

Contrat doctoral sur projets exploratoires émergents de l'Université Grenoble Alpes Années 2026-2029

Acronyme du projet	PreVerS
Titre de la thèse	Pr éservation des V ergers de S avoie face aux gelées printanières. Rôle du vent catabatique sur le processus de gelée radiative en coteau.
Directeur de thèse : contact et candidature	Christophe Brun LEGI/MEIGE christophe.brun@univ-grenoble-alpes.fr
Date limite de dépôt de candidatures	7 juin 2026
Date de début de contrat	1 ^{er} octobre 2026
Ecole doctorale	ED STEP - Sciences de la Terre, de l'Environnement et des Planètes

1. Résumé de la thèse

Le dérèglement climatique actuel se traduit par une recrudescence des phénomènes météorologiques extrêmes et leur amplification. Parmi ceux-ci, les gelées printanières impactent de plus en plus souvent le développement des arbres fruitiers. Le projet présent se propose d'utiliser en synergie la variété d'approches dont le LEGI est spécialiste (numérique, expérimentale, théorique) pour comprendre finement les processus de refroidissement à l'œuvre dans les vergers lors d'épisodes de gelées et analyser le mélange turbulent nécessaire pour le contrer.

Les objectifs du projet sont de deux ordres :

- étudier le phénomène de gelées printanières pour mieux comprendre les processus thermodynamiques et aérodynamiques mis en jeu et leur interaction en relief alpin, en situation d'inversion thermique courante lors d'épisodes météorologiques anticycloniques.
- analyser l'efficacité des moyens de lutte mis en œuvre sur le terrain, les modéliser, les évaluer et proposer des solutions alternatives :
 - valorisation de la topographie alpine et des vents catabatiques associés pour augmenter le mélange turbulent en utilisant des moyens passifs (murets, haies)
 - génération de nuages de vapeur d'eau pour réduire ou bloquer les échanges radiatifs à la surface

Les approches mises en œuvre pour l'étude sont diverses et complémentaires et s'appuient toutes sur l'expertise du LEGI dans le domaine de la mécanique des fluides appliquée à la géophysique d'une part (équipe MEIGE) et à la modélisation numérique HPC de la turbulence d'autre part (équipe MoST) :

- études in situ des phénomènes de gelées printanières dans les vergers de Savoie
- modélisation numérique 3D HPC des épisodes météorologiques d'intérêt à l'échelle du verger, dans le contexte régional et des processus en configuration idéalisée
- analyse théorique des instabilités hydrodynamiques et thermiques mises en jeu dans les processus de mélange turbulent à l'échelle de la couche de surface en coteau

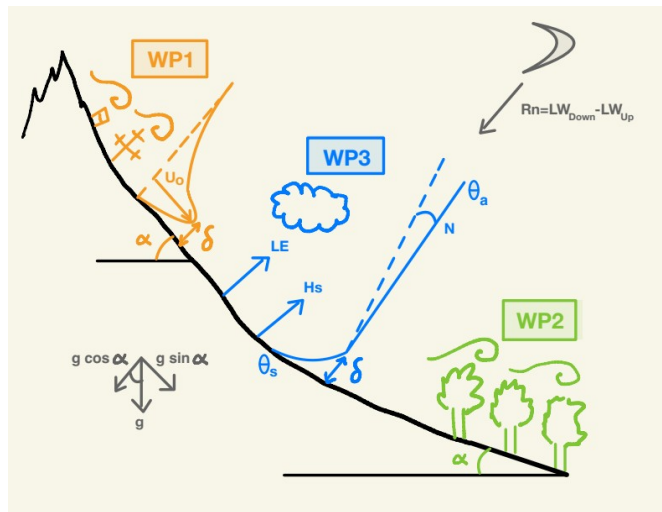
Tout en étant fortement ancré dans des activités de recherche fondamentale sur la turbulence, le projet se veut au plus près d'une problématique sociétale et à ce titre mettra en jeu des collaborations étroites avec différents acteurs de la problématique des gelées printanières :

- arboriculteur de la SCEA des vergers de la Ferme du coteau en Savoie
- réseau de la chambre d'agriculture Mont-Blanc Savoie

Afin de mener à bien ce projet, la partie expérimentale *in situ* sera prise en charge dans le cadre d'une thèse de doctorat encadrée par un EC et une chercheuse de l'équipe MEIGE du LEGI. C'est l'objet de ce projet de décrire comment la thèse centrée sur l'observation de la turbulence *in situ* contribuera à une partie du projet de recherche et devrait permettre, d'une part d'améliorer la compréhension des processus en jeu dans l'interaction des vents catabatiques en coteau avec les gelées radiatives dans les vergers, d'autre part de proposer des solutions efficaces et quantifiables pour contrer ces gelées.

1. Contexte scientifique et/ou technologique, objectifs du projet et positionnement

Contexte — Le dérèglement climatique se traduit par une recrudescence de phénomènes extrêmes météorologiques tels que les gelées printanières qui impactent de plus en plus souvent le développement des arbres fruitiers. La phase de débourrement de la végétation devient plus précoce en fin d'hiver puis le gel radiatif agit sur la floraison du fruit. Les vergers de pommes et les vignobles en coteaux sont parmi les plus touchés. Les épisodes anticycloniques de gelée, récurrents depuis avril 2017, ont conduit à de lourds dégâts. Les solutions adoptées sont variées : brasiers dans les vergers, fumées en amont des coteaux, turbines



aérodynamiques ou hélicoptères en vol stationnaire. Elles s'appuient d'une part sur la redistribution du bilan d'énergie radiatif nocturne en surface en flux de chaleur sensible au niveau des vergers, d'autre part sur la valorisation du mélange turbulent généré par des sources aérodynamiques locales et sa contribution aux transferts de chaleur au sein de la basse couche de l'atmosphère. Bien que clairement identifiés, ces phénomènes thermiques et dynamiques sont en forte interaction et leur couplage a été peu étudié, d'autant qu'il s'agit d'une couche limite atmosphérique sur pente mêlant des processus complexes, localisés et intermittents, très proches de la surface, associés à des vents thermiques descendants.

Etat de l'art — Le développement accru d'études ciblées [1] pointe l'urgence de la situation de terrain devenue critique depuis la dernière décennie. L'intérêt applicatif est croissant dans les vignes [2], les vergers ou les champs de thé. Si les études récentes s'intéressent au bilan radiatif d'énergie à la surface [3, 21], le rôle joué par le vent thermique nocturne descendant (vent catabatique) sur les pentes des coteaux est complètement ignoré. Sur le plan fondamental, les processus de couche limite atmosphérique stablement stratifiée en température et leur lien avec le forçage radiatif de surface en situation anticyclonique sont largement documentés [4, 5, 20]. En situation nocturne par ciel clair, le rayonnement net à la surface terrestre est porté par la seule contribution à grande longueur d'onde entre l'atmosphère et le sol $R_n = LW_{down} - LW_{up}$ selon la loi de Stefan d'un corps gris, et son bilan radiatif négatif est redistribué à l'atmosphère sous forme de chaleur sensible $H_s < 0$ et chaleur latente LE (voir schéma). Cela constitue le forçage gravitaire principal des vents catabatiques le long d'une pente, selon Prandtl (1942) [6,7]. C'est l'objectif de l'étude de **remettre au centre des phénomènes de gelée printanière la compréhension des processus gravitaires** à l'œuvre en arboriculture, en interaction avec les **processus thermiques turbulents** et leur sensibilité aux conditions environnantes

Objectifs du projet et hypothèses de recherche — Les gelées printanières en coteau sont principalement gouvernées par le couplage entre refroidissement à la surface et écoulement gravitaire associés au vent

catabatique turbulent sur pente. On étudiera le phénomène par des mesures *in situ* pour mieux comprendre les processus thermiques et dynamiques mis en jeu et leur interaction en relief de pente, en situation anticyclonique d'inversion thermique. On associera des approches complémentaires d'analyse expérimentale, théorique de stabilité linéaire et numérique de simulation de la turbulence (DNS, LES) afin de couvrir l'ensemble des régimes de nombre de Reynolds $Re=U_0\delta/\nu$ depuis la transition à la turbulence jusqu'à des régimes pleinement développés et réalistes. Le nombre de Froude $Fr = U_0/N\delta$ du forçage gravitaire peut correspondre au régime de stabilité de la couche atmosphérique et permettre de critiquer les lois de similitude de Monin-Obukhov, à l'œuvre pour quantifier les effets relatifs de flottabilité sur la turbulence [4, 5]. Ces deux paramètres universels (Re , Fr) peuvent s'exprimer en fonction des conditions aux limites thermiques et orographiques (angle α de la pente, refroidissement en surface H_s , stratification thermique ambiante N) [7, 8, 22, 23]. Il s'agira de préciser les liens entre chacun de ces paramètres et les régimes de turbulence correspondant. La prise en compte de la vapeur d'eau sera limitée à son rôle de scalaire passif dans son couplage à la température et son influence sur le bilan de chaleur à la surface par changement de phase. On proposera des paramétrisations de la turbulence pertinentes pour ces couches limites gravitaires, validées sur la base des résultats expérimentaux et numériques avant d'être intégrées dans les modèles méso-échelle prédictifs. **Le savoir-faire acquis dans ce projet pourra bénéficier à l'étude de solutions pratiques de lutte contre les gelées radiatives en coteau, en particulier au niveau local dans les vergers de Savoie concernés par l'étude *in situ*.**

Questions de recherche à approfondir — (i) Le mélange turbulent dans les jets catabatiques agit-il comme un catalyseur ou un inhibiteur du processus de gelée? (ii) Comment se traduisent les régimes critiques de transition à la turbulence (Re , Fr) en terme de forçage thermique à la surface et de stratification ambiante (H_s , N)? (iii) Quel est la sensibilité du mélange à l'orographie, la canopée et la rugosité de surface? (iv) Quel peut être le rôle de la vapeur d'eau pour réduire les échanges radiatifs?

Positionnement sur la scène locale, nationale et internationale — Le LEGI est le seul laboratoire de l'UGA à pouvoir proposer une expertise en mécanique des fluides avancée et turbulence sur l'étude des écoulements gravitaires en coteau et leur couplage avec le refroidissement radiatif nocturne en surface. L'équipe MEIGE a une longue expérience d'observation de la turbulence dans les vents catabatiques sur pente alpine dans le massif de Belledonne (campagnes *in situ* en février 2012, Avril 2015, février 2019, février 2023) dans le cadre de 2 thèses (S. Blein 2016, C. Charrondière 2021). Cette expertise s'est appuyée dans un premier temps sur des collaborations au sein de l'OSUG avec les équipes d'observation de l'IGE (J.M Cohard, J.E. Sicart) puis les activités se sont recentrées sur l'analyse de la turbulence dans la couche de surface avec des moyens d'étude transposés du laboratoire vers le terrain (soufflerie de laboratoire vs soufflerie naturelle *in situ*). L'équipe MEIGE est en contact avec les principales équipes européennes spécialisées dans l'étude de la physique de l'atmosphère et ses applications aux vents thermiques (vents catabatiques nocturnes et vents anabatiques diurnes). Dans le cadre d'un projet collaboratif d'observation de la météorologie de montagne dans les alpes européennes (TEAMx 2025), l'équipe MEIGE interagit avec l'équipe d'Ivana Stiperski à l'université d'Innsbruck et l'équipe de Dino Zardi à l'université de Trento, toutes deux spécialisées dans la physique et la turbulence de l'atmosphère en milieu alpin [13, 19, 20]. Ces deux équipes sont reconnues pour leurs travaux sur l'impact sociétal des vents thermiques en vallée, en particulier sur les questions de qualité de l'air et de résilience de la viticulture et de l'arboriculture en vallée préalpine et alpine. L'équipe MEIGE a également des liens étroits avec le CNRM Météo-France et le LAERO Toulouse dans le cadre de collaborations visant à développer des modèles numériques de surface réalistes en milieu alpin, couplés aux modèles de météorologie régionale (SURFEX et MESO-NH).

3. Moyens disponibles

Financements Actuels sur des thématiques similaires :

- projet INSU LEFE COCAINN 2024-2026 (Mesures *in situ* dans la vallée d'Innsbruck, Autriche, dans le cadre du projet TeamX) : 30k€
- projet LABEX OSUG2020 CANDI 2025-2027 (Profilage de la couche limite turbulente dans le vent Anabatique dans la vallée de l'ADlge, Italie, dans le cadre du projet TeamX) : 26 k€
- contrat d'accompagnement de thèse UGA projet exploratoire 2026-2029 : 5k€

Moyens humains :

- équivalent d'un temps plein : 3 EC, 3 IR + 2 stagiaires M1/M2

instrumentation *in situ* :

- 2 sondes Pitot 3D à haute fréquence (1.5 KHz) + système de déplacement micrométrique + 8 thermocouples + 1 anémomètre sonique 3D CSAT3B + 1 analyseur de gaz Irgason (prêt OSUG/IGE)
- 1 sonde IR120 de rayonnement LW + 1 sonde CNR2 de rayonnement net LW & SW : Température & bilan net radiatif en surface + 1 station météo (température, humidité, pression, vitesse)
- 1 ballon captif, logistique treuil+ Helium, NOTAM à 600m (LEGI), sonde emportée sous ballon (développée LEGI/IGE) : Arduino 1s, capteurs de température, humidité, pression, anémomètre 2D

4. Programme scientifique / méthodologie / résultats escomptés

Le projet de recherche présent s'articule avec le **projet de création d'une Mono-équipe au sein du LEGI** sur la **thématique du mélange turbulent dans les processus de gelée radiative en coteau** (dépôt d'ANR PRME en phase 2). Il s'agit de regrouper un ensemble d'expertises complémentaires (observation *in situ*, expérimentation en laboratoire, analyse de stabilité théorique et modélisation numérique HPC) **portées par 3 enseignants chercheurs et chercheurs du LEGI (CB, EN & GB)**. Deux d'entre eux (CB & EN) seront co-directeurs du contrat doctoral IRGA présent centré sur les aspects d'expérimentation *in situ*.

Méthodologie — (i) **L'observation *in situ*** est la première étape vers l'analyse physique des phénomènes [2] y compris concernant les propriétés de la turbulence dans les vents catabatiques [9]. Les vents de pente dans les coteaux en épisode nocturne de gelée génèrent des couches limites fortement turbulentes ($Re \sim 10^5$), justifiant que l'étude couvre l'ensemble des régimes de transition à la turbulence jusqu'à des régimes turbulents pleinement développés. On étudiera ***in situ* dans les vergers (T2.1, T3.3)** et **en soufflerie naturelle sur pente alpine (T1.1, T3.3)** les processus thermiques et dynamiques à l'œuvre dans des situations nocturnes de gelée radiative en présence de vent catabatique induit. Ces études expérimentales seront couplées à des approches numériques de modélisation de la turbulence et théoriques de caractérisation du taux de croissance des instabilités. (ii) L'**analyse de stabilité hydrodynamique et thermique** [7, 10] fournira une compréhension détaillée des phénomènes qui génèrent la turbulence en fonction des paramètres adimensionnels caractérisant les processus thermiques, gravitaires [11] et dynamiques (T1.2, T3.1) en régime de bas nombre de Reynolds. (iii) Pour les régimes non-linéaires de plus haut nombre de Reynolds, **la simulation numérique DNS et LES** [7, 12] permettra d'analyser les processus de mélange turbulent susceptibles de contrer le refroidissement à l'œuvre dans ces épisodes (T1.3, T3.2). (iv) La **modélisation numérique régionale** sur terrain réel devient accessible avec l'utilisation du calcul intensif HPC couplé à des paramétrisations de la turbulence à petite échelle et à des modèles de paroi [24]. Cette partie permettra de replacer l'étude des processus catabatiques dans le contexte réaliste de prévision des épisodes de gelée *in situ* (T2.2). (v) On s'intéressera à des situations de **couche limite sèche (WP1, WP2)** avant de généraliser l'étude aux **effets d'humidité spécifique (WP3)** dans l'évolution de température virtuelle et la redistribution du bilan radiatif R_n en flux turbulent de chaleur sensible H_s et chaleur latente LE . On analysera aussi la capacité du brouillard de vapeur d'eau à réduire le transfert radiatif par altération de l'émissivité du mélange d'air (voir schéma). Dans l'ensemble, les approches de modélisation numérique et d'expérimentation en soufflerie naturelle offriront des conditions contrôlées des processus plus difficiles à assurer en terrain réel. La modélisation numérique permettra par ailleurs une description spatiale précise des phénomènes, complémentaire de la description fine temporelle assurée par les mesures *in situ* en un point. C'est la mise en œuvre de **l'ensemble des ces approches (théorique, numérique, expérimentale), généralement utilisées séparément dans la littérature, qui offrira une compréhension systématique des processus** pour tous les régimes d'écoulement à la fois dans l'espace et dans le temps.

Programme scientifique —

WP1. Processus thermiques et dynamiques fondamentaux dans le jet catabatique — **T1.1 Mesure de turbulence en soufflerie naturelle (C.B. + PHD)** Le LEGI a une décennie d'expérience de mesures *in situ* de turbulence atmosphérique [8, 9]. La zone d'étude, sur une pente alpine régulière du massif de Belledonne, est le siège de vents catabatiques nocturnes suffisamment homogènes pour constituer une **soufflerie gravitaire naturelle** idéale pour les processus. Les dernières campagnes d'observation [13, 25] constituent une **preuve de concept** de transposition *in situ* de l'instrumentation fine du laboratoire. **T1.2 Stabilité thermo-hydrodynamique du jet catabatique (E.N.)** L'analyse par stabilité linéaire de couches limites stratifiées stablement en température a été largement traitée sur sol plat, mais pas dans le cas de pente où des régimes spécifiques de stabilité apparaissent du fait du caractère oblique des directions de gravité et de cisaillement [7]. On généralisera cette étude (T1.1) y compris en régime turbulent [15]. **T1.3 DNS et LES de vent catabatique en géométrie idéale (G.B.)** La simulation numérique du jet catabatique sur pente à Reynolds réaliste est une entreprise complexe car la dynamique du vent gravitaire est initiée par flottabilité à partir d'un état au repos. L'état de l'art est limité à des DNS sur paroi lisse infinie de couche limite à l'équilibre [7] ce qui inhibe la transition à la turbulence en paroi et constitue un **verrou technique** [26]. On effectuera des simulations à haute résolution avec le code YALES2 parallèle, co-développé au LEGI [14, 15].

WP2. Rôle du vent catabatique dans les gelées printanières — **T2.1 Observations in situ dans les vergers de Savoie. (C.B + PHD)** Le cœur du projet consiste en une campagne de mesures *in situ* en situation de gelée radiative nocturne sur les coteaux d'un verger de pommes au pied du massif des Bauges. **Les principes de base décrivant le processus ont été observés** (stages M1 2019-2021). Il s'agira de mesures déclenchées sur alerte météorologique. **La base de donnée** générée sera valorisée sur un **serveur de type Zenodo** [16] **T2.2. Modélisation numérique réaliste à l'échelle régionale. (C.B.)** Le bilan radiatif en surface R_n et sa redistribution en flux de chaleur H_s sont fortement contraints par le cycle diurne et l'orographie locale des coteaux. On reproduira par **modélisation numérique HPC meso-échelle** des épisodes de gelée récents avec le modèle MesoNH (CNRM Météo-France).

WP3. Couplage avec un nuage de vapeur d'eau — **T3.1 Stabilité linéaire avec humidité spécifique. (E.N.)** En présence de nuage de vapeur, l'**humidité spécifique** q est une mesure de la fraction de mélange de vapeur d'eau dans l'air [4]. Elle contribue à augmenter la température virtuelle de l'air par rapport à la température de l'air sec. On reprendra ici l'étude de stabilité T1.2 en linéarisant l'équation de transport de q pour étudier son interaction avec la transition à la turbulence du jet catabatique. **T3.2 DNS et LES d'un système couplé avec 2 scalaires. (G.B.)** L'humidité spécifique q se comporte comme un scalaire passif diffusif [4]. On modélisera la **diffusion de nuages de vapeur d'eau** dans un jet catabatique sur pente. **T3.3 Campagne d'observation en soufflerie gravitaire naturelle. (C.B. + PHD)** On modifiera le bilan radiatif en surface et sa redistribution en chaleur (R_n vs LE et H_s) en générant un nuage artificiel de vapeur d'eau. On mesurera la capacité des nuages à réduire le rayonnement infrarouge échangé avec la surface froide (**émissivité**). Ce sous-projet présente des risques en terme d'**efficacité d'atténuation radiative**; C'est un **verrou technologique** à lever qui pourrait permettre de proposer *in fine* des moyens de lutte plus efficace contre les gelées radiatives [27].

5. Organisation du projet : échancier, personnel impliqué, partenariats

Echéancier envisagé sur la durée du projet :

	S2 2026	S1 2027	S2 2027	S1 2028	S2 2028	S1 2029
Mesures in situ		Fev Belledonne		Avril Savoie		Fev Belledonne avril Savoie
Modélisation numérique & analyse de stabilité	YALES 2 HPC		MesoNH HPC		Stabilité hydrodynamique	YALES 2 MesoNH
Solutions in situ		Mélange passif muret & haies		Mélange passif muret & haies		Blocage radiatif injection vapeur

Doctorant	bibliographie	encadrement Master M2	Analyse data	encadrement Master M1	Analyse data	réduction du mémoire
-----------	---------------	--------------------------	-----------------	--------------------------	--------------	-------------------------

Partenariat équipe — *Coordinateur scientifique* — **C. Brun** (LEGI/MEIGE, MCF, 80%) sera le coordinateur scientifique. Il est expert des vents catabatiques sur forte pente alpine et en maîtrise les approches expérimentales de terrain [8, 9, 13, 16] ainsi que la modélisation numérique LES des processus turbulents à fine échelle [12, 15]. Il a une longue expérience de la turbulence dans le domaine géophysique aussi bien que celui de l'ingénierie. Il est responsable d'un master de turbulence à l'UGA Grenoble, transversal aux domaines de la physique, de la mécanique des fluides et des mathématiques appliquées. **Partenaires et complémentarité** — Le consortium regroupe un ensemble d'experts spécialistes d'**approches complémentaires et dont la synergie permettra de lever des verrous scientifiques associés aux processus de gelée radiative** en coteau. **E. Negretti** (LEGI/MEIGE, DR, 40%) sera en charge de l'étude théorique analytique des écoulements gravitaires et de stabilité linéaire à bas Reynolds et en transition à la turbulence. Elle est experte en mécanique de fluides fondamentale en particulier en milieu stratifié sur les courants gravitaires [11] et a une base solide pour l'analyse de stabilité en milieu stratifié [10, 15]. **G. Balarac** (LEGI/MoST, Pr, 40%) sera en charge des simulation numériques de la turbulence (DNS, LES) pour l'étude des processus. Il est l'un des principaux développeurs du code YALES2 [14] qu'il applique dans un contexte de calcul HPC pour l'étude de processus fondamentaux [15]. Ces 3 chercheurs partagent des collaborations scientifiques depuis 10 à 15 ans dans le domaine de la modélisation sous-maille de la turbulence [17] et de l'analyse croisée de données expérimentales de laboratoire vs *in situ*. [8, 11, 13, 16]. Ils ont co-encadré la thèse de J. Dagaut (2021) sur les effets de courbure en couche limite turbulente [15, 18]. **E.N.** et **C.B.** ont co-organisé l'Euromech Colloquium 608 Dynamics of gravity currents à Grenoble (2019). **E.N.** a également participé aux campagnes d'observation de la couche limite atmosphérique en milieu alpin organisées par **C.B.** dans le cadre du projet collaboratif TEAMx 2024-2025 [13]. Enfin **G.B.**, **E.N.** & **C.B.** participent depuis plus de 5 ans à la structuration du M2 TMA de l'UGA Grenoble dédié à la turbulence sur des aspects théoriques, expérimentaux et numériques. L'équipe sera complétée par des **experts en technique instrumentale et numérique** du LEGI : M. Lagauzère (IR instrumentation, 10%), C. Bonamy (IR HPC MesoNH, 5%), P. Begou (IR HPC YALES2, 5%).

Recrutement : 1 doctorant sur le projet IRGA présent pour la partie expérimentale *in situ* (T1.1, T2.1, T3.3)

ANR PRME associée : 1 doctorant pour la partie numérique processus DNS/LES (T1.3, T3.2) et la partie analytique instabilités hydrodynamiques (T1.2, T3.1); 2 étudiants en stage master M2 pour la partie numérique de modélisation *in situ* (T2.2) et d'analyse de données expérimentales *in situ* (T2.1).

partenariats et collaborations *in situ* :

- technicien de coordination (N. Drouzy) de la chambre d'agriculture Mont Blanc Savoie
- SCEA de la Ferme du coteau (C. Raucaz) pour la mise en œuvre des mesures *in situ* en vergers

plan de mise en œuvre pratique :

La campagne de mesure *in situ* constituera le coeur du projet doctoral et sera menée chaque printemps sur alerte météorologique sur les coteaux de Savoie au milieu des vergers de l'arboriculteur impliqué dans le projet. Elle consistera en des mesures météo et de turbulence. Elle sera couplée à des mesures de profil de température et vitesse à l'échelle de la vallée par ballon captif. Une série de campagne hivernale sera prévue en soufflerie naturelle sur les pentes alpines dans le massif de Belledonne afin de mettre en situation de vent catabatique et de fort refroidissement radiatif en surface les systèmes passifs de lutte contre les gelées et les nébulisateurs de vapeur d'eau. Le LEGI dispose de l'ensemble des sondes de mesure, les projets en cours (INSU LEFE & LABEX OSUG2020) ayant permis d'en acquérir d'autres nécessaires pour finaliser l'étude. Les étudiants de master M1/M2 seront issus d'une des formations en turbulence et géophysique de l'atmosphère de l'UGA (M2 TMA, M2 EFM, M2 STPE). Ils effectueront la partie numérique de la modélisation des gelées en reproduisant les épisodes de 2017-2022 puis 2027-2029. Ils participeront également aux campagnes de mesure, au développement de solutions technologiques.

Essaimage et valorisation du projet : Au delà du projet de recherche à 3 ans, on envisagera l'implantation d'une ou plusieurs des solutions dans les vergers de la SCEA la ferme du coteau, puis l'essaimage des dispositifs vers la filière fruit de Savoie via la chambre d'agriculture Mont-blanc Savoie. Les degrés de mise en pratique ne sont pas les mêmes pour chaque système. L'utilisation de murets et haies constituera une solution passive librement utilisable par les arboriculteurs et viticulteurs de Savoie et d'ailleurs mais nécessitera des études amonts supplémentaires à proposer dans le cadre d'appels à projets plus conséquents de l'ANR PRME ou de l'ERC. Cette étude servira donc d'effet de levier pour accompagner un projet de plus grande envergure. Enfin la solution la plus efficace en terme de protection contre le refroidissement radiatif, mais dont la mise en œuvre est encore seulement prospective, est basée sur la génération de nuage de vapeur d'eau au sein du verger. Si ça faisabilité est confirmée par cette étude, ce choix est d'avantage compatible avec une réduction de nuisances par rapport à d'autres choix de brouillards synthétiques tels que fumées ou particules chimiques opaques.

Stratégie de communication : conférences en Europe ICAM 2027, EGU 2028, ICAM 2029 - publications de rang A ciblées : JFM, PRF, BLM, JAS, JGR - base de data ouverte sur serveur Zenodo

6. Bibliographie (*publications de l'équipe en gris*)

- [1] Boeke et al. Energy exchange during the operation of a ventilator for frost protection. EGU (2022)
- [2] Everard et al., Turbulent heat exchange in nocturnal flow on a sloped vineyard. BLM 175:1 (2020)
- [3] Mauder et al., Surface-Energy-Balance closure over Land: A Review. BLM 177, 395-426 (2020).
- [4] Wyngaard, Turbulence in the Atmosphere (2010)
- [5] Mahrt, Stably Stratified Atmospheric Boundary Layers, Annu. Rev. Fluid Mech. 46:23-45 (2014)
- [6] Horst & Doran, The turbulence structure of nocturnal slope flow. JAS 45(4) :605-616 (1988)
- [7] Xiao & Senocak, Stability of the Prandtl model for katabatic slope flows. JFM 865 (2019)
- [8] Charrondière, **Brun** et al., Katabatic Winds over Steep Slopes: Overview... BLM 182, 29-54(2022)
- [9] Charrondière, **Brun** et al., Mean flow structure of katabatic winds... JFM 941:A11 (2022)
- [10] **Negretti** & Billant., Stability of a Gaussian pancake vortex in a stratified fluid. JFM 718:457 (2013)
- [11] Maggi, **Negretti** et al., Turbulence characteristics... of gravity currents. POF 35:1 (2023)
- [12] **Brun** et al., LES of a katabatic jet along a Convexly Curved Slope... JAS 74(12), 4047-4073 (2017)
- [13] **Brun**, **Negretti** et al. Mesures de couche limite gravitaire sur pente alpine, 26eme CFM (2025)
- [14] Grenouilloux, **Balarac** et al., Toward the use of LES: automatic mesh definition. JOT 6:280 (2023)
- [15] Dagaut, **Negretti**, **Balarac** & **Brun**, Linear to turbulent Görtler instability transition. POF 33 (2021)
- [16] **Brun** et al., Data from a field experiment 2019 on katabatic winds. [Data set] Zenodo (2022)
- [17] **Brun**, **Balarac** et al., Effects of diffusion on the SGS modeling of passive scalars. POF 20:2 (2008)
- [18] Dagaut, **Balarac**, **Negretti**, & **Brun**, Transition to turbulence in Görtler flows, 17th ETC (2019)
- [19] Stiperski, **Brun**, Zardi, et al., Open questions in atmospheric turbulence: A synthesis from the centenary workshop "100 years of turbulence: Innsbruck 1922 -2022". JEMS 3/100022 (2025)
- [20] Farina, Zardi, Understanding Thermally Driven Slope Winds: Recent Advances and Open Questions. Boundary-Layer Meteorol 189, 5-52 (2023).
- [21] Brunet, Turbulent Flow in Plant Canopies. BLM 177, 315-364 (2020)
- [22] Shapiro & Fedorovich, A boundary-layer scaling for turbulent katabatic flow. BLM 153,1 (2014)
- [23] Giometto et al., Direct numerical simulation of turbulent slope flows. JFM 829:589-620 (2017)
- [24] Ma et al., An advanced ML canopy model to simulate canopy flows. JA Model Earth Syst (2019)
- [25] Brun et al., Turbulent boundary layer measurements near the surface. EMS EMS2024-616 (2024)
- [26] Schlatter & Örlü, Assessment of DNS data of turbulent boundary layers. JFM. 659:116 (2010)
- [27] Bai & Meneveau, Turbulent flow downstream of a fractal tree-like object. BLM 143:285 (2012)