

---

# Modélisation par télédétection de la répartition du permafrost dans les Hautes Alpes Calcaires (Suisse)

Cristian Scapozza<sup>1\*</sup>, Rafael Tapia<sup>2</sup>, Devis Tuia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Géographie de l'Université de Lausanne

<sup>2</sup> Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque, Université de Lausanne

CH-1015 Lausanne, Suisse

\*E-mail: [Cristian.Scapozza@unil.ch](mailto:Cristian.Scapozza@unil.ch)

---

*RÉSUMÉ.* La modélisation de la répartition potentielle du permafrost à petite échelle se base le plus souvent sur des méthodes empiriques fondées sur un modèle régional de répartition du permafrost. Dans cette contribution, la classification par télédétection satellitaire est utilisée pour modéliser la répartition du permafrost. L'application des méthodes de classification d'images satellitaires dans la région suisse des Hautes Alpes Calcaires a permis de mettre en évidence des régions cohérentes en termes de répartition et caractérisées par les signatures typiques de formes géomorphologiques liées à la présence de permafrost. La comparaison avec les résultats d'un modèle topoclimatique empirique dans la région montre la valeur de la méthode développée.

*ABSTRACT.* Small scale permafrost repartition models are often based on empirical methods, focused on a regional empirical permafrost distribution model. In this contribution, a remote sensing approach based on satellite image classification is proposed to model permafrost distribution. Application in the Swiss region of the Hautes Alpes Calcaires highlights coherent regions characterized by typical spectral signatures of permafrost-related geomorphological landforms. Comparison of results with an empirical topoclimatic model within the region showed the relevancy of the method developed.

*MOTS-CLÉS :* Permafrost, télédétection satellitaire, SIG, géomorphologie, classification, Hautes Alpes Calcaires, Suisse.

*KEYWORDS:* Permafrost, remote sensing, GIS, geomorphology, classification, Hautes Alpes Calcaires, Switzerland.

---

## 1. Introduction

Le permafrost est défini comme du matériel de subsurface, qui peut être de la moraine, du sol, des éboulis, un glacier rocheux, de la roche, dont la température reste en dessous de 0°C durant plus d'une année (Washburn, 1979). Nous pouvons distinguer, selon un critère de surface occupée, entre le permafrost continu

(> 80 % de la surface), discontinu (entre 80 et 30 %) et sporadique (< 30 %) (Harris, 1986). La télédétection, à travers l'analyse multispectrale de la réflectance des sols, peut aider dans la détermination des zones potentiellement favorables au permafrost, comme cela a été démontré par Dousse (1992) et Dousse et Lugon (1996) dans les Alpes Penniques de Suisse Occidentale. L'objectif de cette contribution est de créer un modèle de distribution du permafrost discontinu dans les Hautes Alpes Calcaires occidentales à travers la classification dirigée d'une image satellite à haute résolution de type ASTER. Le modèle de distribution du permafrost discontinu obtenu par télédétection satellitaire est ensuite comparé à un modèle topoclimatique empirique régional établi sur la base de l'inventaire des glaciers rocheux des Alpes Bernoises (Imhof, 1996).

## **2. Méthodes : classification dirigée par relevé des signatures spectrales**

La classification dirigée est l'étape centrale du traitement de l'image. L'algorithme utilisé classe les pixels sur des critères de maximum de vraisemblance par rapport à des signatures spectrales caractéristiques définies a priori. Le choix de ces signatures est principalement fondé sur la reconnaissance visuelle de formes sur une photo aérienne. Pour la classe *Permafrost*, la carte géomorphologique du Vallon de Nant, dans l'ouest de la région étudiée, a été utilisée (Phillips, 1993). La signature spectrale caractéristique pour les zones favorables au permafrost a été identifiée sur trois zones d'échantillonnage différentes : le corps d'un glacier rocheux actif, une moraine présentant des loupes de solifluxion et la partie inférieure d'un éboulis de haute altitude. Les deux premiers terrains constituent des formes géomorphologiques liées à la présence de permafrost dans le sous-sol, tandis que les éboulis de haute altitude, dans leur partie inférieure, présentent un contenu en glace non négligeable (Delaloye et Lambiel, 2005). Afin d'en évaluer la fiabilité, le modèle obtenu par télédétection a été comparé à un modèle topoclimatique empirique régional de la distribution potentielle du permafrost discontinu dans les Hautes Alpes Calcaires. Il estime la répartition potentielle à partir de la limite inférieure du permafrost discontinu relative aux huit orientations principales. Les données proviennent de l'inventaire de 82 glaciers rocheux des Alpes Bernoises (Imhof, 1996).

## **3. Résultats et discussion**

### **3.1. Résultats de la classification**

La classification dirigée distingue les zones favorables au permafrost des glaciers, des névés, des moraines végétalisées (en particulier les moraines antérieures au Petit Age Glaciaire) et de certains rochers et éboulis. Selon la matrice d'erreur, 95 % des pixels de la classe permafrost ont été classés correctement.

	Pe.	Gl.	Mo.	Pa.	Nu.	Fo.	Ro.	Om.	Zu.	Za.
Permafrost	<b>95.2</b>	-	-	-	-	-	4.8	-	-	-
Glaciers	-	<b>99.6</b>	-	-	0.4	-	-	-	-	-
Moraines ante PAG	-	-	<b>98.8</b>	1.2	-	-	-	-	-	-
Pelouse alpine	-	-	1.4	<b>95.4</b>	-	-	-	-	-	3.2
Nuages	-	-	-	-	<b>100</b>	-	-	-	-	-
Forêt	-	-	-	-	-	<b>100</b>	-	-	-	-
Rochers	9.2	-	0.1	-	-	-	<b>90.7</b>	-	-	-
Ombrages	0.3	-	-	-	-	-	-	<b>99.7</b>	-	-
Zones urbaines	-	-	-	-	0.4	-	-	-	<b>84.3</b>	15.3
Zones agricoles	-	-	0.1	3.1	0.2	-	-	-	13.5	<b>83.1</b>

Fig. 1 : Matrice d'erreur du modèle de classification des pixels. Résultats exprimés en %.

### 3.2. Comparaison avec le modèle topoclimatique empirique régional

La corrélation entre le modèle topoclimatique empirique régional et la répartition obtenue par télédétection s'est avérée bonne, bien que des différences soient visibles au niveau local. Le modèle topoclimatique ne se basant pas sur des caractéristiques géomorphologiques, toutes les zones au-dessus de la limite inférieure du permafrost sont attribuées à la classe permafrost. Par contre, la télédétection n'a pas permis d'extraire des zones de permafrost dans des portions de l'image caractérisées par des ombrages importants : ceci est dû à l'effet d'abri du rayonnement solaire direct exercé par les parois calcaires (Phillips et Reynard, 1996). La morphologie de la région est donc un facteur de perturbation pour le modèle. En même temps, il faut rappeler que la morphologie, en influençant les périodes d'ombrage et donc la température au sol, est un facteur prédominant dans la distribution du permafrost. Dans le futur, des analyses visant l'explication de ces différences permettront de mettre en évidence la complémentarité des deux modèles. En particulier, le modèle par télédétection peut contribuer à une meilleure définition des discontinuités. Il est important de préciser que, les deux modèles se basant principalement sur des travaux empiriques de terrain, leur pouvoir de généralisation court le risque d'être faible.

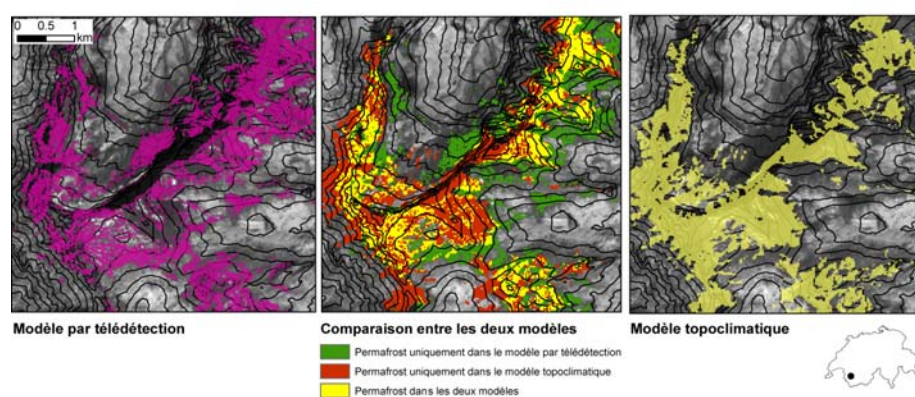


Fig. 2 : Comparaison des résultats des modèles utilisés

#### 4. Conclusions

L'application des méthodes de classification d'images satellitaires dans la région suisse des Hautes Alpes Calcaires a permis de mettre en évidence des régions cohérentes en termes de répartition et caractérisées par les signatures typiques de formes géomorphologiques liées à la présence de permafrost. La comparaison avec les résultats d'un modèle topoclimatique empirique dans la région montre la valeur de la méthode développée.

Il s'agira à l'avenir, de procéder à une comparaison quantitative entre le modèle obtenu par télédétection et les modèles classiques de répartition du permafrost, en particulier le programme SIG PERMAMAP, développé par Hoelzle (1994) et basé sur une relation statistique entre la radiation solaire incidente et la température annuelle moyenne de l'air. Il sera également important d'appliquer la même méthode aux Alpes Penniques afin de la tester dans une région caractérisée par des conditions climatiques et structurales différentes.

#### 5. Bibliographie

- Delaloye R., Lambiel C., « Evidences of winter ascending air circulation in talus slopes situated near the lower limit of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps) », *Norsk Geografisk Tidsskrift*, vol. 59, n° 2, 2005, p. 194-203.
- Dousse J.-P., Système d'information géographique et télédétection satellitaire : deux nouveaux instruments dans la recherche du pergélisol alpin, Travail de diplôme, Institut de Géographie de l'Université de Fribourg, 1992.
- Dousse J.-P., Lugon R., « Analyse spatiale numérique du pergélisol alpin dans les Alpes Valaisannes », *Simulation der Permafrost-verbreitung in den Alpen mit geographischen Informationssystemen*, Zürich, Hochschulverlag AG an der ETHZ Zürich, 1996, p. 19-24.
- Harris S. A., *The permafrost environments*, London/Sydney, Croom Helm, 1986.
- Hoelzle M., *Permafrost und Gletscher im Oberengadin. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren*, Mitteilungen der VAW 132, ETH Zürich, 1994.
- Imhof M., « Modelling and Verification of the Permafrost Distribution in the Bernese Alps (Western Switzerland) », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 7, 1996, p. 267-280.
- Phillips M., Géomorphologie du Vallon de Nant, Mémoire de licence, Institut de Géographie de l'Université de Lausanne, 1993.
- Phillips M., Reynard E., « Influence régionale du climat et de la morphologie sur la distribution du permafrost : l'exemple des Hautes Alpes Calcaires », *UKPIK, Rapports de recherche de l'Institut de Géographie, Université de Fribourg*, vol. 8, 1996, p. 197-206.
- Washburn A., *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*, London, Arnold, 1979.