, de la glace était présente en bas du petit éboulis, alors que dans le haut de l'éboulement une température de 11°C a été mesurée.

- Il n'existe qu'un seul système de ventilation, dont les différentes formations géomorphologiques sont interconnectées. Les valeurs BTS mesurées entre le bas de l'éboulis et la zone froide de l'éboulement sont plus ou moins équivalentes (< -1.5°C) et situées à la même altitude (1'620 m.s.m). Ces deux secteurs pourraient former ainsi un continuum. La moraine représente en revanche un point surélevé et serait ainsi sujet à l'évacuation d'air chaud du système. Le substrat rocheux et les sols argileux alentours (pâturage) délimiteraient le système.
- Une combinaison de ces deux hypothèses est également envisageable. Les quatre systèmes de ventilation seraient ainsi partiellement indépendants, avec une interconnection limitée mais existante entre eux. Des recherches approfondies sont cependant nécessaires.

- Remplissage et vidange du réservoir de chaud et de froid :

Des sorties d'air chaud ont été détectées dans la partie haute de l'éboulis (BTS chaudes, fenêtres de fonte hivernales et printanières principalement en bordure du cône) et sur la crête morainique (BTS chaudes, températures hivernales toujours positives). De mi-novembre à fin avril, la décroissance régulière de la température de 2.5°C à 0.5°C mesurée par l'UTL Pier-T20 illustre la vidange du réservoir de chaud emmagasiné durant l'été.

Inversement, dans la zone sur-refroidie de l'éboulement (Pier-T30), l'augmentation des températures du sol de +1°C entre juin et septembre 2005 semble indiquer la vidange du réservoir de froid constitué durant l'hiver précédent (cf. carte BTS).

Ces deux processus contradictoires devraient avoir lieu dans des secteurs différents des formations poreuses : réservoir de froid dans la partie basse de l'éboulis et réservoir de chaud dans la partie haute ? La distribution et l'emplacement de ces secteurs en profondeur restent encore à déterminer.

- Gel et dégel en profondeur ? :

Les valeurs élevées de résistivité apparente et spécifique (entre 35 et 90 k Ω m) mesurées dans les sondages Pier-01 et Pier-03 et la forme en cloche de la courbe décrivent probablement la présence de niveau poreux avec la présence possible de sédiments gelés.

La comparaison des résultats du sondage Pier-01 entre mai et octobre est particulièrement intéressante. L'augmentation des valeurs de résistivité apparentes de la première couche du sol pourrait être la conséquence d'un assèchement du terrain proche de la surface. En mai en effet, la fonte de la neige aurait pu fortement humidifier le sol. En revanche, la légère diminution des valeurs de résistivités pour la troisième couche du sol (dès approximativement 3 mètres de profondeur) pourrait être causée par une diminution de la glace interstitielle souterraine ou par une augmentation de la température de l'air hypogé (vidange du réservoir de froid ?).

La structure poreuse du le glacier rocheux fossile et de l'éboulement permettent également le refroidissement du terrain par des mécanismes de ventilation. En raison des valeurs de résistivité mesurées relativement élevées et de l'observation de glace et de température froide en surface (Pier-T10 et Pier-T30), la présence de glace interstitielle en profondeur ne peut être exclue.

- Présence d'un aquifère ? :

Les eaux fraîches (< 3°C en été à la surface) et relativement stables (en température et en niveau d'eau) de la petite gouille située au front du glacier rocheux fossile nous interrogent. Le petit lac correspond-t-il au niveau de la nappe phréatique (ce qui expliquerait sa stabilité) ? Les pores du glacier rocheux fossile pourraient-ils faire office de réservoir des eaux de fonte et de pluie ? Le lac est-il alimenté par la fonte estivale de glace interstitielle du complexe éboulis –

glacier rocheux fossile ? La chute brutale et les faibles valeurs des résistivités apparentes (< 0.2 k Ω m) dans la couche la plus profonde du glacier rocheux fossile sont-elles causées par la présence d'une granulométrie plus fine, le substrat rocheux (cornieule ?) ou la présence d'eau souterraine (dont la résistivité spécifique est généralement < 0.1 k Ω m) ? Une analyse plus poussée, notamment l'utilisation de la sismique-réfraction et un suivi thermique de la température de la gouille, serait souhaitable.

4.5 Combe de Lavaux-Châtillon (VD)

La combe de Lavaux-Châtillon se situe à trois kilomètres au sud-est du Col des Mosses⁷. Un large voile d'éboulis d'orientation est, nord et ouest occupe les flancs des parois du Tarent (2'548 m) et de Châtillon (2'478 m) entre 1'900 et 2'400 m.s.m sur une surface de plus de 1 km² (figure 4.72). Ce site, le plus élevé de notre étude, se situe donc juste en dessous de la limite régionale du pergélisol discontinu (~2'300 m.s.m.).

Figure 4.72 – Localisation de la combe de Lavaux-Châtillon. A : voile d'éboulis est ; B : grand éboulis sud ; C : éboulis ouest. Carte n°1265 – Les Mosses. (*source* : swisstopo).

4.5.1 Cadre géologique et géomorphologique



La chaîne du Pic Chaussy fait partie de la Nappe du Niesen, composée « *d'un empilement d'écailles chevauchantes et de plis couchés déversés vers le NW, avec un fort pendage axial vers le NE* » (SCHOENEICH, 1998). Le massif Pic Chaussy – La Para est entrecoupé de plusieurs failles perpendiculaires, déterminant la présence de vallons sur son versant nord. Le pendage général présente une inclinaison d'environ 35°. Plusieurs charnières de plis sont présentes dans le massif (figure 4.73). Les roches sont composées principalement de flyschs à calcaires blancs, de calcschistes, de conglomérats moyens et intermédiaires du Crétacé (annexe 4). SCHOENEICH (1998) signale également la présence de grès grossiers, polygéniques et à forte concentration d'éléments cristallins. Ces bancs sont très résistants, permettant le maintien de hautes parois, mais parfois également très délités et instables, fournissant ainsi des éboulis abondants.

⁷ Elle est accessible en véhicule 4x4 jusqu'à la ferme de Lavaux (1'950 m.s.m.) qui nous a servi de camp de base pour les mesures géophysiques (contact : Roger Henchoz, 079 485 73 81).


Figure 4.73 – Combe de Lavaux-Châtillon depuis le Col. La faille principale, le pendage général des couches et la structure plissée du massif sont bien visibles.

Le fond de la combe est occupé par deux cirques glaciaires (au sud et à l'ouest). Le cirque sud est logé dans l'axe d'une des failles transversales de la chaîne (figure 4.74). Des éboulis remodelés par des processus périglaciaires et présentant de nombreux petits lobes recouvrent des matériaux argileux plus fins (cf. 4.5.3 et 4.5.4). Le versant est se caractérise par d'abruptes parois dominant un large voile d'éboulis. Des zones de blocs éboulés de taille métrique se situent très souvent juste à l'aval, recouvrant les pâturages. De multiples têtes de bancs rocheux affleurent dans le vallon, la principale étant située le long de la faille transversale.

L'hydrologie du vallon se caractérise par la présence de ruisseaux temporaires dont la mise en charge est liée à la fonte des neiges et aux précipitations pluvieuses. La combe de Lavaux-Châtillon possède également « *la source la plus froide du canton, dont l'eau décolle les yeux* » (ROGER HENCHOZ, comm. pers.). Elle se situe à environ 2'090 m.s.m. et sa température atteint 1°C (mesurée avec un thermomètre de poche le 18-19 juillet, le 30 août et le 1^{er} octobre 2005).

Proche du chalet d'alpage, SCHOENEICH (1998) a décrit 7 arcs morainiques tardiglaciaires correspondant à 7 positions de front glaciaire, ainsi que deux moraines latérales. Un petit arc morainique se trouve également sur le versant ouest de la combe, ceinturant un petit étang au lieu-dit « Le Gour ». Ce dépôt indique la présence d'un petit glacier, postérieur aux stades de retrait visibles en amont de la ferme de Lavaux. Des zones humides occupent actuellement de petites dépressions comblées.



Figure 4.74 – Carte géomorphologique de la combe de Lavaux-Châtillon (modifiée d'après SCHOENEICH 1998). La température de la source située à proximité du sondage n°1 est égale à \sim 1°C. Fond topographique au 1 :10'000.

4.5.2 Fenêtres de fonte

Diverses fenêtres de fonte printanières ont été détectées sur le voile d'éboulis dans la partie est de la combe (cercles rouges sur la figure 4.75, A). Les fenêtres de fonte précoces sont ensuite agrandies par le rayonnement solaire, les pieds de pente restant plus longtemps enneigés en raison des dépôts de coulées d'avalanche (figure 4.75, B). Les zones déneigées indiquées par des cercles noirs sur la figure 4.75 sont des crêtes (gradins) rocheux émergeants.

Le grand éboulis sud ne présente en revanche pas de fenêtres de fonte précoce. Les observations de terrain ont montré une structure sédimentaire différente. Le voile d'éboulis à l'est de la combe est composé de blocs décimétriques poreux au travers desquels de l'air doit pouvoir circuler. Le grand éboulis sud est composé d'une fine couche de blocs décimétriques poreux reposant sur un mélange de blocs aplatis et de matrice argileuse humide. Quelques gros blocs éboulés (taille métrique) se trouvent à la surface de l'éboulis.

L'analyse d'une photo de la combe le 25 novembre 2004, après de faibles chutes de neige, semble indiquer la présence de zones déneigées plus rapidement dans les parties hautes des éboulis supérieurs de la combe (figure 4.75, C). Les éboulis inférieurs ne semblent pas présenter de zones de fonte préférentielle (flèche noire).



Figure 4.75 – Evolution des fenêtres de fonte dans la combe de Lavaux-Châtillon. A : 15.06.04 (photo : R. DELALOYE); B : 29.06.05; C : 25.11.04. Les photos B et C ont été prises depuis le col au nord de Pra Cornet.

4.5.3 Indices thermiques

6 UTLs ont été placés de septembre 2004 à octobre 2005 dans la combe de Lavaux-Châtillon à une profondeur de 40 centimètres (emplacements sur figure 4.74) et à des altitudes comprises entre 2'140 et 2'280 m.s.m. L'UTL Chât-T01 se trouve dans la partie sommitale de l'éboulis supérieur du voile est, l'UTL Chât-T02 dans la partie basse. Les UTLs Chât-T31, Chât-T32, Chât-T33, Chât-T34 forment un transect le long du grand éboulis sud. Lors du creusement, une matrice fine a été détectée entre les blocs dès 30 centimètres de profondeur à l'emplacement de Chât-T34 (figure 4.76).

La température de l'air a été dérivée des valeurs du Bois des Arlettes (1'750 m.s.m.) en utilisant le gradient de 0.58°C/100m (altitude moyenne de Lavaux-Châtillon : 2'200 m.s.m.).



Figure 4.76 – UTL Chât-T34 placé à 50 centimètres de profondeur. Une matrice fine occupe les espaces entre les blocs (flèche jaune).



Figure 4.77 – Evolution de la température du sol et de l'air dans la Combe de Lavaux-Châtillon du 1^{er} octobre 2004 au 30 septembre 2005. Les différentes phases de comportement thermique sont indiquées au sommet de la figure. L'échelle des températures est différente pour la température de l'air atmosphérique et du sol. Les courbes ont été réalisées avec les moyennes journalières. Emplacement des UTLs sur la figure 4.74. Explications dans le texte.

UTLs	oct.04	nov.04	déc.04	janv.05	févr.05	mars.05	avr.05	mai.05	juin.05	juil.05	août.05	sept.05	Moyenne
Tair	4.37	-3.19	-4.14	-6.46	-10.46	-2.87	0.15	4.70	9.49	9.44	7.43	6.79	1.35
T01	3.22	-1.91	-0.83	1.19	1.56	0.72	0.94	3.01	7.29	7.92	6.17	6.19	2.96
T02	2.82	-1.65	-2.39	-2.42	-2.67	-2.81	-0.86	-0.01	2.04	5.90	5.48	5.76	0.79
T31	3.12	0.29	0.71	1.26	1.33	1.02	0.72	0.37	0.13	6.84	6.29	5.98	2.35
T32	0.81	-3.70	-4.54	-5.51	-7.02	-7.75	-5.93	-0.96	0.00	2.22	3.17	2.62	-2.18
T33	2.74	-0.96	-2.23	-1.29	-1.72	-1.43	-0.48	0.00	0.94	5.23	5.41	5.22	0.97
T34	3.13	-0.09	-0.17	-0.11	-0.11	-0.09	-0.04	0.05	0.52	7.61	6.98	6.73	2.06

UTL	Anomalie thermique	Min ¹	Max ¹	Amplitude ¹	GFI	Degrés jours	Période zéro curtain			WEOT
UILS						négatifs	Début	Fin	Durée	WEQI
Tair	-	-23.33	24.25	47.58		-946.11	-	-	-	-
T01	+1.62	-8.61	17.51	26.12	53	-98.55	-	-	0	?
T02	-0.56	-7.34	11.67	19.01	218	-397.46	03.05	11.06	30	-0.67 ?
T31	+1.00	-3.56	14.19	17.75	25	-6.68	-	-	0	?
T32	-3.53	-9.13	4.51	13.64	246	-1070.82	22.05	01.07	40	?
Т33	-0.38	-3.78	9.44	13.22	228	-257.12	29.04	23.06	55	-0.44 ?
T34	+0.71	-2.78	13.31	16.09	180	-33.75	-	-	0	?

Tableau 4.6 – Températures mensuelles et indices thermiques pour les UTLs de la Combe de Lavaux-Châtillon du 1^{er} octobre au 30 septembre 2005. ¹ Les températures minimales et maximales ont été déterminées à l'aide des valeurs horaires, les autres valeurs du tableau ont été déterminées sur la base des valeurs journalières moyennes.

L'analyse des enregistrements continus de la température du sol permet de relever différentes particularités d'une formation poreuse ventilée et non-ventilée. La structure du sous-sol semble avoir une influence prépondérante. Les résultats demeurent ainsi bien différents de ceux observés au Bois des Arlettes et à la Pierreuse (figure 4.75 et tableau 4.6) :

- Dans l'éboulis est, l'UTL Chât-T01 présente un régime thermique caractéristique d'un système de circulation d'air. Durant l'été, sa température évolue de façon synchrone avec la température de l'air extérieur. En revanche, entre le 24 novembre 2004 et le 19 avril 2005, son comportement thermique est systématiquement inverse. Les périodes de redoux hivernales se traduisent par une baisse de la température du sol. A l'exception de novembre et décembre 2004, les températures mensuelles restent toujours supérieures à 0°C. La moyenne annuelle est même supérieure de 1.6°C à MAAT !
- Dans le même éboulis, Chât-T02 semble connaître un comportement identique à la température de l'air durant toute la période de mesure. En hiver, des pics de refroidissement succèdent à une baisse importante de la température de l'air (*flèches noires*) traduisant une aspiration d'air. Une période de « zero curtain » s'étend du 2 mai au 12 juin. Durant l'été (de juillet à septembre), la température reste fraîche oscillant autour de 5.5°C en moyenne.
- Dans la partie haute du grand éboulis sud, la température moyenne annuelle de Chât-T31 atteint 2.35°C, soit 1°C supérieure à MAAT. Durant l'hiver, la température reste toujours supérieure au point de congélation et présente une relation inverse avec la température de l'air extérieur. Une expulsion d'air « chaud » se produit à cet endroit. La remontée brutale de la température à la fin juin correspond probablement à la disparition définitive du manteau neigeux à l'emplacement du capteur.
- Les UTLs Chât-T32 et Chât-T33 présentent un comportement identique à l'évolution de la température de l'air, à l'exception de la période de « zero curtain » débutant à la fin avril 2005 (remontée brutale des températures du sol). Chât-T32 montre une température moyenne annuelle du sol de -2.18°C, soit 3.5°C inférieure à la température de l'air extérieur. Durant l'hiver, de l'aspiration d'air froid se déroule avec un temps de retard d'environ 10 jours au travers du manteau neigeux. La température estivale reste relativement froide (en moyenne inférieure à 3°C) sans toutefois montrer un comportement thermique inverse, comme cela a été observé au Bois des Arlettes et à la Pierreuse.

- L'UTL Chât-T34 est situé dans la partie inférieure du grand éboulis sud. Dans ce secteur, de nombreux lobes de solifluxion ou de gélifluxion sont visibles, indiquant la présence de processus périglaciaires. Le capteur est placé dans un matériau argileux fin et humide, ce qui explique la persistance de température à 0°C durant tout l'hiver. Durant le reste de l'année, le comportement thermique est synchrone avec la température de l'air extérieur.

Le graphique 4.78 nous permet d'estimer la corrélation existante (ou non) entre la température de l'air et la température du sol mesurée par les UTLs Chât-T01, Chât-T02 et Chât-T32 :

- Entre le 21 novembre 2004 et le 19 avril 2005, une relation inverse existe entre l'UTL Chât-T01 et la température de l'air. Plus l'air hivernal est froid, plus l'air expulsé dans le haut de l'éboulis est chaud. Du 2 octobre au 20 novembre 2004, puis du 20 avril au 30 septembre 2005, la relation est en revanche normale. Les températures du sol les plus froides sont enregistrées au début novembre, lorsqu'un manteau neigeux est encore absent. Le passage d'un comportement normale (aspiration) à inverse (soufflage) semble se produire lorsque la température de l'air (dérivée !) passe un seuil d'environ +2°C.
- Le comportement thermique de Chât-T02 semble suivre la tendance de la température de l'air durant l'été et l'automne. En revanche, durant l'hiver, la température du sol (comprise principalement entre -2 et -4°C) semble plus ou moins indépendante de la température de l'air extérieur.
- Chât-T32 présente une tendance plus ou moins identique à l'évolution de la température de l'air extérieur, mais avec beaucoup de bruit et de variabilité. Durant l'hiver, la majorité des températures du sol sont comprises entre -3 et -9°C. Durant la période estivale, elles ne dépassent pas les +4.5°C.



Figure 4.78 – Comparaison des températures de l'air et des températures du sol pour les UTLs Chât-T01 (haut de l'éboulis est), Chât-T02 (bas de l'éboulis est) et Chât-T32 (milieu supérieur éboulis nord). Les valeurs ont été séparées en trois périodes afin d'illustrer le type de comportement thermique. L'échelle des températures de l'air est deux fois plus grande que celle des UTLs.

4.5.4 Propriétés électriques

9 sondages verticaux ont été effectués dans la combe entre le 18 et le 20 juillet 2005 (situation sur figure 4.74). Les conditions météorologiques difficiles du 18 juillet (orage de grêle) ont cependant réduits le temps d'investigation. Les valeurs de la roche en place oscillent apparemment entre 1.5 et 6 k Ω m (sondage Chât-07, figure 4.80).

6 sondages ont été réalisés dans la partie est de la combe : Chât-01 dans un éboulis juste au-dessus de la source froide, Chât-02 en bas de l'éboulis à l'emplacement de l'UTL Chât-T02, Chât-03 en haut de l'éboulis à l'emplacement de l'UTL Chât-T01, Chât-07 sur une tête de banc avec un sol végétalisé, Chât-08 et Chât-09 perpendiculairement à l'éboulis principal du voile est.

Dans le grand éboulis sud, le sondage Chât-04 a été réalisé juste en amont de l'UTL Chât-T32 et le sondage Chât-05 dans la zone des lobes de gélifluxion. Chât-06 se situe sur une forme en lobe à gros blocs en pied de pente du cirque glaciaire ouest.



Figure 4.79 - Sondages effectués dans les éboulis est de la combe de Lavaux-Châtillon. Situation sur figure 4.74.

L'éboulis supérieur de la partie est de la combe (sondage Chât-02 et Chât-03) se caractérise par une couche de surface grossière d'environ 1 - 1.5 mètres d'épaisseur (figure 4.79). Au-dessous de cette couche, plusieurs modèles du sous-sol peuvent être proposés : il est possible que la roche en place se retrouve déjà vers 1-2 mètres de profondeur. Un modèle à trois couches peut également être envisagé avec la présence d'un éboulis épais de plusieurs mètres avec plus de matrice fine en profondeur, dont la résistivité serait similaire à la roche en place. Un problème de masquage de couche (cf. chapitre 3.4) semble donc intervenir pour cet éboulis. Ces deux sondages ayant été effectués aux deux extrémités de l'éboulis aux emplacements des UTLs Chât-T01 et Chât-T02, il est également envisageable que l'épaisseur centrale de cette formation soit plus épaisse. Les blocs dans la partie sommitale sont très mobiles et de taille décimétrique, la pente est très raide.

Les sondages Chât-08 et Chât-09 ont été réalisés perpendiculairement à la pente dans la partie basse du principal éboulis de la combe. Pour Chât-08, une couche de blocs de surface pourrait recouvrir une accumulation sédimentaire poreuse (10-15 k Ω m) d'une quinzaine de mètres d'épaisseur (figure 4.79). A l'emplacement du sondage Chât-09, des matériaux fins sont visibles à la surface, ce qui expliquerait la baisse des résistivités apparentes proche de la surface. L'éboulis semble être relativement fin (5-6 k Ω m) et épais de quelques mètres, à moins qu'un problème de masquage n'intervienne comme pour les sondages Chât-02 et Chât-03.



Figure 4.80 – Sondages effectués dans l'éboulis sud, sur les cuestas et au-dessus de la source froide dans la combe de Lavaux-Châtillon. Situation sur figure 4.74.

Le sondage Chât-04 présente une couche de 5-10 mètres d'épaisseur dont la résistivité spécifique atteint 10-15 k Ω m et indiquerait la présence d'un éboulis poreux dans la partie supérieure de l'éboulis sud (figure 4.80). Des blocs grossiers de taille décimétrique à métrique se trouvent en effet la surface. A l'emplacement du sondage Chât-05, plusieurs lobes sont visibles en surface. La couche de surface serait constituée de blocs et de matériaux fins d'un mètre d'épaisseur environ. En dessous, les résistivités spécifiques sont très faibles, de l'ordre de 0.3 k Ω m. Ces valeurs pourraient correspondre aux propriétés électriques d'un éboulis fin relativement humide ou de moraine de fond, avec une forte proportion d'argile à blocaux. Des petits glaciers occupaient en effet cette partie de la combe lors du tardiglaciaire würmien. Une description de leurs différents stades de retrait a été réalisée par SCHOENEICH (1998). Des matériaux fins et humides pourraient également expliquer les valeurs mesurées à l'emplacement de Chât-01 (au-dessus de la source froide).

Dans l'éboulis ouest, une accumulation de blocs grossiers décimétriques à métrique occupe le pied de pente sur une épaisseur de 2-3 mètres. Ces blocs pourraient provenir d'éboulements des parois susjacentes. L'épaisseur de la formation rocheuse semble également peu épaisse en regard du plus grand éboulis du voile est. Il est également possible qu'un éboulis fins et relativement humide (source à proximité, cf. figure 4.74) de taille indéterminée soir présent en profondeur. L'absence d'informations sur ce cirque ouest ne nous a pas permis de relever des indices de fonctionnement d'une circulation d'air interne.

4.5.5 Interprétation

Le site de Lavaux-Châtillon est situé juste en dessous de la limite régionale du pergélisol discontinu. Il a amené des résultats différents de ceux du Bois des Arlettes et de la Pierreuse pour la compréhension des systèmes de ventilation. Les principaux enseignements sont rappelés ci-dessous :

- Indices de fonctionnement d'une ventilation hivernale ascendante :

Le comportement thermique du sol durant l'hiver est caractéristique d'une formation poreuse ventilée. Une aspiration d'air froid semble ainsi avoir lieu aux emplacements des capteurs Chât-T02, Chât-T32 et Chât-T33. Dans les parties hautes des éboulis, la présence de nombreuses fenêtres de fonte printanières et les anomalies thermiques positives enregistrées par Chât-T01 (+1.62) et Chât-T31 (+1.00) sont des indices de zones d'expulsion d'air « chaud ».

Le comportement thermique de Chât-T01 est cependant moins stable que celui de Chât-T31 durant l'hiver : la baisse continue des températures de Chât-T31 contraste en effet avec les nombreux pics de température de Chât-T01. Lors du redoux de la mi-mars, le sol gèle à Chât-T01 probablement en raison de l'arrêt ou l'affaiblissement du système de ventilation ascendant. Une épaisseur de neige différente (plus importante à l'emplacement de Chât-T31), une expulsion d'air concentrée plutôt que diffuse pourraient éventuellement expliquer cette différence.

- Indices de fonctionnement d'une ventilation estivale descendante ? :

Les secteurs dans lesquels une aspiration d'air froid hivernale semble avoir lieu, ne présentent en revanche pas d'évidences de décharge gravitaire d'air froid durant l'été. Ainsi, Chât-T02 et Chât-T32 ne montrent pas de relations thermiques inverses par rapport à l'évolution de la température de l'air, comme dans les cas de Dreveneuse, du Bois des Arlettes ou du Gourd de la Plâne. Les températures du sol restent cependant relativement froide durant l'été, surtout à l'emplacement de Chât-T32 (toujours < 4.5° C et en moyenne entre 2.5 et 3°C). Chât-T02 connaît en revanche des températures estivales plus élevées. Bien que situé en bas de la pente, ce capteur ne se trouve peut-être pas dans un canal de sortie d'air froid. Ces observations viennent s'ajouter à celles de DELALOYE & LAMBIEL (2005) qui précisent qu'à haute altitude, il ne semble pas avoir d'évidence nette de décharge gravitaire d'air froid.

- Rôle de la granulométrie ? :

La présence de matériaux fins et humide sous une cinquantaine de centimètres de blocs dans la partie basse de l'éboulis sud pourrait expliquer l'absence d'indices de circulation d'air et la persistance de températures égales au point de congélation mesurées par le capteur Chât-T34 durant l'hiver. Une observation de surface n'est donc pas suffisante pour considérer tout éboulis comme ventilé.

Un système de ventilation semble en revanche fonctionner dans les accumulations poreuses de la partie médiane et haute du grand éboulis sud (comme le montrent les UTLs Chât-T31 et Chât-T32). La limite inférieure du système serait ainsi déterminer par le passage à une granulométrie plus fine, un peu à l'aval du capteur Chât-T33.

- Origine des eaux froides (~1°C) de la source ? :

Environ 300 mètres en amont de la source froide se situe le principal éboulis de la partie est de la combe. Les résultats du sondage Chât-08 indiqueraient une accumulation sédimentaire poreuse (10-15 k Ω m) d'une quinzaine de mètres d'épaisseur, avec la présence possible de sédiments gelés. Existe-t-il un lien entre eux ? Quel est le régime hydrologique et thermique de la source ? La présence de conditions thermiques froides ou de matériaux gelés dans l'éboulis abaissant la température des eaux de fonte ou de pluie peut-elle expliquer la fraîcheur durable de la source ? Nous ne pouvons donner de réponses à ces interrogations. Il serait donc intéressant d'y placer des capteurs de température.

4.6 Autres sites

De nombreux autres sites ont fait l'objet d'investigations rapides pour détecter différents indices visuels de circulation d'air. Une partie d'entre eux ont déjà été décrits par DORTHE (2006). Sur certains d'entre eux, des mesures BTS ou des enregistrements continus de la température du sol ont toutefois été effectués. Nous les présentons ici brièvement.

4.6.1 Gros Chadoua (FR)

Le site du Gros Chadoua se situe au fond d'un petit vallon d'exposition nord, environ 1 km au nordouest du Vanil Carré. Il a été découvert par C. LAMBIEL en 2005. Un glacier rocheux fossile entièrement recouvert de pâturage s'est développé au pied d'un voile d'éboulis entre 1'600 et 1'800 m.s.m. (figure 4.81). L'altitude inférieure du front se trouvant à 1'580 m.s.m., ce glacier rocheux peut être rattaché à la deuxième génération de SCHOENEICH (1992) (cf. chapitre 2.4). Une zone d'épicéas nains occupent l'éboulis le plus à l'aval. De la glace de regel a été découverte dans de nombreux trous de la partie frontale et dans une ruine présente sur le glacier rocheux fossile le 27 mai 2005 (LAMBIEL 2006). Un système de ventilation semble donc bien présent.



Figure 4.81 – Le glacier rocheux fossile du Gros Chadoua (FR) s'est développé au pied d'un voile d'éboulis. Différentes moraines tardiglaciaires se retrouvent sur le site. Des cristaux de glace ont été découverts dans la ruine le 27 mai 2005. (*photo ruine* : R. DELALOYE).

Afin de détecter le comportement thermique hivernal, 347 points BTS ont été acquis le 16 et le 17 janvier 2006 (figure 4.82). Entre 70 et 120 cm de neige recouvraient le site. La distribution des températures est caractéristique d'une formation poreuse ventilée. Des zones « chaudes » se trouvent dans la partie médiane des éboulis. Aucune mesure n'a pu être acquise dans les parties hautes en raison d'un risque élevé d'avalanche. Des zones froides (< -5°C) occupent le bas de l'éboulis et certaines parties du glacier rocheux fossile, en particulier dans sa zone frontale. La ruine semble être un lieu privilégié du système puisque des températures inférieures à -8°C y ont été mesurées. Un trou d'aspiration resté ouvert au bénéfice d'un rocher est également signalé dans la partie radicale.





Figure 4.82 - Interpolation par krigeage simple de mesures BTS effectuées les 16-17 janvier 2006 au Gros Chadoua. Le motif de répartition des températures est caractéristique d'un complexe éboulis – glacier rocheux fossile ventilé. Un important trou d'aspiration se trouvait dans la partie radicale. (*données* : J. DORTHE & S. MORARD; *carte* : R. DELALOYE).

Des mesures géoélectriques réalisées lors d'un camp de terrain organisé par DELALOYE (Université de Fribourg) et dont les résultats ont été publiés par LAMBIEL (2006) indiquent une épaisseur de sédiments dans le glacier rocheux fossile comprise entre 10 et 30 mètres avec une résistivité spécifique de l'ordre de 15 k Ω m. Une étude approfondie du site (facilement accessible, suffisamment petit pour avoir des données recouvrant l'ensemble du terrain) serait vivement souhaitée pour les années à venir.

4.6.2 Le Larzey (VD)

Le cirque glaciaire du Larzey est situé à l'est du Mont d'Or (2'175 m.s.m.), sur le versant opposé du Bois des Arlettes. D'importants éboulis fournissent du matériel très grossier (blocs parfois de plusieurs m³) à un glacier rocheux fossile situé à l'aval (SCHOENEICH 1992). Des sondages géoélectriques dans les cônes d'éboulis ont permis d'identifier une accumulation sédimentaire poreuse de 10-15 mètres de profondeur avec des résistivités spécifiques supérieures à 20 k Ω m et pouvant atteindre 170 k Ω m (LAMBIEL 2006).

Nous avons participé à une campagne de mesure BTS (99 points) menée en collaboration avec l'Université de Lausanne le 25 mars 2005 (figure 4.83). Après la période très froide de février 2005, la température de l'air est remontée brutalement aux alentours des +5°C vers le 12 mars. Au Bois des Arlettes, les températures du sol ont atteint le 0°C (début de la période de « zero curtain ») entre le 21 et le 29 mars (cf. chapitre 4.3). Une humidification importante du manteau neigeux semble donc s'être produit les jours précédents la campagne de mesure BTS du Larzey.



Figure 4.83 - Interpolation par krigeage simple de mesures BTS effectuées le 25 mars 2005 au Larzey. Le motif de répartition des températures est caractéristique d'un éboulis ventilé pour le cône n°2. De larges couloirs de fonte étaient visibles dans la partie haute du cône d'éboulis n°2.



Figure 4.84 – Cheminées de fonte hivernale et formes d'affaissement du manteau neigeux en bordure nord du cône d'éboulis n°2. (25.03.05).

Une succession de fenêtres de fonte ouvertes étaient présentes dans la partie haute du cône 2 (figure 4.84), les BTS y étaient positives. Dans la partie basse en revanche, des valeurs froides (< -7° C) délimitent certainement une zone d'aspiration d'air extérieur froid. La présence de températures du sol aussi froides après une période d'humidification du manteau neigeux et dans un versant d'exposition sud-est est tout à fait exceptionnelle !

Le cône 3 et le glacier rocheux fossile présentent en revanche des températures proches ou supérieures à 0°C, peut-être en raison de l'humidification du manteau neigeux. La date tardive des mesures BTS ne permet cependant pas d'effectuer une comparaison avec les températures du sol mesurées sur le glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes notamment.

Diverses fenêtres de fonte printanières ont été détectées le 2 avril 2005 sur les éboulis du Larzey et du Gros Van (situé plus à l'est sur le même versant) (figures 4.85 & 4.86). Une unique zone déneigée se trouve en bordure aval du cône 3 du Larzey. Sur la base des mesures BTS, LAMBIEL (2006) considère que « outre le fait qu'aucune sortie d'air (chaud) n'a pu y être observée, la base du cône n'est pas particulièrement froide, d'où une probable absence d'aspiration d'air ». Cette absence apparente reste néanmoins inexpliquée et mériterait un complément d'informations (notamment la réalisation de mesures BTS avant l'humidification du manteau neigeux).



Figure 4.85 – Fenêtres de fonte printanières au Larzey (02.04.05).



Figure 4.86 – Fenêtres de fonte printanières au Gros Van (02.04.05).

4.6.3 Crêt-de-la-neige (France)

Sur le versant nord ouest du Crêt de la Neige (Jura français), dans la vallée de la Valserine, des zones de végétation azonale ont été observées dans la partie inférieure d'une pente d'éboulis se détachant fortement de la forêt climacique de pins de montagne (*pinus mugo*) (figure 4.87).

Le site se situe à 1'550 mètres d'altitude et la température de l'air extérieur (1 mètre au-dessus du sol) est de 21°C (à 15h00) le 7 juillet 2004. Dans la zone de l'éboulis, un léger courant d'air froid sortant de la formation meuble est perceptible avec des températures oscillant entre 2.5 à 4.1 °C ! Dans un sol à granulométrie fine en dehors de l'éboulis, la température y est de 7,5°C sous les arbres à l'ombre.



Figure 4.87 – Pins de montagne nains dans l'éboulis et forêt climacique (07.07.04).



Figure 4.88 – Sphaigne attestant l'existence d'un marais d'eau de condensation (07.07.04).

De la végétation azonale est donc présente dans cette zone. En plus de pins de montagnes nains, de Cresson des Chamois (*Hutchinsia alpina*, *Pritzelago alpina*), qui se développe également sur les sols polygonaux à haute altitude, est découvert. Les rhododendrons ferrugineux présentent également un développement différent dans la zone de l'éboulis et en bordure de celui-ci. En effet, la taille des plantes et des feuilles est moindre dans la zone sur-refroidie (ventilée) et le développement phénologique⁸ semble également moins avancé. La présence de sphaigne est également attestée sur ce site (figure 4.88). Leur présence pourrait être associée à un marais d'eau de condensation (cf. chapitre 5.2).

4.7 Synthèse

Les résultats généraux présentés au chapitre 5 ont été déterminés sur la base des nombreuses observations et mesures thermiques et géophysiques acquises sur de nombreux sites de moyenne altitude. La présentation détaillée de ces terrains d'étude a permis de relever des particularités communes à tous les sites ventilés, ainsi qu'un certain nombre de spécificités propres au site. De nombreuses questions restent encore irrésolues et des investigations approfondies et continues (monitoring) serait nécessaires. Une discussion et des perspectives futures d'étude vont être présentées aux chapitres suivants.

⁸ Phénologie : étude de la répartition dans le temps des phénomènes périodiques caractéristiques du cycle vital des organismes dans la nature ; ce cycle est le plus souvent annuel.



SYNTHESE ET DISCUSSION

5. Indices et résultats généraux

Ce chapitre a pour objectif de présenter une synthèse des principaux résultats obtenus par le travail de terrain. Dans un premier temps, le comportement thermique des formations poreuses ventilées sera synthétisé. Les divers indices visuels observés seront ensuite décrits et rattachés au comportement thermique associé à la ventilation. Pour conclure, quelques résultats généraux des méthodes géophysiques (géoélectrique) seront présentés.

5.1 Indices thermiques

Les indices thermiques ont été relevés grâce à l'utilisation de l'enregistrement continu des températures du sol (UTLs) et par l'utilisation de la méthode BTS.

5.1.1 Régime thermique d'un éboulis ventilé

Deux paramètres sont déterminants dans le régime thermique : la valeur mesurée (en°C) de la température et la comparaison de la variation des températures du sol et de l'air extérieur. Une relation thermique semblable entre l'éboulis et l'atmosphère indique généralement un régime aspirant, alors qu'une relation inverse correspond à un régime soufflant. Des anomalies thermiques sont ainsi observées dans les parties hautes et basses des éboulis (figure 5.1).



Figure 5.1 – Principales phases du comportement thermique du sol (proche de la surface) pour une formation poreuse ventilée de basse et moyenne altitude. Les deux courbes de températures du sol illustrent à la fois les anomalies positives et négatives. La courbe en gris clair décrit la variation de la température de l'air.

Sur la base des enregistrements des températures du sol acquises sur nos sites d'études et sur l'éboulis de référence du Creux-du-Van, différentes phases du comportement thermique saisonnier du sol peuvent être identifiées pour des terrains de basse et moyenne altitude :

- a) **Phase 1** : conditions estivales
 - (1⁺) : l'évolution de la température moyenne journalière du sol est calée sur celle de l'air extérieur. Cette phase correspond à l'accumulation de chaleur dans la partie haute de l'éboulis.
 - (1[•]): l'écoulement gravitaire d'air froid entraîne le maintien de température du sol froide à la surface (généralement < +5°C). La température se rapproche d'autant plus du 0°C que la température de l'air est chaude (relation inverse). Cette phase correspond à la vidange du réservoir de froid emmagasiné durant l'hiver.
- b) Phase 2 : automne et début de l'hiver (avant la mise en place d'un épais manteau neigeux)
 - (2⁺): la température du sol reste positive dans les secteurs soumis à l'expulsion d'air chaud, malgré des températures de l'air extérieur négatives. Les valeurs sont d'autant plus élevées que l'air extérieur est froid.
 - **ii.** (2[•]) : un refroidissement marqué du sol consécutif à l'aspiration d'air froid extérieur peut se produire avant l'arrivée d'un épais manteau neigeux.
- c) **Phase 3** : conditions hivernales
 - i. (3⁺): la température est généralement supérieure à 0°C (expulsion d'air chaud) et le système subit un lent refroidissement consécutif à la vidange de la chaleur emmagasinée durant l'été, sans toutefois atteindre le point de congélation. Cette phase thermique reflète les conditions thermiques à l'intérieur de l'éboulis.
 - ii. (3): la température est en permanence négative et le comportement thermique est contrôlé par celui de la température extérieure (aspiration d'air froid). Selon les conditions météorologiques, de grandes quantités de froid peuvent être emmagasinées durant cette phase.
- d) **Phase 4** : humidification (fonte des neiges)
 - (4⁰) : Lorsque le manteau neigeux est humidifié au printemps ou durant des périodes de redoux hivernal, les températures du sol s'élèvent brutalement jusqu'à 0°C. La température demeure stable (zero curtain) tant que la neige ou la glace n'a pas entièrement fondue.

Suivant son emplacement sur l'éboulis et les conditions météorologiques (température de l'air, neige), la température du sol peut suivre de façons diverses la chronologie proposée ci-dessus. Des phases peuvent ainsi être absentes. Le régime thermique du sol peut également passer d'un état (+) à un état (-) de la même phase et vice versa. Les différents types de comportement thermique annuel du sol d'un éboulis froid (I, II, III, IV, 0, cf. 2.1.1.1) peuvent ainsi être caractérisés par une succession des différentes phases saisonnières (1, 2, 3, 4) (tableau 5.1) :

Type annuel	Phases saisonnières	Remarques
I (chaud en hiver, normal en été)	1 ⁺ , 2 ⁺ (2 ⁻ *), 3 ⁺ (3 ⁻ **), 1 ⁺	* peut se produire dans la partie supérieure lors de grand froid et si le capteur n'est pas situé directement sur une sortie d'air chaud. ** peut se produite lors d'une phase de redoux hivernal provoquant l'arrêt ou l'affaiblissement de l'expulsion d'air chaud.
II (froid en hiver, normal en été)	1 ⁺ , 2 ⁻ , 3 ⁻ , 4 ⁰ , 1 ⁺	
III (froid en hiver, froid en été)	1 (1 ****), 2 , 3 , 4 , 1	*** la température reste froide, mais une aspiration d'air peut avoir lieu si la température de l'air descend sous le seuil de réversibilité (lors d'une période de froid).
IV (normal en hiver, froid en été)	1 ⁻ , (2 ⁻), 4 ⁰	
0 (normal en hiver, normal en été).	$1^+, 4^0 * * * *, 1^+$	**** la température reste légèrement supérieure à 0°C durant tout l'hiver, sauf en cas de grand froid et de couvert neigeux peu épais.

Tableau 5.1 – Succession des phases saisonnières pour les différents types de comportement thermique annuel d'un éboulis ventilé.

5.1.2 Carte BTS typique d'un complexe éboulis – glacier rocheux fossile ventilé

L'analyse des cartes BTS réalisées dans le cadre de ce travail a montré une excellente correspondance de la distribution spatiale des valeurs BTS entre les différents sites. Un modèle pour le complexe ventilé éboulis – glacier rocheux fossile montre ainsi (figure 5.2) :

- L'existence d'une transition rapide entre les températures de surface maximales (-1°C à +1°C) de la partie supérieure et les températures minimales (-8 à -12°C) dans la partie inférieure de l'éboulis. Cette transition peut s'opérer sur quelques mètres.
- Les BTS minimales ne sont pas mesurées dans la partie la plus basse de l'éboulis. Les processus d'aspiration ont donc lieu préférentiellement dans un secteur situé quelques dizaines de mètres en amont du pied de l'éboulis.
- Les sillons des glaciers rocheux fossiles présentent généralement des valeurs BTS plus basses que sur les rides. Soit une aspiration d'air froid a lieu à ces endroits, soit une accumulation d'air froid dans ces dépressions topographiques comme le suggèrent HEGGEM ET AL. (2005) peut expliquer cette baisse des températures BTS
- Au front du glacier rocheux, des zones d'aspiration peuvent également provoquer une baisse des BTS.



Figure 5.2 - Carte BTS typique d'un complexe éboulis - glacier rocheux fossile ventilé.

5.2 Indices visuels

Lors du choix initial des sites d'étude, l'observation de zones déneigées (fenêtres de fonte) ainsi que d'une végétation particulière (arbres nains, zones couvertes de mousses, auréoles de groupements végétaux azonaux) contrastant avec la végétation climacique⁹ environnante a souvent été le premier indice de la présence d'un phénomène particulier. Par la suite, une observation attentive et répétée des éboulis et des glaciers rocheux fossiles a permis de mieux appréhender la complexité des systèmes de ventilation.

⁹ Climacique : qui concerne le climax (aboutissement théorique de l'évolution naturelle d'un écosystème en équilibre avec le sol, le climat et avec toutes ses composantes, et qui s'autogénère).

5.2.1 Végétation et écosystèmes « insulaires »

L'observation d'une faune et d'une flore boréo-alpine à des altitudes comprises entre 350 et 700 m.s.m. en Europe centrale a très rapidement intrigué les botanistes. En effet, dans les parties basses des éboulis, d'extraordinaires écosystèmes sont habités par différentes plantes (mousses, rhododendron ferrugineux, épicéa et pin de montagne nains...) et par plusieurs groupes d'invertébrés (mites, araignées, puces, collemboles, scarabées,...) qui se trouvent habituellement dans les zones polaires ou en haute montagne (BERTINELLI ET AL. 1993, GUDE & MOLENDA 2000, 2003).

Ces constations permettent de supposer des relations dynamiques importantes entre la faune, la végétation et le sol sur éboulis froid, comme cela a été montré par BERTINELLI et al. (1993) dans la Combe obscure (Alpes françaises méridionales), par GUDE & MOLENDA (2003) en Europe centrale ou par KÖRNER & HOCH (2006) dans le cirque du Creux-du-Van (Suisse). Selon BERTINELLI ET AL. (1993), les conditions micro-climatiques et pédo-climatiques débordent même de l'éboulis puisque des relevés végétaux dans le site de la Combe obscure (1450-1550 m.s.m) ont montré la présence de groupements forestiers montagnards hygrosciaphiles¹⁰ aux alentours de l'éboulis froid.

La **présence d'arbres nains** a été un indice primordial pour la détection d'anomalies thermiques négatives sur nos sites d'étude (figure 5.3). BERTINELLI ET AL. (1993) associent la croissance très lente des arbres sur éboulis froids (1,5 m pour un épicéa de 120 ans dans la Combe obscure (France)) à celle de la zone de combat subalpine. Des différences dans le développement phénologique¹¹ existent entre la végétation de l'éboulis et celle située à ses marges. DESCROIX (2001) signale notamment un jaunissement précoce des arbres sur l'éboulis à la fin de l'été.



Figure 5.3 – Secteurs à arbres nains (épicéa dans cet exemple) (Dreveneuse d'en Bas, mai-juin 2004) (*photo de gauche*: REYNALD DELALOYE).

De nombreux sites présentés par WAKONIGG (1996) révèlent l'existence d'un marais propre aux éboulis froids, **le marais d'eau de condensation** (*Kondenswassermoor*). GOBAT ET AL. (2003) ne parlent pas de marais d'eau de condensation mais d'organosol insaturé constitué d'un hydromor¹² à sphaignes. Une hypothèse de formation a été proposée par STEINER (1992) (cité par WAKONIGG, 1996) : les sorties d'air froid provoqueraient la condensation (par baisse de la température) de l'air extérieur « plus chaud » situé à proximité. Ce processus serait la cause de l'existence des marais d'eau de condensation. Cependant un tel phénomène ne pourrait avoir lieu qu'avec un air déjà fortement chargé en humidité et selon WAKONIGG (1996) uniquement dans un rayon décimétrique. Ce dernier

¹⁰ Hygrosciaphile : se dit d'une espèce qui se développe dans des conditions ombragées et de forte humidité atmosphérique.

¹¹ Phénologie : étude de la répartition dans le temps des phénomènes périodiques caractéristiques du cycle vital des organismes dans la nature ; ce cycle est le plus souvent annuel.

¹² Hydromor : forme d'humus des sols acides (mor) se développant dans un milieu temporairement saturé d'eau.

relève que ce type de marais pourrait également trouver sa genèse dans la conservation des eaux de pluie et de ruissellement dans un milieu fortement refroidi, et dont la faible évaporation garantirait la permanence de zones humides.

Néanmoins, ces théories devront être confirmées par des études plus approfondies. Un tel phénomène n'a été que très rarement observé sur nos terrains (uniquement dans les éboulis froid du Creux-du-Van et du Crêt de la Neige dans le Jura français).

Les éboulis froids constituent aussi d'extraordinaires écosystèmes insulaires pour la (micro-) faune. Des analyses ADN ont montré l'existence de populations de scarabées sans ailes – donc incapables de se mouvoir sur de grandes distances – ayant évoluées séparément les unes des autres depuis plusieurs milliers d'années (un peu comme sur une île) dans plusieurs éboulis d'une même région (cette étude a été menée en Allemagne) (GUDE & MOLENDA 2003). Ainsi ces différentes espèces peuvent être considérées comme reliques. Leurs niches écologiques ont conservé un micro-climat périglaciaire stable depuis les dernières glaciations.

5.2.2 Comportement annuel de la circulation d'air

De nombreux indices de fonctionnement d'une ventilation interne sont visibles tout au long de l'année. Ces manifestations sont variables selon la saison et selon le secteur du complexe éboulis – glacier rocheux fossile, séparé en cinq zones : sommet de l'éboulis (au pied des parois), partie supérieure, partie médiane, partie inférieure, glacier rocheux fossile (si existant). Le comportement thermique de ces différents secteurs d'un éboulis a été présenté au chapitre 2.1.

5.2.2.1 Automne et début de l'hiver

L'automne et le début de l'hiver se caractérisent par une réversibilité du courant d'air et le début d'une aspiration importante d'air froid, consécutive au mouvement ascendant de l'air « chaud » à l'intérieur de l'éboulis, avant la mise en place du manteau neigeux. L'intensité du refroidissement est étroitement liée avec les conditions météorologiques extérieures ainsi que la présence/absence et l'épaisseur d'un manteau neigeux précoce.

a) <u>Partie supérieure</u> (phase 2⁺, parfois 2⁻)

Lorsqu'une fine couche de neige (< 10 cm) recouvre l'éboulis, **l'ascendance de l'air chaud** – même s'il est diffus – provoque l'ouverture rapide de **fenêtres de fonte « automnales »** (figures 5.4 et 5.5). Cette observation permet de relever assez précisément les secteurs de sorties d'air chaud.



Figure 5.4 – Fenêtre de fonte automnale après la mise en place d'une mince couche de neige. L'air chaud expulsé avait une température comprise entre +4 et $+8^{\circ}C$! (Vudèche, 10.11.04).



Figure 5.5 – Fenêtres de fonte au début de l'hiver dans la partie supérieure d'un éboulis. L'effet de l'expulsion de l'air chaud est facilement distinguable (Dreveneuse, 24.11.04) (*photo* : REYNALD DELALOYE).

Un trou souffleur (ou une zone d'expulsion d'air) peut « fumer » par mélange de deux masses d'air proches de la saturation. Un panache d'air tiède se mélangeant à un air extérieur très froid va se condenser par baisse de sa température en dessous du point de rosée ou de congélation. Ce cas de figure peut être observé au début de l'hiver dans la partie supérieure de l'éboulis. Cette condensation se traduit par la formation d'un léger **brouillard** dans la zone d'expulsion d'air chaud (observée uniquement à Vudèche durant la matinée du 10.11.04¹³), par la présence de **zones de blocs mouillés** ou par la présence de **cristaux de givre** (*hoarfrost*) sur les cailloux lorsque les conditions extérieures deviennent très froides (figures 5.6 à 5.9). Des observations ont montré que l'humidification se produit non seulement en surface, mais affecte également les premiers décimètres du sol. Ce phénomène semble apparaître lorsque l'air extérieur n'est pas encore assez froid pour que du givre se forme autour des blocs, par la fonte du givre ou d'une mince couche de neige causée par le rayonnement solaire ou par l'expulsion d'air « chaud » saturé qui se refroidit et condense. Les cristaux de givre se reconnaissent à leur forme hexagonale, en aiguille ou en rosette (LUETSCHER 2005).





Figure 5.6 – Formation de brouillard due à l'ascendance d'air chaud (Vudèche,10.11.04) (*photo*: THIERRY SEMBACH).



Figure 5.8 - Liseré de givre (Sattelspitzen, 16.12.04)

Figure 5.7 – Humidification d'une zone de blocs par sortie d'air chaud (Sattelspitzen, 16.12.04).



Figure 5.9 – Cristaux de givre (Bois des Arlettes, 25.11.04).

Un dernier indice de circulation d'air pouvant être observé dans la partie supérieure de l'éboulis concerne le **regel du manteau neigeux** avec l'**englacement basal** du manteau neigeux (*basal icing*) et la **formation de plaques de glace** (*ice sheets*) (figure 5.10) (passage de la phase 2⁺ à 2⁻). En certains endroits, la neige forme une voûte sans toucher le sol traduisant l'ascendance d'air « chaud ». Lorsque le système de ventilation faiblit ou s'inverse en fonction du gradient de température, la base humide du manteau neigeux peu épais se refroidit et peut regeler. De même, de véritables plaques de glace de quelques centimètres d'épaisseur, sur lesquelles des blocs restent incrustés, peuvent tapisser les parties supérieures de l'éboulis.

¹³ Une vidéo de ce brouillard est disponible sur le cd-rom : 04111028.avi (durée : 26 sec.).



Figure 5.10 - Formes de regel du manteau neigeux : A) Plaque de glace posée à la verticale, les blocs situés en dessous sont humides ; B) Détail sur des blocs décimétriques pris dans l'englacement basal ; C) Regel de la base d'un faible manteau neigeux (env. 5 cm), le phénomène de gel/dégel est bien illustré par la gouttelette gelée à droite (flèche blanche) (Bois des Arlettes ; A et C : 04.12.04 ; B : 09.02.05).

b) Partie médiane

Le fonctionnement de la ventilation dans la partie médiane de l'éboulis reste complexe et peu comprise. En effet, des observations aux Sattelspitzen (16.12.04) ont révélé la présence de plusieurs fenêtres de fonte étagées entre lesquelles de petits trous d'aspiration s'étaient développés. Cette observation traduit-elle une superposition de petits systèmes de ventilation dans l'éboulis par-dessus un système majeur englobant tout l'éboulis? Ou étions-nous en présence de trous d'aspiration factices ? LISMONDE (2002) a relevé la présence de trous soufflant ou aspirant toute l'année dans des systèmes souterrains, traduisant une entrée intermédiaire d'un tube à vent. Est-ce le cas dans cet éboulis ? De telles observations n'ont en revanche pas été relevées sur les autres sites d'étude. D'une façon générale, le secteur médian se caractérise par l'absence de fenêtres de fonte et de trous d'aspiration, traduisant une zone de transition d'air (de grandeur variable) entre la partie supérieure et inférieure de l'éboulis.

c) <u>Partie inférieure</u> (phase 2⁻)

Lorsqu'une faible couche de neige recouvre la partie basse de l'éboulis, l'aspiration d'air se fait par l'intermédiaire de petites dépressions. Ces **trous d'aspiration** se distinguent notamment des trous souffleurs d'air chaud par l'absence de cristaux de givre et un sol sec (figure 5.11). Ils sont également parfois associés à un bloc ou un tronc d'arbre leur permettant de rester « ouverts » malgré l'épaississement du manteau neigeux durant l'hiver. Leur température (mesurée à l'aide d'un thermomètre de terrain) est le plus souvent bien inférieure à 0°C (par exemple : -11.7°C à 13h00 le 04.12.04 au Bois des Arlettes).



Figure 5.11 – Trous d'aspiration : A) A travers le manteau neigeux (Dreveneuse, 24.11.04) ; B) Utilisant un bloc (Bois des Arlettes, 25.11.04) ; C) Restant ouvert grâce à un tronc d'arbre (Drudzes, 08.01.05) (*photo A* : REYNALD DELALOYE).

d) Glacier rocheux fossile

Lorsqu'un faible manteau neigeux recouvre le glacier rocheux, il est possible d'observer des trous d'aspiration dans les dépressions et mêmes parfois sur le flanc des rides du glacier rocheux fossile (figure 5.11 B). Des zones de fonte et d'humidification se retrouvent en revanche sur ses rides (figure 5.12). De mini-systèmes de ventilation semblent donc avoir aussi lieu entre les rides et sillons de ces formations grossières.

Figure 5. 12 – Zone de fonte sur une ride frontale du glacier rocheux fossile de Dreveneuse (24.11.04) (*photo* : REYNALD DELALOYE).



5.2.2.2 Hiver

L'hiver se caractérise généralement par la présence d'un épais manteau neigeux et de températures extérieures très froides. Ces deux paramètres sont cependant variables d'année en année, influençant grandement l'efficacité de refroidissement du système de ventilation. Celui-ci est principalement ascendant avec l'évacuation d'air interne « chaud » dans les parties hautes et l'aspiration d'air externe froid dans les parties basses et médianes des éboulis. La circulation d'air s'effectue alors à travers la couche de neige poreuse.

a) <u>Partie supérieure</u> (phase 3^+)

L'expulsion d'air chaud (>0°C) dans les parties supérieures se traduit par des formes de fonte de deux types. Lorsque l'échappement de l'air est diffus, des secteurs sont tout d'abord criblés de petites dépressions non ouvertes. La surface du couvert neigeux prend alors un aspect « moutonné » avec de nombreuses figures d'affaissement de la surface du manteau neigeux. L'évolution de la fonte mènera à l'ouverture et à l'agrandissement de fenêtres de fonte hivernales (figures 5.13 et 5.14). Dans de nombreux éboulis, ces secteurs prennent des formes allongées dans le sens de la pente (« couloirs de fonte ») et se situent bien souvent sur les bords d'un éboulis au profil convexe perpendiculaire à la pente (figure 5.15).



Figure 5.13 – Différents stades de développement des fenêtres de fonte hivernale (Dreveneuse, 10.02.05) (*photo* : REYNALD DELALOYE).

L'explication de cette distribution spatiale est à rechercher dans la structure sédimentaire du soussol. En effet, ces secteurs présentant une plus forte porosité que les zones adjacentes constituent des zones d'expulsion préférentielle d'air « chaud ». L'évacuation de l'air ne se fait donc pas de manière uniforme dans l'éboulis, mais semble bien confiné dans des conduits.



Figure 5.14 – Modèle d'évolution des cheminées de fonte au cours de l'hiver (*source* : LAMBIEL 2006).

Figure 5. 15 – Typologie et emplacement des formes de fonte hivernal pour un éboulis convexe (en coupe).

Le deuxième type de formes concerne **l'expulsion concentrée** d'air. Dans ce cas de figure, l'air « chaud » s'évacue par des puits souvent recouverts de givre. La base humide du manteau neigeux forme une voûte avec le sol souvent détrempé (figures 5.16 et 5.17). Lorsqu'un puits fermé est ouvert de manière artificielle, un fort courant chaud et humide est immédiatement perceptible. LAMBIEL (2006) assimile ces formes au stade 2 de son modèle d'évolution des cheminées de fonte (figure 5.14). Cependant l'observation de puits fossiles au printemps (cf. 5.2.2.3) ne permet pas de généraliser ce modèle à l'ensemble des éboulis.



Figure 5.16 – Puits ouverts dans l'éboulis de Vudèche (08.02.05).



Figure 5.17 – Voûte entre le sol humide et la base du manteau neigeux (Vudèche, 08.02.05) (*photo* : REYNALD DELALOYE).

b) <u>Partie inférieure</u> (phase 3⁻)

Des trous d'aspiration peuvent encore subsister lorsque le manteau est épais. La présence d'une entrée d'air abritée par une branche ou un rocher permet de conserver un contact direct entre l'air extérieur et la base du manteau neigeux. Si un fort gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis existe, la vitesse du courant d'air aspiré devient alors très rapide (cf. 2.1.1.3). Cependant, l'aspiration s'effectue essentiellement à travers le manteau neigeux et ne peut être détectée par des indices visuels.

5.2.2.3 « Printemps » (période de fonte)

Avec le réchauffement de la température, le système de ventilation ascensionnelle s'affaiblit au début du printemps et va commencer son inversion. L'écoulement gravitaire d'air froid devient alors effectif. Les eaux de fonte vont pénétrer dans l'éboulis et regeler au contact du réservoir de froid formé durant l'hiver dans la partie basse. La neige se maintient plus longtemps en pied de pente et dans les dépressions des glaciers rocheux fossiles, en raison des conditions de sol froides, des dépôts d'avalanches et des accumulations dues au vent.

a) <u>Partie supérieure</u> (phase 1^+)

En général, des vestiges de la phase ascendante d'air chaud peuvent être observés au début du printemps, lorsque la neige commence à disparaître des hauteurs de l'éboulis (figures 5.18 et 5.19). Une bonne correspondance existe entre les fenêtres de fonte automnales et printanières. Ces **fenêtres de fonte « fossiles »** peuvent être agrandies avec le réchauffement saisonnier. Toutes les zones libres de neige ne sont pas forcément consécutives à l'ascendance d'air chaud durant l'hiver. Leur présence peut aussi être à rechercher dans le départ d'avalanches ou tout simplement dans la morphologie (roche en place plus rapidement déneigée que l'éboulis, rides soufflées par le vent...).





Figure 5.18 – Fenêtre de fonte « printanière » (en rouge) (Vudèche, 25.05.04).

Figure 5.19 – Puit « fossile », témoignant d'une sortie d'air chaud concentrée (Vudèche, 26.05.05).

b) <u>Partie inférieure et glacier rocheux fossile</u> (phase 4⁰ puis 1⁻)

Dès la fin avril / fin mai (selon l'altitude et l'année), c'est au pied de l'éboulis qu'il faut rechercher des indices de fonctionnement du système de ventilation. **Des plaques de neige et de glace** sont également conservées durant le printemps (et une partie de l'été). Au Bois des Arlettes, une épaisse couche de glace de regel a même été détectée sous une cinquantaine de centimètres de neige au fond d'une dépression, ralentissant la disparition du manteau neigeux (figure 5.20). Des **sorties d'air froid** (proche du 0°C) deviennent également perceptibles à la base de l'éboulis et sur le glacier rocheux fossile. Lorsque de la neige tapisse encore le fond des sillons, de l'air froid est évacué sur les flancs des rides. La pression gravitaire du réservoir d'air froid doit alors être considérable ! Le **sol est gelé** en surface et de la **glace massive de regel** est visible aux sorties d'air (figure 5.21). Ces zones surrefroidies sont associées avec de la végétation azonale.



Sol gelé

Figure 5.20 – Couche de glace massive, due au regel des eaux de fonte dans une zone sur-refroidie (« Doline souffleuse », Bois des Arlettes, 28.05.05).

Figure 5.21 - Sol gelé et glace massive à la sortie d'un trou souffleur d'air froid dans la ride du glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes (22.05.05).

Temp. : +0.5°C

5.2.2.4 Eté

La période estivale se caractérise par l'écoulement gravitaire d'air froid dans les parties basses des éboulis et la persistance d'anomalies thermiques négatives malgré des températures de l'air élevées. Le glacier rocheux fossile est aussi concerné par ces conditions estivales fraîches.

a) <u>Partie supérieure</u> (phase 1^+)

La partie supérieure ne présente aucun indice visuel durant l'été. L'aspiration d'air extérieur est diffuse et ne peut être détectée.

b) <u>Partie inférieure et glacier rocheux fossile (phase 1)</u>

Durant l'été, les sorties d'air froid sont toujours perceptibles avec des valeurs comprises le plus souvent entre 0.5° et 5°C (avec une température de l'air extérieure de 15-20°C). Plus le contraste entre l'air extérieur et l'air interne à l'éboulis est grand, plus la température baisse et la vitesse augmente. Il arrive parfois que les trous se mettent à fumer (peut-être est-ce aussi le cas au printemps). Ce phénomène se produit lorsque de l'air glacé et saturé entre en contact avec un air tiède et humide (après la pluie ou la rosée). Une condensation se produit et **le brouillard** rampe par terre (figure 5.22). Des plaques de glace et de neige affleurantes peuvent subsister en profitant de l'effet protecteur de la végétation (s'il y en a) (figure 5.23). Cette observation est d'autant plus remarquable qu'elle intervient à la fin du mois de juillet le plus chaud depuis 1864 au moins !



Figure 5.22 – Condensation au pied de l'éboulis (Wandflue, $1'550 \text{ m}, 30.07.06)^{14}$.



Figure 5.23 – Plaques de glace et neige profitant du refroidissement de la ventilation (Wandflue, 1'625 m., 30.07.06).

5.2.3 Granulométrie

Le flux d'air à l'intérieur d'une formation meuble (éboulis, glacier rocheux fossile) circule au travers des interstices entre les blocs. La granulométrie se trouve être un facteur déterminant pour l'efficience de la ventilation et pour l'efficacité du refroidissement.

5.2.3.1 Le granoclassement

Les éléments composants un éboulis sont de taille variable et ont tendance à s'agencer selon un certain ordre le long de la pente. Les gros blocs roulent par gravité jusqu'au pied de la pente, alors que les

¹⁴ Une vidéo de ce brouillard est disponible sur le cd-rom (durée : 20 sec.).

petits éléments restent de façon plus ou moins stable en haut de la pente. Les particules fines sont souvent lessivées, de façon accrue dans un environnement karstique.

La taille des blocs varie selon l'éboulis investigué. Le diamètre des plus gros éléments est compris entre quelques dizaines de centimètres à environ un mètre, alors que les plus petits éléments sont de taille centimétrique à millimétrique. Cependant, la littérature rapporte qu'une circulation d'air peut se dérouler dans des blocs beaucoup plus grand : entre 1.5 et 2 mètres (TANAKA ET AL. 1999), de 30 à 300 centimètres (SAWADA 2003), jusqu'à 3 – 4 mètres (GORBUNOV ET AL. 2004). En revanche, quel est le diamètre approximatif minimal des éléments internes d'un éboulis pour que la circulation d'air puisse exister ?

5.2.3.2 Les gravières : des éboulis triés

A défaut de pouvoir entreprendre une étude in situ qui aurait demandé une logistique et un investissement considérable, une inspection des systèmes de ventilation de deux gravières fribourgeoises (Châtillon et La Tuffière) a été entreprise le 30 janvier 2005, après 1 semaine de temps très froid (cf. figure 2.10). De la neige est tombée en plaine aux alentours du 20 janvier. De nombreux indices visuels d'une circulation d'air ont été observés, notamment des fenêtres de fonte, des sorties d'air chaud et des cristaux de givre (figure 5.24). Les températures dans les parties supérieures ont été relevées à l'aide d'un thermomètre digital et la température de l'air extérieur était de -8°C le matin (gravière de Châtillon, 620 m.s.m.) et de -6°C l'après-midi (gravière de la Tuffière, 650 m.s.m.). Les résultats sont présentés dans le tableau 5.2 :

Diamètre des blocs [mm]	Température mesurée dans la partie supérieure [°C]	Indices visuels de ventilation (sorties d'air chaud)	Gravière
80	+ 3.4 °C	oui	La Tuffière
60	+ 2.0°C	oui	La Tuffière
45	+ 1.5°C	oui	Châtillon
40	+ 2.5 à + 3.5°C	oui	Châtillon
30	+ 1.1°C	oui	Châtillon
12 – 16	pas de mesures	oui	Châtillon
11 – 16	pas de mesures	oui	Châtillon
6 – 11	pas de mesures	oui	Châtillon
5-7	pas de mesures	oui	Châtillon
3 - 6	pas de mesures	oui	Châtillon
3 – 4	pas de mesures	oui	Châtillon
0.5 - 2	pas de mesures	non	Châtillon

Tableau 5.2 – Température mesurée dans les parties supérieures en fonction du diamètre des blocs. La température de l'air était comprise entre -6 et -8°C.

Dans un tas de sable dont le diamètre des éléments était compris entre 0.5 et 2 mm, aucun indice de circulation n'a été remarqué. Il semble donc qu'une ventilation puisse avoir lieu dès que la taille des éléments dépasse 2 mm.



Figure 5.24 – Système de ventilation dans les gravières : A) Fenêtres de fonte et traces de cheminement de l'air chaud (taille : 30mm); B) Sortie d'air chaud avec pourtour givré (taille : 30mm) (30.01.05).

L'intensité du refroidissement en fonction de la taille des blocs n'a pu être déterminé. Cependant des simulations numériques menées par QUAN ET AL. (2005) ont montré que le refroidissement par convection était meilleur avec un diamètre de 9 cm, qu'avec un diamètre de 3 cm, 6 cm ou 15 cm. D'autres résultats obtenus par SUN ET AL. (2005) montrent que la température moyenne annuelle du sol sous une couche de roche broyée avec un diamètre de 40 à 50 cm était plus basse que celle avec un diamètre de 5 à 8 cm. Cependant, un suivi annuel du comportement thermique dans des amas de cailloux granoclassés pourrait apporter une meilleure compréhension du rôle de la granulométrie sur la ventilation et le refroidissement.

Un dernier paramètre granulométrique important concerne la façon dont sont agencés les matériaux. En effet, une ventilation nécessite une **porosité efficace** suffisante. De la roche délitée en plaquettes et superposée en « toit d'ardoises » réduit ainsi fortement les interstices entre les blocs. Un tel cas de figure a été observé dans l'éboulis de la Flottuwald au-dessus de Sierre (VS). Ce site constitue cependant une exception.

La pétrographie des matériaux ne joue pas de rôle direct pour la présence ou l'absence d'une ventilation. En effet, des éboulis froids ont été décrits aussi bien dans des roches calcaires (Creux-du-Van, Bois des Arlettes, Vudèche...) que dans des roches volcaniques (au Japon, eg. SAWADA 2003). En revanche la résistance des roches l'érosion et la production de matériaux rocheux pour la formation d'éboulis ou de glacier rocheux sont des paramètres indirects importants.

En conclusion, l'occurrence d'un système de ventilation ne semble d'une part pas être directement liée au type de matériaux, et d'autre semble pouvoir se produire même avec des éléments de petites tailles. L'efficacité de la circulation d'air est probablement variable selon la granulométrie. Cela reste cependant à démontrer.

5.3 Indices géophysiques

Les principes de la méthode géophysique ont été présentés au chapitre 3.4. Sur la base des nombreux sondages verticaux réalisés dans le cadre de ce travail de diplôme, des modèles généraux ont pu être déterminées pour les éboulis et les glaciers rocheux fossiles. Ces modèles s'appliquent principalement aux éboulis constitués de calcaires massifs, situation relativement fréquente dans les Préalpes suisses romandes. Les différentes formes de courbe d'un modèle à 3 couches ont déjà été présentées au chapitre 3.4 et ne seront pas répétées ici.

5.3.1 Eboulis

Dans la partie inférieure des éboulis, tous les sondages montrent la présence d'un niveau résistant sous quelques mètres de blocs de surface. Un modèle à trois ou quatre couches a le plus souvent été adopté avec :

- 1a : Une couche de gros blocs d'environ un mètre d'épaisseur avec des résistivités spécifiques généralement supérieures à 20 km et pouvant atteindre 200 kΩm.
- 1b : Eventuellement une couche avec une résistivité plus faible (environ 10 k Ω m) d'un mètre d'épaisseur environ.
- 2 : Une couche avec une forte résistivité (>15 à 50-200 k Ω m) de 2 à 20 mètres d'épaisseur.
- 3 : Substratum (< 5 k Ω m généralement).

La résistivité élevée de la 2^{ème} couche peut être due soit à une forte porosité soit à un sédiment gelé, ou plus probablement à un matériau poreux gelé. LAMBIEL (2006) considère cependant que « *le niveau résistant identifié est avant tout dû à la porosité de l'éboulis* ». Des résistivités élevées enregistrées au début de l'été peuvent traduire la présence de glace de regel dans l'éboulis. Cette glace saisonnière peut en partie ou totalement fondre durant l'été. La répétition d'un sondage dans la partie basse du

Bois des Arlettes semble illustrer cette fonte (cf. chapitre 4.3). Cependant, la forte porosité doit permettre la circulation d'air froid et la formation d'un réservoir de frigories dont la température reste inférieure au point de congélation une bonne partie de l'année. Pour les éboulis froids, une nouvelle définition du pergélisol est peut-être nécessaire. Des forages seraient bien entendus indispensables pour venir confirmer ces hypothèses.

Les sondages réalisés dans la partie haute des éboulis donnent des résultats bien différents. La courbe de sondage est très aplatie et les valeurs de résistivité spécifique sont moindres. Elles peuvent cependant atteindre 20 k Ω m dans certains éboulis, probablement en raison d'une porosité élevée.

5.3.2 Glacier rocheux fossile

La forme en cloche, témoignant de la présence d'un niveau résistant, caractérise aussi les glaciers rocheux fossiles. Des mesures dans un éboulement végétalisé (la Pierreuse) ont donné le même profil. Un modèle à trois ou quatre couches a le plus souvent été adopté avec :

- 1a : Un sol organique de faible résistivité (2-3 k Ω m) d'environ un mètre d'épaisseur.
- 1b : Une couche de blocs grossiers avec des résistivités élevées allant de 10 à 100 k Ω m. L'épaisseur est de quelques mètres.
- 2 : 10 à 15 mètres de matériaux poreux avec des résistivités d'environ 10-15 k Ω m. La présence de sédiments gelés ne peut être exclue.
- 3 : Substratum (< 5 k Ω m généralement).

5.4 Synthèse

La circulation d'air se déroulant à l'intérieur d'un éboulis ou d'un glacier rocheux fossile peut être distinguée par différents indices. Les indices visuels permettent de détecter des sorties d'air chaud en automne et en hiver. Durant le printemps et l'été, une décharge gravitaire d'air froid permet l'installation d'une végétation atypique. Les méthodes thermiques nous renseignent sur les relations ayant lieu entre l'air extérieur et les circulations d'air des différents secteurs des formations grossières étudiées. La géoélectricité permet enfin de mieux comprendre la structure interne des éboulis et des glaciers rocheux fossiles. Ces différentes observations saisonnières et les mesures effectuées doivent permettre une meilleure compréhension du système. Les différents indices présentés dans ce chapitre sont résumés dans la figure 5.25 ci-dessous.



Figure 5.25 - Synthèse des différents indices visuels caractérisant un complexe éboulis - glacier rocheux fossile ventilé.

6. Mécanismes de circulation d'air

Couramment observées dans les réseaux souterrains, les circulations d'air constituent un facteur majeur du climat hypogé¹⁵. Le « *vent des ténèbres* » est également de plus en plus fréquemment signalé dans les formations sédimentaires grossières (éboulis, glacier rocheux) (eg. WAKONNIG 1996, SAWADA 2003, DELALOYE 2004, LAMBIEL 2006).

Les éboulis peuvent être considérés comme un réseau souterrain complexe avec de multiples entrées et sorties. Et comme le décrivent TANAKA ET AL. (2000) : « *there are plenty of spaces between rocks, but the space is too narrow for a person to walk as in the wind cave* ». WAKONIGG (1996) ainsi que DELALOYE (2004) assimilent le réseau des vides de pierrier à un tube à vent fonctionnant entre le haut et le bas de l'éboulis, et parcouru par un courant d'air dont le sens s'inverse en fonction du gradient thermique saisonnier (atmosphère interne de l'éboulis – air libre). HERZ ET AL. (2005) relèvent également que lorsque la surface est composée d'une accumulation de blocs poreuse, le transfert de chaleur se fait plus par convection que par conduction.

La question de ce « *souffle des cailloux* » est abordée par une présentation des paramètres thermodynamiques nécessaires (6.1). Nous analyserons ensuite de façon détaillée la ventilation des cavités souterraines (6.2) ainsi que l'évolution saisonnière des glacières (6.3). En utilisant les concepts physiques, les nombreuses observations réalisées dans les cavités souterraines, ainsi que les divers résultats acquis lors de notre recherche, les différentes causes et théories concernant le refroidissement des parties basses des éboulis proposées dans la littérature (eg. DE SAUSSURE 1873, WAKONIGG 1996, GUDE & MOLENDA 2000, HARRIS & PEDERSEN 1998, DELALOYE 2004) seront discutées (6.4). Une brève présentation de quelques exemples d'utilisation de la ventilation dans la construction conclura ce chapitre.

6.1 Paramètres physique et thermodynamique

Différents principes régissant la physique et la thermodynamique atmosphérique peuvent être appliqués au mécanisme de circulation d'air qui nous intéresse (FFME 2006).

Lorsqu'un déséquilibre thermique existe entre deux masses d'air – à l'intérieur et à l'extérieur de l'éboulis dans notre cas – une **convection** se produit en raison de différences de densité entre les masses d'air (l'air chaud aura tendance à monter, l'air froid à descendre). Ce mouvement d'air, consécutif à l'existence d'un gradient thermique, va donc essayer de rétablir un équilibre entre les masses d'air. En vertu de la loi de la continuité de masse, toute masse sortant d'un volume d'air doit être compensée par une masse d'air équivalente, à moins qu'un changement de densité n'intervienne.

L'air, à une température donnée, ne peut pas contenir plus qu'une certaine quantité de vapeur d'eau. L'humidité relative (rH) est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau (ou l'humidité spécifique) et la valeur à saturation. En ajoutant de l'humidité dans l'air ou en refroidissant une masse d'air, l'humidité relative augmente jusqu'à atteindre la saturation (rH = 100%). Lorsque l'humidité spécifique dépasse ce seuil, on atteint la saturation et les processus de condensation (changements de phase de l'eau) se mettent en œuvre. A partir de ce moment, la vapeur d'eau va se transformer en eau liquide ou, si l'on se trouve dans un environnement sous le point de congélation, en glace. Lors de changements de phases, les molécules H_2O subissent des modifications structurelles qui s'accompagnent de flux d'énergie (**chaleur latente**), qui sont libérés lors de la condensation (réchauffement du milieu environnant) ou absorbés par l'évaporation (refroidissement).

L'air chaud peut contenir plus de vapeur d'eau que l'air froid car la distance entre les molécules d'air est plus grande. De même l'air sec est plus dense que l'air humide, les molécules d'eau étant plus

¹⁵ Hypogé(e) : qui se développe sous terre.

légère que les molécules d'air (sec). L'air humide est également plus instable en raison de la chaleur latente (potentielle) qu'il contient.

L'air chaud et l'air froid se comportent un peu comme de l'huile et de l'eau. En effet, le mélange entre deux masses d'air avec des caractéristiques de température différentes est faible en raison de la mauvaise conductivité thermique de l'air. Ce dernier principe important explique notamment pourquoi l'air froid semble parfois « ramper » par terre.

6.2 Courants d'air dans les cavités souterraines

Moins connue que l'hydrologie des systèmes karstiques, l'aérologie du monde souterrain n'en demeure pas moins un phénomène complexe et déterminant du climat hypogé. LUETSCHER & JEANNIN (2004) suggèrent en effet que la distribution de la température dans les grottes est contrôlée par des effets de la ventilation. LISMONDE (2002) présente les nombreux phénomènes – très communs ou rares et uniques – liés à ces « vents des ténèbres ».

6.2.1 Origines des circulations d'air

MASSEN ET AL. (1998) relèvent que les courants d'air peuvent être provoqués par des différences de température (drainage gravitationnel ou effet cheminée), par l'influence du vent extérieur, par un changement de la pression atmosphérique, par l'entraînement de l'air par des circulations d'eau ou par un changement du volume de la cavité lorsqu'elle est inondée. Nous allons maintenant passer en revue ces différentes origines en essayant de relever leur importance pour le mécanisme de ventilation.

- LISMONDE (2002) signale que la plupart des courants d'air sont d'origine thermique, par l'intermédiaire d'un effet de cheminée dans des cavités à entrées multiples ou par des cellules de convection locales créées par des différences locales de températures. L'effet de cheminée est expliqué par la poussée d'Archimède. En effet, celle-ci fait monter dans la cheminée l'air chaud, dont la masse volumique est plus petite que celle de l'air froid. Le tirage de la cheminée (l'appel d'air) est d'autant plus fort que la différence thermique est élevée et que la cheminée est haute (ie. la dénivellation entre les deux entrées est plus importante, cf. 6.2.1.1). LISMONDE (2002) précise également qu'un réseau souterrain est un système à « mémoire ». En effet, le courant d'air, un jour donné, dépend essentiellement de la température des semaines précédentes.
- L'influence du **vent extérieur** est en revanche peu responsable, sauf quand il crée des surpressions et des cisaillements au voisinage des orifices (LISMONDE, 2002). Les vents soufflants directement dans la grotte peuvent cependant aussi affecter la température en forçant l'air extérieur dans le système (SMITHSON, 1991). L'entrée de la cavité doit alors se trouver dans l'axe des vents dominants.
- La mise en charge de réseaux souterrains **lors de crues ou l'entraînement par des cascades** peut également mettre en mouvement des masses d'air souterraines. Une crue fait également monter le niveau piézométrique, réduisant ainsi le volume d'air de la grotte. Il s'en suit une surpression (comme dans une marmite à vapeur) et une expulsion d'air parfois accompagnée de sifflements stridents (uniquement en soufflage).
- Des **fluctuations de la pression atmosphérique** provoquent un phénomène appelé « respiration des cavernes », si la grotte est de grand volume. Contrairement à la circulation induite par des différences de température, la respiration des cavernes est un phénomène périodique et non saisonnier, suivant très bien les variations de la pression atmosphérique (MASSEN ET AL. 1998). Ces trous sont couramment appelés des « soufflards ». Dans les réseaux géants de Jewel Cave et Wind Cave (Dakota du Sud), lorsque la pression atmosphérique chute, les gouffres soufflent (par exemple, lors de l'approche d'un orage). Inversement lorsque la pression atmosphérique augmente, les gouffres aspirent, l'air étant un

fluide compressible alors que la grotte est incompressible (LISMONDE, 2002). Selon MASSEN ET AL. (1998), la densité de l'air dépendrait principalement de la pression atmosphérique et dans une moindre mesure de la température de l'air.

6.2.1.1 Vitesse du courant d'air

Le moteur de la circulation d'air est le **gradient de pression motrice** (ΔP_m). En considérant l'absence de concentration de CO₂ dans l'atmosphère de la cavité, une approximation du gradient de pression motrice est donnée par l'équation (5) (LISMONDE 2002b, cité par LUETSCHER 2005) :

$$\Delta P_{m} \approx \rho_{0} \underbrace{p_{g}}_{p_{0} 273} (\theta_{int} - \theta_{ext}) H$$

$$(5)$$

$$/ ephémère / saisonnier / fixe /$$

Avec ΔP_m : pression motrice [Pa], ρ_0 : densité moyenne de l'air [1,293 kg/m⁻³ à 273 K], p : pression de l'air de la cavité [Pa], p₀: pression de l'air à la surface [Pa], g : accélération de la pesanteur [9,81 m/s⁻²], θ_{int} : température moyenne de l'air de la grotte [°C], θ_{ext} : température moyenne de l'air à la surface [°C], H : différence d'altitude entre les deux entrées [m].

De nombreux auteurs (eg. LISMONDE 1981, OHATA ET AL. 1994, LISMONDE 2002) ont mis en évidence le rôle principal de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la cavité comme cause principale de la mise en mouvement de l'air. L'hygrométrie intervient d'une manière secondaire.

La vitesse du flux d'air est déterminée par un gradient de pression résultant d'une différence de température. Dans le cas d'un réseau souterrain à deux ouvertures, LISMONDE (1981) propose une formulation mathématique déterministe complexe que nous ne présenterons pas ici. Une équation (ultra-)simplifiée est tout de même proposée (6) :

$$U_{\rm max} = 0.3 \ \sqrt{(\Delta T \ H)} \tag{6}$$

Avec U_{max} : vitesse maximale de la section la plus étroite, ΔT : différence des températures, H: dénivellation entre les deux entrées. 0,3 : constante déterminée empiriquement (l'auteur ne précise cependant pas comment elle a été déterminée).

D'une façon simplifiée, la vitesse maximale dépend essentiellement de la dénivellation entre les deux entrées. Pour une formulation plus précise, mais aussi plus complexe, il faudrait encore prendre en compte les pertes de charges dues aux frottements visqueux à la paroi d'un conduit et aux singularités géométriques (rétrécissement brusque, élargissement) (LISMONDE, 1981).

OHATA ET AL. (1994) proposent également une équation linéaire simple permettant de lier la vitesse du flux d'air et la différence de température dans le cas d'un piège à air froid (7) :

$$\mathbf{U} = \mathbf{c} \,\sqrt{\Delta \mathbf{T}} \tag{7}$$

Où U : vitesse [m/s], c : coefficient dépendant de la structure de la cavité (défini par ATKINSON ET AL. 1983), $\Delta T = T_{air outside} - T_{air cave}$.

Dans les deux cas, **plus l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur de la cavité est grand, plus la vitesse est élevée**. La vitesse du courant d'air suit la variation de la température extérieure avec parfois un certain décalage temporel. Les gradients de température les plus élevés et donc les vitesses maximales se rencontrent généralement à l'aube (OHATA ET AL., 1994).

Les courants d'air souterrains atteignent couramment des vitesses de 1 m/s (3.6 km/h) dans les resserrements de cavités dénivelées de montagne et 0.1 m/s (0.36 km/h) dans les cavités de plaine (LISMONDE 2002). Les courants d'air peuvent cependant atteindre les 10 m/s (36 km/h), principalement lorsqu'ils sont engendrés par des cascades. Le 11 août 1970, BAKALOWICK a mesuré

des vitesses record de 166 km/h (46 m/s) dans un rétrécissement de la grotte de Pinargözü en Turquie (LISMONDE, 2002).

6.2.1.2 Réversibilité du courant d'air

Une variation progressive de la pression motrice, résultant d'une variation progressive de la température extérieure, de part et d'autre de la valeur zéro [Pa] se traduit par une variation brutale de la vitesse (LISMONDE, équation (8) p. 40, 1981). Le renversement du courant d'air dans un système à deux ouvertures est donc un phénomène rapide (de quelques secondes) (figure 6.1). Ce cas de figure s'observe lorsque la température moyenne de l'air extérieur (mais très variable dans une période journalière) est proche de la température de la cavité. LISMONDE (2002) signale en outre que le renversement d'un courant d'air est plus fréquent que son annulation pure et simple.



Figure 6.1 – Renversement brutal du courant d'air (U) en fonction du gradient de température (ΔT). (d'après LISMONDE, 1981)

Un arrêt brutal de la circulation d'air peut cependant être observée lorsqu'un bouchon est établi sur le parcours, par exemple par le remplissage d'un siphon suite à un orage, par la fermeture d'une porte ou un éboulement.

6.2.2 Grottes à une seule entrée

Les cavités en pente et à une seule entrée constituent des pièges thermiques. Les pièges à air (froid ou chaud) se caractérisent par un comportement double en système ouvert (échange d'air par convection) et fermé (stratification thermique) (figure 6.2). La structure de la cavité constitue un facteur primordial pour le comportement thermique.

Le porche d'entrée de la grotte Roche dans le Vercors se situe à une altitude inférieure du fond de la cavité. Par conséquent, cette grotte fonctionne en système ouvert durant l'été, alors que l'hiver se caractérise par une stratification thermique stable avec une température interne chaude (+8°C alors qu'il gelait dehors). « *Les hommes préhistoriques qui utilisaient les cavernes du Vercors comme abri de chasse devaient connaître ces propriétés* » (LISMONDE, 2002).

À l'inverse, un piège à air froid fonctionne comme un système ouvert en hiver, l'air extérieur envahit la cavité et la (ré)alimente en air froid. **Les parois de la grotte emmagasinent par conduction le froid apporté par le courant d'air.** En été en revanche, une stratification thermique s'installe en raison de la différence de densité, maintenant une température froide à l'intérieur de la grotte ($T^{\circ}_{grotte \acute{ete}}$ < MAAT). OHATA ET AL. (1994) relèvent une température estivale se maintenant autour de 0°C, alors que la MAAT à la surface est de +8.4°C dans une grotte du Mt. Fuji (1'120 m.s.m., Japon). Ce processus demeure le plus fréquent pour la formation des glacières (LUETSCHER, 2005).

Dans la glacière de Monlési (Jura suisse), des masses d'air froid s'engouffrent dans un large puits en hiver, sont réchauffées au contact de la glace et de la roche et ressortent par deux petits puits. En



revanche, durant l'été, cette ventilation se résume à un faible courant d'air oscillatoire (LUETSCHER, 2005).

Figure 6.2 – Modèle simplifié des pièges thermiques : A) Piège à air chaud avec $MAAT_{cavité} > MAAT_{air extérieur}$; B) Piège à air froid avec $MAAT_{cavité} < MAAT_{air extérieur}$, si le refroidissement est inférieur au point de congélation et que de l'eau est disponible, la formation d'une glacière est possible. (d'après LISMONDE 2002 & LUETSCHER 2005)

LISMONDE (2002) précise que le phénomène est cependant plus complexe. En effet, une instabilité convective peut se créer si la température de la grotte décroît plus vite que l'atmosphère adiabatique de référence. De plus, une différence de composition entre l'air intérieur et l'air extérieur peut compliquer l'analyse. Des circulations d'eau proche de la surface peuvent enfin venir perturber la stratification thermique par la mise en mouvement des masses d'air.

6.2.3 Grottes à plusieurs entrées (tube à vent)

Si la grotte possède plus d'une entrée, une convection forcée qui s'inverse selon la saison peut être établie en raison d'une différence de densité entre l'air extérieur et l'air de la cavité. C'est le principe du **tube à vent** (figure 6.3).

Durant l'hiver, en raison de l'ascendance de l'air « chaud » de la cavité, de l'air froid est aspiré à l'entrée inférieure ($\Delta P_m > 0$) gelant les eaux d'infiltration et refroidissant les parois de la cavité. En été, le processus est inversé ($\Delta P_m < 0$) et de l'air chaud extérieur 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 MAAT.

La convection forcée peut se dérouler même si la différence d'altitude entre les entrées de la grotte est négligeable. Cependant LUETSCHER (2005), s'appuyant sur les résultats de son modèle de bilan d'énergie pour les glacières, suggère **que le refroidissement est bien plus efficace avec l'effet de cheminée** qu'avec un simple piège à air froid lorsque la température de l'air extérieur est inférieur à la température de l'air à l'intérieur de la cavité.



Figure 6.3 – Tube à vent. Durant l'hiver, lorsque la température extérieure est inférieure à celle de la cavité, l'air « chaud » de la grotte s'élève et est remplacé par l'aspiration d'air froid à l'entrée inférieure. Le processus est inversé durant l'été. Comme plus d'énergie est stockée sous la forme de glace (chaleur latente) que dans la roche (chaleur sensible), l'anomalie thermique est plus importante à l'entrée inférieure (où de la glace est présente). (*source* : LUETSCHER 2005)

En vertu de la loi de continuité de masse, la somme des débits entrants devrait être égale à la somme des débits sortants. Des mesures effectuées par LISMONDE (2002) dans le réseau de la Dent de Crolles (Massif de la Chartreuse, France) le 18 août 1993 ont cependant relevé que les débits entrants mesurés représentaient uniquement 1/20 des débits sortants ! Ce déséquilibre peut s'expliquer de plusieurs façons : d'une part le sommet de la Dent de Crolles est très lapiazé (circulation diffuse) et d'autre part les trous souffleurs sont plus faciles à détecter que les trous aspirateurs. En effet, le visage ou la main sont plus sensibles aux différences thermiques qu'à la vitesse du courant d'air, et les trous aspirant possède la même température que l'air extérieur. Des trous soufflant ou aspirant toute l'année traduisent l'existence d'une ouverture intermédiaire dans un système ventilé à trois entrées ou plus (LISMONDE, 2002).

6.2.4 Glacières ou grottes glacées

Les glacières sont souvent associées à des anomalies thermiques induites par des circulations d'air. Si MAAT de la grotte est inférieur à 0°C, la préservation de la glace est possible. THURY en 1861 (cité par LUETSCHER 2005), puis LEE (1926) notamment, attribuaient déjà à la circulation d'air froid un rôle capital à la présence et la préservation des glacières de basses et moyennes altitudes. LEE (1926) suggère même que les glacières ont pu être des refuges privilégiés pour les indiens du Nouveau Mexique en raison de la présence d'eau potable.

Les **glacières** sont donc des grottes renfermant de la glace pendant toute l'année. On peut en distinguer trois types (DYSLI & LUETSCHER 2003) :

- **Dynamique** : Elle possède plusieurs entrées et à des altitudes différentes, ce qui permet la mise en place de circulation d'air par effet cheminée. Durant l'hiver, de l'air froid est aspiré par l'entrée inférieure. En été, une décharge gravitationnelle d'air froid se produit à l'entrée inférieure.
- **Piège à neige** (statique) : La neige tombée en hiver au travers d'un orifice se transforme petit à petit en glace. Les mouvements d'air sont très faibles à l'intérieure de la grotte et l'isolation de la cavité est constituée par la roche encaissante et par la forêt qui recouvre presque toujours les alentours de la cavité et qui protège la glacière du rayonnement solaire.
- **Piège à air froid** (statique) : Elle est constituée par une galerie ou un puits fermé à son extrémité inférieure et formant une poche à air froid. L'air froid qui s'y accumule pendant l'hiver provoque le gel des eaux de fonte qui s'y écoule au printemps, formant ainsi de la glace qui peut persister toute l'année.
6.3 Evolution saisonnière des glacières

Suivant la configuration de la cavité, les circulations d'air peuvent mener à une modification du climat souterrain en créant des anomalies thermiques positives (piège à air chaud) ou négatives (piège à air froid, tube à vent). C'est surtout le courant d'air aspirant qui apporte des modifications au climat souterrain. Le courant d'air soufflant (expulsion) traduit en effet les conditions présentes à l'intérieur de la cavité. Un courant d'air froid refroidit et dessèche les parois, un courant d'air chaud les réchauffe et les humidifie (LISMONDE 2002).

La formation et la préservation des glacières (et des anomalies thermiques) sont liées aux échanges d'air entre l'extérieur et l'intérieur de la grotte, ainsi qu'aux apports d'eau (FORD & WILLIAMS, 1989). D'autres facteurs sont cependant importants, comme l'intensité du refroidissement hivernal, la structure de la grotte (nombre d'entrées notamment), l'exposition, la couverture végétale et l'humidité (OHATA ET AL., 1994). Il existe plusieurs autres façons de transférer de la chaleur dans une cavité : par conduction au travers de la roche située au-dessus (réchauffée par le rayonnement solaire) et située au-dessous (flux géothermique), par la convection d'air et par des apports d'eau (OHATA ET AL. 1994, LUETSCHER 2005).

Contrairement aux éboulis, la prise de mesures *in situ* est relativement aisée dans une cavité souterraine. Nous allons maintenant présenter l'évolution saisonnière des conditions thermiques et hydriques (formation de la glace, évaporation) à l'intérieur d'une glacière.

6.3.1 Conditions hivernales

6.3.1.1 Refroidissement

Le bilan de masse d'une glacière reflète principalement les conditions atmosphériques hivernales extérieures. Les circulations d'air hypogées jouent un rôle majeur dans la formation et la conservation de la glace souterraine (LUETSCHER, 2005). La quantification des échanges de chaleur dans la Glacière de Monlési (Jura suisse) a permis de démontrer que le bilan de masse de la glace souterraine est tributaire du refroidissement hivernal induit par les circulations d'air responsable de 70% des pertes de chaleur, et de la chaleur latente liée aux accumulations de neige hivernale à la base des puits d'entrée (LUETSCHER, 2005). OHATA ET AL. (1994) relèvent également que le courant hivernal sec et glacé est l'élément principal du bilan d'énergie, les processus de fonte et de gel, ainsi que les flux géothermiques étant d'intensité moindre. Le climat estival a en revanche une faible influence sur le bilan de masse de la glace.

L'air froid extérieur commence à pénétrer dans les cavités à partir d'un certain **seuil thermique**. Dans une grotte du Peak Disctrict de Derbyshire (Royaume-Uni), lorsque la température extérieure descend sous 7°C, de l'air froid pénètre dans la grotte (SMITHSON, 1991). Dans une grotte glacée du Mt.-Fuji (Japon, 1'020 m.s.m., MAAT = 8.4° C) fonctionnant en piège à air froid, OHATA ET AL. (1994) ont observé que lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à -2.5°C en hiver, l'air froid commence à pénétrer dans la grotte. Le seuil d'aspiration d'air varie donc en fonction de conditions topo-climatiques de la grotte.

La température de l'air à l'intérieur de la grotte suit la tendance de la température extérieure durant la saison froide, bien que les variations à court terme soient amorties et que la température minimale soit décalée.

6.3.1.2 Assèchement des parois

Lorsqu'il pénètre dans un réseau souterrain, l'air froid extérieur abaisse la température de la grotte (air et roche). L'air qui pénètre dans la grotte durant l'hiver va également se réchauffer au contact de la roche et en se mélangeant à l'air (plus chaud) de la grotte. **Suite à la baisse de son humidité relative** (consécutive à son réchauffement), **il va devenir encore plus sec, augmentant ainsi l'assèchement de la grotte et la sublimation de la glace**. Cet air plus sec évapore donc l'humidité des parois de la cavité, refroidissant encore plus vite la grotte (par absorption de chaleur latente) (STOEVA & STOEV, 2005). Ce phénomène semble d'autant plus marqué que le gradient thermique est fort (DELALOYE 2004).

Les conditions les plus sèches en hiver se rencontrent donc proche de l'entrée où l'air froid de l'hiver pénètre dans la grotte (FORBES, 1998). Les grottes s'assèchent donc en hiver. Le dessèchement d'une cavité par un courant d'air aspirant l'hiver peut dépasser le kilomètre, comme cela a pu être observé au Trou qui Souffle (Isère, France) (LISMONDE, 2002).

Par principe, le refroidissement d'une masse d'air s'accompagne d'une augmentation de son humidité relative. Cependant, FORBES (1998) signale que lorsque l'air extérieur est bien plus froid et plus sec que l'air de la grotte, une baisse simultanée de la température et de l'humidité relative peut s'observer dans la cavité. L'air extérieur refroidit et assèche en même temps le climat souterrain.

6.3.1.3 Evaporation et sublimation

Les échanges de chaleur latente associés à la circulation hivernale d'air sont supposés être un facteur majeur du bilan énergétique d'une glacière. Les changements de phases en lien avec la sublimation et l'évaporation accroissent encore le refroidissement de la grotte durant la période « ouverte » (cf. 6.2.2). Les mesures effectuées à la glacière de Monlési montrent que les échanges de chaleur latente équivalent à peu près les flux de chaleur sensible induits par la circulation d'air ; la sublimation associée à la ventilation constitue dès lors un élément majeur de l'échange thermique affectant la cavité (LUETSCHER, 2005).

Lorsque l'atmosphère n'est pas saturée, un plus grand nombre de molécules d'eau quitte la glace en direction de l'air. La chaleur latente de sublimation est de 2'590 kJ kg⁻¹. LAW & DIJK (1994) ont montré que plus la température est basse, plus le taux de sublimation est faible. Ainsi, un taux élevé de sublimation a été mesuré entre -1 et -4°C, ce taux décroissant rapidement lorsque la température est inférieure à -4°C pour devenir quasi-inexistant sous -12°C. Différentes explications sont reprises par LAW & DIJK (1994) : à des températures très froides, le mouvement de la vapeur d'eau par diffusion est réduit et une plus grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente de sublimation. Lorsque rH = 100%, la sublimation ne peut pas se produire. La vitesse du courant d'air (agent de transport) est également un facteur important, puisqu'elle détermine le taux d'échange de molécule d'eau entre l'air et la glace. Lorsque sa vitesse augmente, le taux de sublimation augmente, d'autant plus que le vent est sec (LAW & DIJK 1994).

6.3.2 Formation de la glace

La cristallisation de la glace peut être due à trois processus : diagenèse d'accumulation de neige (névé), gel des eaux d'infiltration (glace de congélation), gel des eaux de condensation (givre). Le seul critère indispensable à la formation de la glace est la présence de quantités suffisantes d'eau.

L'existence d'une glacière est limitée aux emplacements où l'infiltration est diffuse plutôt que concentrée et où les taux d'infiltration ne sont pas trop élevés (ie. la chaleur advectée par l'eau est

limitée). Les observations de terrain ont montré que la glace se forme lorsque des eaux froides d'infiltration (par exemple eau de fonte ou de pluie) pénètrent dans la grotte dont la température est encore inférieure à 0°C. Les conditions favorables se rencontrent **principalement au début du printemps**, lorsque des nuits glaciales succèdent à des journées plus chaudes, ainsi qu'en **périodes hivernales de redoux** permettant la percolation de l'eau de pluie ou de fonte dans un environnement sur-refroidi (LUETSCHER, 2005).

Durant l'hiver, du givre temporaire avec des cristaux de glace hexagonaux est observé dans de nombreuses entrées de grotte où de l'air chaud circule sur un substratum gelé. Le givrage montre alors que le courant qui remonte s'est chargé en humidité dans la cavité (LISMONDE 2002).

Ainsi, ce résultat suggère que des hivers doux sont plus favorables pour la formation de la masse de glace que des hivers très froids. Contrairement aux eaux d'infiltration, les amoncellements de neige à l'entrée de la grotte sont un facteur majeur dans le bilan énergétique, puisqu'ils favorisent la conservation pérenne du corps de glace (c'est le cas pour la glacière de Monlési, LUETSCHER, 2005). Une végétation dense limite également le rayonnement solaire direct et permet de conserver les accumulations de neige.

OHATA ET AL. (1994) relève également que l'intensité du gel est maximale de mars à avril, puis décroît jusqu'en juillet (dans une grotte du Mt.-Fuji, Japon). Il existe donc un **décalage temporel** entre la période la plus froide et la période de formation de la glace.

6.3.3 Fonte de la glace

La formation de la glace continue jusqu'à ce qu'un équilibre thermique soit atteint dans la cavité ; le bilan énergétique entre les flux réchauffant et refroidissant la cavité est alors équilibré. Cette phase se produit autour de la mi-juin dans la glacière du Monlési. Dès lors, chaque quantité de chaleur entrant dans la grotte contribue à la fonte de la glace. Cependant comme les échanges avec l'air extérieur sont réduits en été, dus au piège à air froid, la fonte est généralement provoquée par les eaux de percolation (lors d'orages par exemple) et par les flux géothermiques. Des conditions climatiques estivales chaudes mais sèches sont donc favorables à la conservation de glace.

La fonte basale de la masse de glace est provoquée par le flux géothermique, qui apporte une quantité significative mais constante d'énergie dans le système (LUETSCHER, 2005). La présence d'éboulis entre la glace et la surface de la grotte permet une circulation d'air qui va drainer les flux de chaleur provenant du sol et limiter la fonte basale. OHATA ET AL. (1994) n'attribuent en revanche pas un rôle majeur à la fonte basale sur leur site d'étude.

Contrairement aux glaciers alpins, les conditions estivales ne jouent donc pas un rôle majeur dans le bilan de masse des glacières. L'été 2003 n'a pas été suivi par une augmentation significative de la fonte dans la Glacière de Monlési (LUETSCHER, 2005).

Les conditions saisonnières à l'intérieur d'une glacière et les mécanismes (notamment la ventilation) expliquant la formation et la conservation de masses de glace peuvent servir à la meilleure compréhension des causes du refroidissement des éboulis froids.

6.4 Causes du refroidissement des éboulis froids

De nombreuses descriptions historiques ont déjà attiré l'attention sur d'étonnants courants d'air froid, sur la formation de glace ainsi que sur l'existence de végétation azonale dans les parties basses d'éboulis de basse altitude (eg. DESAUSSURE 1783, BÄCHLER 1946, WAKONIGG 1996). Dans la région du Laux Montaux (Baronnies, Drôme, France ; 1'040 m.s.m.), l'ouverture d'une carrière dans un éboulis a révélé en plein été la présence de glace qui gênait considérablement l'extraction des matériaux (DESCROIX 1993). Le même problème s'est présenté lors du creusement d'un talus

d'éboulis pour la construction d'une route au Japon (< 1'000 m.s.m.) (SONE 2005). La toponymie d'un certain nombre d'éboulis de basses altitudes fait également référence à la présence de glace : Le « Glacier » dans la Combe Obscure (Baronnies, Drôme, France ; 1'040 m.s.m.) (DESCROIX 1993), la « Eislöcher » d'Eppan (Süd Tyrol, 570 m.s.m.), la « cave à glace » (*Eiskeller*) dans les Matzen (Autriche, 1'100 m.s.m.), le « *Toteisboden* » dans l'Untertal (Autriche, 1'000 m.s.m.), le « trou à glace » (*Eisloch*) dans le Seebachtal (Autriche, 1'300 m.s.m.) (WAKONIGG 1996), la « Glacière » de Ban-sur-Meurthe et Clécy dans les Vosges (France, 680 m.s.m.), la « Ice Valley » en Corée du Sud (TANAKA ET AL. 2000). De tels phénomènes, connus ou analysés depuis plusieurs centaines d'années, ne sont l'objet d'études détaillées que depuis peu (eg. SAWADA 2003, DELALOYE 2004, LAMBIEL 2006). L'origine de l'anomalie thermique négative présente dans les parties basses des éboulis a suscité de nombreuses hypothèses.

6.4.1 Déficit d'ensoleillement

La plupart des 36 éboulis froids investigués en Suisse par RIST ET AL. (2003) se trouvent dans des versants ombragés orientés au nord. Le modèle de distribution du pergélisol PERMAMAP utilisant le rayonnement solaire potentiel direct et MAAT (fonction de l'altitude) montre l'existence possible de pergélisol à basse altitude dans les versants ombragés situés au nord de hautes parois (HOELZLE ET AL. 2001). Le déficit d'ensoleillement a alors été considéré comme cause principale du refroidissement.

Cependant, RUZICKA (1999) ainsi que les résultats de nos recherches montrent que la présence d'éboulis froids est indépendante de l'orientation. Des éboulis contenant du pergélisol ont également été identifiés dans des versants sud (par exemple, l'éboulis de Klic en Tchéquie, GUDE ET AL. 2003). Les observations réalisées dans de nombreux sites des Préalpes romandes dans le cadre de ce travail de diplôme viennent confirmer cet état de fait (cf. chapitre 4) : **les éboulis froids ne sont pas limités aux versants très peu ensoleillés** ! RIST ET AL. (2003) concluent également suite à l'analyse de 10 sites d'épicéas nains en Suisse, que les différences dans le bilan d'énergie entre l'éboulis froid et son environnement immédiat sont infimes.

Le faible ensoleillement d'un site n'est donc pas le facteur principal du refroidissement de la partie basse des éboulis, zone la plus ensoleillée du versant lorsque l'éboulis est orienté au nord. Le flux d'énergie solaire peut certes influencer le bilan d'énergie en particulier le niveau de température général du système, mais dans le cas d'un système de ventilation, il n'est qu'un facteur secondaire.

6.4.2 Balch Effect

Etablie par BALCH (1900, cité par HARRIS & PEDERSEN, 1998), cette théorie est basée sur le principe que l'air froid est plus dense que l'air chaud et qu'il tend à déplacer l'air chaud dans les interstices des matériaux grossiers. Dans une couche de blocs superficiels, l'air peut se déplacer facilement sous la forme de cellules de convection (Balch Effect) contrôlées par des contrastes de températures (DELALOYE & LAMBIEL 2005). Le Balch Effect ne peut cependant que se dérouler dans des matériaux à gros blocs et aux endroits où l'air peut facilement pénétrer les pores en hiver (ie. où le couvert neigeux est limité) (ISHIKAWA 2003). HEGGEM ET AL. (2005) expliquent la présence de cheminée de fonte sur un glacier rocheux en Norvège par ce processus. Les indices décrits par HEGGEM ET AL. (2005) font cependant plutôt penser à un mécanisme d'effet de cheminée.

6.4.3 Evaporation estivale

En 1796 déjà, DE SAUSSURE avait attiré l'attention sur le rôle de l'évaporation comme cause du refroidissement (*Verdunstungskälte*). Pour qu'une substance matérielle homogène (dans notre cas, de l'eau) puisse passer d'un état physique à un autre, il faut qu'une certaine quantité d'énergie sous forme

de chaleur latente lui soit apportée (évaporation) ou retranchée (condensation). Lors de l'évaporation de l'humidité de la roche ou de la sublimation de masses de glace, le milieu environnant (air) lui fournit cette énergie et devient donc plus froid. Lorsque l'air devient saturé, il ne peut plus se refroidir entraînant l'arrêt de l'évaporation de l'humidité de la roche ou de la sublimation de la glace. Une expérience très simple menée par DE SAUSSURE (1796) permet d'illustrer ce processus : un courant d'air sec à 18°C provoqué par un gros soufflet se refroidit en traversant un tube de verre rempli des fragments de pierre mouillée ; la température n'est plus que de 15°C à la sortie du tube.

L'hypothèse du refroidissement causé par une évaporation estivale absorbant de la chaleur latente a trouvé pendant longtemps un large écho (SCHAFTLEIN 1962, FURRER 1966, SCHINDLER et al. 1976, ZIMMERMANN 1989 (cités par WAKONIGG 1996), GUDE & MOLENDA 2000). De nombreuses théories – parfois un peu déconcertantes – ont ainsi été proposées :

HÖLZL (1882) et CANAVAL (1893) (cité par WAKONIGG 1996) parlent d'évaporation rapide durant les périodes chaudes qui provoquerait un refroidissement par absorption de chaleur latente. Selon PLATTER (1896) (cité par WAKONIGG 1996), « *les glaçons proviennent de l'évaporation d'un courant d'air humide passant dans les fissures et les vides de l'éboulis* ». GSELL-FELS (1898) (cité par WAKONIGG 1996) considère même la chaleur extérieure comme responsable de l'évaporation rapide et du refroidissement sous le point de congélation. KYRLE (1923) (cité par WAKONIGG 1996) pensait qu'une évaporation relativement importante serait à mettre en relation avec un fort courant passant au travers de l'éboulis, mais uniquement si « *le vent diurne entrant dans l'éboulis est relativement sec* ». SCHAFTLEIN (1963) (cité par WAKONIGG 1996) considère encore la saturation de l'air et la différence de pression de vapeur (*Dampfdruckgefälle*) comme facteurs contrôlant et limitant l'évaporation estivale.

FINK (1989) (cité par WAKONIGG 1996) explique la forte humidité de l'air sortant de l'éboulis en été par le contact avec de la glace, le ruissellement des eaux de fonte et l'humidité de la roche. Cette humidité serait alors évaporée lorsque qu'elle entrerait en contact avec de l'air extérieur plus sec, ce qui contribuerait à maintenir un sol gelé toute l'année. Cependant cette hypothèse de l'évaporation provoquée par le mélange entre deux masses d'air ayant une humidité relative fortement différente ne semble pas pertinente et n'explique aucunement le sur-refroidissement de l'éboulis. STEINER (1992) (cité par WAKONIGG 1996) considère que de l'air chaud et humide aspiré à l'intérieur de l'éboulis doit subir une phase de condensation. Cette suggestion est reprise par FRANEK (1995) (cité par WAKONIGG 1996) qui affirme que « *aux sorties d'air de l'éboulis, une condensation de l'eau se produit en raison du refroidissement provoqué par l'évaporation* ».

Sur la base de mesures thermiques et d'observations de glace et de sol gelé, un modèle microclimatique (figure 6.4) a été élaboré par GUDE & MOLENDA (2000) considérant l'éboulis dans son contexte énergétique. Cette théorie émet l'hypothèse d'une condensation hivernale et d'une évaporation, respectivement une sublimation estivale provoquée par la circulation d'air à l'intérieur de l'éboulis. Ces différents changements de phase provoquent également des flux de chaleur latente qui renforcent le gradient de chaleur sensible (et donc l'intensité du courant d'air) existant entre l'air extérieur et l'air dans l'éboulis. Un réchauffement effectif a donc lieu en hiver lors des phases de condensation, alors qu'un refroidissement effectif a lieu en été lors des phases d'évaporation/sublimation. Lors des phases de transition (printemps et automne), une stagnation de l'air semble dominer en raison d'un faible gradient thermique. De plus GUDE & MOLENDA (2000) précisent que l'arrêt printanier s'expliquerait par le remplissage de glace des espaces poreux dans la partie inférieure de l'éboulis.

Mikroklimamodel						
Frühling	Sommer	Herbst	Winter			

Stagnation	Positive Wärmebilanz	Stagnation Negative Wärmebilanz		
Der geringe Temper- aturgradient zwischen Atmosphäre und Hal- denkörper verhindert die Luftströmung und es findet kaum Wärmeaustausch mit der Atmophäre statt.	Der grosse Temperaturgradient gegenüber der Atmosphäre bewirkt eine starke Strömung durch den Haldenkörper. Die Sublimation beim Abbau des Eises verursacht weitere Abkühlung und damit eine Verstärkung des Temperatur- gradienten.	Der geringe Temper- aturgradient zwischen Atmosphäre und Hal- denkörper verhindert die Luftströmung und es findet kaum Wärmeaustausch mit der Atmophäre statt.	Der grosse Temperaturgradient gegenüber der Atmosphäre bewirkt eine starke Strömung durch den Haldenkörper. Die Kondensation beim Aufbau des Eises verursacht weitere Erwärmung und damit eine Verstärkung des Temperatur- gradienten.	
Eiskörper	·			

Figure 6.4 – Modèle micro-climatique décrivant le comportement thermique d'un éboulis. (source : GUDE & MOLENDA 2000)

Cependant WAKONIGG (1996) et DELALOYE (2004) critiquent sévèrement cette théorie de l'évaporation estivale. CRAMMER en 1899 (cité par WAKONIGG 1996) déjà parlait d'évaporation durant les périodes froides, bien qu'il considère l'ampleur de l'évaporation estivale comme non négligeable. BOCK (1913, cité par WAKONIGG 1996) affirme également que « *en été de la chaleur est libérée par la condensation de la vapeur d'eau et non pas absorbée par l'évaporation* »

Ainsi, comme nous l'avons vu pour les glacières, « s'il y a évaporation (sublimation) de l'humidité (glace) du sol, elle se produit durant l'hiver lorsque l'air froid (et sec) est introduit dans l'éboulis, (...) l'été est quant à lui caractérisé par la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air chaud et des eaux de fonte qui pénètrent dans le terrain refroidi » (DELALOYE 2004). Les nombreuses observations réalisées lors de notre recherche ont également montré que les trous d'aspiration d'air froid hivernal se caractérisent par un sol absolument sec. Une translation doit donc être appliquée au modèle de GUDE & MOLENDA (2000) avec un refroidissement et un assèchement (par évaporation et sublimation) du terrain durant l'hiver et la formation de glace durant la fonte des neiges au printemps et au début de l'été. La glace formée proche de la surface et jusqu'à une certaine profondeur (à déterminer et probablement variable selon les années) va ensuite partiellement disparaître durant la fin l'été et l'automne.

6.4.4 Tube à vent (effet de cheminée)

En 1796, DE SAUSSURE supposait déjà que « *l'évaporation ne suffit pas pour expliquer un refroidissement de 7 à 8 degrés au-dessous du tempéré* » et que la pénétration d'air froid hivernal à l'intérieur « *d'un grand réservoir souterrain et assez rapproché de la surface de la terre* » expliquerait en partie les conditions froides observées. De même, BOCK (1913, cité par WAKONIGG 1996) considère que l'évaporation participe au refroidissement durant l'hiver, mais que le refroidissement « normal » est provoqué par le gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis.

BERTINELLI ET AL. (1993), WAKONIGG (1996), HARRIS & PEDERSEN (1998) ainsi qu'ISHIKAWA (2003) notamment considère que l'air chaud dans l'éboulis est déplacé par la pénétration d'air extérieur plus froid. Cependant, selon LISMONDE (2002) et DELALOYE (2004), l'ascendance d'air « chaud » vers les parties supérieures de l'éboulis est bel et bien la cause de la pénétration (aspiration) d'air froid dans ses parties inférieures. Ce processus, basé sur le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis, fonctionne d'autant mieux que l'air extérieur est froid.

L'étude des connaissances thermodynamiques des glacières dynamiques nous permet alors de considérer la circulation d'air par effet de cheminée (tube à vent) comme un élément fondamental expliquant le refroidissement des parties basses des éboulis. Le mécanisme de ventilation a été décrit

au chapitre 2.1. Nous ne nous intéresserons donc ici qu'à son implication sur l'évolution du refroidissement du terrain.

a) <u>Refroidissement et assèchement (par sublimation et évaporation) durant l'hiver</u>

En hiver, l'air à l'intérieur de l'éboulis, relativement plus chaud (et donc plus léger) que l'air extérieur, subit un mouvement ascendant et est expulsé dans les parties supérieures. En conséquence de l'air froid extérieur est aspiré dans l'éboulis par les ouvertures inférieures. Cet effet de cheminée « enlève de la chaleur » à l'éboulis d'une part en introduisant de l'air externe froid, et d'autre part en provoquant l'évaporation (sublimation) de l'humidité du sol (absorption de chaleur latente) (WAKONIGG 1996). L'éboulis profite donc de toutes les périodes froides de l'hiver pour se refroidir sous le point de congélation. Ce processus est très efficace dans des matériaux grossiers et semble pouvoir refroidir le terrain adjacent (GORBUNOV ET AL. 2004) et sous-jacent jusqu'à 15 mètres de profondeur au moins (DELALOYE 2004). Dans la Combe Obscure (Drôme, France), BERTINELLI ET AL. (1993) signalent que les conditions micro- et pédo-climatiques fraîches (qu'ils qualifient de « paraglaciaires ») débordent de l'éboulis proprement dit, attestant un refroidissement adjacent.

b) Formation de glace interstitielle au printemps (lors de la fonte des neiges)

Au printemps, le système se caractérise potentiellement par des changements journaliers dans la direction de la circulation. En effet, l'aspiration d'air froid (la nuit et le matin) diminue de plus en plus dans les parties basses au fil de la saison. En revanche, des sorties d'air froid s'y produisent durant les heures chaudes de la journée en augmentant à l'approche de l'été. Lors de la fonte des neiges, de l'eau liquide circulant plus ou moins librement à l'intérieur de l'éboulis regèle au contact des zones sur-refroidies de l'éboulis (glace de congélation) aussi longtemps que la température se maintient sous 0°C (WAKONIGG 1996). La quantité de glace formée dépend de l'importance du réservoir de froid (énergie négative) constitué durant l'hiver et emmagasiné dans les blocs et le terrain sous-jacent, ainsi que de l'intensité du refroidissement sous le point de congélation. La période de formation de glace correspond également – par la libération de chaleur latente – au début d'une phase de réchauffement jusqu'au point de congélation. Une période de « zero curtain » s'initie dès le début de la fonte du manteau neigeux.

c) <u>Réchauffement et humidification (fonte de la glace et condensation de l'air) durant l'été</u>

La période de « zero curtain » initiée au printemps (en mars-avril à moyenne altitude) persistera jusqu'à la disparition complète de la glace dans les conduits d'aération (mai-juillet), en raison de l'absorption de chaleur latente lors de la fonte. La quantité d'énergie nécessaire à la transformation de la glace en eau¹⁶ est d'ailleurs conséquente. Dans les parties basses de l'éboulis, un courant d'air frais (supérieur à 0°C et généralement inférieur à +5°C) est ensuite perceptible, d'autant plus froid que la température de l'air extérieur est élevée (DELALOYE 2004, cf. chapitre 4). Une légère tendance au réchauffement (+1 à +2 °C, cf. chapitre 4) s'observe cependant entre la fin de la période de « zero curtain » et l'automne, correspondant probablement à la vidange du réservoir de froid emmagasiné durant l'hiver.

Si une évaporation estivale, renforcée par l'accroissement de la vitesse du courant d'air en raison d'un gradient thermique plus important (WAKONIGG 1996) a bien lieu dans les interstices de l'éboulis, elle ne peut être la cause première du refroidissement (DELALOYE 2004). Ainsi, les températures froides observées durant l'été ne seraient que l'unique conséquence du sur-refroidissement du bas de l'éboulis ayant lieu durant l'hiver (et non durant l'été) (DELALOYE 2004), comme cela est le cas pour les glacières.

Durant la période estivale, l'éboulis s'humidifie (et devient comme « une éponge gorgée d'eau ») en raison de deux processus thermodynamiques :

¹⁶ Il faut environ 0.334 10⁶ Joules/kg pour faire passer 1 kg d'eau à l'état solide à 0°C à l'état liquide à 0°C.

- La chaleur amenée par conduction, par l'aspiration d'air chaud dans les parties hautes de l'éboulis ou par des précipitations (orages par exemple) contribue à la fonte de la glace interstitielle. Cette eau de fonte va fortement humidifier le terrain.
- L'air extérieur aspiré va se refroidir et donc se condenser lors de son passage dans l'éboulis sur-refroidi. Il fournira ainsi d'une part de l'humidité au terrain, et d'autre part libérera de la chaleur latente qui pourra contribuer à accentuer la fonte de la glace Le courant d'air étant saturé, il ne peut donc pas produire une évaporation ! Des mesures réalisées par WAKONIGG (1996) dans plusieurs éboulis ventilés (en Autriche), montrent ainsi que le courant d'air sortant en bas de l'éboulis est à saturation entre fin juillet et fin octobre (tableau 6.1), et sa température est largement inférieure à la valeur du point de rosée de l'air environnant.

Liouv	Dates	Heures des	Température de sortie	Humidité relative	Air extérieur	
LICUX	Dates	mesures	d'éboulis la plus froide		Point de rosée	Température
Matzen	8.9.1994	11-12	0.9°	100 %	11.8°	18.5°
Klammhöhe	12.8.1994	10-11	1.4°	100 %	7.1° - 9.8°	15.1° - 16.1°
"	28.10.1995	9-10	0.1°	100 %	5.6°	7.0°
Ameiskogel	20.8.1994	10	3.5°	95 %	13.3°	14.1°
Turmkogel	20.8.1994	12	2.1°	100 %	10.4°	11.3°
Kitzbrunn	23.9.1994	11-12	2.3°	100 %	8.7°	10.0° - 12.0°
"	26.7.1995	14-15	1.0°	100 %	14.3°	22.2°

Tableau 6.1 – Aperçu de mesures réalisées sur différents éboulis froids de basses altitudes (Autriche) (*source* : WAKONIGG 1996).

Lors de la phase automnale, la circulation d'air présente des changements de direction quotidiens. Une entrée d'air froid provoque le « séchage » des surfaces de blocs par évaporation de l'eau et de la glace (WAKONIGG 1996). De courtes phases de gel (zero curtain) peuvent également être observées si de l'humidité est disponible. Dans ce cas, la condensation libère d'énormes quantités de chaleur latente. La température ne pourra alors s'abaisser que lorsque toute l'eau aura été transformée en glace.

6.4.5 Echange d'air continu avec l'atmosphère

Selon HARRIS & PEDERSEN (1998), l'effet de cheminée ne peut avoir lieu qu'en présence d'un couvert neigeux sur l'éboulis. En l'absence d'un couvert neigeux, l'échange d'air vertical entre l'éboulis et l'atmosphère serait alors la cause principale du sur-refroidissement. Cet échange d'air pourrait également être renforcé par des vents forts et secs, qui vont aider le refroidissement par évaporation au printemps et en été. Cependant, l'analyse de données thermiques et diverses observations contredisent cette affirmation (cf. chapitre 4).

6.4.6 Rôle de la neige

En ce qui concerne les aspects thermiques de la surface du sol et du pergélisol, l'arrivée et les taux d'accumulation de la neige (épaisseur), ainsi que la redistribution de la neige par le vent et les avalanches jouent un rôle capital (LERJEN ET AL. 2003, HEGGEM ET AL. 2005, RISEBOROUGH 2005). Un enneigement tardif permet au sol de se refroidir fortement au début de l'hiver. En revanche des chutes de neige précoces en automne vont limiter le refroidissement du terrain. Au printemps et en été, les zones restant enneigées jusque tard dans la saison protège le sol du rayonnement solaire. L'histoire du manteau neigeux doit alors être connue. Cependant, les zones occupées par de la neige tardive ne peuvent servir d'indicateurs de pergélisol (LERJEN ET AL. 2003).

Les avalanches (évènement brutal) et le vent (processus constant) jouent un rôle important dans la redistribution de la neige (LERJEN ET AL. 2003). Les bilans d'énergie sont ainsi très différents en fonction du processus d'accumulation :

- Une avalanche provoque le déneigement d'un secteur isolé jusque là. Le vent en revanche balaye constamment certaines zones favorisant ainsi le refroidissement du sol par des flux de chaleur sensible et latente (évaporation) et par augmentation de la perte d'énergie infrarouge du terrain.
- Les zones de forte accumulation neigeuse persistant durant la saison chaude peuvent aussi être distinguées en fonction de leur processus de formation (accumulation constante par le vent ou accumulation spontanée lors d'une avalanche).

Cependant, dans le cas d'une formation poreuse ventilée, quelle importance accorder à ces deux paramètres (vent et avalanche) ? Le refroidissement du terrain se produit aussi bien en l'absence ou la présence de neige dans les parties basses des éboulis.

6.4.7 Rôle du vent

L'influence du régime des vents proche de la surface sur l'intensité de la ventilation interne a été abordée par certains auteurs (eg. GUDE & MOLENDA 2000, GUDE ET AL. 2003). HARRIS & PEDERSEN (1998) signalent que d'une part l'échange d'air (vertical) entre l'atmosphère et l'éboulis peut être renforcé par les vents et que d'autre part un vent sec va renforcer les processus de refroidissement par évaporation (sublimation) de l'humidité du sol au printemps et en été. Quoi qu'il en soit, le rôle du vent dans le déclenchement d'une ventilation interne d'un éboulis semble très limité. En revanche, le vent peut affecter la répartition spatiale des températures du sol par la redistribution de la neige.

6.4.8 Rôle de la végétation

La présence d'un sol et de végétation protège la surface de l'éboulis du réchauffement estival. DELALOYE & REYNARD (2001) ont pu montrer que « *la strate arbustive (des épicéas nains) absorbe ou réfléchit jusqu'à deux tiers du rayonnement solaire incident en été lors des journées de beau temps* ». Les mousses (parfois des sphaignes) recouvrant le sol sont d'excellents isolants thermiques. Une différence thermique de 30°C peut ainsi être relevée entre la surface et la base du tapis de mousse (quelques centimètres seulement) lors d'une journée très chaude (DELALOYE 2004). SAWADA (2005) a constaté dans un éboulis au Japon que du pergélisol est présent aux endroits où les sphaignes dominent. La forte teneur en humidité d'un sol organique contribue également à prévenir le réchauffement du terrain. Cependant selon HEGGEM ET AL. (2005), l'humidité du sol est défavorable au développement d'un pergélisol aux endroits où la végétation est clairsemée, au contraire des zones où elle agit comme une couche isolante. Ainsi lorsqu'un couvert végétal dense est absent, l'humidité du sol et les flux de chaleur latente associés peuvent réguler notablement la distribution du pergélisol (HEGGEM ET AL. 2005).

6.4.9 Conclusion

La circulation d'air par effet de cheminée contribue d'une façon majeure au refroidissement observé dans une formation poreuse ventilée. Les autres facteurs présentés semblent agir de façon secondaire, mais sont importants pour comprendre les différences d'amplitude et d'importance des anomalies thermiques observées entre les différents sites ou parties de sites étudiés lors de notre recherche. L'ampleur (durée et intensité) du refroidissement hivernal et les variations granulométriques semblent agir de façon directe et prépondérante sur le refroidissement induit par un effet cheminée.

L'ensemble de ces facteurs (et d'autres ?) devrait être pris en compte pour la création d'un modèle de bilan d'énergie « éboulis froid ». Leur importance respective reste cependant encore à déterminer.

6.5 Utilisation de la ventilation dans la construction

Pour conclure ce chapitre, nous souhaitons présenter brièvement à l'aide de quelques exemples, des applications possibles de la ventilation naturelle et artificielle dans la construction. La stabilité des sols gelés cimentés par de la glace interstitielle dépend avant tout de la température. Différents moyens existent pour refroidir artificiellement le sol en utilisant les températures froides de l'hiver.

6.5.1 La ventilation artificielle des mines

Bien avant l'invention des ventilateurs, les maîtres mineurs avaient imaginé différentes méthodes pour générer des courants d'air de convection et en augmenter le débit. La ventilation artificielle est en effet connue depuis plus de 2'500 ans. Une ancienne gravure du *De Re Metallica* d'AGRICOLA datant de 1'556 (cité par LISMONDE 2002) présente en effet une technique de ventilation artificielle « *par l'utilisation d'un paravent pour fournir une surpression sur une des entrées, par l'allumage d'un feu pour augmenter le tirage dans un puits secondaire et par l'utilisation d'un conduit en venturi¹⁷ dans le deuxième puits » (figure 6.7). Les mineurs utilisaient également le soufflet activé par l'énergie humaine, animale, hydraulique et aérienne, ou encore de « <i>l'eau tombant en douche dans les puits pour créer une pression motrice* » (LISMONDE 2002).



Figure 6.7 – Ventilation artificielle dans une mine (d'après LISMONDE 2002).

6.5.2 Une climatisation naturelle

Lors de son second voyage à travers les Alpes, DE SAUSSURE (1796) fit une découverte surprenante à Cesi en Italie. La fraîcheur d'un courant d'air provenant « *des crevasses d'un rocher, contre lequel la maison est bâtie* » était utilisée pour conserver des vins, des fruits et d'autres denrées alimentaires, mais « *encore en conduisant cet air frais par des tuyaux jusque dans les appartements. Des robinets placés à l'extrémité de ces tuyaux donnent à volonté la quantité de cet air frais qu'on désire. On a même poussé la recherche jusqu'à conduire cet air sous des guéridons dont le pied est percé, en sorte que les bouteilles posées sur ces guéridons sont continuellement rafraîchies par le vent qui en sort » ! Le développement et l'utilisation d'une climatisation naturelle se basant sur le principe de l'effet de cheminée pourraient apporter une alternative durable aux appareils énergivores de climatisation utilisés actuellement.*

¹⁷ L'effet Venturi est le fait que la pression dans un rétrécissement est plus petite qu'ailleurs, d'où des applications pour une aspiration (LISMONDE 2002).

6.5.3 Les thermosiphons

Les thermosiphons permettent d'ôter la chaleur du terrain. Lorsque les températures de l'air extérieur sont plus basses que celles du sol, un mouvement de convection du réfrigérant (air ou liquide) s'initie permettant le refroidissement du sol autour du thermosiphon. Quel que soit le système utilisé, lorsque l'air extérieur est plus chaud que le terrain, toute circulation de fluide liquide ou gazeux s'interrompt dans le thermosiphon (période passive) (DELALOYE 2004). Le froid accumulé est alors absorbé par le sol environnant. Il existe deux types de thermosiphons :

- Les thermosiphons fermés utilisant du dioxyde de carbone et/ou un mélange d'autres gaz.
- Les thermosiphons à air ont souvent été moins utilisés et considérés comme moins efficaces. Cependant en comparant les deux systèmes, KUZMIN & ZHANG (2003) ont montré que les nouveaux thermosiphons à air possèdent une capacité égale à celle des systèmes liquides. En effet, lors de la première année d'enregistrement, le sol autour du thermosiphon à air a été moins refroidi qu'autour du thermosiphon liquide. La tendance s'est ensuite équilibrée puis inversée dès la troisième année d'enregistrement. De plus avec l'agrandissement de leur taille, la capacité de refroidissement des thermosiphons à air sera bientôt plus importante que celle des thermosiphons liquides.

6.5.4 Ventilation des remblais

La ligne de chemin de fer Qinghai-Tibet est la plus longue du monde située à haute altitude. Une importante partie de la construction (630 km sur 1'959 km) traverse des zones de pergélisol. Afin d'éviter des dommages aux structures de transport (fissures dues au tassement) dus à la dégradation du pergélisol, différentes méthodes ont été utilisées : pierres concassées pour le remblai, construction de couches isolantes sous la voie du chemin de fer, augmentation de la largeur et de la hauteur du remblai, et ventilation du remblai par un effet cheminée, par des thermosiphons ou par l'utilisation des vents dominants. Les trois premières méthodes sont passives et coûteuses à la construction et à la maintenance. La ventilation en revanche est une méthode active qui permet de retirer la chaleur du sol.

Les remblais ventilés par l'installation de tuyaux à leur base montrent ainsi des effets évidents de l'amélioration du refroidissement (NIU & CHENG 2005). Différents critères sont à prendre en compte pour le refroidissement du terrain : diamètre des tuyaux, espace compris entre deux conduits, profondeur d'enfouissement et hauteur du remblai. Une étude menée par BO ET AL. (2004) a montré que de nombreux tuyaux de petit diamètre donnent un meilleur refroidissement du sol qu'avec un nombre moindre de tuyaux de diamètre plus grand ; que plus le conduit est enfoncé profondément dans le remblai, plus l'effet refroidissant sur le pergélisol est grand.

NIU ET AL. (2003) ont testé l'influence de la ventilation induite par les vents dominants. Des tuyaux ouverts ont ainsi été installés dans un remblai de loess dans l'axe des vents dominants. Après 480 heures de gel, la température a en effet été réduite de 11.3-11.8°C dans le remblai ventilé et de 5.9-6.3°C dans le remblai non-ventilé. La ventilation permet donc de protéger plus efficacement le pergélisol sous la ligne de chemin de fer et peut même étendre la zone gelée. En revanche, durant la saison chaude, l'effet est inverse (augmentation de la fonte) et les conduits de ventilation doivent être fermés.

Le changement de régime thermique causé par la couche d'asphalte est la cause principale du développement de zones de fonte et d'instabilité sur le chantier de l'autoroute Qinghai – Tibet. Afin de remédier aux problèmes de fissuration observés, WANG ET AL. (2003) suggèrent l'utilisation d'un revêtement plus clair pour limiter l'absorption du rayonnement direct et de remblais ventilés afin d'augmenter l'échange de chaleur turbulent.

6.6 Synthèse

Suite à l'analyse du comportement thermodynamique des grottes et des éboulis, nous pouvons relever les éléments suivants :

- Parmi les différentes hypothèses émises pour expliquer la préservation de conditions froides et de glace durant l'été, **la circulation d'air par effet de cheminée** semble être le facteur le plus important. Les autres facteurs seraient d'ordre secondaires, mais une étude approfondie est nécessaire pour clarifier l'importance des différents paramètres du bilan d'énergie d'une formation ventilée.
- La plupart des courants d'air sont **d'origine thermique.** Les autres facteurs de formation (vent, changement de la pression, entraînement par les cascades) peuvent cependant le renforcer ou l'atténuer. La vitesse du courant d'air est proportionnelle au gradient thermique. Plus celui-ci est élevé, plus le souffle d'air est rapide.
- Un seuil thermique de réversibilité du courant d'air existe pour la circulation d'air. Il peut être définit en comparant les périodes synchrones (ou non) entre les variations de la température de l'air extérieur et celle de l'éboulis. Ce seuil peut-être variable selon la saison, en fonction notamment de la température globale de l'ensemble du système ventilé. Le renversement du courant d'air est supposé très rapide.
- L'aspiration et l'expulsion d'air se fait plutôt de façon diffuse dans le haut des éboulis (mais pas toujours), et d'une manière mieux organisée et plus concentrée dans le bas à cause du granoclassement. Une répartition analogue se retrouve dans les systèmes karstiques (cf. 6.2.3).
- Le bilan thermique d'un éboulis froid (dans se partie basse) reflète principalement les **conditions atmosphériques hivernales** extérieures.
- En hiver, l'intérieur de l'éboulis est refroidi et asséché par l'aspiration d'un air extérieur froid. Les processus d'évaporation/sublimation se produisent donc durant l'hiver, asséchant l'intérieur de l'éboulis et augmentant le refroidissement par absorption de chaleur latente.
- La formation de la glace a lieu au printemps (au sens large) lors de la fonte des neiges, ou en hiver durant des phases de redoux.
- Durant l'été, des conditions fraîches se rencontrent en surface dans les parties basses de l'éboulis, en raison de la vidange du réservoir de froid emmagasiné durant l'hiver. Inversement, de la chaleur pénètre à travers l'éboulis par aspiration d'air extérieur dans ses entrées supérieures. L'infiltration des eaux de pluie (orages d'été) dans le terrain peut également advecter de la chaleur. La formation poreuse ventilée va donc se réchauffer durant l'été et l'automne.

7. Synthèse et perspectives

L'objectif principal de cette étude était de combler la lacune concernant l'occurrence et le mode de fonctionnement des circulations d'air dans des formations sédimentaires poreuses de moyenne altitude (ie. entre 1'500 et 2'300 m.s.m.). L'analyse détaillée de 5 sites d'études des Préalpes suisses romandes, et l'inventaire d'une vingtaine d'éboulis ont permis d'établir et d'étayer la liste des nombreux indices de fonctionnement caractéristiques d'une formation ventilée. Nous allons maintenant reprendre les différents points énoncés dans notre problématique (cf. chapitre 2.1).

7.1 Synthèse

Quelle est l'occurrence des systèmes de ventilation à basse et moyenne altitude ?

Sur tous les sites investigués, des indices de fonctionnement de circulation d'air ont été relevés. De la glace se maintenant durant l'été, des courants d'air froid traduisant une décharge gravitaire d'air froid, ou des fenêtres de fonte précoces consécutives à des souffles d'air chaud ont été trouvés partout. La cartographie BTS a également livré un motif de distribution des températures du sol en période de temps froid commun à toutes les formations ventilées (cf. chapitre 5). Cette observation a notamment été favorisée par les longues périodes de temps froid ayant sévies durant les hivers 2004-2005 et 2005-2006. **Des systèmes de ventilation existent donc dans presque toutes les formations visitées**, mais de nombreuses particularités locales (topographie, climat...) en modifient l'ampleur et l'efficacité (MORARD et al., 2007).

La partie inférieure du grand éboulis sud de la combe de Lavaux-Châtillon n'est en revanche pas concernée par un système de ventilation. L'explication est certainement d'ordre granulométrique, puisque des matériaux très fins se retrouvent directement sous la surface de blocs. La porosité efficace devient alors extrêmement faible.

Quelles sont les formations sédimentaires concernées ?

Initialement, l'attention s'est portée principalement sur des éboulis et des glaciers rocheux fossiles. Dans ces derniers, de nombreux indices visuels (glace, souffles d'air froid et chaud, végétation azonale...) et thermiques de circulation d'air ont été signalés. Cependant d'autres formations sédimentaires poreuses – zone d'éboulement et moraine – ont montré des caractéristiques de systèmes ventilés. De plus, une **interconnection** existe dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile. Elle peut en revanche uniquement être supposée entre les éboulis, les moraines et les zones d'éboulement (par ex. La Pierreuse, cf. 4.4).

Quelle est l'influence des réseaux souterrains (karstiques ou non) sur la ventilation des terrains sédimentaires poreux de surface ?

Le comportement thermique particulier enregistré dans la partie haute de l'éboulis de Vudèche (et dans une moindre mesure dans celui de Dreveneuse du Milieu) semble indiquer une **influence notable des réseaux karstiques** sous-jacents (à démontrer) aux éboulis.

D'une part, l'aspiration observée dans la partie haute de l'éboulis (alors que le gradient thermique était favorable à une expulsion d'air chaud) pourrait s'expliquer par la surpression exercée par la forte bise de novembre 2004 sur le versant face au vent, alors que le versant sous le vent connaît une depression barométrique. Dans le versant face au vent, une aspiration généralisée aurait ainsi lieu en direction de l'énorme réseau karstique présent dans la région.

D'autre part, la température reste extrêmement constante dans la partie haute de l'éboulis durant l'hiver (autour de 3.5°C à Vud-05); alors que dans le cas d'un système ventilée de surface, une décroissance s'observe durant l'hiver. Cette constance s'expliquerait par la vidange de chaleur provenant d'un énorme réservoir (ie. le réseau souterrain).

Quels sont les facteurs essentiels pour qu'une circulation d'air puisse avoir lieu ?

Deux facteurs sont primordiaux : l'existence d'un **gradient de température** entre l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la formation poreuse, et une **porosité efficace suffisante** pour que de l'air puisse circuler.

L'analyse granulométrique des gravières a montré qu'une ventilation peut avoir lieu même en présence de très petits éléments (jusqu'à 2 mm). La présence d'eau, en particulier dans un sédiment argileux et silteux, semble en revanche empêcher la circulation d'air par gonflement des minéraux argileux et par occupation des interstices.

Le gradient de température définit la direction du courant d'air. En régime estival, lorsque l'air extérieur est plus chaud que l'air interne, une décharge gravitaire au point le plus bas de la pente a lieu. En hiver, le fonctionnement est inverse avec une ascendance de l'air « chaud » à l'intérieur de l'éboulis entraînant une aspiration d'air dans les parties basses de l'éboulis et du glacier rocheux fossile. Il existe cependant une dissymétrie dans le positionnement des secteurs d'aspiration en hiver et de décharge gravitaire en été. Si le système est bien compris dans son ensemble, de nombreuses particularités (pente, granulométrie non homogène, présence de fines...) le rendent particulièrement complexe.

Qu'en est-il des périodes de réversibilité du courant d'air ?

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). La théorie nous apprend que le renversement d'un courant d'air en fonction du gradient de température est brutal (LISMONDE 2002). Des observations visuelles s'accordent avec cette théorie. Cependant l'absence de mesures de vitesse et de direction du courant d'air ne peut venir confirmer cette hypothèse.

De plus, la réversibilité du courant d'air doit s'opérer de façon sensiblement différentes entre l'automne et le printemps, pour au moins deux raisons :

- Premièrement les conditions météorologiques (présence ou absence de neige sur le terrain notamment, glace interstitielle de regel pouvant bloquer partiellement le système, variation des températures de l'air) sont différentes. De plus la remontée des températures de l'air au printemps semble se produire plus rapidement que la baisse des températures de l'air durant l'automne.
- Deuxièmement le seuil de réversibilité du courant d'air devrait dépendre de la température générale du système ventilé. L'éboulis se refroidissant durant l'hiver et se réchauffant durant l'été, le renversement du courant d'air devrait ainsi s'effectuer à une température de l'air extérieur plus élevée en automne qu'au printemps (l'air à l'intérieur de l'éboulis est plus froid).

Dans quelle mesure, la signature thermique observée peut s'appliquer aux sites de plus haute altitude ?

Les indices de fonctionnement d'une circulation d'air ont été déterminés dans ce travail pour des sites de moyenne altitude, situés en dessous de la limite inférieure du pergélisol discontinu. Les processus (notamment le rôle de la neige et la présence/absence de sol) n'étant pas de même importance entre la moyenne et la haute altitude, une analyse comparative détaillée serait nécessaire.

Quel est le rôle des différents facteurs de refroidissement ?

Au chapitre 6.4, différents facteurs ont été présentés pour expliquer le sur-refroidissement observé dans les parties basses des éboulis. Sur la base de nombreuses publications, nous avions conclu que la circulation d'air par effet de cheminée (dynamique) et la granulométrie (statique) étaient les deux facteurs primordiaux. Le refroidissement du sol est également dépendant de l'intensité et de la durée des périodes de temps froid durant l'hiver. La radiation solaire, la végétation, la neige, le *Balch effect*, l'évaporation estivale, la formation et la fonte de la glace, le ruissellement (fonte, pluie) seraient des

facteurs certes importants mais secondaires. Cependant une analyse de tous ces paramètres serait nécessaire pour pouvoir déterminer leur importance exacte.

Quelle est l'influence du refroidissement par circulation d'air à l'intérieur de la formation poreuse ventilée et dans le terrain adjacent et sous-jacent ?

Les diverses méthodes utilisées dans ce travail se sont limitées à une approche de surface pour la compréhension des systèmes de ventilation. La géoélectrique permet certes de déterminer la structure du sous-sol, mais pas la mesure des paramètres du courant d'air. Le comportement à l'intérieur de la formation sédimentaire poreuse n'a pu être que supposé ou dérivé à partir d'observations menées dans des réseaux souterrains dans lesquels l'homme peut s'y faufiler. Un forage récemment réalisé dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas devrait fournir de précieuses informations.

Comme supposé par certains auteurs (eg. BERTINELLI ET AL. 1993, DELALOYE 2004, GORBUNOV 2004), le refroidissement par circulation d'air (par advection) pourrait se transmettre au terrain adjacent et sous-jacent non poreux par conduction. Des mesures de terrain et une modélisation de ces différents flux de chaleur devraient être menées.

La circulation d'air peut-elle permettre la formation de pergélisol dans une formation ventilée ?

L'aspiration d'air froid et sec durant l'hiver permet la formation d'un réservoir de frigories pour autant que la structure interne de l'éboulis ou du glacier rocheux fossile le permette. Lors de la fonte des neiges, l'eau de ruissellement peut geler au contact de cet ensemble de matériaux surrefroidis. Des lentilles de glace peuvent ainsi être créées et si la fonte estivale n'est pas trop importante (des étés avec une faible pluviométrie seraient donc favorables), cette glace peut être conservée. Par définition, les glaciers rocheux fossiles sont des formations stables ne contenant plus de glace. Cependant, lorsqu'un système de ventilation est présent, il est possible que de la glace de regel se trouve dans les interstices de la formation. La réalisation d'un forage pourrait amener des éléments de réponse.

Une nouvelle définition du pergélisol est-elle nécessaire pour les formations ventilées ?

Le pergélisol se définit comme « *un matériel de subsurface dont la température est inférieure à* $0^{\circ}C$ *durant l'année entière* » (DELALOYE 2004). En l'absence de données à l'intérieur du terrain, il est délicat de répondre par l'affirmative. En effet, les valeurs des BTS peuvent varier fortement d'année en année et il est dès lors peu judicieux d'utiliser les classes de W. HAEBERLI pour déterminer la présence/absence de pergélisol. L'enregistrement continu des températures du sol a certes montré une importante anomalie thermique par rapport à MAAT dans les diverses formations sédimentaires ventilées et des MAGTs inférieures à 0°C, mais les températures demeurent malgré tout positives (< 5°C) durant l'été. Cependant, les mesures récemment effectuées dans le sondage de Dreveneuse semblent indiquer que les températures à l'intérieur de l'éboulis sont légèrement plus basses qu'en surface (DELALOYE, comm. pers. ; DELALOYE & LAMBIEL, 2007).

Notre étude ne s'est déroulée que sur une année, mais des observations continues sur une longue période par SONE (2005) ont révélé que du pergélisol était tantôt présent, tantôt absent dans la partie basse d'un éboulis ventilé selon les années.

Sur la base de ces deux considérations, il serait plus adéquat de parler de « **pergélisol à court terme** ». GORBUNOV (2004) le nomme « pereletok ».

7.2 Modèle de circulation d'air pour un complexe éboulis – glacier rocheux fossile

Un apport majeur de cette étude réside dans la détermination d'indices de fonctionnement d'un système de ventilation durant les diverses périodes de l'année. L'attestation d'une interconnection du système dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile nous a poussé à créer un nouveau modèle graphique de circulation d'air (figures 7.1 et 7.2). Les différentes observations et mesures thermiques

(figure 7.3) présentées dans les chapitres 4 et 5 y ont été intégrées. Le modèle représente ainsi le système de ventilation en régime hivernal (expulsion d'air chaud et aspiration d'air froid) et en régime estival (décharge gravitaire).

En régime hivernal, l'air à l'intérieur de la formation est plus chaud que l'air extérieur et le courant d'air devient ascendant (figure 7.1). En conséquence des sorties d'air chaud aux points hauts (haut de l'éboulis et, dans certains cas, sur les rides du glacier rocheux fossile), de l'air froid est aspiré avec une zone de refroidissement maximal située une dizaine de mètres en amont du bas de l'éboulis. 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. Des fenêtres de fonte, des dépressions ouvertes ou fermées, des voûtes basales et des cristaux de givre traduisent des expulsions d'air chaud.



Figure 7.1 – Modèle de circulation d'air dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime hivernal. Les étoiles indiquent l'emplacement des courbes de température de la figure 7.3.

En régime estival, le froid emmagasiné durant l'hiver s'écoule par gravité aux points bas de l'éboulis et du glacier rocheux fossile (figure 7.2). Le courant d'air est descendant. De la glace, des souffles d'air froid (<5°C) et de la neige sont présents malgré des températures extérieures élevées. De la végétation azonale et des arbres nains traduisent des conditions de sol sur-refroidi. La forêt peut jouer un rôle dans la préservation de conditions froides en limitant l'effet de la radiation solaire au sol. Si l'air est très humide, des trous souffleurs peuvent « fumer ». De l'air chaud est probablement aspiré de façon diffuse dans les parties hautes de l'éboulis.



Figure 7.2 – Modèle de circulation d'air dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime estival. Les étoiles indiquent l'emplacement des courbes de température de la figure 7.3.



Figure 7.3 – Courbes de températures typiques pour différentes parties d'un complexe ventilé éboulis – glacier rocheux fossile. Les données proviennent de Dreveneuse du Milieu (VS) pour la période octobre 2005 à septembre 2006. Emplacements de capteurs sur les figures 7.1 et 7.2.

7.3 Perspectives

Suite à la discussion des divers résultats présentés dans ce travail, nous aimerions brièvement suggérer différentes perspectives de recherche pour l'amélioration de la compréhension des systèmes de ventilation :

- Un suivi continu et détaillé (**monitoring thermique et géoélectrique**) doit être mené sur un ou deux sites de référence. Des mesures de température, d'humidité, de vitesse et direction du courant d'air doivent être réalisées en surface et **en profondeur** (forage) ainsi que dans les terrains peu poreux sous-jacent et adjacents à l'éboulis. Un forage a ainsi été réalisé dans l'éboulis de Dreveneuse d'en Bas en 2004.
- Une **modélisation** de la trajectoire du courant d'air dans le plan vertical et horizontal (**advection**) et des flux énergétiques (chaleur sensible, latente, énergie solaire et infrarouge) est souhaitable afin de déterminer l'évolution et l'influence d'un système ventilé. Au préalable une définition des différents paramètres du bilan est indispensable. Quelques-uns des paramètres sont : gradient thermique, flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente, processus de condensation et d'évaporation/sublimation, flux géothermique, rayonnement solaire et infrarouge, pente, orientation, granulométrie, structure de l'éboulis, type de roche, végétation...
- La détermination de ces paramètres, notamment l'influence de la granulométrie, pourrait également être menée sur une **formation poreuse artificielle** (amas de cailloux équipé d'instrument) placée à moyenne altitude. Des mesures fines et suivies pourraient ainsi être facilement réalisées, sans pour autant endommager un site naturel.
- Sur les différents sites présentés dans ce travail, l'utilisation d'autres méthodes (tomographie, sismique réfraction, radar, forage...) pourrait amener une meilleure compréhension du système. L'utilisation de l'imagerie thermique infrarouge (IRT) peut être envisagée pour détecter les zones d'expulsion d'air chaud en hiver et d'air froid en été. Une collaboration avec l'armée suisse qui dispose d'instruments thermiques pourrait être envisagée (le site du Bois des Arlettes se trouve dans la place d'armes de l'Hongrin).
- L'introduction des résultats de mesures dans une base de données géographiques (BDG) permet une gestion intéressante des nombreuses données récoltées. L'ébauche d'une BDG créée avec le logiciel ArcGIG 8.3 (ESRI) a été réalisée par DORTHE & MORARD (2006). Cette BDG pourrait servir également de plate-forme d'échange avec des chercheurs d'autres universités.
- Les éboulis froids sont également des biotopes particuliers qui exigent une protection et une **mise en valeur**. Une recherche interdisciplinaire avec des botanistes, des pédologues et des entomologistes est à envisager. La considération de ces sites comme géotopes et biotopes d'importance nous semble indispensable. Une information auprès du public par le biais de publication ou de reportages serait un bon moyen de faire connaître ces phénomènes particuliers.

Les perspectives sont ambitieuses, mais une meilleure compréhension du mécanisme de ventilation se retrouvant à toutes les altitudes est indispensable pour une meilleure gestion des interrogations et des problèmes liés au pergélisol.

8. Conclusion

La circulation d'air consécutive à un déséquilibre thermique existant entre l'air extérieur et l'air à l'intérieur d'une formation poreuse est un mécanisme courant se retrouvant dans la plupart des éboulis et des glaciers rocheux fossiles de moyenne altitude. Des anomalies thermiques positives (réchauffement) et négatives (refroidissement) caractérisent ainsi les formations sédimentaires ventilées. Grâce à de fréquentes visites de nombreux sites des Préalpes suisses romandes, il nous a été possible de déterminer un certain nombre d'indices de fonctionnement en fonction de la saison et de la position sur le complexe éboulis – glacier rocheux fossile. L'inventaire non exhaustif de ces terrains sera certainement complété ces prochaines années. La méthode BTS s'est avérée particulièrement efficace pour déterminer les zones de refroidissement hivernal maximales ainsi que les zones d'expulsion d'air chaud. Le régime thermique des éboulis de basses et moyennes altitudes semblent maintenant bien compris. Des comportements thermiques semblables ou inverses par rapport à l'évolution de la température de l'air extérieur permettent ainsi de caractériser les différents secteurs d'un système de ventilation.

En raison de la rareté et de l'extrême complexité du phénomène, d'une distribution spatiale relativement réduite et de possibilités limitées d'investigations, l'existence de lentilles de glace et/ou de sol gelé en permanence n'est pas toujours évidente à démontrer. Cependant, la combinaison de plusieurs méthodes d'investigations (observations, cartographie, mesures thermiques et géophysiques, analyse de la végétation) auxquelles peuvent s'ajouter des observations effectuées dans d'autres éboulis de basse et moyenne altitude, nous amène à la conclusion que du pergélisol est fortement probable dans les formations ventilées de basse et moyenne altitude. Des forages restent cependant indispensables pour attester cette supposition.

Dans le cadre de ce travail, nous avons consacré une première partie à l'étude théorique et bibliographique des systèmes de ventilation d'air. Les méthodes utilisées ont également été discutées. Dans un deuxième temps, les différents sites investigués ont été présentés en détail. Pour terminer, nous avons présenté les divers résultats généraux caractérisant une formation ventilée. Le chapitre 5 représente donc l'apport majeur de cette étude. Une poursuite des enregistrements, notamment thermique (UTL), serait souhaitée afin de déterminer l'évolution des conditions du sous-sol en fonction des conditions atmosphériques extérieures. Diverses perspectives de recherche ont été suggérées au chapitre 7.

Les conditions de sur-refroidissement provoquées par un système de ventilation permettent à des écosystèmes fragiles et peu concurrentiels de survivre. Les formations ventilées présentes dans les Préalpes suisses romandes sont également des vestiges biologiques spectaculaires et peu connus de la fin de la dernière glaciation.

Une mise en valeur durable de quelques-uns de ces sites nous semble donc envisageable. Le challenge consisterait cependant à concilier la découverte d'un environnement exceptionnel et pédagogique avec la préservation de ces sites extrêmement fragiles et ne supportant aucunement le piétinement. Les cas de la touristique « Eislöcher » d'Eppan et de l'éboulis froid du Creux-du-Van devraient servir d'exemples à ne pas suivre. Une gestion intégrée et durable, à l'image de l'arrêté de biotope de la Combe Obscure (France) (BERTINELLI ET AL. 1993) ou par la délimitation de secteurs d'observation et de déplacement, est donc absolument nécessaire.

9. Bibliographie

ALBERT, M.R. & SHULTZ, E.F. (2002) : « Snow and firn properties and air-snow transport processes at Summit, Greenland ». Atmospheric Environment, Volume 36, Number 15, May 2002, pp. 2789-2797(9).

Architecture HKU (2007) : « Air movement and natural ventilation ». Notes de cours, Université de Hong-Kong, http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect01.htm (consulté : janvier 2007)

ASSIER, ALAIN & FABRE, DENIS (1996) : « Prospection électrique sur les Glaciers Rocheux du Cirque de Sainte-Anne (Queyras, Alpes du Sud, France) ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.7, 1996, pp. 53-67.

BÄCHLER, E. (1930) : « Der verwünschte oder verhexte Wald im Brüelobel ». Appenzeller Kalender, in Club Nachrichten der Sektion St-Gallen SAC (1946), 18/8, 91-96.

H. BADOUX, R. CHESSEX, A. JEANNET, M. LUGEON, F. RIVIER (1960): « Carte géologique Monthey ». Feuille 37, Atlas géologique de la Suisse, Berne.

BARKHAUSEN, A. & GEISER, F. (1998): «Guide des réserves naturelles de Suisse. Les sites, les espèces, les conseils pratiques». Pro Natura, Les Guides du Naturaliste, Delachaux et Niestlé, Lausanne, 426 p.

BAUDER, A., PRALONG, A., FUNK, M. & FAILLETTAZ, J. (2006) : « Les glaciers des Alpes suisses en 2003/2004 et 2004/2005 ». in Les Alpes, revue du Club Alpin Suisse (CAS), octobre 2006, pp. 34-43.

BERTINELLI, F., PETITCOLAS, V., ASTA, J., RICHARD, L., SOUCHIER, B. (1993) : « Dynamic relations between vegetation and soil on cold scree in southern french alps ». Revue d'Ecologie Alpine, II, pp. 93-104.

BERTINELLI, F., PETITCOLAS, V., ASTA, J., RICHARD, L., SOUCHIER, B. (2000): «Relations dynamiques entre la végétation et le sol sur éboulis froid dans les Alpes françaises méridionales ». Documentation électronique du centre de biologie alpine, http://www-pole.grenet.fr/POLE/CIMES/documents/biologie/asta-article.html (consulté en juillet 2004).

BO, S., NING, G. & XIAOJUAN, Q. (2004) : « The numerical study on the ventilated embankment in permafrost regions in Qinghai – Tibet railway ». in Cold Regions Science and Technology 38, pp. 229-238.

DELALOYE, REYNALD & MORAND, SONIA (1997) : « Du Val Ferret au Grand-Combin (Alpes Valaisannes) : Inventaire des Glaciers Rocheux et Analyse Spatiale du Pergélisol à l'aide d'un Système d'Information Géographique (Idrisi) ». Travail de diplôme, Institut de Géographie, Université de Fribourg, non publié, mars 1997, 119 p.

DELALOYE, R. & REYNARD, E. (2001) : « Les éboulis gelés du Creux du Van (Chaîne du Jura, Suisse). Environnements Périglaciaires, 8, 105-113.

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, REYNALD (2004): « Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale ». Série Geofocus, volume 10, Department of Geosciences, Geology, University of Fribourg, 240 p.

DELALOYE, REYNALD & LAMBIEL, CHRISTOPHE (2005): « Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps) ». in Norsk Geografisk Tidsskrift, 59, 2005, pp. 194-203.

DELALOYE, R., DORTHE, J., MORARD S. (2005) : « Corrections des mesures BTS 2005 ». Protocole, Institut de Géographie, Université de Fribourg, non publié, avril 2005, 3 p.

DELALOYE, REYNALD & LAMBIEL, CHRISTOPHE (2007) : « Drilling in a low elevation cold talus slope (Dreveneuse, Swiss Prealps). EGU General Assembly, April 15-20, 2007, Wien, Austria.

DESAUSSURE, HORACE-BÉNÉDICT (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/ (consulté : janvier 2007).

DESCROIX, L. (2001) : « Note technique au sujet de l'éboulis englacé de Laux Montaux (Baronnies, Drôme – France) ». Revue de Géographie Alpine, 3 (2001), pp. 90-94.

DORTHE, JONATHAN (2006) : « Petit inventaire des éboulis froids des Préalpes fribourgeoises ». Travail de recherche personnelle 2 (TRP 2), Institut de Géographie, Université de Fribourg, non publié, novembre 2006, 33 p.

DORTHE, JONATHAN & MORARD, SÉBASTIEN (2006) : « Analyse du rayonnement solaire à l'aide de l'extension pour ArcView 3.x : The Solar Analyst, et création d'une base de données géographiques sur les éboulis froids avec ArcGIS 8.3. Projet SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale), Institut de Géographie, Université de Fribourg, non publié, juin 2006, 49 p.

DYSLI, M. & LUETSCHER, M. (2003) : « Les glaciers du Jura ». in Les Alpes, revue du Club Alpin Suisse (CAS), juillet 2003, pp. 38-41.

FFME (2006) : « Fédération Française de la Montagne et de l'Escalade. Fiches techniques de météorologie ». http://www.ffme.fr/technique/meteorologie/index.htm (consulté en janvier 2006).

FORBES, J. (1998) : « Air temperature and relative humidity study : Torgac Cave, New Mexico ». in Journal of Cave and Karst Study, 60 (1), April 1998, pp. 27-32.

FORD, D. & WILLIAMS, P. (1989) : « Karst Geomorphology and Hydrology ». Academic Division of Unwin Hyman Ltd, London, 601 p.

FRANCOU B. & HÉTU B. (1989): « Eboulis et autres formations de pente hétérométriques. Contribution à une terminologie géomorphologique ». Notes et Comptes-Rendus du groupe de travail "Régionalisation du Périglaciaire", CNRS, Centre de géomorphologie, XIV, 11-69.

FRANCOU, BERNARD (1991) : « Pentes, Granulométrie et Mobilité des Matériaux le long d'un Talus d'Eboulis en Milieu Alpin ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.2, 1991, pp. 175-186.

FURRER, E. (1970/71) : « Kaltluftvegetation im Waagtal (Schwytz) ». Berichte des Geobotanischen Instituts der ETH Zürich (Stiftung Rübel), 41, 21-24.

GOBAT, J.-M., ARAGNO, M., MATTHEY, M. (2003) : « Le sol vivant. Bases de pédologie, biologie des sols ». PPUR-Lausanne, 2^{ème} édition.

GORBUNOV, ALDAR P. ; MARCHENKO, SERGEI S. AND SEVERSKY, EDUARD V. (2004) : « The Thermal Environment of Blocky Materials in the Mountains of Central Asia ». in Permafrost and Periglacial Processes, Short Communication, Vol.15, 2004, pp. 95-98.

GRUBER, STEPHAN & HOELZLE, MARTIN (2001) : « Statistical Modelling of Mountain Permafrost Distribution : Local Calibration and Incorporation of Remotely Sensed Data ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.12, 2001, pp. 69-77.

GUDE, M. & MOLENDA, R. (2000) : « Zeitliche Dynamik im Temperaturregime von Blockhalden in Mitteleuropa ». Acta Univ. Purkyn., Usti n. L., stud. Biol., 4 : 31-35, 2000.

GUDE, M. & MOLENDA, R. (2002) : « Blockhalden in Mittelgebirgen – Relikte der Eiszeiten ». Institut für Länderkunde, Leipzig 2002.

GUDE, M., DIETRICH, S., MÄUSBACHER, R., HAUCK, C., MOLENDA, R., RUZICKA, V., ZACHARDA, M. (2003) : « Probable occurrence of sporadic permafrost in non-alpine scree slopes in central Europe ». Proc. 8th Int. Conf. Perm., Zurich 2003, 331-336.

GUDE, M. & MOLENDA, R. (2003) : « Felsen, Block- und Schutthalden, Blockmeere ». In Konold, W., Böcker, R. & Hampicke, U. (Ed.) : Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege, Landsberg, XI-2.27, 1-9, 2003, pp. 181-192.

HAEBERLI, W. & EPIFANI, F. (1986) : « Mapping the distribution of burried glacier ice – an example from Lago delle Locce, Monte Rosa, Italian Alps ». in Annals of Glaciology, International Glaciological Society, 1986, pp. 78-81

HANSON, S. & HOELZLE, M. (2003) : « The thermal regime of the coarse blocky active layer at the Murtèl rock glacier in the Swiss Alps ». 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, Extended abstracts Vol., 51-52.

HARRIS, STUART A. & PEDERSEN, DAVID E. (1998) : « Thermal Regimes Beneath Coarse Blocky Materials ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.9, 1998, pp. 107-120.

HAUCK, CHRISTIAN (2001) : « Geophysical methods for detecting permafrost in high mountains ». Mitteilungen, VAW 171, in Eigenverlag der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, Zürich, Switzerland, 204 pp.HEGGEM ET AL. (2005)

HEGGEM, EVA S.F.; JULIUSSEN, HAVARD AND ETZELMÜLLER, BERND (2005): «Mountain permafrost in Central-Eastern Norway ». in Norsk Geografisk Tidsskrift, 59, 2005, pp. 94-108.

HERZ, T. ; KING, L. AND GUBLER, H. (2003) : « Microclimate within coarse debris of talus slopes in the alpine periglacial belt an dits effect on permafrost ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 383-387.

HERZ, T.; PHILIPPI, S; HOF, R. AND KING, L. (2005): « The influence of substrate and surface characteristics on the ground thermal regime and mountain permafrost distribution – Examples from the Matter Valley, Valais, Swiss Alps ». in Terra Nostra, 2nd European Conference on Permafrost, Abstracts, Potsdam, Germany, 2005, pp. 129-130.

HOELZLE, M. (1994): «Permafrost und Gletscher in Oberengadin: Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren ». Mitt. der VAW/ETH Zürich, 132.

HOELZLE, MARTIN ; WEGMANN, MATTHIAS AND KRUMMENACHER, BERNHARD (1999) : « Miniature Temperature Dataloggers for Mapping and Monitoring of Permafrost in High Mountain Areas : First

Experience from the Swiss Alps ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.10, 1999, pp. 113-124.

HOELZLE, MARTIN; MITTAZ, CATHERINE; ETZELMÜLLER, BERND AND HAEBERLI, WILFRIED (2001): « Surface Energy Fluxes and Distribution Models of Permafrost in European Mountain Areas : an Overview of Current Developments ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.12, 2001, pp. 53-68.

HOELZLE, M. ; HAEBERLI, W. AND STOCKER-MITTAZ, C. (2003) : « Miniature ground temperature data logger measurements 2000-2002 in the Murtlèl-Corvatsch area, Eastern Swiss Alps ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 419-424.

IIJIMA, Y. & FUKUI, K. (2003) : « The effect of surface nocturnal cooling on maintaining the mountain permafrost in central Japan ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 449-454.

IMHOF, M., PIERREHUMBERT, G., HAEBERLI, W. & KIENHOLZ, H. (2000) : « Permafrost investigation in the Schilthorn Massif, Bernese Alps, Switzerland ». Perm. Perigl. Process., 11, 189-206.

ISHIKAWA, MAMORU & HIRAKAWA, KAZUOMI (2000) : « Mountain Permafrost Distribution Based on BTS Measurements and DC Resistivity Soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.11, 2000, pp. 109-123.

ISHIKAWA, MAMORU (2003) : « Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation ». in Geomorphology, 52, 2003, pp. 105-120.

KING, LORENZ; GORBUNOV, ALDAR P. AND EVIN, MICHÈLE (1992) : « Prospecting and Mapping of Mountain Permafrost and Associated Phenomena ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.3, 1992, pp. 73-81.

KNEISEL, CHRISTOF (2003) : « Sporadic and discountinous mountain permafrost occurrence in the Upper Engadine, eastern Swiss Alps ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 561-566.

KÖRNER, C. AND HOCH, G. (2006): "A test of treeline theory on montane permafrost island". In Arctic, Antartic and Alpine Research, Vol 38, No 1, 2006, pp. 113-119.

KRUMMENACHER, B., BUDMIGER, K., MIHAJLOVIC, D. & BLANK, B. (1998) : « Periglaziale Prozesse und Formen im Furggentälti, Gemmipass ». Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforsch., Davos, Mitt. 56.

KUZMIN, G.P. & ZHANG, R.V. (2003) : « Operation of air and liquid thermosyphons : an experimental comparison ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 617-619.

LAMBIEL, C. (2006) : « Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités ». Thèse de doctorat, Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, non publiée, 251 pp.

LAUBER, K. & WAGNER, G. (1998) : « Flora Helvetica, flore illustrée de Suisse ». Editions Paul Haupt, Berne-Stuttgart-Vienne, 1'616 p.

LAW, JANE & VANDIJK, DEANNA (1994) : « Sublimation as a Geomorphic Process : a Review ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.5, 1994, pp. 237-249.

LEE, W.T. (1926) : « An Ice Cave in New Mexico ». in Geographical Review, Vol. 16, No. 1, January 1926, pp. 55-59.

LERJEN, M.; KÄÄB, A.; HOELZLE, M. AND HAEBERLI W. (2003): « Local distribution pattern of discontinuous mountain permafrost. A process study at Flüela Pass, Swiss Alps ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 667-672.

LISMONDE, BAUDOUIN (1981) : « Circulation de l'air dans les réseaux souterrains à deux ouvertures ». Colloque de Seyssins sur le karst, Fédération française de spéléologie, 1981, pp. 37-53

LISMONDE, BAUDOUIN (2002) : « Climatologie du monde souterrain : Vents des ténèbres ». Edition du Comité Départemental de Spéléologie de Isère, 1ère édition, Tome 1, février 2002, 168 p.

LISMONDE, BAUDOUIN (2002b) : « Climatologie du monde souterrain : Aérologie des Systèmes Karstiques ». Edition du Comité Départemental de Spéléologie de Isère, 1ère édition, Tome 2, février 2002, 362 p.

LUETSCHER, M.; JEANNIN, P.-Y. AND HAEBERLI, W. (2003): « Energy fluxes in an cave of sporadic permafrost in the Swiss Jura mountains-concept and first observational results ». In Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 691-696.

LUETSCHER, MARC (2005) : « Processes in Ice Caves and their Significiance for Paleoenvironmental Reconstructions ». PHD Thesis, Swiss Institute for Speleology and Karst Studies (SISKA), 2005, 154 pp.

LUETSCHG, MARTINA & HAEBERLI, WILFRIED (2005) : « Permafrost evolution in the Swiss Alps in a changing climate and the role of the snow cover ». in Norsk Geografisk Tidsskrift, 59, 2005, pp. 78-83.

LUGON, RALPH & DELALOYE, REYNALD (2001) : « Modelling alpine permafrost distribution, Val de Réchy, Valais Alps (Switzerland) ». in Norsk Geografisk Tidsskrift, 55, 2001, pp. 224-229.

MASSEN, F., DUSAR, M., LOY, W. & VANDENBERGHE, N. (1998) : « Cave volume computed on the behavior of a blowing well (Tournai basin, W. Belgium). In Terra Nova, 10, 1998, pp. 131-135.

MCCARROLL, DANNY; SHAKESBY, RICHARD A. AND MATTHEWS, JOHN A. (2001): « Enhanced Rockfall Activity during the Little Ice Age: Further Lichenometric Evidence from a Norwegian Talus ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.12, 2001, pp. 157-164.

MÉTÉOSUISSE (2006) : « Office fédéral de météorologie et climatologie ». Département Fédéral de l'Intérieur (DFI), http://www.meteosuisse.ch (consulté en décembre 2006).

MEYER DE STADELHOFEN, C. (1991) : « Applications de la géophysique aux recherches d'eau ». Lavoisier, Technique et Documentation, Paris, 183 pp.

MOLENDA, R. (1996): « Das Ökosystem Kaltluft erzeugende Blockhalde ». Natur- und Kulturlandschaft, Heft 1, 133-136. Höxter 1996.

MORARD S., DELALOYE R., DORTHE J., LAMBIEL C. (2007) : « Inventory of ventilated cold scree slopes and rock glaciers in the Swiss Alps and Prealps ». EGU General Assembly, April 15-20, 2007, Wien, Austria.

NIU, F.J.; CHENG, G.D. AND LAI, Y.M. (2003) : « Laboratory study on a duct-ventilation roadbed of the Qinghai-Tibet railway ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp.815-820.

NIU, F. & CHENG, G. (2005): «Field experiment study on effects of duct-ventilated railway embankment on protecting permafrost of the Qinghai-Tibet Plateau ». in Terra Nostra, 2nd European Conference on Permafrost, Abstracts, Potsdam, Germany, 2005, pp. 187.

OHATA, T. ; FURUKAWA, T. AND HIGUCHI, K. (1994) : "Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji ice cave, Japan, Part 1. Seasonal variation and mechanism of maintenance". In Arctic and Alpine Research, Vol 26, No 3, pp. 227-237

OHATA, T.; FURUKAWA, T. AND OSADA, K. (1994) : "Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji ice cave, Japan. Part 2. Interannual variation and relation to climate". In Arctic and Alpine Research, Vol 26, No 3, pp. 238-244

RICHARD, J-L. (1961): « Les forêts acidophiles de résineux ». in Les forêts acidophiles du Jura, Commission phytogéographiques de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Editions Hans Huber, Berne.

RISEBOROUGH, D.W. (2002) : « The Mean Annual Temperature at the Top of Permafrost, the TTOP Model, and the Effect of Unfrozen Water ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.13, 2002, pp. 137-143.

RISEBOROUGH, D.W. (2005) : « Influence of snow cover characteristics on permafrost temperatures ». in Terra Nostra, 2nd European Conference on Permafrost, Abstracts, Potsdam, Germany, 2005, pp. 146.

RIST, A., PHILLIPS, M., AUERSWALD, K. (2003) : « Undercooled scree slopes covered with stunted dwarf trees in Switzerland – abiotic factors to characterize the phenomenon ». Proc. 8th Int. Conf. Perm., Zurich 2003, 135-136.

RUZICKA, V. (1999): «The freezing scree slopes and their arachnofauna. Blockhalden mit Frostvorkommen und ihre Spinnenfauna. Lebensraum Blockhalde – Zur Okologie perglazialer Blockhalden im ausseralpinen Mitteleuropa. Decheniana – Beihefte (Bonn), 37, 141-147.

SAWADA, Y. (2003): «Monitoring of ground-ice formation in a block slope at Mt. Nishi-Nupukaushinupuri, Hokkaido, Japan ». Permafrost, Philipps, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 1001-1005.

SAWADA, YUKI; ISHIKAWA, MAMORU AND ONO, YUGO (2003): «Thermal regime of sporadic permafrost in a block slope on Mt. Nishi-Nupukaushinupuri, Hokkaido Island, Northern Japan ». in Geomorphology, 52, 2003, pp. 121-130.

SCHOENEICH, PHILIPPE (1992) : « Glaciers rocheux fossiles dans les Préalpes Vaudoises ». Bulletin de Géologie, Lausanne, n°318, pp. 35-55.

SCHOENEICH, P. & REYNARD, E. (1993): «Cartographie géomorphologique, cartographie des risques ». Colloque SSGM, 21 juin 1992, Les Diablerets, Lausanne 1993, 129 p.

SCHOENEICH, PHILIPPE (1998) : « Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Etivaz (Préalpes vaudoises) ». Thèse publiée dans les Travaux et Recherches n°14 de l'Institut de Géographie, Université de Lausanne, Volumes 1 et 2, 1998, 483 p.

SMITH, M.W. & RISEBOROUGH, D.W. (1996) : « Permafrost Monitoring and Detection of Climate Change ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.7, 1996, pp. 301-309.

SMITHSON, P.A. (1991): «Inter-relationships between cave and outside air temperatures». in Theorical and Applied Climatology, Volume 44, Number 1, March 1991, pp. 65-73.

SONE, T. (2005) : « Extra-zonal permafrost and ground air circulation at a slope along the Kanokodam, Oketo town, Hokkaido, Japan ». in Terra Nostra, 2nd European Conference on Permafrost, Abstracts, Potsdam, Germany, 2005, pp. 80.

STOCKER-MITTAZ, CATHERINE ; HOELZLE, MARTIN AND HAEBERLI, WILFRIED (2002) : « Modelling Alpine Permafrost Distribution Based on Energy-Balance Data : a First Step ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.13, 2002, pp. 271-282.

STOEVA, P. & STOEV, A. (2005): « Cave air temperature response to climate and solar and geomagnetic activity ». in Memorie della Societa Astronomica Italiana, Vol. 76, pp. 1042-1047.

TANAKA, H.L., MOON S.-E. AND HWANG, S.-J. (1999): "An observational study of summertime ice formation at the Ice Valley in Milyang, Korea". In Sci., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba. Sect. A Vol 20, 1999, pp. 34-51

TANAKA, H.L., NOHARA, D. AND YOKOI, M. (2000): "Numerical simulation of wind hole circulation and summertime ice formation at Ice Valley in Korea and Nakayama in Fukushima, Japan" In Journal of the meteorological society of Japan, Vol. 78, No 5, pp. 611-630.

THEURILLAT, J.-P. & MATTHEY, E. (1987) : « Le vallon de l'Allondon : Promenade botanique suivie d'une introduction à la phytosociologie ». Série documentaire 22 des Conservatoire et Jardin Botanique de la Ville de Genève.

VON DER WEID J. (1961): «Géologie des Préalpes médianes au SW du Moléson». Eclogae geologicae Helvetiae, 53/2, 521 - 624.

VONDER MÜHLL, D. (1993) : « Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins ». Mitt. VAW/ETH Zürich, 122.

VONDER MÜHLL, DANIEL; HAUCK, CHRISTIAN; GUBLER, HANSUELI; MCDONALD, ROBERT AND RUSSILL, NICK (2001): « New Geophysical Methods of Investigating the Nature and Distribution of Mountain Permafrost with Special Reference to Radiometry Techniques ». in Permafrost and Periglacial Processes, Vol.12, 2001, pp. 27-38.

WAKONIGG, H. (1996): «Unterkühlte Schutthalden. Beiträge zur Permafrostforschung in Osterreich ». Arbeiten aus dem Inst. f. Geogr. Karl-Franzens-Universität Graz, 33, 209-223.

WANG, S., NIU, F., ZHAO, L. & LI, S. (2003) : « The thermal stability of roadbed in permafrost regions along Qinghai – Tibet Highway ». in Cold Regions Science and Technology, 37, February 2003, 25-34.





Annexe 1 – Légende de la carte géologique (annexes 2 - 4) (*source* : Atlas géologique de la Suisse, feuille 64, carte 1'265 – Les Mosses).



Annexe 2 – Carte géologique du massif du Mont d'Or. Légende : cf. annexe 1. (*source* : Atlas géologique de la Suisse, feuille 64, carte 1'265 – Les Mosses).

Annexe 3



Annexe 3 – Carte géologique du cirque de la Pierreuse. Légende : cf. annexe 1. (*source* : Atlas géologique de la Suisse, feuille 64, carte 1'265 – Les Mosses).

Annexe 4



Annexe 4 – Carte géologique de la chaîne du Pic Chaussy. Légende : cf. annexe 1. (*source* : Atlas géologique de la Suisse, feuille 64, carte 1'265 – Les Mosses).

Annexe 5 : Relevés de végétation du Bois des Arlettes (9 juillet 2005)

a) <u>Relevé n°1</u>

Lieu :	Doline souffleuse $(570.450/137.974; \text{ précision 7 m})$, surface : $2x10 \text{ m}^2$
Altitude :	1'712 (GPS) et 1'725 m.s.m. (carte) !
Météo :	Couvert et froid.
Observation :	Pas de glace, faible souffle au logger arl-018.
Description :	Cuvette à neige avec gros blocs (diamètre jusqu'à 2m) de calcaires durs.
Pente :	10-15°

Recouvrement végétal : 90 % ; Blocs : 10% ; Beaucoup de bois mort.

ASS. SALICETUM RETUSO-RETICULATAE

Remarques : Association de combe à neige sur gros blocs calcaires, mais plus frais et plus humide que la normale avec *Pritzelago alpina* et *Pinguicula alpina*.

Strate arbustive (50% recouvrement)					
Larix decidua	+				
Salix reticulata	3	3	Ass. Combe à neige		
Salix retusa	2	3	sur gros blocs		
Vaccinium uliginosum	2	2			
Salix appendicullata	+				
Rhododendro ferruginea	+°				
Strate herbacée (40%)					
Sesleria caerulea	r				
Dryas octopetalia	2	2			
Bartia alpina (bleu-violacé)	2	2			
Pritzelago alpina	2	2	\rightarrow froid		
Pinguicula alpina	1	2	→ humidité		
Lychopodium alpinum	+	2			
Carex sempervirens	1	2			
Ranunculus alpestris	2	2			
Polygonatum viviparium	1	1			
Gentiana bavarica	+	2			
Gentiana clusii	+	2			
Silene acaulis	1	3			
Agrostis alpina	+	2			
Carex atrata (atrata?)	+	2			
Homogyne alpina	r				
<i>Carex sp.</i> (?)	1	3			
Strate muscinale et lichen					
Mousse 85%					
Lichen 5%					

b) <u>Relevé n°2</u>

Lieu :	Zone sans végétation au dessus du chemin (570.537/138.069), surface : $2x10 \text{ m}^2$
Altitude :	1'735 m.s.m.
Météo :	Couvert et froid.
Observation :	Pas de glace, faible souffle au logger arl-002.
Description :	Cuvette, couloir, écran d'arbre entre éboulis et zone, logger, dans petit thalweg.
	Gros blocs calcaires (diamètre \rightarrow 1m), bois mort,
Pente :	5°-10°

Recouvrement végétal : 95 % ; Blocs : 5% ; Beaucoup de bois mort.

ASS. « RHODOENDRO-VACCINETUM »

Remarques : Stade plus avancé de végétation que dans le relevé n°1 avec une strate arbustive plus haute (1-3 m), plus de rhododendrons dont la floraison est plus avancée.
Association placée entre « » car n'est pas un bon *Rhodo-Vaccinetum*.
Les meilleures espèces de la station précédente (n°1) ont disparu ou se sont raréfiées (*salix reticulata, pinguicula alpina, pritzelago alpina, dryas octopetalia, ranunculus alpestris*).
Apparition d'espèces nouvelles (en vert) pionnières de la pessière.

Dominance d'espèces de landes à éricacées.

Plus d'humus (mousse, lichen, bois mort) que dans le relevé n°1, le sol est également plus acide (aiguilles d'épicéa).

Strate arbustive (50% recouvrement)						
V1 (1-3 m ; 10%)						
Juniperus nana	+°		Ne pique pas			
Picea excelsa	r		1 ind.			
Larix decidua	+					
Bettula pubescens	1	1				
Salix appendicullata	1	2				
V2 (<1m ; 75%)						
Vaccinium myrtilis	2	3				
Salix reticulata	2	3				
Salix retusa	1	2				
Vaccinium uliginosum	3	3				
Loiseleuria procumbens	2	3				
Rhododendro ferruginea	2	2				
Strate herbacée (10%)						
Carex attrata	+	2				
Dryas octopettala	1	2				
Pritzelago alpina	1	2				
Pirola rottundifolia	+		En présence de forêt d'épicéa			
Polygonatum viviparium	1	1				
Bartica alpina	1	2				
Ranunculus alpestris	1	1	En fleur			
Homogine alpina	+					
Carex sempervirens	+	2				
Lichopodium alpinum	+	2	(+ 2) à côté relevé mais dans milieu semblable			
Pinguicula alpina	1	2				
Strate muscinale et lichen	Strate muscinale et lichen					
Mousse (95%)						
Lichen (25%)						

c) <u>Relevé n°3</u>

Lieu : Station logger 008 au bord de la doline dans la zone de transition avec la forêt.

Altitude : 1'735 m.s.m.

Météo : Couvert et froid.

Observation : Pas de glace.

Description : Exposition ouest (plus chaud que les relevés n°1 et 2).

Pente : 20°

ASS. RHODODENDRO-VACCINETUM JUNIPERETOSUM.

Remarques : Station à Juniperus nana (3, 50%).

Plus chaud, avec une tendance vers la pessière (début de la forêt à épicéas). Beaucoup moins de mousse et lichen (20%).

Strate arbustive			
Picea abies	2		Jeune épicéa (10%)
Strate herbacée			
Polygala chamaebuxus	1	1	Thermophile
Sorbus mugeoti	2		10%
Rhododendro ferruginea			
Vaccinium myrtillus	3	2	
Vaccinium uliginosum	3	2	
Vaccinium vitis-idaea	1		
Lonicera alpigena	+		