

Titre : **Analyse des mesures in situ de couche limite turbulente sur pente dans les alpes européennes. Modélisation physique et Simulation numérique des vents catabatiques dans le cadre du projet collaboratif TEAMx.**

Résumé :

Les vents catabatiques sont des écoulements gravitaires générés en particulier la nuit par le refroidissement radiatif en surface terrestre. Ils sont principalement observés en hiver lors d'épisodes météorologiques anticycloniques associés à une stratification stable et à une inversion de température dans la basse troposphère. Bien que leur intensité soit relativement faible (autour de 2 à 4 m/s) sauf sur d'autres atmosphères planétaires comme celles de Mars où ils atteignent des vitesses de l'ordre de 10 à 20 m/s (Newman JGR 2022), leur rôle est primordial dans les zones de relief complexe car ils participent de manière systématique à l'accumulation de polluants en fond de vallée et contribuent directement à la génération de 'cold air pool'. Il existe un grand nombre d'observations in situ du processus catabatique le long de pentes faibles (1° à 10°) telles que celles rapportées dans les vallées ou les glaciers (voir par exemple Denby JAM 2020, Grachev BLM 2016), mais beaucoup moins le long de pentes alpines fortes (20° à 40°) dans les montagnes (voir par exemple Nadeau BLM 2013, Charrondière BLM 2022 [3]). Le vent catabatique se compose d'un jet de paroi turbulent le long de la pente couplé à une couche limite thermique turbulente refroidie en surface, tous deux soumis aux effets de la gravité.

Une approche classique du couplage est donnée par le modèle de Prandtl (1942), qui inclut également les effets turbulents (Grisogono JAS 2001), mais on sait peu de choses sur la région d'écoulement très proche en dessous de la vitesse maximale du jet en particulier pour les configurations à forte pente (Oldroyd BLM 2016).

La question de recherche traitée est double, d'une part approfondir la connaissance générale des propriétés turbulentes des vents catabatiques dans la zone très proche de la surface rarement observée in situ pour des raisons techniques et logistiques (échelles millimétriques peu accessibles avec des sondes classiques météorologiques) en adaptant in situ des sondes de mesures de vitesse 3D à haute résolution en fréquence et de taille réduite (généralement utilisées en soufflerie au laboratoire), d'autre part proposer et valider un ensemble de lois de parois nécessaires à la définition cohérente des conditions aux limites de surface pour une utilisation appropriée des modèles régionaux en montagne et sur les reliefs complexes en général (par exemple Meso-NH, SURFEX au CNRM Météo France).

L'analyse sera faite sur la base d'une campagne d'observation effectuée dans le cadre du projet alpin européen TEAMx en 2024-2025, incluant des mesures in situ d'épisodes catabatiques dans les alpes autrichiennes près d'Innsbruck (janvier-février 2025) et dans les alpes italiennes dans la vallée de l'Adige (juin-juillet 2025).

summary :

Katabatic winds are gravity flows generated in particular at night by radiative cooling at the Earth's surface. They are mainly observed in winter during anticyclonic weather episodes associated with stable stratification and temperature inversion in the lower troposphere. Although their intensity is relatively low (around 2 to 4 m/s), except over other planetary atmospheres such as those of Mars where they reach speeds of around 10 to 20 m/s (Newman JGR 2022), their role is crucial in areas of complex relief, as they systematically contribute to the accumulation of pollutants at the bottom of valleys and directly contribute to the generation of cold air pools. There are a large number of in situ observations of the katabatic process along gentle slopes (1° to 10°) such as those reported in valleys or glaciers (see for example Denby JAM 2020, Grachev BLM 2016), but much less so along steep alpine slopes (20° to 40°) in the mountains (see for example Nadeau BLM 2013, Charrondière BLM 2022 [3]). The katabatic wind consists of a turbulent wall jet along the slope coupled to a turbulent thermal boundary layer cooled at the surface, both subject to the effects of gravity.

A classical approach to coupling is given by Prandtl's (1942) model, which also includes turbulent effects (Grisogono JAS 2001), but little is known about the region of flow below the jet's maximum velocity very close to the surface, in particular for steep-slope configurations (Oldroyd BLM 2016). The research question addressed is twofold: on the one hand, to improve general knowledge of the turbulent properties of katabatic winds in the region very close to the surface, which is rarely observed in situ for technical and logistical reasons (millimetre scales not easily accessible with conventional meteorological probes), by adapting in situ 3D velocity measurement probes with high frequency resolution and small size (generally used in wind tunnels in the laboratory), secondly, to propose and validate a set of wall laws necessary for the coherent definition of surface boundary conditions for the appropriate use of regional models in the mountains and on complex reliefs in general (e.g. Meso-NH, SURFEX at the CNRM Météo France).

The analysis will be based on an observation campaign carried out as part of the European Alpine TEAMx project in 2024-2025, including in situ measurements of katabatic episodes in the Austrian Alps near Innsbruck (January-February 2025) and in the Italian Alps in the Adige Valley (June-July 2025).

Sujet :

Ce projet de thèse vise à approfondir l'étude des processus turbulents à l'oeuvre très près de la surface dans les vents catabatiques sur pente forte et généralise les résultats obtenus dans le massif de Belledonne (2012-2019) en s'intéressant à 2 nouveaux sites de mesure dans les alpes européennes : la vallée de l'Inn près d'Innsbruck en Autriche et le massif du Monte Baldo près de Trento en Italie. La double campagne de mesure effectuée dans chacune de ces régions en hiver 2025 et été 2025 vient compléter l'ensemble des observations effectuées dans le cadre du programme collaboratif européen TEAMx dédié à l'étude *in situ* des processus atmosphériques dans les alpes européennes (<http://www.teamx-programme.org>). La thèse se focalisera sur l'analyse des résultats expérimentaux 2025. Un élément central sera la modélisation théorique des processus de couches limites catabatiques et leur transposition en modélisation numérique DNS et LES avec le code de calcul YALES2 (co-développé au LEGI) et le modèle meso-échelle MesoNH couplé au modèle de surface SURFEX (développés au CNRM MétéoFrance).

Intérêt scientifique, contexte et état de l'art :

Les vents catabatiques sont des écoulements gravitaires générés en particulier la nuit par le refroidissement radiatif en surface terrestre. Ils sont principalement observés en hiver lors d'épisodes météorologiques anticycloniques associés à une stratification stable et à une inversion de température dans la basse troposphère. Bien que leur intensité soit relativement faible (autour de 2 à 4 m/s) sauf sur d'autres atmosphères planétaires comme celles de Mars où ils atteignent des vitesses de l'ordre de 10 à 20 m/s (Newman JGR 2022), leur rôle est primordial dans les zones de relief complexe car ils participent de manière systématique à l'accumulation de polluants en fond de vallée et contribuent directement à la génération de 'cold air pool'. Leur implication en fin d'hiver dans les processus de gelées printanières dans les vignes et les vergers est également devenue une problématique récurrente en lien avec certains effets critiques du dérèglement climatique sur l'arboriculture fruitière en coteaux.

Il existe un grand nombre d'observations in situ du processus catabatique le long de pentes faibles (1° à 10°) telles que celles rapportées dans les vallées ou les glaciers (voir par exemple Denby JAM 2020, Grachev BLM 2016), mais beaucoup moins le long de pentes alpines fortes (20° à 40°) dans les montagnes (voir par exemple Nadeau BLM 2013, Charrondière BLM 2022 [5]). Les vents catabatiques se composent d'un jet de

paroi turbulent le long de la pente couplé à une couche limite thermique turbulente refroidie en surface, tous deux soumis aux effets de la gravité. Une approche classique du couplage est donnée par le modèle de Prandtl (1942), qui inclut également les effets turbulents (Grisogono JAS 2001), mais on sait peu de choses sur la région d'écoulement très proche en dessous de la vitesse maximale du jet en particulier pour les configurations à forte pente (Oldroyd BLM 2016).

Objectif général et questions de recherche traitées

La question de recherche traitée est d'une part d'approfondir la connaissance générale des propriétés turbulentes des vents catabatiques dans la zone très proche de la surface rarement observée in situ pour des raisons techniques et logistiques, d'autre part de mieux comprendre la turbulence générée par ces vents et sa contribution aux processus de météorologie de montagne sur forte topographie, puis son rôle dans les modèles de climat actuels, globaux et régionaux.

On proposera d'implémenter et de valider un ensemble de lois de parois thermiques et dynamiques, avec un code de calcul de processus (YALES2 au LEGI). Ces lois sont nécessaires à la définition cohérente des conditions aux limites de surface pour une utilisation appropriée des modèles régionaux en montagne et sur les reliefs complexes en général (par exemple Meso-NH, SURFEX au CNRM Météo France).

Les résultats préliminaires de la campagne TEAMx, soutenue à la fois par un projet INSU LEFE (hiver) et un projet LABEX OSUG (été) vont permettre d'évaluer avec précision les propriétés de la couche limite turbulente dans la région située en dessous du maximum du jet catabatique, en relation avec les effets de la gravité (communications [11] au 37th ICAM, 30 Septembre 2025, Croatia, [12] au 26eme CFM, 26 Août 2025, Metz et [13] à l'EGU, 27 April-2 May 2025). Les résultats confirment les tendances déjà publiées (Charrondière JFM 2022 [6]) sur la base de quelques mesures effectuées avec la même sonde dans le cadre de la campagne 2019 sur les pentes du Grand Colon, massif de Belledonne (les données sont disponibles sur un dépôt Zenodo [4]).

L'objectif général de l'étude est de valoriser la double campagne d'observation dans les alpes autrichiennes de l'hiver janvier-février 2025 près d'Innsbruck puis les alpes italiennes de l'été juin-juillet 2025 près de Trento, dans le cadre du projet alpin européen TEAMx 2024-2027. Il s'agira d'une analyse de base de données expérimentales couplée à la modélisation analytique puis numérique de processus puis de leur transposition *in situ*.

Plan de recherche, méthodologie :

1. Analyse des mesures locales de la couche limite turbulente dans le jet catabatique sur forte pente surplombant la vallée de l'Inn près d'Innsbruck (Alpes autrichiennes) et sur les pentes du Monte Baldo (Alpes italiennes).

Le site NF27 est un site instrumenté de l'observatoire i-box de la vallée de l'Inn entretenu depuis 2016 par l'équipe de physique atmosphérique d'Innsbruck. Il consiste en une pente alpine d'angle environ 27° située à 1000m d'altitude et s'étendant sur une longueur d'environ 500m : <https://acinn-data.uibk.ac.at/pages/i-box-hochhaeuser.html>

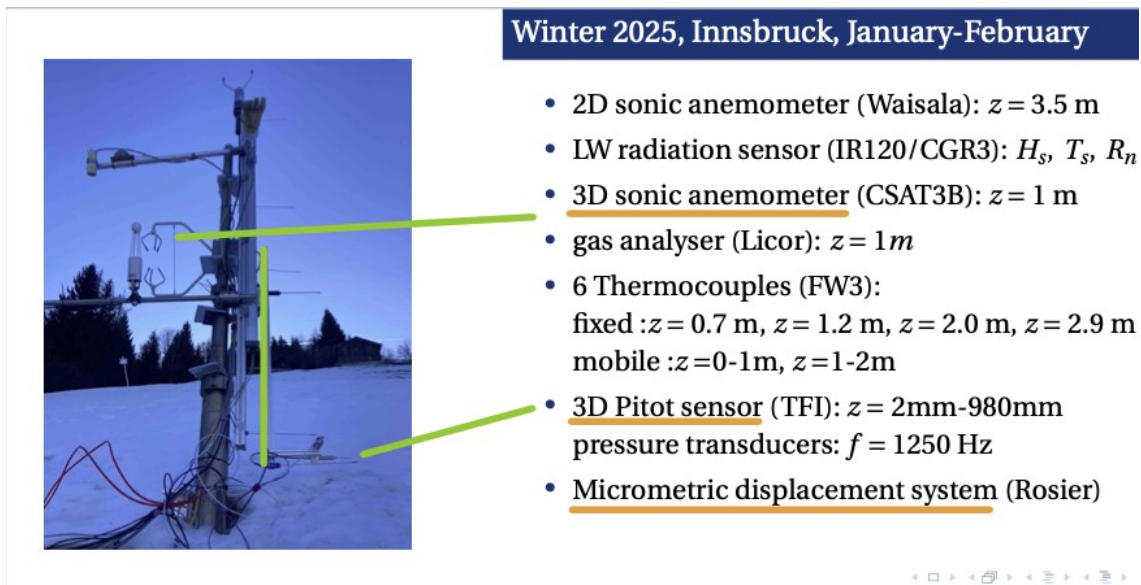


Fig 1 : Mat instrumenté du profileur pendant la campagne de janvier-février 2025 à l'observatoire NF27 dans la vallée d'Innsbruck (Alpes autrichiennes).

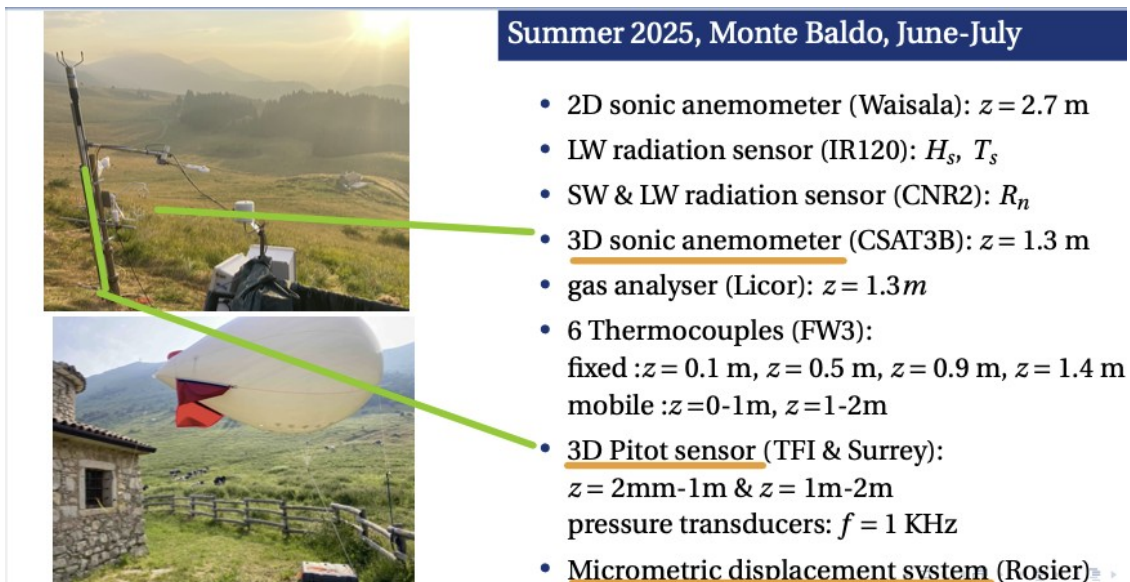


Fig 2 : Mat instrumenté du profileur pendant la campagne de juin-juillet 2025 sur les pentes du Monte Baldo (Alpes italiennes).

Le site est accessible par la route depuis la vallée. Des mesures en bas de pente sont disponibles en continu sur un mat instrumenté avec une station météorologique (pression, température, humidité relative, rayonnement LW & SW, vitesse moyenne 2D) et 1 anémomètre sonique placé à 1.50 m du sol. Ces observations viendront compléter la campagne de mesure effectuée en janvier-février 2025 dans le cadre du projet TeamX (Fig 1). Un mat instrumenté avec le profileur Cobra du LEGI a été installé à mi-pente au dessus de la station NF27. On dispose ainsi d'un ensemble continu de mesures depuis le sol jusqu'à une hauteur de 1m (doublé à 2m par l'utilisation d'un 2ème pitot de même type acquis dans le cadre d'un projet de soutien INSU LEFE), c'est-à-dire incluant la hauteur maximale du jet [1-6, 11, 12]. La spécificité de ces mesures consiste en l'utilisation de deux sondes de vitesse 3D multi-trous à haute fréquence d'échantillonnage (1 KHz), couplées à des sondes thermocouples mobiles, l'ensemble monté sur un système de déplacement vertical. Les mesures effectuées de $z = 2$ mm près de la surface de la neige

($z+ = 20$ exprimé en unités de paroi) à $z = 2$ m de hauteur ($z+ = 10^4$) des 3 composantes de la vitesse et de température ont été collectées pendant des épisodes catabatiques sur des périodes d'environ 30 minutes tout au long de la nuit et donnent accès au profil vertical moyen de vitesse 3D et température mais également à des échantillons temporels à traiter par analyse spectrale. Les mesures effectuées de part et d'autre du maximum du jet permettront de discuter le comportement spectral dans le jet catabatique et retrouver des lois de turbulence d'onde forte à grande échelle [1].

Une campagne similaire a été mise en place au cours de l'été 2025 sur les pentes du Monte Baldo (vallée de l'Adige, Italie) et permet entre autre d'étudier les vents catabatiques nocturnes en situation anticyclonique (fig. 2). En complément, un système de mesure de rayonnement grandes et petites longueur d'ondes CNR2 a été mis en place (acquis grâce au soutien financier du LABEX OSUG2020) afin de caractériser le cycle radiatif à la surface, qui constitue le forçage de la couche limite atmosphérique turbulente (fig. 3). Les observations ont été menées de nuit pour retrouver des situations catabatiques similaires à celles observées l'hiver, mais aussi de jour pour étudier les configurations anabatiques.

2. Modélisation méso-échelles du vent thermique dans le massif alpin autrichien près d'Innsbruck et dans le massif Italien du Monte Baldo (Programme d'observation IOC TEAMx hiver-été 2025)

Les mesures locales et à petite échelle effectuées au niveau de la station NF27 en janvier-février 2025 puis sur les pentes du Monte Baldo en juin-juillet 2025 seront mises en perspective de la campagne complète d'observation dans l'ensemble des massifs alpins européens (Transect Allemagne-Autriche-Italie) pendant l'hiver 2024-2025 puis l'été 2025. En particulier on comparera les mesures locales à l'ensemble de la couche limite atmosphérique stable attendue lors d'épisodes anticycloniques hivernaux puis estivaux. Les observations à grande échelles effectuées dans le cadre de TEAMx permettront de définir un niveau de référence global de la stratification stable à comparer aux données locales. A cette fin on mettra en œuvre des simulations numériques méso-échelle à l'échelle de la vallée d'Innsbruck/du Monte Baldo avec descente d'échelle jusqu'à celle de la pente instrumentée. On utilisera le modèle MesoNH couplé au modèle de surface SURFEX (CNRM Météo-France) en collaboration avec les équipes du CNRM et LAERO Toulouse. L'équipe MEIGE du LEGI a une longue expérience de l'utilisation de ce modèle sur relief complexe (PhD S. Blein 2016, M1 A. Robledano 2021, M1 R. Monville 2021).

3. Traitement de données à l'échelle du cycle diurne et élaboration de jeux de données

Les bases de données générées donneront accès à une représentation quasi complète de la CLA turbulente sous le maximum du jet, incluant des variations spatio-temporelles importantes. Les outils statistiques classiques seront mis en œuvre afin de caractériser l'ensemble des échelles de la couche limite turbulente. On s'intéressera en particulier à déterminer les invariants du tenseur de Reynolds qui sont très utilisés en turbulence pour quantifier l'écart à l'isotropie des structures turbulentes (Tennekes and Lumley 1972, Stiperski et al. QJRM 2017, APS 2023). On tracera la carte des invariants d'anisotropie (AIM) qui montre clairement à quel point la couche limite turbulente s'écarte de l'état de turbulence isotrope et nécessite de séparer les contributions des flux turbulents dans la direction principale de l'écoulement moyen (direction du vent catabatique) et dans la direction principale de cisaillement (direction perpendiculaire à la surface au sol) [8, 9]. On montrera d'abord en quoi les couches limites turbulentes sous vent catabatique sont universelles puis on s'attachera à décrypter les différences qui pourraient être dues essentiellement à l'état de stratification ambiante de la CLA stable et également à l'état de rugosité de surface.

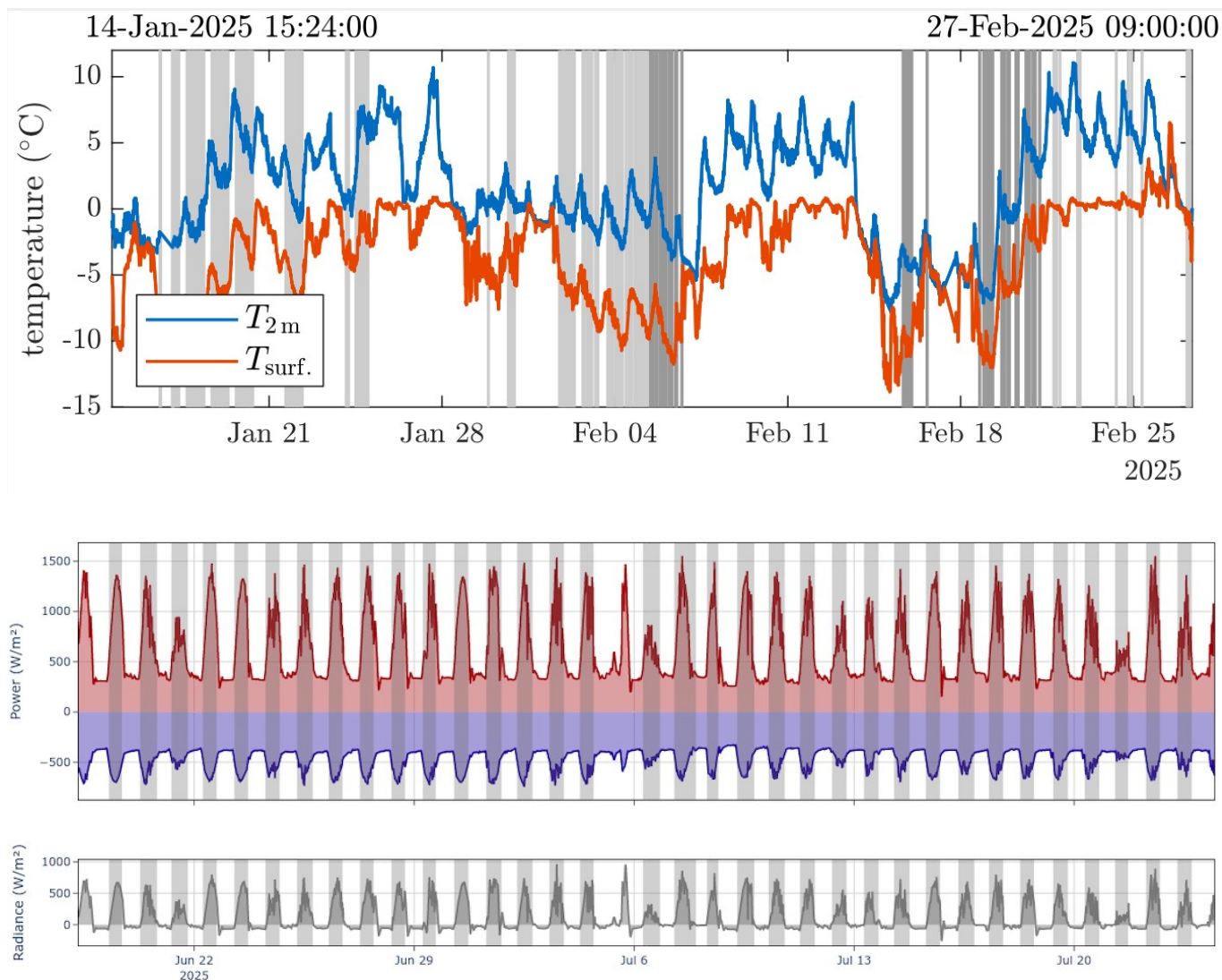


Fig 3 : Bilan radiatif temporel des 2 campagnes de mesure dans les Alpes autrichiennes (haut) et les alpes italiennes (bas). Evolution temporelle de la température à la surface et de la température à 1.50 m le long des pentes du Hochauser dans la vallée d’Innsbruck en janvier-février 2025 (haut). Evolution temporelle du rayonnement net (long wave et short wave) à la surface le long des pentes du Monte Baldo dans la vallée de l’Adige en juin-juillet 2025 (bas).

Les données seront mises à disposition sur des serveurs de données libres d’accès, à l’image de ce qui est déjà partagé sur un serveur Zenodo pour les données de la campagne 2019 dans Belledonne [4]. A court terme, les données seront partagées entre les équipes contribuant au projet sur un serveur OpenDAP du LEGI plus rapide de mise en place et plus souple d’utilisation. Par ailleurs, dans le cadre du projet TEAMx il est prévu que l’ensemble des observations de la campagne 2024-2025 soit partagé sur un serveur de données à échéance de juillet 2026.

4. Analyse et modélisation des processus de couche limite turbulente

On a montré dans l’ensemble des campagnes de mesure dans le massif de Belledonne en 2012, 2019 et 2023 que le modèle de Prandtl (1942) pour les profils de vitesse et de température du jet catabatique permettait d’obtenir une très bonne approximation des

données mesurées à condition de considérer un modèle de viscosité turbulente (coefficient de mélange du modèle de Prandtl) avec une variation linéaire en fonction de la distance à la paroi [1, 3, 5, 6, 7, 8]. Le dernier jeu de données de 2023 permet d'affiner le modèle en séparant le comportement du modèle de mélange au dessous (couche limite turbulente) et au dessus (couche de mélange) du maximum du jet. Les résultats préliminaires de la campagne 2025 (fig. 4) montrent les premiers profils de couche limite thermique et dynamique mesurés in situ dans la couche de surface (à notre connaissance de la littérature sur le sujet). Les mesures permettent d'accéder à l'ensemble des profils depuis la surface (ici $z=3$ mm) jusqu'à 2m soit largement au dessus du maximum du jet (situé ici à environ $z=20$ cm). Les mesures au dessus du mat (en bleu sur la figure 4) sont déduites des séries de profilage effectuées avec une sonde de pression/température emportée sous ballon captif jusqu'à 200m d'altitude et couplée à un anémomètre sonique 2D. On améliorera encore ce modèle pour proposer des fermetures universelles en fonction des échelles caractéristiques catabatiques (pente, refroidissement, frottement).

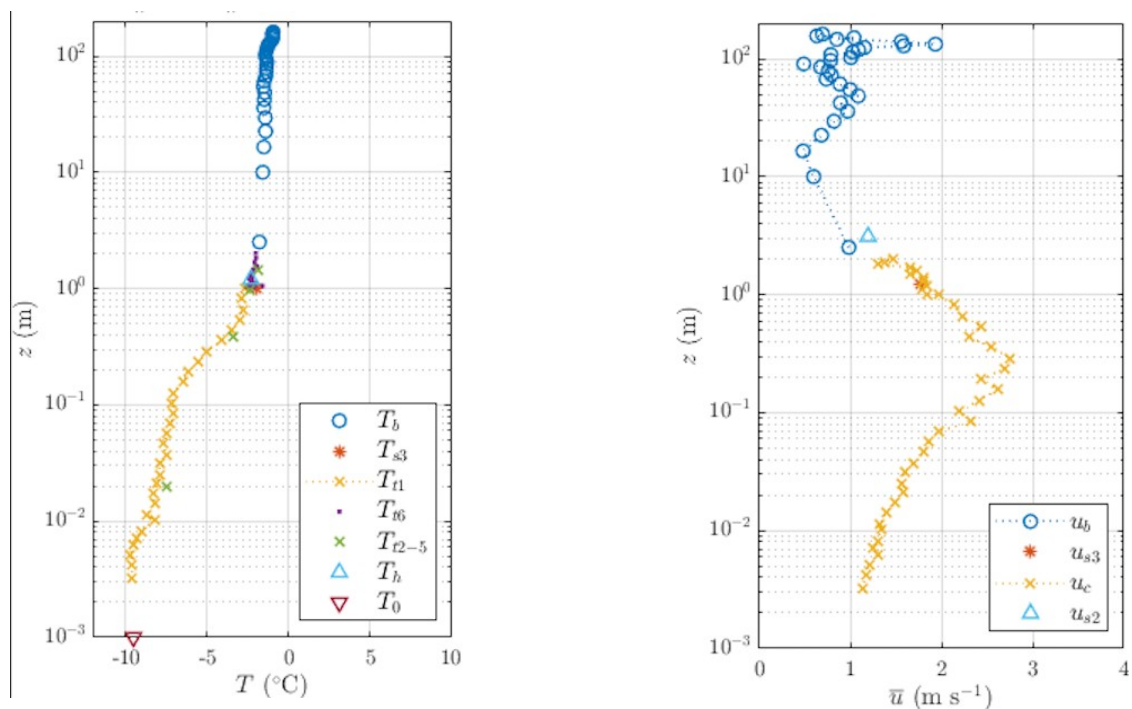


Fig 4 : Profils de de température T et de vitesse longitudinale U dans la couche limite turbulente près de la surface (Vallée d'Innsbruck nuit du 3-4 février 2025, 3h36-4h10).

On reprendra l'analyse théorique et expérimentale de Denby et Smeets (J Appl. Met. 2000) afin de valider dans la configuration de forte pente l'évolution linéaire des profils de flux turbulents d'une part (par effet de gravité) et la correction qui en découle de loi logarithmique-linéaire pour le profil de vitesse. Les résultats préliminaires de TEAMx confirment le comportement linéaire des flux à la surface (fig. 5), suivis ici d'une zone très près de la surface à flux constant (qui coïncide avec une zone de température constante égale à la température de surface). Cette contribution est particulièrement bien décrite par un modèle algébrique simplifié des équations de Navier-Stokes :

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}}_{\text{Inertia}} + \underbrace{\bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}}_{\text{Advection}} + \underbrace{\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}}_{\text{Divergence of the turbulent momentum flux}} \approx \underbrace{-g \frac{\bar{\theta}_s - \theta_a}{\theta_a} \sin \alpha}_{\text{Katabatic forcing}} = \frac{u_*^2}{L_{Kat}}$$

$$-\overline{u'w'} = u_*^2 \left(1 - \frac{z}{L_{Kat}}\right) = \left(\kappa z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2$$

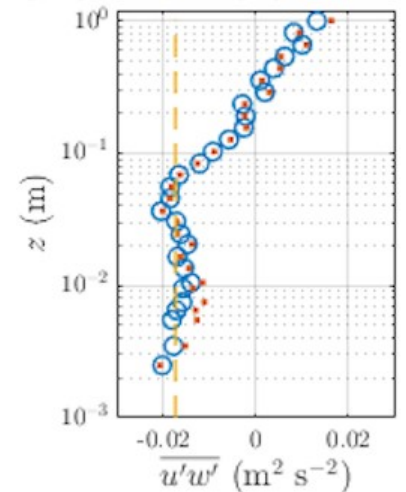


Fig 5 : Profil vertical de flux turbulent $\langle u'w' \rangle$ du jet catabatique (Vallée d'Innsbruck nuit du 3-4 février 2025, 3h36-4h10).

Par ailleurs, on observe des lois logarithmiques pour la composante descendante de la vitesse près du sol et pour la température [11, 12]. Les effets de rugosité et la correction de la gravité due à un fort refroidissement de la température du sol sont également bien décrits. On définit enfin une échelle de longueur gravitaire L_{Kat} essentielle dans la modélisation des vents catabatiques sur forte pente dont les ingrédients sont la pente, le refroidissement en surface et la gravité mais ne dépend pas directement du terme de flottabilité turbulente, ce qui laisse envisager que les corrections de type Monin-Oboukov (MO) sont de second ordre ici par rapport à des effets directs gravitaires. Ce point sera à préciser et confirmer car c'est une question récurrente depuis une dizaine d'années dans la communauté scientifique de s'interroger de la validité de l'approche de similitude de MO dans le cadre des vents catabatiques.

5. Simulation numérique LES des processus catabatiques sur pente simple

On modélisera les processus de vents catabatiques par une approche DNS et LES sur une configuration de pente simple en utilisant le codes YALES2 co-développé au LEGI (équipe MoST). Ce code a déjà été utilisé avec succès dans le cadre d'une thèse (PhD J Dagaut 2021) pour simuler les instabilités de Görtler dans une couche limite sur pente courbe concave, y compris refroidie en paroi. Les résultats préliminaires de la configuration de vent catabatique sur pente simple (stage M2 Ph. Rosales 2025) sur le nouveau serveur de calcul KRAKEN de GRICAD à l'UGA ont permis de dimensionner une configuration numérique de référence avec un maillage et un domaine adaptés et des conditions limites thermiques (refroidissement en surface, stratification ambiante) à la fois réalistes par rapport aux mesures [11, 12] et accessibles au calcul HPC.

6. Développement de lois de paroi pour les simulations numériques meso-échelles

Les modèles régionaux (par exemple Meso-NH) sont rarement utilisés à des échelles aussi petites que celles caractéristiques des vents catabatiques de surface. Leur réponse dans des situations de relief complexe est souvent imparfaite. Une des raisons évidente est que les conditions aux limites en surface ne sont pas adaptées au forçage, en l'occurrence le forçage catabatique/anabatique. On utilise souvent des lois de paroi pour fixer l'état de l'écoulement au premier point de modélisation dans la zone près de la surface. Les mesures sous le maximum du vent catabatique montrent que les lois classiques de paroi logarithmiques en régime turbulent ne sont pas complètement valables. En particulier le flux turbulent $\langle u'w' \rangle$ n'est pas constant et la contribution W n'est

jamais prise en compte alors que les mesures montrent une porosité importante de l'ordre de 10 % du champ moyen du vent catabatique. On se propose donc d'ouvrir un chantier de modélisation des lois de paroi afin de développer un ensemble de conditions aux limites adaptées aux différents types de situations de vents catabatiques conditionnées par la taille relative des échelles résolues explicitement par le modèle numérique. Ce projet vise aussi, dans le cadre d'une coopération européenne avec les meilleurs experts de la mesure atmosphérique en milieu complexe, de proposer de nouvelles lois de paroi, afin d'améliorer les modèles atmosphériques, météorologiques, climatiques existant (TEAMx). Cet ensemble de lois pourra être validé à terme dans les modèles de surface et modèles régionaux (SURFEX couplé à MesoNH).

Références bibliographiques

- [0] Stiperski, I.; Brun, C.; Zardi, D. et al. (2025): Open questions in atmospheric turbulence: A synthesis from the centenary workshop "100 years of turbulence: Innsbruck 1922 -2022". In: *Journal of the European Meteorological Society* 3/100022, No.100022.
- [1] C. Brun, H. Michallet, E. Negretti, T. Fernandez, A. Tassigny, P. Alvarez, M. Lagauzère, N. Philippot, F. Rodriguez, E. Francisco-Alcantara, L. Gostiaux, I. Staudinger, G. Doglioni (2025) Turbulence in katabatic and anabatic winds on steep slopes In situ observations from the Austrian Alps to the Italian Alps, 37th ICAM, 30 Septembre 2025, Croatia
- [2] C. Brun, H. Michallet, S. Pioz, E. Negretti, T. Fernandez, A. Tassigny, M. Magnier, P. Alvarez, S. Louet, M. Lagauzère, I. Staudinger (2025) Analyse des mesures de couche limite turbulente gravitaire sur pente alpine de la région d'Innsbruck, 26eme CFM, 26 Août 2025, Metz
- [3] M. Lehner, M. W. Rotach, I Stiperski, L. Pfister, A. Gohm, C. Brun, J. Vüllers, J. Cermak, A. Orr, I. Renfrew, H. F. Dacre, C. Chemel (2025) The TEAMx Observational Campaign – First findings from the winter campaign EGU, 27 April-2 May 2025, Austria , <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-5859>
- [4] C. Brun, W. Bessem, A. Dublanche, M. Lagauzère, S. Pioz, 'Turbulent boundary layer measurements near the surface below the jet maximum in a katabatic wind along alpine slope.' EMS Annual Meeting 2024, Barcelona, Spain, 1–6 Sep 2024, EMS2024-616,
- [5] C. Charrondière, C. Brun, E. J. Hopfinger, J.-M. Cohard and J.-E. Sicart, (2024) Evidence of strong wave turbulence and of Bolgiano temperature spectra in katabatic winds on steep slopes', *Physics of Fluids*, Volume 36, 026615 (2024)
- [6] C. Brun, H. Michalet, M. Obligado, M. Lagauzere, EUROMECH Colloquium **608**: Dynamics of Gravity currents, Grenoble, 28 juin 2023.
- [7] C. Brun et al., [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6546702>, 2022
- [8] C. Charrondière, C. Brun et al., *Boundary-Layer Meteorology*, 187:29–54, 2022
- [9] C. Charrondière, C. Brun, et al., *Journal of Fluid Mechanics*, 941, 2022
- [10] C. Brun, C. Charrondière, M. Obligado, E.J. Hopfinger, J.E. Sicart, J.M. Cohard., 'turbulent flow in the inner layer of a katabatic jet along a steep alpine slope '. *European Geoscience Union*, Wien, 2022.
- [11] C. Charrondière, C. Brun, J.E. Sicart, J.M. Cohard, R. Biron, S. Blein (2020) 'Buoyancy Effects in the Turbulence Kinetic Energy Budget and Reynolds Stress Budget for a Katabatic jet over a Steep Alpine Slope'. *Boundary Layer Meteorology*, **177**, pages 97–122, <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00549-2>
- [12] Brun, C. (2017), Large-Eddy Simulation of a katabatic jet along a convexly curved slope. part 2: Evidence of Görtler vortices. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122(10), 5190–5210 .