



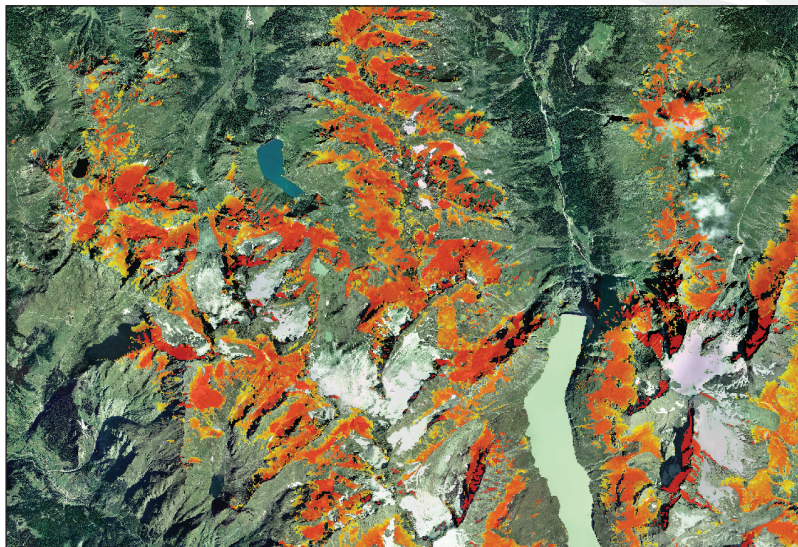
UNIL | Université de Lausanne  
Faculté des géosciences  
et de l'environnement

Master of Science in Geography

# MODELISATION DE LA REPARTITION DU PERGELISOL ALPIN A L'AIDE DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

NICOLA DELUIGI

Sous la direction du Dr. Christophe Lambiel  
Expert: Prof. Martin Hoelzle



Maîtrise universitaire ès sciences en géographie | Janvier - 2012



Institut de géographie, Université de Lausanne | [www.unil.ch/igul](http://www.unil.ch/igul)

*Figure de couverture:* carte de la répartition potentielle du pergélisol  
à l'aide de l'apprentissage automatique.



## RÉSUMÉ

La plupart des modèles de distribution spatiale du pergélisol alpin existants montrent généralement une corrélation entre l'occurrence de pergélisol et l'augmentation de l'altitude (KELLER & HOELZLE, 1996; OFEV, 2005). Ce constat s'avère valide à l'échelle régionale. Cependant, à une échelle géographique plus locale, ils ne permettent pas de refléter la très forte discontinuité spatiale du pergélisol de montagne, comme par exemple le fait que le pergélisol soit généralement présent uniquement dans la moitié inférieure d'un éboulis (LAMBIEL & PIERACCI, 2008). Cette recherche se propose d'établir un nouveau modèle empirico-statistique de la répartition du pergélisol dans les formations superficielles (éboulis, glaciers rocheux, dépôts morainiques), en tenant compte des dernières connaissances acquises sur le terrain. L'objectif est d'établir un modèle qui soit le plus fiable possible à l'échelle locale. La modélisation a été établie à partir de variables caractérisant la région Mont Fort - Mont Gelé (Verbier-Nendaz, VS) et testée sur la feuille 1:25'000 Rosablanche. Les variables utilisées sont l'altitude, la température moyenne annuelle de l'air, la radiation solaire directe, l'exposition, les glaciers, les marges proglaciaires, les glaciers rocheux, les éboulis ou encore les surfaces végétales. Ces dernières ont été tirées de manipulations du MNT25 et de la couche de surfaces primaires de Swisstopo. Le jeu de données a été complété par des mesures empiriques récoltées au cours des dernières années par l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne (IGUL). La modélisation a été effectuée en utilisant des séparateurs à vaste marge (Support Vector Machines – SVM) (KANEVSKI *ET AL.*, 2009). Cette méthode se base sur un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé, permettant de résoudre des problèmes de discrimination non-linéaire. La limite inférieure du pergélisol pour les parois rocheuses a été ajoutées au modèle dans un deuxième temps.

### *Mots clés*

Géomorphologie – Pergélisol – Eboulis – Modélisation - Formations sédimentaires - Glacier rocheux

## ABSTRACT

Most of the existing models of the alpine permafrost distribution show a direct correlation between the permafrost occurrence and the increase of altitude (KELLER & HOELZLE, 1996; OFEV, 2005). If this may be correct at a regional scale, it is not valid at a more local scale, because of the high spatial discontinuity of alpine permafrost. For instance, recent studies showing that permafrost is usually present only in the lower part of talus slopes (LAMBIEL & PIERACCI, 2008) has never been modeled. The purpose of this study is the development of a new empiric-statistical model of the alpine permafrost distribution in unconsolidated landforms, such as talus slopes, rock glaciers or glacial deposits, which includes the recent knowledge obtained from field investigations. The main goal is to develop a model reliable at the local scale. Predictor variables cover the Mont Fort-Mont Gelé region (Verbier-Nandaz, VS) and the model has been tested on the 1:25'000 Rosablanche topographic map. Inputs such altitude, mean annual air temperature, direct solar radiation, aspect, glaciers, glaciers forefields, rock glaciers, talus slopes or vegetation were extrapolated from a digital elevation model (DEM25), the Swisstopo primary surfaces map and rock glacier inventory. The dataset has been completed by empirical data obtained by the Geography Institute of the University of Lausanne during field campaigns. For this, modeling "Support Vector Machines" have been chosen. This method is based on machine learning, and permits to solve non linear discrimination problems (KANEVSKI *ET AL.*, 2009). The permafrost lower limits for rockwalls has been added to the model in a second step.

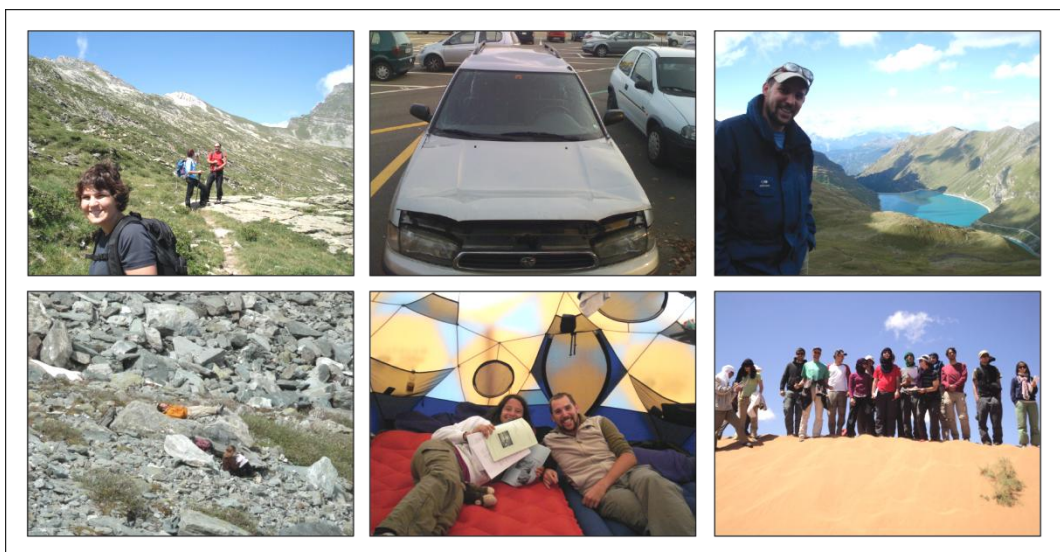
### *Keywords*

Geomorphology – Permafrost - Talus slope – Modelling - Sedimentary deposits - Rock glacier

## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier les personnes suivantes, sans lesquelles la réalisation de ce travail de Mémoire aurait été impossible :

- le Dr. Christophe Lambiel, mon directeur de Mémoire, qui m'a toujours offert sa disponibilité et sa confiance totale tout au long du travail.
- le Prof. Martin Hoelzle, expert de Mémoire, pour sa disponibilité ;
- le Dr. Cristian Scapozza, pour les journées de terrain extraordinaires passées ensemble. Merci notamment pour les nombreuses discussions concernant ma problématique de Mémoire accompagnées de quelques verres de blanc et d'une bonne raclette à l'hôtel de Siviez ;
- le Prof. Emmanuel Reynard, directeur de l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne, pour ses enseignements durant mon parcours académique et pour m'avoir offert un emploi comme assistant-étudiant pendant l'été 2010. Cette possibilité a sûrement contribué à élargir mes connaissances ;
- le futur Dr. Jean-Baptiste Bosson, pour son énorme disponibilité et pour les moments superbes passés ensemble.
- le futur Dr. Natan Micheletti, pour le temps qu'il ne m'a jamais nié et l'aide précieuse offert lors du traitement des données ;
- Laura Bernasconi, amie et collègue de Master, pour le soutien, les encouragements et les beaux moments que nous avons partagé à l'université et sur la route avec « la bagnole » ;
- mes parents et ma sœur, qui m'a toujours soutenu ;
- mes amis de l'UNIL, en particulier Adrien, Gabriele, Simona, Albedo, Adriano, Line, Lucie, Antoine, Laetitia, Mariano, Simon, l'équipe des valaisans et tous ceux que j'ai malheureusement oublié de citer. **Merci beaucoup à tout le monde !**



# TABLES DES MATIÈRES

Résumé	2
Abstract	3
Remerciements	4
Tables des matières	5
Table des illustrations	9
1. Introduction	14
1.1 Problématique générale	15
1.2 Objectifs généraux	16
1.3 Structure du travail	17
2. La modélisation environnementale	18
2.1 La géographie quantitative : définition et objectifs	19
2.2 Pourquoi modéliser l'environnement?	19
2.3 Les notions de simplicité et complexité	20
2.4 Objectifs et caractéristiques d'un modèle environnemental	21
2.4.1 Typologies de modèles	21
2.4.2 Les modèles stochastiques	24
2.4.3 Elaboration et développement d'un modèle	25
2.4.4 Variables, constantes, paramètres et calibration d'un modèle	26
2.4.5 Test, validation, erreur et incertitude	27
2.3 Synthèse	27
3. Le pergélisol	29
3.1 Rappels théoriques	31
3.1.1 La notion de pergélisol	31
3.1.2 Les facteurs de contrôle selon l'échelle géographique	33
3.1.3 La répartition du pergélisol dans les parois rocheuses	35
3.1.4 Le pergélisol dans les terrains sédimentaires meubles	36
3.1.4.1 Les éboulis : notions théoriques et répartition du pergélisol	36
3.1.4.2 Les glaciers rocheux : l'expression visible du pergélisol	41
3.1.4.3 Le pergélisol dans les formations morainiques	43
3.1.4.4 Le sol fluants	44

3.1.5	La limite inférieure et la distribution typique et atypique du pergélisol alpin discontinu	45
3.1.6	Synthèse	47
3.2	La modélisation de la répartition du pergélisol : état de la recherche	48
3.2.1	Les bases de la recherche	48
3.2.1.1	Les premiers modèles empiriques de répartition du pergélisol alpin	50
3.2.2.2	Les modèles empirico-statistiques de répartition du pergélisol alpin	50
3.2.2.3	Les modèles physiques de répartition du pergélisol alpin	51
3.2.3.4	La modélisation du pergélisol alpin dans les parois rocheuses	53
3.2.2	Cartes de l'extension potentielle du pergélisol alpin	54
3.2.2.1	A l'échelle nationale	54
3.2.2.2	A l'échelle des Alpes	55
3.2.2.1	A l'échelle continentale	56
3.2.3	Modèles physiques d'évolution temporelle du pergélisol alpin à l'échelle de l'objet	57
3.2.4	Synthèse	59
4.	Problématique et méthodes	61
4.1	Problématique et objectifs de recherche	63
4.2	Choix de la zone d'étude	64
4.2.1	Caractéristiques géographiques, géologiques et climatiques de la région couverte par la feuille Rosablanc	65
4.2.2	Sites d'intérêt particulier	67
4.2.2.1	Secteur des versants entourant le Mont Gelé	67
4.2.2.2	Secteur de la combe de Momin	68
4.2.2.3	Secteur de la Pointe et de la Combe d'Allèves	68
4.2.2.4	Secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du Glacier des Tsauderys	69
4.2.2.5	Secteur du Mont Rouge et du Pic d'Artsinol	69
4.3	Les méthodes utilisées	70
4.3.1	L'apprentissage automatique	70
4.3.2	Les machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge	72
4.3.2.1	Hyperplans de séparation optimaux	72
4.3.2.2	Le problème d'optimisation de la largeur $\rho$	75
4.3.2.3	Vecteurs de support et leur pertinence	76



4.3.2.4	La marge de classification « molle »	77
4.3.3	Intégration d'une fonction noyau	78
4.3.8	Les fonctions noyau	79
4.3.9	Le choix des paramètres et des hyperparamètres	80
4.3.10	L'évaluation quantitative d'un modèle	81
4.3.11	La sigmoïde de transformation	83
5.	Modélisation du pergélisol alpin à l'aide de l'apprentissage automatique	84
5.1	Annotations préliminaires	85
5.2	La modélisation du pergélisol alpin dans les terrains sédimentaires	85
5.2.1	Le rôle du modèle numérique de terrain	85
5.2.2	Traitement des variables	87
5.2.2.1	L'altitude	88
5.2.2.2	La MAAT	88
5.2.2.3	L'orientation	90
5.2.2.4	La radiation solaire directe	90
5.2.2.5	La pente	91
5.2.2.6	La courbure du terrain	91
5.2.2.7	La végétation	92
5.2.2.8	Les surfaces à couverture minérale	92
5.2.2.9	Les glaciers et les marges proglaciaires	93
5.2.2.10	Les lacs et les infrastructures humaines	94
5.2.2.11	Les glaciers rocheux intacts	94
5.2.2.12	Les parois rocheuses et les éboulis	95
5.2.3	Absence ou présence certaine de pergélisol alpin	97
5.2.4	Le jeu de données	99
5.2.5	La division du jeu de données d'entraînement, de test et de validation	100
5.2.6	Le processus d'entraînement	101
5.2.7	Le processus de prédiction	102
5.3	La modélisation du pergélisol alpin dans les parois rocheuses	104
5.4	Carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin issue de PERB	106
6.	Analyse et discussion des résultats	108
6.1	Analyses quantitatives	109
6.2	Analyses qualitatives	111
6.2.1	Secteur des versants entourant le Mont Gelé	111

6.2.2	Secteur de la combe de Momin _____	112
6.2.3	Secteur de la Pointe et de la Combe d'Allèves _____	113
6.2.4	Secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du Glacier des Tsauderys _____	114
6.2.5	Secteur du Mont Rouge et du Pic d'Artsinol _____	115
6.3	Discussion des résultats _____	117
6.3.1	Synthèse des résultats _____	117
6.3.2	Comparaisons avec la carte officielle de l'extension potentielle du pergélisol _____	117
6.3.3	Les limites de PERB _____	119
6.3.4	Clé d'interprétation de la carte à l'échelle locale et de l'objet _____	120
7.	Conclusion _____	123
7.	Conclusion _____	125
7.1	Conclusions générales _____	125
7.2	Perspectives des recherche _____	126
8.	Références _____	128
9.	Annexes _____	142
	Annexe I _____	142
	<b>Alps in danger of tumbling down</b> _____	142
	Annexe II _____	144
	Annexe III _____	144

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure II.1: tunnel du vent de simulation des condition climatiques (d'après NASA, 2010)	26
Figure II.2: pouvoir prédictif et pouvoir explicatif des modèles environnementaux	28
Figure III.1: la stratigraphie d'un pergélisol (modifié d'après FRENCH (1996).	36
Figure III.2: les facteurs de contrôle du pergélisol selon l'échelle géographique (modifié de LAMBIEL,2006)	37
Figure III.3: champ thermique à l'intérieur d'un massif montagneux (NOETZLI & GRUBER, 2005).	39
Figure III.4: voiles d'éboulis de la combe de Dreveneuse (Chablais valaisan et l'éboulis conique du Gourde de la Plâne dans la Réserve de la Pierreuse (Vaud) (Photos : DELALOYE, dans MORARD ET AL., 2009).	41
Figure III.5: fonctionnement schématique du système de ventilation à l'intérieur des éboulis froids (modifié d'après MORARD ET AL., 2010).	43
Figure III.6: fenêtres de fonte et une cheminée de fonte dans la partie amont d'un éboulis de montagne (Photos : LAMBIEL, notes de cours).	44
Figure III.7: le glacier rocheux spectaculaire du versant Nord-Est du Gilpin Peak, au Colorado (Photo : BOB WEBSTER).	45
Figure III.8: facteurs de contrôle et caractéristiques d'un glacier rocheux (Photo : DELUIGI, 2011).	46
Figure III.9: répartition des sédiments gelés dans la marge proglaciaire du Ritord et de l'Epée (DELALOYE, 2004).	47
Figure III.10: marge proglaciaire des Rognes (Massif du Mont Blanc) dans laquelle une langue glaciaire couverte de blocs est observable (UTZ, 2011).	48
Figure III.11: des formes de fluage à Motta Blantse dans le Val de Moiry (UTZ, 2012 in prep.).	49
Figure III.12: extension potentielle du pergélisol de la région du Corvatsch-Furschellas à l'aide de PERMAKART (KELLER, 1992).	54
Figure III.13 : extension potentielle du pergélisol DE la Turtmantal à l'aide de PERMAMAP (NYENHUIS, 2005).	55
Figure III.14 : conception schématique des modules de PERMABAL (STOCKER-MITTAZ ET AL., 2002).	56
Figure III.15 : modélisation de la MARST dans les parois rocheuses pour les sites du Corvatsch et du Jungfraujoeh (GRUBER ET AL., 2004).	57
Figure III.16 : carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin (OFEV, 2005).	58

Figure III.17 : la légende de la carte de l'OFEV, avec les classes de probabilité qui ont été attribuées à la probabilité d'occurrence du pergélisol (OFEV, 2005). ..... 58

Figure III.18 : aperçu de la répartition du pergélisol pour la région du Mont Gelé. La zone délimitée en rouge indique comment cette carte ne tient pas compte de la distribution atypique du pergélisol dans les éboulis (OFEV, 2005). ..... 59

Figure III.19 : modèle de répartition du pergélisol à l'échelle continentale (dans HARRIS ET AL., 2003). ..... 60

Figure III.20 : modèle de l'extension du pergélisol à l'échelle continentale pour les hémisphères Nord et Sud (OELKE & ZHANG ; 2004). ..... 61

Figure III.21 : fonctionnement schématisé du COUP-Model (Modifié d'après JANSSON & KARLBERG; 2001). ..... 62

Figure III.22 : application du COUP-Model pour la détermination des températures du sol et de l'épaisseur de neige (SCHERLER & HOELZLE, 2011). ..... 62

Figure III.23 : projection de l'épaisseur de la couche active et de la neige au Schilthorn jusqu'à 2101 (SCHERLER ET AL., 2011). ..... 63

Figure IV.1 : localisation de la feuille Rosablanche (fond de carte : Swisstopo). ..... 69

Figure IV.2 : aperçu de la carte topographique (Swisstopo). ..... 69

Figure IV.3 : aperçu de la carte géologique couvrant la zone d'étude (Swisstopo). ..... 70

Figure IV.4 : carte des précipitations annuelles moyennes en Suisse (MétéoSuisse). .... 70

Figure IV.5 : le secteur du Mont Gelé (fond de carte : Swisstopo). ..... 71

Figure IV.6 : le secteur de la Combe du Momin (fond de carte : Swisstopo). ..... 72

Figure IV.7 : le secteur de la Combe et de la Pointe d'Allèves (fond de carte : Swisstopo). ..... 72

Figure IV.8 : secteur des glaciers de Darbonneire et des Tsauderys(fond de carte : Swisstopo). ..... 73

Figure IV.9 : le secteur du Pic d'Artsinol (fond de carte : Swisstopo). ..... 73

Figure IV.10 : la limite linéaire entre deux groupes de données dans un espace N-dimensionnel (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009). ..... 77

Figure IV.11 : classification de deux groupes d'objet par une marge de largeur  $\rho$  à l'aide de vecteurs de support (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009). ..... 78

Figure IV.12 : maximisation de la marge linéaire de classification binaire,(modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009). ..... 78

Figure IV.13 : l'introduction de variables d'écart permettant la classification pour un jeu de données bruité ou contenant des valeurs extrêmes (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009). ..... 81

Figure IV.14 : aperçu du changement N-dimensionnel produit par l’astuce du noyau, permettant de passer d’un espace réel à un espace de redescription (modifié d’après KANEVSKI ET AL., 2009). .....	83
Figure IV.15 : qualité d’un modèle en fonction de sa complexité et de son erreur (modifié d’après KANEVSKI ET AL., 2009). .....	85
Figure IV.16 : points relevants d’une courbe ROC, mettant en relation le taux de faux positifs avec le taux de vrais positifs (modifié d’après HAMEL, 2009). .....	86
Figure IV.17 : la sigmoïde de transformation (modifié d’après PLATT, 1999). .....	87
Figure V.1 : aperçu en trois dimensions de l’information contenue dans un MNT. ....	90
Figure V.2 : aperçu de la perte de l’information en fonction de la résolution du MNT utilisé. ....	91
Figure V.3 : aperçu de la carte des altitudes issue du MNT. ....	92
Figure V.4 : aperçu de la carte des températures. ....	92
Figure V.5 : aperçu de la carte des orientations issue du MNT. ....	94
Figure V.6 : aperçu de la carte de la radiation solaire issue du MNT. ....	94
Figure V.7 : aperçu de la carte des pentes issue du MNT. ....	95
Figure V.8 : schéma de la courbure du terrain caractérisant un éboulis. ....	95
Figure V.9 : aperçu de la carte de la courbure du terrain. ....	96
Figure V.10 : aperçu de la carte de la végétation et des surfaces à couverture minérale, issues de la couche des surfaces primaires de Swisstopo. ....	96
Figure V.11 : aperçu de la carte des glaciers et des marges proglaciaires. ....	97
<i>Figure V.12 : aperçu de la carte des lacs et des zones bâties. ....</i>	<i>98</i>
Figure V.13 : aperçu de la carte des glaciers rocheux. ....	98
Figure V.14 : aperçu de la carte des éboulis et des parois rocheuses. ....	101
Figure V.15 : aperçu de la carte des glaciers rocheux et des sites investigués.....	102
Figure V.16 : carte de l’occurrence certaine ou inconnue du pergélisol pour la région de la Rosablanche. ....	103
Figure V.17 : visuellement le jeu de données se présente comme l’empilement des variables. ....	104
Figure V.18 : carte des valeurs restituées par la fonction de décision. Quelques exemples indiquant la présence ou absence de pergélisol est observable : les glaciers rocheux actifs (A), les éboulis (B), les lacs (C), les glaciers (D), les marges proglaciaires (E), etc.	107
Figure V.19 : carte de la répartition du pergélisol potentielle dans les formation sédimentaires meubles. En dessous d’une probabilité d’occurrence de 40% le pergélisol (ou son absence) n’as pas été représenté. Dans cette carte la répartition du pergélisol dans les parois rocheuses n’est pas considéré. ....	108

Figure V.20 :le modèle topoclimatique de la répartition du pergélisol dans les parois rocheuses, qui sera par la suite intégré au résultat des SVM. ....	109
Figure V.21 : carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin pour la totalité de la feuille Rosablanche. Elle est issue d'une prédiction à l'aide des Machines à Vecteurs (terrains sédimentaires) et d'un modèle topoclimatique (parois rocheuses). ....	111
Figure VI.1 : carte de la répartition du pergélisol du secteur du Mon Gelé. ....	115
Figure VI.2 : carte de la répartition du pergélisol du secteur de la Combe de Momin. ....	116
Figure VI.3 : carte de la répartition du pergélisol du secteur de la Combe d'Allèves. ...	117
Figure VI.4 : carte de la répartition du pergélisol du secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du Glacier des Tsauderys. ....	118
Figure VI.5 : carte de la répartition du pergélisol du secteur du Pic d'Artsinol. ....	119
Figure VI.6 : cartographie des deux glaciers rocheux en amont du Pic d'Artsinol. ....	120
Figure VI.7 : comparaison des modèles de répartition du pergélisol M-OFEV et PERB pour le secteur du Mont Gelé. ....	122
Figure VI.8 : comparaison des modèles de répartition du pergélisol M-OFEV et PERB pour le secteur du Pic d'Artsinol. ....	122
Figure VI.9 : environnements typiques pour lesquelles une clé d'interprétation du modèle pourrait être utile (Photos : ©Rogers (gauche), Deluigi(droite). ....	125
Tableau III.I : caractéristiques principales des glaciers rocheux intacts et fossiles (Photo : DELUIGI, 2011). ....	46
Tableau III.II: synthèse de la répartition du pergélisol dans plusieurs types d'environnement. ....	50
Tableau III.III: modèle topo-climatique des limites inférieures du pergélisol (possible ou probable) selon l'orientation e la localisation du site (modifié d'après HAEBERLI, 1996). ....	53
Tableau III.IV : aperçu des caractéristiques de plusieurs modèles et leur adaptabilité à l'échelle géographique (modifié d'après SCAPOZZA, 2008). ....	63
Tableau IV.I : matrice de confusion des instances observées et calculées (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009). ....	85
Tableau V.I : aperçu du jeu de données utilisé pour la réalisation du modèle. ....	103
Tableau V.II : les poids issus de l'étape d'entraînement. ....	105
Tableau V.III : altitudes minimale pour lesquelles du pergélisol est observable dans les parois rocheuses (PERMOS, 2009). ....	108
Tableau VI.I : les caractéristiques de la meilleure simulation de PERB. ....	113
Graphique V.I : évolution de la MAAT pour la station des Attelas. ....	93

Graphique V.II : la distribution des classes de pente de la région d'étude, issue de Histofit. ....	99
Graphique V.III : les limites des morphologies proposées par Histofit. ....	100
Graphique V.IV : distribution des poids issus de l'étape d'entraînement permettant la compréhension des variables significatives pour la répartition du pergélisol.. ....	105
Graphique V.V : altitudes minimale pour lesquelles du pergélisol est observable dans les parois rocheuses pour les 8 orientations (PERMOS, 2009). ....	108
Graphique V.VI : distribution de la probabilité calculée pour la totalité des pixels du raster. ....	110
Graphique VI.I : 10 courbes ROC du jeu de données divisé en 1600/1600/2800 exemples .....	114
Boîte V.I : rappel théorique sur les formules de BOUËT (1985).....	93





# 1. INTRODUCTION



## 1.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

La prise en compte et l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques constitue un des principaux défis du 21<sup>ème</sup> siècle. Les modèles climatiques prédisent une augmentation significative des températures et des précipitations, s'éloignant fortement des valeurs qui ont caractérisé le dernier siècle (IPCC, 2001). Les cycles énergétiques et hydrologiques seront particulièrement touchés par ces évolutions. Bien que l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère et des océans soit un phénomène qui engendre des modifications significatives à l'échelle de toute la planète, elles s'avèrent particulièrement importantes aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord où la réponse aux modifications du climat est plus rapide (IPCC, 2001). Fortement présente à ces latitudes et étant une des composantes majeures du cycle hydrologique, la cryosphère subira d'importantes transformations au cours des prochaines décennies. Les milieux environnementaux situés dans l'arc alpin seront autant touchés que les régions polaires. Le recul des glaciers de montagne, ainsi que la dégradation thermique du pergélisol alpin sont déjà évidents (BENISTON & HAEBERLI, 2001 ; GIEC, 2002). Une étude menée par le *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) a récemment souligné qu'à partir de 1850, la majorité des glaciers de toute la planète ont subi un retrait considérable. Dans certains cas, ils ont même complètement disparus (WGMS, 2005). Cette tendance est en accord avec l'augmentation des températures mesurée à l'échelle globale et régionale (IPCC, 2001). De plus, pour les Alpes Suisses, SCHERRER *ET AL.* (2005) ont montré une diminution significative des précipitations neigeuses en basses altitudes, également attribuée au réchauffement climatique.

Une correspondance similaire a été observée pour les mesures de la température du sol gelé en permanence (HARRIS *ET AL.*, 2003). Les auteurs indiquent que des températures de plus en plus chaudes se traduisent par une augmentation des instabilités de versants qui provoquent une augmentation des risques associés aux éboulements et aux glissements de terrain. La problématique de la dégradation du pergélisol alpin dans le contexte du réchauffement climatique a récemment fait l'objet de nombreuses études (DAVIES *ET AL.*, 2001 ; OCCC, 2002 ; OCCC, 2003 ; HARRIS *ET AL.*, 2003) et concerne autant les matériaux non-consolidés que la roche en place. Bien que la réponse du permafrost soit légèrement décalée par rapport au réchauffement thermique de la surface, les forages montrent que le permafrost n'est plus en équilibre avec les conditions climatiques. Le modèle proposé par DAVIES *ET AL.* (2001) a révélé une corrélation entre la diminution de la stabilité des parois rocheuses gelées et l'augmentation de la température, en raison de la disparition de la glace remplissant et consolidant les interstices des zones fissurées. L'accélération des vitesses de fluage de certains glaciers rocheux (LAMBIEL & DELALOYE, 2004 ; KÄÄB *ET AL.*, 2007) au cours de la dernière décennie tend par ailleurs à confirmer cette tendance.

Aujourd'hui, ces phénomènes suscitent l'intérêt tant de la communauté scientifique que de la presse (voir ANNEXE I). En Europe, la volonté d'étudier la relation entre le climat et le pergélisol a abouti à la constitution du projet *Permafrost and Climate in Europe*

(PACE). Comme le territoire suisse est occupé par environ 4 à 6% de terrains gelés en permanence (KELLER ET AL., 1998), la création d'un réseau de monitoring similaire au réseau européen semblait nécessaire. Ainsi, le *Swiss Permafrost Monitoring Network* (PERMOS) a vu le jour en 2000. Les connaissances concernant le pergélisol discontinu alpin en Suisse se sont améliorées grâce aux nombreux travaux qui ont été réalisés au cours des dix dernières années, notamment par les Instituts de recherche des Universités de Zurich, Fribourg, Lausanne et par l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF) de Davos. Bien que l'abondance de la littérature dans ce domaine ne soit pas nouvelle (cf. 3.1), le siècle qui vient de se conclure s'est caractérisé par un effort important dans la compréhension des facteurs de contrôle régissant l'occurrence du pergélisol à une échelle géographique locale. Cependant, les dernières recherches ont montré que ces facteurs ne permettaient plus d'expliquer des discontinuités locales et remettaient en question les connaissances acquises jusqu'alors. Le pergélisol s'est révélé un phénomène qui se caractérise par une forte discontinuité spatiale et plusieurs auteurs ont proposé de ne plus corrélérer la répartition du pergélisol alpin aux seuls facteurs topoclimatiques de l'endroit considéré. En revanche, ils donnent une grande importance à des facteurs plus locaux (par exemple REYNARD ET AL., 2003 ; DELALOYE, 2004 ; DELALOYE & LAMBIEL, 2005 ; HOELZLE ET AL., 2005 ; LAMBIEL, 2006 ; MORARD, 2008 ; SCAPOZZA, 2012). L'intégration de ces concepts dans une modélisation de l'extension potentielle du pergélisol est malheureusement très complexe et aucun modèle existant actuellement (cf. 3.2) ne simule avec précision la distribution atypique du pergélisol (cf. 3.1.4.1).

Pour cette raison, des efforts dans cette direction sont à présent indispensables afin d'améliorer les connaissances concernant la répartition potentielle du pergélisol alpin, notamment dans les régions de montagne où des infrastructures ont été bâties (touristiques, communications, approvisionnement énergétique, etc.). Une modélisation représentant de manière plus fiable la répartition des sols gelés en permanence se traduirait d'une part par une amélioration des connaissances en matière de pergélisol, notamment dans un contexte de recherche fondamentale, et, d'autre part, par l'application de ce même savoir à des problématiques concrètes comme la prévention contre les risques naturels.

## 1.2 OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Cette recherche s'inscrit dans l'ensemble des travaux concernant *l'étude du domaine périglaciaire alpin et de sa réaction face au réchauffement climatique en cours*. Sur la base des considérations décrites plus haut (cf. 1.1), elle a l'ambition de développer un modèle de la répartition potentielle du pergélisol alpin qui ne tient pas uniquement compte de la relation linéaire entre l'occurrence du permafrost et l'altitude (cf. 3.1.2). Plusieurs facteurs de contrôle expliquant la présence de pergélisol à une échelle locale doivent être intégrés. Pour ce faire, il est essentiel de choisir une méthode adaptée pour la réussite de cette modélisation. Les Machines à Vecteurs de Support, technique

appartenant au domaine de l'apprentissage automatique, peuvent se révéler satisfaisante à ce propos (cf. 4.3). Par conséquent, ce travail de mémoire a un double objectif : *produire une carte de la répartition du pergélisol alpin qui soit la plus fiable possible à l'échelle locale (notamment en relation avec son comportement atypique dans les éboulis) et tester une nouvelle approche dans la modélisation de la distribution du pergélisol alpin.*

### 1.3 STRUCTURE DU TRAVAIL

Après cette mise en contexte, le deuxième chapitre de ce document résume le rôle et les traits fondamentaux des modèles environnementaux. Il est suivi d'un troisième chapitre qui a comme objectif d'illustrer les principales notions théoriques en matière de pergélisol alpin. Les principaux modèles existants sur la répartition du permafrost sont présentés par la suite, en mettant l'accent sur les différentes approches adoptées jusqu'à aujourd'hui.

Afin d'approfondir la problématique et les objectifs spécifiques mentionnés dans ce chapitre introductif, un quatrième chapitre s'intéresse notamment aux motivations qui ont dicté la rédaction de ce travail de recherche. Un aperçu de la méthode est aussi présenté dans cette partie. Les deux chapitres qui suivent concernent le terrain d'étude choisi et la description de sites d'intérêt particulier permettant une analyse qualitative du modèle que a été développé dans le cadre de ce travail. La recherche se complétera par une description du traitement des variables nécessaires à la modélisation, pour aboutir à la présentation et la discussion des résultats obtenus. Un dernier chapitre présente les conclusions générales du travail et propose des perspectives de recherches futures.



## **2.LA MODÉLISATION ENVIRONNEMENTALE**





## 2.1 LA GÉOGRAPHIE QUANTITATIVE : DÉFINITION ET OBJECTIFS

La géographie quantitative est la branche de la géographie qui a pour objectif de développer des théories spatiales, d'analyser des données spatiales numériques, de créer et tester des modèles mathématiques concernant un processus spatial quelconque (FOTHERINGHAM ET AL., 2000). Le but premier de ce domaine est la compréhension et la quantification de ces processus.

L'approche quantitative est généralement efficace lorsqu'une amélioration des connaissances concernant un phénomène humain et physique est indispensable. Sujette à de nombreuses critiques, la géographie quantitative est cependant une discipline adéquate pour l'obtention d'un bon niveau d'information d'un processus sur la base d'une analyse de données spatiales. GRAHAM (1997) définit les géographes quantitatifs en deux catégories : les positivistes et les naturalistes. Ces derniers se caractérisent par la croyance que la « géographie s'appuie sur la physique », c'est-à-dire qu'il est possible de rechercher des règles et des relations globales permettant d'expliquer un phénomène naturel. Cette approche est nécessaire aux géographes physiques, car l'investigation des processus naturels est très souvent associée à la prédiction de ceux-ci. Il est donc indispensable de comprendre les mécanismes physiques à la base de leur dynamique. Selon le même auteur, le géographe humain est toutefois obligé d'intégrer une approche positiviste, qui requiert une analyse et des connaissances des faits réels vérifiés par l'expérience afin d'expliquer les phénomènes du monde. Le domaine d'étude de la géographie humaine est généralement dépendant des choix des êtres humains, ce qui rend très complexe la recherche de règles globales s'appliquant à toutes les échelles.

Dans la suite de ce chapitre, une meilleure explication des applications de la géographie quantitative est proposée en se focalisant sur les thématiques propres à la géographie physique, dans lesquelles ce travail de mémoire s'inscrit.

## 2.2 POURQUOI MODÉLISER L'ENVIRONNEMENT?

La compréhension du fonctionnement de notre planète est un objectif que les Hommes essaient d'atteindre depuis des millénaires. Au cours des dernières décennies, grâce au développement de l'informatique, l'émergence de modèles numériques s'est révélé être un complément important aux multiples techniques qui permettent d'aboutir à la complète connaissance des phénomènes environnementaux. Dans ce cadre, le développement des *Système d'Information Géographiques* (SIG) a été primordial. Les modèles se transforment en de véritables laboratoires virtuels permettant la visualisation et la représentation de ces phénomènes à plusieurs échelles géographiques. Le besoin de représenter et modéliser la réalité est devenu de plus en plus important en raison des changements climatiques contemporains et de l'impact toujours plus invasif de l'homme sur le milieu naturel. En effet, la majorité des travaux

effectués dans le domaine permettent de comprendre l'impact du réchauffement climatique et des activités humaines et de concevoir, par la suite, des scénarios à moyen et long terme.

## 2.3 LES NOTIONS DE SIMPLICITÉ ET COMPLEXITÉ

GRAND (2000) définit une tâche quelconque comme étant *complexe* lorsqu'elle contient un grand nombre d'informations ayant une utilité. Au contraire, il considère une tâche *compliquée*, lorsqu'elle contient beaucoup d'informations peu utiles ou sans signification.

Si on transpose cette définition à l'environnement, on pourrait imaginer ce dernier comme étant très compliqué pour l'être humain, car ses connaissances ne sont initialement pas suffisantes. Un des buts principaux d'un modèle est de donner une signification aux caractéristiques du milieu naturel étudié, afin de passer d'une représentation compliquée de celui-ci à une représentation complexe.

Cette définition de la complexité d'un système peut être associée au concept du « rasoir d'Ockham », très souvent utilisé dans le développement des théories scientifiques. Attribué au frère franciscain Guillaume d'Ockham au cours du XIV<sup>e</sup> siècle, l'énoncé « *pluralitas non est ponenda sine necessitate* » (« *les multiples ne doivent pas être utilisés sans nécessité* ») est aujourd'hui connu et appliqué aux sciences sous une formulation plus moderne :

*« les hypothèses les plus simples sont les plus vraisemblables »*

Cette citation s'applique très bien au concept de modèle, car ce dernier se caractérise par une simplification et une idéalisation de la réalité (WAINWRIGHT & MULLIGAN, 2005). De plus, il est souvent conçu à partir de bases subjectives car il est influencé par la conception propre du modélisateur. Modéliser l'environnement correspond donc à une abstraction du système naturel (ODUM, 1975). Cette dernière représente, de la façon la plus simple, une réalité complexe. En d'autres termes, le meilleur modèle est celui qui abouti à la représentation la plus proche de la réalité à l'aide de la paramétrisation et de la modélisation la moins complexe (WAINWRIGHT & MULLIGAN, 2005).

## 2.4 OBJECTIFS ET CARACTÉRISTIQUES D'UN MODÈLE ENVIRONNEMENTAL

Un modèle peut résulter de différents objectifs. Normalement, une modélisation ne constitue pas une alternative aux observations sur le terrain. Toutefois, elle est parfois un outil très utile permettant de compléter et de mieux expliquer ces dernières, ainsi que de développer ou valider une théorie scientifique. Comme un modèle est une abstraction d'un système réel qui en simplifie les composantes sur la base de ces observations et il dépend de la perception du modélisateur, la modélisation revient donc à « un art avec des bases rationnelles qui nécessite autant l'usage du bon sens que des connaissances mathématiques » (CROSS & MOSCARDINI, 1985). Modéliser signifie aussi scinder le système réel en plusieurs de ses composantes. Il en résulte une connotation subjective qui peut parfois ne pas être acceptée par tous les utilisateurs.

En règle générale, il est possible de définir plusieurs caractéristiques, voir objectifs, d'un modèle environnemental. Il est surtout une aide à la recherche, qui ne doit pas pour autant faire oublier que la recherche ne doit pas se bases que sur des modélisations. Les modèles facilitent parfois la description et l'analyse d'un système naturel, mettent en lien plusieurs disciplines ou concepts scientifiques, ou encore permettent la récolte d'informations trop coûteuses pour être obtenues par des mesures directes. Une modélisation peut ainsi être définie comme un véritable laboratoire virtuel dans lequel il est possible d'expérimenter des scénarios en modifiant les valeurs des variables exploitées, ce qui est parfois difficilement réalisable ou impossible dans la réalité.

### 2.4.1 Typologies de modèles

Les modèles ont toujours accompagné le développement des théories scientifiques sur l'environnement. Les modélisations les plus simples ont vu le jour dans l'antiquité déjà avec les premiers dessins et les premières cartes représentant une abstraction des processus naturels et de l'environnement connus à l'époque.

CROSS ET MOSCARDINI (1985) attribuent trois époques à la modélisation : la « Genius Age » correspond aux siècles caractérisés par le développement des grandes théories scientifiques permettant de décrire mathématiquement les lois physiques de la nature comme par exemple la gravité par Newton. Cette époque a été suivie par une « Transitional Age », pendant laquelle les premières machines permettaient de mieux décrire et simuler les processus naturels. Elles étaient par contre encore trop coûteuses, lentes ou difficiles d'utilisation. Le développement et l'amélioration des ordinateurs et de techniques numériques permettant le traitement de jeux de données de taille plus importante que dans le passé, ont permis d'entrer dans l'époque que les auteurs décrivent comme la « Contemporary Age ». Il s'agit de notre époque, toujours en développement, au cours de laquelle l'informatique permet la découverte et l'étude des sciences environnementales à travers une utilisation toujours plus *complexe* des relations mathématiques.

Une hiérarchisation des modèles « modernes » est dès lors possible. Deux familles principales peuvent être mises en évidence :

- les modèles physiques au sens large du terme (*hardware models*)
- les modèles mathématiques

Les premiers ne doivent pas être confondus avec les modèles mathématiques se basant sur des lois physiques. En effet, la famille des modèles physiques se réfère aux

Figure II.1: tunnel du vent de simulation des conditions climatiques (d'après NASA, 2010)



simulations d'un système réel dans un laboratoire. Les tunnels du vent (*figure IV.1*), permettant des tests de simulation dans des conditions climatiques particulières, sont des bons exemples. En règle générale, cette catégorie de modèle se développe à une échelle nettement plus réduite par rapport à l'échelle du

système réel, ce qui peut fausser les résultats. Malheureusement, les coûts de mise en place des infrastructures permettant ce genre de modélisations sont normalement trop élevés pour les agrandir et diminuer et par conséquent, l'incertitude des simulations obtenues est souvent problématique.

Les modèles mathématiques sont généralement plus communs et ils se basent uniquement sur des expressions mathématiques, tels que les algorithmes. Ces expressions permettent, d'une manière plus ou moins complexe, de décrire un phénomène dans l'espace et dans le temps, sur la base des informations connues a priori. Cette famille de modèles peut se diviser en différents types de modèles (WAINWRIGHT & MULLIGAN, 2005) :

- Les modèles empiriques, décrivant les relations existants entre les variables d'un système uniquement sur la base des observations de terrain, sans tenir compte des processus à la base d'un tel phénomène. Ces modèles sont généralement produits à l'aide d'expressions mathématiques simples qui essaient de mettre en relation des variables sans qu'aucun principe physique ne soit considéré. Les modèles empiriques se caractérisent donc par un fort pouvoir de prédiction (*figure IV.2*), ils manquent toutefois de pouvoir explicatif car ils se réfèrent aux caractéristiques propres à l'endroit où les données ont été collectées. Ils s'appliquent donc difficilement aux systèmes naturels possédant des conditions différentes. Cela signifie que, par exemple, la même relation empirique ne peut pas s'appliquer à un système réel possédant une altitude ou une latitude

différente du système originel. Il est généralement le cas pour les modèles empiriques de la répartition du pergélisol alpin qui se basent sur des mesures BTS (cf. 3.2) : la relation statistique qui existe entre la température du sol et l'altitude ne s'applique que pour l'endroit spécifique où les températures ont été enregistrées. Cette relation ne sera toutefois plus valable lorsqu'elle est appliquée à un endroit différent.

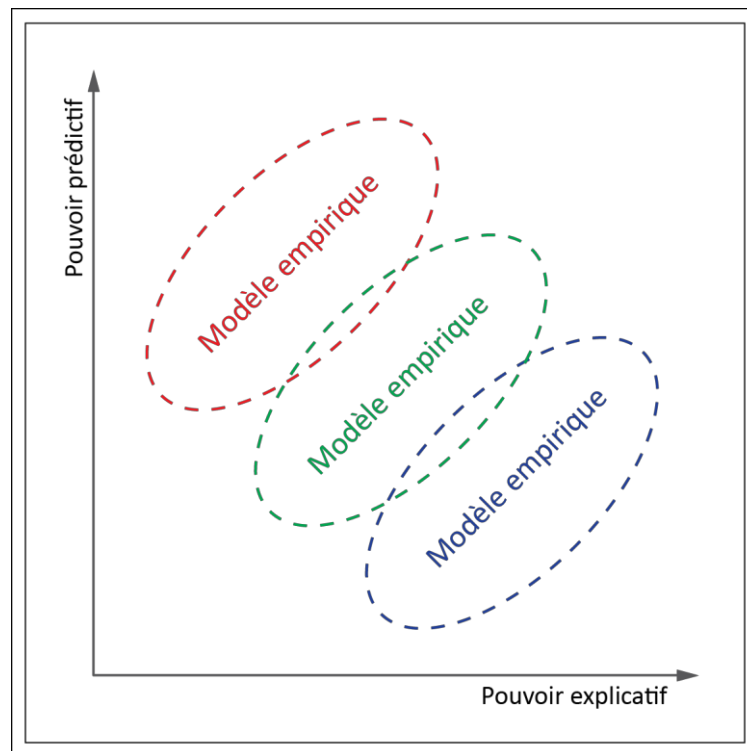
- Les modèles physiques au sens strict du terme, c'est-à-dire toute modélisation établie à partir de principes physiques qui produit une représentation du système qui est en accord avec les observations réelles (BEVEN, 2002). Malheureusement, dans la majorité des cas, un modèle physique intègre correctement des lois physiques, mais il reflète difficilement la réalité dans sa totalité. Parfois, lorsque tous les composants du système ne sont pas connus ou que les relations physiques seules sont insuffisantes, il est nécessaire d'inclure une généralisation empirique afin d'expliquer un phénomène. Le modèle PERMABAL (cf. 3.2.2.3) en est un bon exemple car il se base sur des lois physiques expliquant les flux énergétiques qui régissent les échanges entre l'atmosphère, la surface du sol et le sous-sol dans l'objectif de déterminer la température du sol.

En raison de ses caractéristiques, une modélisation physique (au sens strict du terme) ne permet pas une prédiction à long terme sur l'évolution d'un système naturel. Le pouvoir explicatif de ce type de modèle est par contre très élevé (*figure IV.2*), car il se base sur une loi physique précise qui *devrait* expliquer complètement le phénomène naturel étudié.

- Les modèles conceptuels permettent de concevoir une représentation du système réel à partir de notions considérées comme vraies et sur la base des relations existantes entre les variables retenues, issues d'observations sur le terrain. Contrairement à un modèle empirique, qui ne s'intéresse en aucune manière aux processus physiques permettant l'explication d'un phénomène, une modélisation conceptuelle se construit à partir de ces derniers. Dès lors, il est nécessaire d'avoir une vision claire des acteurs du système afin de pouvoir le décrire. Il est pourtant essentiel de revenir à la définition de CROSS & MOSCARDINI, qui affirment qu'un modèle dépend beaucoup de la perception subjective du modélisateur. En conséquence, un modèle de type conceptuel aura un pouvoir explicatif et descriptif moyen (*figure IV.2*), car il se base d'une part sur des préconcepts liés à la vision que le modélisateur possède du système, et d'autre part sur les relations entre les observations directes faites sur le même système. Un exemple d'un modèle conceptuel est la représentation de la répartition du pergélisol alpin dans les éboulis ventilés, dont un aperçu plus détaillé est proposé dans la suite de ce travail (cf. 3.1.4.1). Des mécanismes de ventilation ont clairement été démontrés sur la base de mesures et d'observations sur le

terrain, cependant leur représentation reste conceptuelle et, à l'heure actuelle, aucun modèle physique n'explique de manière précise ce phénomène.

Figure II.2: pouvoir prédictif et pouvoir explicatif des modèles environnementaux (DELUIGI).



## 2.4.2 Les modèles stochastiques

Dans le domaine des sciences de l'environnement l'étude d'un phénomène est souvent associée aux probabilités de retour de celui-ci, notamment en termes de fréquences et d'intensité. Grâce aux modèles stochastiques, c'est-à-dire les modèles qui s'intéressent à la probabilité qu'un phénomène naturel soit présent, il est possible de simuler des scénarios à partir de variables qui changent au cours du temps ou dans l'espace (VAREKAMP ET AL., 1996). Lorsque les données de départ sont aléatoirement variables, les données de sortie le seront aussi. Ce principe est à la base d'un modèle stochastique.

Aux cours des dernières décennies, la littérature scientifique s'est de plus en plus enrichie de publications proposant des nouvelles modélisations établies à partir de techniques de prédiction telles que les réseaux neuronaux artificiels (*Artificial Neuronal Networks*) ou l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) (KANEVSKI ET AL., 2009). Le développement de modèles probabilistes sous forme de simulations permet d'obtenir des résultats nettement meilleurs, et ceci pour deux raisons essentielles :

- contrairement aux estimations des modélisations « classiques », les simulations donnent plus d'importance au résultat global par rapport à la précision locale.

- contrairement aux estimations, les simulations génèrent différentes alternatives, c'est-à-dire plusieurs modèles numériques qui donnent une bonne représentation de la réalité avec un regard plus global.

Ces simulations sont souvent obtenues à partir d'algorithmes itératifs, appelés « *back-propagation algorithms* » (KANEVSKI & MAIGNAN, 2004). Ces techniques permettent de simuler plusieurs scénarios de manière itérative et de réduire l'erreur jusqu'au seuil minimum atteignable ou une limite définie par le modélisateur.

Ce type de modélisation a été utilisé dans le cadre de ce travail de mémoire (cf. 4.3).

### 2.4.3 Elaboration et développement d'un modèle

L'élaboration d'un modèle environnemental est un processus qui se construit en différentes étapes (BEREC, 2002). La première se définit par l'énonciation des principes caractérisant le système réel retenu. Il est important de définir lesquels doivent être considérés comme importants, voire fondamentaux, afin d'aboutir au meilleur résultat possible en fonction de la problématique choisie. Il en résulte ainsi que plusieurs principes négligeables doivent être écartés dans le but de réduire l'erreur de la modélisation.

L'étape suivante consiste à définir les limites du système réel. Les recherches en géographie sont fortement dépendantes de l'échelle géographique. La modélisation environnementale requiert aussi une délimitation de la zone d'étude en terme d'échelle. En effet, les variables nécessaires à l'explication d'un processus naturel sont fortement dépendantes de l'échelle spatiale retenue et elles peuvent devenir négligeables en la considérant à une autre échelle. Une autre limite qui doit ainsi obligatoirement être définie est l'intervalle temporel décrivant les données exploitées pour la modélisation.

A partir de là, il est possible de conceptualiser le système naturel étudié en le formulant en termes d'expressions mathématiques. Si le résultat final est proche de la réalité, le modèle est satisfaisant. Si les résultats sont insatisfaisants, la conceptualisation du système doit être reformulée. CROSS & MOSCARDINI (1985) définissent cinq étapes dans le développement d'un modèle mathématique :

1. L'*identification du problème*, indispensable afin de définir le point de départ de la modélisation.
2. La *gestation*, c'est-à-dire l'acquisition des connaissances disponibles, afin de se familiariser avec le sujet et pouvoir séparer les informations utiles de celles qui sont négligeables.
3. La *construction du modèle*, c'est-à-dire la formulation des algorithmes permettant la génération des résultats.
4. La *simulation du système réel*, permettant de tester si la modélisation produit des résultats satisfaisants.

5. La *validation* de l'efficacité du modèle permettant de contrôler si les résultats sont en accord avec la réalité.

Les étapes doivent être modifiées et rediscutées à chaque fois qu'elles n'aboutissent pas à des résultats satisfaisants.

#### 2.4.4 Variables, constantes, paramètres et calibration d'un modèle

Lors de la calibration d'un modèle, le modélisateur fait appel à divers variables, constantes et paramètres. La différence entre ces trois composantes essentielles à la réalisation d'un modèle environnemental n'est pas toujours claire. La définition de chacune de celles-ci peut être clarifiée à l'aide d'exemples concrets (CROSS & MOSCARDINI, 1985) :

**Variable** : elle correspond à une donnée numérique propre à un facteur contrôlant un phénomène naturel, qui change dans le temps et dans l'espace. La température en est un bon exemple : à un endroit précis, au cours de la journée, des mois ou des années, elle varie de façon significative. Cette variation est aussi observable spatialement, par exemple lorsque des mesures sont réalisées à différentes altitudes.

**Constante** : il s'agit d'une entité qui ne varie en aucune manière, même en changeant le référentiel d'étude. Il suffit de penser, par exemple, à la constante de gravité  $g$ , qui possède la même valeur à n'importe quel endroit de la planète.

**Paramètre** : il se définit par une valeur constante dans le cadre d'une modélisation, mais qui peut varier lorsque le même modèle est relancé afin d'aboutir à un résultat plus satisfaisant. C'est normalement le cas des modèles qui se développent de manière itérative : un premier calcul permet d'obtenir un scénario de base, qui s'améliore au fur et à mesure que la valeur des paramètres est modifiée. Les variables considérées sont généralement attribuées à un poids (un paramètre) qui assume une valeur différente à chaque itération. Si le modélisateur croit que cette variable nécessite un poids différent afin de mieux expliquer un processus, il peut en changer la valeur et réduire donc l'erreur du modèle final.

Lors de l'étape de *construction du modèle*, le modélisateur aura peu de marge de manœuvre, car les variables et les constantes qui doivent être intégrées résultent de campagnes de mesures sur le terrain, de la télédétection ou de manipulation d'autres données dans des SIG. Les paramètres sont les seuls facteurs qui nécessitent une calibration. L'étape de *gestation* est donc indispensable car elle permet d'acquérir une connaissance a priori suffisante pour choisir les paramètres ayant une validité scientifique et une cohérence avec le sujet d'étude. Cette paramétrisation préliminaire permettra donc une première simulation et ainsi de tester le modèle.



### 2.4.5 Test, validation, erreur et incertitude

Dans le langage courant, le test et la validation peuvent avoir la même signification. Toutefois, en informatique, ces deux termes ont une connotation très différente. Le test est normalement un processus qui permet de vérifier que les algorithmes du modèle fonctionnent de manière correcte et cohérente par rapport aux résultats espérés. La validation est par contre une comparaison entre le résultat de la modélisation et le système réel (KANEVSKI, 2004). Lorsque la simulation n'est pas satisfaisante, un retour aux étapes précédentes est parfois nécessaire et, souvent, une nouvelle calibration permet de réduire l'erreur du modèle. Or, la validation est un processus itératif permettant d'augmenter la performance de la modélisation et de réduire l'erreur jusqu'à un seuil minimal ou fixé par le modélisateur.

Comme un modèle est une simplification de la réalité, il est impossible d'obtenir des résultats sans erreur. ZIMMERMANN (2000) met en lumière les différences entre *l'erreur au sens mathématique du terme* et *l'incertitude*. Cette dernière se définit par la signification qu'il est possible d'attribuer aux différences entre résultat du modèle et réalité. Elle doit parfois être mise en relation avec un manque d'informations significatives ou, au contraire, l'utilisation de trop d'informations. Dans le premier cas, l'absence de données permettant d'expliquer correctement un tel phénomène peut être une des raisons engendrant de l'erreur. Dans le deuxième cas, un jeu de données contenant trop d'informations, parfois inutiles, peut se révéler négatif dans le processus de traitement des variables. Il faut ainsi se rappeler que les données utilisées pour la modélisation contiennent souvent des valeurs extrêmes. Par conséquent, l'erreur doit être considérée comme une partie importante du processus de modélisation qui ne peut pas être totalement éliminée. Toutefois, sa minimisation est à la base d'une bonne modélisation.

## 2.3 SYNTHÈSE

Un modèle, quelque soit son type, peut s'appliquer à tout système réel existant, lorsque notre degré de connaissance est suffisant pour son développement. Bien que la modélisation nécessite des connaissances à priori, elle représente ainsi un outil très intéressant pour mieux comprendre les phénomènes qui nous entourent. Elle requiert plusieurs niveaux d'abstraction et nécessite souvent l'intuition et la vision subjective du modélisateur pour aboutir à un résultat qui soit le plus proche possible de la réalité. De nos jours, l'évolution de l'informatique se traduit par un développement des modèles qui permettent la formulation de scénarios, faisant des modèles de véritables laboratoires dans lesquels il est possible de tester des hypothèses non vérifiables dans la réalité.

Dans le domaine des sciences de la Terre, ces outils ont toujours été indispensables. Les cartes de dangers qui « *indiquent pour une zone donnée les différents types de dangers*

*auxquels celle-ci est exposée (inondation, coulée de boue, glissement de terrain, avalanche, etc.), l'ampleur du danger évalué en fonction de l'intensité du processus et de sa probabilité ainsi que son étendue géographique » (OFEV, 2011) sont un bon exemple parmi ces outils. Dans cette définition, toutes les caractéristiques propres d'un modèle sont indiquées : des simulations sont proposées à partir d'observations à différentes échelles spatiales et temporelles afin d'aboutir à plusieurs scénarios selon le degré de danger.*

Dans les Alpes, les environnements périglaciaires se localisent principalement en altitude, à des endroits où l'accès est difficile et les campagnes de mesures se révèlent coûteuses voire impossibles. Ainsi, la modélisation des processus périglaciaires est un outil fondamental est peu dispendieux permettant d'améliorer les connaissances concernant le sujet.





## **3. LE PERGÉLISOL**



## 3.1 RAPPELS THÉORIQUES

Ce chapitre propose d'appréhender l'avancement de la recherche en matière de pergélisol. Ses caractéristiques et sa distribution spatiale sont discutées dans l'objectif de permettre une meilleure compréhension de la suite du document. Étant donné que cette recherche porte principalement sur la modélisation du pergélisol alpin dans les formations superficielles, notamment dans les éboulis et les glaciers rocheux, une présentation de ces concepts est indispensable.

### 3.1.1 La notion de pergélisol

Le pergélisol, ou *permafrost* en anglais, est défini comme **un terrain de subsurface dont la température ne remonte jamais au-dessus de 0°C durant une année au moins** (WASHBURN, 1979). Cette définition fait référence uniquement à l'état thermique et la présence de glace n'est pas nécessaire pour parler de sol gelé en permanence. Cependant, lorsque le sol est poreux (sédiments meubles, roches fissurées), l'eau qui s'infiltre peut se transformer en glace par regel en raison des températures négatives en permanence. La teneur en glace définit par conséquent trois typologies de pergélisol : le *permafrost sous-saturé*, lorsque seulement quelques interstices sont complètement englacés, le *permafrost saturé*, lorsque la glace remplit l'intégrité des vides, et le *pergélisol sursaturé*, c'est-à-dire un sol dans lequel la glace occupe un volume supérieur à celui des pores.

Concernant le caractère thermique d'un pergélisol, DELALOYE (2004) propose trois catégories distinguables :

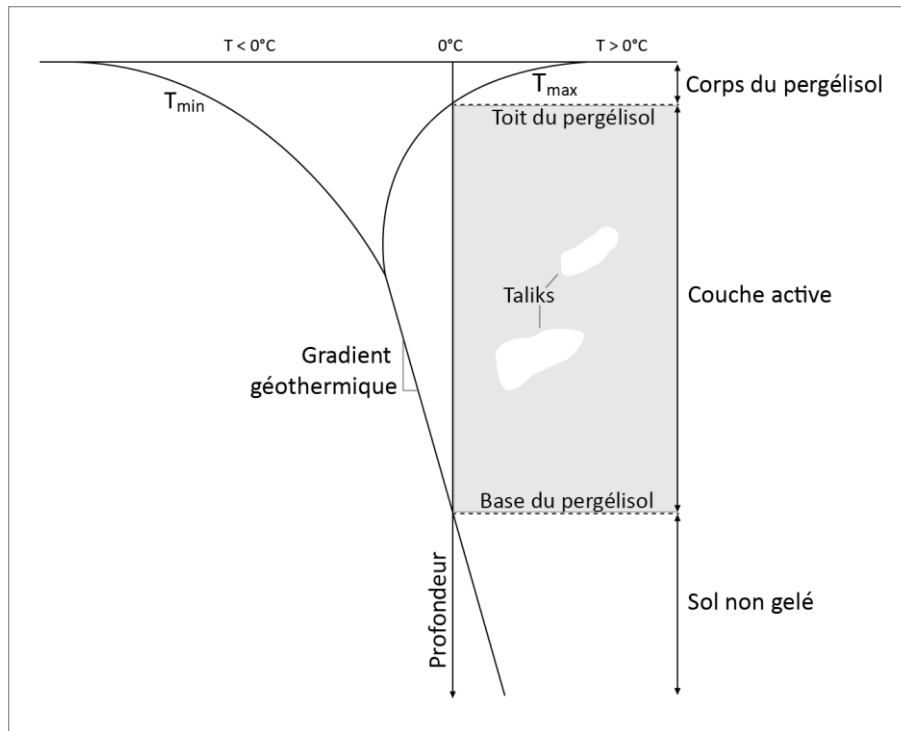
- le *permafrost froid*, avec une température annuelle moyenne (MAPT – *Mean Annual Permafrost Temperature*) qui est clairement inférieure à environ -0,5 °C et dont aucune valeur instantanée n'est égale à 0 °C ;
- le *permafrost semi-tempéré*, avec une MAPT qui est proche de 0 °C (plus grande que -0,5 °C) et des valeurs de 0 °C qui sont occasionnellement enregistrées par les capteurs de température ;
- le *permafrost tempéré* avec une température égale à environ 0 °C tout au long de l'année.

A l'exception d'un pergélisol tempéré, qui possède une température toujours proche du point de fusion, la température du sol varie généralement avec la profondeur en raison du gradient géothermique terrestre. Ainsi, il est possible qu'un pergélisol semi-tempéré soit surmonté d'un pergélisol froid. Ceci est parfois valable pour le pergélisol se localisant aux hautes latitudes et il a été montré par HARRIS ET AL. (2003) sur la base des mesures effectuées dans des forages dans le cadre du programme de monitoring PACE. Le réseau suisse PERMOS a cependant montré que, dans les Alpes, les températures proches de la surface subissent généralement un réchauffement (PERMOS, 2009). Le profil thermique vertical du sous-sol ne suit pas la même tendance que le gradient

géothermique de la lithosphère. Ceci peut s'expliquer par la présence d'un sol gelé en permanence qui n'est plus à l'équilibre avec les conditions climatiques.

Ces discordances se reflètent sur la *stratigraphie du pergélisol* (figure III.1), dans laquelle on retrouve, de haut en bas, la succession de couches suivantes (HAEBERLI ET AL., 1993) :

Figure III.1: la stratigraphie d'un pergélisol (modifié d'après FRENCH, 1996).



- la couche active, qui se localise entre la surface du sol et le toit du pergélisol. Elle se caractérise par un dégel et un regel au cours du printemps et de l'automne. Ce niveau est fortement soumis aux échanges énergétiques entre l'atmosphère et le sol sur une épaisseur qui varie normalement entre 3 et 5 mètres ;
- le corps du permafrost, qui se caractérise par un niveau gelé en permanence (au sens thermique). Normalement, dans les Alpes, l'épaisseur de cette couche ne varie que de quelques dizaines de mètres. Il est possible d'y trouver des niveaux non gelés nommés « taliks », ainsi que des corps de glace massive. La présence de ces derniers permet de définir le pergélisol comme étant sec ou saturé, selon le degré de saturation ;
- le corps du permafrost est limité par la base du permafrost. A partir de ce niveau, l'augmentation de la température en raison du gradient géothermique ne permet plus le maintien d'un sol gelé en permanence.



### 3.1.2 Les facteurs de contrôle selon l'échelle géographique

Les facteurs de contrôle expliquant l'occurrence de pergélisol s'avèrent plus ou moins importants selon l'échelle géographique considérée. De plus, lorsque cette dernière s'agrandit, les paramètres influençant la répartition des sols gelés en permanence deviennent de plus en plus nombreux et leurs interactions de plus en plus complexes.

A l'échelle de la planète, le permafrost se localise généralement aux hautes latitudes et aux hautes altitudes. Dans la région polaire et subpolaire le permafrost se caractérise par une répartition *zonale* et il est étroitement dépendant du bilan énergétique. Ce dernier dépend de paramètres astronomiques tels que la rotation de la planète, l'inclinaison de son axe par rapport à l'écliptique ou sa position par rapport au soleil.

Quant au pergélisol de montagne, il suit normalement une répartition *azonale*. LAMBIEL (2006) considère que les facteurs de contrôle d'un pergélisol de montagne peuvent être différenciés selon l'échelle géographique retenue (*figure III.2*).

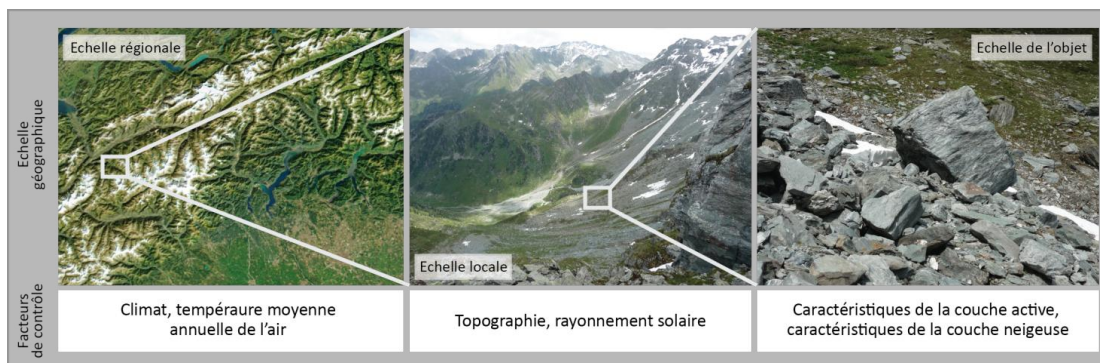


Figure III.2: les facteurs de contrôle du pergélisol selon l'échelle géographique (modifié de LAMBIEL, 2006)

A une échelle géographique *régionale* (échelle alpine), les paramètres climatiques jouent un rôle prépondérant. Il est communément accepté que la température de l'air soit un des facteurs parmi les plus importants qui détermine l'occurrence de pergélisol. Elle est strictement en relation avec l'altitude. Au fur et à mesure que celle-ci devient élevée, la densité de l'air diminue et l'absorption de la radiation solaire s'atténue, ce qui se traduit par une diminution de la température de l'air. Cependant, la *température moyenne annuelle de l'air (MAAT)* ne peut expliquer la distribution du pergélisol le long de la chaîne alpine qu'à l'échelle *régionale* où elle représente une composante importante des caractéristiques climatiques de l'espace considéré. Ce facteur ne peut par contre pas expliquer la présence de terrains gelés en permanence lorsque l'échelle s'élargit.

Au niveau *local*, il faudra effectivement plutôt tenir compte de la *température moyenne annuelle de la surface du sol (MAGST)* qui s'explique principalement par les variations du rayonnement solaire en raison de la complexité topographique, liée notamment à l'orientation du versant, sa pente ou encore sa configuration géomorphologique (PHILLIPS & REYNARD, 1997).

A l'échelle *de l'objet*, l'occurrence du pergélisol dépend des échanges d'énergie entre l'atmosphère et le toit du permafrost. Le profil thermique subit l'effet du bilan d'énergie

qui est dépendant de plusieurs facteurs (HOELZLE *ET AL.*, 2003). Les propriétés de la surface, ainsi que la couverture neigeuse et les propriétés physiques de la couche active du sol perturbent la MAGST et la température annuelle au toit du pergélisol (MAPT), en provoquant des décalages thermiques (*thermal offset*) (DELALOYE 2004). Trois décalages principaux doivent être considérés.

Le *premier décalage thermique* s'opère entre l'atmosphère et la surface du sol, lorsqu'une couche de neige est présente (KELLER, 1994 ; HOELZLE & KRUMMENACHER, 1999). Cette dernière possède une faible conductivité thermique qui diminue avec la densité et l'épaisseur de la couche. Ainsi, la neige se révèle être un bon isolant qui limite l'influence sur le sol des paramètres climatiques de l'atmosphère tels que la température de l'air, le vent, le rayonnement solaire, l'humidité, etc. Pendant l'hiver, il y aura moins d'échanges d'énergie sur un glacier rocheux que sur une paroi rocheuse verticale, car il est généralement couvert de neige.

Le *deuxième décalage thermique* s'explique par l'influence des caractéristiques de la surface du terrain sur la température. Des variations importantes peuvent être attribuées aux caractéristiques particulières du terrain. La rugosité, l'albédo du matériau composant le sol, la couverture végétale, l'inclinaison et l'orientation du terrain engendrent des décalages thermiques qui diffèrent parfois d'un endroit à l'autre d'un même site caractérisé par les mêmes conditions climatiques.

Le *troisième décalage thermique* s'opère en raison des caractéristiques de la couche active. Les propriétés physiques de la subsurface permettent une conduction de chaleur différente selon le type de matériau. Les flux énergétiques sont dépendants de la porosité du sous-sol : un milieu possédant une porosité importante sera normalement caractérisé par une présence significative d'espaces vides, dans lesquelles de l'air peut circuler. Comme l'indique GRUBER (2005), lorsque l'agencement des matériaux donne un mélange poreux sec, l'énergie circule par convection, advection, conduction, libération ou consommation de chaleur latente. Ainsi, une couche active se composant de gros blocs jouera un rôle significatif dans le maintien d'un décalage thermique entre l'atmosphère et le toit du permafrost lorsque la surface du sol n'est pas couverte par une couche de neige suffisamment épaisse. Selon HARRIS & PEDERSEN (1998), ce processus est en relation avec la ventilation de Balch (BALCH, 1900), qui permet une convection de l'air à l'intérieur de la couche active et par conséquent, le maintien de températures froides au toit du pergélisol. Ce phénomène se révèle particulièrement important pour les terrains tels que les éboulis (*cf.* 3.1.4.1).

### 3.1.3 La répartition du pergélisol dans les parois rocheuses

Au cours des dernières années, la dégradation du pergélisol a été un des facteurs les plus importants qui ont influencé l'augmentation de l'éboulement des parois rocheuses en haute montagne. DAVIES *ET AL.* (2001) ont montré qu'un réchauffement des températures dans les fissures du substratum peut réduire sa stabilité lorsque la température remonte de valeurs négatives jusqu'à des valeurs autour de  $-1.5/0^{\circ}\text{C}$ . Le changement de phase de l'eau qui passe d'un état solide à un état liquide, ainsi que la pression élevée en raison de l'existence d'eau souterraine liquide produisent une perte de cohésion du substratum. Celui-ci serait stable si les températures étaient plus basses ou bien si l'eau était absente.

Ainsi, l'absence totale d'une couverture à blocs se traduit par un temps de réaction nettement plus rapide aux variations de température (MITTAZ *ET AL.*, 2000 ; HOELZLE *ET AL.*, 2001). GRUBER *ET AL.* (2003) rappellent que l'absence presque totale d'une couverture neigeuse sur les parois rocheuses, en raison de leur pente importante, et l'absence d'un décalage thermique complexe entre la surface et la subsurface sont des facteurs dont la prise en considération est nécessaire afin de comprendre les mécanismes régissant l'occurrence du pergélisol dans les parois rocheuses. Par conséquent, le facteur de contrôle principal se révèle être l'*altitude* parallèlement au *rayonnement solaire direct*, qui varie fortement selon l'exposition et l'albédo de la roche. Ces facteurs ont été découverts par HALL (1997) à l'aide de mesures effectuées sur des parois rocheuses en Antarctique. Il a été démontré qu'en l'absence de rayonnement solaire direct, la température de la roche est similaire à celle de l'air. Cependant, durant la période d'ensoleillement, l'albédo devient le facteur régissant les températures enregistrées avec des différences très contrastées entre les différentes typologies de surfaces et d'orientations.

De plus, (NOETZLI & GRUBER, 2005) indiquent qu'un flux de chaleur est toujours présent dans une paroi rocheuse et il se déplace par transfert conductif. Ceci se traduit par un champ thermique à l'intérieur d'un massif montagneux qui est généralement plus chaud sur les versants exposés au Sud (*figure III.3*).

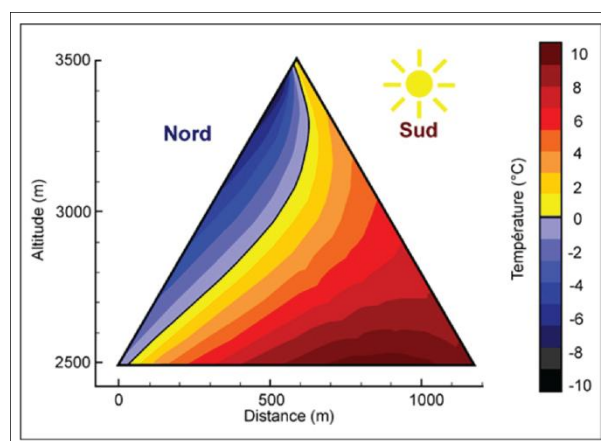


Figure III.3: champ thermique à l'intérieur d'un massif montagneux (NOETZLI & GRUBER, 2005).

Des études concernant la répartition du pergélisol alpin dans cette typologie d'environnement sont aujourd'hui disponibles (HAEBERLI & BENISTON, 1998 ; HOELZLE & HAEBERLI, 1995 ; GRUBER & HOELZLE, 2001) et présentent les premiers efforts de monitoring des variations de températures sur différents sites des Alpes. GRUBER *ET AL.* (2004) ont essayé d'exploiter les données acquises afin de produire un modèle de répartition du pergélisol dans ce type de terrain. Cette étude est présentée dans la suite de ce chapitre.

### 3.1.4 Le pergélisol dans les terrains sédimentaires meubles

Les terrains sédimentaires meubles (de la zone périglaciaire) se caractérisent par un pergélisol qui subit une forte influence par les caractéristiques de l'enneigement (densité et épaisseur de la couche de neige, durée, etc.), ainsi que par les températures des mois estivaux. Ce type de terrain se présente généralement avec une topographie peu inclinée et l'occurrence en glace est plus probable par rapport aux zones rocheuses raides en raison des caractéristiques de la couche active plus poreuse. Parmi les terrains sédimentaires principaux on distingue les éboulis, les glaciers rocheux, les moraines et les marges proglaciaires. Dans les sous-chapitres suivants la répartition du pergélisol, très différente selon les principales caractéristiques spécifiques de ses endroits, est présentée.

#### 3.1.4.1 Les éboulis : notions théoriques et répartition du pergélisol

Dans la littérature, les travaux de FRANCU ET HETU (1989) sont une référence centrale en matière d'étude sur les éboulis de montagne. Les auteurs les définissent comme « *des formations détritiques qui se mettent en place progressivement sur un versant à la suite du détachement successif et de la chute de fragments rocheux d'une paroi rocheuse ou de toute pente inclinée à plus de 40-45°* ». Dans un environnement périglaciaire, cette chute de fragments est souvent liée à l'action du gel et du dégel. Effectivement, si l'on tient compte des éboulis de haute montagne, les matériaux qui s'érodent en amont sont produits généralement par gélifraction. Egalement appelé « cryoclastie », ce processus se caractérise par des fortes contrastes de pressions de l'eau qui gèle et dégèle à l'intérieur des fissures présentes dans les parois rocheuses (voir FRENCH, 1996). L'alternance entre les phases eau/glace induit une déstabilisation du substratum, engendrant par la suite des chutes de blocs lorsque que la stabilité de la roche est insuffisante.

La taille des matériaux composant les éboulis, qui occupent les pieds de versant est généralement grossière et hétérométrique. Leur répartition est normalement granoclassée, c'est-à-dire avec les blocs de taille importante localisés dans plus à l'aval en raison de leur forte énergie cinétique. De plus, si la topographie le permet, la forme typique d'un ébouli est régulière lorsque le pied de la paroi en amont est rectiligne (*figure III.4:A*), tandis qu'elle est conique si un couloir est présent en amont (*figure III.4:B*) (PIERACCI, 2006). Dans sa partie distale, la formation se compose généralement de blocs de tailles plus importantes dont l'agencement laisse des espaces vides principalement à la surface. En effet, les matériaux fins migrent en profondeur et remplissent les pores entre les blocs plus grossiers.



Figure III.4: voiles d'éboulis de la combe de Dreveneuse (Chablais valaisan) et l'éboulis conique du Gour de la Plâne dans la Réserve de la Pierreuse (Vaud) (Photos : DELALOYE, dans MORARD ET AL., 2009).

Parmi les traces de remaniement de débris les plus visibles, il est aussi important d'aborder la présence fréquente de dépôts résultant soit du transport de matériaux par les laves torrentielles au cours de l'été soit de matériel amené dans la partie aval par les avalanches au cours de l'hiver. Ces processus, ainsi que d'autres caractéristiques des nombreux éboulis étudiés par FRANCOU (1988) et FRANCOU & HÉTU (1989) leur ont permis de les classer en cinq grandes catégories :

- *Les éboulis de gravité* : il s'agit d'éboulis dont la surface est généralement régulière. L'apport principal des éléments qui les composent se produit principalement par gravité et les matériaux s'installent le long de la pente par granoclassement. Dans ce cas, le profil de pente est généralement régulier car il existe un angle dit de frottement interne en-dessus duquel les matériaux restent en équilibre.
- *Les éboulis ruisselés* : plusieurs systèmes de laves torrentielles peuvent être observés. Des ravines dans la partie sommitale du versant et des cônes de débris dans la partie basale sont des formes caractéristiques de ces phénomènes.
- *Les éboulis à avalanches* : contrairement aux éboulis de gravité, cette typologie d'éboulis se caractérise par un faible granoclassement car les avalanches peuvent amener les éléments les plus fins vers l'aval. De plus, ce remaniement de matériaux vers la partie distale se traduit par une forme plus concave que celle d'un éboulis de gravité.
- *Les éboulis fluants* : la dynamique de ce type de formation sédimentaire est en relation avec le fluage de la glace contenue dans les sédiments, qui permet une déformation de l'éboulis de manière plus marquée dans la partie aval. Il n'est pas rare de retrouver des corps de glace enfouis dans le secteur inférieur d'un éboulis fluant car l'eau qui percole en profondeur peut combler les espaces vides entre les matériaux fins et geler. Le mouvement gravitaire de la glace permet le développement d'une forme qui est considéré dans la littérature

comme le stade intermédiaire entre un protalus rampart et un glacier rocheux (par exemple PIERACCI 2006, SCAPOZZA, 2008).

- *Les éboulis soliflués ou géliflués* : dans le cas de ce type d'éboulis, différentes loupes de solifluxion et de gélifluxion s'étendent parallèlement à la ligne de pente. Ces formes peuvent être recouvertes par de la végétation ou en être dépourvues. Cependant, généralement, il est possible de reconnaître un fluage superficiel avec des formes ayant un front lobé et pierreux ainsi qu'un sol caractérisé par une teneur importante en eau.

Dans la réalité, ces catégories d'éboulis ne sont pas observables de manière si bien définie car les phénomènes peuvent être mixtes. Dans la zone périglaciaire par exemple, il existe des éboulis à avalanches sur lesquels se développent des systèmes torrentiels estivaux, ainsi que de la solifluxion, voire du fluage périglaciaire. Au cours des dernières années, l'étude de ces cas est devenu de plus en plus fréquent afin d'améliorer les connaissances concernant la répartition de la glace et du pergélisol qu'ils contiennent. Les premiers essais datent de la deuxième moitié du siècle dernier et s'inscrivent dans les travaux de BARSCH (1969) et HAEBERLI (1985). Les moyens à disposition pour ces recherches étaient toutefois trop limités pour obtenir des analyses satisfaisantes. Plus récemment, ce sujet de recherche a particulièrement intéressé les Instituts de Géographie des Universités de Fribourg et Lausanne (par exemple DELALOYE, 2004 ; LAMBIEL, 2006 ; LAMBIEL & PIERACCI, 2008 ; SCAPOZZA ET AL., 2009 ; SCAPOZZA, 2012), qui ont réalisé plusieurs recherches sur différents éboulis de haute montagne. Après l'investigation de 17 sites particuliers, LAMBIEL (2006) a tiré les conclusions suivantes :

- Pratiquement aucun éboulis n'est intégralement occupé par du pergélisol.
- Dans la majorité des cas étudiés, le pergélisol se trouve principalement dans la partie inférieure des éboulis.
- Souvent, les températures de surface et parfois les résistivités électriques (ERT) témoignent de la présence possible de pergélisol dans la partie sommitale de l'accumulation sédimentaire.
- Les secteurs amont et aval sont, dans la majorité des cas, séparés par une bande à l'intérieur de laquelle le pergélisol est absent.
- L'hétérogénéité de la distribution du pergélisol va souvent de pair avec la taille de l'éboulis.

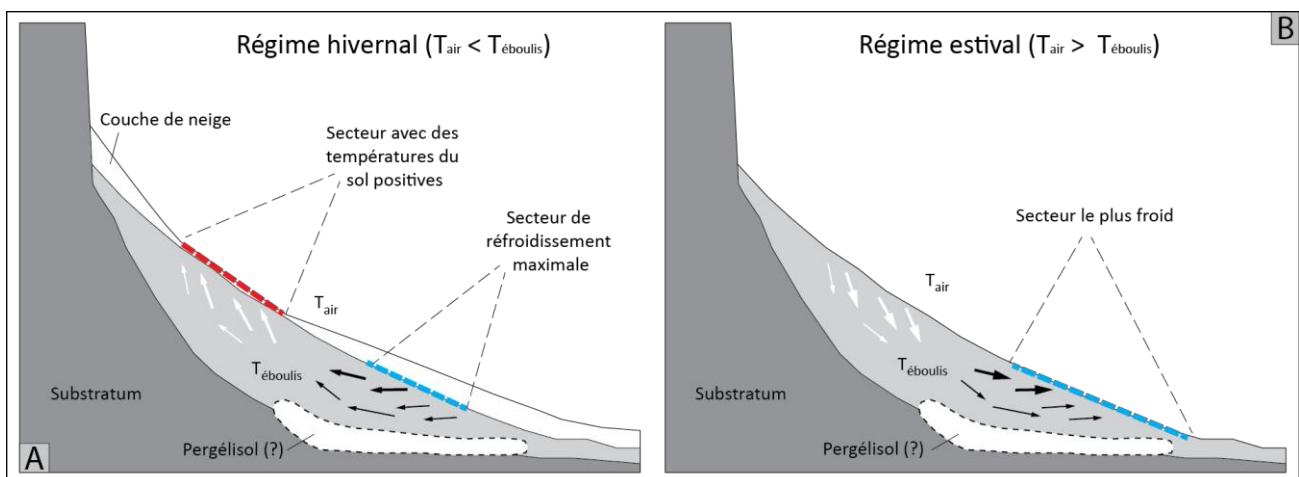
En général donc, LAMBIEL (2006) conclut que ***le pergélisol ne caractérise que la moitié aval d'un éboulis et le secteur en amont en est généralement dépourvu.***

A l'aide de la prospection géophysique, notamment de la tomographie des résistivités électriques (ERT – Electrical Resistivity Tomography), la sismique réflexion et des diagraphies nucléaires, SCAPOZZA (2012) a pu investiguer d'autres éboulis de haute montagne dans l'objectif de combler certaines lacunes dans l'étude de la structure et de

la répartition du pergélisol alpin. Ses recherches ont permis de valider les conclusions des recherches antérieures affirmant que l'introduction d'un nouveau facteur de contrôle est nécessaire afin d'expliquer la présence de pergélisol que dans la moitié aval des éboulis. DELALOYE, 2004 ; LAMBIEL, 2006 ; PIERACCI, 2006 ; SCAPOZZA, 2012 l'expliquent par la présence d'une circulation d'air à l'intérieur de l'éboulis par effet dit *de cheminée*. L'air qui y est contenu a la possibilité de migrer à l'intérieur de la formation car le substratum est poreux et des espaces vides sont présents. Or, une anomalie se produit en raison de deux régimes thermiques saisonniers principaux caractérisés par une circulation d'air descendant à l'intérieur de l'éboulis au cours de l'été et une circulation ascendante et de l'air chaud est évacué dans la partie amont. Ce mécanisme engendre une dépression d'air dans la partie inférieure de l'éboulis, qui est par conséquent remplie par une aspiration d'air froid provenant de l'extérieur (figure III.5:A).

- **Pour le régime hivernal**, en raison d'un gradient thermique contrasté, une inversion thermique a lieu au cours de l'hiver. La température de l'air externe est généralement plus froide que celle de l'air contenu à l'intérieur des blocs. La densité moins importante de cette dernière masse d'air produit donc une circulation ascendante et de l'air chaud est évacué dans la partie amont. Ce mécanisme engendre une dépression d'air dans la partie inférieure de l'éboulis, qui est par conséquent remplie par une aspiration d'air froid provenant de l'extérieur (figure III.5:A).
- **Pour le régime estival**, l'air se localisant à l'intérieur de l'éboulis est normalement plus froid et donc plus dense par rapport à l'air externe. Par conséquent, une circulation descendante par décharge gravitaire se met en place avec le déplacement, au cours de l'été, d'une masse d'air plus froide qui s'installe dans la partie aval de la formation sédimentaire (figure III.5:B).

Figure III.5: fonctionnement schématique du système de ventilation à l'intérieur des éboulis froids (modifié d'après MORARD ET AL., 2010).



La force du système de ventilation est strictement en relation avec le gradient thermique : plus les différences en termes de température entre les masses d'air internes et externes à l'éboulis sont importantes, plus le mécanisme sera efficace. De plus, au cours de la période hivernale, une couche de neige se forme souvent sur ces

formations sédimentaires. Si l'épaisseur de cette couche est suffisante, la neige permet d'isoler complètement la subsurface de l'extérieur, permettant le développement de cette circulation d'air de façon encore plus marquée. Au cours des mois les plus froids, l'air chaud ascendant sera évacué dans la partie amont de l'éboulis par des *cheminées de fonte* qui peuvent se transformer en *fenêtres de fonte*, faisant fondre certains secteurs sommitaux de la couche neigeuse (figures III.6:A et III.6:B).

Figure III.6: *fenêtres de fonte* et une *cheminée de fonte* dans la partie amont d'un éboulis de montagne (Photos : LAMBIEL, notes de cours).



D'autres facteurs secondaires ont tendance à accentuer ce phénomène, notamment le granoclassement des blocs et l'apport de matériaux d'avalanches qui permettent l'accumulation de la neige dans la partie aval des éboulis. Comme expliqué par SCAPOZZA (2012), les matériaux plus grossiers s'agencent par gravité plutôt dans la partie distale, tandis que les blocs plus petits se localisent plus près de la paroi rocheuse amont. La moitié inférieure d'un éboulis se caractérise donc par un substratum dont la granulométrie des matériaux permet la présence de nombreuses pores contenant de l'air. L'air froid peut donc stagner dans la couche active du sol isolant le corps du pergélisol des températures positives de l'atmosphère. De la même manière, l'apport de neige par les avalanches permet aussi de renforcer le contraste thermique entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis. Une épaisse couche de neige provenant d'une avalanche protège la couche active du réchauffement estival. Dans ce cas, la couche active perdure plus longtemps par rapport à des cas non protégés par des avalanches.

Le mécanisme de circulation d'air favorise évidemment la formation de glace interstitielle dans le secteur distal d'un éboulis. Si le volume de glace est supérieur au volume des matériaux meubles (permafrost sursaturé), et si la topographie à la base de l'éboulis possède une pente suffisante, la gravité peut devenir le moteur à l'origine d'un fluage vers l'aval. Si le fluage est suffisamment développé, il peut donner naissance à un *éboulis fluant* cités plus haut et, en cas d'apport suffisant en matériaux par l'amont, aboutir à un *glacier rocheux*.



### 3.1.4.2 Les glaciers rocheux : l'expression visible du pergélisol

Dans des sédiments meubles, le pergélisol peut se présenter sous différentes formes. Les plus spectaculaires sont les glaciers rocheux (*figure III.7*). En règle générale, ces derniers présentent une morphologie variée en fonction de leur dynamique. La reptation du pergélisol peut avoir différentes origines, formes et taux d'activité.

BARSCH (1996) propose quelques classifications reposant sur ces caractéristiques. En considérant *la forme*, il est possible de distinguer les *glaciers rocheux lobés* des *glaciers rocheux de vallée*. En s'intéressant aussi à la genèse de ces phénomènes, il est possible d'inclure les *protalus ramparts* dans cette classification (*cf. 3.1.4.1*). L'*origine des matériaux* permet une catégorisation supplémentaire. Elle différencie les *glaciers rocheux de pied de versant*, alimentés en sédiments provenant d'un éboulis, des *glaciers rocheux de débris morainiques*, alimentés en matériaux appartenant aux moraines latérales ou à la frontale d'un glacier.



Figure III.7: le glacier rocheux spectaculaire du versant Nord-Est du Gilpin Peak, au Colorado (Photo : BOB WEBSTER).

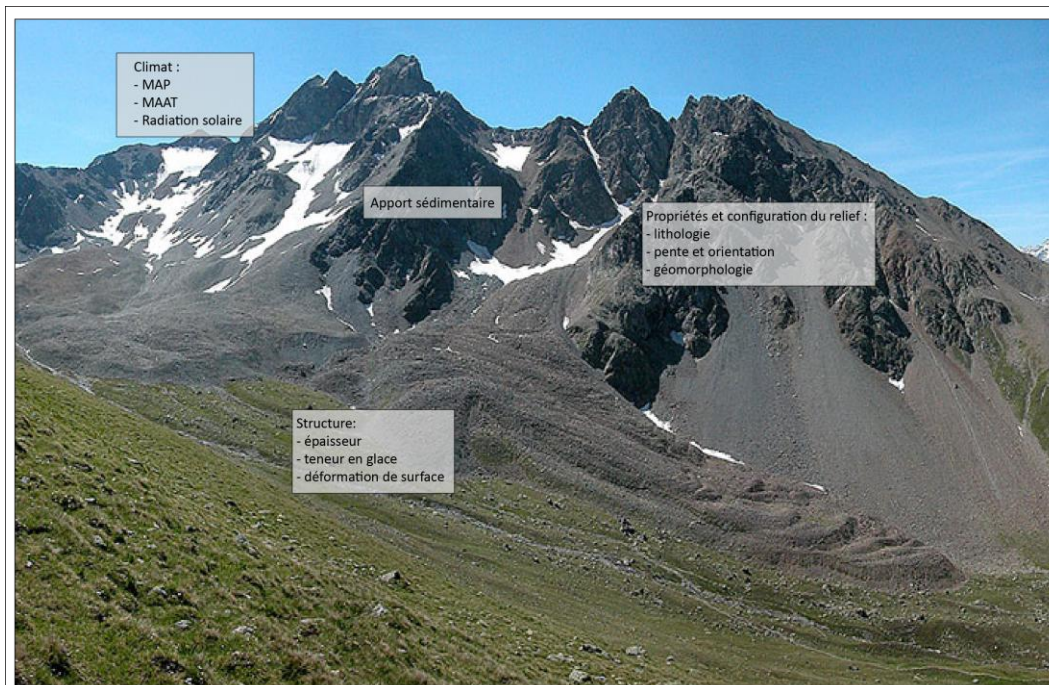
La classification des glaciers rocheux selon leur dynamique est toutefois plus fréquemment utilisée. Leur mouvement dépend notamment de l'action de la gravité et de leur teneur en glace. Il est possible de distinguer trois types de dynamiques : les *glaciers rocheux actifs*, pouvant se déplacer sur plusieurs mètres en une année et étant sursaturés en glace, les *glaciers rocheux inactifs*, dont le mouvement est absent même si un corps gelé persiste, et les *glaciers rocheux fossiles*, immobiles et dépourvus de glace. Parfois, il est possible qu'un glacier rocheux inactif soit réactivé par des mouvements du substratum, notamment des glissements de terrain ou des tassements déstabilisant le versant. Ces mouvements permettent aux glaciers rocheux d'atteindre des déplacements qui dépassent plusieurs dizaines de mètres par an. Toutefois, il s'agit d'un fluage « indirect » qui n'est pas en relation avec la dynamique « périglaciaire ».

Parmi les glaciers rocheux actifs, la vitesse de déplacement permet une classification supplémentaire. DELALOYE ET AL. (2005) introduisent la nomenclature de *glaciers rocheux en crue* lorsque les vitesses mesurées dépassent 3 mètres par an et de *glaciers rocheux à mouvement rapide* pour toute formation possédant un déplacement inférieur à ce seuil.

La morphogénèse des glaciers rocheux intacts (actifs et inactifs) dépend de plusieurs facteurs de contrôle (*figure III.8*). Autant le climat que les caractéristiques du relief dans lesquelles le glacier rocheux se développe jouent un rôle fondamental. L'apport en matériaux dépend fortement de la lithologie et de la tectonique du site. La teneur en glace dépend à la fois de l'orientation du versant ainsi que de la structure interne de la

formation. L'influence de la radiation solaire et de l'albédo de la surface est aussi très importante. En outre, la MAAT ainsi que les précipitations moyennes annuelles (MAP) régissent les conditions nécessaires pour que le pergélisol puisse se maintenir.

Figure III.8: facteurs de contrôle et caractéristiques d'un glacier rocheux (Photo : DELUIGI, 2011).



Concernant leur dynamique, le mouvement vers l'aval induit par la gravité se traduit généralement par des sillons et des rides de compression en surface des glaciers rocheux. Ce phénomène s'explique par des vitesses plus élevées dans la partie centrale, de la même manière que dans un glacier. Le talus frontal est souvent raide pour les glaciers rocheux les plus actifs, tandis qu'il présente une pente plus douce pour les glaciers rocheux possédant une activité réduite. Ces derniers peuvent aussi être composés de blocs couverts de lichens et dépourvus de traces de déformations lorsque leur dynamique est quasiment nulle. HAEBERLI (1985) et BARSCH (1988) suggèrent plusieurs caractéristiques observables sur le terrain permettant une première analyse de l'activité des glaciers rocheux. Le *tableau III.1* permet de les récapituler.

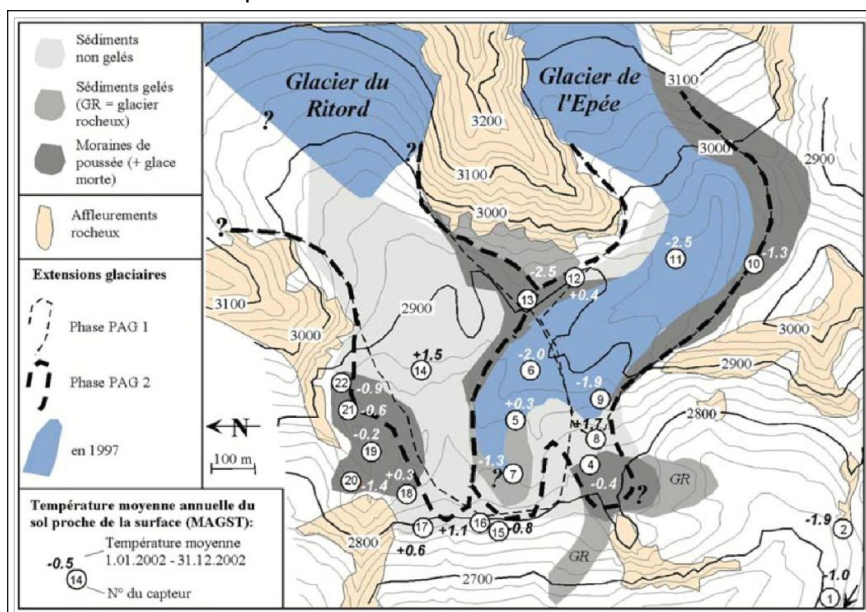
Tableau III.1: caractéristiques principales des glaciers rocheux intacts et fossiles (Photo : DELUIGI, 2011).

Glaciers rocheux intacts	Glaciers rocheux fossiles
<b>Pente du talus frontal raide : 40-45° si actif ; 35-40° si inactif</b>	Pente du talus frontal inférieure à 35°
<b>Relief bombé</b>	Absence d'évidence de mouvement
<b>Sources au front (0-2°C)</b>	Sources au front (plus chaudes que 2°C)
<b>Pergélisol probable/possible</b>	Pergélisol improbable
<b>Lichens rares et matériel fin au front si actif ; lichens et matériel fin plus rares si inactif</b>	Surface marquée par des dépressions thermokarstiques

### 3.1.4.3 Le pergélisol dans les formations morainiques

De manière générale, l'occurrence de permafrost dans les moraines construites se caractérise par une extrême discontinuité spatiale, qu'elles soient datées du tardiglaciaire ou de l'holocène. Aucun facteur spécifique est à la base cette répartition discontinu, cependant deux cadres de figure peuvent être établis à partir des recherches principales sur le sujet :

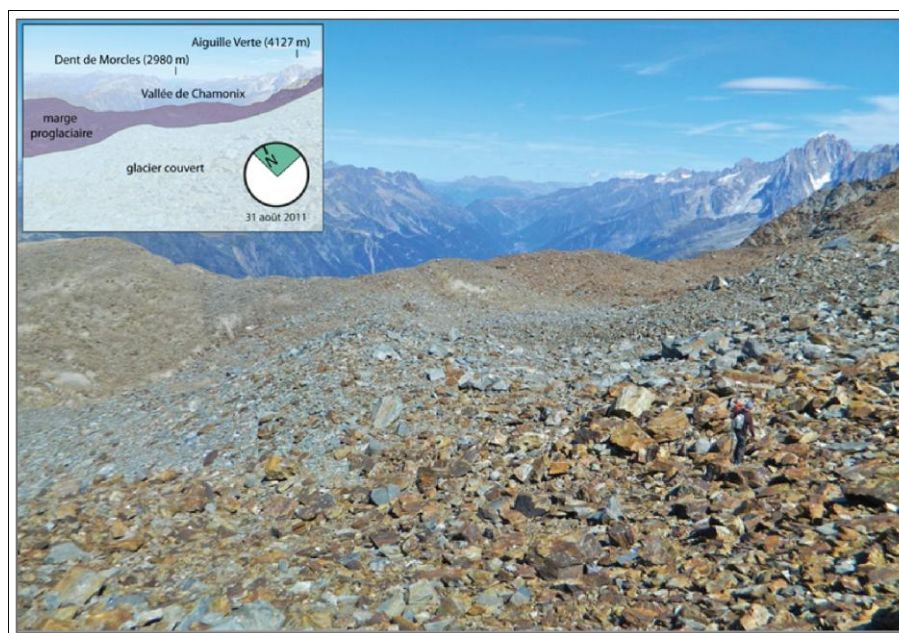
1. *le pergélisol est généralement absent dans les moraines qui se situent à l'aval de la limite inférieure du pergélisol discontinu, c'est-à-dire l'altitude en dessous de laquelle aucune forme périglaciaire est observable (cf. 3.1.5). Les moraines datant du tardiglaciaire ou du Petit Age Glaciaire des grands glaciers du massif du Mont-Blanc sont un bon exemple (voir BOSSON, 2010).*
2. *l'occurrence de pergélisol est complexe et atypique dans les moraines se localisant en amont de la limite inférieure du pergélisol discontinu. En règle générale, si une perturbation géométrique et thermique s'est produite lors de l'occupation glaciaire, la moraine contient difficilement du pergélisol. Ce cas a été bien documenté, par exemple, dans les moraines du glacier d'Aget par REYNARD ET AL. (2003). Suite à des mesures de prospection géophysique dans la moraine de fond du glacier du Ritord, DELALOYE (2004) a ainsi confirmé ces observations. Cependant, ce dernier site se caractérise par une très grande variabilité spatiale avec des portions de la marge proglaciaire contenant partiellement ou intégralement du pergélisol (figure III.9). Cela se traduit par la présence de glace qui peut avoir une origine soit sédimentaire, c'est-à-dire intégrée par le glacier dans la construction morainique, soit de congélation, en raison de la fonte de la neige et de précipitations d'eau qui gèle dans les vides de l'édifice morainique.*



§1Figure III.9: répartition des sédiments gelés dans la marge proglaciaire du Ritord et de l'Epée (DELALOYE, 2004).

D'autres études de ce type ont été proposées pour d'autres sites tels que le Becca d'Agè (REYNARD *ET AL.*, 2003), le Gruben (HAEBERLI, 2005), le Muragl (KNEISEL & KÄÄB, 2007) et le Col des Gentianes (Lambiel & Schuetz, 2008) (voir aussi KNEISEL, 2003 ; KÄÄB ET KNEISEL, 2006 ; MONNIER, 2007 ; RIBOLINI *ET AL.*, 2010). Ces moraines se particularisent par une relation complexe avec les formes de fluage périglaciaire qui peut résulter de la présence de glaciers noirs (*figure III.10*), de *ice-cored moraines* ou de moraines de poussée (*push moraines*) (voir par exemple HAEBERLI *ET AL.*, 2006 ; KRÄINER & MOSTLER, 2006).

Figure III.10: marge proglaciaire des Rognes (Massif du Mont Blanc) dans laquelle une langue glaciaire couverte de blocs est observable (Utz, 2011).



La répartition du pergélisol alpin pour dans les formations morainiques est donc très hétérogène et extrêmement dépendante de facteurs locaux. Suite aux études cités auparavant, les marges proglaciaires sont donc communément reconnues comme des surfaces peu favorables à la présence de sols gelés en permanence à l'exception de ses zones marginales. L'occurrence de pergélisol est effectivement plus fréquente dans les bords des marges proglaciaires, où des accumulations détritiques complexes d'origine glaciaire et périglaciaire se localisent.

#### 3.1.4.4 Le sol fluants

Les loupes de gélifluxion sont une expression visible supplémentaire du pergélisol alpin. Visibles autant dans les éboulis soliflués (*cf.* 3.1.4.1) que dans les versants à couverture végétale, les loupes de solifluxion/gélifluxion peuvent atteindre des dimensions variant de quelques décimètres à quelques mètres (*figure III.11*). SCAPOZZA (2008) rappelle que la définition de la solifluxion, associée à celle de la gélifluxion, est souvent confuse. Pour certains auteurs (par exemple WASHBURN 1979 ; SUMMERFIELD, 1991), la gélifluxion est un synonyme de la solifluxion d'un pergélisol, alors que pour d'autres comme FRENCH (1996), il s'agit uniquement de la reptation d'un sol normalement gelés en dehors de la

saison de dégel, dont le fluage est lié à la percolation de l'eau. La détermination de l'occurrence de pergélisol dans ces structures nécessite donc des mesures spécifiques, comme par exemple des mesures géophysiques telles que la tomographie électrique, afin de déterminer les éléments contrôlant la reptation. Des recherches de cartographie et des inventaires de ces formes sont actuellement en cours (UTZ, 2012 in prep.).

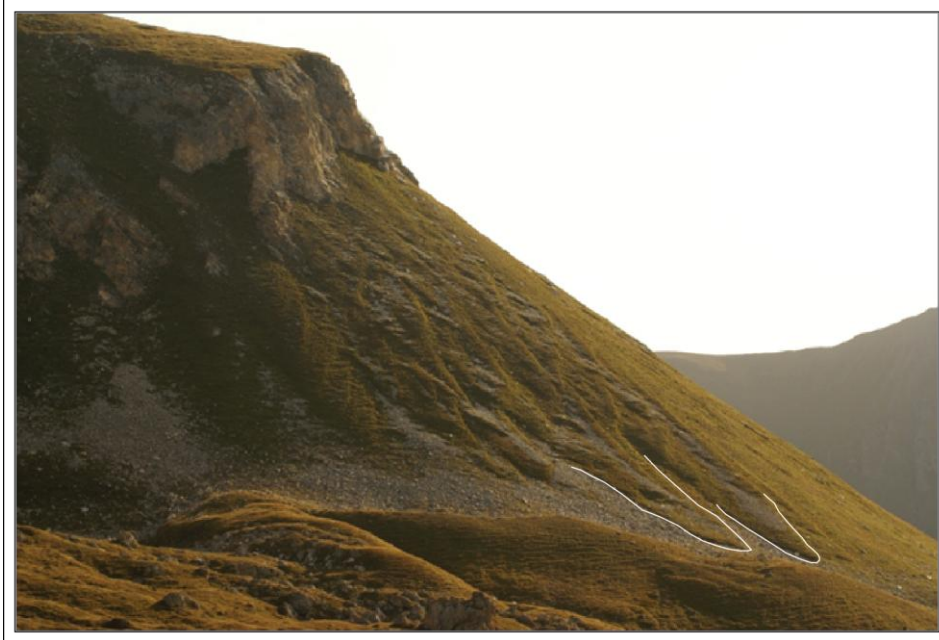


Figure III.11: des formes de fluage à Motta Blantse dans le Val de Moiry (Utz, 2012 in prep.).

### 3.1.5 La limite inférieure et la distribution typique et atypique du pergélisol alpin discontinu

La définition communément acceptée pour la *limite inférieure du pergélisol discontinu* est généralement l'altitude en dessous de laquelle il n'est pas possible de retrouver un terrain gelé en permanence. Comme il a été montré, les glaciers rocheux dépendent fortement des facteurs topo-climatiques, notamment de la MAAT (en relation avec l'altitude) et l'exposition du versant. Sur cette base, dans la littérature la limite inférieure du pergélisol est généralement associée à la limite inférieure des glaciers rocheux actifs et inactifs. Des inventaires de glaciers rocheux à des échelles régionales ont donc permis d'établir cette altitude, à partir de laquelle plusieurs modélisations à caractère empirique basées sur ce concept ont été développées (cf. 3.2). Cependant, il est évident qu'il s'agit d'une limite complexe et que cette approche est imprécise. DELALOYE, 2004 ; MORARD ET AL, 2010) ont montré par exemple que, si une circulation d'air persiste dans un éboulis de basse altitude, il est possible, sous certaines conditions, d'observer du pergélisol.

Ces découvertes ont remis en discussion la limite inférieure de la ceinture du pergélisol et une réflexion concernant sa distribution très hétérogène s'est révélée nécessaire. En règle générale, la présence de terrains gelés en permanence dépend des facteurs

topoclimatiques énoncés dans les sous-chapitres précédents. Ces derniers correspondent aux composantes verticales du bilan d'énergie influençant les échanges thermiques entre la couche active et la surface du sol. Ce concept est valable pour une échelle régionale, pour laquelle la probabilité d'occurrence du pergélisol augmente avec l'altitude.

Cependant, quelques exceptions existent. C'est par exemple le cas pour la répartition du pergélisol dans les éboulis, où une anomalie thermique liée à une circulation interne d'air est le moteur principal du refroidissement atypique de la moitié inférieure de la formation. Ce qui permet l'observations d'éboulis froid de basse altitude dans lesquelles un état thermique négatif est présent. Ainsi, les marges proglaciaires et les moraines de poussée peuvent être localement gelées en permanence ou être complètement dépourvues de permafrost lorsque la couverture minérale est suffisamment épaisse pour protéger la subsurface des échanges énergétiques entre sol et atmosphère.

Il est donc indispensable de comprendre que le pergélisol se distribue de façon *typique* là où la composante des échanges énergétiques est dominante. Néanmoins, lorsque les échanges énergétiques entre l'atmosphère et le sol sont perturbés par des facteurs externes (effet de cheminée, corps de glace d'origine glaciaire, etc.), la distribution du pergélisol devient *atypique* (DELALOYE, 2004 ; LAMBIEL, 2006 ; SCAPOZZA, 2012). Cette distinction devient fondamentale lors de la mise en place d'une modélisation de la distribution potentielle du pergélisol alpin. Au centre de la problématique de recherche du présent travail et présente dans plusieurs travaux proposés dans la littérature, la forte discontinuité spatiale du permafrost représente aujourd'hui un des défis principaux des études sur le pergélisol alpin.

### 3.1.6 Synthèse

L'occurrence de pergélisol alpin en haute montagne se caractérise par une extrême discontinuité spatiale et, à l'échelle locale, les facteurs de contrôle varient en fonction des types d'environnements considérés. Ces derniers peuvent être classés en deux catégories, dans lesquelles le pergélisol est généralement présent ou absent. Une synthèse concernant la répartition du pergélisol est donc proposé à l'aide du *tableau III.II*.

Type d'environnement	Occurrence de pergélisol	Remarques
Glacier rocheux actif	✓	Caractérisé par une matrice sursaturé en glace qui est à l'origine du fluage vers l'aval.
Glacier rocheux inactif	✓	Mouvement absent, caractérisé par un corps de glace dans sa matrice.
Glacier rocheux fossile	✗	Il ne contient plus de glace et il se localise généralement en dessous de la ceinture du pergélisol discontinu.
Eboulis (moitié amont)	✗	Le régime thermique qui s'installe dans certain éboulis de haute montagne favorise un réchauffement dans la moitié amont (cf.3.1.4.1).
Eboulis (moitié aval)	✓	Le régime thermique qui s'installe dans certain éboulis de haute montagne favorise un maintien de températures négatives dans la moitié aval (cf.3.1.4.1).
Surface végétalisée	✗	La végétation est généralement synonyme d'absence de pergélisol.
Parois rocheuse	✓ - ✗	Pergélisol présent uniquement pour les parois localisées à une altitude suffisamment élevée.
Eboulis végétalisé	✗	L'éboulis végétalisé n'a généralement pas une couche active à granulométrie suffisamment grossière pour qu'une ventilation d'air se développe à son intérieur.
Marge proglaciaire	✗	Communément reconnue comme dépourvue en pergélisol (cf. 3.1.4.3). Pergélisol présent très localement.
Loupes de gélifluxion	✓	cf. 3.1.4.4
Moraine du PAG	✓ - ✗	Différentes facteurs régissent la probabilité d'occurrence de pergélisol (cf. 3.1.4.3).
Crête morainique latérale	✓ - ✗	Idem.
Moraine de poussée	✓	Elle se composent généralement d'anciens pergélisol remaniés et compressés par l'avancée glaciaire.
Glacier couvert	✓	La glace massive résiste au températures positives et donc du néo-pergélisol sporadique et présent.
Moraine du Tardiglaciaire	✗	Généralement dépourvue car localisé en dessous de la limite inférieure du pergélisol.

Tableau III.II: synthèse de la répartition du pergélisol dans plusieurs types d'environnement.

## 3.2 LA MODÉLISATION DE LA RÉPARTITION DU PERGÉLISOL : ÉTAT DE LA RECHERCHE

Dans la littérature, plusieurs modèles sur l'occurrence du pergélisol sont proposés. Ils sont essentiellement de deux types : les modèles de répartition du permafrost de caractère empirique ou empirico-statistique, et les modèles physiques qui s'intéressent plutôt à la compréhension des échanges énergétiques entre la couche active et l'atmosphère. L'un et l'autre nécessitent un choix concernant l'échelle géographique influençant les variables à retenir. En effet, comme indiqué précédemment, l'occurrence de permafrost peut s'expliquer par des facteurs de contrôle propres aux dimensions de la zone d'étude considérée. Etant donné que la topographie est l'un des facteurs influençant le plus les températures du sol, la plupart des modélisations empiriques et empirico-statistiques actuelles se réfèrent à des échelles régionales et locales. En effet, peu d'entre elles couvrent une échelle continentale en raison du manque de détails à ce niveau. Les modèles physiques, quant-à-eux, s'intéressent principalement à l'échelle de l'objet et, plus précisément, dans la majorité des cas ils décrivent le pergélisol de façon ponctuelle car beaucoup d'informations sont requises afin d'aboutir à une simulation cohérente par rapport à la réalité.

### 3.2.1 Les bases de la recherche

A une échelle régionale, telle que l'échelle alpine, les modèles de répartition du pergélisol proposés dans la littérature se basent sur différentes approches telles que des méthodes stochastiques ou déterministes. Les modèles stochastiques sont calibrés de façon empirico-statistique, tandis que les déterministes correspondent à des modélisations physiques. La plupart de ces modèles se basent sur des indices indiquant la présence de terrains gelés en permanence tels que les glaciers rocheux intacts, ainsi que les mesures BTS (*bottom temperatures of snow cover*), en s'appuyant sur la méthode proposée par HAEBERLI en 1973.

Les points communs de ces modèles sont liés aux « *Permafrost-Faustregeln* » (HAEBERLI, 1996). Il s'agit des premiers essais qui ont permis de mettre en évidence les éléments expliquant la présence de pergélisol. Initiées pendant les années 1970, les recherches de Wilfried Haerberli lui ont permis d'énoncer dix règles empiriques traduisant ses observations de terrain dans les Alpes Grisonnes. Elles définissent les facteurs principaux concernant la présence ou l'absence de pergélisol à un endroit spécifique:

1. Dans les pentes plus raides que 5°, l'exposition, induisant une variation du rayonnement solaire direct, a une grande influence sur la limite inférieure du pergélisol discontinu.
2. Dans les pieds de pente, là où la neige se maintient jusqu'en été, la limite inférieure du pergélisol discontinu est abaissée.



3. Dans les pentes inférieures à 5°, l'influence de la température de l'air et de la hauteur de neige est plus importante que l'exposition.
4. En dessous de la limite de la forêt, le permafrost est présent sous forme très sporadique ; en dessus de cette limite, il faut compter avec la présence potentielle de permafrost.
5. Les glaciers rocheux intacts (actifs/inactifs) sont des indicateurs de la présence de permafrost.
6. Les névés ou taches de neige pérennes sont des indicateurs de la présence de permafrost.
7. Dans les zones à pelouse alpine, la probabilité de trouver du pergélisol est faible (<25%) ; dans les éboulis nus, elle est élevée (>75%).
8. Les surfaces à gros blocs sont favorables au pergélisol ; les granulométries fines le sont beaucoup moins.
9. Des températures de sources inférieures à 1°C ne peuvent s'expliquer que par un contact de l'eau avec un corps de pergélisol (sauf si de l'eau de fonte de la neige s'infiltré dans le terrain).
10. Si les températures sont supérieures à 2°C, on peut s'attendre à une absence de pergélisol.

Ces dix propositions ont posé les bases de la modélisation du pergélisol alpin et plusieurs modèles ont effectivement été développés en traduisant ces observations. Le même Haeberli fut le premier à proposer un modèle topoclimatique (*tableau III.III*) définissant les limites inférieures de la ceinture du pergélisol, selon l'orientation et la topographie du terrain considéré. De plus, cette modélisation a permis une première classification, donnant les altitudes en-dessus desquelles la présence de permafrost est *possible* ou *probable*.

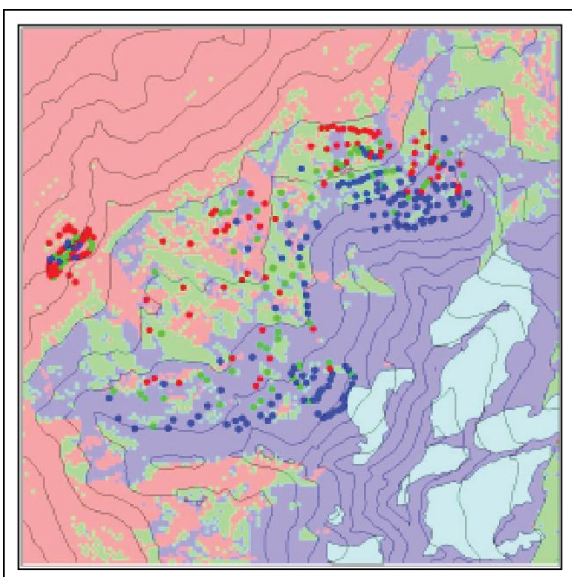
Orientation	Pergélisol possible en dessus de (m)		Pergélisol probable en dessus de (m)	
	Pente	Pied de pente	Pente	Pied de pente
N	2400	2100	2600	2550
NE	2450	2300	2600	2700
E	2600	2400	3000 ?	2700
SE	2850	2300	3000 ?	2700
S	3000	2250	?	2600
SW	2700	2150	2900	2550
NW	2350	2050	2400	2400
<b>Replats exposés au vent</b>	2600		2700	
<b>Replats protégés du vent</b>	2650		3000?	

Tableau III.III: modèle topo-climatique des limites inférieures du pergélisol (possible ou probable) selon l'orientation et la localisation du site (modifié d'après HAEBERLI, 1996).

### 3.2.1.1 Les premiers modèles empiriques de répartition du pergélisol alpin

La première représentation numérique de la répartition du pergélisol a été conçue par KELLER en 1992. Il s'agit d'un module du système d'information glaciologique KRYO, développé dans un environnement ARC/INFO et nommé PERMAKART (figure III.12). Cette modélisation permet de mettre en évidence la distribution potentielle du permafrost de montagne sur une carte topographique à partir des règles empiriques proposées par Haeberli, ainsi que des analyses basées sur un modèle numérique d'altitudes (MNA) (voir aussi KELLER & HOELZLE, 1996). Par la suite, IMHOF (1996a) a proposé une amélioration de ce module en incluant différentes typologies de couverture du sol. Un deuxième module connu comme PERM a été développé sur cette base et a été testé avec relativement de succès dans les Alpes Bernoises.

Figure III.12: extension potentielle du pergélisol de la région du Corvatsch-Furschellas à l'aide de PERMAKART (KELLER, 1992).



D'autres auteurs ont créé des simulations de la répartition du pergélisol discontinu sur la base de différents inventaires de glaciers rocheux (IMHOF, 1996B ; DELALOYE & MORAND, 1997 ; BARONI ET AL., 2004 ; SEPPI ET AL. 2005). Les glaciers rocheux intacts se localisant aux altitudes les plus basses déterminent effectivement la limite inférieure de la ceinture du pergélisol pour une exposition spécifique. De manière empirique donc, des cartes de la répartition potentielle du pergélisol a pu être établie. Toutefois, du moment que les régions dans lesquelles les glaciers rocheux ont été inventoriés sont différentes, les limites d'altitude en dessous desquelles il est possible de retrouver du pergélisol varie légèrement. Ainsi, il n'est envisageable d'appliquer ces modèles qu'à une échelle purement régionale. Une comparaison entre ceux-ci n'est par ailleurs pas recommandée.

### 3.2.2.2 Les modèles empirico-statistiques de répartition du pergélisol alpin

En raison de ces limites et de leur simplicité, les modèles purement empiriques se sont révélés imprécis et ils ont laissé la place à d'autres modélisations de caractère statistique. Le modèle le plus connu de ce type, PERMAMAP, a été proposé par HOELZLE & HAEBERLI en 1995 et utilise une base de SIG. L'absence ou la présence de pergélisol est indiquée pour des centaines de mesures BTS, et sont fonctions des facteurs climatiques propres à l'endroit considéré. Pour chacun de ces points de mesure, la MAAT a été calculée ainsi que la radiation solaire directe potentielle. Ces opérations ont été réalisées par manipulation d'un modèle d'altitude numérique. Afin de prédire l'occurrence du pergélisol, PERMAMAP utilise la relation statistique existant entre la radiation solaire directe au cours de l'été et la température de l'air dans les zones

limites, c'est-à-dire aux endroits où les mesures BTS se localisent entre  $-2^{\circ}\text{C}$  et  $-3^{\circ}\text{C}$ . Plusieurs tests (par exemple FRAUENFELDER, 1998 ; NYENHUIS, 2005) ont montré l'efficacité de ce modèle qui permet de prédire la présence de pergélisol en-dessous de la limite inférieure du pergélisol discontinu (figure III.13). Les mesures BTS permettent donc de ne plus utiliser l'altitude minimale de l'inventaire des glaciers rocheux, qui ne représente pas la forte discontinuité spatiale de la répartition du pergélisol.

Par la suite, l'utilisation des températures à la base de la couche de neige a été adopté à plusieurs reprises même pour de modèles basés sur des approches différentes, autant empirico-statistiques que physiques (KELLER *ET AL.*, 1998; RIEDLINGER AND KNEISEL, 2000; GRUBER AND HOELZLE, 2001; STOCKER-MITTAZ *ET AL.*, 2002; EBOHON AND SCHROTT, 2008). L'exploitation de mesures de température à l'intérieur de forages a par ailleurs servi au développement d'autres modèles similaires (GRUBER *ET AL.*, 2004; HEGGEM *ET AL.*, 2005; ETZELMÜLLER *ET AL.*, 2006, 2007; ALLEN *ET AL.*, 2009).

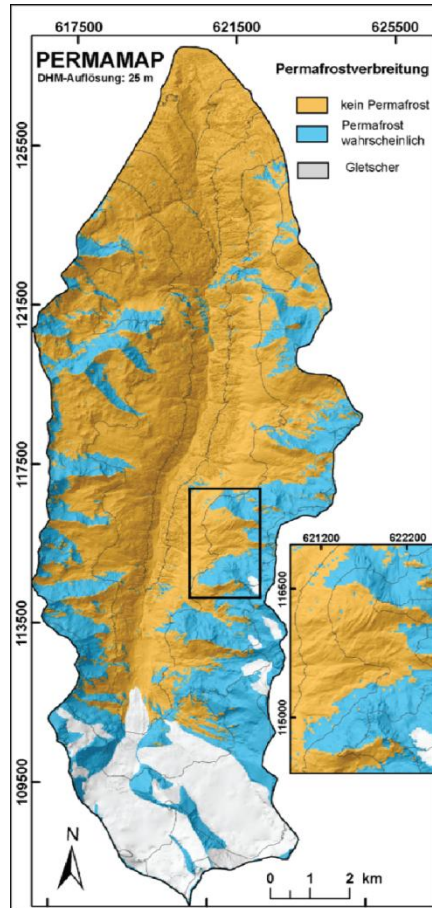
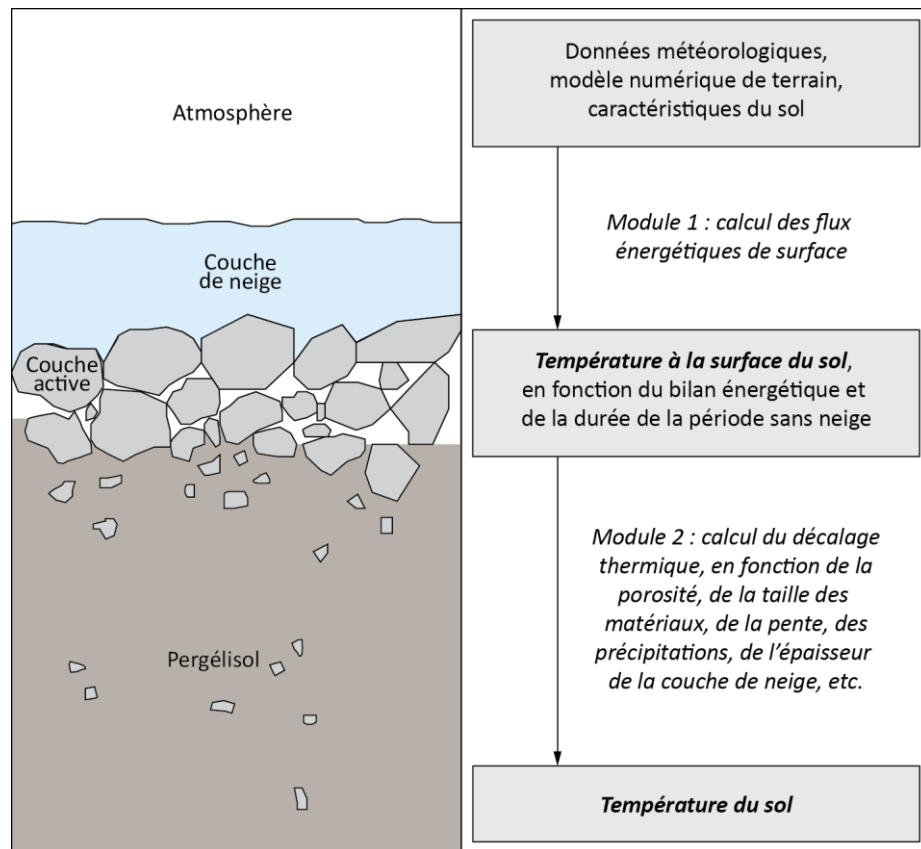


Figure III.13 : extension potentielle du pergélisol DE la Turtmantal à l'aide de PERMAMAP (NYENHUIS, 2005).

### 3.2.2.3 Les modèles physiques de répartition du pergélisol alpin

Aucun modèle parmi ceux qui ont été décrits précédemment ne tient compte des caractéristiques du sol, qui influencent de façon significative l'occurrence du pergélisol à l'échelle locale. En effet, les bilans énergétiques sont fortement dépendants du type de couverture du sol et de la durée de la couverture neigeuse. Si pour des parois rocheuses verticales l'influence des flux énergétiques est relativement facile à décrire, pour des versants à faible pente, les températures du sol sont liées aux conditions atmosphériques de manière nettement plus complexe. Les premiers modèles essayant de décrire les bilans d'énergie de la couche active ont donc vu le jour (MITTAZ *ET AL.* 2000 ; HOELZLE *ET AL.*, 2001). PERMABAL, développé par STOCKER-MITTAZ *ET AL.* (2002), est un des modèles les plus connus. Il se base sur les processus physiques et intègre les décalages thermiques dépendant de la couverture neigeuse et des caractéristiques de la couche active (figure III.14).

Figure III.14 : conception schématique des modules de PERMABAL (STOCKER-MITTAZ ET AL., 2002).



Deux modules composent ce modèle : un premier prend en compte les flux d'énergie de surface afin de calculer la température de surface sur la base de données météorologiques, d'un modèle d'altitude et de données concernant les caractéristiques du sol telles que l'albédo, l'émissivité et la rugosité. Sur la base de la température de surface obtenue, un deuxième module permet de calculer la température du sol (MAGST), tout en tenant compte du décalage thermique résultant des caractéristiques de la couche active (porosité, taille de blocs, présence de la neige, etc.).

Ce modèle, comme tout modèle physique, s'avère efficace à une échelle ponctuelle et lorsque les données à disposition sont très nombreuses. Ce dernier constat s'est pourtant révélé être une des plus grandes limites pour GUGLIELMIN ET AL. (2003) le développement de PERMACLIM. Composé aussi de deux modules permettant d'une part de calculer la MAGST sur la base de la MAAT mesurée et d'autre part de calculer le décalage thermique induit entre MAGST et MAAT par la couche de neige, ce modèle se propose de produire une carte de la répartition potentielle du pergélisol. Toutefois, il est fortement limité lorsque les informations à disposition sont peu nombreuses, notamment, comme l'indiquent les mêmes auteurs, concernant les caractéristiques de la couverture neigeuse en termes d'épaisseur et de densité, de remaniement de la neige par les avalanches et le vent, etc. Malheureusement, il est très difficile de produire des cartes fiables de la répartition de ce type d'informations, ce qui rend par conséquent difficile l'élargissement des résultats des modèles physiques à une échelle différente de l'échelle locale ou de l'objet.

### 3.2.3.4 La modélisation du pergélisol alpin dans les parois rocheuses

Malgré les progrès des recherches pour une meilleure représentation de la répartition du permafrost alpin, peu de modèles visaient à la compréhension de l'état thermique à l'intérieur des parois rocheuses et par conséquent, de l'occurrence de pergélisol. Installés il y a dix ans environ et par la suite intégrés au réseau de monitoring PERMOS, des capteurs ont permis depuis de mesurer les températures de la surface de la roche dans les parois rocheuses possédant une pente supérieure à 70°. Les données récoltées ont permis de comprendre que, dans ce cas, en raison de la quasi-totale absence de couverture neigeuse et de matériel poreux, le transfert de chaleur par conduction thermique est l'un des facteurs les plus importants régissant la présence d'un sol gelé en permanence (GRUBER *ET AL.*, 2003). Par conséquent, le permafrost est particulièrement dépendant de la température de la roche à la surface de la paroi (MARST). Le premier essai de modélisation de ce phénomène a été proposé par GRUBER *ET AL.* (2003, 2004) et il se base sur les températures mesurées sur plusieurs sites dans les Alpes. En adaptant le modèle PERMABAL à ce type d'environnement, l'isotherme moyen de 0°C pour une période de 21 ans a pu être calculé (figure III.15).

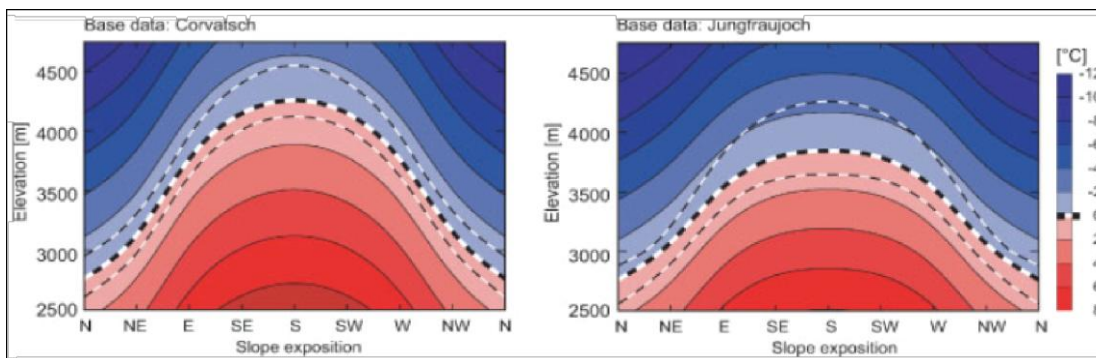


Figure III.15 : modélisation de la MARST dans les parois rocheuses pour les sites du Corvatsch et du Jungfraujoch (GRUBER *ET AL.*, 2004).

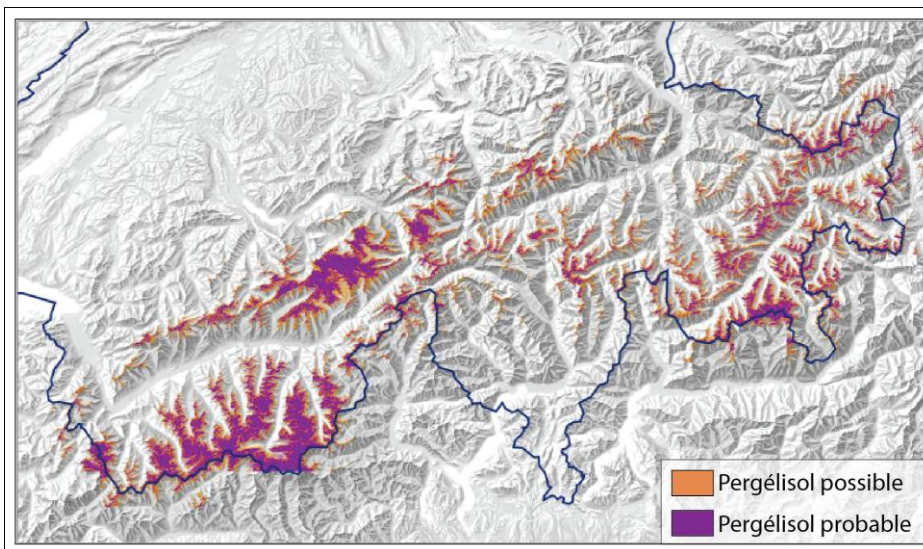
Des études supplémentaires ont été présentées dans la littérature ces dernières années, permettant une meilleure compréhension des dynamiques faisant varier l'état thermique des parois. En effet, plusieurs chercheurs ont avancé des hypothèses concernant le rôle des fractures de la roche dans les variations des décalages thermiques (GRUBER & HAEBERLI, 2007 ; NOETZLI *ET AL.*, 2007 ; HASLER *ET AL.*, 2011). Dès lors, il semble maintenant évident que, contrairement aux formations superficielles, la réponse du pergélisol aux changements climatiques dans les parois rocheuses se présente de façon différente. Par conséquent, le développement de nouvelles modélisations plus appropriées à ce type de contextes est nécessaire.

### 3.2.2 Cartes de l'extension potentielle du pergélisol alpin

#### 3.2.2.1 A l'échelle nationale

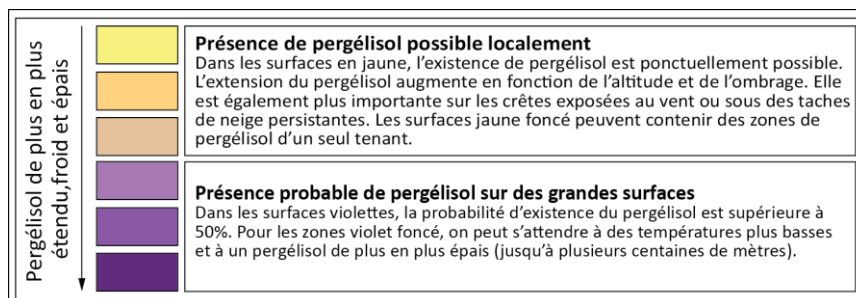
Au cours dernières décennies, la conception d'un outil de planification des constructions humaines dans les zones se localisant dans des environnements périglaciaires s'est révélé nécessaire. Sur la base des connaissances à disposition jusqu'à ce moment, les bureaux Geotest, Geo7 et Academia Engiadina ont été mandatés par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) afin de créer une carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin à l'échelle nationale. A l'aide d'un modèle empirique, cette modélisation tient compte de trois classes de surface : les glaciers et les surfaces d'eau, les rochers et les matériaux meubles. Des facteurs de contrôle supplémentaires ont été extrapolés à partir d'un modèle numérique de terrain possédant une résolution de 25 mètres. Ceux-ci ont permis d'établir l'occurrence du permafrost pour les deux dernières classes de surface sur la base de limites d'altitude obtenues empiriquement et vérifiées par la suite par des mesures de terrain. Un modèle physique, intégrant des mesures de température dans les parois, a par contre été employé afin de déterminer la répartition du pergélisol dans les parois rocheuses. La carte nationale qui a été produite (figure III.16) propose deux classes d'interprétation : les zones de pergélisol possibles et probables.

Figure III.16 : carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin (OFEV, 2005).

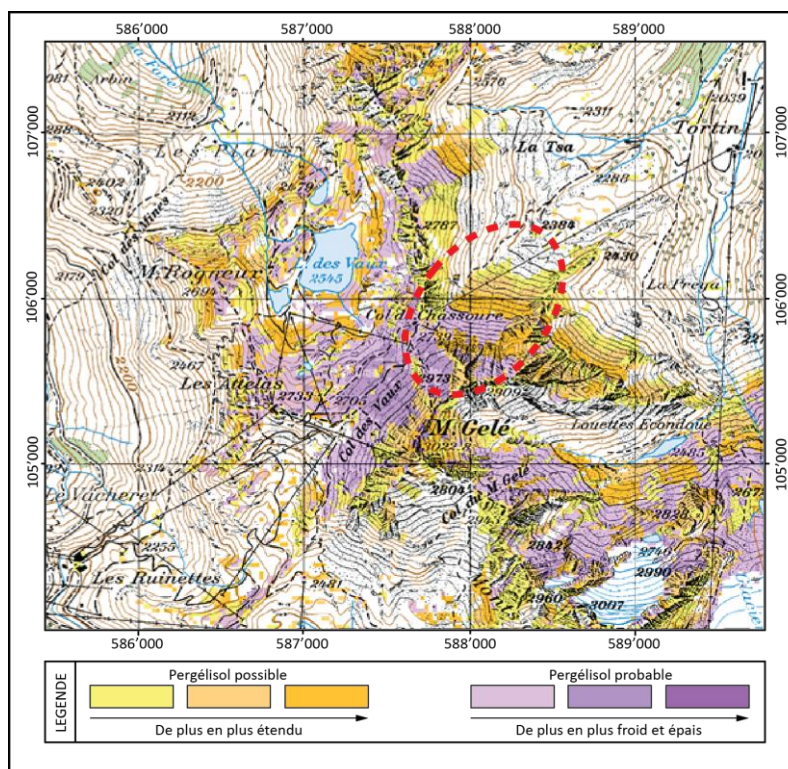


A niveau régional, le modèle prévoit plus de classes de probabilités (figure III.17). L'OFEV précise par contre que la carte a été développée sur la base d'un modèle numérique de terrain, aucune information sur les conditions locales (géologie de la couverture rocheuse, granulométrie, etc.) n'a été prise en compte.

Figure III.17 : la légende de la carte de l'OFEV, avec les classes de probabilité qui ont été attribuées à la probabilité d'occurrence du pergélisol (OFEV, 2005).



Dès lors, dans la réalité, du pergélisol est probablement trouvable en dessous de 2000 mètres d'altitude lors que les conditions le permettent. Il est donc indispensable de développer une réflexion supplémentaire sur le terrain lorsque la carte doit être utilisée pour une analyse locale (OFEV, 2005). En effet, ce modèle ne permet pas de représenter la forte discontinuité du pergélisol discontinu (cf. 3.1.4.1), et une plus forte occurrence de pergélisol avec l'augmentation de l'altitude semble être la tendance la plus récurrente. Un extrait de la carte de l'OFEV (figure III.18) pour la région du Mont Gelé met clairement en évidence ce problème : différents études (voir par exemple DELALOYE, 2004 ; LAMBIEL, 2006 ; SCAPOZZA, 2012) indiquent la présence de sols gelés en permanence uniquement dans la moitié inférieure de l'éboulis des Lapires, à l'Est du Col de Chassoure. La carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin au contraire, propose une tendance opposée à ces découvertes.



### 3.2.2.2 A l'échelle des Alpes

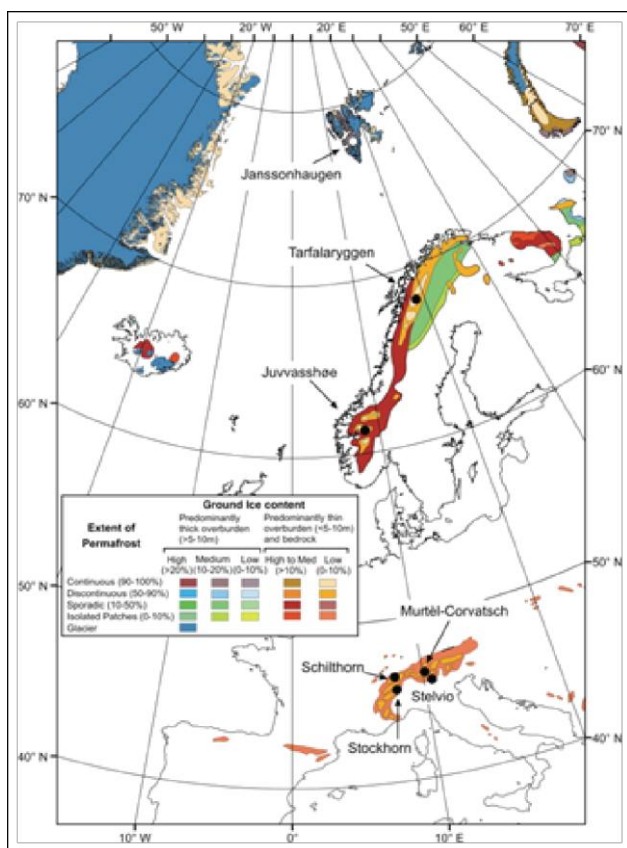
Une étude similaire aboutissant à la modélisation du pergélisol à l'échelle des Alpes a été proposée par BOECKLY ET AL. (2011). De type empirico-statistique, ce modèle se base sur un inventaire des glaciers rocheux et des températures moyennes de la roche à la surface (MARST). Deux modules ont été conçus : un traitant les formations sédimentaires meubles et l'autre concernant les parois rocheuses. Le premier exploite des variables telles que la MAAT, la radiation solaire directe potentielle et les précipitations annuelles moyennes afin de prédire si les glaciers rocheux des différents inventaires sont intacts ou fossiles. Une limite d'altitude en-dessus de laquelle du pergélisol est envisageable est déterminée à partir de ce module.

Le deuxième module modélise le pergélisol dans les versants à forte pente et il utilise la MAAT et la radiation solaire directe potentielle afin définir des limites d'altitudes pour chaque orientation. La calibration de cette modélisation s'effectue à l'aide de la MARST.

Bien que la carte proposée par BOECKLY s'applique de façon satisfaisante à l'échelle alpine et que l'approche utilisée pour la prédiction de la répartition du phénomène est différente par rapport aux autres modèles proposés dans la littérature, la représentation du permafrost à l'échelle locale présente les mêmes problématique que celles citées auparavant. Aucune des méthodes empirico-statistiques utilisées ne s'est révélée convenable lorsque l'échelle à considérer doit s'agrandir. Une réflexion concernant l'interprétation de ces cartes est donc nécessaire, ce qui n'est pas toujours évident pour des utilisateurs non experts dans le domaine.

### 3.2.2.1 A l'échelle continentale

Figure III.19 : modèle de répartition du pergélisol à l'échelle continentale (dans HARRIS ET AL., 2003).



A l'échelle continentale, le modèle le plus connu a été proposé par BROWN ET AL. (1997) dans le cadre du projet international de recherche PACE (figure III.19). Se basant exclusivement sur des facteurs topoclimatiques tels que la latitude, l'altitude, la température de l'air et du sol, cette modélisation du secteur européen a été réalisée entre les lignes de longitudes 30°E et 25°W et elle inclut la Scandinavie, l'Islande, Svalbard et les Alpes. Cependant, elle ne tient pas compte du Groenland et de la Russie. La figure 3.6 propose un aperçu des résultats dans la zone d'étude.

Commentant cette carte, HARRIS ET AL. (2003) décrivent un important

contraste entre deux grandes régions : la portion de territoire comprenant l'archipel arctique de Svalbard et les basses latitudes de la Scandinavie et les Alpes. Dans la première région, le pergélisol est cartographié comme étant continu autant dans les zones non recouvertes par des glaciers qu'à leur base, en raison de leur caractère polythermique permettant une température basale suffisamment froide pour que des sols gelés en permanence se maintiennent. Au contraire, dans les Alpes et en Scandinavie, l'altitude et l'orientation des versants jouent un rôle majeur et le



permafrost est discontinu ou sporadique (BROWN *ET AL.*, 1997). De plus, à l'exception des glaciers de haute altitude, les températures à la base des glaciers de basses latitudes n'est pas suffisamment froide pour que du pergélisol soit présent (KNEISEL, 2003).

D'autres modèles tenant en compte l'échelle continentale sont ainsi proposés par d'autres réseaux de monitoring du pergélisol, notamment s'intéressant aux régions polaire et subpolaire. C'est par exemple le cas des cartes proposées par le réseau « Circumpolar Active Layer Monitoring » (CALM) qui, sur la base de mesures de température à l'aide de forages, capteurs et stations météorologiques, a produit une simulation de l'extension du pergélisol pour les basses latitudes de l'hémisphère Nord et Sud (OELKE & ZHANG ; 2004) (figure III.20).

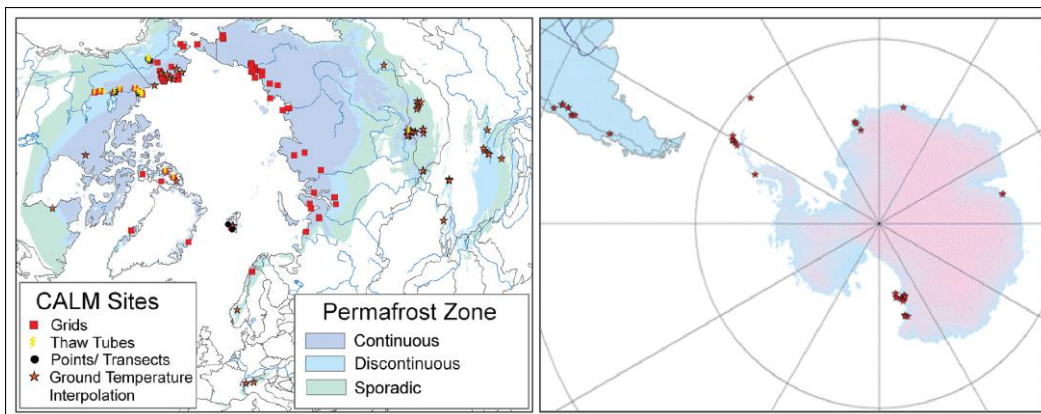


Figure III.20 : modèle de l'extension du pergélisol à l'échelle continentale pour les hémisphères Nord et Sud (OELKE & ZHANG ; 2004).

Comme la simulation se base généralement sur une interpolation de température du sol, il est évident que le niveau de détails de ces modèles est faible car l'échelle est assez réduite. Par conséquent, les cartes de l'extension continentale du pergélisol sont des outils permettant la compréhension de ce phénomène avec ces interrelations globales, mais elles sont difficilement exploitables pour une analyse locale et régionale.

### 3.2.3 Modèles physiques d'évolution temporelle du pergélisol alpin à l'échelle de l'objet

Les connaissances relatives aux flux énergétiques régissant un sol gelé en permanence sont devenues de plus en plus précises, permettant une bonne compréhension du phénomène. Plusieurs recherches ont adapté un modèle décrivant le transfert de chaleur dans le sol au domaine du permafrost. Il a été proposé en 2001 par JANSSON & KARLBERG et est connu dans la littérature sous le nom de COUP-Model. SCHERLER *ET AL.* (2011) et SCHERLER & HOELZLE (2011) ont employé cette approche sur deux sites : le Murtèl, en Engadine, et le Schilthorn, dans les Alpes Bernoises. Le COUP-Model (figure III.21) calcule un bilan énergétique complet du sol et de la couverture neigeuse, ce qui permet d'obtenir la température à la surface, c'est-à-dire la limite supérieure du profil thermique du sol. À l'aide du flux de chaleur géothermique, la limite inférieure est ensuite déterminée. Le modèle prend en compte l'accumulation et la fonte de la

couverture saisonnière de neige, ainsi que le gel et le dégel du sol. De plus, il se base sur les paramètres météorologiques mesurés sur le site d'étude tels que la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement solaire globale (ondes longues et courtes), la vitesse du vent et les précipitations.

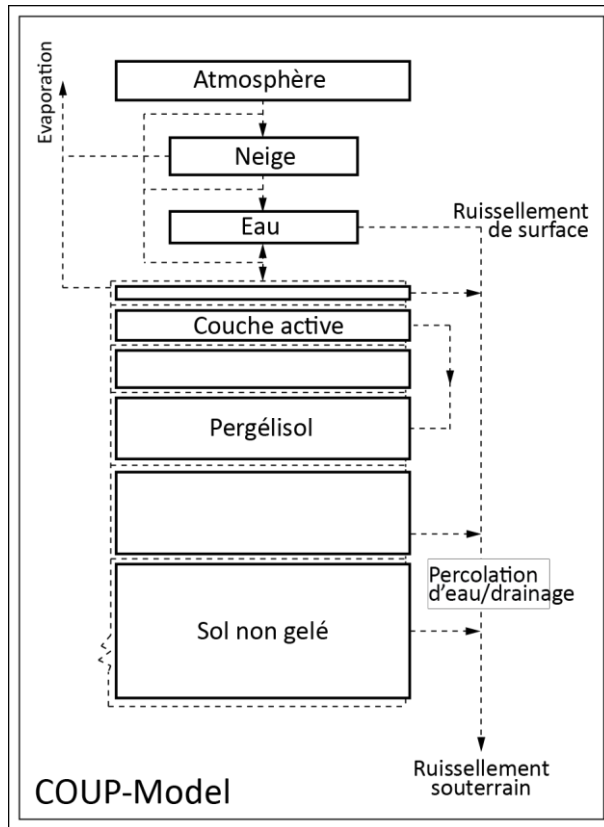


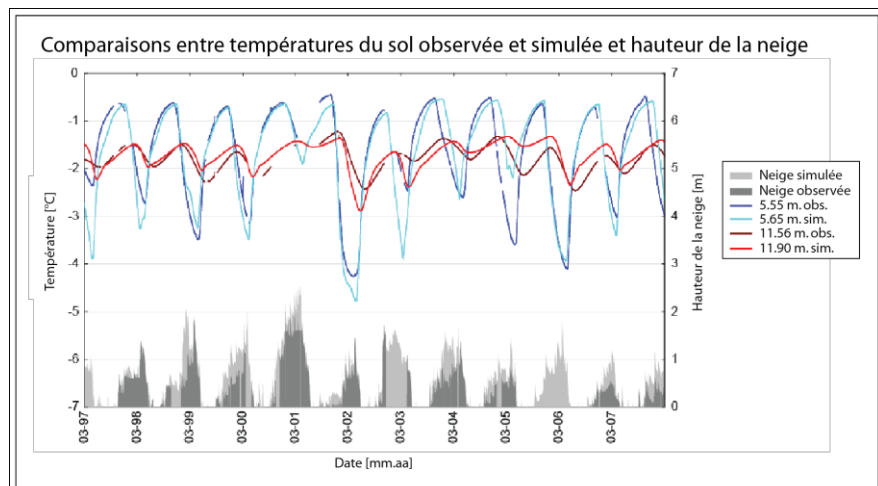
Figure III.21 : fonctionnement schématique du COUP-Model (Modifié d'après JANSSON & KARLBERG; 2001).

Le COUP-Model original ne prévoit pas les phénomènes de convection et d'advection à l'intérieur d'une granulométrie à blocs car il s'agit d'un modèle unidimensionnel. Afin de tenir compte de l'effet d'isolation de la stratification (qui est stable au cours de l'été à l'intérieur de ce genre de sol), ainsi que de la perte de chaleur advective dans la couche à blocs, au cours des mois d'automne et d'hiver, SCHERLER & HOELZLE (2011) ont inclus dans le modèle une pompe à chaleur placée proche de la couche de surface. Cette dernière permet de simuler un transfert de la chaleur du milieu le plus froid (qui se refroidit encore plus) vers le milieu le plus chaud (qui se réchauffe) alors que, naturellement, la chaleur se diffuse

de l'endroit le plus chaud vers le plus froid jusqu'à l'égalité des températures.

A l'aide de ce modèle les auteurs ont pu déterminer la hauteur de la neige et la température à l'intérieur du sol à différentes profondeurs et de les comparer aux valeurs mesurées disponibles. La figure III.22 se réfère aux essais effectués pour le glacier rocheux du Murtèl en considérant la période 1997-2007.

Figure III.22 : application du COUP-Model pour la détermination des températures du sol et de l'hauteur de neige (SCHERLER & HOELZLE, 2011).



Le COUP-Model s'est aussi révélé particulièrement satisfaisant lorsqu'il s'agit de prédire l'évolution de la hauteur de la couche neigeuse ou l'épaisseur de la couche active au cours de prochaines décennies. En effet, plusieurs scénarios dépendant des différents modèles climatiques prévus pour le prochain siècle ont été produits afin de simuler l'évolution du pergélisol pour le site du Schilthorn (figure III.23).

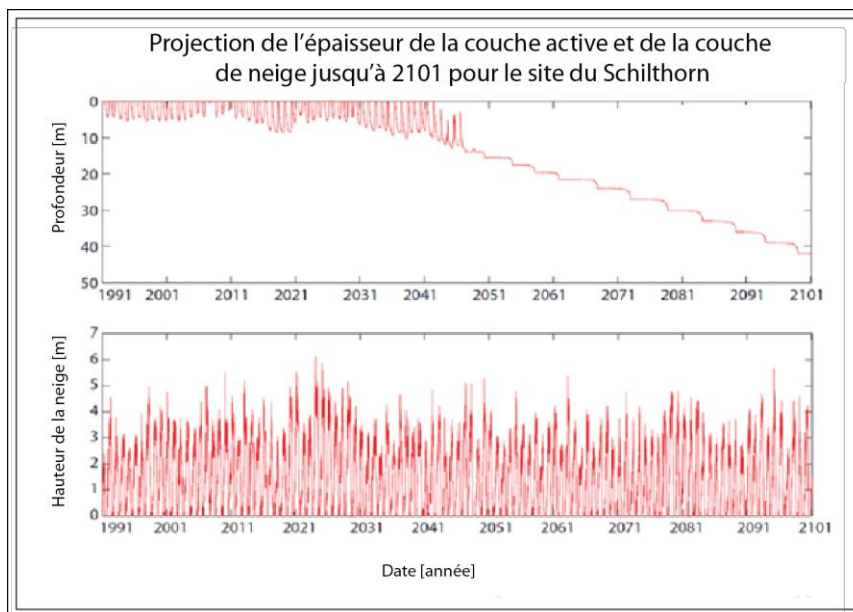


Figure III.23 : projection de l'épaisseur de la couche active et de la neige au Schilthorn jusqu'à 2101 (SCHERLER ET AL., 2011).

### 3.2.4 Synthèse

Les modèles que qui ont été présentés dans ce chapitre sont conçus à l'aide d'approches variées, ce qui ne les rend pas toujours comparables car ils sont calibrés sur des données régionales distinctes. Il est évident que l'échelle géographique influence de manière non négligeable le type de modèle développé ainsi que ses limites. SCAPOZZA (2008) a réalisé un inventaire des modèles existants (tableau III.IV), en les classant selon l'échelle spatiale retenue, leur type et leur complexité. Cette classification a été complétée par les modèles de répartition du pergélisol couvrant toutes les Alpes proposés par Boeckly (cf. 3.2.2.2) ainsi que le COUP-Model utilisé par SCHERLER (cf. 3.2.3) :

Echelle spatiale	Type de modèle	Exemple de modèle(s)	Complexité du modèle	Demande de données
Continentale	Topoclimatique – empirique	BROWN ET AL. (1997)	Simple	Faible
Régionale	Topoclimatique - empirique	PERMAKART PERM	Simple	Faible
Locale	Empirico-statistique	PERMAMAP PERMACLIM BOECKLY (2011)	Intermédiaire	Moyenne
Objet	Physique	PERMABAL COUP-Model	Complexe	Forte

Tableau III.IV : aperçu des caractéristiques de plusieurs modèles et leur adaptabilité à l'échelle géographique (modifié d'après SCAPOZZA, 2008).

Il est important de souligner que les modèles de type empirico-statistiques sont généralement mieux adaptés à la représentation de la répartition du pergélisol à l'échelle régionale, car ils mettent en relation l'occurrence du permafrost avec les paramètres topoclimatiques de la région (MAAT, radiation solaire, altitude, orientation, pente, etc.). Ces facteurs ne sont pas toujours suffisants pour expliquer les échanges énergétiques entre le sol et l'atmosphère à une échelle plus locale. Ainsi, dans ce cas, les modèles physiques sont plutôt employés afin de reproduire le fonctionnement d'un sol gelé en permanence de façon ponctuelle. Les études récentes (par exemple SCHERLER, 2011) ont montré l'efficacité des modèles physiques sur l'évolution temporelle du pergélisol. Cependant, peu d'efforts en direction d'une modélisation de la distribution atypique du permafrost dans les éboulis sont visibles et actuellement aucun modèle n'arrive à simuler l'extrême discontinuité du pergélisol de montagne. Au cours des prochaines années, des recherches concernant ce sujet extrêmement intéressant devront être envisagées afin de mettre à jour les cartes existantes et s'adapter à l'évolution des connaissances.





# 4. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODES





## 4.1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Les pages qui suivent portent sur le développement d'un nouveau modèle de la répartition du pergélisol alpin. Comme la distribution de ce phénomène est sujette à de fortes variations selon le type de terrain étudié, quelques réflexions sont nécessaires. En effet, comme il a été mis en évidence à plusieurs reprises, l'état thermique d'un sol gelé en permanence subit l'influence de facteurs de contrôle différents dans le cas d'un éboulis. C'est notamment dans ce type d'environnement que la problématique de cette recherche s'inscrit, car aucun modèle existant n'a encore été capable de simuler de manière satisfaisante la répartition du permafrost dans ce cas.

Plus spécifiquement, l'objectif du travail est de concevoir un modèle prenant en compte la forte discontinuité spatiale qui se révèle autant entre la moitié inférieure et la moitié supérieure d'un éboulis (cf. 3.1.4.1), que dans les différences observables entre les autres types de terrains sédimentaires. Ainsi, il s'agit d'une part de modéliser la distribution atypique qui se présente dans les éboulis froids, et d'autre part de reconnaître de manière automatique la limite inférieure du pergélisol et d'en simuler la répartition typique pour la portion de territoire restante.

Sur la base de ces principes, quatre objectifs principaux peuvent être formulés :

- Produire une cartographie de la répartition spatiale du pergélisol alpin.
- Prendre en compte de la distribution atypique qui se traduit normalement par la présence de pergélisol dans la partie aval d'un éboulis et par son absence dans la moitié amont, pour distinguer ce modèle des modélisations classiques (cf. 3.2).
- Reconnaître automatiquement la limite du pergélisol alpin pour les huit orientations principales par le biais de la méthode proposée, sans avoir à utiliser les valeurs d'altitudes minimales obtenues à partir d'inventaires de glaciers rocheux.
- Proposer à la fois un aperçu de la répartition régionale et une vue la plus détaillée possible lorsque la portion de territoire étudiée se réduit vers un niveau plus local.

A partir de ces objectifs, plusieurs tâches peuvent être définies. Premièrement, une distinction entre les types de surfaces est nécessaire, ainsi que l'« extrapolation » des facteurs de contrôle par la manipulation d'un modèle numérique d'altitude (calculs de l'orientation, la radiation solaire, etc., pour tout endroit de la région d'étude). Dans un deuxième temps, à l'aide d'une technique connue sous le nom de *Machines à vecteurs de support* (cf. 4.3), la relation existante entre le pergélisol, le type de terrain et les facteurs mentionnés précédemment sera appréhendée par un algorithme. Cette relation sera exploitée pour la prédiction de la répartition du pergélisol alpin à des endroits dans lesquels elle est encore inconnue. Finalement, une deuxième modélisation s'intéressant exclusivement aux parois rocheuses sera ajoutée au résultat obtenu pour

les formations superficielles, afin de produire une carte de l'extension potentielle des sols gelés en permanence pour tout type de surface.

Dans les sous-chapitres qui suivent, un aperçu de la zone d'étude, de quelques sites présentant des formes géomorphologiques intéressantes et comparables avec le résultat du modèle, ainsi qu'une explication détaillée de la méthode sont présentés.

## 4.2 CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE

Le modèle qui est développé dans le cadre de ce travail de mémoire doit être appliqué spatialement sur une région intéressante du point de vue scientifique ainsi que déjà passablement étudiée au cours des dernières années. L'existence d'une grande quantité de données de qualité est en effet indispensable à la calibration du modèle. Par conséquent, les critères suivants pour le choix de la zone d'étude ont été pris en compte :

- Le terrain doit contenir des altitudes se situant au-dessus de la ceinture du pergélisol discontinu.
- Une grande diversité spatiale est nécessaire afin de couvrir plusieurs cas de figures (huit orientations, pentes différentes, types de terrain variés, etc.).
- La présence de glaciers rocheux déjà étudiés est indispensable, ainsi que d'autres formations superficielles telles que des éboulis. Ces exemples permettent en effet de prédire l'occurrence de pergélisol sur la base de cas dont la présence est certaine.

La portion de territoire couverte par la carte *Rosablance* (feuille 1326 de Swisstopo), dans le Canton du Valais (*figure IV.1*), remplit ces critères et semble être le cas le plus approprié. Depuis 1992, les Instituts de Géographie des universités de Lausanne et de Fribourg s'engagent dans l'étude des formes périglaciaires caractérisant cette région. Aux alentours du Mont Gelé et du Mont Fort, près de Verbier et de Nendaz, de nombreux sites ont fait l'objet de travaux de recherche et de monitoring. Ils concentrent principalement sur la cartographie géomorphologique et des glaciers rocheux (par exemple LAMBIEL, 1999 ; LAMBIEL & REYNARD, 2003), sur la modélisation de l'extension potentielle du pergélisol (REYNARD, 1996 ; WENKER 1997 ; LAMBIEL & REYNARD, 2001) ainsi que sur de nombreuses mesures de prospection géophysique (par exemple TURATTI, 2002 ; MARESCOT *ET AL.*, 2003 ; DELALOYE, 2004 ; LAMBIEL, 2006 ; LAMBIEL & PIERACCI, 2008) . Ces recherches ont permis d'étudier de manière précise la répartition du pergélisol alpin à différentes échelles géographiques, ainsi que de comprendre les mécanismes régissant l'occurrence du permafrost, notamment dans les éboulis. De plus, la station météorologique des Attelas, localisée à 2733 mètres d'altitude, mesure continuellement la température de l'air, ce qui permet le calcul de la MAAT à cet endroit et pour la totalité de la carte à l'aide d'une régression linéaire (*cf.* 5.2.2.2).

### 4.2.1 Caractéristiques géographiques, géologiques et climatiques de la région couverte par la feuille Rosablanche

La région couverte par la feuille Rosablanche se localise en rive gauche du Rhône et elle est entourée de trois vallées principales : le Val de Bagnes, le Val de Nendaz, le Val d'Hérémence. Dans la moitié Ouest de la carte une topographie hétérogène est dominante, avec des versants escarpés aux pieds des sommets principaux (le Mont Gelé, le Mont Fort, le Metallier, la Rosablanche).

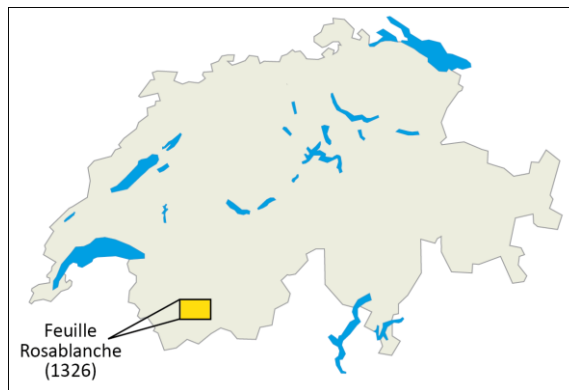


Figure IV.1 : localisation de la feuille Rosablanche (fond de carte : Swisstopo).

La moitié Est de la carte se caractérise par contre par une topographie plus régulière appartenant au grand bassin versant du Lac des Dix. Situé au fond du Val d'Hérémence, ce lac artificiel est largement connu grâce à l'imposant barrage de la Grande Dixance. A l'Est de ce dernier, il est possible d'observer les sommets des Aiguilles Rouges d'Arolla, la Pointe de Vouasson et le Pic d'Artsinol .

La feuille Rosablanche (figure IV.2) se caractérise par une altitude moyenne d'environ 2400 mètres qui est suffisamment élevée pour que ces environnements aient une connotation essentiellement glaciaire et périglaciaire. Quelques glaciers existent effectivement dans ce secteur (par exemple les glaciers du Mont Fort, des Etagnes, du Prafleuri, etc.), ainsi que quelques petits glacierets qui résistent dans les versants exposés au Nord. Parmi les formes périglaciaires visibles dans la zone d'étude, il est important de rappeler les nombreux glaciers rocheux intacts présents dans les vallons. Un aperçu de l'inventaire des glaciers rocheux de la région sera présenté par la suite (cf. 5.2.2.11).

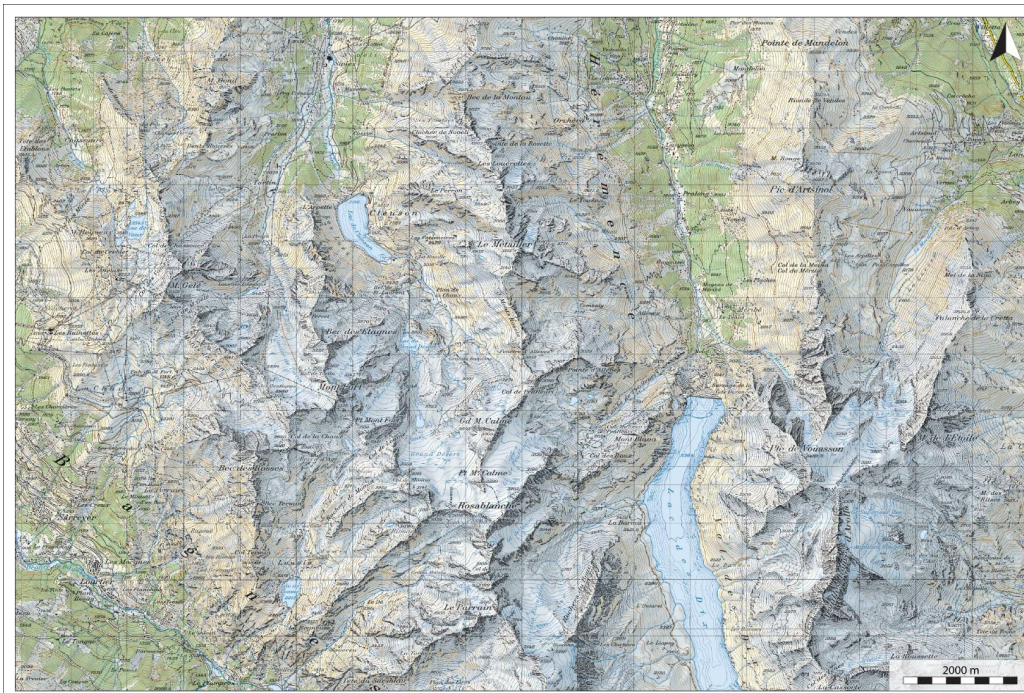
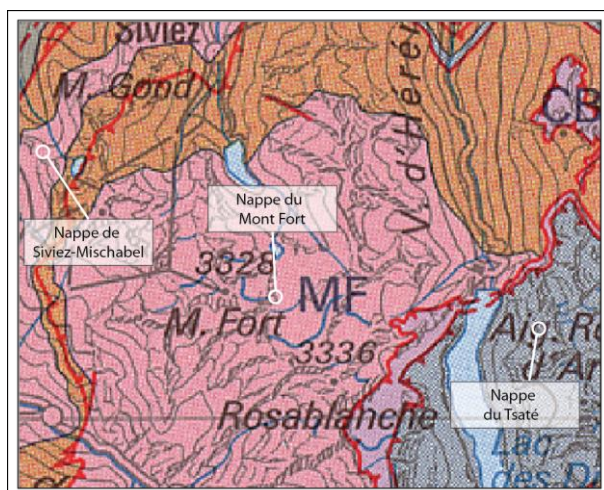


Figure IV.2 : aperçu de la carte topographique (Swisstopo).

Figure IV.3 : aperçu de la carte géologique couvrant la zone d'étude (Swisstopo).



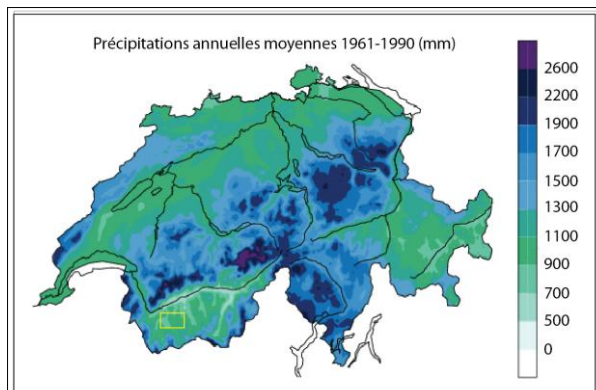
Concernant son contexte géologique (figure IV.3), la région se situe principalement dans la Nappe du Mont Fort (Pennique moyen), à l'exception de la portion de territoire localisée au Sud-Est, qui appartient à la Nappe du Tsaté. La première se caractérise, du Nord au Sud, par trois séries principales : la série du Greppon Blanc, constituée principalement de schistes siliceux, de schistes à albites, de quartzites et de

prasinites, la série des « porphyres quartzifères », qui se compose essentiellement de gneiss clairs et massifs et la série de Métailler formée de gneiss et de schistes (SARTORI ET AL., 2006). Cette lithologie cristalline est donc souvent impliquée par des fractures irrégulières de la roche en raison de l'action du gel et du dégel, à la base de la topographie hétérogène cités quelques lignes plus haut. L'érosion des versants se traduit par une forte présence de formations sédimentaires meubles qui résident les vallons de la région.

Dans un contexte géologique différent, dans la Nappe du Tsaté, les Aiguilles Rouge d'Arolla et la Pointe de Vouasson se situent sur la limite Est de la Nappe du Mont Fort. Les premières sont composées essentiellement de metagabbros plutôt massifs tandis que la Pointe de Vouasson est formée de calcschistes et de marbres phylliteux, communément appelés schistes lustrés (STECK ET AL., 1999).

Du point de vue climatique, la territoire couvert par la feuille Rosablanche se caractérise par un climat continental intra-alpin. L'air humide et tempéré provenant de l'Atlantique se décharge au contact avec la chaîne alpine. La région d'étude reste donc relativement assez bien abritée des précipitations par rapport au reste de la Suisse. C'est notamment le cas des perturbations provenant du Nord, alors que celles débordant du Sud sont légèrement plus importantes (ROSSIER, 2011). Météosuisse indique que les précipitations annuelles moyennes varient entre 1200 et 1500 mm/an (figure IV.4). En raison de son altitude, les précipitations qui arrosent les versants sont souvent sous forme neigeuse.

Figure IV.4 : carte des précipitations annuelles moyennes en Suisse (Météosuisse).



Quant à la température moyenne annuelle de l'air, pour la station des Attelas (2700 mètres) une valeur d'environ  $-0.9^{\circ}\text{C}$  à été calculée (cf. 5.2.2.2). La MAAT peut cependant subir des variations locales en raison d'une inversion thermique dans les fonds des vallées.

## 4.2.2 Sites d'intérêt particulier

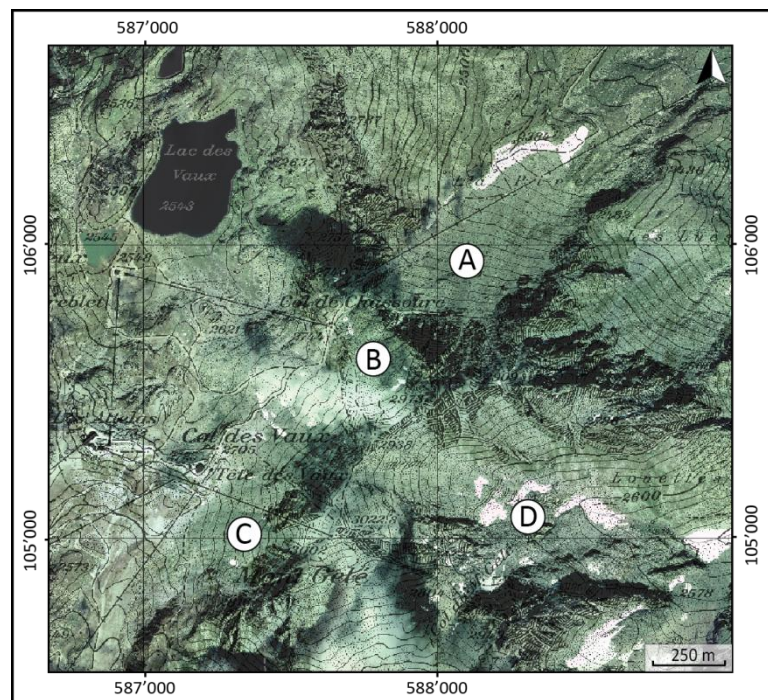
Afin de permettre une meilleure analyse de la carte, des secteurs d'intérêt majeur sont présentés dans la suite de ce chapitre. Comme le modèle est conçu sur la base de données existantes et qu'il permet de simuler la répartition du pergélisol alpin à des endroits où la présence de permafrost est inconnue, le choix de régions d'analyses contenant les deux cas de figure est essentiel. De plus, la sélection doit aussi être dictée par la disponibilité d'autres modèles couvrant les mêmes surfaces, notamment la carte de l'OFEV (2005). Enfin, il est important que les sites d'intérêt permettent de prendre en compte le plus vaste nombre de morphologies possibles afin de vérifier la validité du modèle sur plusieurs types de terrains et d'obtenir des résultats satisfaisants sur la question de l'occurrence d'un sol gelé en permanence. Une description rapide de ces sites est rapidement présentée ci-dessous. Néanmoins, plus de détails seront proposés dans le chapitre abordant la procédure de traitement des variables prises en compte, en présentant des images mettant en évidence chaque secteur. Il est important de préciser qu'il s'agit d'une description issue de l'analyse d'orthophotos et qu'aucun travail de cartographie sur le terrain n'a malheureusement été effectué.

### 4.2.2.1 Secteur des versants entourant le Mont Gelé

Ce secteur a été étudié à plusieurs reprises et il est le véritable laboratoire naturel qui a fourni la plupart des données nécessaires à la mise en place de la modélisation. Parmi les formes périglaciaires les plus importantes, il est nécessaire de rappeler les éboulis des Lapires (*figure IV.5:A*), les trois lobes fluants du Lac des Vaux (*figure IV.5:B*), l'éboulis des Attelas (*figure IV.5:C*), ainsi que l'important complexe de glaciers rocheux des Yettes Condja (*figure IV.5:D*). L'intérêt de cette région résulte aussi de la forte composante anthropique qui la caractérise, avec la présence des remontées mécaniques de la station de ski de Verbier-Nendaz.

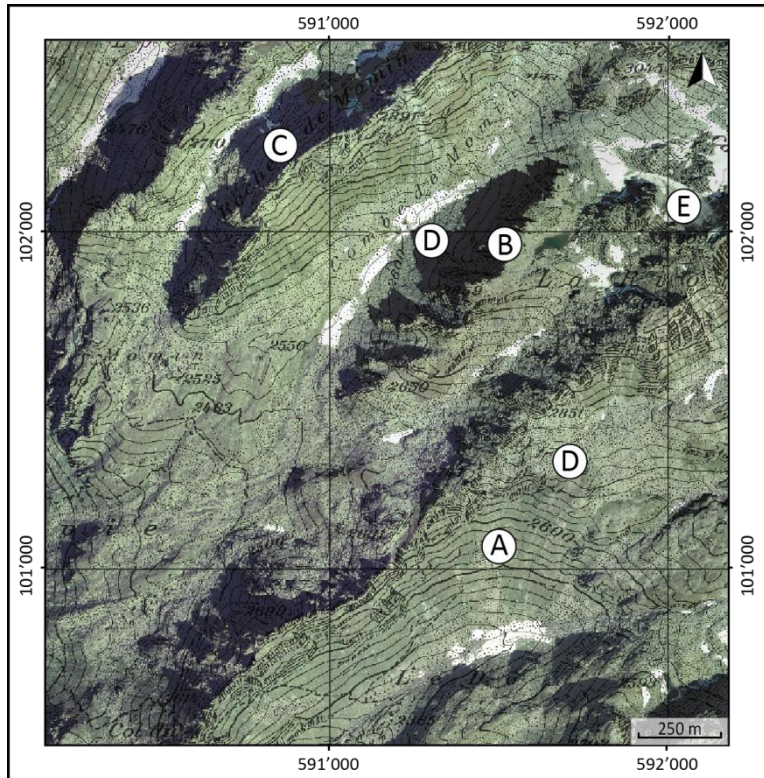
Les motivations à la base du choix du secteur sont la présence de nombreuses formes périglaciaires, de surfaces à couverture minérale très répandues, la disponibilité de données exploitable et la possible comparaison entre le modèle produit dans le cadre de cette recherche et celui de l'OFEV (*cf. 3.2.2.1*).

Figure IV.5 : le secteur du Mont Gelé (fond de carte : Swisstopo).



#### 4.2.2.2 Secteur de la combe de Momin

Figure IV.6 : le secteur de la Combe du Momin (fond de carte : Swisstopo).



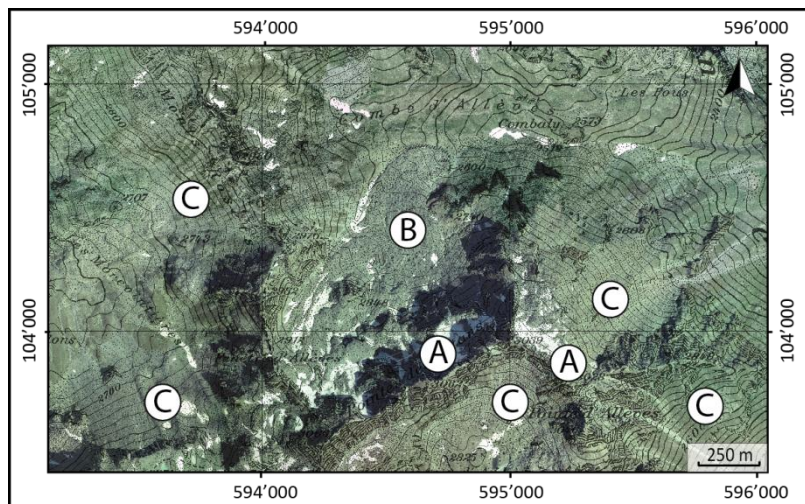
Localisé dans la partie méridionale de la feuille Rosablanche, en amont du vallon de Louvie, ce secteur se caractérise par des versants à pente régulière (figure IV.6:A), ainsi que par des parois rocheuses (figure IV.6:B) en-dessous desquelles il est possible

d'observer plusieurs éboulis de taille réduite (figure IV.6:C) par rapport aux éboulis des Lapires et des Attelas. De plus, le site se caractérise par la présence de quelques glaciers rocheux intacts (figure IV.6:D) et glacierets de pied de pente (figure IV.6:E).

Les motivations à la base du choix du secteur sont la présence de surfaces à couverture végétale très répandues, une topographie homogène, ainsi que la présence de glacierets et d'une marge proglaciaire, de parois rocheuses et de petits éboulis.

#### 4.2.2.3 Secteur de la Pointe et de la Combe d'Allèves

Cette portion de territoire est particulièrement intéressante car les versants se répartissent sur les quatre orientations principales et une grande richesse de formes géomorphologiques typiques du domaine glaciaire et périglaciaire sont présentes. Des petits glacierets (figure IV.7:A) aux pieds des parois rocheuses exposées au Nord, en



amont d'un énorme complexe de glaciers rocheux (figure IV.7:B) sont en effet reconnaissables. Exposés au Sud, à l'Est et à l'Ouest, des éboulis à pente régulière sont par ailleurs observables (figure IV.7:C).

Les motivations à la base du choix du secteur sont des morphologies très variées et riches en formes glaciaires et périglaciaires, une topographie homogène et des versants exposés selon plusieurs orientations.

Figure IV.7 : le secteur de la Combe et de la Pointe d'Allèves (fond de carte : Swisstopo).

#### 4.2.2.4 Secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du Glacier des Tsauderys

A l'Ouest des Aiguilles Rouges d'Arolla, le secteur se caractérise par des versants avec une forte composante minérale. Il a été sélectionné comme site d'intérêt particulier car il se situe dans la Nappe du Tsaté et qu'aucun glacier rocheux n'est présent dans l'inventaire des glaciers rocheux que utilisé pour la modélisation. Par ailleurs, il sera intéressant d'analyser comment le modèle prédira les éboulis caractérisés par de nombreuses loupes de solifluxion et qui se localisent à l'Ouest de cette zone (figure IV.8:A), ainsi que les macroformes lobées qui sont situées dans le cirque du glacier de Darbonneire (figure IV.8:B).

Les motivations à la base du choix sont l'absence de données exploitables pour ce site, qui se révèle donc un bon exemple de vérification du modèle, et une situation géologique et tectonique différente par rapport aux sites précédents.

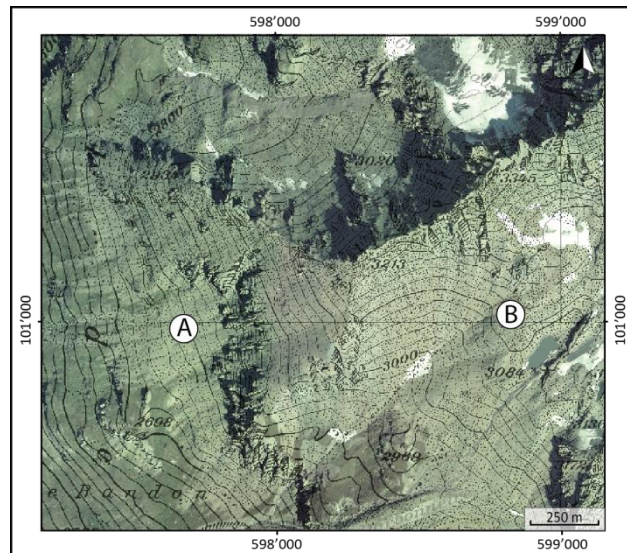


Figure IV.8 : secteur des glaciers de Darbonneire et des Tsauderys (fond de carte : Swisstopo).

#### 4.2.2.5 Secteur du Mont Rouge et du Pic d'Artsinol

Localisé en rive droite du Val des Dix, ce secteur est fortement végétalisé à l'exception des terrains se situant directement en dessous des parois rocheuses du Mont Rouge et du Pic d'Artsinol (figure IV.9:A). Dans une lithologie schisteuse, des formes de reptation lobées sont visibles et ressemblent à première vue à des protalus ramparts et des glaciers rocheux (figure IV.9:B). Comme dans l'exemple précédent, ces structures ne sont pas contenues dans un inventaire et permettent ainsi une calibration de la simulation. Or, il est intéressant d'observer comment ces grandes formes sont modélisées dans le résultat final de répartition du pergélisol.

Les motivations à la base du choix sont l'absence de données exploitables qui rend le secteur un site de vérification du modèle, un scénario tectonique différent par rapport aux sites précédents, des formes périglaciaires évidentes et des morphologies hétérogènes.

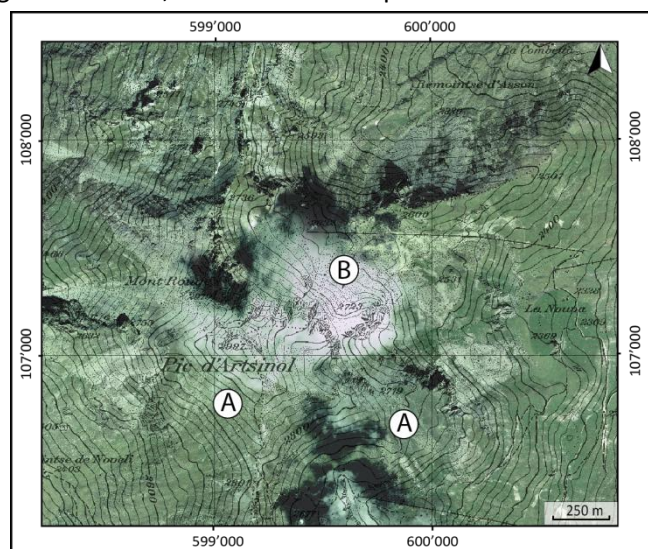


Figure IV.9 : le secteur du Pic d'Artsinol (fond de carte : Swisstopo).

## 4.3 LES MÉTHODES UTILISÉES

La méthode choisies dans le cadre de cette recherche utilise une approche différente par rapport aux modélisations existantes (cf. 3.2). Elle s'inscrit dans le domaine de l'apprentissage automatique, mieux connu sous sa dénomination anglaise de « machine learning », qui a vécu un développement significatif au cours des dernières décennies. L'application de ces techniques dans le domaine des sciences de l'environnement n'a eu lieu que tardivement par rapport à leur développement. En effet, les modélisations spatiales de phénomènes naturels par le biais de l'interpolation de géodonnées spatiales ou de l'utilisation de la télédétection pour la classification de surfaces spécifiques ont principalement été réalisées pendant les deux dernières décennies (KANEVSKI & MAIGNAN, 2004).

### 4.3.1 L'apprentissage automatique

Souvent identifié comme un sous-domaine de l'informatique et de l'intelligence artificielle, KANEVSKI *ET AL.* (2009) indiquent que l'apprentissage automatique comprend toute technique dont les caractéristiques les plus récurrentes du jeu de données sont « apprises » automatiquement sur la base de méthodes statistiques. Ceci permet de prédire un phénomène à partir d'exemples étudiés et connus à priori. Les méthodes développées dans ce cadre ont été conçues afin de permettre une prédiction automatique qui est pilotée uniquement par les dépendances existantes dans les données, et ne nécessite pas l'introduction des connaissances humaines. Aucune paramétrisation manuelle n'est donc nécessaire, ce qui limite l'influence de la subjectivité du modélisateur dans le résultat.

L'apprentissage automatique est subdivisé en deux catégories principales : les techniques se caractérisant par un apprentissage dit « supervisé » (« supervised learning ») et les techniques pour lesquelles l'apprentissage est « non supervisé » (« unsupervised learning »).

La première catégorie se caractérise par un processus d'apprentissage qui est guidé par l'opérateur tout le long de la procédure d'entraînement de la machine. Les relations entre les informations d'entrée et de sortie (inputs et outputs) sont fournies à l'ordinateur par l'utilisateur à partir d'un jeu de données d'entraînement (« training dataset »). Ensuite, la paramétrisation du modèle s'effectue à l'aide d'un jeu de données supplémentaire, appelé jeu de « test ». La vérification du modèle est réalisée à l'aide d'un troisième jeu de données, dit de « validation ».

Les données d'entraînement sont décrites par un vecteur  $x$  appartenant à  $\mathbb{R}^N$ . Il s'agit d'un input qui a une relation connue avec un output  $y$ . Chaque valeur d'entrée peut être représentée comme un vecteur dans un espace  $N$ -dimensionnel, où  $N$  correspond au nombre de variables considérées. La valeur  $y$  varie selon la problématique. Dans le cadre



des problèmes de régression,  $y$  correspond à une valeur réelle ( $y \in \mathbb{R}$ ). Dans le cadre d'un problème de classification, la valeur d'output est une valeur discrète qui résulte d'une classification binaire, avec  $y \in (-1 ; 1)$ , ou d'une classification à plusieurs classes, avec  $y \in (1 ; 2 ; 3 ; \dots ; m)$ . La machine d'apprentissage a pour objectif de construire une fonction  $y = f(x)$  sur la base des relations  $[(x_1, y_1); \dots ; (x_k, y_k)]$  apprises à partir des  $k$  exemples d'entraînement.

La deuxième approche d'apprentissage est dite non supervisée car aucune information d'output  $y$  n'est fournie à la machine. Elle doit donc apprendre par elle-même les relations existantes entre les données d'input et d'output. Une des méthodes connues d'apprentissage non supervisé est l'analyse par clusters. Il s'agit de grouper les données selon leurs caractéristiques similaires, sans connaître la vraie nature de chaque exemple (KANEVSKI ET AL., 2009).

Des méthodes intégrant les deux types d'apprentissage ont été aussi développées. Dans la littérature, elles sont généralement connues sous le nom de « techniques hybrides d'apprentissage semi-supervisé » (CHAPELLE, 2006).

Comme l'objectif principal de ce travail de mémoire est la détermination de la présence ou l'absence potentielle de pergélisol dans la région d'étude (cf. 4.1), il apparaît qu'il s'agit d'un problème de classification binaire. Parmi les méthodes les plus efficaces pour ce type de problématique, il est important de citer celles des machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge, mieux connues sous leur dénomination anglaise de *Support vector machines (SVM)*. Dans le domaine des techniques d'apprentissage automatique, elles font appel à des « méthodes à noyaux », ou « *kernel methods* » dans le jargon, dont les caractéristiques seront présentées par la suite. Ce type de méthode *supervisée* doit ses origines à la théorie de l'apprentissage statistique aussi connue comme la théorie de Vapnik-Chervonenkis, développée par le mathématicien soviétique Vladimir Vapnik au cours des années 1960 et 1970 (VAPNIK, 1998). L'idée à la base de cette théorie est la formulation d'une modélisation ayant pour but de produire un résultat correspondant à un degré de complexité minimal et une exploitation maximale des informations à disposition du modélisateur (sur la base du principe du rasoir d'Ockham, cf. 2.3). Le modèle résultant de l'apprentissage supervisé se base sur une fonction d'exécution  $y = f(x)$  appelée *fonction de décision pour le problème de classification*. Elle découle du processus d'apprentissage réalisé sur la base du jeu de données d'entraînement. Cette fonction de décision est choisie parmi un ensemble de fonctions  $F = \{f(x, \alpha), \alpha \in \Lambda\}$ , où  $\alpha$  correspond au vecteur du paramètre retenu parmi l'ensemble de paramètres  $\Lambda$ . La meilleure fonction de décision correspond à celle qui permet d'aboutir à une simulation décrivant les données disponibles de la façon la plus optimale.

### 4.3.2 Les machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge

Les machines à vecteurs de support représentent une des techniques les plus efficaces et robustes en matière de classification ou de régression (KANEVSKI *ET AL.*, 2009). Avant d'adapter cette méthode à la problématique de cette recherche, quelques précisions sont nécessaires. Un lexique récapitulant les notions principales est présenté en annexe (*Annexe II*).

#### 4.3.2.1 Hyperplans de séparation optimaux

Pour toute problématique qui requiert de diviser deux catégories d'objets à l'aide d'une frontière discriminante, la façon la plus intuitive de procéder est de tracer une ligne de séparation entre les deux groupes. C'est exactement sur ce principe que les SVM sont développés. Plus généralement, dans un espace  $N$ -dimensionnel, cette ligne correspond à un hyperplan  $f(x) = wx + b$ . Le vecteur d'entrée  $x$  de dimension  $N \in \mathbb{R}^N$  est multiplié par un vecteur  $w$ , permettant de donner un poids spécifique à  $x$ . La fonction est en plus optimisée par l'ajout d'un scalaire  $b$ .

Dans un espace à deux dimensions, c'est-à-dire lorsque seulement deux variables  $x_1$  et  $x_2$  permettent de décrire les données, cette fonction fournit l'équation d'un plan de coordonnées  $(f(x), x_1, x_2)$ . Si un plan horizontal séparant linéairement les données est défini à la hauteur de la courbe  $f(x) = 0$  et si ces vecteurs suivent le signe de la fonction  $f(x)$ , alors les données seront affectées soit dans la classe positive lorsqu'elles sont localisées au-dessus du plan horizontal  $f(x) = 0$ , soit dans la classe négative si elles se situent au-dessous.

Par soucis de simplification un exemple simple concernant la répartition du pergélisol est proposé. Après avoir divisé l'espace de coordonnées  $X$  et  $Y$  en une grille régulière se composant de pixels, à chacun de ces derniers des valeurs numériques correspondant à plusieurs variables ont été attribuées. Ces valeurs sont regroupées dans un jeu de données, c'est-à-dire une matrice contenant toutes les informations disponibles. Le jeu de données est généralement divisé en plusieurs parties qui sont exploitées de plusieurs manières (*cf. 4.3.9*). La détermination de l'hyperplan se fait généralement à l'aide d'une de ces portions du jeu de données : *le jeu de données d'entraînement*, qui contient des exemples permettant d'entraîner la machine et reconnaître les relation entre les variables et le phénomène étudié.

Dans un premier exemple (*figure IV.10:A*), il est nécessaire de accepter que le pergélisol est en relation uniquement avec deux variables, telles que par exemple l'altitude et l'orientation. La distribution des points permet de grouper les pixels en deux catégories qui représentent la présence et l'absence de pergélisol. La façon la plus simple de délimiter ces deux catégories d'objets et une limite linéaire.

Dans un deuxième cas (*figure IV.10:B*) une troisième variable peut s'ajouter (la radiation solaire directe). La distribution des exemples se développe donc dans un espace à trois

dimensions et la limite linéaire entre la présence et l'absence de pergélisol s'effectue à l'aide d'un plan et non plus d'une ligne rectiligne.

Lorsque des N variables supplémentaires sont incluses dans le jeu de données, l'espace aura N dimensions et la division linéaire des deux catégories nécessitera d'un hyperplan.

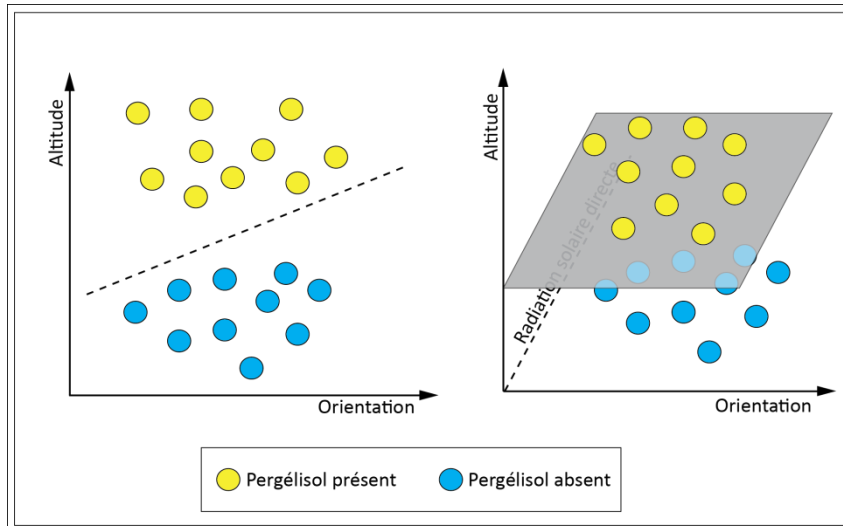


Figure IV.10: la limite linéaire entre deux groupes de données dans un espace N-dimensionnel (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

La conception d'un hyperplan optimal qui sépare linéairement les deux classes de données nécessite la définition à priori de quelques conditions. Pour le jeu de données d'entraînement, les valeurs de la fonction de décision  $f(x)$  doivent respecter les relations suivantes :

$$\begin{aligned} wx_i + b &\geq 1, & \text{si } y_i &= 1 \\ wx_i + b &\leq -1, & \text{si } y_i &= -1 \end{aligned}$$

Une valeur positive ( $y_i = 1$ ) correspond à une fonction de décision strictement supérieure ou égale à 1, tandis qu'une valeur négative ( $y_i = -1$ ) doit être attribuée lorsque la fonction est inférieure ou égale à -1. Les deux conditions peuvent être regroupées dans la formulation suivante :

$$y_i(wx_i + b) \geq 1$$

Cette expression indique qu'aucun vecteur d'entraînement ne devrait se situer dans la région où l'hyperplan vaut une valeur comprise entre  $[-1; +1]$ . Seuls quelques points correspondent exactement à la valeur de +1 ou -1. Ils sont appelés vecteurs de support (SV) et la région correspondant à l'intervalle  $[(f(x) = 1); (f(x) = -1)]$  est appelée « marge de largeur  $\rho$  » (figure IV.11). En outre, la limite permettant de définir les deux classes devient l'hyperplan  $f(x) = wx + b = 0$ .

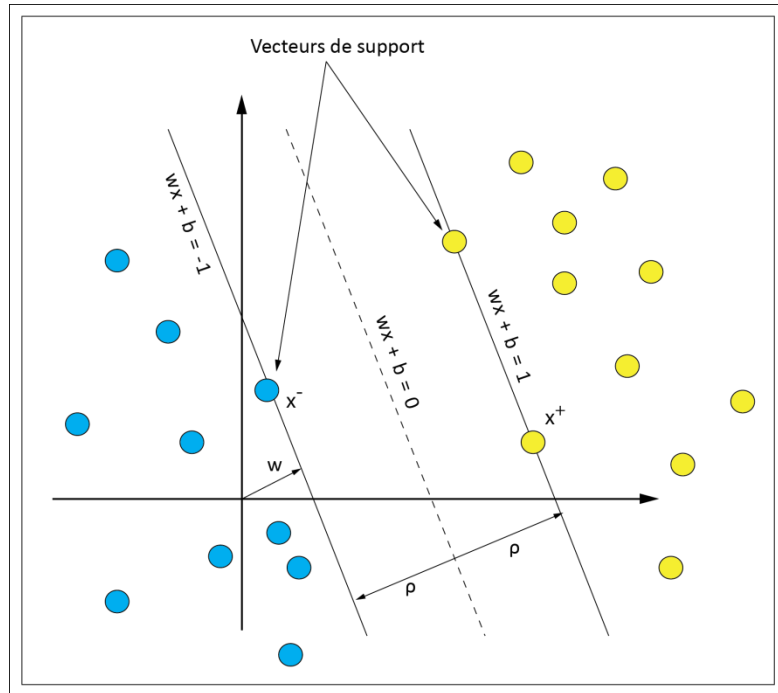


Figure IV.11 : classification de deux groupes d'objet par une marge de largeur  $\rho$  à l'aide de vecteurs de support (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

L'objectif de ces techniques d'apprentissage est la généralisation des règles apprises à partir des données d'entraînement et leur application à des situations où de nouveaux cas doivent être classés. Pour trouver la solution optimale, il s'agit de maximiser la largeur de la marge afin que le plus d'échantillons possibles soient classés correctement. Le figure IV.12, qui représente l'exemple vu précédemment concernant la répartition du pergélisol, montre deux marges de séparation. Dans l'image de gauche, la largeur n'est pas optimisée (figure IV.12:A). Elle a été toutefois maximisée pour les échantillons présentés dans la figure de droite (figure IV.12:B).

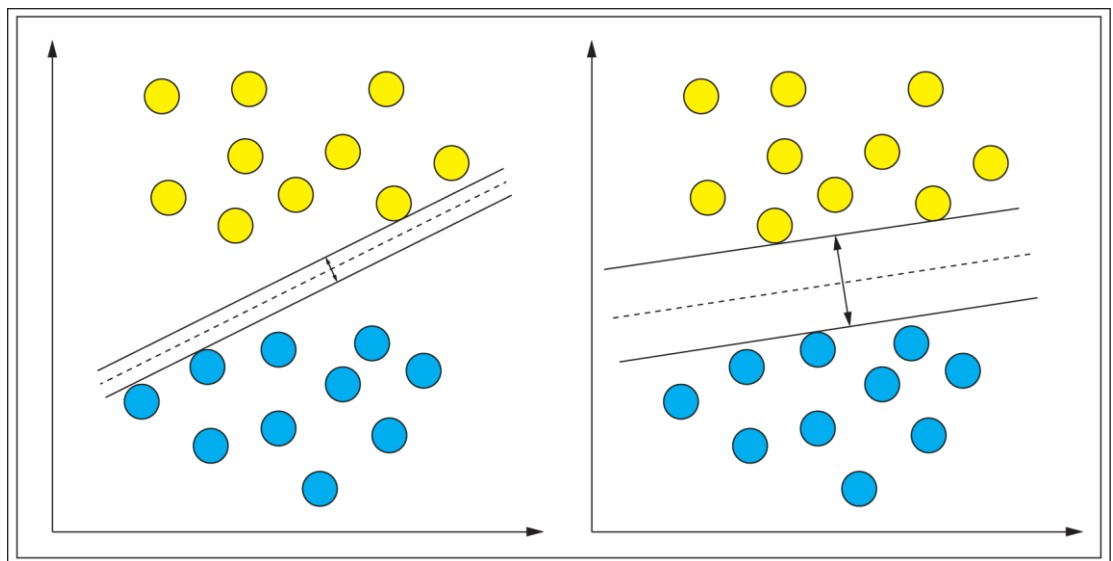


Figure IV.12 : maximisation de la marge linéaire de classification binaire, (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

Le calcul de la largeur de la marge  $\rho$  se définit comme suit :

$$\rho = \frac{w}{\|w\|} (x^+ - x^-) = \frac{wx^+ - wx^-}{\|w\|} = \frac{(1-b) - (-1-b)}{\|w\|} = \frac{2}{\|w\|}$$

où  $w$  est le vecteur définissant l'hyperplan,  $x^+$  et  $x^-$  sont les vecteurs de support positif et négatif qui contribuent à la définition d'une marge optimale. L'objectif, selon les critères proposés dans la théorie de l'apprentissage automatique de VAPNIK (1998), est de minimiser  $\|w\|$ . En effet, l'auteur explique que la complexité  $h$  d'un jeu de fonctions est déterminée par :

$$h \leq \min(R^2 \|w\|^2, N) + 1$$

où  $R$  est le rayon de la plus petite sphère englobant tous les vecteurs d'entraînement appartenant à  $\mathbb{R}^N$ . Par conséquent, une grande marge implique un petit  $\|w\|$  et contribue à rendre le modèle pertinent et efficace.

#### 4.3.2.2 Le problème d'optimisation de la largeur $\rho$

L'optimisation de la largeur  $\rho$  de la marge est le résultat d'un processus d'entraînement de la machine. Les SVM fournissent un algorithme qui permet de maximiser la marge, tout en respectant les contraintes présentées précédemment. Sur la base du paradigme d'optimisation sous contraintes proposé par Lagrange à la fin du 18ème siècle, et des améliorations développées au cours des années 1950 par Kuhn et Tucker, il est possible de résoudre facilement cette problématique (KANEVSKI ET AL., 2009). Tout d'abord, il est nécessaire d'introduire des multiplicateurs de Lagrange  $\alpha_i \geq 0$  associés aux valeurs d'entraînement  $i$  afin d'exprimer la formule en terme de premier algorithme d'optimisation, appelé généralement *premier problème d'optimisation* ou *algorithme proximal primal* :

$$L_P = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i (w x_i + b) + \sum_{i=1}^L \alpha_i$$

En vue de trouver la marge maximale (ou la valeur de  $\|w\|$  minimal), la tâche principale consiste à minimiser l'algorithme proximal primal par rapport à  $w$  et  $b$ . En raison de la convexité de la fonction  $L_P$ , ceci est rendu possible par la recherche des valeurs pour lesquelles les produits dérivés associés disparaissent :

$$\frac{\partial L_P(w, b, \alpha)}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial L_P(w, b, \alpha)}{\partial w} = 0$$

Les résultats obtenus sont alors :

$$\sum_{i=1}^L \alpha_i y_i = 0, \quad w = \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i x_i$$

Ils peuvent être substitués dans l'équation de l'algorithme proximal primal afin d'obtenir l'*algorithme proximal dual* (ou deuxième problème d'optimisation) :

$$L_D \sum_{i=1}^L \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^L \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j$$

A ce stade, il est possible de trouver les paramètres  $\alpha_i$  en maximisant  $L_D$ , tout en tenant compte du fait que les valeurs  $\alpha_i$  sont soumises aux contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^L \alpha_i y_i = 0$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, L$$

La solution du problème d'optimisation permet de formuler la *fonction de décision finale du séparateur à vaste marge* :

$$f(x) = \sum_{i=1}^L \alpha_i y_i x x_i + b$$

L'étiquette de la classe prédite (+1 ou -1) est simplement attribuée en fonction du signe de cette expression car il s'agit d'une tâche de classification binaire. Si les vecteurs d'entrée appartiennent à plus de deux classes, la solution peut être trouvée en combinant plusieurs classificateurs binaires. Les différentes approches existant pour résoudre ce type de problème ne seront pas développées dans ce document, mais sont présentées dans VAPNIK (1998) et CRISTIANINI ET AL. (2000).

#### 4.3.2.3 Vecteurs de support et leur pertinence

Le processus d'entraînement du séparateur à vaste marge fournit donc les valeurs de  $\alpha_i$ . Ce coefficient représente le poids que l'algorithme attribue à chaque vecteur d'entraînement  $x_i$ . Cependant, une valeur différente de zéro est attribuée uniquement à une petite portion de ces derniers, ce qui signifie que seule une partie du jeu de données d'entraînement influence la fonction de décision. Ces vecteurs correspondent aux vecteurs de support décrits précédemment. Comme indiqué sur la *figure IV.11*, ils se localisent sur la marge positive ou négative.

Pour les vecteurs de support, l'expression  $y_i(w x_i + b) \geq 1$  devient  $y_i(w x_i + b) = 1$ . Cela implique que seul ce petit échantillon de données est nécessaire pour la classification, et que les autres données du jeu d'entraînement ne sont pas exploitées.

#### 4.3.2.4 La marge de classification « molle »

La *figure IV.11* présentée précédemment met en évidence un cas dans lequel les deux classes d'objets sont séparées linéairement. Ces deux catégories ne se chevauchent pas et la limite de classe correspond à l'hyperplan. Il s'agit pourtant d'un exemple exceptionnel d'une situation qui ne se présente que rarement. Dans la majorité des cas, les jeux de données d'entraînement contiennent du bruit. Ce dernier doit être pris en compte pour tracer une limite de classification optimale.

La présence de bruit exige une formulation différente de la marge de classification. L'introduction d'une marge « souple » par le biais de variables d'écart  $\xi_i$  est ainsi nécessaire. Intuitivement, il s'agit de prendre en compte les données du jeu d'entraînement qui s'écartent de la solution retenue, c'est-à-dire qui se situent en dehors de la courbe  $+1$  ou  $-1$ , et de les intégrer dans l'expression suivante :

$$y_i(wy_i + b) \geq 1 - \xi_i$$

De cette manière, les vecteurs positifs (ou négatifs) peuvent être associés à une fonction de décision qui ne doit pas être strictement supérieure (ou inférieure) à  $+1$  (ou  $-1$ ). Un échantillon qui se situe du mauvais côté de la limite de décision  $wx + b = 0$  pourra être classé dans la bonne catégorie s'il est associé à  $\xi_i > 1$ . La *figure IV.13* indique le rôle des variables d'écart  $\xi_i$  dans la classification.

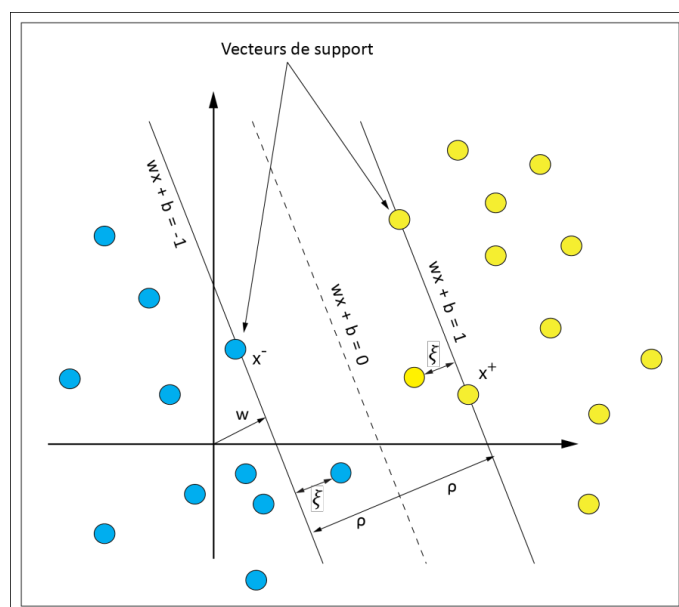


Figure IV.13 : l'introduction de variables d'écart permettant la classification pour un jeu de données bruité ou contenant des valeurs extrêmes (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

Dans le but de maintenir une faible erreur empirique, il est indispensable que l'algorithme assigne des valeurs non nulles de  $\xi_i$  à un minimum de données d'entraînement possible. La fonction initiale qui doit être minimisée prendra donc la forme suivante :

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^L \xi_i$$

Autant le terme de gauche que le terme de droite doivent être minimisés. Le nouveau terme  $C \cdot \sum_{i=1}^L \xi_i$  permet d'évaluer la pertinence des erreurs de classification du jeu de données d'entraînement qui sont strictement liées au bruit. La constante  $C$  correspond au poids que le modélisateur attribue à l'erreur. Une valeur significative de  $C$  implique la conviction que le jeu de données ne contient pas de bruit. Cela se traduit par une très faible erreur d'entraînement.

En résumé,  $\frac{1}{2} \|w\|^2$  permet l'optimisation de la marge séparant les deux classes de données d'exemple, tandis que le deuxième terme de l'expression permet de contrôler l'erreur empirique contenue dans le jeu de données, ainsi que de maîtriser la complexité du modèle par le biais de la constante  $C$ . La fonction complète qui regroupe ces deux termes a ainsi pour but de gérer et exprimer le risque accepté d'erreur de classification.

### 4.3.3 Intégration d'une fonction noyau

Sur la base des notions explicitées jusqu'à présent dans ce travail, il apparaît qu'une fonction de décision linéaire se révèle satisfaisante lorsque il est nécessaire d'attribuer des échantillons à deux classes binaires (+1 et -1 dans le précédent exemple). Cependant, lorsque les relations entre les données d'entrée et de sortie ne sont pas linéaires, l'utilisation d'une autre méthode de discrimination des deux classes est nécessaire.

Cette nouvelle approche est basée sur la représentation des données dans un espace de dimensions supérieures à celui de départ, permettant de séparer les échantillons de façon linéaire, plutôt que d'extrapoler une fonction de décision trop complexe nécessitant des calculs laborieux.

Dans ce cas, la fonction de décision s'exprime de la manière suivante :

$$f(x) = \sum_{i=1}^L y_i \alpha_i x x_i + b$$

Elle correspond au produit du vecteur d'entrée d'un nouvel exemple  $x$  et de tous les autres échantillons du jeu de données  $x_i$ . Ce produit peut être substitué par une fonction noyau  $K(\cdot, \cdot)$  qui tient compte des deux mêmes vecteurs. Ceci permet de reformuler la fonction de décision de la méthode des séparateurs à vaste marge comme suit :

$$f(x) = \sum_{i=1}^L y_i \alpha_i K(x, x_i) + b$$



L'utilisation de cette fonction noyau, connue sous le nom d'astuce du noyau ou Kernel trick dans le domaine de l'apprentissage automatique, augmente la dimension de l'espace de façon implicite.

Le produit scalaire  $x \cdot x_i$  ayant la même signification dans un espace de plus grande dimension, il est possible d'appliquer l'astuce suivante :

$$x \cdot x_i \mapsto \phi(x) \cdot \phi(x_i) = K(x, x_i)$$

La *figure IV.14* met en évidence comment l'astuce du noyau permet de passer d'un problème complexe non linéaire à un problème linéaire plus simple dans une dimension supérieure. Dans l'image de gauche, les deux classes d'objets ne sont effectivement pas séparables par une ligne ou un plan linéaire. L'emploi d'une fonction noyau permet la discrimination linéaire dans un espace de plus grande dimension, appelé aussi *espace de redescription*, dans lequel un hyperplan peut être défini. Une classification binaire simple est dans ce cas envisageable.

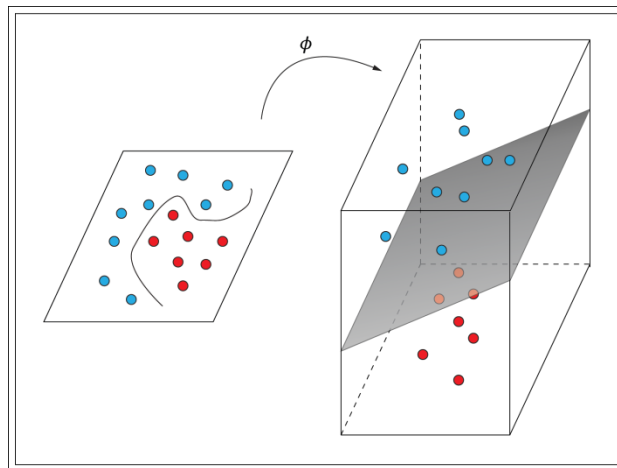


Figure IV.14 : aperçu du changement  $N$ -dimensionnel produit par l'astuce du noyau, permettant de passer d'un espace réel à un espace de redescription (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

### 4.3.8 Les fonctions noyau

Dans le cadre des machines à vecteurs de support, KANEVSKI ET AL. (2009) expliquent que plusieurs fonctions noyau peuvent être employées. Les fonctions les plus connues sont :

- Le noyau linéaire :  $K(x, x_i) = x \cdot x_i$   
Dans ce cas, l'astuce du noyau n'est pas utilisée. Le noyau linéaire est toutefois souvent utilisé afin de tester la complexité du problème, avant de procéder à la recherche d'une fonction de décision plus complexe.
- Le noyau polynomial :  $K(x, x_i) = (x \cdot x_i + 1)^p$ ,  $p \in \mathbb{N}$   
Il permet le changement de dimension selon le degré  $p$  choisi.
- Le *Gaussian Radial Basis Function kernel* ou noyau RBF gaussien :  $K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right)$

Cette dernière fonction noyau est celle qui est la plus souvent utilisée. Son interprétation géométrique est assez simple :  $\|x - y\|^2$  représente la distance au carré entre le vecteur  $x$  et le vecteur  $x_i$ . La distance euclidienne  $(x - y)^2$  est effectivement égale à  $\|x - y\|^2$ .

Le paramètre  $\sigma$  au dénominateur permet de contrôler la taille de la surface gaussienne centrée sur le vecteur  $x$ . Ce paramètre nécessite une optimisation afin que seuls les vecteurs d'entraînement  $x_i$  les plus proches du vecteur  $x$  contribuent à la détermination de la fonction de décision.

### 4.3.9 Le choix des paramètres et des hyperparamètres

Les paramètres qui sont à la base d'un modèle qualitativement acceptable sont normalement choisis par le biais d'une procédure de validation croisée. Cette étape nécessite la division du jeu de données en deux parties : la première composée de vecteurs d'entraînement et la deuxième, de taille plus réduite, contenant les vecteurs restants. La séparation est effectuée de manière aléatoire. Par un processus itératif, la prédiction des exemples d'entraînement fournis à la machine est effectuée en augmentant progressivement le nombre de vecteurs pris en compte. Les résultats sont ensuite comparés avec les valeurs réelles. La démarche continue jusqu'au moment où aucun vecteur d'entraînement supplémentaire ne peut être ajouté. Sur cette base, la même procédure est effectuée avec le deuxième jeu de données.

Cette démarche nécessite d'une importante puissance de calcul lorsque la taille du jeu de données est conséquente. Parfois, il est nécessaire d'adopter une approche moins coûteuse en termes de calculs, en divisant le jeu de données d'entraînement en deux parties supplémentaires. Dans le jargon, le jeu de données se divise donc habituellement en trois groupes de données que l'on appelle *d'entraînement*, *de test* et *de validation*. Il est effectivement crucial d'utiliser des jeux de données différents pour les différentes étapes de la méthode : le calcul du poids  $\alpha$  de chaque variable, le calcul du  $C$  et du  $\sigma$  optimaux et l'efficacité du modèle.

Le jeu de données d'entraînement est tout d'abord utilisé pour la détermination des poids  $\alpha$  et par conséquent la reconnaissance des vecteurs de support. Le jeu de test est ensuite employé pour optimiser les hyperparamètres propres à la méthode. Enfin, il s'agit d'utiliser les valeurs du jeu de validation afin d'évaluer le modèle à l'aide des différentes approches qui seront présentées par la suite (cf. 4.3.10).

En plus de diminuer les ressources nécessaires pour obtenir les paramètres optimaux, cette division des données permet aussi de ne pas aboutir à un résultat trop complexe contenant trop d'erreur. Sur le principe du rasoir d'Ockham, il est nécessaire de trouver un bon compromis entre la simplicité du modèle et son erreur. L'utilisation des trois jeux de données se prête bien à la réalisation de cet objectif. Plus la complexité du modèle augmente, plus l'erreur du jeu de données d'entraînement diminue. Par contre, l'erreur du jeu de données de test se comporte de façon différente. Son erreur commence par diminuer jusqu'au moment où la complexité du modèle ne devient trop extrême. A

partir de ce moment, l'erreur reaugmente en raison de l'incertitude résultant d'une trop forte complexité. Comme indiqué à la *figure IV.15*, la meilleure modélisation ne correspond pas à la modélisation la plus complexe, mais à celle ayant la plus faible erreur (KANEVSKI, 2009). Les modèles qui n'atteignent pas ce résultat provoquent une surestimation ou une sous-estimation des valeurs à prédire.

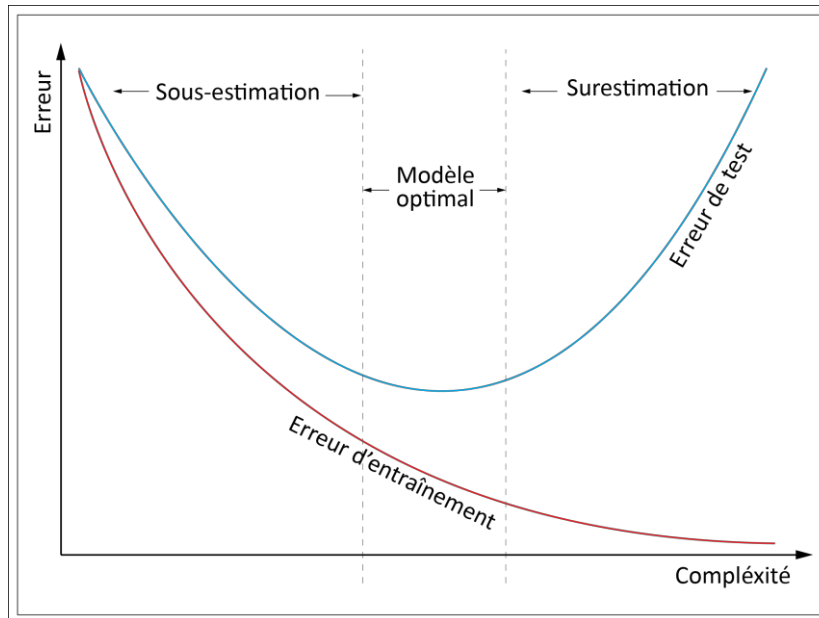


Figure IV.15: qualité d'un modèle en fonction de sa complexité et de son erreur (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

#### 4.3.10 L'évaluation quantitative d'un modèle

La classification obtenue à l'aide de l'apprentissage automatique peut être évaluée à l'aide de plusieurs méthodes. Dans le cas d'une classification binaire, quatre types de résultats sont possibles :

- *Vrai Positif* : instance positive, classifiée comme positive.
- *Faux Positif* : instance négative, classifiée comme positive.
- *Vrai Négatif* : instance négative, classifiée comme négative.
- *Faux Négatif* : instance positive, classifiée comme négative.

Sur cette base, il est possible de définir une matrice de confusion décrivant les exemples observés et prédits (*tableau IV.1*) :

		Prévisions		
		Classe « +1 »	Classe « -1 »	
Observations	Classe « +1 »	Vrai positif	Faux positif	Observé comme positif
	Classe « -1 »	Faux négatif	Vrai négatif	Observé comme négatif
		Simulé comme positif	Simulé comme négatif	Total

A partir de ces résultats, des indicateurs peuvent être développés :

Tableau IV.1: matrice de confusion des instances observées et calculées (modifié d'après KANEVSKI ET AL., 2009).

$$\text{Taux de Vrais positifs} = \frac{\text{Vrais positifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{Faux positifs}}$$

$$\text{Taux de Faux positifs} = \frac{\text{Faux négatifs}}{\text{Faux positifs} + \text{Vrais négatifs}}$$

De même, ces derniers permettent le calcul de l'efficacité du modèle, en fonction de la formule suivante :

$$\text{Précision globale} = \frac{\text{Vrais positifs} + \text{Vrais négatifs}}{\text{Total}}$$

La précision globale renseigne sur le nombre de prédictions correctes par rapport à la totalité des exemples obtenus. Cependant, cet indicateur n'est pas fiable lorsque plusieurs vrais négatifs existent par rapport au vrais positifs, car leur classification sous un étiquette de valeur « -1 » se traduira par une précision globale très importante.

Pour un modèle résultant d'une méthode de classification telle que les machines à vecteurs de support, il est par contre possible d'utiliser une évaluation graphique. Cette méthode ne produit pas uniquement une classe mais aussi un score, qui peut être utilisé comme un seuil utilisé par la suite comme un classificateur discret. A chaque fois qu'un nouvel exemple est introduit dans le système, si la valeur de cet exemple se situe en dessous de ce classificateur, il sera classé dans la catégorie négative. Dans le cas contraire, l'algorithme lui donnera une étiquette positive et un nouveau seuil sera ensuite calculé.

En faisant varier ce seuil entre sa valeur minimale et sa valeur maximale (normalement entre  $-\infty$  et  $+\infty$ ), il est possible de calculer la performance du modèle qui peut être visualisé par le biais de la courbe ROC (FAWCETT, 2006 ; HAMEL, 2009). Elle permet en effet de comparer les Taux de faux positifs (en abscisse) et les Taux de faux négatifs (en ordonnée) pour tout seuil envisageable.

La courbe ROC permet donc d'observer visuellement (*figure IV.16*) si la prédiction a produit un modèle fiable en termes de Vrai Positifs/Faux Positifs et de Vrai Négatifs/Faux Négatifs.

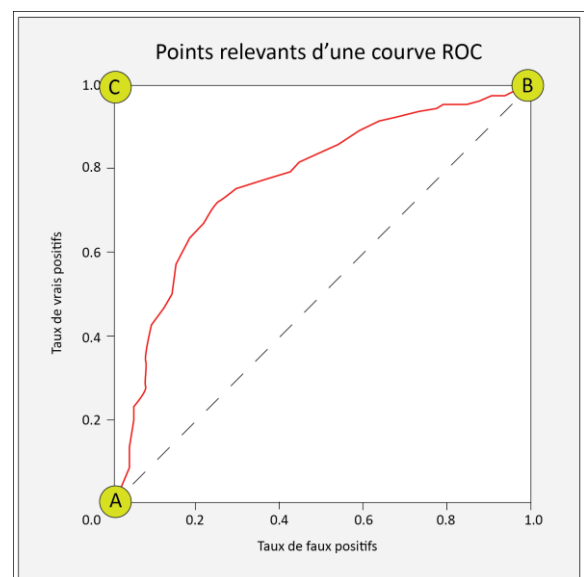


Figure IV.16 : points relevants d'une courbe ROC, mettant en relation le taux de faux positifs avec le taux de vrais positifs (modifié d'après HAMEL, 2009).

Divers cas particuliers sont à relever ::

- $(0, 0)$  le modèle prédit toujours négatif : ni de Faux, ni de Vrais positifs (*figure IV.15:A*).
- $(1, 1)$  le modèle prédit toujours positif : ni de Faux, ni de Vrais négatifs (*figure IV.15:B*).
- $(0, 1)$  : le modèle produit une classification parfaite (*figure IV.15:C*).

La qualité du modèle peut ainsi être quantifiée en fonction de la surface en-dessous de la courbe ROC (Area Under the ROC), définie sur la base de tous les seuils utilisés. Cette étape sera présentée lors de l'évaluation du modèle développé dans le chapitre qui suit (*cf. 6.1*).

### 4.3.11 La sigmoïde de transformation

Comme la fonction de décision des SVM produit une classification qui se base sur les marges  $-1$  et  $+1$ , il est difficile d'interpréter clairement le résultat car trois cas de figures peuvent se présenter. Dans le premier cas, les valeurs sont en-dessous de la courbe de valeur  $-1$  et sont donc classées dans la catégorie négative. Le deuxième cas correspond à la situation inverse, c'est-à-dire que toutes les valeurs supérieures à  $+1$  sont classées dans la catégorie positive. Il est par contre impossible de déterminer une catégorie claire pour les exemples qui, selon la fonction de décision, se situent entre les deux marges  $(]-1; +1[)$ .

PLATT (1999) propose l'utilisation de la loi de Bayes dans l'objectif d'obtenir la probabilité  $P(y = 1|f(x))$  qu'une valeur  $x$  appartienne à la classe  $+1$ . Pour plus d'informations dans la formulation de l'expression qui permet l'interprétation des résultats des SVM, il peut être intéressant de se reporter à l'ouvrage de référence. L'expression mathématique finale proposée par l'auteur se présente comme suit :

$$P(y = 1|f(x)) = \frac{1}{1 + \exp(Af(x) + B)}$$

avec les constantes A et B qui peuvent être déterminées par une méthode itérative. La distribution des valeurs peut finalement être représentée par une courbe sigmoïdale (*figure IV.17*).

Cette formule se révèle particulièrement intéressante car elle produit des résultats compris entre 0 et 1. De cette manière, les valeurs obtenues par la fonction de décision sont interprétables de manière simple sous forme de pourcentage de probabilité.

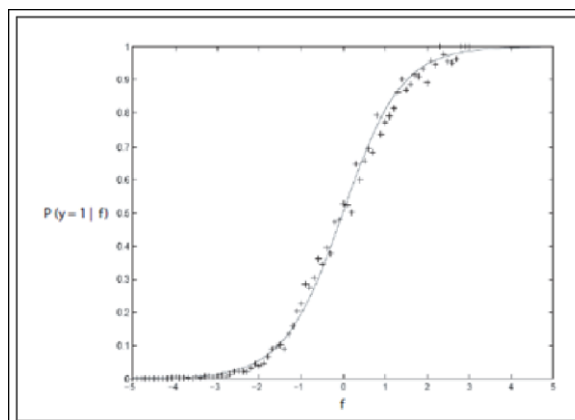


Figure IV.17 : points relevants d'une courbe ROC, mettant en relation le taux de faux positifs avec le taux de vrais positifs (modifié d'après PLATT, 1999).



## **5. MODÉLISATION DU PERGÉLISOL ALPIN À L'AIDE DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE**





## 5.1 ANNOTATIONS PRELIMINAIRES

Dans les chapitres qui suivent, les résultats de la modélisation du pergélisol alpin à l'échelle régionale seront présentés. Différents essais ont été réalisés en vue d'aboutir à un résultat répondant aux objectifs définis au début de ce travail (cf.4.1). Par soucis de simplification et de compréhension du texte, le modèle développé sera nommé « *PERB* », de « *PErmafrost - RosaBlanche* ».

Plusieurs facteurs de contrôle régissent l'absence ou la présence du pergélisol (cf. 3.1.2). Il est donc nécessaire de traduire ces informations dans un langage informatique. Dans ce sens, l'utilisation d'un SIG correspond à la solution la plus optimale. Pour cette recherche, les variables ont été extraites et visualisée avec le logiciel ArcMap 10 (de la collection ArcGIS de ESRI) pour ensuite être traitées à l'aide de MatLab en exploitant une *toolbox* gratuite pour les simulations se basant sur les Machines à vecteurs de support. MatLab et cette *toolbox* permettent en effet une puissance de calcul nettement supérieure qui rend possible l'utilisation de jeux de données de taille importante, ainsi que l'implémentation d'un code personnel adapté aux exigences de cette étude.

Comme de grandes différences existent concernant la répartition du pergélisol dans les terrains sédimentaires et dans les parois rocheuses, le modèle a été développé en suivant deux démarches différentes. Pour la première typologie de terrain une approche géostatistique avec l'utilisation des Marges à Vecteurs de Support a été testée, tandis que pour la deuxième, un modèle topoclimatique simple a été réalisé.

## 5.2 LA MODÉLISATION DU PERGÉLISOL ALPIN DANS LES TERRAINS SÉDIMENTAIRES

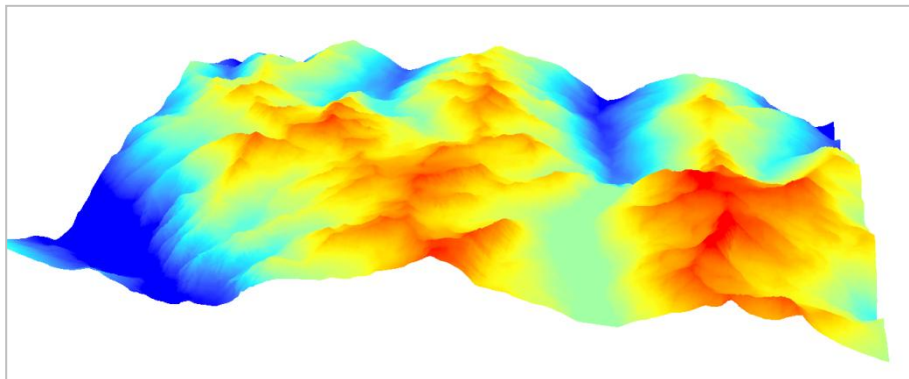
### 5.2.1 Le rôle du modèle numérique de terrain

Avant d'entrer dans les détails de la procédure de traitement des variables, un bref rappel sur la nature et le rôle d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) semble indispensable.

Dans le domaine des SIG, la plupart des données géographiques sont normalement représentées sous forme numérique à l'aide de matrices de taille considérable. Ces matrices, ou « rasters » dans le jargon, possèdent un double rôle. D'une part, elles permettent de représenter l'information dans l'espace ; de l'autre, comme elles contiennent des valeurs propres à la variable et à l'endroit considérés, elles permettent l'élaboration de calculs spatiaux.

Dans ce sens, l'espace peut être représenté numériquement par un MNT. Il correspond à une matrice dont les colonnes sont généralement les coordonnées X et les lignes les coordonnées Y. A ce couple de coordonnées, une valeur numérique décrivant l'altitude Z est attribuée. A l'aide d'un logiciel SIG, cette dernière information peut être représentée de manière visuelle (*figure V.1*).

Figure V.1 : aperçu en trois dimensions de l'information contenue dans un MNT.



Cependant, à chaque fois qu'un MNT est utilisé, il est nécessaire de développer une réflexion au sujet de la *résolution du raster*. La taille de chaque pixel peut varier et l'information qui est fournie est nécessairement liée à la résolution. Il est évident qu'un MNT qui possède une résolution de 25 mètres donne un meilleur aperçu de la topographie du relief par rapport à un MNT dont les pixels ont une taille de 100 mètres. Dans le cadre d'une modélisation d'un phénomène naturel quelconque, l'échelle géographique considérée est fortement liée à la qualité et la résolution des données à disposition. Un modèle prévu pour l'échelle des Alpes ne nécessitera pas une grande précision à petite échelle. Au contraire, un modèle qui s'intéresse à un versant, par exemple, devra décrire le mieux possible la grande échelle. Sur ces principes, l'utilisation d'un MNT adapté au contexte de l'étude est nécessaire afin d'éviter des problèmes de lissage ou au contraire de sur-précision. En effet, une étude à grande échelle donnera des résultats imprécis si un raster possédant une basse résolution est utilisé, car l'information ne n'est pas décrite localement.

Cette problématique peut aisément être mise en évidence par l'exemple très banal de trois MNT à résolution différente : un MNT25 (25 mètres), un MNT100 (100 mètres) et un MNT1000 (1 kilomètre). Les *figures V.2:A, V.2:B et V.2:C* indiquent clairement comment les informations disponibles sur la topographie d'un versant varient en fonction du raster utilisé. Les statistiques produites sur les différents MNT montrent aussi la perte d'informations consécutives à la baisse de résolution dont il sera nécessaire de tenir compte. L'altitude de chaque pixel représente la valeur qui se situe à son centre. Les bords du pixel se verront donc attribuer la même altitude, quand bien même la réalité du terrain est différente. Dans le cas d'une mauvaise résolution, une vallée qui s'étale sur un kilomètre de large, par exemple, se verra attribuer la même altitude sur ses flancs et dans le talweg si le centre du pixel se localise à ce dernier endroit.

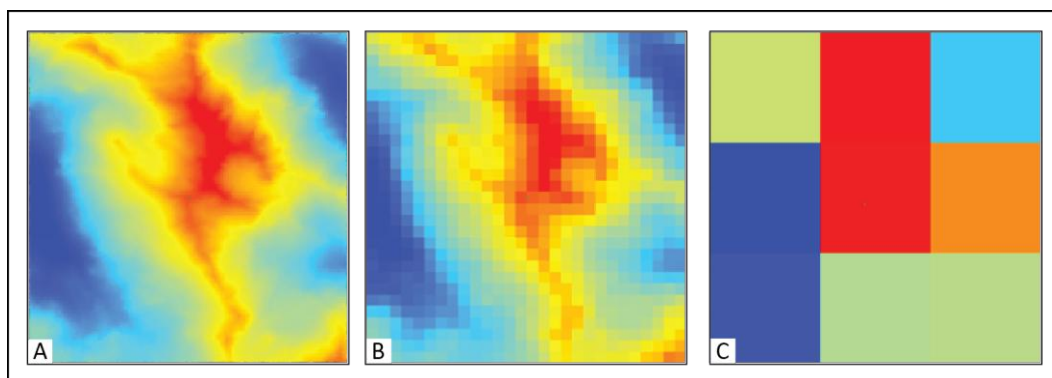


Figure V.2 : aperçu de la perte de l'information en fonction de la résolution du MNT utilisé.

Dans le cadre de la modélisation du pergélisol alpin, SALZMANN *ET AL.* (2006) ont réfléchi à cette problématique en testant plusieurs MNT lors du développement de PERMABAL. Les résultats obtenus indiquent qu'un modèle numérique d'altitude précis permet de mieux modéliser la radiation solaire directe car la microtopographie du sol est mieux prise en compte. Les auteurs ont en effet montré que dans les sites à forte complexité topographique, des problèmes de modélisation peuvent se produire si la précision des données est faible et que des variables importantes ne sont pas prises en compte correctement.

Toutefois, si la qualité de l'information est une condition importante de la modélisation de la distribution du pergélisol, il faut aussi garder à l'esprit qu'un raster de grande résolution correspond à une matrice contenant beaucoup de valeurs. Si on considère une région de 1 km<sup>2</sup> et qu'elle peut être représentée soit par un MNT<sub>25</sub> et soit par un MNT<sup>100</sup>, il y aurait à gérer 400 valeurs dans le premier cas contre seulement 100 dans le deuxième. Lorsque des analyses sur la base du MNT doivent être réalisées, il est impératif de tenir compte de la puissance de calcul nécessaire afin d'aboutir au résultat envisagé.

Dans le cadre de cette recherche, un Modèle Numérique de Terrain ayant une résolution de 25 mètres, fourni par Swisstopo, a été utilisé. Des MNT plus précis existent mais malheureusement pas sur la totalité de zone d'étude. En-dessus de 2000 mètres d'altitude par exemple, aucun MNT plus précis n'existe (si ce n'est ceux obtenus en interpolant un MNT<sub>25</sub>). Il a donc fallu produire PERB uniquement sur la base de ce raster.

## 5.2.2 Traitement des variables

Une réflexion préliminaire concernant les variables à exploiter est une première étape nécessaire. Sur la base des connaissances théoriques décrites précédemment (*cf.* 3.1), un total de 15 variables pouvant influencer la présence ou l'absence de sols gelés en permanence a été pris en compte. Ce chapitre a pour objectif de montrer quelles variables ont été utilisées et comment elles ont été extrapolées à partir du MNT<sub>25</sub> et de

la couche des surfaces primaires de Swisstopo, décrivant les différentes typologies de couverture du sol. Dans l'intention de montrer au lecteur des exemples permettant une bonne compréhension de la démarche, la visualisation de ces variables à l'échelle de la feuille Rosablanche ne semblait pas adéquate. Un aperçu sous forme de carte thématique qui se limite aux sites d'intérêt particulier présentés précédemment est donc proposé. De plus, dans l'objectif d'améliorer la lisibilité, le fond de carte topographique sera inclus.

### 5.2.2.1 L'altitude

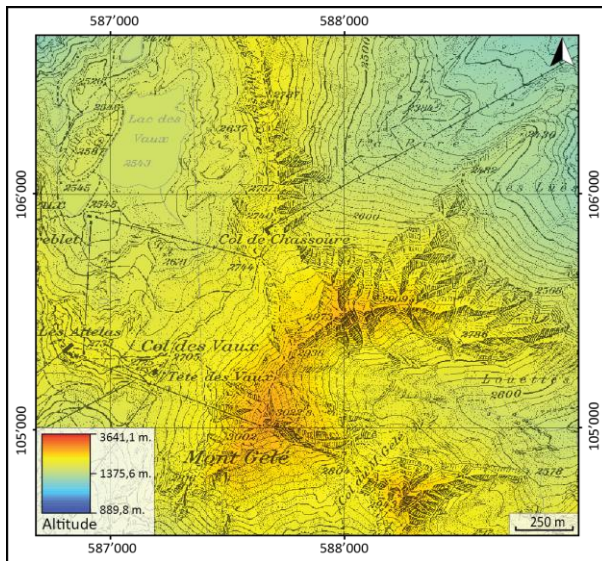


Figure V.3 : aperçu de la carte des altitudes issue du MNT.

Dans la littérature, l'occurrence du pergélisol alpin est généralement en relation avec l'augmentation de l'altitude pour toute distribution typique. Cette variable peut être extraite directement du MNT qui possède pour chaque pixel du raster une valeur d'altitude. La portion de territoire représenté dans la feuille topographique Rosablanche possède une altitude minimale de 889 mètres et une altitude maximale de 3641 mètres. Les statistiques réalisées sur le MNT25 indiquent que la région a une altitude moyenne de 2431 mètres.

### 5.2.2.2 La MAAT

La température moyenne annuelle de l'air est un autre facteur qui régit l'occurrence du permafrost à une échelle géographique relativement petite, car elle est en stricte relation avec le climat. Cependant, comme précisé précédemment, elle est aussi corrélée avec l'altitude et elle diminue au fur et à mesure que cette dernière augmente (si aucune inversion thermique dans les fonds des vallées ne se produit).

Des données de température ont été mesurées par la station ENET du sommet des Attelas. Cette station appartenant à MétéoSuisse enregistre la température de l'air et la vitesse des vents en continu. En

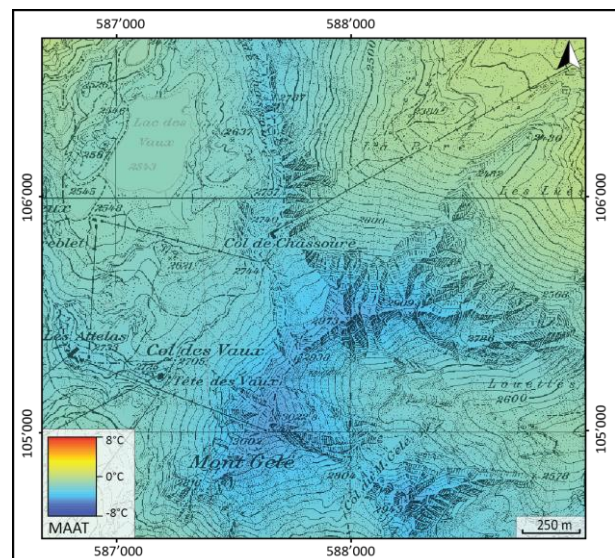
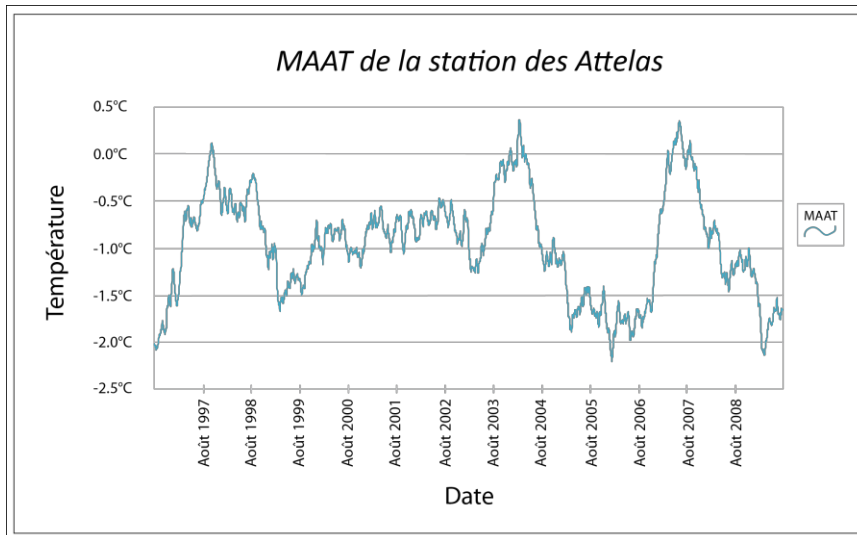


Figure V.4 : aperçu de la carte des températures.

raison d'un manque de données dans la série de mesures, seule la période d'Août 1996 à Juillet 2009 a pu être exploitée. Des températures moyennes annuelles de l'air ont été calculées (*graphique V.1*), permettant d'obtenir la moyenne interannuelle des MAAT. Pour le site des Attelas, cette valeur vaut  $-0.96^{\circ}\text{C}$ . Cette température est considérée comme la valeur de référence de la MAAT du site pour la période 1996-2009.



Graphique V.1 : évolution de la MAAT pour la station des Attelas.

La température moyenne annuelle de l'air pour la totalité de la feuille Rosablanche a été calculée par régression linéaire à l'aide des formules proposées par BOUËT (1985). L'auteur suggère que la station de référence doit se localiser à une altitude supérieure à 1500 mètre afin d'obtenir un résultat satisfaisant. La station météorologique des Attelas, qui se situe à 2733 mètres d'altitude, semble donc adaptée. La MAAT pour tous les autres pixels du raster a été calculée (*figure V.4*) à l'aide des formules de Bouët (*boîte V.1*) qui intègrent les gradients annuels de température proposés par le même auteur ( $0.46^{\circ}\text{C}/100\text{mètres}$  entre 500 et 1500 mètres d'altitude ;  $0.59^{\circ}\text{C}/100\text{mètres}$  entre 1500 et 4000 mètres d'altitude).

Formule 1: estimation de la MAAT si le pixel considéré et la station de référence se localisent dans la même tranche d'altitude (500-1500 mètres ou 1500-4000 mètres) :

$$T = T_R - \left[ (z - z_R) \left( \frac{T}{h} \right) \right]$$

Formule 2 : estimation de la MAAT si le pixel considéré et la station de référence ne se localisent pas dans la même tranche d'altitude :

$$T = T_R - \left[ (1500 - z_R) \left( \frac{T_1}{h_1} \right) \right] - \left[ (z - 1500) \left( \frac{T_2}{h_2} \right) \right]$$

où T = la température qu'on souhaite calculer ;

$T_R$  = la température à la station de référence ;

z = l'altitude du pixel pour lequel on souhaite calculer la température ;

$z_R$  = l'altitude de la station de référence ;

$T/h$  = le gradient de température vertical de Bouët ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )

$T_1/h_1$  = le gradient de température vertical de Bouët ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) pour la tranche d'altitude 500-1500 mètres

$T_2/h_2$  = le gradient de température vertical de Bouët ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) pour la tranche d'altitude 1500-4000 mètres

### 5.2.2.3 L'orientation

Des versants d'orientations opposées ont généralement des apports énergétiques différents en raison d'un angle d'incidence des rayons du soleil différent. La quantité d'énergie par unité de surface peut effectivement varier dans un rapport de 1 à 10 entre l'adret et l'ubac. Cette différence d'énergie reçu par le sol peut jouer un rôle

fondamental pour l'occurrence du pergélisol.

L'orientation a été calculée sur la base du MNT25 à l'aide de l'outil « Aspect » du *Raster Calculator* d'ArcMap. Le calcul se base sur le changement de direction qui a lieu à chaque changement de cellule du raster. Cette démarche est similaire à celle de l'outil de calcul de la pente. Elle permet d'obtenir une valeur entre 0° et 360° pour chaque pixel du MNT25.

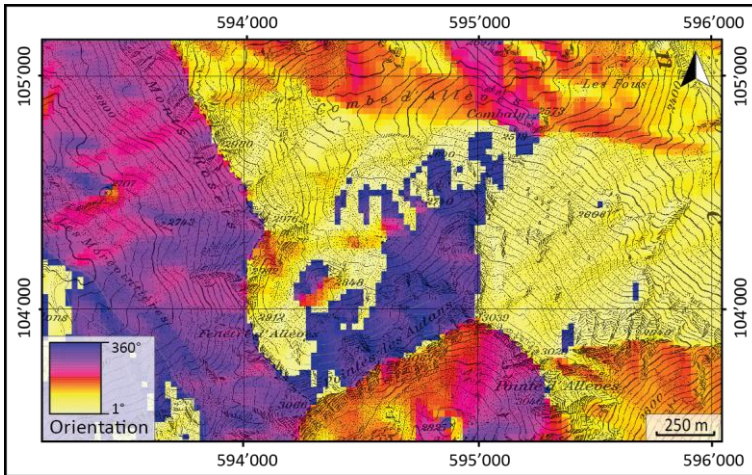


Figure V.5 : aperçu de la carte des orientations issue du MNT.

### 5.2.2.4 La radiation solaire directe

La radiation solaire directe est un des facteurs de contrôle les plus important contrôlant l'occurrence de pergélisol, par le biais notamment de la MAGST. L'apport énergétique au sol varie en fonction de l'orientation et de la pente du versant, car l'angle d'incidence est différent.

Cette variable a été calculée à l'aide de l'outil « Area Solar Radiation » d'ArcMap sur la base du MNT25. Bien que les effets d'ombrage liés à la topographie soient pris en compte par ArcMap, l'outil n'admet qu'un ciel clair, c'est-à-dire sans nuages. Par ailleurs, comme le rappelle HOELZLE (1994), la radiation solaire directe n'a pas une

grande incidence sur un sol enneigé. Cependant, elle influence la MAGST de manière significative si le terrain en est dépourvu. Sur la base de ces principes, la période de référence pris en compte pour cette variable se situe entre le 1<sup>er</sup> juillet et 31 octobre, c'est-à-dire l'intervalle de temps normalement sans précipitation sous forme de neige. La carte de la radiation solaire directe conçue sur la base de ces considérations est visible à la *figure V.6*.

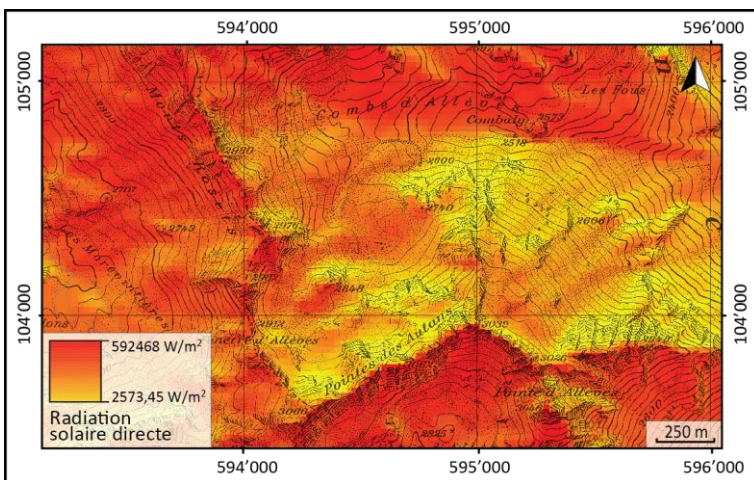


Figure V.6 : aperçu de la carte de la radiation solaire issue du MNT.

### 5.2.2.5 La pente

L'inclinaison du sol influence fortement l'occurrence du pergélisol. La radiation solaire directe varie en fonction de cette variable. De plus, pour des conditions climatiques similaires, la couverture neigeuse a une épaisseur différente en fonction de la pente du versant : les parois rocheuses en sont généralement dépourvues tandis que les surfaces planes ou les pieds de pente peuvent être occupés par une couche de neige plus importante.

L'outil « Slope » d'ArcMap a permis le calcul de la pente sur la base de l'altitude de chaque pixel du raster. La pente correspond en effet au gradient d'altitude calculé sur deux cellules adjacentes. Elle est par la suite utilisée d'une part comme variable indépendante du jeu de données et, d'autre part, pour l'identification des éboulis et des parois rocheuses.

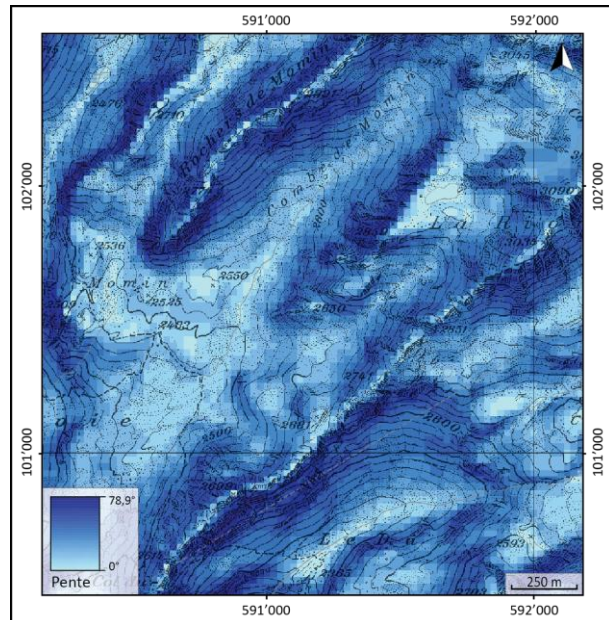


Figure V.7 : aperçu de la carte des pentes issue du MNT.

### 5.2.2.6 La courbure du terrain

*La courbure du terrain* : cette variable n'est pas forcément en relation avec le pergélisol. Cependant, elle pourrait se révéler utile aux Machines à Vecteurs de Support afin de distinguer la moitié inférieure de la moitié supérieure d'un éboulis. En effet, dans un cadre de figure typique (figure V.8), un éboulis se caractérise par une topographie concave dans sa partie distale, par une pente régulière dans le secteur centrale, et par une topographie à nouveau concave en-dessous de la paroi rocheuse se trouvant en amont. De plus, si la forme géomorphologique est suffisamment grande, la topographie convexe d'un glacier rocheux ou d'une crête morainique pourra être reconnue à l'aide d'un indicateur de courbure. Cette variable est donc intégrée dans le jeu de données afin de tester son efficacité dans ce sens.

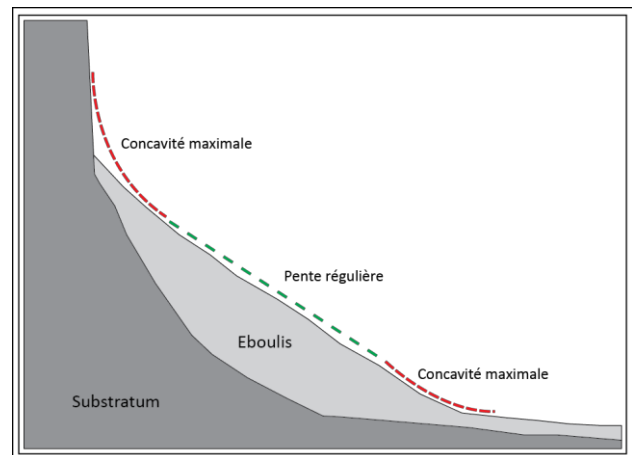


Figure V.8 : schéma de la courbure du terrain caractérisant un éboulis.

Cette variable a été calculée à l'aide de la fonction « Curvature » de la toolbox *Spatial Analyst* d'ArcMap. La courbure du sol correspond à la dérivée de la pente, c'est-à-dire la

« pente de la pente ». Une courbure positive indique que la surface est convexe autour de la cellule étudiée. Au contraire, une courbure négative indique une surface concave (figure V.9).

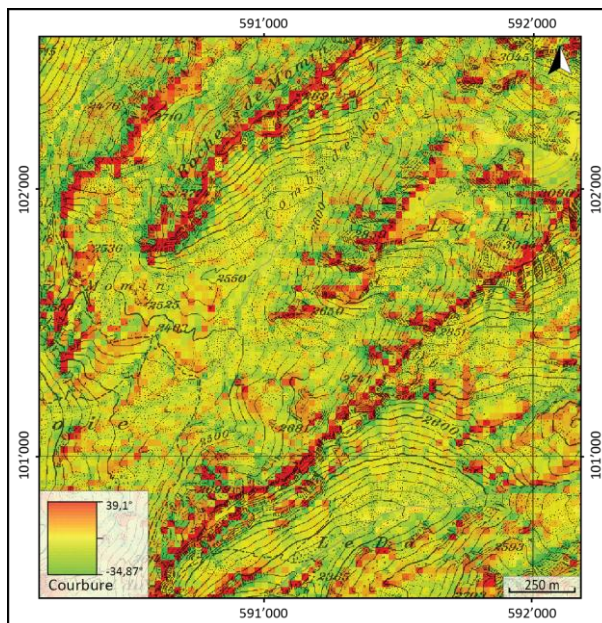


Figure V.9 : aperçu de la carte de la courbure du terrain.

### 5.2.2.7 La végétation

Comme HAEBERLI (1985) l'a indiqué dans ses 10 règles empiriques (cf.3.2.1), la couverture végétale du sol correspond à un terrain dans lequel il n'est généralement pas possible de trouver du pergélisol. Les surfaces possédant de la végétation ont été donc exportées de la couche des surfaces primaires de Swisstopo. Comme plusieurs catégories de zones à couverture végétale sont proposées, elles ont été regroupées en une seule classe. Il aurait aussi été possible de calculer un indice de végétation satellitaire ou NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) à partir d'une image satellitaire. Cependant, il a été décidé d'utiliser uniquement les données fournies par Swisstopo afin de ne pas avoir des typologies de surface qui se chevauchent.

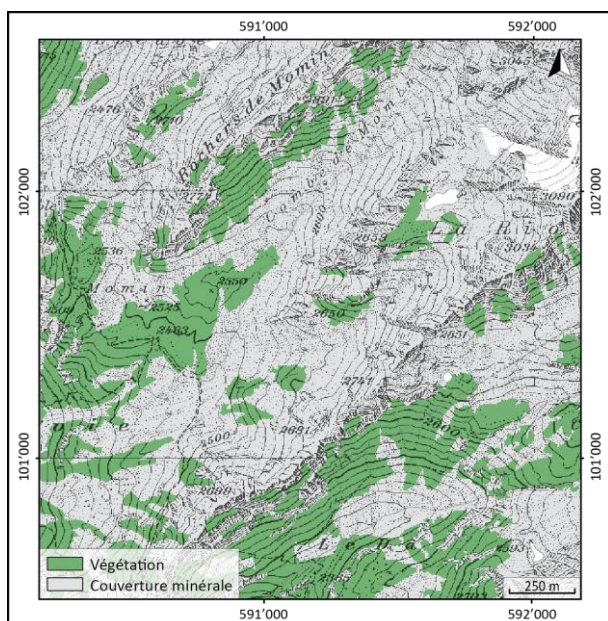


Figure V.10 : aperçu de la carte de la végétation et des surfaces à couverture minérale, issues de la couche des surfaces primaires de Swisstopo.

### 5.2.2.8 Les surfaces à couverture minérale

Ce type de terrains est potentiellement gelé en permanence sous certaines conditions. Comme Haeberli l'explique (cf. 3.2.1), à des altitudes suffisamment élevées, la probabilité de trouver du pergélisol dans les éboulis nus et dans les sols à gros blocs est assez importante. Dans des lithologies fines, la présence d'un état thermique froid est par contre moins envisageable. Une carte des surfaces à couverture minérale a été obtenue de la même manière que la



végétation (*figure V.10*). Elle sera utile soit comme variable permettant d'expliquer l'occurrence du pergélisol, soit comme couche de base pour la mise en évidence des secteurs possibles d'éboulis et de parois rocheuses.

### 5.2.2.9 Les glaciers et les marges proglaciaires

Dans les Alpes, l'occupation glaciaire est souvent synonyme d'une perturbation thermique du sol. Il en résulte que les températures basales ne sont généralement pas suffisantes pour que du permafrost soit présent en-dessous de la surface couverte par un glacier. Sur les mêmes principes, les marges proglaciaires sont aussi dépourvues de pergélisol à l'exception de quelques endroits localisés (*cf. 3.1.4.3*).

Semblablement à la végétation et aux surfaces à couverture minérale, la couche des surfaces primaires contient des données concernant l'extension actuelle des glaciers. A cette information celle des *Pierrier sur glacier* (glacier couvert) a été rajoutée.

Les surfaces englacées jouent un double rôle dans la modélisation. Elles ont tout d'abord été intégrées dans le jeu de données. Dans un deuxième temps, les glaciers ont aussi été utilisés afin de mettre en évidence les marges proglaciaires. Les surfaces englacées au Petit Age Glaciaire qui ne le sont plus actuellement ont été calculées par soustraction de surfaces dans ArcMap. Pour ce faire, les surfaces actuellement couvertes par des glaciers ont été éliminées de la carte de l'extension glaciers au PAG (MAISCH, 1999). Afin de permettre une bonne visualisation de ces deux variables, un aperçu du glacier du Mont Fort et des Etagnes et de leur marge proglaciaire respective est proposé sur la *figure V.11*.

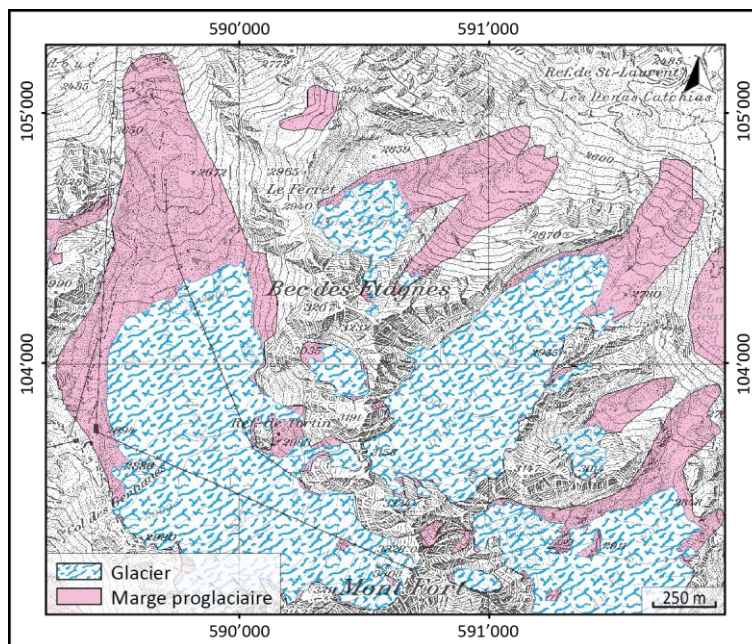


Figure V.11 : aperçu de la carte des glaciers et des marges proglaciaires.

### 5.2.2.10 Les lacs et les infrastructures humaines

Les plans d'eau se caractérisent par des températures qui ne descendent jamais en-dessous de 0°C. Par conséquent, ils correspondent à des secteurs d'absence certaine de sols gelés en permanence.

En ce qui concerne les infrastructures humaines, les sols sur lesquelles elles se localisent ont été considérés comme dépourvus en pergélisol. Il est évident que quelques cas localisés ne correspondent pas à cette affirmation (les infrastructures touristiques du Col des Gentianes par exemple).

Cependant, afin d'exclure les villages et les grandes infrastructures des surfaces potentiellement gelées, cette généralisation semblait nécessaire et cohérente avec la réalité.

Une carte de des lacs et des infrastructures humaines a été obtenue par extraction de ces deux type de surfaces de la couche des surfaces primaires. Aucun traitement supplémentaire de ces deux variables n'a cependant été nécessaire.

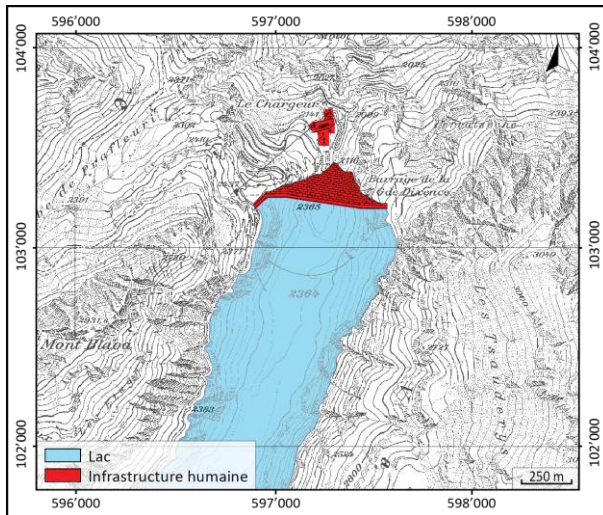


Figure V.12 : aperçu de la carte des glaciers et des marges proglaciaires.

### 5.2.2.11 Les glaciers rocheux intacts

*Les glaciers rocheux intacts* : il s'agit de l'expression la plus visible du pergélisol. Les glaciers rocheux correspondent donc à une première catégorie de formation sédimentaire de référence dans laquelle le pergélisol est présent avec certitude.

Les polygones représentant les glaciers rocheux intacts ont été extraits de l'inventaire des glaciers rocheux actifs, inactifs et fossiles proposé par LAMBIEL (1999) et REYNARD & LAMBIEL (2003). Comme le pergélisol est absent dans les glaciers rocheux fossiles, seuls les glaciers rocheux intacts ont été retenus. La *figure V.13* en propose un aperçu.

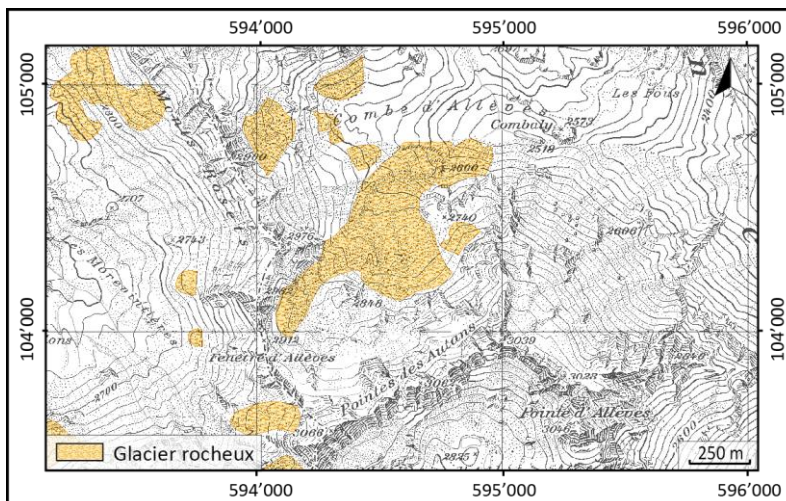


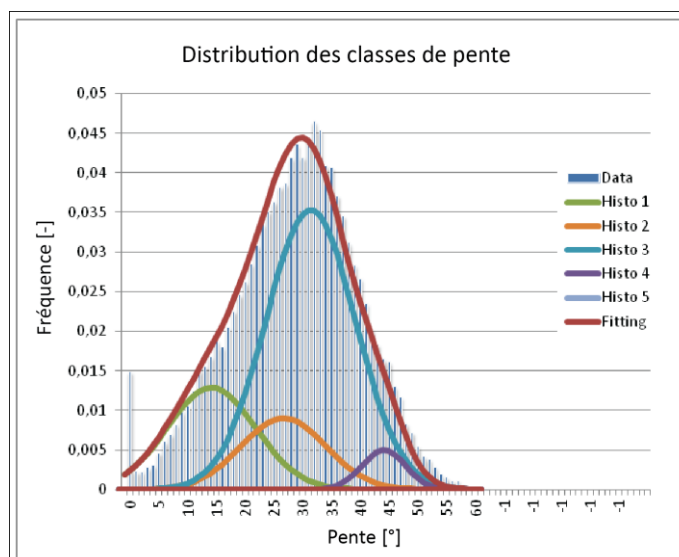
Figure V.13 : aperçu de la carte des glaciers et des marges proglaciaires.

### 5.2.2.12 Les parois rocheuses et les éboulis

Le pergélisol est une composante importante des parois rocheuses en haute altitude. L'état thermique de ce type de surface dépend fortement de la MAAT et de la radiation solaire (cf. 3.1.3). Les parois rocheuses sont donc intégrées parmi les variables du modèle. De plus, elles sont très utiles à la localisation automatique des terrains sédimentaires dont l'apport en matériaux résulte de la gravité.

Quant aux éboulis, la modélisation de la distribution atypique du pergélisol dans ces terrains est un des défis principaux de cette recherche. Comme il a été précisé (cf. 3.1.4.1), le pergélisol est habituellement présent dans la moitié inférieure des éboulis tandis que la moitié supérieure en est généralement dépourvue. Il s'agit donc d'extrapoler cette type de surface et de l'intégrer dans le jeu de données.

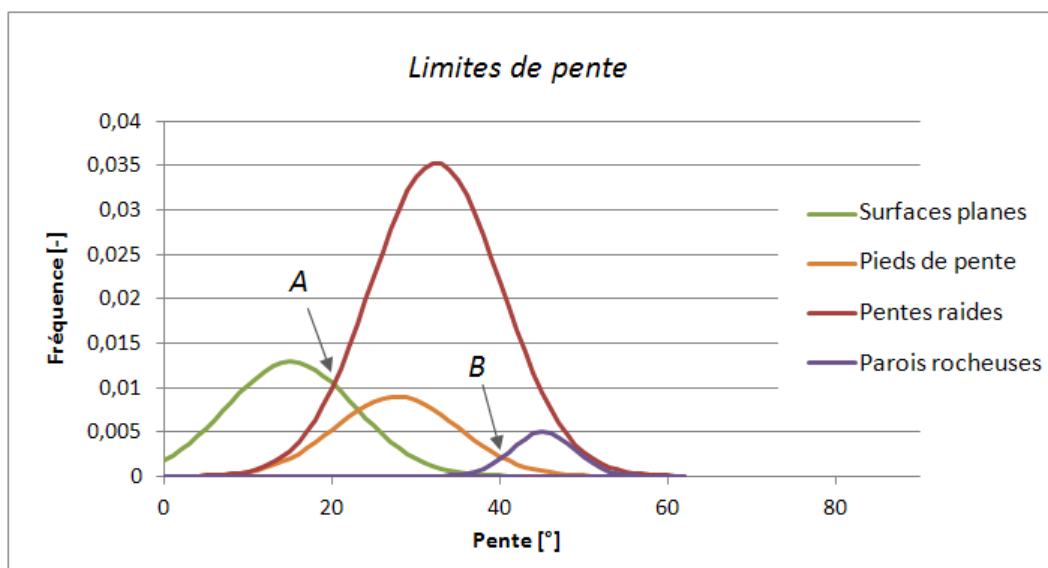
La détermination des surfaces de parois rocheuses et d'éboulis a été effectuée par le biais d'une analyse de l'histogramme des classes de pente de la zone d'étude. Cette démarche se base sur le raster créé dans ArcMap à l'aide de l'outil « Slope » et indiquant la valeur de pente pour chaque pixel. Les différentes classes de pente exportées en format ASCII ont été utilisées dans le logiciel *Histofit* développé dans un environnement Excel par LOYE ET AL. (2009). Cette application permet de calculer la distribution des fréquences des degrés de pente de la topographie étudiée. Par un processus itératif, le logiciel reconnaît automatiquement des classes de fréquence en s'appuyant sur l'optimisation de courbes gaussiennes propres à la distribution des pentes de la zone retenue (graphique V.II). *Histofit* propose ensuite des limites de classe pour les morphologies suivantes : surfaces planes, pieds de pente, pentes raides et parois rocheuses. Des renseignements plus détaillés concernant la méthode sont disponibles dans la publication des auteurs.



Graphique V.II : la distribution des classes de pente de la région d'étude, issue de *Histofit*.

Dans le cadre de ce travail et de la zone d'étude choisie, *Histofit* a fourni une limite inférieure de 20° pour les pieds de pente des éboulis et une limite inférieure de 40° pour les parois rocheuses (graphique V.III). Ces seuils résultent du croisement des courbes

calculées pour les quatre morphologies. En règle générale, deux scénarios sont possibles. Dans un premier cas, la succession des courbes est dans le même ordre des morphologies que l'on rencontrerait en remontant la pente de l'aval à l'amont (surfaces planes, pieds de pente, pentes raides et parois rocheuses). Au contraire, le deuxième scénario envisageable se caractérise par des courbes distribuées dans un ordre différent. Il sera alors nécessaire d'analyser les intersections entre les courbes gaussiennes propres aux différentes morphologies. Dans le cas spécifique, le seuil de 20° représente la limite en dessous de laquelle les pentes raides deviennent dominantes (*graphique V.III:A*). Les pieds de pente ne sont pas suffisamment représentés pour que leur limite soit mise en évidence. De la même manière, l'intersection entre les pieds de pente et les parois rocheuses, située à 40° (*graphique V.III:B*), représente le deuxième seuil qui délimite cette dernière morphologie.



Graphique V.III : les limites des morphologies proposées par Histofit.

En accord avec ces valeurs, les surfaces possédant une pente entre 20° et 40° ainsi que celles entre 40° et 90° ont été extraites. Comme les éboulis se localisent généralement en-dessous d'une paroi rocheuse, seules les surfaces de la première catégorie de pente (20-40°) qui se situent à une distance maximale de 25 mètres de la deuxième (40-90°) ont été retenues. Ce premier tri a permis d'exclure les versants dont la surface n'est pas affectée par un apport sédimentaire par gravité.

Les surfaces restantes correspondent essentiellement à deux types de sol : les terrains à couverture minérale et végétale. A l'aide d'ArcMap, la variable « Surfaces à couverture minérale » précédemment calculée a été utilisée afin de localiser les éboulis, les pierriers et les parois rocheuses. Un dernier tri s'est révélé nécessaire afin d'exclure des zones éloignées des parois rocheuses. Pour cela, les surfaces à couverture minérale ayant une pente comprise entre 20° et 40° et qui ne se situent pas en-dessous de celles ayant une pente supérieure à 40° pour une distance maximale de 25 mètres ont été effacées.

Le résultat obtenu (figure V.14) est satisfaisant en ce qui concerne la mise en évidence des parois rocheuses. Suite à une analyse comparative entre une orthophoto et le raster obtenu après la démarche précédemment décrite, il apparaît que ce type de surface est assez bien identifiée. Toutefois, contrairement aux parois rocheuses, les éboulis au sens strict du terme n'ont pas toujours été correctement identifiés. Dans certains cas, la distinction entre couverture minérale du versant et formation sédimentaire dont l'origine est en relation avec un apport gravitaire n'est pas suffisamment claire. Malgré ces imprécisions, il a été décidé de garder cette variable dans le jeu de données car elle peut servir à l'identification des éboulis en utilisant les machines à vecteurs de support.

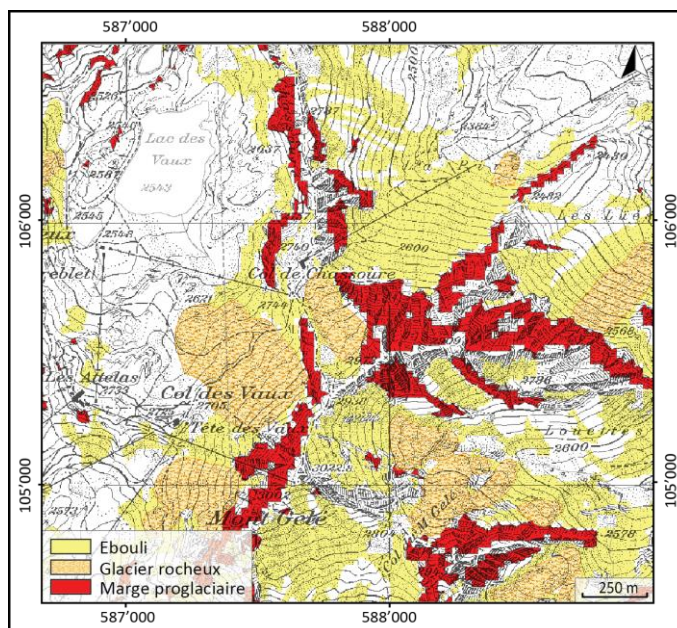


Figure V.14 : aperçu de la carte des éboulis et des parois rocheuses.

### 5.2.3 Absence ou présence certaine de pergélisol alpin

Afin de produire une simulation valable, les machines à vecteurs de support ont besoin de se baser sur des exemples connus représentatifs de la variable à prédire. Des données concernant l'absence et la présence de pergélisol sont donc nécessaires. Sur la base des variables calculées précédemment, il est possible de mettre en évidence divers exemples d'entraînement.

En ce qui concerne l'absence de pergélisol, toutes les surfaces à couverture végétale, les lacs, les glaciers et les marges proglaciaires, qui peuvent être classés comme étant dépourvus en sol gelé en permanence, font office d'exemples représentatifs pour la modélisation (cf. 3.1.6).

En ce qui concerne la présence certaine de pergélisol, les glaciers rocheux intacts sont considérés comme l'indicateur principal indiquant la présence de permafrost. Cependant, comme un des objectifs de PERB est la simulation du pergélisol dans les éboulis, il est important d'intégrer au jeu de données l'information concernant la répartition du sol gelé en permanence dans ce type de surface.

A l'aide de recherches sur le terrain effectuées au cours des dernières années et présentées dans la littérature (DELALOYE, 2004 ; LAMBIEL, 2006 ; REYNARD & LAMBIEL, 2003 ; PIERACCI, 2006 ; SCAPOZZA, 2011), plusieurs zones concernées par la présence de pergélisol

dans des éboulis ont pu être repérées, notamment dans la moitié inférieure de l'éboulis des Lapires, des Yettes Condja (figure V.15) et des Monts de Cion.

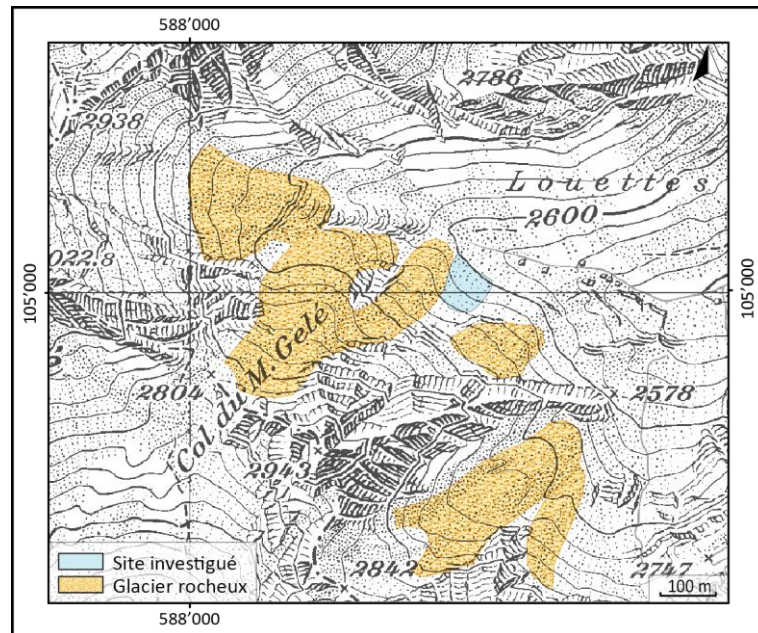


Figure V.15 : aperçu de la carte des glaciers rocheux et des sites investigués.

### 5.2.4 Le jeu de données

Toutes les variables obtenues par manipulation du MNT ou extraction depuis la couche de surfaces primaires ont été exportées sous forme de raster dont les cellules ont une taille de 25x25 mètres, correspondant à la résolution du MNT. Ces immenses matrices ont ensuite été exportées en format ASCII en vue de la mise en place du jeu de données sur MatLab. Ce logiciel est en effet plus pratique et adapté pour le traitement de rasters de taille importante.

Dans un premier temps, une matrice contenant les coordonnées X et Y de la feuille Rosablanche a été créée et une valeur a été ensuite attribuée pour chaque variable et cellule. Dans un deuxième temps, la variable « Pergélisol » a été ajoutée. La présence certaine de pergélisol a été indiquée avec la valeur « 1 », l'absence certaine de pergélisol avec la valeur « 0 » et l'incertitude avec la valeur « 999 » (figure V.16). Sur les 295'680 cellules du raster, 6193 ont été classées dans la première catégorie (2% du total), 182'173 dans la deuxième (62% du total) et les 107'314 restantes comme inconnues (36% du total).

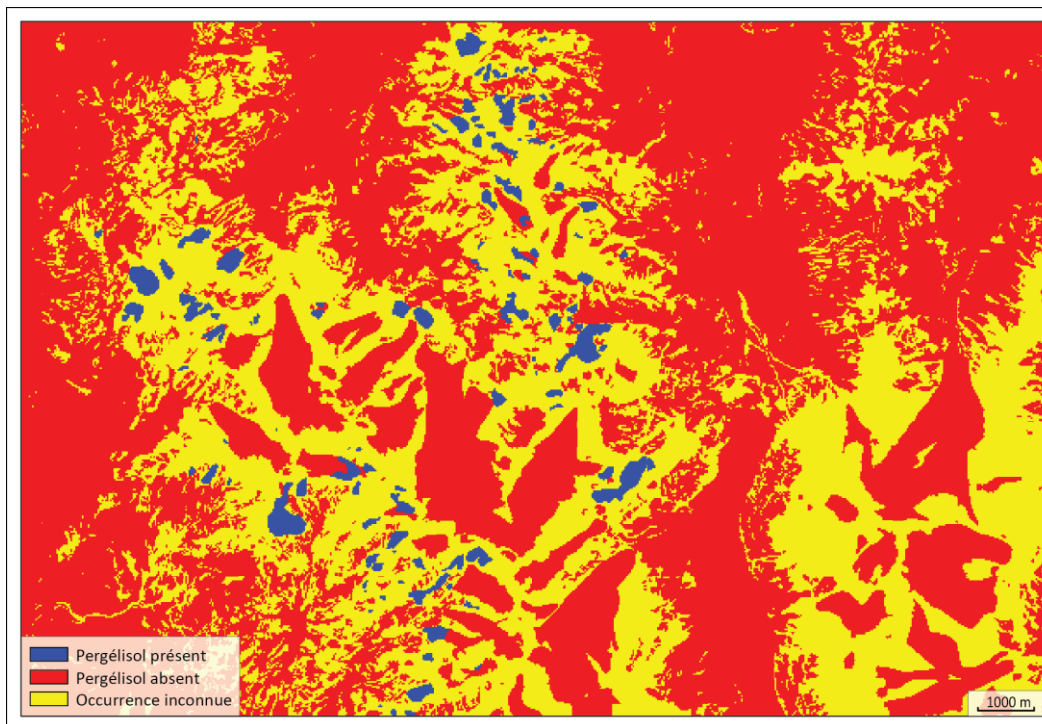
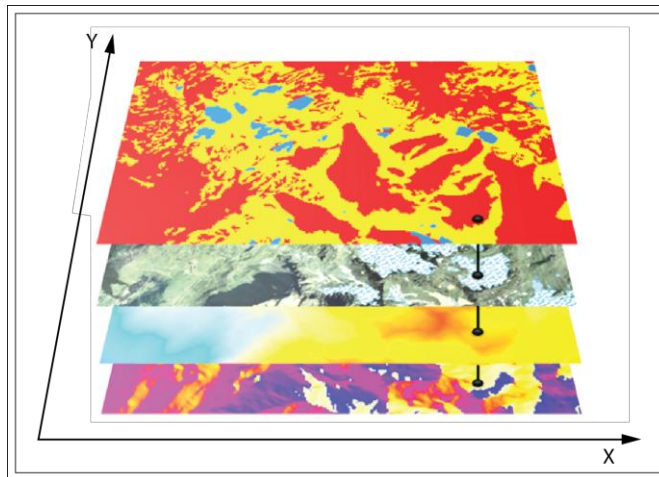


Figure V.16 : carte de l'occurrence certaine ou inconnue du pergélisol pour la région de la Rosablanche.

Le rôle principal des machines à vecteurs de support est donc la prédiction de l'occurrence de pergélisol pour cette dernière catégorie. Le jeu de données se présente comme un simple tableau organisé de la même manière que celui mis en évidence ci-dessous (tableau V.I).

X	Y	Z	Orie.	Courb.	Eboulis	Glac.	G.R.	I.H.	Lac	M.P.	Minéral	Parois	Rad.Sol.	Pente	Vég.	T.	PG
X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	2754	276	22.3	0	0	1	0	0	0	1	0	3456	24.56	0	-1.23	1
X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	3043	302	-3.4	0	1	0	0	0	0	0	0	4354	2.47	0	-0.54	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tableau V.I : aperçu du jeu de données utilisé pour la réalisation du modèle.



Visuellement, les données peuvent être représentées comme un empilement de variables. La variable « Pergélisol » correspond au regroupement des valeurs de chaque variable pour toutes les cellules de l'espace X-Y considéré (figure V.17).

Figure V.17 : visuellement le jeu de données se présente comme l'empilement des variables.

Afin d'éviter qu'une variable aie plus de poids qu'une autre, en raison des phénomènes très différents qu'elles représentent, une normalisation est effectuée. En statistique, cette opération permet de comparer ou de mettre en relation des échantillons de nature différente. La valeur normalisée (ou z-score) est calculée en soustrayant la moyenne de l'ensemble des valeurs à la valeur de la variable et en divisant le résultat par l'écart-type :

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

Il faut préciser cependant que les coordonnées X et Y ainsi que la variable binaire « Permafrost » n'ont pas subi le même traitement et n'ont logiquement pas été normalisées. De plus, comme la limite inférieure du pergélisol alpin discontinu est largement supérieure à 2000 mètres d'altitude, tous les endroits en-dessous de cette valeur ont été exclus du jeu de données dans l'objectif de simplifier les calculs.

### 5.2.5 La division du jeu de données d'entraînement, de test et de validation

L'étape qui précède l'exploitation du jeu de données dans le cadre d'une simulation à l'aide des SVM consiste en sa division en trois parties (cf. 4.3.9). Les données qui composent ces trois sous-groupes ont été choisies aléatoirement. Afin de réduire au maximum l'incertitude, dix groupes de trois jeux de données ont été constitués. Toutefois, pour chaque simulation, un seul jeu de données d'entraînement, de test et de validation est utilisé. Le résultat final se base sur des statistiques effectuées sur la totalité des 30 prédictions. La division du jeu de donnée peut être résumée comme suit :

- 10 jeux de données d'entraînement (1600 valeurs), de validation (1600 valeurs) et de test (2800 valeurs)



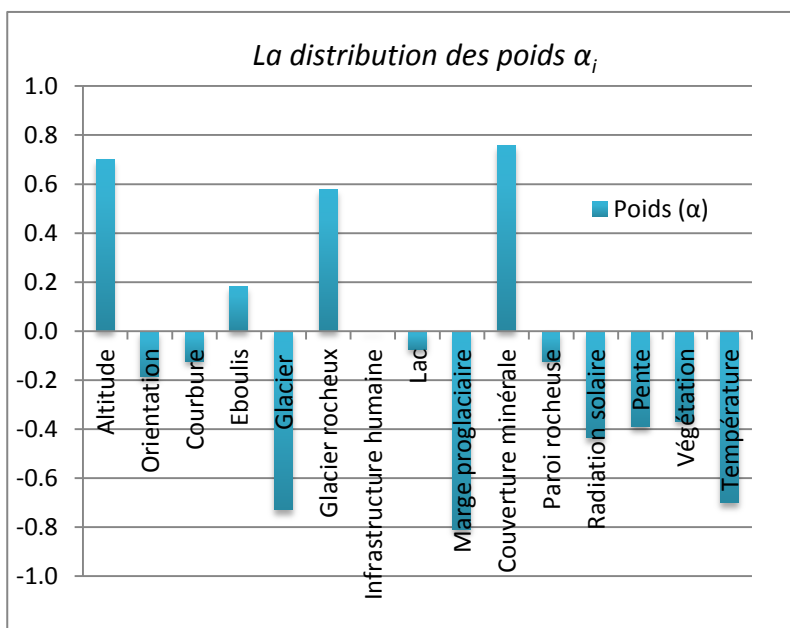
- 10 jeux de données d'entraînement (1800 valeurs), de validation (1800 valeurs) et de test (2400 valeurs)
- 10 jeux de données d'entraînement (2000 valeurs), de validation (2000 valeurs) et de test (2000 valeurs)

De cette manière, la probabilité de choisir au hasard une grosse portion d'exemples négatifs (ou positifs) concernant le pergélisol est considérablement réduite. En effet, si une trop faible proportion d'échantillon représentant des glaciers rocheux ou d'autres sites représentatifs est présente dans le jeu de données d'entraînement, le processus d'apprentissage de la machine pourrait se révéler difficile.

### 5.2.6 Le processus d'entraînement

La première étape du processus d'entraînement consiste à utiliser le jeu de données d'entraînement afin de relever les relations existantes entre le pergélisol et les différentes variables. Il s'agit donc de calculer la valeur des coefficients  $\alpha_i$ , c'est-à-dire les poids optimaux attribués aux facteurs de contrôle permettant de maximiser la largeur de la marge  $\rho$  (cf. 4.3.2.2).

Une bonne stratégie permettant d'atteindre cet objectif est d'utiliser une fonction noyau linéaire (cf. 4.3.8). Pour rappel, cette dernière ne prévoit aucun changement de la dimensionnalité de l'espace, mais permet d'obtenir les valeurs  $\alpha_i$  pour chaque variable. Comme la valeur des poids varie entre  $[-1; +1]$ , trois cadres de figures peuvent apparaître : une variable possédant un  $\alpha$  négatif est négativement corrélée à la présence de pergélisol, une variable possédant un  $\alpha$  proche de 0 n'a pas beaucoup d'influence sur la présence de pergélisol et un  $\alpha$  positif correspond à une corrélation positive avec les terrains gelé en permanence.



Graphique V.IV : distribution des poids issus de l'étape d'entraînement permettant la compréhension des variables significatives pour la répartition du pergélisol..

Variables	Poids ( $\alpha$ )
Altitude	0,69995
Orientation	-0,18602
Courbure	-0,12223
Eboulis	0,18137
Glacier	-0,72837
Glacier rocheux	0,57752
Infrastructure humaine	0,00000
Lac	-0,07407
Marge proglaciaire	-0,81159
Couverture minérale	0,75791
Paroi rocheuse	-0,12232
Radiation solaire	-0,43578
Pente	-0,39133
Végétation	-0,36727
Température	-0,69995

Tableau V.II : les poids issus de l'étape d'entraînement.

Lors de cette première étape, les poids  $\alpha_i$  indiqués dans le *tableau V.II* et représentés dans le *graphique V.IV* ont été obtenus.

Les variables *Altitude*, *Eboulis*, *Glacier rocheux*, *Couverture minérale* et *Température* sont positivement corrélées avec le pergélisol. À l'inverse, les résultats pour les variables *Glacier*, *Marge proglaciaire* et *Température* indiquent une forte corrélation négative. Les variables restantes sont négativement corrélées au pergélisol, mais leur influence est moins importante par rapport à celle des glaciers, des marges proglaciaires et de la température.

Il est par ailleurs important d'attirer l'attention sur le fait que ces résultats ne sont valables que pour le jeu de données d'entraînement, car le calcul a pour l'instant été effectué uniquement sur ce jeu de données extrait de façon aléatoire. Par conséquent, ces valeurs expliquent le phénomène seulement en fonction de sa répartition dans ce jeu de données. Il est évident qu'un bon modèle devrait se baser sur des poids similaires à ceux des facteurs de contrôle présents dans un système réel, cependant il faut toujours garder à l'esprit que le choix aléatoire des exemples d'entraînement peut fausser la représentation de ce même système. L'utilisation de plusieurs jeux d'entraînement, de test et de validation est donc nécessaire pour éviter ce problème.

Lorsqu'confrontés à un jeu de données de taille importante, l'utilisation d'une fonction noyau linéaire donne une prédiction peu robuste par rapport à d'autres kernels. Un nouveau processus d'entraînement a donc été réalisé en utilisant une fonction noyau RBF gaussien  $K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right)$ .

Dans l'objectif d'éviter une surestimation de la prédiction de pixels représentant potentiellement du pergélisol, l'utilisation d'exemples différents est nécessaire à la calibration du modèle. Cette opération permet le calcul des hyper-paramètres de la fonction noyau et de la fonction de décision, notamment les valeurs du coefficient  $\sigma$  et de la constante  $C$  (cf. 4.3.2.4). Le jeu de données de test a finalement été utilisé à cette fin et une fonction de décision optimale est a été calculée.

## 5.2.7 Le processus de prédiction

Grâce à la fonction de décision, toutes les cellules pour lesquelles la répartition du pergélisol était inconnue ont été placés en-dessous ou en-dessus de la marge  $\rho$  au cours du processus de prédiction. De plus, cette étape de la simulation a ainsi permis de valider la fonction de décision sur un troisième jeu de données de validation en calculant l'erreur de classification.

Sur la base des simulations effectuées sur les différents jeux de données (cf. 5.2.5), une première carte des valeurs restituées par les machines à vecteurs de support a pu être réalisée (*figure V.18*). Pour chaque pixel de la matrice représentant l'espace plusieurs

valeurs ont été attribuées. Elles ont une signification précise par rapport aux marges « -1 » et « +1 ». En effet, en-dessous de la marge « -1 », tous les exemples qui ont été repérés dans la classe négative sont retrouvables. A l'opposé, en-dessus de la marge « +1 », tous les pixels prédits dans la classe positive sont observables. En tenant compte uniquement de ces deux classes, il est déjà possible d'identifier des zones dépourvues en pergélisol et à l'opposé, des zones dans lesquelles il existe une probabilité majeure d'en retrouver. Quelques-unes des formes représentatives qui ont été intégrées dans le jeu de données sont reconnaissables assez clairement. Il sont observables par exemple les glaciers rocheux actifs (*figure V.18:A*), qui ont été classés dans la catégorie positive, et les glaciers, classés comme négatifs (*figure V.18:D*). Ces résultats confirment les poids  $\alpha_i$  obtenus à l'aide de la fonction noyau linéaire sur la base du jeu d'entraînement.

Cependant, il faut remarquer qu'une grande portion du territoire a été reconnue par la fonction de décision comme étant entre les marges  $[-1 ; +1]$ . Uniquement sur la base de cette carte, aucune hypothèse concernant la répartition du pergélisol pour ces endroits n'est envisageable.

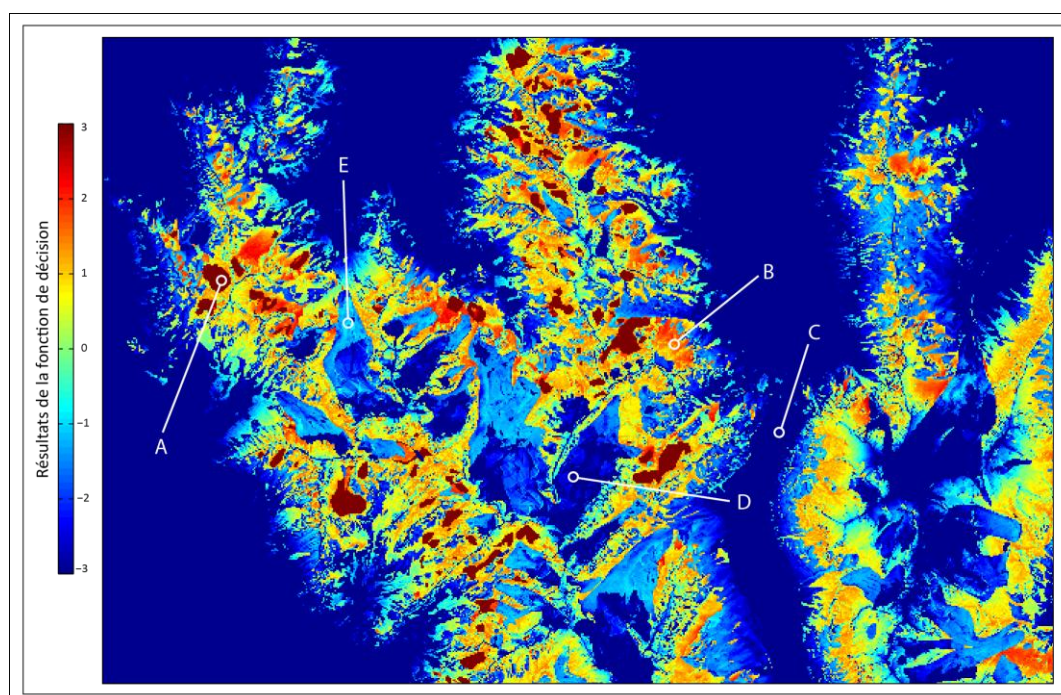


Figure V.18 : carte des valeurs restituées par la fonction de décision. Quelques exemples indiquant la présence ou absence de pergélisol est observable : les glaciers rocheux actifs (A), les éboulis (B), les lacs (C), les glaciers (D), les marges proglaciaires (E), etc.

Une transformation de ces valeurs en classes de probabilité est donc nécessaire en exploitant la fonction sigmoïdale présentée précédemment (*cf. 4.3.11*). Pour rappel, cette dernière permet la transformation des valeurs obtenues par la fonction de décision en classes de probabilités par rapport à la classe positive. Dans ce cas présent, elle renseigne sur la probabilité d'un pixel à se trouver dans une portion de territoire

dans laquelle il est possible de rencontrer du pergélisol. La conversion des résultats a permis la conception d'une nouvelle carte (figure 19).

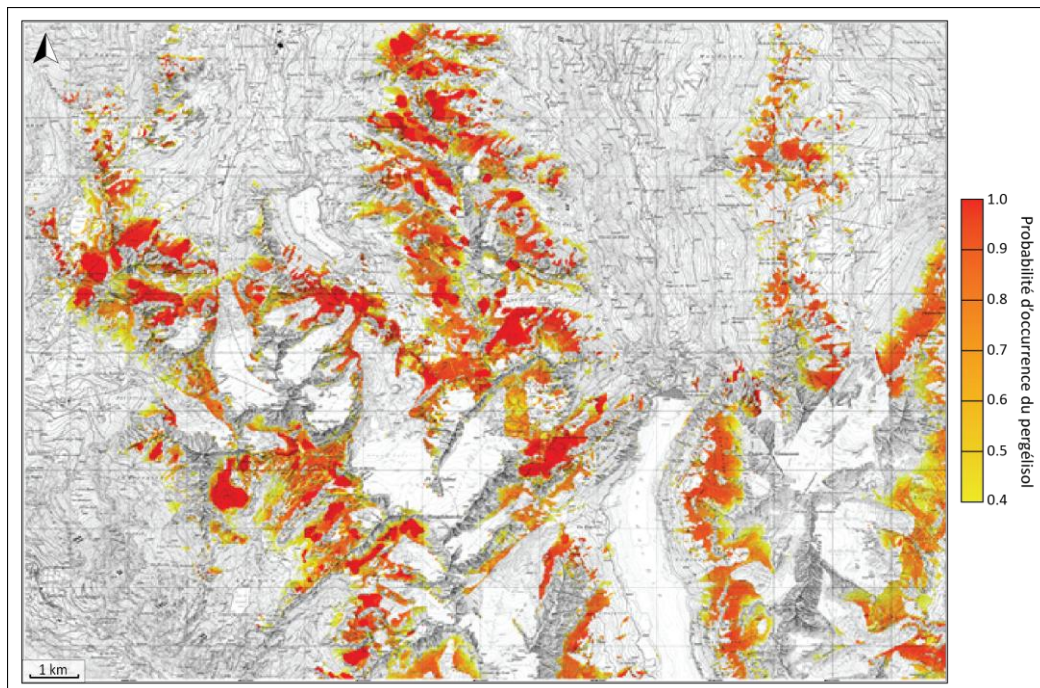


Figure V.19 : carte de la répartition du pergélisol potentielle dans les formation sédimentaires meubles. En dessous d'une probabilité d'occurrence de 40% le pergélisol (ou son absence) n'as pas été représenté. Dans cette carte la répartition du pergélisol dans les parois rocheuses n'est pas considéré.

Une analyse plus détaillée du résultat de cette modélisation en termes quantitatif et qualitatif est présentée dans le prochain chapitre de cette recherche (cf. 6). Une étude précise concernant la qualité statistique du modèle ainsi qu'une réflexion concernant la répartition du pergélisol par rapport aux formes géomorphologiques existantes dans les cinq régions d'intérêt particulier se révèlent en effet nécessaires à la validation du modèle PERB.

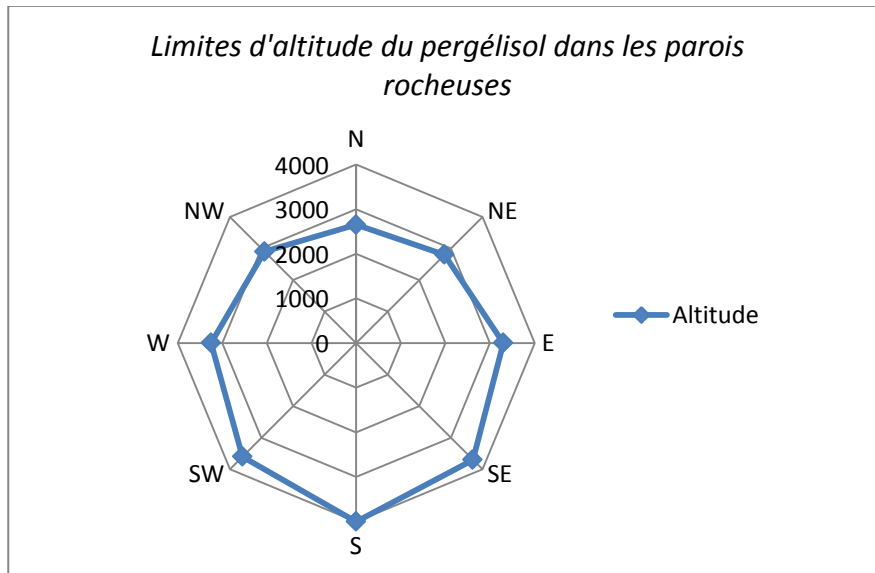
### 5.3 LA MODELISATION DU PERGELISOL ALPIN DANS LES PAROIS ROCHEUSES

Etant donné que le mode de la répartition du pergélisol dans les parois rocheuses suit des règles très différentes par rapport au pergélisol présent dans les terrains sédimentaires meubles, une démarche plus simple et empirique a été choisie pour la deuxième partie de la modélisation.

Les calculs qui suivent sont basés sur des mesures de température effectuées par PERMOS au cours de la période 1985-2006 dans des parois rocheuses de la région (PERMOS, 2009). La limite au-delà de laquelle il est possible de trouver du pergélisol a ainsi été obtenue pour les huit orientations principales (tableau V.III et graphique V.V).

Période	Orientation							
	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
	2650	2800	3300	3700	4000	3600	3250	2900

Tableau V.III : altitudes minimale pour lesquelles du pergélisol est observable dans les parois rocheuses (PERMOS, 2009).



Graphique V.V : altitudes minimale pour lesquelles du pergélisol est observable dans les parois rocheuses pour les 8 orientations (PERMOS, 2009).

Le raster mettant en évidence les parois rocheuses, déjà exploité dans le jeu de données des SVM, a été à nouveau utilisé afin d'exclure des tranches d'altitude dans lesquelles le permafrost devrait être absent. Une carte des parois potentiellement gelées en permanence a ainsi pu être produite et intégrée au résultat de la simulation par apprentissage automatique. La figure V.20 montre un aperçu des parois rocheuses qui ont été répertoriées comme étant potentiellement gelées en permanence (en violet).

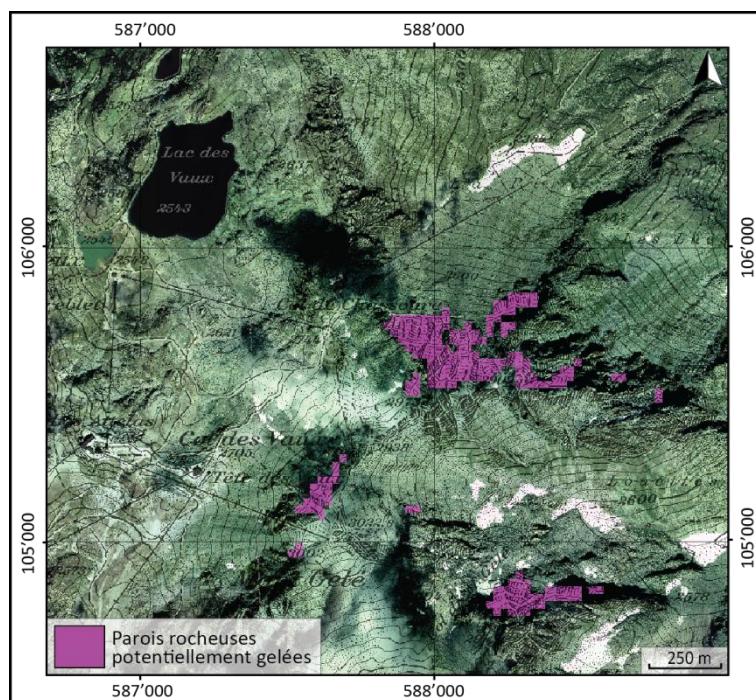


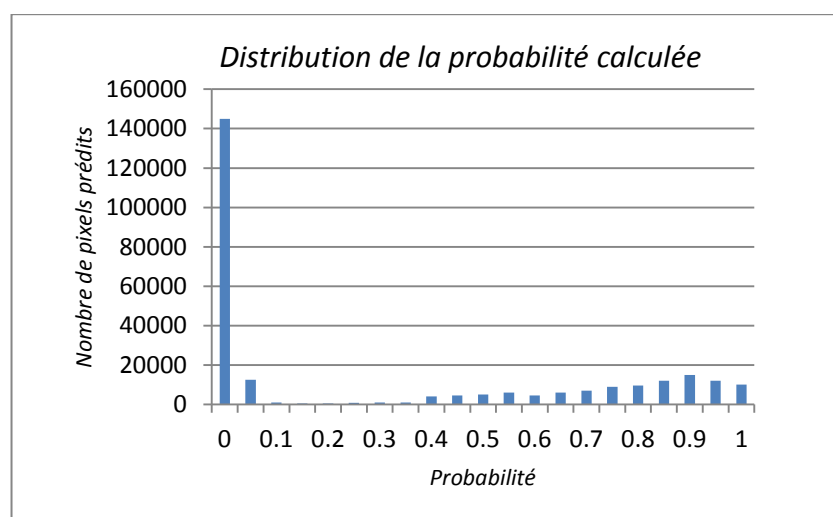
Figure V.20 : le modèle topoclimatique de la répartition du pergélisol dans les parois rocheuses, qui sera par la suite intégré au résultat des SVM.

## 5.4 CARTE DE L'EXTENSION POTENTIELLE DU PERGELISOL ALPIN ISSUE DE PERB

La fusion des résultats issus des deux démarches a permis de produire la carte finale de l'extension potentielle du pergélisol alpine pour le territoire couvert par la feuille Rosablanche. De la même manière que pour le modèle proposé par l'OFEV, les probabilités rencontrées du pergélisol ont été groupées en trois catégories :

- une probabilité en dessous de 40% est synonyme d'*absence de pergélisol* (ou rare)  
Les surfaces qui ont été identifiées comme appartenant à cette classe sont représentées en transparent.
- une probabilité entre 40% et 70% est synonyme de *pergélisol possible*  
Les surfaces qui ont été identifiées comme appartenant à cette classe sont représentées en jaune clair/jaune pale.
- une probabilité en dessus de 70% est synonyme de *pergélisol probable*  
Les surfaces qui ont été identifiées comme appartenant à cette classe sont représentées en orange/rouge.

Le choix de ces limites a été dicté de la répartition des probabilités calculées. Effectivement, une grosse portion de la totalité des pixels a été attribuée à une probabilité d'occurrence du pergélisol proche de 0% (*graphique V.VI*). A partir de 40% beaucoup plus d'échantillons ont été simulés comme étant potentiellement gelés en permanence. Le seuil de 70% a simplement été utilisé afin de diviser les classes de probabilités restant en deux groupes égaux (30% et 30%).



Graphique V.VI : distribution de la probabilité calculée pour la totalité des pixels du raster.

Une première analyse visuelle (*figure V.21*) permet de remarquer que la présence de pergélisol est largement répandue dans la région. Il se localise principalement dans les

zones non végétalisées et non englacées. De plus, la limite inférieure du pergélisol semble assez bien délimitée pour les différentes orientations. Toutefois, une meilleure analyse quantitative et qualitative est nécessaire pour que ce modèle soit considéré comme fiable. Le prochain chapitre a donc pour but de discuter le résultat de PERB et de comprendre ses qualités et ses limites.

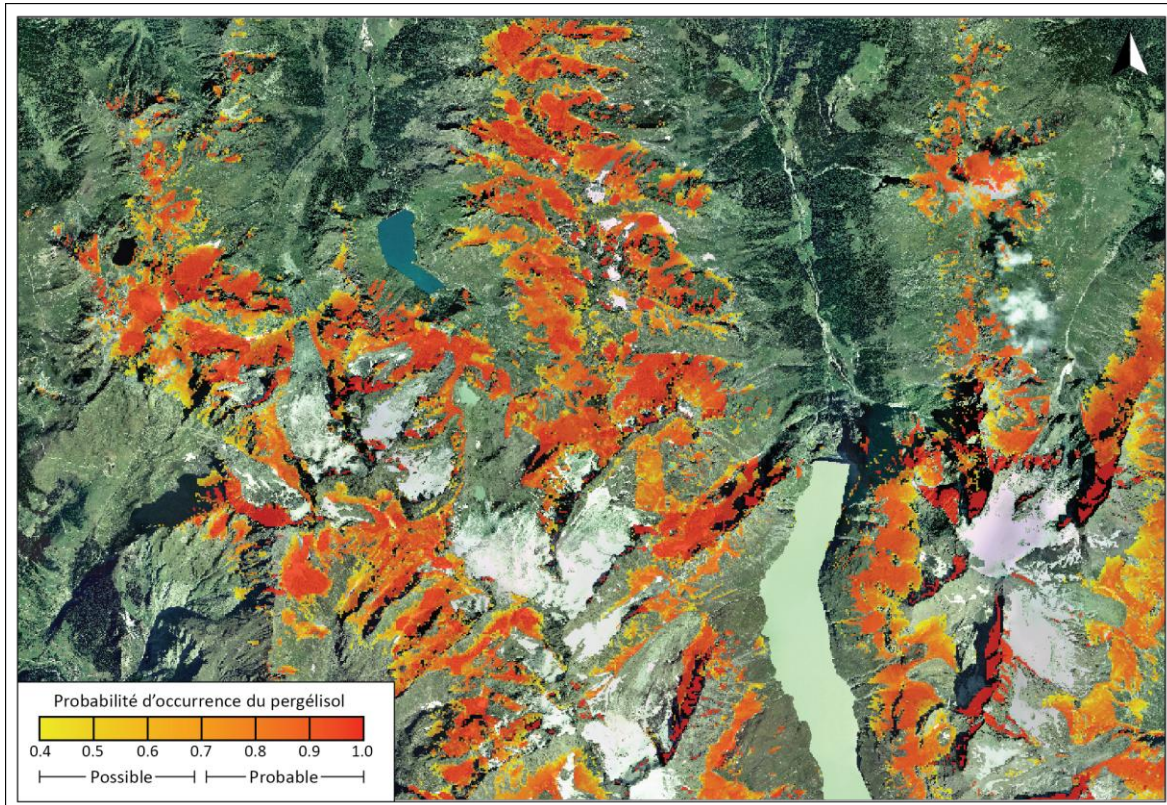


Figure V.21 : carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin pour la totalité de la feuille Rosablanche. Elle est issue d'une prédiction à l'aide des Machines à Vecteurs (terrains sédimentaires) et d'un modèle topoclimatique (parois rocheuses).





## **6. ANALYSES ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**



## 6.1 ANALYSES QUANTITATIVES

Ce sous-chapitre propose d'analyser de manière quantitative le résultat dérivant des machines à vecteurs de support et de le discuter. A ce propos, l'outil utilisé dans MatLab pour l'application de la méthode fournit quelques statistiques exploitables (*tableau VI.1*). En effet, la méthode offre au modélisateur la possibilité de calculer des indicateurs de qualité.

<b>Meilleure simulation PERB</b>	
Vecteurs de support	168
Meilleure C	1000
Meilleure sigma	16
Précision globale	0,9667
Surface ROC	0,9752

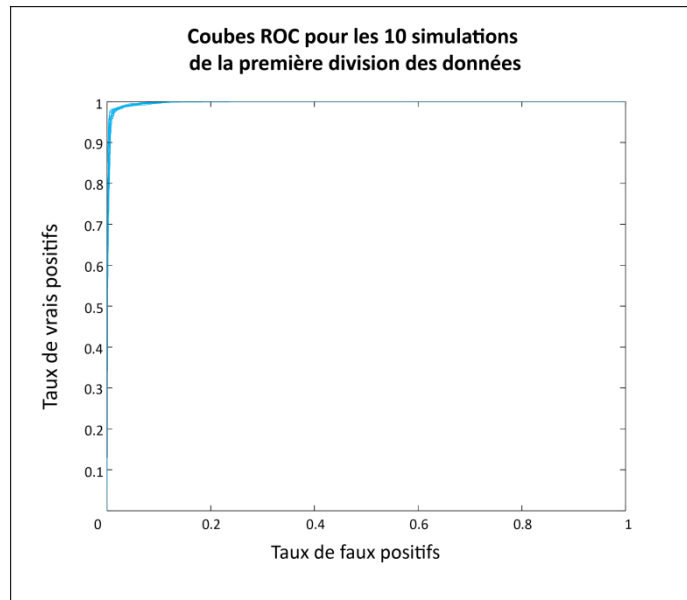
*Tableau VI.1: les caractéristiques de la meilleure simulation de PERB.*

La meilleure simulation de PERB qui a été retenue comme modèle final a été construite à l'aide de 168 vecteurs de support. Ces données se localisent donc sur les marges « -1 » et « +1 » et permettent de définir les limites séparant les deux classes. Il s'agit d'un nombre de vecteurs relativement faible comparé à la quantité de données contenus dans le jeu d'entraînement utilisé. Ceci peut s'expliquer par les poids attribués aux facteurs de contrôle. Sur un total de 15 variables, uniquement 6 ont une corrélation positive ou négative importante ( $\alpha > 0.5$  ou  $\alpha < -0.5$ ). Il semble par conséquent que la relation entre le pergélisol et les autres facteurs soit assez simple pour ce jeu de données. Les variables *Altitude*, *Eboulis*, *Glaciers rocheux*, *Couverture minérale*, *Températures*, *Glacier* et *Marge proglaciaire* sont suffisantes pour expliquer la répartition du pergélisol, ce qui permet de réduire fortement le nombre de vecteurs de support nécessaire à la modélisation.

Sur la base du nombre de pixels catégorisés comme des vrais positifs et des vrais négatifs, la précision globale peut être calculée. Cette analyse se base sur les résultats de la matrice de confusion indiquant le nombre de cas qui ont été classifiés par catégories de résultat (*cf. 4.3.10*). Malheureusement la *toolbox* de simulation à l'aide des SVM ne restitue pas les valeurs de la matrice de confusion, mais directement la valeur de la précision globale. Cette valeur est de 96.67% (*voir tableau VI.1*) ce qui indique que la quasi-totalité des échantillons ont été classés correctement et par conséquent que le modèle a fourni très peu de fausses alarmes (faux négatifs ou positifs).

Généralement, une précision globale si élevée est synonyme de surestimation du modèle. Dans ce cas, ceci s'explique probablement par les fortes corrélations des 6 variables citées plus haut. La faible corrélation que l'algorithme reconnaît entre le pergélisol et les autres facteurs provoque une forte généralisation du modèle et attribue la quasi-totalité de la responsabilité de la répartition du pergélisol à la couverture minérale, aux glaciers rocheux ou aux éboulis. Lorsque l'algorithme rencontre un pixel correspondant à ces types de surface, il le catégorise comme un vrai positif en raison de

la forte corrélation qui existe entre le pergélisol et ces variables. Il est donc probable que PERB modélise plus de sols gelés en permanence qu'ils n'en existent en réalité. L'hypothèse d'une surestimation est par ailleurs confirmée par une surface en-dessous de la courbe ROC qui vaut 97.52% du total (*graphique VI.1 et Annexes III, IV et V*). Cette surface indique une classification très proche de la perfection, ce qui est surprenant (et parfois irréel).



*Graphique VI.1: 10 courbes ROC du jeu de données divisé en 1600/1600/2800 exemples.*

Cette première analyse quantitative met ainsi en évidence des valeurs de précision très élevées qui pourraient indiquer que le résultat de PERB est correct. Toutefois, les indicateurs calculés donnent des résultats douteux. Une analyse qualitative de quelques secteurs spécifiques de la carte est donc nécessaire afin de comprendre visuellement comment la prédiction de la répartition du pergélisol a été effectuée. Elle permettra de vérifier les résultats de l'analyse quantitative et de finaliser l'évaluation du modèle.

## 6.2 ANALYSES QUALITATIVES

Dans ce sous-chapitre, une analyse des sites d'intérêt particulier est effectuée en rediscutant les motivations qui ont amené à choisir ces secteurs de la carte. Une comparaison visuelle entre une orthophoto (indiquant la topographie en transparence) et la répartition du pergélisol alpin selon PERB sera proposée.

### 6.2.1 Secteur des versants entourant le Mont Gelé

Selon PERB, ce site se caractérise par des larges surfaces possédant du pergélisol. Sa présence est plus importante dans les secteurs orientés Nord-ouest, Nord et Nord-est, tandis que la probabilité de trouver des terrains gelés en permanence sur les versants exposés aux autres orientations est clairement inférieure. Les exemples exploités pendant l'entraînement du modèle, notamment les glaciers rocheux des Yettes Condja (*figure VI.1:A*), les lobes du lac des Vaux (*figure VI.1:B*) et l'éboulis des Attelas (*figure VI.1:C*), sont mis en évidence sur la carte. Par ailleurs, d'autres surfaces pour lesquelles l'occurrence du pergélisol était inconnue ont été prédites par l'algorithme. C'est par exemple le cas de l'éboulis des Lues Rares (*figure VI.1:D*) ou les éboulis présents dans le vallon des Luettes Econdoue (*figure VI.1:E*). De plus, le modèle indique une plus forte probabilité de trouver du pergélisol à fur et à mesure que l'altitude augmente. Bien qu'elle ne corresponde pas un objectif prioritaire de cette recherche, cette tendance rejoint celle montrée par d'autres modélisations concernant la répartition du permafrost. Il apparaît par contre que la distribution atypique du pergélisol n'ait pas été correctement modélisée. Toutefois, de manière générale, la répartition du pergélisol à une échelle régionale semble être cohérente avec les notions théoriques présentées précédemment.

Plus localement, il est possible d'observer quelques pixels isolés indiquant la présence de pergélisol, par exemple dans les alentours du lac des Vaux. Ce résultat semble être incorrect et probablement ces probabilités élevées ont été calculée en raison de la présence d'une couverture minérale à ces endroits. Le modèle a donc probablement surestimé la répartition du pergélisol pour ces sites et une correction serait nécessaire.

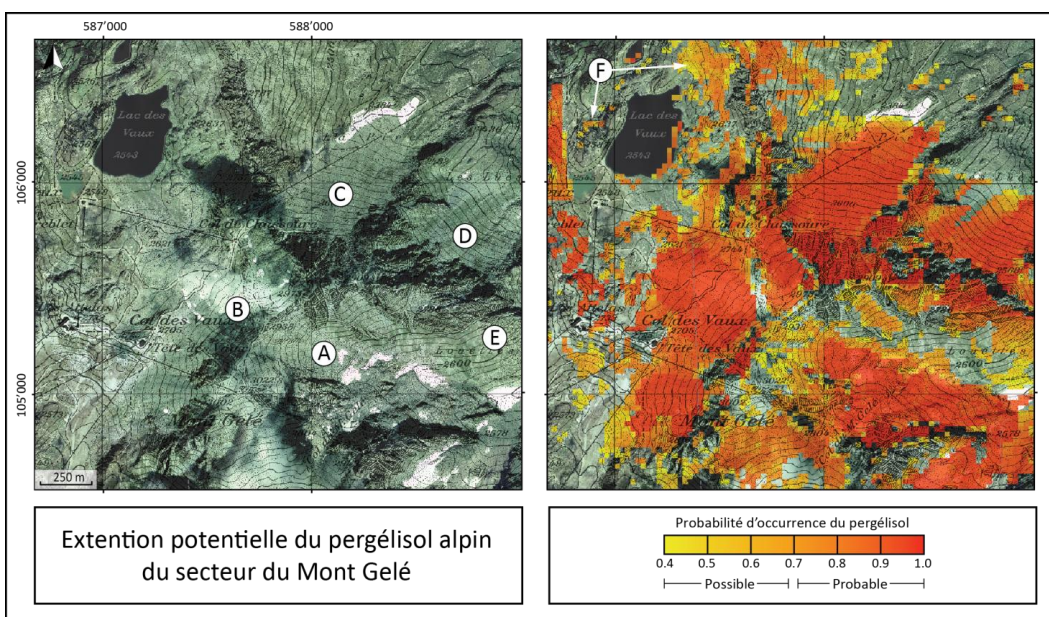


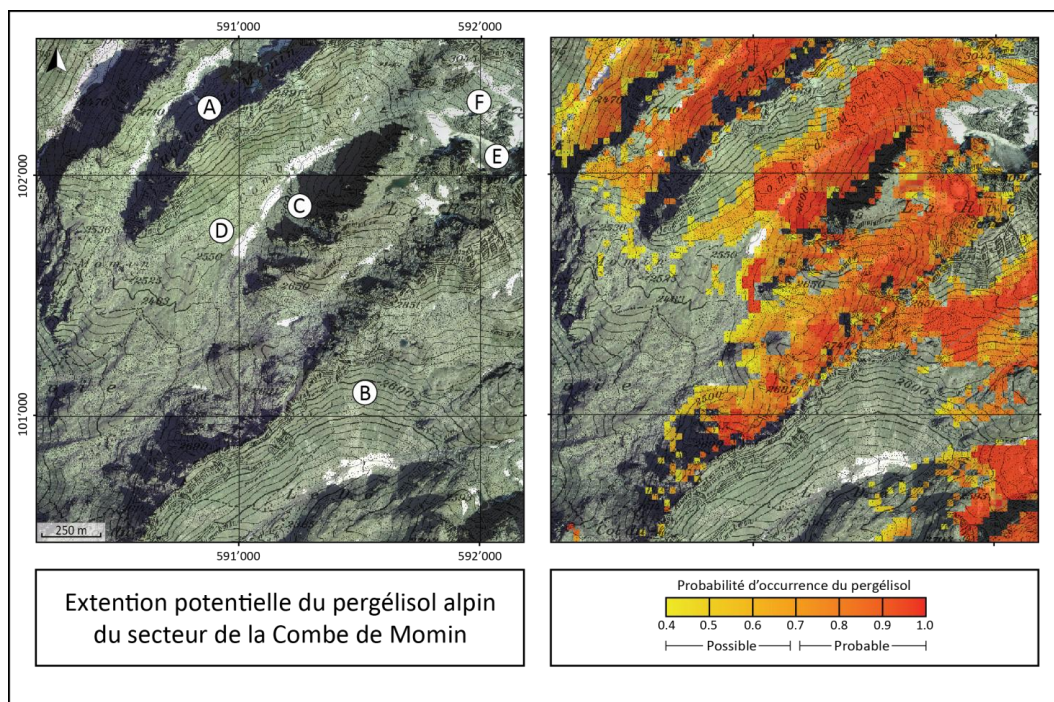
Figure VI.1 : carte de la répartition du pergélisol du secteur du Mont Gelé.

## 6.2.2 Secteur de la combe de Momin

Dans ce secteur, en règle générale, PERB simule la présence de pergélisol plus importante pour les versants qui sont orientés au Nord et au Nord-ouest par rapport aux autres orientations. Moins exposés au rayonnement solaire, ceux-ci se situent aussi en-dessous des parois rocheuses alimentant de petits éboulis (*figure VI.2:A*). Aucune paroi rocheuse ne semble être gelée en permanence, en raison de l'altitude trop faible qui caractérise le secteur de la combe de Momin. En se basant sur le même principe, il est possible d'expliquer l'attribution de la classe « *pergélisol possible* » (et non « *pergélisol probable* ») aux versants Nord par les faibles altitudes du site, qui sont assez proches de la limite inférieure de la ceinture du pergélisol alpin. En outre, les pentes végétalisées exposées au Sud sont dépourvues de pergélisol (*figure VI.2:B*), ce qui est en accord avec les règles empiriques de HAEBERLI (*cf.* 3.2.1). De plus, les glaciers rocheux actifs qui se localisent dans la combe (*figure VI.2:C*) ont été repérés de manière satisfaisante, ainsi que le glacier rocheux fossile qui se situe plus à l'aval (*figure VI.2:D*).

Par ailleurs, la combe de Momin fournit un premier exemple de la manière dont le modèle a simulé les glaciers et les marges proglaciaires. En effet, dans la partie Nord-ouest du secteur, c'est-à-dire dans les glacierets qui y résident (*figure VI.2:E*) et dans leur marge proglaciaire respective (*figure VI.2:F*), le pergélisol est complètement absent. Les poids  $\alpha_i$  des variables présentés précédemment se traduisent donc correctement sur la carte. L'altitude joue un rôle fondamental dans la prédiction de l'absence ou de l'occurrence possible ou probable du pergélisol. La corrélation négative entre la présence de terrains gelés en permanence et les glaciers ou marges proglaciaires semble aussi respectée. De même, l'orientation, la végétation et les terrains à couverture minérale semblent influencer correctement la présence ou l'absence de pergélisol. Sur la base de toutes ces considérations, l'analyse qualitative à l'échelle régionale de ce site se révèle par conséquent assez satisfaisante.

Figure VI.2 : carte de la répartition du pergélisol du secteur de la Combe de Momin.



### 6.2.3 Secteur de la Pointe et de la Combe d'Allèves

Ce site se caractérise par des morphologies très variées et riches en formes glaciaires et périglaciaires (cf. 4.2.2.3). Au final, la modélisation a bien repéré les glaciers rocheux aux pieds des Pointes des Autans, en amont de la Combe d'Allèves (figure VI.3:A). De plus, il faut remarquer la présence de quelques glacierets dont la surface a été classée comme dépourvue de pergélisol (figure VI.3:B).

Les versants restants sont exposés selon plusieurs orientations et ils sont la plupart du temps couverts de végétation (figure VI.3:C) ou occupés par des pierriers (figure VI.3:D). Pour le premier type de terrain, le modèle a simulé l'absence de pergélisol. Pour le deuxième par contre, une *occurrence probable* a été calculée. Comme pour le secteur précédent, il est intéressant d'observer que PERB a parfois mis en évidence une limite d'altitude différente selon l'orientation du versant. La limite d'altitude pour la présence de pergélisol sur les pentes régulières à l'Ouest de la Fenêtre d'Allèves et au Nord de la Pointe d'Allèves par exemple correspond à 2600-2650 mètres (figure VI.3:E). Par contre, sur le versant Sud-est de ce dernier sommet, les terrains sont complètement dépourvus de sols gelés en permanence (figure VI.3:F).

Une fois de plus, PERB montre la relation communément acceptée entre l'altitude et l'occurrence du pergélisol, sans tenir compte de la distribution atypique de ce dernier causée par l'effet de ventilation dans les éboulis.

Cependant, pour quelques exemples localisés, des versants avec une *occurrence probable* ont été mis en évidence à l'aval de secteurs ayant une *occurrence possible*. C'est par exemple le cas de l'éboulis au Nord de la Pointe d'Allèves (figure VI.3:G). Dans le jeu de données d'entraînement, une forte discontinuité spatiale entre amont et aval qui caractérise la distribution atypique avait été suggérée pour les éboulis (cf. 5.2.3). Il est toutefois difficile de savoir si le modèle a effectivement reconnu la relation qui existe entre le pergélisol et les exemples d'entraînement concernant les éboulis ou si cette classification est due à d'autres facteurs.

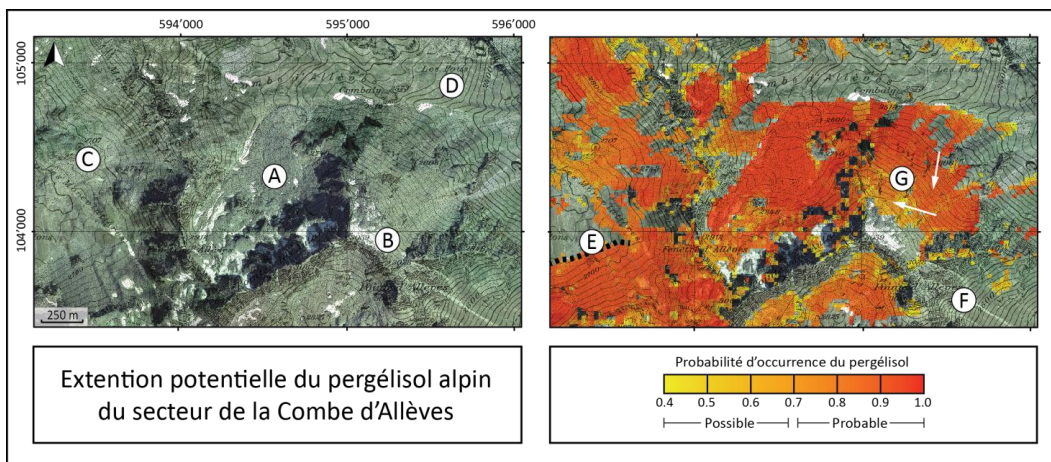


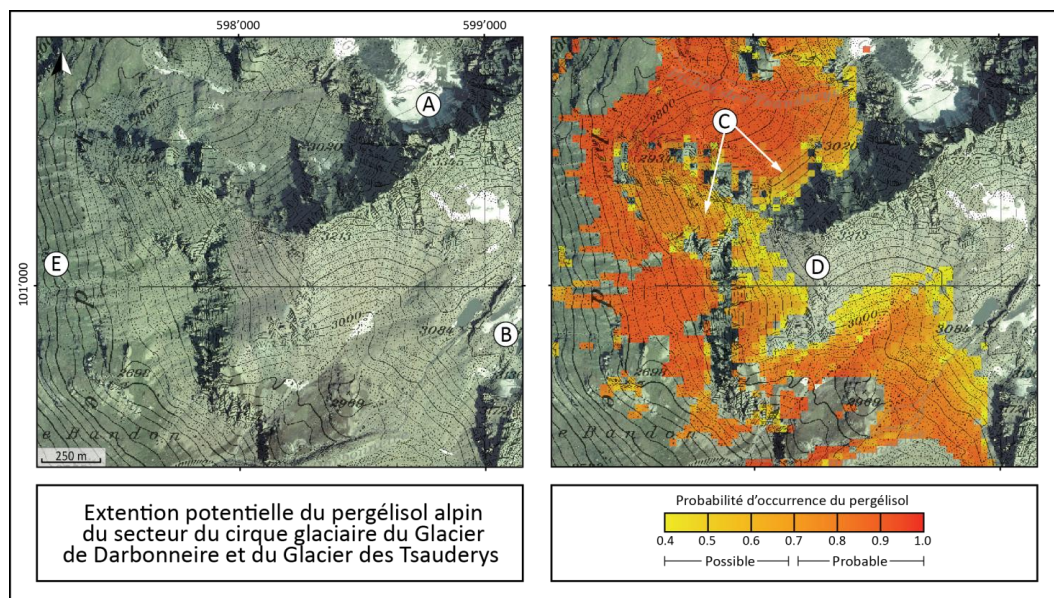
Figure VI.3 : carte de la répartition du pergélisol du secteur de la Combe d'Allèves.

## 6.2.4 Secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du Glacier des Tsauderys

L'analyse de ce site est très intéressante car il est caractérisé par des versants à forte composante minérale, ainsi que par la totale absence de glaciers rocheux répertoriés dans l'inventaire utilisé pour l'entraînement du modèle. Pour les différentes orientations des versants de ce secteur, le résultat de PERB est assez satisfaisant du point de vue de la répartition du pergélisol. En effet, le modèle indique une occurrence supérieure pour les versants orientés au Nord par rapport de ceux exposés au Sud. De plus, aucune zone de pergélisol n'a été cartographiée dans la portion de territoire couverte par les glaciers des Tsauderys (*figure VI.4:A*) et par la marge proglaciaire située dans le cirque glaciaire de Darbonneire (*figure VI.4:B*).

Concernant l'éboulis ou les pierriers se localisant au Nord du secteur (*figure VI.4:C*), la simulation a calculé une occurrence probable pour la plupart d'entre eux. Bien que la partie distale de l'éboulis ne soit pas délimitée clairement par rapport à sa partie sommitale, cette formation se caractérise par une probabilité d'occurrence du pergélisol plus importante à sa base. Comme pour le secteur de référence précédent, il est difficile d'affirmer exactement la relation qui a été reconnue par l'algorithme entre le pergélisol et les caractéristiques morpho-climatiques de ces versants. Toutefois, il est probable que les Machines à Vecteurs de Support aient simulé une occurrence probable à l'aval et une occurrence possible à l'amont sur la base des exemples en matière d'éboulis fournis lors de l'entraînement du modèle.

Figure VI.4 : carte de la répartition du pergélisol du secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du Glacier des Tsauderys.



Une tendance similaire mais nettement plus marquée été observable pour les éboulis se localisant dans la partie Ouest du secteur (*figure VI.4:D*) et à l'aval de la marge proglaciaire du glacier de Darbonneire. Ces formations se caractérisent par des pentes régulières qui maintiennent la même orientation tout le long de leur pente. Pour ces sites, PERB indique une absence totale de pergélisol dans la moitié amont du versant, opposée à du pergélisol possible dans la moitié aval. Il semble donc que les SVM aient



simulé correctement la distribution atypique dans ces éboulis, même si cet objectif a été atteint que très localement.

Ce secteur offre cependant la possibilité de lancer quelques critiques sur le résultat. A l'aval des éboulis situés à l'Ouest (*figure VI.4:E*), la carte indique des pixels localisés qu'à première vue semblent être des dépôts torrentiels. Comme PERB se base fortement sur la cartographie proposée par Swisstopo, ces dépôts appartiennent probablement à la variable « Couverture minérale » bien qu'ils se soient déposés sur de la pelouse. Le modèle indique du pergélisol probable pour ces sites localisés, ce qui n'est probablement le cas dans la réalité. Probablement, très localement (au niveau de quelques pixels), la simulation estime de manière inexacte la répartition potentielle du pergélisol.

### 6.2.5 Secteur du Mont Rouge et du Pic d'Artsinol

Ce dernier site de référence est fortement végétalisé et seules quelques formes périglaciaires sont présentes à l'aval des parois rocheuses du Mont Rouge et du Pic d'Artsinol (*figure VI.5:A*). La modélisation a correctement calculé une faible probabilité de rencontrer du pergélisol dans les zones à pelouse alpine (*figure VI.5:B*). Au contraire, dans les pentes qui entourent les deux sommets plus en amont, une occurrence plus importante a été modélisée. Il s'agit de surfaces à forte composante minérale, qui sont affectées à la catégorie des pierriers dans la couche des surfaces primaires. Il s'agit principalement d'éboulis et de dépôt de débris qui s'éboulent des sommets. Comme il était le cas pour les exemples précédents, quelques pixels localisés indiquent la présence de pergélisol, probablement en raison de la cartographie de Swisstopo les décrivant comme des surfaces à couverture minérale (*figure VI.5:C*).

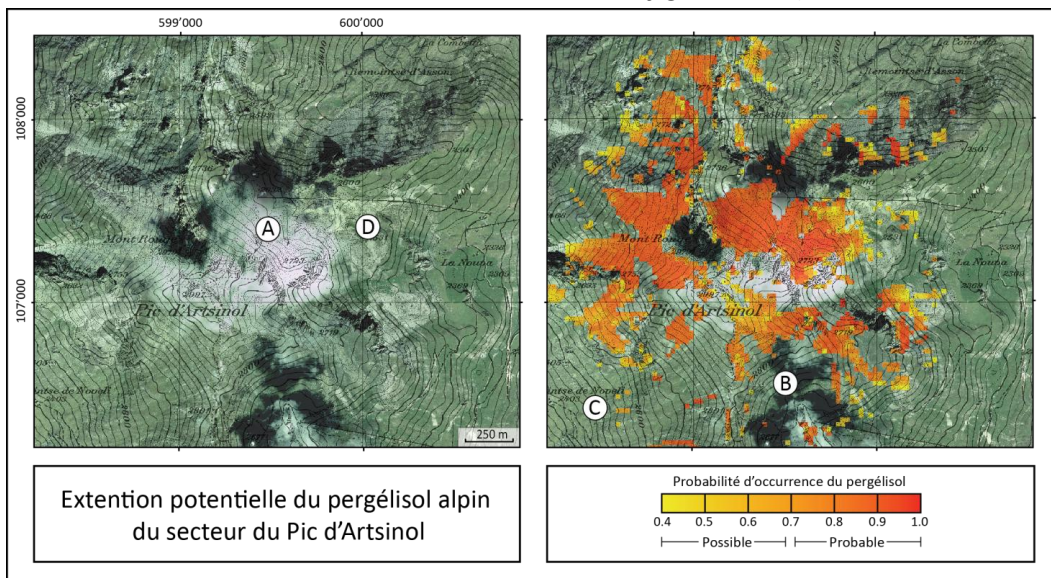
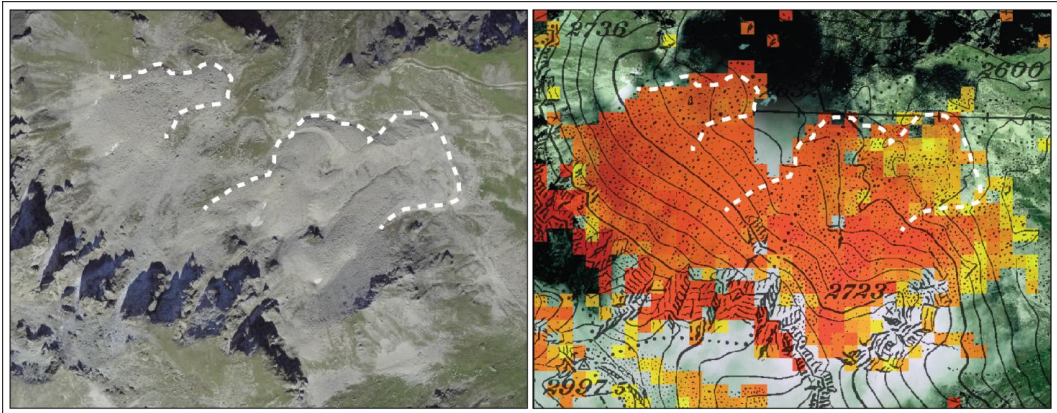


Figure VI.5 : carte de la répartition du pergélisol du secteur du Pic d'Artsinol.

L'étude de ce site est intéressante car le fond topographique montre la présence de deux lobes de taille importante dans le versant situé au Nord (*figure VI.5:D*). L'orthophoto fournie par Swisstopo ne permet pas de visualiser clairement ce secteur car le ciel était

couvert lors de la capture de l'image. Cependant, un aperçu tiré du géo-portail de l'OFEV permet d'observer les fronts lobés de ces formes de fluage, qui correspondent vraisemblablement à trois glaciers rocheux (figure VI.6).

Figure VI.6 : cartographie des deux glaciers rocheux en amont du Pic d'Artsinol.



Dans ce cas, les Machines à Vecteurs de Support se sont donc révélées capables d'effectuer une prédiction correcte sur une zone pour laquelle aucun glacier rocheux ou forme géomorphologique lobée n'avait été répertorié. A nouveau, il est difficile d'interpréter la démarche exacte qui a permis à la méthode d'aboutir à un résultat si correcte et particulièrement bien défini du point de vue des limites de ces formes de fluage périglaciaire.

## 6.3 DISCUSSION DES RÉSULTATS

### 6.3.1 Synthèse des résultats

Une synthèse des caractéristiques principales de PERB et de la méthode peut à ce moment être proposée. Globalement, la modélisation de l'extension potentielle du pergélisol semble être correcte à l'exception de quelques cas particuliers. La probabilité d'occurrence du pergélisol est généralement plus importante pour les versants exposés au Nord, tandis que celle des versants au Sud est souvent moins élevée. De la même manière, la carte n'indique pas la présence de sols gelés en permanence en dessous d'une certaine altitude. Cela signifie que les Machines à Vecteurs de Support ont su reconnaître la limite inférieure du pergélisol sur la base des exemples fournis dans le jeu de données d'entraînement. De plus, PERB semble montrer une augmentation des probabilités lors qu'aussi l'altitude augmente. En outre, en accord avec les règles empiriques de HAEBERLI (cf. 3.2.1), l'absence de pergélisol dans les zones végétalisées a ainsi été correctement simulée. De même, les glaciers, les marges proglaciaires, les lacs et les zones bâties ont été repérés comme en étant dépourvus.

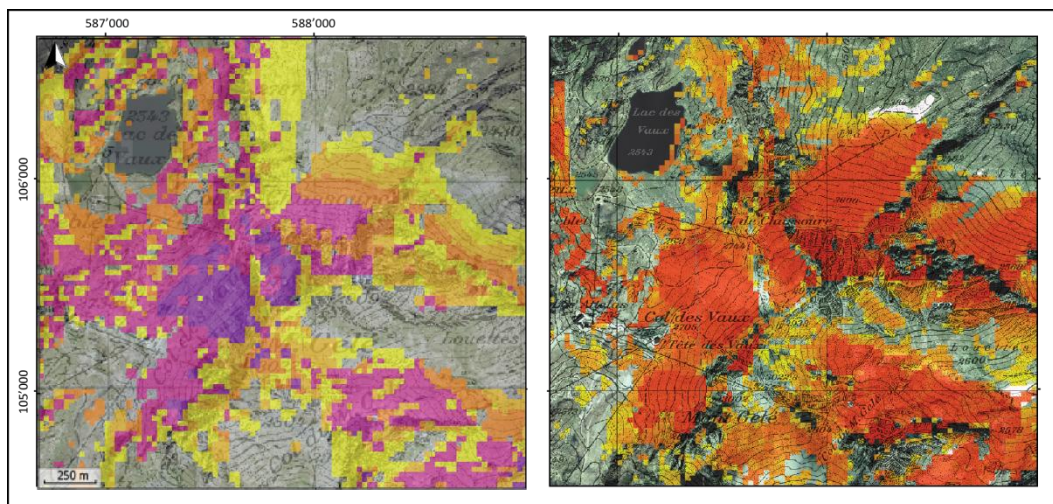
En ce qui concerne la répartition du pergélisol dans les éboulis, le résultat n'est pas si satisfaisant. Cependant, localement, la méthode semble prédire une occurrence probable à l'aval d'une occurrence possible (cf. 6.2.3 et 6.2.4). La moitié inférieure des éboulis n'est pas délimitée de la moitié supérieure comme il était souhaité. Toutefois, ce premier résultat base des bonnes bases pour un développement futur du modèle en montrant la puissance des SVM, qui pourraient probablement être efficaces pour une simulation de la distribution atypique du pergélisol dans les éboulis plus correcte.

### 6.3.2 Comparaisons avec la carte officielle de l'extension potentielle du pergélisol

Le modèle officiel de l'OFEV (qui, par simplicité, sera appelé M-OFEV par la suite) est actuellement le modèle le plus connu en Suisse et le seul à décrire la répartition potentielle du pergélisol pour tout le pays (cf. 3.2.2.1). Une comparaison entre cette modélisation et PERB permet donc une analyse intéressante afin de comprendre les qualités et les limites de la simulation proposée dans le cadre de cette recherche. L'images comparant les deux modèles dans le secteur du Mont Gelé (figure VI.7) indiquent que PERB est généralement moins optimiste par rapport à M-OFEV. En effet, la portion de territoire qui a été répertoriée comme étant des pergélisols est moins étendue dans PERB. Il est cependant intéressant de remarquer que les endroits où la probabilité de retrouver du pergélisol est importante (en violet pour M-OFEV, en rouge pour PERB), les résultats des deux modèles sont très proches. Il s'agit notamment des versants au Nord-Ouest du Mont Gelé et au Nord du Col du Mont Gelé. Par contre, quelques différences existent. PERB prédit par exemple de manière différente l'éboulis des Lapires (figure VI.7:A), en calculant la même probabilité pour pratiquement

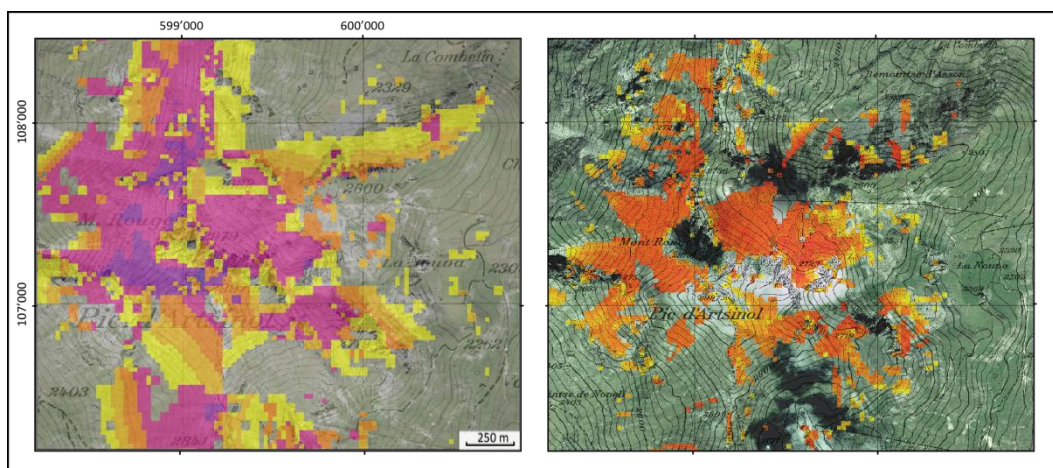
l'ensemble de la pente. De même, quelques petits éboulis à l'amont du vallon des Luettes Econdoue (*figure VI.7:B*) ont été classés comme étant gelés en permanence, ce qui n'est pas le cas dans M-OFEV. De manière semblable, PERB semble simuler une probabilité d'occurrence du pergélisol importante pour le versant Sud du Mont Gelé, ce qui n'est pas le cas pour le résultat proposé par M-OFEV. Pour ces deux derniers exemples, M-OFEV semble être plus correcte car les deux sites se caractérisent, d'après une analyse visuelle à l'aide d'une orthophoto, par de la végétation. Pour ces mêmes endroits, le jeu de données indiquait des versants à couverture minérale, ce qui a probablement induit les Machines à Vecteurs de Support à y simuler du pergélisol.

Figure VI.7 : comparaison des modèles de répartition du pergélisol M-OFEV et PERB pour le secteur du Mont Gelé.



En règle générale, PERB semble plus tenir compte de la limite entre les surfaces à couverture végétale et celles à couverture minérale par rapport à M-OFEV. Le pergélisol dans les éboulis et les pierriers est effectivement mieux détecté et la surface totale des terrains potentiellement gelés en permanence est clairement plus réduite par rapport au modèle de l'OFEV (*figure VI.8*). Les surfaces végétalisées aux pieds du Pic d'Artsinol, dépourvue en pergélisol et opposées aux surfaces à couverture minérale potentiellement gelées, en sont un bon exemple. Il est cependant évident que la validité de ce résultat est totalement dépendante de la précision de la cartographie proposée par Swisstopo.

Figure VI.8 : comparaison des modèles de répartition du pergélisol M-OFEV et PERB pour le secteur du Pic d'Artsinol.



Ainsi, il apparaît que M-OFEV ne tient jamais compte de la discontinuité spatiale amont-aval. En effet, l'altitude semble être le facteur prépondérant déterminant l'occurrence du pergélisol. Bien qu'un résultat correspondant parfaitement à la réalité est loin, PERB simule mieux (ou de manière moins imprécise) la distribution atypique dans les sédiments meubles.

### 6.3.3 Les limites de PERB

En vue de mettre en lien les analyses qui viennent d'être présentées, une discussion concernant les limites de PERB s'avère nécessaire. En règle générale, la carte résultant de la modélisation par Machines à Vecteurs de Support et du modèle topoclimatique focalisé sur les parois rocheuses s'est révélée assez valable et en accord avec les notions théoriques présentées précédemment. Le modèle est nettement moins optimiste par rapport au modèle proposé par l'OFEV, bien qu'une portion de territoire encore plus importante puisse probablement être exclue de la simulation. En effet, les analyses quantitatives basées sur la courbe ROC et la matrice de confusion ont indiqué une précision globale considérable. Ceci est généralement dû à une surestimation du modèle. Par conséquent, ce dernier a probablement calculé des probabilités trop élevées pour des surfaces ne pouvant pas répondre à des conditions de gel en permanence. Toutefois, il faut garder à l'esprit que PERB se base sur un jeu de données et un nombre de variables retenues réduits. Le résultat final correspond au meilleur modèle possible sur la base de ce même jeu de données. Il pourrait par contre être différent si la simulation était réalisée sur la base d'un autre jeu de données, car la dépendance entre les variables et le permafrost ne serait plus la même et l'apprentissage par l'algorithme aboutirait à un résultat différent.

En outre, l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain d'une résolution de 25 mètres a probablement été une des limites principales de PERB. En effet, les microformes ne peuvent pas être reconnues car elles sont trop petites pour être détectées. Des petits glaciers rocheux, des protalus rampart ou des loupes de gélifluxion, dont la largeur dépasse difficilement les 25 mètres, sont par exemple concernés par ce problème. La convexité de ces formes ne peut être identifiée et les Machines à Vecteurs de Support ne sont pas capables de les repérer automatiquement. Ce constat n'est pas nécessairement problématique lorsque l'objectif est de modéliser le pergélisol à l'échelle régionale. Toutefois, comme un des objectifs de cette recherche était de tester une méthode et l'adaptabilité du modèle à une échelle plus locale, il est nécessaire de rappeler qu'il faut être particulièrement attentif au choix d'un MNT adapté aux buts de la modélisation.

La comparaison entre le résultat de PERB et la carte proposée par M-OFEV a ainsi mis en évidence la forte dépendance qui existe entre la qualité du modèle et la précision de la cartographie des surfaces primaires de Swisstopo. La *Couverture minérale* était un parmi les poids les plus significatifs (cf. 5.2.6) utilisés par PERB pour simuler la répartition potentielle sur la base des relations qui demeurent entre les variables et le pergélisol.

Une délimitation correcte des surfaces à couverture minérale se révèle décisive dans l'objectif de fournir un résultat satisfaisant. Il a été par exemple le cas pour l'éboulis au Sud du Mont Gelé présenté précédemment (*figure VI.7*). Bien que un modèle à l'échelle régionale tel que PERB doit admettre de la généralisation résultant des données utilisées à sa création, une réflexion sur cette problématique est sûrement nécessaire afin d'éviter des erreurs localisés dans la prédiction du pergélisol.

Concernant la distribution atypique du pergélisol dans les éboulis, est généralement mal représentée par PERB. Toutefois, pour quelques cas localisés, la méthode semble mettre en évidence des zones d'une occurrence possible en amont de secteur ayant une occurrence probable. La méthode des Machines à Vecteur de Support semble donc être prometteuse à ce propos. Néanmoins, dans le modèle, la limite entre les deux classes de probabilités ne se situe généralement pas entre la moitié inférieure et la moitié supérieure des éboulis. Deux variables discriminantes (« *Moitié inférieure* » et « *Moitié supérieure* » de l'éboulis) devraient être incluses dans le jeu de données, afin de renforcer la relation entre l'occurrence du pergélisol et la localisation des pixels dans la pente. Pendant la période consacrée à l'analyse des données dans le cadre de cette recherche, des efforts ont été consentis détecter automatiquement la partie sommitale et la partie distale des éboulis. Ces essais n'ont malheureusement abouti à aucun résultat crédible. La démarche et les résultats obtenus n'ont pas donc pas été présentés dans ce document.

### 6.3.4 Clé d'interprétation de la carte à l'échelle locale et de l'objet

La carte de l'extension potentielle du pergélisol proposée est bien adaptée à une échelle régionale et locale, cependant la qualité des résultats de la simulation devient plus faible lorsque l'échelle s'agrandit et qu'une analyse des microstructures est souhaitée (*cf. 6.3.3*).

Dans le cadre de la modélisation de l'extension potentielle du pergélisol à l'échelle des Alpes (*cf. 3.2.2.2*), BOECKLI *ET AL.* (2011) ont conçu une clé d'interprétation facilitant la lecture de leur carte sur le terrain. La même démarche peut aisément être appliquée en vue d'interpréter le résultat de PERB. Quatre principaux types de surfaces sont pris en considération par cette clé : les éboulis, les versants (partiellement) végétalisés, les glaciers rocheux et les parois rocheuses. Selon la position à laquelle le lecteur de carte issue du modèle se situe, plusieurs conditions typiques sont mises en évidence.

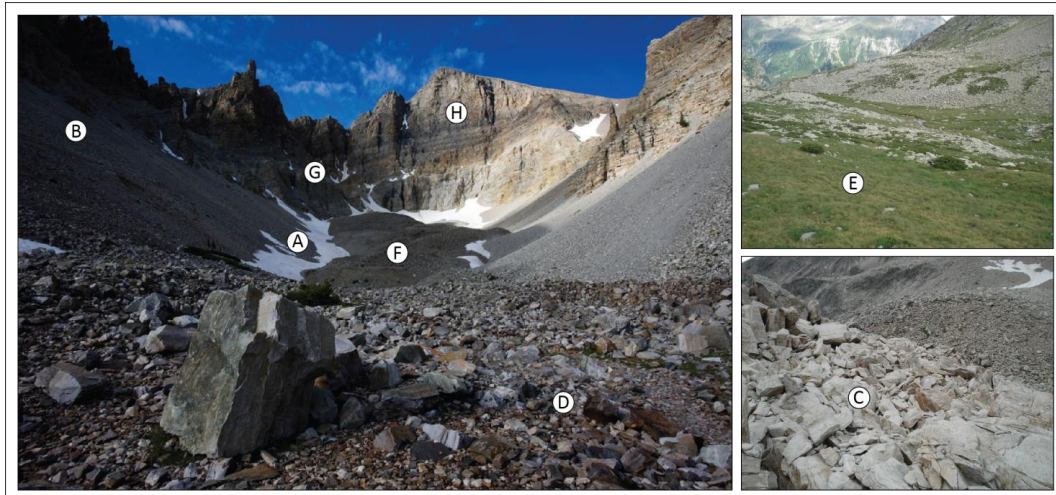


Figure VI.9 : environnements typiques pour lesquelles une clé d'interprétation du modèle pourrait être utile (Photos : ©Rogers (gauche), Deluigi(droite)).

- Eboulis en fonction du granoclassement des matériaux, de la circulation d'air à l'intérieur de la formation sédimentaire ou de la présence et la distribution de la neige, il est possible de mettre en évidence les conditions thermiques différentes dans ce type de formation. Souvent, le pied de pente (*figure VI.9:A*) possède la MAGST la plus froide car il comprend des matériaux plus grossiers et il est souvent recouvert d'une couche de neige d'origine avalancheuse qui perdure plus longtemps. Des taches de neige permanentes indiquent aussi un état thermique du sol froid.  
Par contre, la partie amont (*figure VI.9:B*) d'un éboulis est affectée par des conditions thermiques plus chaudes car elle est composée généralement de matériaux plus fin et moins poreux.
- Versants (partiellement) végétalisés : pour ce type de terrain, il est important de tenir compte de la taille des matériaux présents sur le site, des propriétés du sol et de la végétation existante. Une couverture sédimentaire à gros blocs (*figure VI.9:C*), poreuse et non remplie de matériaux fins, peut indiquer des conditions thermiques froides. La présence de roche en place, d'un sol à couverture minérale de taille très fine ou à gros blocs saturés en matériaux fins (*figure VI.9:D*) désignent généralement des températures chaudes. Un versant à couverture végétale (*figure VI.9:E*) indique normalement l'absence de pergélisol.
- Glaciers rocheux intact (*figure VI.9:F*): ils indiquent la présence de pergélisol lorsque des traces de mouvement sont observables (front raide et rides de déformation). Cependant, l'évaluation des conditions thermiques à proximité de ces formes est difficile en l'absence d'analyses supplémentaires.
- Parois rocheuses : la microtopographie d'une paroi rocheuse liée notamment à la fracturation de la roche rend ce type d'environnement

périglacière très discontinue. Une surface très hétérogène (*figure VI.9:G*) permet souvent le dépôt d'une couche de neige dans les zones fracturées, favorisant des conditions thermiques froides. Les parois rocheuses verticales (*figure VI.9:H*), au contraire, sont souvent soumises à des conditions plus chaudes si l'altitude du site n'est pas suffisamment élevée. Une attention particulière est ainsi nécessaire concernant l'exposition du site d'étude au soleil.







## **7. CONCLUSION**



## 7. CONCLUSION

La modélisation d'un phénomène naturel est importante tant du point de vue de la recherche fondamentale que du point de vue de la prévention contre les risques naturels. Cette recherche s'inscrit dans ces deux domaines en proposant d'une part, de tester une méthode afin de contribuer au développement d'une modélisation du pergélisol alpin de plus en plus fiable, et de l'autre de concevoir une nouvelle carte de l'extension du pergélisol, qui pourrait être utilisée comme outil de planification territoriale.

Au vue de ces considérations, divers éléments de conclusions générales, ainsi que de perspectives de recherche peuvent être formulés.

### 7.1 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La modélisation de la discontinuité spatiale qui caractérise la répartition du pergélisol alpin dans les éboulis était un des défis principaux de ce travail de mémoire. En effet, comme l'affirment par exemple DELALOYE (2004), LAMBIEL (2006) et SCAPOZZA (2012) la croyance qu'uniquement les facteurs topoclimatiques (MAAT, radiation solaire directe, orientations du versant, etc.) régissent l'occurrence du pergélisol n'est pas toujours exacte. Les auteurs affirment au contraire que les différences thermiques observées entre la partie distale et la partie sommitale des éboulis sont à mettre en relation avec une ventilation à l'intérieur des matériaux poreux, une granulométrie différente pour ces deux secteurs et une redistribution de la neige vers l'aval par les avalanches.

La simulation de cette répartition discontinue dans le cadre d'un modèle de répartition du pergélisol a été tentée à plusieurs reprises sans succès. Plusieurs auteurs (par exemple HOELZLE *ET AL.*, 2005) se sont déjà interrogés sur les réelles possibilités d'aboutir à un résultat crédible. L'objectif principal de ce travail de mémoire était donc de contribuer à la recherche de techniques permettant d'aboutir à ce résultat.

La carte de l'extension potentielle du pergélisol alpin couvrant la région visible sur la feuille Rosablancche s'est révélée qualitativement satisfaisante, notamment en la comparant à d'autres modèles existants. Elle semble s'approcher de la réalité tout en respectant les notions théoriques concernant la répartition typique du pergélisol, mettant en relation son occurrence avec l'altitude. Pour la plupart des versants qui ont été étudiés, la méthode a permis de reconnaître automatiquement la limite du pergélisol alpin pour les huit orientations principales.

Malheureusement, la modélisation de la répartition discontinue du pergélisol dans les éboulis n'a pas abouti complètement au résultat souhaité. La présence de pergélisol dans la partie aval d'un ébouli et son absence dans la moitié amont n'ont été repérées que très localement et de manière approximative. Ce résultat est probablement lié au faible nombre d'exemples utilisés dans le jeu de données d'entraînement. Les éboulis dans la partie Ouest du secteur du cirque glaciaire du Glacier de Darbonneire et du

Glacier des Tsauderys en sont un bon exemple (*cf. 6.2.4*), car la limite entre le pergélisol probable en dessous du pergélisol possible se localise trop en amont par rapport au modèle conceptuel de la distribution atypique (*cf. 3.1.4.1*).

Ces éléments mettent cependant en évidence que la méthode utilisée pour le développement de PERB est valable et que des perspectives d'amélioration sont clairement possibles dans ce domaine. A la suite des analyses effectuées sur la carte obtenue, PERB se révèle donc efficace et la cartographie de l'extension potentielle du pergélisol est satisfaisante, soit à une échelle régionale qu'à une échelle locale. Dans un objectif d'adaptation du modèle à une échelle plus grande (échelle d'un éboulis, par exemple), d'autres facteurs plus spécifiques devraient être exploités (*cf. 6.3.3*). Plusieurs perspectives de recherche peuvent ainsi être mises en évidence.

## 7.2 PERSPECTIVES DES RECHERCHE

Afin de pallier aux problèmes indiqués précédemment, quelques suggestions quant aux stratégies à adapter pour le développement futur de ce domaine de recherche sont proposées. L'efficacité de la méthode à l'échelle d'un versant nécessite d'être testée sur un secteur plus réduit par rapport à la totalité de la surface couverte par une carte topographique. Une simulation de la répartition du pergélisol dans un versant (comme celui de l'éboulis des Lapires par exemple) en exploitant des données numériques plus précises pourrait par exemple donner un résultat intéressant. Il s'agirait cependant d'effectuer des mesures et des relevés dans le secteur, en effectuant par exemple un scan à l'aide d'un LIDAR permettant d'avoir à disposition un nouveau Modèle Numérique de Terrain plus précis que le MNT25. Des analyses plus rigoureuses concernant le choix des variables à prendre en compte pourrait dès lors débiter.

En outre, PERB interprète les surfaces à couverture minérale comme synonyme de pergélisol lorsque l'altitude et l'orientation sont favorables. Dans la réalité, la granulométrie joue un rôle fondamental dans la répartition atypique du pergélisol dans les éboulis. Si aucune technique d'extrapolation de l'information sur la base d'images satellites semble satisfaisante, une cartographie de la taille des matériaux qui occupent le versant serait utile dans l'objectif de valider la méthode. Sur le même principe, si aucune solution permettant de diviser automatiquement la moitié amont de la moitié aval des éboulis n'est découverte à l'avenir, un inventaire des éboulis sur le terrain pourrait se révéler nécessaire.

Si une modélisation crédible à l'échelle du versant voyait le jour, de nouveaux facteurs de contrôle pourraient être inclus dans un jeu de données s'intéressant à une échelle plus réduite. Il est évident qu'idéalement, cela ne devrait pas nécessiter un travail de cartographie sur le terrain, mais devrait être établie automatiquement. Cependant, à l'heure actuelle, cette perspective ne semble malheureusement pas envisageable. Dès lors, beaucoup de questions restent ouvertes ...







## 8. RÉFÉRENCES

## 8. RÉFÉRENCES

- Allen S., Gruber S., and Owens, I (2009). Exploring steep bedrock permafrost and its relationship with recent slope failures in the Southern Alps of New Zealand, *Permafrost Periglac.*, 20, 345–356
- Balch E.S. (1900). *Glaciers or freezing caverns*. Philadelphia, Allen Lane & Scott.
- Baroni C., Carton A., Seppi R. (2004). Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella massif (Italian Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, 243-259
- Barsch D. (1969). Permafrost in der oberen subnivalen Stufe der Alpen. *Geographica Helvetica*, 24 (1), pp. 10-20.
- Barsch D. (1988). Rockglaciers. In: Clark M.J. (Ed.): *Advances in periglacial geomorphology*. Chichester, Wiley, 69-90.
- Barsch D. (1996). *Rockglaciers. Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments*. Berlin/Heidelberg, Springer.
- Berc L. (2002). Techniques of spatially explicit individual-based models: construction, simulation and mean-field analysis, *Ecological Modelling* 150, 55-81.
- Bertran P., Coutard J.P., Ozouf J.C., Texier J.P. (1995). Dépôts de pente calcaires du nord de l'Aquitaine. Répartition et géographie des faciès. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge*, 39, 29-54.
- Beven, K. (2002). Toward an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modeling system. *Hydrological Processes* 16. 189-206
- L. Boeckli, A. Brenning, S. Gruber, and J. Noetzli (2011). A statistical permafrost distribution model for the European Alps. *The Cryosphere Discuss.*, 5, 1419-1459
- Bouët M. (1985). *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Lausanne, Payot (2ème édition)
- Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E.S. (1997). *Circum-arctic map of permafrost and ground-ice conditions*. 1:10,000,000 Map CP-45. Circum-Pacific map series, USGS

- Chapelle O., Schölkopf B., and Zien A. (2006). *Semi-Supervised Learning*, MIT Press, Cambridge, MA
- Cristianini N. and Shawe-Taylor J. (2000). *An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge University Press
- Cross, M., Moscardini, A.O. (1985). *Learning the Art of Mathematical Modelling*. John Wiley & Sons. London
- Davies M., Hamza O., Harris C. (2001). The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 137-144.
- Delaloye, R. & Morand, S. (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 de l' Université de Fribourg (non publié).
- Delaloye R. (2004). *Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale*. Fribourg, département des Géosciences, GeoFocus No. 10.
- Delaloye, R., Lambiel, C. (2005). Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps), in: *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 59, 2, 194-203.
- Delaloye R., Lambiel C., Lugon R. (2005). *ESA SLAM project, phase 2, Bas-Valais. Validation of InSAR data in permafrost zone*. Bern, Federal Office of Water and Geology (FOWG), Final Report.
- Ebohon B. and Schrott L. (2008). *Modeling Mountain Permafrost Distribution: a new map of Austria*, 25 in: 9th International Conference on Permafrost, edited by: Kane, D. L. and Hinkel, K. M., Fairbanks, Alaska, Institute of Northern Engineering University of Alaska Fairbanks: Fairbanks, Alaska, 397–402
- Etzelmüller B., Farbrót H., Gudmundsson A., Humlum O., Tveito O., and Björnsson H. (2007). The regional distribution of mountain permafrost in Iceland, *Permafrost Periglac.*, 18, 185–199
- Fawcett T. (2006). An introduction to roc analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27:861-874

- Fishman G.S., Kiviat P.J. (1968). The statistics of discrete-event simulation. *Simulation* 10. 185-191
- Fotheringham A.S., Brunson C. and Charlton M. (2000). *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*, Sage.
- Francou, B. (1988). *L'ébouilisation en haute montagne*, Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., Editec, Caen, 2 tomes, 696 p.
- Francou, B., Hetu, B. (1989). Eboulis et autres formations de pente hétérométriques. Contribution à une terminologie géomorphologique, in : *Notes et comptes rendus du groupe de travail « Régionalisation du Périglaciaire »*, XIV, 11-69.
- Frauenfelder R. (1998). Permafrostuntersuchungen mit GIS. Eine Studie im Fletschhorngebiet. *Mitteilungen der VAW-ETH Zürich* 158: 55–68.
- French H.M. (1996): *The Periglacial environment*. Longman, London (2nd edition).
- Graham, E. (1997). *Methods in Human Geography: A Guide for Strudents doing a Research Project*. Harlow: Longman.
- Grand, S. (2000). *Creation : Life and How to Make It*. Phoenix, London
- Gruber, S. & Hoelzle, M. (2001): *Statistical modelling of mountain permafrost distribution: local calibration and incorporation of remotely sensed data*. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 69-77.
- Gruber, S. (2005) *Mountain permafrost: transient spatial modelling, model verification and the use of remote sensing*, Thèse de doctorat, Geographisches Institut, Univ. Zürich.
- Gruber S., Peter M., Hoelzle M., Woddhatch I., Haeberli W. (2003). *Surface temperatures in steep Alpine rock faces—a strategy for regional-scale measurement and modelling*. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost 2003*. Swets & Zeitlinger: Zurich; 325–330.
- Gruber S., Hoelzle M., Haeberli W. (2004). *Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003*. *Geophysical Research Letters* 31

- Gruber, S. and Haeberli, W. (2007) Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature related destabilization following climate change, *J. Geophys. Res.*, 112
- Guglielmin M., Aldighieri B., Testa B. (2003). PERMACLIM: a model for the distribution of mountain permafrost, based on climatic observations. *Geomorphology*, 51, 245-257.
- Hall K. (1997). Rock temperatures and implications for cold region weathering—I: new data from Viking Valley, Alexander Island, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 69–90.
- Harris C., Vonder Mühll D., Isaksen K., Haeberli W., Sollid J. L., King L., Holmlund P., Dramis F., Guglielmin M., Palacios D. (2003). *Warming permafrost in European mountains*. *Global and Planetary Change*, 39, 215-225.
- Harris, S. A., Pedersen, D. E. (1998). Thermal regime beneath coarse blocky materials, in: *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 107-120.
- Haeberli W. (1985). *Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers*. Mitteilungen der VAW – ETH Zürich No. 77.
- Haeberli W., Hoelzle M., Keller F., Schmid W., Vonder Mühll D., Wagner S. (1993). Monitoring the long-term evolution of mountain permafrost in the Swiss Alps. *Proceedings of the 6th International Conference on Permafrost*, Beijing, China, 5-9. July 1993, 214-219.
- Haeberli W. (1996). *Die "Permafrost-Faustregeln" der VAW/ETHZ – einige grundsätzliche Bemerkungen*. In: Haeberli W., Hoelzle M., Dousse J.-P., Ehrler C., Gardaz J.-M., Imhof M., Keller F., Kunz P., Lugon R., Reynard E. (1996): *Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit geographischen Informationssystemen*. Arbeitsbericht NFP 31, Zürich, Hochschulverlag AG an der ETHZ, 13-18.
- Haeberli W, Beniston M. (1998). *Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps*. *Ambio* 27(4): 258–265.
- Hamel, L. (2009). Model assessment with roc curves. Department of Computer Science and Statistics - University of Rhode Island - USA
- Hasler, A., Gruber, S., Font, M., and Dubois, A. (2011). Advective heat transport in frozen rock clefts - conceptual model, laboratory experiments and numerical simulation, *Permafrost Periglac. Process.*, accepted,.

- Heggem, E., Juliussen, H., and Etzelmüller, B. (2005). Mountain permafrost in Central-Eastern Norway, *Norsk Geogr. Tidsskr.*, 59, 94–108
- Hoelzle, M. (1992). Permafrost occurrence from BTS measurements and climatic parameters in the eastern Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(2), 143-147.
- Hoelzle, M. (1994). *Permafrost und Gletscher im Oberengadin. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren*, Mitteilungen n°132, VAW, Zürich.
- Hoelzle, M. & Haeberli, W. (1995). Simulating the effects of mean annual air temperature changes on permafrost distribution and glacier size. An example from the Upper Engadin, Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 21, 400-405.
- Hoelzle M., Wegmann M., Krummenacher B. (1999). Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: first experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10, 113-124.
- Hoelzle M., Haeberli W., Stocker-Mittaz C. (2003). Miniature ground temperature data logger measurements 2000-2002 in the Murtèl-Corvatsch area, Eastern Swiss Alps. *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21-25 July 2003, 419-424.
- Hoelzle M, Mittaz C, Etzelmüller B, Haeberli W. (2001). *Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in high mountain areas: an overview of current developments*. *Permafrost and Periglacial Processes* 12(1): 53–68.
- Hoelzle, M., Frauenfelder, R., Gruber, S., Hanson, S., Noetzli, J., Salzmann, N. (2005). *Mountain permafrost: Are we able to model the real distribution?*, in: 2nd European Conference on Permafrost June 12-16 Programme and Abstracts, Potsdam, 130.
- Kääh, A. & Kneisel, C. (2006). Permafrost creep within a recently deglaciated glacier forefield: Muragl, Swiss Alps.- *Permafrost and Periglacial Processes* 17: 79–85.
- Kääh A., Frauenfelder R., Roer I. (2007). On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56, 172-187.
- Kanevski M., Maignan M. (2004). *Analysis and modelling of spatial environmental data*. EPFL Press, Lausanne.

- Kanevski M., Pozdnoukhov A., and Timonin V. (2009). *Machine Learning for Spatial Environmental Data*. EPFL Press, Lausanne.
- Keller, F. (1992). Automated Mapping of Mountain Permafrost Using the Program PERMAKART within the Geographical Information System ARC/INFO. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3, 133-138.
- Keller, F. (1994). Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost, eine Grundlagenstudie im Oberengadin, in: *Mitt. VAW/ETH Zürich*, 127.
- Keller F., Hoelzle M. (1996). *PERMAKART und PERMAMAP*. In: Haeberli W., Hoelzle M., Dousse J.-P., Ehrler C., Gardaz J.-M., Imhof M., Keller F., Kunz P., Lugon R., Reynard E. (1996). *Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit geographischen Informationssystemen*. Arbeitsbericht NFP 31, Zürich, Hochschulverlag AG an der ETHZ, 35-46.
- Keller, F., Frauenfelder, R., Gardaz, J.-M., Hoelzle, M., Kneisel, C., Lugon, R., Phillips, M., Reynard, E., Wenker, L. (1998). Permafrost map of Switzerland, in: Permafrost 7<sup>th</sup> International Conference June 23-27 Proceedings, Yellowknife, 557-562.
- Kneisel, C. (2003). Permafrost in recently deglaciated glacier forefields – measurements and observations in the eastern Swiss Alps and northern Sweden.- *Z. Geomorph.* 47: 289-305.
- Kneisel, C. & Kääh, A. (2007). Mountain permafrost dynamics within a recently exposed glacier forefield inferred by a combined geomorphological, geophysical and photogrammetrical approach.- *Earth Surface Processes and Landforms* 32/12: 1797-1810.
- Imhof M. (1996a). *PERM-ein Programm für die automatisierte Kartierung von Permafrost in den Schweizer Alpen*. In: Haeberli W., Hoelzle M., Dousse J.-P., Ehrler C., Gardaz J.-M., Imhof M., Keller F., Kunz P., Lugon R., Reynard E. (1996): *Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit geographischen Informationssystemen*. Arbeitsbericht NFP 31, Zürich, Hochschulverlag AG an der ETHZ, 25-33.
- Imhof M. (1996b). Modelling and verification of the permafrost distribution in the Bernese Alps Western Switzerland). *Permafrost and Periglacial Processes*, 7, 267-280.
- Jansson P-E., Karlberg L. (2001). Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm.

- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group 1 to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.
- Jansson P-E., Karlberg L. 2001. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm.
- Lambiel C. (1999). *Inventaire des glaciers rocheux entre le Val de Bagnes et le Val d'Hérémence (Valais)*. Mémoire de licence, Institut de Géographie, Université de Lausanne, [non publié].
- Lambiel, C. et Reynard, E. (2001). Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes-Hérémence area (Western Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, Vol. 55: 219-223.
- Lambiel, C. et Reynard, E. (2002). Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais). *Entwicklungstendenzen und Zukunftsperspektiven in der Geomorphologie, Physische Geographie, Zürich*, Vol. 41: 91-104.
- Lambiel C., Delaloye R. (2004). *Contribution of real-time kinematic GPS in the study of creeping mountain permafrost: examples from the Western Swiss Alps*. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, 229-241.
- Lambiel C. (2006): *Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités*. Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et recherches No. 33.
- Lambiel, C. et Pieracci, K. (2008). Permafrost distribution in talus slopes located within the alpine periglacial belt, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(3): 293-304.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., and Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1643-1653.
- Maisch M. (1999). *Die Gletscher der Schweizer Alpen – Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien (NFP31 final report)*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 376 pp.



- Mittaz C, Hoelzle M, Haeberli W. (2000). First results and interpretation of energy-flux measurements over Alpine permafrost. *Annals of Glaciology* 31: 275–280.
- Monnier S. (2010). « Du glacier au glacier rocheux, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, au pied du Mont Thabor (Alpes du Nord, France) », *Quaternaire*, vol. 18/3 | 2007, [En ligne], mis en ligne le 01 septembre 2010. URL : <http://quaternaire.revues.org/index1140.html>. Consulté le 24 novembre 2011.
- Morard S., Delaloye R., Lambiel C. (2010). Pluriannual thermal behavior of low elevation cold talus slopes (western Switzerland). *Geographica Helvetica*, Jg. 65, Heft 2, 124-134
- National Aeronautics and Space Administration (2010). Le tunnel du vent [Page Web] Disponible sur : <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunnel1.html> (consulté le 16.05.2011).
- Noetzli, J., Gruber, S., Kohl, T., Salzmann, N., and Haeberli, W. (2007). Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography, *J. Geophys. Res.*, 112
- Odum, E.P. (1975). *Ecology*. Holt Reinhart and Winston. London.
- Office fédéral de l'environnement (2005). *Carte de l'extension potentielle du pergélisol en Suisse*.
- PERMOS (2009). Permafrost in Switzerland 2004/2005 and 2005/2006. Noetzli, J., Naegeli, B., and Vonder Muehll, D. (eds.), Glaciological Report (Permafrost) No. 6/7 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 100 pp.
- Pieracci K. (2006): *Distribution et caractéristiques du pergélisol dans les éboulis calcaires de haute altitude. Région du Grand Chavalard, Valais, Suisse*. Lausanne, Institut de Géographie, Mémoire de licence
- Phillips M., Reynard E. (1996): *Influence régionale du climat et de la morphologie sur la distribution du permafrost*. Ukpik, Rapports de recherche de l'Institut de Géographie, Université de Fribourg, 8, 197-206.
- Platt, J. (1999). *Probabilist Outputs for Support Vector Machines and Comparisons to Regularized Likelihood Method: Advances in Large Margin Classifiers*, MIT Press.

- Reynard, E., Lambiel, C., Delaloye, R., Devaud, G., Baron, L., Chapellier, D., Marescot, L., Monnet, R. (2003) Glacier/permafrost relationships in forefields of small glaciers (Swiss Alps), in: Permafrost 8th International Conference July 21-25 Proceedings, Zürich, 947-952.
- Reynard, E., Bissig, G. (2005). Manuel de Géomorphologie générale, Volume 1, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Matériaux pour les cours et séminaires, 44.
- Reynard, E., Bissig, G., et Thomi, L. (2006). Manuel de Géomorphologie générale, Volume 2, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Matériaux pour les cours et séminaires, 47.
- Ribolini A., Guglielmin P., Fabre D., Bodin X., Marchisio M., Sartini S., Spagnolo M., Schoeneich P. (2009). The internal structure of rock glaciers and recently deglaciated slopes as revealed by geoelectrical tomography: insights on permafrost and recent glacial evolution in the Central and Western Alps (Italy–France), Quaternary Science Reviews, Volume 29.
- Riedlinger, T. and Kneisel, C. (2000.). Interaktionen von Permafrost und Ausaperung im Gletschervorfeld des Vadret da Rosatsch, Oberengadin, Schweiz, Trierer Geograph. Stud., 23, 147–164, 1422
- Rossier A. (2011). *Précipitations extrêmes dans le val de Bagnes. Occurrence et prévision*. Sous la direction du Dr. J.-M. Fallot. Mémoire de master en géographie. Institut de Géographie de l'université de Lausanne.
- Salzmann, N., Gruber, S., Hugentobler, M. & Hoelzle, M. (2006): The influence of different Digital Terrain Models (DTMs) on alpine permafrost modeling. *Journal of Environmental Modeling and Assessment*
- Sartori M., Gouffon Y. & Marthaler M. (2006). Harmonisation et définition des unités lithostratigraphiques briançonnaises dans les nappes penniques du Valais. *Eclogae geologicae Helvetiae* 99 : 363-407.
- Scapozza C. (2008) : *Contribution à l'étude géomorphologique et géophysique des environnements périglaciaires des Alpes Tessinoises orientales*. Sous la direction du Dr. C. Lambiel. Mémoire de master en géographie. Institut de Géographie de l'université de Lausanne.

- Scapoza C. (2012). Stratigraphie, morphodynamique, paléoenvironnements des terrains sédimentaires meubles à forte déclivité du domaine périglaciaire alpin. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne, 551 pp.
- Scapoza, C., Lambiel, C., Reynard, E., Baron, L. and Marescot, L. (2009). Verification of Geophysical Models of the Permafrost Distribution within an Alpine Talus Slope Using Borehole Information, Valais, Swiss Alps. In *Geophysical Research Abstracts*. EGU2009-9444
- Scherler M., Hoelzle M. (2011). Quantification of air driven heat transfer in the active layer on rock glacier Murtèl-Corvatsch. Vol. 13, EGU2011-11850
- Scherler M., Hauck, C., Hoelzle M. (2011). Projection of permafrost and snow cover evolution under climate change scenarios. Vol. 13, EGU2011-11807
- Scherrer S. C., C. Appenzeller, M. A. Liniger, and C. Schär (2005). European temperature distribution changes in observations and climate change scenarios. *Geophys. Res. Lett.*
- Seppi R., Carton A., Baroni C. (2005): Proposta di una nuova scheda per il censimento dei rock glaciers da fotografie aeree: applicazione sull'Alta Val Ultimo (Gruppo Ortles-Cevedale). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, Suppl. 7, 329-338.
- Steck A., Bigioggero B., Dal Piaz G.V., Escher A., Martinetti G. & Masson H. (1999). Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale et des régions avoisinantes 1 :100'000. Berne, Service Hydrologique et géologique national, Carte géologique spéciale No. 123
- Stocker-Mittaz, C., Hoelzle, M., and Haeberli, W.(2002) Modelling alpine permafrost distribution based on energy-balance data: a first step, *Permafrost. Periglac.*, 13, 271–282, doi:10.1002/ppp.426
- Summerfield M. A. (1991): *Global geomorphology*. Edinburgh, Pearson.
- The independent Online”(2001). *Alps in danger of tumbling down*. [Page Web]. Disponible sur <http://www.independent.co.uk> (consulté le 12.04.2011)
- Utz, S. (parution prévue 2012). *Typologie des mouvements de solifluxion à l'étage Alpin et Nival*, Travail de Mémoire. Institut de Géographie de l'université de Lausanne.
- V. Vapnik. (1998). *Statistical Learning Theory*, Wiley

- Varekamp, C., Skidmore, A.K. et al. (1996). Using public domain geostatistical and GIS software for spatial interpolation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**: 845-854.
- Wainwright, J., Mulligan, M. (2005). *Environmental Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Washburn A.L. (1979): *Geocryology: a survey of periglacial processes and environments*. London, Arnold.
- WGMS (2005). *Fluctuations of glaciers, 1995-2000*. VIII, Paris.
- Zimmermann, H.J. (2000). An application-oriented view of modeling uncertainty. *European Journal of Operational Research* 122. 190-198





## 9. ANNEXES

## 9. ANNEXES

### ANNEXE I

#### ***Alps in danger of tumbling down***

*Permafrost is melting as the planet heats up, leaving the mountain range vulnerable to more landslides*

*Daniel Vonder Muehll regularly rides up the Schilthorn cable car to visit two pipes sticking out of the snow overlooking one of the most breathtaking views in the world. Unknown to the skiers and snowboarders who whip by him, Mr Vonder Muehll takes the temperature of the ice underneath. He has discovered that the mountain is sick.*

*Here, where the British helped the Swiss to invent skiing as a sport, the permanently frozen ice cementing the jointed bedrock of the mountain is melting. Landslides are becoming common in the Alps as whole sections threaten to slide down into the valleys below, causing death, destruction and taking with them the future of the hugely lucrative Alpine skiing and tourism industry. Mountain-top restaurants and cable cars are already starting to shift on their foundations. The director of one cable car alone, the popular Schilthorn, says that his firm spends 7m Swiss francs (£2.9m) every year to maintain its stability. A new study by Swiss and British scientists has found that the permafrost has warmed up by one degree centigrade over the past 15 years at their three monitoring stations in the Alps: near Zermatt, St Moritz and at the Schilthorn, in the Berner Oberland, where James Bond skied in the film *On Her Majesty's Secret Service*.*

*The research - Europe's first in-depth study of the fate of the permafrost - is the latest evidence of rapid and widespread thawing around the world as global warming takes hold.*

*Ski instructors and mountain guides in the Alps are already familiar with the impact of climate change. To the irritation of skiers and ice climbers, the once reliable Christmas snowfall has shifted into early January and snowfalls have become unpredictable, leaving skiing and climbing conditions increasingly dangerous. Snow now falls in heavy bouts and is interspersed with unpredictable cycles of hot and freezing weather, leading to unstable snow fields, dangerous ice climbs, patchy ski runs and violent avalanches. Vanessa Haines of the Ski Club of Great Britain said the skiing industry is concerned about the effect climate changes might have on business in the long term. Deirdre Rowe, head of Optimum Ski, a chalet ski firm based near Les Arcs in France, said locals had noticed a steady rise in climate at the resort in recent years. Two years ago, a devastating avalanche in the Chamonix valley reduced chalets to matchwood, underlining the growing threat to property and the safety of holiday-makers. The famed glaciers around Chamonix have visibly shrunk. Where Victorian tourists were able to step directly on to the Glace de Mer in the Vallée Blanche, modern tourists have to reach the glacier by cable car.*



*The problem is especially acute in Switzerland because it has the steepest and most populated mountains in Europe. "We realise there is a serious issue here," said Vonder Muehll, a geophysicist who heads the Swiss side of a European-wide study. In just one year, scientists believe, warming permafrost caused more than 250 landslides, killing eight people and causing damage worth Sfr1.3bn (£555m). They predict that the toll will rise as the climate change increases.*

*Countless restaurants and hotels and 288 ski lifts are built into the permafrost. Scientists already have identified two ski lifts with structural problems and some buildings in which cracks were forming due to shifting of the ground.*

*"It is a very, very sensitive topic for Switzerland, especially because tourism is so important for its economy," said Stephan Gruber, a scientist at the Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich.*

*The question in scientists' minds is no longer whether it happens, but where, when and what the damage will be. The problem is so acute that the geophysicists held a meeting last year with the cable car operators who are located in permafrost areas. All of them are privately owned. "Cable car operators don't want to tell us when they notice a problem," said Felix Keller, a geographer and glacierologist at Academia Engiadina. "We need to find solutions for them, too." The solutions the cable car companies find may not always be to the liking of the geologists. The Gemstock ski lift operators in Andermatt responded to their structural problems last year by injecting 210 tonnes of cement into the mountain at a cost of Sfr1.3m. Geologically it was a disaster. "Cement warms up the mountain and melts the permafrost," said Mr Keller.*

*Not all ski lifts sitting in permafrost are in danger. The Schilthorn cable car station continually circulates cold air under the building, keeping the ground, and the permafrost underneath it, frozen. Peter Feuz, director of the Schilthorn cable car, said his firm spends around Sfr7m each year maintaining the building's stability. He needs to. More than two million people used his lift last year, many of them British. Heinz Schoeni, a government official responsible for cable car safety, said his office was constantly monitoring the situation, and that all ski lifts in Switzerland remain safe.*

*But scientists now say they cannot predict accurately where mudslides and rock flows will occur next. In the past, geologists have been able to forecast landslides by looking at past magnitude and frequency. The changing climate in the permafrost changes all that. Once it is warmed, all it takes is a trigger - such as a heavy rain - to cause a rock slide with deadly results.*

*Back at the Schilthorn the skiers have called it a day and are heading down the cable car to the bars. This makes Peter Lehner happy. The director of tourism for Berner Oberland, which includes the Schilthorn, has been worried since news of the permafrost warming. Anything that might hurt tourism is taken seriously. All citizens of the town of Märren work in the tourism industry.*

Parution dans "The independent Online", le 18 mars 2001.

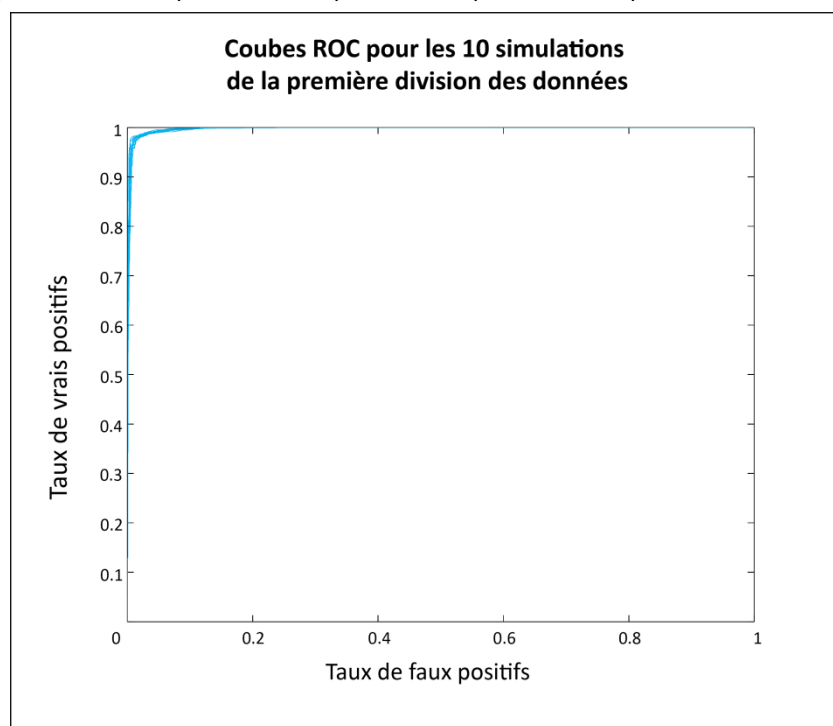
## ANNEXE II

- *Lexique méthodologique*

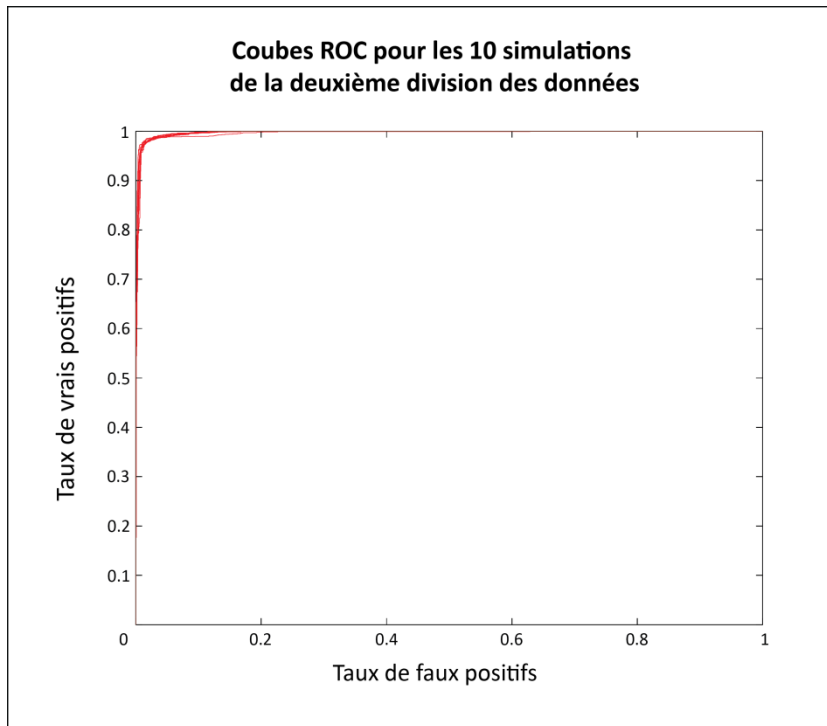
<b>Fonction de décision</b>	Fonction déterminant la classification de chaque objet du jeu de données.
<b>Hyperplan</b>	Ligne ou plan horizontal séparant linéairement les données et défini à la hauteur de la courbe $f(x)=0$ .
<b>Vecteurs de support</b>	Points qui correspondent exactement à la valeur de 1 ou -1, déterminant la limite de la marge $\rho$ .
<b>Marge de largeur <math>\rho</math></b>	Limite permettant de définir des deux classes d'objets et se défini par l'hyperplan $f(x) = wx + b = 0$ .
<b>Vecteur d'entraînement</b>	Point se localisant dans la région où l'hyperplan vaut une valeur comprise entre [-1 ; +1] et se propose d'aider la machine à maximiser la marge.
<b>Variation d'écart</b>	Variable permettant de gérer le bruit ou les valeurs extrêmes qui peuvent exister dans le jeu de données.
<b>Fonction noyau</b>	Elle permet de passer d'un problème complexe non linéaire à un problème linéaire plus simple dans une dimension supérieure.
<b>Courbe ROC</b>	Courbe permettant une analyse quantitative de la validité du modèle.
<b>sigmoïde de transformation</b>	Fonction transformant les valeurs résultant de la fonction de décision en probabilité, de plus simple interprétation.

## ANNEXE III

- *Graphique représentant 10 jeux de données d'entraînement (1600 valeurs), de validation (1600 valeurs) et de test (2800 valeurs)*



- 10 jeux de données d'entraînement (1800 valeurs), de validation (1800 valeurs) et de test (2400 valeurs)



- 10 jeux de données d'entraînement (2000 valeurs), de validation (2000 valeurs) et de test (2000 valeurs)

