

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande  
**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 132 (2006)  
**Heft:** 09: Interactions climatiques

**Artikel:** Une étude de terrain sur le glacier de la Plaine Morte  
**Autor:** Couach, Olivier / Bou-Zeid, Elie / Huwald, Hendrik  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-99465>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 08.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Une étude de terrain sur le glacier de la Plaine Morte

ENVIRONNEMENT

**Le climat de la planète est en train de changer : les températures se sont élevées de manière significative et les précipitations, l'ensoleillement, l'enneigement ainsi que la vitesse du vent se modifient eux aussi. Ces changements devraient s'amplifier au cours de ce siècle. Dans ce contexte, l'expérience du glacier de la Plaine Morte permet de mieux comprendre les échanges d'énergie entre l'atmosphère et la neige, éléments importants pour interpréter les conditions susceptibles d'accroître le danger d'avalanches ou d'accélérer la fonte des glaciers.**

Les caractéristiques topographiques et physiques du sol contrôlent la turbulence atmosphérique qui se développe dans la couche limite atmosphérique (CLA), qui va du sol jusqu'à une hauteur comprise entre 500 et 1000 mètres. L'atmosphère interagit dynamiquement et thermiquement avec la surface du sol. Les propriétés physiques de la surface (rugosité, albédo<sup>1</sup>, etc.) influencent les divers flux d'énergie à l'interface sol-atmosphère ainsi que la dynamique de l'atmosphère. Un exemple : étant donné que la neige est plus

poreuse que le sol, le vent pénètre la couche de neige et influence les flux de masse et de chaleur sous sa surface. Ces procédés physiques – échanges interstitiels ou phénomènes agissant à la surface de la neige – affectent le bilan énergétique à l'interface neige-atmosphère. Leur étude permet de faire des prévisions sur les propriétés dynamiques et thermiques du manteau neigeux ainsi que sur son évolution.

L'un des problèmes les plus complexes et encore non-résolus pour les écoulements atmosphériques est l'évolution de la basse atmosphère lorsque la surface est plus froide que la couche d'air supérieure (conditions atmosphériques stables). Ce phénomène est très important pour les régions montagneuses comme les Alpes mais aussi pour les zones urbaines, où les problèmes de pollution atmosphérique augmentent avec des conditions stables. Dans ces conditions dites stables, la turbulence varie de façon intermittente. Il est connu que des fluides turbulents en contact avec des surfaces solides présentent des caractéristiques structurelles dites « cohérentes », c'est-à-dire organisées. Celles-ci déterminent l'échange de quantité de mouvement, de masse et d'énergie entre la surface et la couche atmosphérique proche.

## Expérience de terrain

Le glacier de la Plaine Morte (fig. 1), considéré comme un site de mesures idéal pour mieux comprendre les échanges entre la neige et l'atmosphère, a été sélectionné pour une expérience de terrain inédite. En effet, il offre une surface de neige lisse sur plusieurs kilomètres, surface plane où le vent est constant et peu perturbé par des obstacles. Les mesures réalisées sur un tel site se rapprochent donc de conditions pouvant être obtenues en laboratoire à une échelle beaucoup plus petite. De plus, les remontées mécaniques de la station de Crans-Montana rendent ce glacier facile d'accès<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Indice du pouvoir réfléchissant de la surface d'un objet céleste non lumineux par lui-même (planètes, satellites artificiels). L'albédo de la terre, déterminé par l'atmosphère, les nuages et la nature des surfaces, joue un rôle fondamental dans le bilan énergétique terre-atmosphère.

<sup>2</sup> Le site de mesures choisi se trouve à environ trente minutes à ski depuis l'arrivée du téléphérique de la Plaine Morte.





Fig. 1 : Localisation du site de l'expérience de la Plaine Morte

Fig. 2 : Remise en état de fonctionnement de l'expérience après une grosse chute de neige

De janvier à avril 2006, une équipe du Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement et d'hydrologie (EFLUM) de l'EPFL, en collaboration avec des chercheurs de l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF) de Davos et des chercheurs de la Johns Hopkins University de Baltimore (USA), a donc mené une campagne de mesures sur le glacier de la Plaine Morte, à 3000 mètres d'altitude. Les patrouilleurs de la station ont donné chaque jour des conseils de sécurité avisés et ont aidé les chercheurs à transporter sur le site plus d'une tonne d'instruments de mesures, de structures de montage, de panneaux solaires et d'ordinateurs.

### Instrumentation et mesures

Douze anémomètres soniques<sup>3</sup> et trois hygromètres ont été mis en place en direction de l'est (orientation la plus favorable pour se trouver face aux vents les plus fréquents) pour mesurer les fluctuations du vent en trois dimensions et la température de l'air à une fréquence de 20 Hz sur le glacier. Ces soniques ont été montés sur une structure stable de six mètres de hauteur. Sept soniques ont été fixés horizontalement sur un premier niveau et les cinq autres sur un niveau supérieur (fig. 2). Ils ont été disposés de cette manière afin d'obtenir une représentation spatiale de l'évolution du vent et de la température. De plus, cette structure a permis de surélever les soniques suivant l'évolution de la couche de neige, rendant ainsi possible les mesures tout au long de l'hiver.

En utilisant une structure avec plusieurs anémomètres soniques, nous pouvons mesurer la variation spatio-temporelle des flux turbulents. L'ensemble de ces mesures atmosphériques va à présent être utilisé pour tester et améliorer les modèles atmosphériques basés sur la technique numérique de « simulation des grands tourbillons », plus couramment appelée « Large Eddy Simulation » (LES). Le mot



« tourbillon » est un autre terme pour désigner la « caractéristique cohérente » (voir ci-dessus). Il définit l'ampleur de ce mouvement tourbillonnant dans l'écoulement atmosphérique et ainsi la résolution nécessaire pour les calculs numériques.

En simultanément avec les mesures de vent, de température et d'humidité sur les écoulements atmosphériques proches de la surface, des mesures sur l'évolution de la couche de neige et de ses propriétés physiques ont été effectuées. Une station météorologique a été installée près de la structure sur laquelle reposent les anémomètres soniques. Le bilan énergétique à la surface de la neige englobe la radiation nette ( $R_n$ ), les flux de chaleur turbulents sensible ( $H$ ) et latent ( $LE$ )<sup>4</sup> ainsi que le flux de chaleur conducteur ( $G$ ) dans la couche de neige. En l'absence de fonte de la couche de neige, la somme des flux radiatif et turbulent est équilibrée par le flux de chaleur conducteur :  $R_n + H + LE = G$ .

<sup>3</sup> Les anémomètres soniques émettent des ultrasons dont ils mesurent les fluctuations de vitesse. Ainsi, la vitesse du vent en trois dimensions peut être déterminée en un point donné.

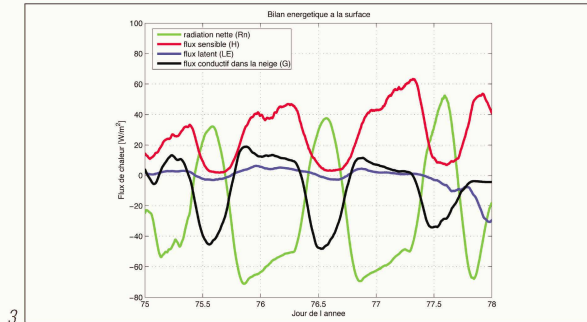
<sup>4</sup> Prend en compte l'évaporation, la condensation, la sublimation et le dépôt au-dessus de la surface de la neige.

Fig. 3 : Bilan énergétique à la surface de la neige, mesuré sur une période de trois jours

Fig. 4 : Les différents flux de chaleur sont mesurés avec quatre appareils.

Fig. 5 : La station météorologique mesure les variables atmosphériques et les composantes du bilan énergétique à la surface.

Fig. 6 : Nouvel instrument de mesure du profil de la température dans la neige, développé par l'EFLUM et installé sur la Plaine Morte



3



4



5



6

La figure 3 montre l'évolution du bilan énergétique à la surface de la neige sur une période de trois jours. La radiation nette est mesurée avec deux pyranomètres et deux pyrghéomètres de précision (fig. 4). Un pyranomètre mesure le rayonnement global alors qu'un pyrghéomètre mesure le rayonnement infra-rouge. Les flux de chaleurs turbulents (H et LE) sont obtenus à partir des mesures des anémomètres soniques. En complément, la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse et la direction du vent, la pression barométrique et la température de surface de la neige sont mesurées par la station météo (fig. 5). Un capteur de distance à ultrasons est utilisé pour mesurer l'évolution de la hauteur de la couche de neige. Le flux conducteur de chaleur dans la neige (G) est calculé à partir du gradient de température à la surface de la neige et de la conductivité thermique de cette dernière.

#### Nouvel appareil de mesure

Il est difficile de mesurer précisément le gradient de température à la surface de la neige, car son niveau varie avec les précipitations, les tourbillons de vent, le tassement et la fonte de la couche de neige. Si la hauteur de neige se modifie trop, les deux sondes de températures fixes ne sont plus fonctionnelles. Afin de résoudre ce problème, un nouveau capteur mesurant la température sur une profondeur de plus de deux mètres avec une résolution spatiale de 2,5 cm a été développé à l'EPFL.

Cet instrument, planté verticalement dans la neige, mesure un profil de température dans la couche de neige et dans la couche d'air proche de la surface (fig. 6). Il donne un calcul précis du gradient de température à la surface de la neige. La conductivité thermique de la neige dépend de sa densité. Nous avons pu mesurer cette dernière épisodiquement jusqu'à une profondeur de 1,5 mètres.

#### Mouvements d'air dans la neige

De manière générale, les mouvements d'air dans la neige sont causés par des structures « cohérentes ». Ce phénomène est important pour le transfert d'énergie car il est associé à des changements de phases et de transport de la vapeur d'eau dans la couche de neige. Les fluctuations de la pression atmosphérique et la dispersion des gaz dans le manteau neigeux sont encore mal comprises, car il existe peu de mesures et d'analyses sur ce sujet. Afin de mieux interpréter les procédés dynamiques et thermodynamiques ayant lieu dans le manteau neigeux, nous avons mesuré, à une fréquence de 10 Hz, les gradients de pression verticaux et horizontaux dans la couche de neige à différentes profondeurs et sur



Fig. 7 : Le site de l'expérience, très petit par rapport à l'immensité du glacier de la Plaine Morte

Fig. 8 : Hygromètre et anémomètres soniques sur le glacier de la Plaine Morte



7



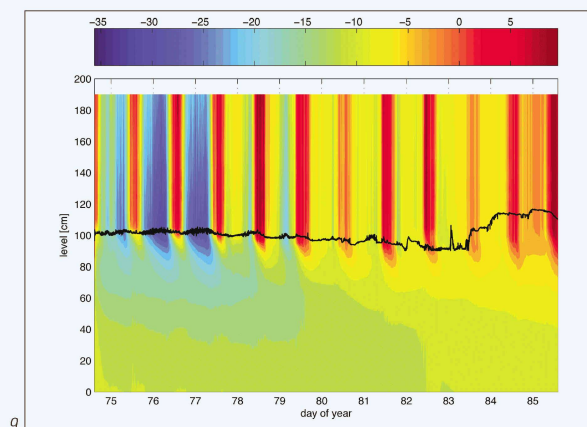
8

Fig. 9 : Evolution de la température dans la neige et dans la couche d'air proche de la surface. Chaque contour représente un intervalle de 2°C. La ligne noire indique la position de la surface de la neige.

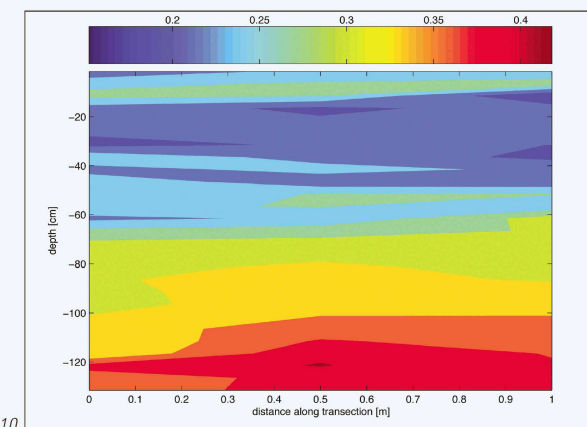
Fig. 10 : Variation spatiale de la densité de la neige. Les profils de neige ont été mesurés sur trois sites distants de 0,5 m.

Fig. 11 : Echantillonnage de gaz au cours de l'expérience sur les gaz traces dans la neige

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs, ©Jako Martinet)



9



10

différents sites du glacier. Deux axes d'un mètre de longueur chacun, munis de capteurs de pression à différents niveaux, ont été plantés verticalement dans la couche de neige, dans un axe parallèle à la direction principale du vent soufflant lors des mesures (fig. 9 et 10).

Dans le but d'étudier la diffusion, la dispersion de l'air dans la neige et la perméabilité de la neige à l'air, nous avons également réalisé des expériences avec des gaz traces. Un mélange de gaz ayant la même densité que l'air a été injecté dans la couche de neige à 30 cm et a été suivi de prélèvements réguliers à différentes profondeurs et sur différents sites (fig. 11). Les premières analyses de ces mesures ont montré des fluctuations de la pression proche de la surface de la neige et des phénomènes de transport actifs (gaz traces) même avec un vent faible. Les liens entre ces phénomènes et les écoulements atmosphériques vont à présent être investigués à partir des mesures des anémomètres soniques, des hygromètres et de la station météorologique.

L'expérience du glacier de la Plaine Morte a permis d'obtenir plusieurs séries de mesures de très bonne qualité. Les résultats finaux vont servir à l'ensemble de la communauté scientifique, notamment pour améliorer les modèles d'hydrologie alpine et d'évolution de la couche de neige. Ces modèles devront permettre de faire des prévisions sur la fonte des neiges et les écoulements printaniers des eaux dans les bassins hydrographiques alpins.



11

Olivier Couach, dr sc. tech. EPF, ing. méc. INPG-UJF  
 Elie Bou-Zeid, dr sc. tech., ing. environ. (Johns Hopkins University)  
 Hendrik Huwald, dr sc. tech., ing. environ. EPFZ  
 Marc Parlange, prof. dr sc. tech., ing. civil et environ. (Cornell University)

Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement  
 et d'hydrologie, EPFL-ENAC-EFLUM  
 Bâtiment GR, Station 2, CH – 1015 Lausanne

Ont également collaboré à ce projet : Sam Assouline, Julien Mezzo, Jan Overney, John Selker, Martin Tromp et Scott Tyler (EPFL-EFLUM), Marcelo Chamecki et Charles Meneveau (Johns Hopkins University, Baltimore), Michael Lehning (SLF Davos)

Les auteurs tiennent à remercier le personnel technique de la station de Crans-Montana : cette expérience aurait été impossible sans leur soutien et leur assistance.