

Unil

UNIL | Université de Lausanne

Faculté des géosciences  
et de l'environnement  
Institut de géographie

## Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité: distribution, régime thermique et instabilités



*Thèse de doctorat présentée à la Faculté des Géosciences  
et de l'Environnement de l'Université de Lausanne par*

**Christophe LAMBIEL**

Lausanne, juillet 2006

Travaux et recherches n°33

# Table des matières

Résumé	I
Abstract	II
Abréviations	V
Remerciements	VII

## 1 Introduction 3

### 1.1 Problématique générale 3

1.1.1 Contexte de l'étude	3
1.1.2 Objectifs généraux de la thèse	4
1.1.3 Organisation de la thèse	4

### 1.2 Les sites d'étude 5

1.2.1 Deux régions d'étude principales	5
1.2.1.1 Région du Mont Gelé (Verbier/Nendaz)	6
1.2.1.2 Région des Fontanesses (Arolla)	8
1.2.2 Autres sites	8
1.2.3 Cadre climatique	9
1.2.4 Conditions climatiques durant les cinq années d'étude	10

### 1.3 Le pergélisol 13

1.3.1 Définition	13
1.3.2 Facteurs de contrôle	13
1.3.2.1 Echelle régionale et locale	13
1.3.2.2 Echelle de l'objet	14
1.3.3 Distribution typique et atypique du pergélisol	15
1.3.4 Limite inférieure du pergélisol	16

## 2 Méthodes 19

### 2.1 Température du sol 19

2.1.1 La méthode BTS	19
2.1.1.1 Principe de la méthode	19
2.1.1.2 Principe d'application et représentation des mesures	19
2.1.1.3 Variabilité spatiale	20
2.1.1.4 Variabilité inter-annuelle	21
2.1.1.5 Interprétation des mesures	22
2.1.2 Mesures de surface en continu	22
2.1.2.1 Principe de la méthode	22
2.1.2.2 Clef de lecture	22
2.1.2.3 Dans le cadre de cette étude	24

### 2.2 La géoélectrique 24

2.2.1 Principe de la méthode	24
2.2.2 Le sondage	26
2.2.3 Le traîné	27
2.2.4 Questions pratiques et mise en oeuvre	27

<b>2.3</b>	<b>Le GPS différentiel</b>	<b>29</b>
2.3.1	Principe de la méthode	30
2.3.2	Mise en œuvre	31
2.3.3	Contribution du RTK GPS	32
<b>2.4</b>	<b>Autres méthodes</b>	<b>32</b>
2.4.1	Forages	32
2.4.2	Température de l'air	33
<b>3</b>	<b>Distribution et microclimatologie du pergélisol dans les éboulis</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction et problématique</b>	<b>37</b>
3.1.1	Eboulis: quelques notions	37
3.1.2	Le pergélisol dans les éboulis	38
3.1.3	Les éboulis froids de basse altitude	40
3.1.3.1	Des observations courantes	40
3.1.3.2	Présence de pergélisol ?	40
3.1.3.3	Effet de cheminée	40
3.1.3.4	Indices de fonctionnement d'un système de ventilation	41
3.1.4	Ventilation à haute altitude ?	42
3.1.5	Objectifs principaux	43
<b>3.2</b>	<b>Eboulis froids de basse altitude</b>	<b>45</b>
3.2.1	Eboulis de Dreveneuse	45
3.2.1.1	Description du site et observations	45
3.2.1.2	Mesures effectuées et données disponibles	48
3.2.1.3	Régime thermique hivernal	49
3.2.1.4	Régime thermique estival	52
3.2.1.5	Propriétés électriques de l'éboulis	58
3.2.1.6	Synthèse	59
3.2.2	Complexe éboulis froid - glacier rocheux du Gros Chadoua	60
3.2.2.1	Description du site	60
3.2.2.2	Observations	60
3.2.2.3	Interprétation	62
3.2.2.4	Présence de pergélisol ?	63
3.2.3	Eboulis du Mont d'Or - Le Larzey	64
3.2.3.1	Description du site	64
3.2.3.2	Observations et mesures hivernales	65
3.2.3.3	Présence de pergélisol ?	68
3.2.4	Eboulis de Van d'en Haut	69
3.2.4.1	Description du site et mesures effectuées	69
3.2.4.2	Evidences d'un effet de cheminée au sein de l'éboulis	71
3.2.4.3	Un pergélisol à 1400 m ?	72
3.2.5	Autres éboulis	73
3.2.5.1	Bois des Arlettes - Mont d'Or	73
3.2.5.2	Col de Pavis (France)	74
3.2.6	Synthèse	75
<b>3.3</b>	<b>Eboulis de haute altitude</b>	<b>79</b>
3.3.1	Eboulis des Lapires	79
3.3.1.1	Description du site et mesures effectuées	79
3.3.1.2	Caractéristiques du pergélisol	80
3.3.1.3	Extension spatiale du pergélisol	83
3.3.1.4	Evidences de l'existence d'un système de ventilation	84
3.3.1.5	Synthèse	88

---

3.3.2	Eboulis des Attelas	89
3.3.2.1	Description du site et mesures effectuées	89
3.3.2.2	Distribution du pergélisol	90
3.3.2.3	Indices d'un effet de cheminée	95
3.3.2.4	Incidences du système de ventilation sur la distribution du pergélisol	98
3.3.3	Secteur Lac des Vaux - Mont Gelé: complexe éboulis - glacier rocheux	98
3.3.3.1	Description du site et mesures effectuées	98
3.3.3.2	Caractéristiques du pergélisol dans le glacier rocheux	101
3.3.3.3	Distribution du pergélisol dans l'éboulis	102
3.3.3.4	Indices d'un effet de cheminée	106
3.3.3.5	Synthèse	108
3.3.4	Le vallon des Yettes Condjà	108
3.3.4.1	Description générale du site	108
3.3.4.2	Eboulis Est	109
3.3.4.3	Versant Est du Mont Gelé	112
3.3.4.4	Synthèse	117
3.3.5	Eboulis du Mont Gelé, versant Sud	117
3.3.5.1	Description du site	117
3.3.5.2	Evidences de l'existence d'un système de ventilation	118
3.3.5.3	Présence de pergélisol ?	120
3.3.6	Eboulis fluant des Monts de Cion	121
3.3.7	Eboulis du Petit Mont Rouge	122
3.3.7.1	Description du site	122
3.3.7.2	Distribution du pergélisol	122
3.3.7.3	Evidences de l'existence d'un système de ventilation	124
3.3.7.4	Implications du système de ventilation sur l'occurrence de pergélisol	127
3.3.8	Eboulis de Tsena Réfien	128
3.3.8.1	Description du site et mesures effectuées	128
3.3.8.2	Eboulis A, B, C et glaciers rocheux	130
3.3.8.3	Eboulis D	135
3.3.8.4	Synthèse	137
3.3.9	Eboulis du Mont Gitsa	138
3.3.9.1	Description du site et mesures effectuées	138
3.3.9.2	Distribution du pergélisol	141
3.3.9.3	Un système de ventilation à 3000 m ?	143
3.3.9.4	Implications du système de ventilation sur l'occurrence de pergélisol	146
3.3.10	Versant ouest du Mont Dolin	146
3.3.10.1	Description du site et mesures effectuées	146
3.3.10.2	Distribution du pergélisol	147
3.3.10.3	Fonctionnement d'un système de ventilation ?	150
3.3.10.4	Synthèse	153
3.3.11	Versant est du Mont Dolin	153
3.3.11.1	Description du site	153
3.3.11.2	Distribution du pergélisol	153
3.3.11.3	Indices du fonctionnement d'un système de ventilation et ses implications	160
3.3.12	Eboulis de Tsarmine	161
3.3.12.1	Description du site et mesures effectuées	161
3.3.12.2	Distribution du pergélisol et régime thermique de surface	161
3.3.13	Eboulis de Perroc	164
3.3.13.1	Description du site et mesures effectuées	164
3.3.13.2	Distribution du pergélisol	164
3.3.14	Eboulis du Creux du Boui	165
3.3.14.1	Description du site	165
3.3.14.2	Propriétés électriques de l'éboulis	166
3.3.14.3	Régime thermique de surface	167
3.3.15	Eboulis des Charmettes	168
3.3.15.1	Description du site et observations	168
3.3.15.2	Propriétés électriques de l'éboulis	169

3.3.15.3 Régime thermique de surface	170
3.3.16 Autres éboulis	171
<b>3.4 Synthèse - discussion</b>	<b>173</b>
3.4.1 Caractéristiques électriques du pergélisol dans les éboulis	173
3.4.2 Distribution du pergélisol	175
3.4.3 La ventilation interne comme facteur de contrôle	176
3.4.3.1 Mise en évidence d'une ventilation ascendante à haute altitude	176
3.4.3.2 Profondeur du cheminement de l'air	177
3.4.3.3 Le rôle de la porosité	177
3.4.3.4 Localisation du sur-refroidissement maximal en hiver	178
3.4.3.5 Modèle de la ventilation ascendante au sein d'un éboulis de haute altitude	178
3.4.3.6 Réversibilité du système	179
3.4.3.7 Influence de la ventilation interne sur l'occurrence du pergélisol	180
3.4.4 Le rôle des avalanches	180
3.4.5 Teneur en glace des éboulis	181
<b>4 Dynamique des terrains sédimentaires gelés: relation avec les caractéristiques du pergélisol et signification climatique</b>	<b>185</b>
<b>4.1 Introduction et problématique</b>	<b>185</b>
4.1.1 Réchauffement du pergélisol	185
4.1.1.1 Généralités	185
4.1.1.2 Le forage des Lapires	186
4.1.2 Fluage du pergélisol	187
Réaction de la dynamique des glaciers rocheux face au réchauffement du pergélisol et variations saisonnières	187
4.1.4 Objectifs et hypothèses de recherche	189
<b>4.2 Etudes de cas</b>	<b>191</b>
4.2.1 Moraine de poussée du Col des Gentianes	191
4.2.1.1 Description du site	191
4.2.1.2 Régime thermique du pergélisol : le forage	193
4.2.1.3 Propriétés électriques de la moraine et répartition spatiale du pergélisol	197
4.2.1.4 Mouvements de terrain	198
4.2.1.5 Conclusions	202
4.2.2 Glaciers rocheux du Vallon des Yettes Condjà	203
4.2.2.1 Caractéristiques du pergélisol	203
4.2.2.2 Vitesses annuelles	207
4.2.2.3 Accélération du glacier rocheux B ?	208
4.2.2.4 Glacier rocheux C: une dynamique plus calme	210
4.2.2.5 Variations annuelles	211
4.2.2.6 Variations saisonnières	214
4.2.2.7 Conclusions	216
4.2.3 Eboulis fluant du Lac des Vaux	217
4.2.3.1 Observations	217
4.2.3.2 Mouvements estivaux	217
4.2.4 Glacier rocheux de Tsarmine	219
4.2.4.1 Description du site	219
4.2.4.2 Caractéristiques du pergélisol	221
4.2.4.3 Estimation des mouvements sur la base de documents cartographiques et photographiques	222
4.2.4.4 Vitesses annuelles	223
4.2.4.5 Variations saisonnières	223
4.2.4.6 Conclusions	224

4.2.5	Glacier rocheux des Lués Rares	225
4.2.5.1	Caractéristiques du pergélisol	226
4.2.5.2	Indices géomorphologiques de mouvements	226
4.2.5.3	Estimation des mouvements sur la base de documents cartographiques et photographiques	226
4.2.6	Glacier rocheux du Col de Chassoure	227
4.2.6.1	Description du site et observations	227
4.2.6.2	Mouvements estivaux	227
4.2.7	Glacier rocheux du Mont Dolin	228
4.2.7.1	Observations	228
4.2.7.2	Mesures de déplacements	229
4.2.8	Glacier rocheux de la Pointe du Tsaté	230
<b>4.3</b>	<b>Conclusions</b>	<b>232</b>
4.3.1	Magnitude des mouvements	232
4.3.2	Influence des caractéristiques du pergélisol sur la magnitude des mouvements	233
4.3.3	Réponse de la dynamique des glaciers rocheux au réchauffement du pergélisol	233
4.3.4	Variations saisonnières des mouvements	235
<b>5</b>	<b>Conclusion générale et perspectives de recherches futures</b>	<b>239</b>
<b>5.1</b>	<b>Le pergélisol dans les éboulis</b>	<b>239</b>
5.1.1	Distribution du pergélisol dans les éboulis d'altitude	239
5.1.2	Part et implication de la ventilation dans la distribution du pergélisol et dans son maintien	240
5.1.3	Conséquences pour la modélisation de la distribution du pergélisol	241
5.1.4	Perspectives de recherches futures et questions ouvertes	241
<b>5.2</b>	<b>Dynamique des terrains sédimentaires gelés</b>	<b>242</b>
5.2.1	Enseignements principaux	242
5.2.2	Perspectives de recherches futures	243
<b>5.3</b>	<b>En terme de risques</b>	<b>243</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>247</b>