

## ALPES : Le permafrost

### LE MAÇON EST MALADE... ... La faute à la météo ?

*Quand on parle  
de réchauffement climatique en montagne,  
on pense tout de suite au recul des glaciers.  
Mais le projet international PERMAdataROC  
agite un autre épouvantail :  
la fonte du permafrost, à l'origine  
d'éboulements rocheux de grande ampleur.  
Des pierres qui tombent,  
là où personne ne vit, quel intérêt ?  
Et quel rapport avec la météo ?  
Et pourtant...*

C'est l'histoire d'un formidable édifice qui commence il y a des millions d'années : les Alpes surgissent de terre, et peu à peu, de grandes parois rocheuses défient la gravité. Le maçon ? Le permafrost, francisé sous le terme de pergélisol. Ce vocable définit tout matériau dont la température reste négative au moins deux années durant. Souvent



riche en glace, il s'est insinué dans les interstices, soudant entre elles les petites pierres qui font les grandes parois.

Mais les chercheurs commencent à se pencher sur le cas de cet artisan méconnu et désormais moribond. Actuellement située vers 3 000 m, la limite inférieure d'altitude du permafrost continu ne cesse de remonter. Et les pierres, délivrées de leur carcan de glace, de s'empresser de répondre à l'appel de la pesanteur.

*Face Ouest du petit Dru et cicatrice de l'éroulement de juin 2005.*

Les grands écroulements rocheux (impliquant un volume supérieur à 100 m<sup>3</sup>) se multiplient à travers le monde ; à titre d'exemple, la Punta Thurwieser (Italie) s'est allégée de 2,5 millions de mètres cubes de roche en 2004. On serait tenté de hausser poliment les épaules ; après tout, qu'importe la santé de parois qui n'intéressent que quelques alpinistes en mal d'émotions ? Néanmoins la déstabilisation de versants rocheux entiers ne menace pas uniquement des refuges et des remontées mécaniques (lesquelles transportent tout de même 500 millions de passagers chaque année dans le Nord des Alpes françaises). La chute des blocs peut déclencher des avalanches et des coulées de boue, susceptibles de déferler sur les routes, les barrages, voire les villages.

Par ailleurs, la sensibilité apparente du permafrost au réchauffement climatique en fait un objet d'étude de choix. Les programmes de recherche se multiplient ; parmi eux, le projet PERMAdataROC, mené conjointement par la France, la Suisse et l'Italie, qui s'intéresse de très près aux mouvements gravitaires et au régime thermique des parois de haute montagne. C'est là qu'intervient la météo. Le permafrost, par définition un état thermique, est étroitement corrélé à la température moyenne annuelle du rocher. Celle-ci dépend à son tour de la température de l'air et du rayonnement solaire ; voici donc les clés du permafrost.

Dès lors, d'autres facteurs compliquent l'équation : la neige renforce de façon sensible l'albédo et l'isolation thermique de la surface. Et l'eau (pluie, fonte nivale) percole en profondeur, convoyant la chaleur superficielle et mettant en jeu des mécanismes complexes de mutation du ciment de glace.

Très bien, il faut donc diagnostiquer l'impact des paramètres météo sur le permafrost et les relier aux écroulements. Sauf que... la haute montagne compte au nombre des ultimes terrae incognitae météorologiques. Les mesures sont rares en ce royaume d'accès difficile et les effets locaux légion ; le relief tourmenté défie la maille la plus fine des modèles numériques. Puisque les données manquent, essayons de trouver des méthodes d'estimation viables, par extrapolation depuis les vallées habitées.

## Agent pathogène n°1 : la température

Qui dit fonte du permafrost dit apport de chaleur. On pense aussitôt à la température du roc, et, partant, de l'air. Depuis Angot (1892), un gradient standard de  $-0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  est d'ordinaire employé. Mais pourquoi ne pas chercher à l'affiner dans le seul cadre du massif du Mont-Blanc, théâtre de l'étude ? (figure 2)

La vallée de Chamonix (figure 3), avec ses sept stations de mesure étagées entre 815 et 3 842 mètres d'altitude, s'y prête fort bien. Une régression linéaire fait émerger un gradient variant entre  $-0,74$  et  $-0,33\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  selon la saison et le paramètre (Tn ou Tx).

Chez nos voisins italiens (figure 4), le thermomètre perd 0,1 à 0,2  $^{\circ}\text{C}$  de plus tous les 100 m, mais affiche en fonds de vallée des températures plus agréables – la *dolce vita*... ; si bien que l'écart est lissé vers 3.500 m d'altitude. Recalculé à l'échelle du massif tout entier (hautes vallées de Chamonix et d'Aoste), le gradient s'échelonne entre  $-0,74$  et  $-0,53\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ .

## Le massif du Mont-Blanc



Figure 2 - Extrait de carte IGN, 1:100 000.

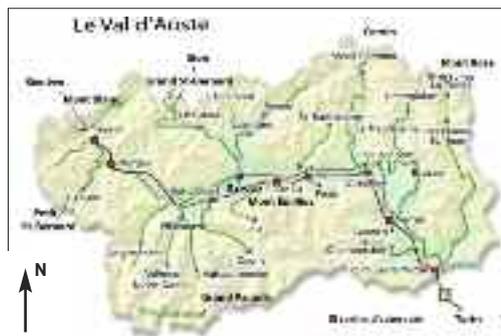


Figure 4 - Le Val d'Aoste (Wikipédia). Cette vallée comprend 47 stations entre 367 et 3 460 m, dont 14 en Haut Val d'Aoste (utilisées pour l'étude globale du massif).



Figure 3 - Vallée de Chamonix. Cette vallée comprend 10 stations entre 815 et 3 842 m, dont 4 avec pluviomètres.

Mais le prévisionniste local de sursauter : ce serait trop simple ! Quid des effets locaux ? En effet, inversions thermiques, propriétés de la roche, exposition et brassage éolien, sont autant de paramètres qui compliquent joyeusement l'estimation de la température en un point donné d'une paroi. Pour nous y intéresser de plus près, embarquons à bord du téléphérique de l'Aiguille du Midi, qui nous hisse en quelques minutes à 3 842 m d'altitude. Une station Météo-France coiffe le sommet, tandis que des capteurs de température sont installés en faces Nord et Sud. Une comparaison des relevés sur les deux faces donnent des résultats prévisibles : la Tx est sensiblement supérieure en face Sud, et l'excellente capacité d'absorption radiative du granit accentue encore le contraste avec l'ombre de la face Nord. La nuit, l'écart est réduit à néant.

Mais trop simple, encore une fois. De curieux résultats sont parfois enregistrés. Chacun se souvient ainsi de juillet 2007, parangon d'une année « sans été ». Les courbes de températures sur les trois postes ont perdu le sens de l'orientation : la Tx reste supérieure en face Nord durant près de 15 jours (figure 5) ! L'explication se cache dans la neige : début juillet, 60 millimètres sont relevés à Chamonix, et les sommets blanchissent.

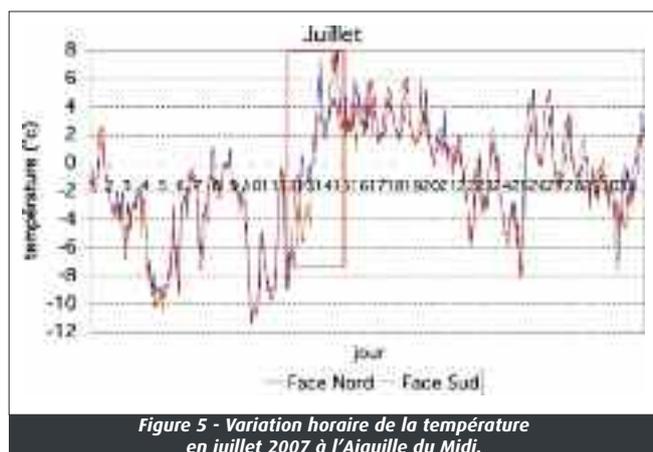


Figure 5 - Variation horaire de la température en juillet 2007 à l'Aiguille du Midi.

La poudreuse, légère et sans cohésion, ne parvient pas à se fixer sur les faces Nord; mais au Sud, la neige se transforme, s'alourdit et plâtre alors durablement la paroi, aussi paradoxal que cela puisse paraître. Dès lors, l'albédo fait le reste, et il faut attendre une soudaine hausse du mercure pour voir les courbes reprendre leur cours normal.

La température de l'air en un point donné du massif, et, plus encore, celle du rocher, ne se résument donc pas à l'altitude. Mais seul un Modèle Numérique de Terrain (MNT) doté d'un algorithme complexe peut intégrer la multitude de facteurs variants. Il faudra se contenter du gradient altitudinal pour calculer un paramètre clé de la fusion du permafrost : l'isotherme zéro degré en atmosphère réelle, limite entre les états liquide et glacé (de façon plus précise, la plage de température critique pour la cohésion de la glace se situe entre  $-1,5$  et  $0$  °C).

Existe-t-il un lien entre un isotherme zéro degré élevé et les grands écroulements ? Patience, tout n'est pas encore en place : n'oublions pas l'eau...

## Agent pathogène n° 2 : les précipitations

Quand une variation de température en surface met quelques dizaines d'années à atteindre une profondeur de cent mètres par conduction, l'eau en percolation transporte beaucoup plus rapidement la chaleur au cœur de la paroi. Cette eau est fournie par la pluie ou la fonte nivale. Il est à noter que la neige a des effets complexes : en jouant l'hiver le rôle d'isolant thermique, elle limite le refroidissement de la paroi et donc le regel du permafrost superficiel. L'été, à l'inverse, elle abrite le rocher du rayonnement solaire direct. Les précipitations pourraient donc jouer un rôle considérable dans la fusion du permafrost. Mais davantage encore que la température, elles se dérobent à l'estimation. Les erreurs de mesure sont légion, et exacerbées en montagne : neige l'hiver, déficit de captation lié au vent, effet d'abri, etc. Le seul recours : travailler sur de petites aires spatiales, proches sur le plan topographique.

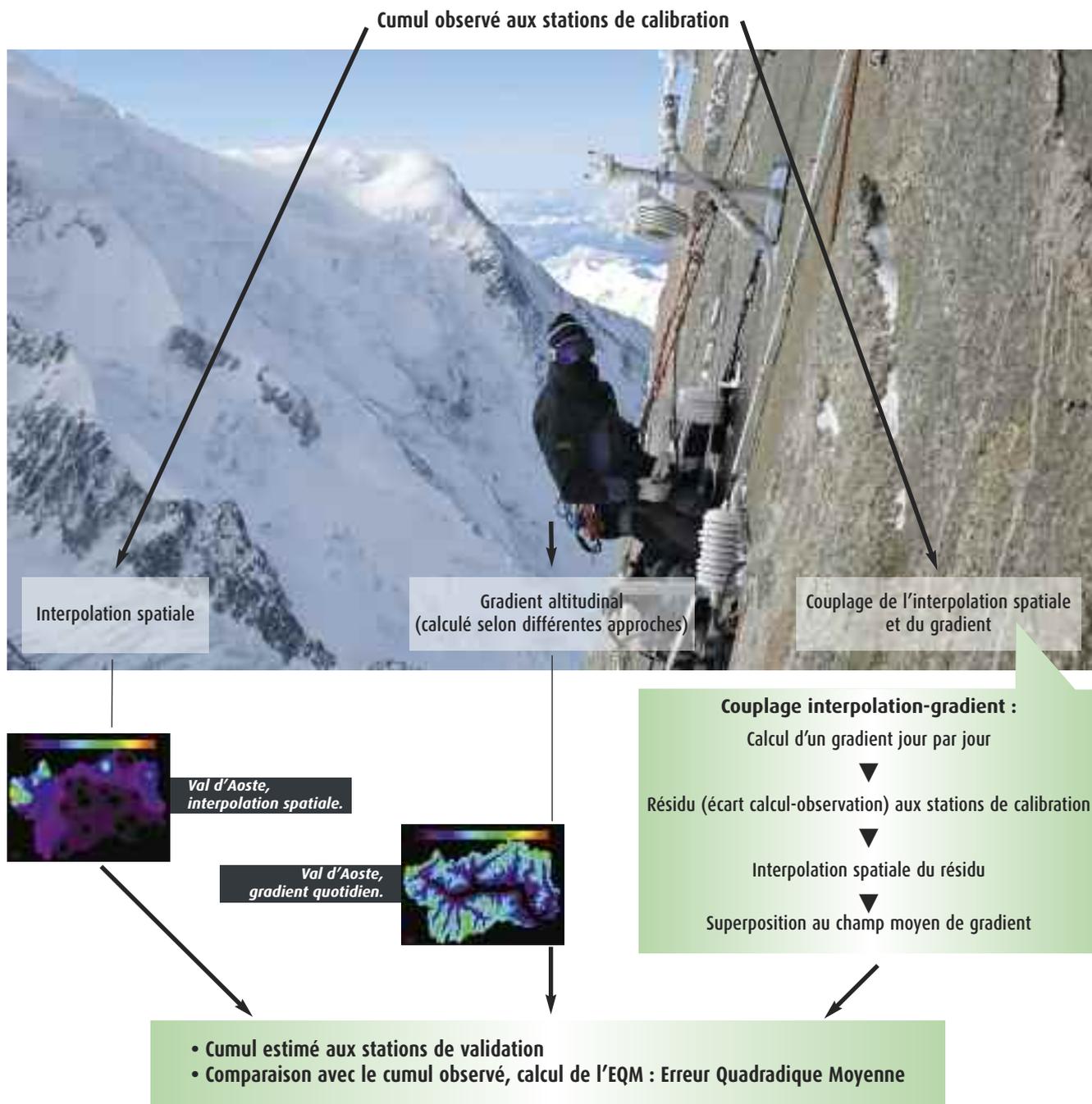
Cap sur la vallée valdôtaine de Greysoney, à 80 km à vol d'oiseau du Mont-Blanc, auscultée par six pluviomètres. Et rapide désillusion : les cumuls décroissent avec l'altitude, à l'encontre de toute logique ! La réponse vient avec la cartographie : l'entrée de la vallée est très exposée aux pluies entrant depuis le piémont ; en revanche, les stations plus en amont (et plus en altitude) bénéficient d'un effet d'abri, la vallée étant orientée Nord-Sud, soit perpendiculairement à l'axe général de progression des perturbations.

Le champ géographique doit donc encore être resserré autour du Mont-Blanc. Une fois écartées les données hivernales (de nombreux pluviomètres n'étant pas réchauffés), un gradient quotidien de l'ordre de  $0,15$  mm/100 m émerge pour le Haut Val d'Aoste. Mais la dispersion n'est pas négligeable. Pour mieux cerner l'influence du relief sur les précipitations, on classe les stations selon divers critères de nature topographique : vallée par vallée, selon l'axe de la vallée, ou encore en distinguant fonds de vallée, pentes et crêtes. Les résultats laissent à désirer : la dispersion est énorme, et les échantillons trop petits pour être significatifs. L'extension de la méthode à l'ensemble du massif (en intégrant les stations françaises) est plus insatisfaisante encore. Comment caractériser les précipitations en altitude, alors ?

Aux grands maux, les grands remèdes. Un modèle statistique couplé à un MNT (Modèle Numérique de Terrain) spatiale sur l'ensemble du Val d'Aoste les précipitations fournies en entrée, selon différentes approches (interpolation spatiale, ou différents gradients quotidiens, cf. encadré ci-contre). Au niveau de stations dites « de validation », le résultat obtenu est comparé avec la valeur mesurée. L'interpolation spatiale gagne haut la main, avec des écarts à la mesure qui laissent pourtant songeur : l'erreur médiane atteint  $55,78$  % (cumuls sur – ou sous-estimés d'autant) !

De grands espoirs sont fondés sur une approche couplant l'interpolation spatiale (qui ne prend pas en compte le relief) avec un gradient altitudinal calculé jour par jour. Mais le manque de stations en altitude se fait cruellement ressentir : impossible ici de valider cette méthode. Force est

## Modélisation des précipitations



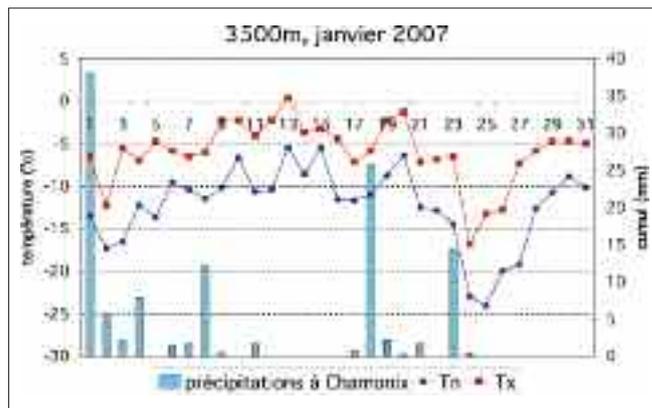
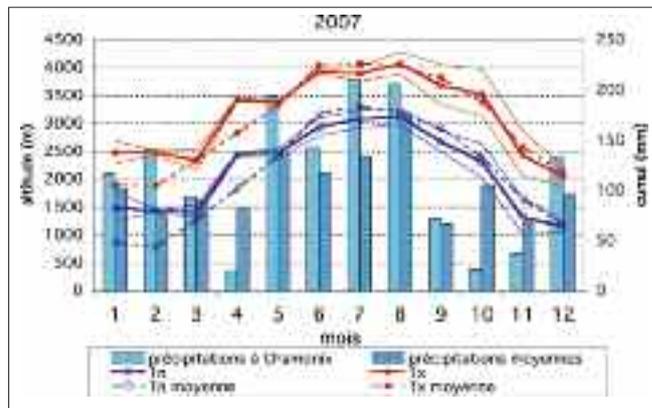
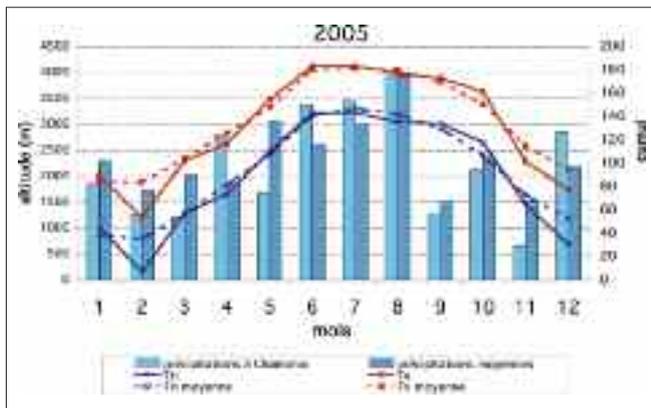
de conclure sur un échec. La variabilité spatiale est trop importante pour espérer estimer les précipitations sur le massif du Mont-Blanc. Seule parade : un réseau beaucoup plus dense de pluviomètres en altitude, et une correction poussée des erreurs de mesure.

### Diagnostic

De la chaleur, de l'eau... On en arrive à l'étape cruciale du diagnostic : ces facteurs sont-ils ceux qui rendent le permafrost malade? Le symptôme le plus évident étant les mouvements gravitaires, y a-t-il expression anormale de ces deux paramètres avant un grand écroulement rocheux ? Retour au 29 juin 2005, au matin. Le gardien du refuge de

la Charpoua entend un grand fracas, sort la tête par la fenêtre, et se trouve aveuglé par un nuage de poussière. Lorsque celle-ci retombe, toute la vallée de Chamonix découvre que plus de 250 000 m<sup>3</sup> de rocher gisent en miettes au pied de la face Ouest du Petit Dru. Le mythique pilier Bonatti n'est plus.

De la chaleur, de l'eau... Après un hiver sec et froid, qui permet au permafrost de regeler en profondeur, l'été débute dans la fraîcheur et la pluie. 35 mm sont relevés à Chamonix le 3 juin. Le mercure s'envole ensuite, pour atteindre 10 °C à 3 500 m d'altitude entre le 23 et le 28 juin. Le lendemain, c'est l'écroulement. Un cas particulier ? On reconduit l'expérience pour les étés 2003, année noire dans les Alpes, et 2007. Des températures anormalement élevées



Conditions météorologiques  
(en haut : altitude de l'iso 0°C ; en bas : Tn/Tx à 3500m ; à gauche : année 2005 ; à droite : année 2007).

les jours, voire les semaines, précédant l'écroulement, et un épisode de fortes précipitations trois à cinq semaines auparavant sont constatés pour la plupart des grands écroulements.

De la chaleur, de l'eau... Et en hiver, quand le gel étreint la montagne ? Crochet en janvier 2007, avec l'effondrement du Rognon du Plan, satellite de l'Aiguille du Midi. 35 cm de neige tombent le 1<sup>er</sup> janvier. Les courbes d'isotherme zéro degré racontent ensuite un hiver anormalement doux ; la température maximale oscille entre -3 et 0 °C à 3 500 m à la mi-janvier. De la chaleur : la cohésion de la glace interstitielle au sein du permafrost superficiel est mise à mal dès -1,5 °C (Gruber et al., 2004). De l'eau : fonte nivale partielle, et infiltration d'eau dans les fissures.

Le terrain est instable, et l'on ne peut qu'avancer sur des œufs. Mais il semble bien qu'un pic de chaleur ou une longue période de redoux hivernal affecte le permafrost ; le processus de percolation de l'eau dans les fissures, jusqu'à présent négligé, ouvre une autre piste prometteuse. Point de conclusion radicale, toutefois : les paramètres météorologiques peuvent parfois être, de façon plus modeste, l'infime impulsion faisant basculer un système déjà au bord du déséquilibre (dégradation pluriannuelle, réajustement gravitaire, etc.).

Le maçon est malade, et les causes traquées. En première ligne, température et précipitations ; mais pour cerner au mieux leur comportement en haute montagne, il paraît crucial de disposer de davantage de données. Une campagne de mesures de grande envergure permettrait de préciser les effets micro-climatiques, notamment en ce qui concerne la pluie et la neige. A l'heure du réchauffement climatique, l'enjeu grandit décennie après décennie.

Le maçon est malade, et les chercheurs n'ont pas fini de se réunir à son chevet pour proposer un diagnostic précis. Quant au remède, c'est une autre paire de manches...

Références  
Angot A., 1892: Sur la décroissance de la température de l'air avec la hauteur. C. R. Acad. Sci., 115, 1272-1273.  
Gruber S., Hoelzle M. et Haberli W., 2004. Permafrost thaw and destabilisation of Alpine rock wall in hot summer of 2003. Geophysical Research Letters, 31, L13504.

AUDREY HARTBROT